

Optimasi Pemilihan Model Girder Pada Jembatan dengan Desain *Post-Tension* Berdasarkan Kinerja Struktur

Optimization Of Girder Model Selection in Post-Tensioned Bridges Based on Structural Performance

Puti Annisa Aulia¹, Reni Suryanita², Alex Kurniawandy³

Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

Article Info

Article history:

Received 19, June, 2025

Revised 28, July, 2025

Accepted October 1, 2025

Kata Kunci:

Girder beton prategang

Jembatan beton

PCI girder

PCU girder

Post-tension

Optimasi girder

Abstrak

Perkembangan infrastruktur transportasi menuntut pemilihan elemen struktural jembatan yang efisien dan andal, khususnya pada sistem girder beton prategang *post-tension*. Penelitian bertujuan untuk mengoptimalkan pemilihan model girder melalui perbandingan kinerja struktur antara girder tipe *precast concrete I* (PCI) dan *precast concrete U* (PCU). Analisis dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif dengan pemodelan struktur pada perangkat lunak MIDAS Civil yang divalidasi melalui perhitungan manual berdasarkan Standar Nasional Indonesia. Variasi bentang yang dianalisis meliputi 25,80 m, 30,80 m, 35,80 m, dan 40,80 m dengan mutu beton K-600. Variabel yang ditinjau mencakup tinggi girder, kehilangan gaya prategang, tegangan beton pada kondisi transfer dan kondisi layan, kapasitas momen lentur, lendutan, serta kebutuhan material berupa volume beton, jumlah tendon, dan *strand*. Kriteria optimasi ditentukan berdasarkan kemampuan girder dalam mencapai kapasitas momen maksimum dengan tinggi penampang minimum serta tetap memenuhi batas tegangan dan lendutan yang disyaratkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa girder PCU secara konsisten memiliki kapasitas momen yang lebih besar dibandingkan dengan girder PCI pada bentang yang sama, dengan peningkatan berkisar antara 11% hingga 22%. Selain itu, PCU girder menunjukkan kehilangan gaya prategang yang lebih kecil dan mampu mencapai kapasitas penampang maksimum dengan tinggi girder yang lebih rendah dibandingkan dengan PCI girder. Namun demikian, PCU girder memerlukan volume beton dan jumlah tendon yang lebih besar. Seluruh model girder memenuhi persyaratan tegangan dan lendutan sesuai standar. Berdasarkan hasil tersebut, girder PCU direkomendasikan sebagai alternatif yang lebih optimal apabila perencanaan jembatan difokuskan pada efisiensi struktural dan kapasitas momen maksimum, sedangkan girder PCI tetap layak digunakan pada perencanaan yang mengutamakan efisiensi material.

Abstract

The advancement of construction technology demands efficiency and effectiveness in selecting structural elements, including in prestressed bridge structures. This study explores the optimization of girder model selection in post-tensioned bridge systems by comparing precast concrete I (PCI) and precast concrete U (PCU) girders. The analysis was conducted using a comparative quantitative approach through structural modeling with MIDAS

Keywords:

Prestressed concrete girder

Concrete bridge

PCI girder

PCU girder

Post-tension

Girder optimization

Civil and manual calculations based on Indonesian National Standards (SNI). The span variations studied were 25,80 m, 30,80 m, 35,80 m, and 40,80 m, using K-600 grade concrete. Analytical parameters included girder height, stress at transfer and service stages, moment capacity, prestress loss, deflection, and material requirements (concrete volume, tendons, and strands). The results indicate that PCU girders consistently achieved maximum capacity (100%) with lower cross-sectional height compared to PCI girders, which reached only 82%–90% capacity for the same spans. Prestress loss was also found to be greater in PCI girders, indicating less efficient stress distribution compared to PCU girders. However, PCU girders required more concrete, tendons, and strands than PCI girders. Therefore, the selection of girder type should consider a trade-off between structural efficiency and material usage. All models met the allowable limits for deflection and stress.

Corresponding Author: Suryanita, reni.suryanita@eng.unri.ac.id

A. PENDAHULUAN

Beton prategang merupakan teknologi yang banyak diterapkan pada konstruksi jembatan karena keunggulannya dalam menahan beban besar dan efisiensi struktural, terutama untuk bentang panjang. Salah satu bentuk penerapannya adalah penggunaan girder pracetak tipe *precast concrete I* (PCI) dan *precast concrete U* (PCU) yang umum digunakan di Indonesia. Analisis tegangan pada balok prategang perlu ditinjau dalam dua kondisi, yaitu kondisi transfer dan kondisi layan (*service*), yang masing-masing mempertimbangkan distribusi gaya prategang serta kehilangan gaya akibat waktu (*time dependent losses*) (Leo & Agung, 2017). Meskipun PCI girder unggul dalam kemudahan fabrikasi dan efisiensi material, PCU girder dinilai lebih stabil terhadap momen puntir. Oleh karena itu, pemilihan tipe girder harus mempertimbangkan banyak faktor seperti kapasitas momen, lendutan, tegangan, kehilangan gaya prategang serta efisiensi penggunaan tendon dan volume beton.

Penelitian bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan performa struktur girder PCI dan PCU girder dengan sistem prategang pasca tarik (*post tension*) pada berbagai

bentang, yaitu 25,80 m, 30,80 m, 35,80 m dan 40,80 m, mengguakan mutu beton K-600 dan *strand* 12,7 mm. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MIDAS Civil dan perhitungan manual mengacu pada standar SNI, sebagai dasar rekomendasi desain girder yang optimal dan efisien untuk aplikasi jembatan prategang di Indonesia

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Beton Prategang

Beton prategang adalah beton bertulang dimana tegangan dalam diberikan untuk mereduksi tegangan tarik potensial dalam beton yang dihasilkan dari beban, dan untuk pelat dua arah menggunakan dengan sekurang-kurangnya tulangan minimum prategang (SNI 2847:2019). Pada struktur dengan bentangan yang panjang, struktur beton bertulang biasanya tidak cukup untuk menahan tegangan lentur sehingga akan terjadi retak di daerah yang mempunyai tegangan lentur, geser atau puntir yang tinggi. Untuk mengatasi keretakan tersebut maka dilakukan penegangan pada struktur beton bertulang tersebut. Dalam pemberian tegangan pada beton prategang dikenal dengan 2 (dua) metode cara yang berbeda. Kedua metode

tersebut membedakan sistem prategang yaitu pra-tarik (*pre-tension*) atau pascatarik (*post-tension*) (Richarlim, 2020). Pemberian gaya prategang pada girder dengan menggunakan metode pascatarik dapat menyebabkan terjadinya beberapa kehilangan prategang pada girder yaitu *immediate elastic losses dan time dependent losses* (Side, 2020).

2. Beton Mutu Tinggi

Sesuai dengan perkembangan teknologi beton yang demikian pesat, ternyata kriteria beton mutu tinggi juga selalu berubah sesuai dengan kemajuan tingkat mutu yang berhasil dicapai. Pada tahun 1950an, beton dengan kuat tekan 30 MPa sudah dikategorikan sebagai beton mutu tinggi. Pada tahun 1960an hingga awal 1970an, kriterianya lebih lazim menjadi 40 MPa. Saat ini, disebut mutu tinggi untuk kuat tekan di atas 50 MPa, dan 80 MPa sebagai beton mutu sangat tinggi, sedangkan 120 MPa bisa dikategorikan sebagai beton bermutu ultra tinggi (Tumpu & Rangan, 2020).

3. Baja Mutu Tinggi

Baja mutu tinggi digunakan untuk beban layan yang tinggi, penggunaan baja tulangan (*tendon*) dan beton yang kuat akan lebih efektif dan efisien. Hanya baja dengan tegangan leleh tinggi yang cocok untuk beton prategang. Penggunaan baja tulangan berkualitas tinggi tidak hanya menguntungkan, tetapi juga merupakan kebutuhan. Prategang menghasilkan elemen yang lebih ringan, bentang yang lebih besar, dan pemasangan yang lebih ekonomis dibandingkan dengan beton bertulang standar.

Ada 3 (tiga) macam baja (*tendon*) yang digunakan untuk beton prategang, antara lain:

- Kawat tunggal (*wires*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang yang sistem pratarik (*pre-tension*)

- Kawat untai (*strand*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pascatarik (*post-tension*). PC strand/KBJP-P7 merupakan gabungan kawat-kawat baja yang dihasilkan dari batang kawat baja diproses tarik dingin (*cold wire drawing*) sebanyak tujuh batang dipilin, kemudian dihilangkan sisa tegangannya dengan proses perlakuan panas (*stress relieving*) secara kontinyu untuk mencapai sifat mekanis sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan dan digunakan pada konstruksi beton prategang (SNI 1154:2016).
- Kawat batang (*bar*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pratarik (*pre-tension*)

4. Tegangan Izin di Beton dan Tendon

Tegangan izin di beton terdiri dari :

- Tegangan beton izin saat transfer gaya prategang.
Tegangan beton pada tahapan ini disebabkan berat sendiri komponen struktur dan gaya prategang dikurangi kehilangan tegangan akibat angkur set, dan perpendekan elastis beton (SNI 2847:2019). Susut, rangkai dan relaksasi tidak diperhitungkan pada tahap ini. Tegangan ini berlaku untuk sistem prategang pratarik maupun pascatarik dengan penyesuaian kehilangan tegangan yang sesuai saat transfer gaya prategang. Batasan tegangan tekan dan tarik beton dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Batasan tegangan tekan beton sesaat setelah transfer gaya prategang

Lokasi	Tegangan Tekan Izin
Ujung dari balok tumpuan sederhana	0,70 fci'
Semua lokasi lainnya	0,60 fci'

(Sumber: SNI 1725:2016)

Tabel 2. Batasan tegangan tarik beton sesaat setelah transfer gaya prategang, tanpa penambahan tulangan lekat di daerah tarik

Lokasi	Tegangan Tarik Izin
Ujung dari balok tumpuan sederhana	$0,50\sqrt{f_c}$
Semua lokasi lainnya	$0,25\sqrt{f_c}$

(Sumber: SNI 1725:2016)

- b. Tegangan tekan beton izin pada kondisi beban layan
Batasan tegangan tekan saat beban layan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Batasan tegangan tekan beton saat beban layan

Lokasi	Tegangan Tekan Izin
Prategang + beban tetap	$0,45 f_c'$
Prategang + beban total	$0,60 f_c'$

(Sumber: SNI 1725:2016)

5. Jembatan Prategang

Jembatan beton prategang adalah jembatan yang menggunakan konstruksi beton yang memanfaatkan pemakaian bahan dengan kekuatan yang lebih tinggi dan penggunaan mutu baja tinggi untuk mengantisipasi serat tegangan tarik yang terjadi pada gelagar jembatan (Iqbaliah, dkk., 2021).

6. Pembebanan Pada Jembatan

Pembebanan pada jembatan terdiri dari :

a. Beban permanen

Terdiri dari berat sendiri (MS) dan beban mati tambahan (MA). Berat sendiri adalah berat bagian tersebut dan elemen-elemen struktural lain yang dipikulnya, termasuk berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan bagian struktural, ditambah dengan nonstruktural yang dianggap tetap. Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu

beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan.

b. Beban lalu lintas

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri dari beban lajur D dan beban truk T. Beban lajur D adalah beban yang bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Untuk jumlah total beban lajur D yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri (SNI 1725:2016).

7. Kehilangan Prategang

Kehilangan gaya prategang itu adalah berkurangnya gaya yang bekerja pada tendon pada tahap-tahap pembebanan (Tumpu & Rangan, 2020). Secara umum kehilangan gaya prategang dapat dijelaskan sebagai berikut :

a. Immediate elastic losses

Immediate elastic losses merupakan kehilangan gaya prategang langsung atau segera setelah beton diberi gaya prategang. Kehilangan gaya prategang secara langsung ini disebabkan oleh:

- 1) Perpendekan elastis beton.
- 2) Kehilangan akibat friksi atau geseran sepanjang kelengkungan dari tendon, ini terjadi pada beton prategang dengan sistem *post tension*.
- 3) Kehilangan pada sistem angkur, antara lain akibat slip diangkur

b. Time dependent losses

Time dependent losses merupakan kehilangan gaya prategang akibat dari pengaruh waktu, yang mana hal ini disebabkan:

- 1) Rangkak (*creep*) dan susut pada beton.
- 2) Pengaruh temperatur.
- 3) Relaksasi baja prategang.

Pada dasarnya nilai masing-masing kehilangan gaya prategang adalah kecil, tetapi apabila dijumlahkan dapat menyebabkan penurunan gaya *jacking* yang signifikan, yaitu $\pm 15\% - 25\%$, sehingga kehilangan gaya prategang harus dipertimbangkan.

C. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode komparatif untuk membandingkan dua jenis girder, yaitu PCI girder dan PCU girder. Pendekatan kuantitatif dipilih karena bersandar pada filsafat positivisme yang bertujuan untuk menguji dan membuktikan hipotesis secara objektif melalui pengukuran dan analisis statistik (Mulyadi, 2013). Metode komparatif digunakan agar data yang diperoleh dapat mencerminkan perbedaan variabel yang nyata tanpa manipulasi (Priadana & Sunarsi, 2021). Variabel yang dianalisis meliputi kapasitas momen, defleksi, tegangan transfer, tegangan *service*, kehilangan prategang, serta kebutuhan tendon dan strand masing-masing girder.

Penelitian dimulai dari pengumpulan data dan pemodelan penampang PCI dan PCU girder serta analisis pembebanan dan analisis struktur. Kemudian dilakukan pemeriksaan keamanan struktur dan perbandingan hasil desain dan optimasi pemilihan PCI dan PCU girder.

Data primer diperoleh langsung melalui pengukuran dan perhitungan pembebanan girder, sedangkan data sekunder berupa katalog produk, *shop drawing*, brosur *post-tension*, standar nasional Indonesia (SNI), dan referensi terkait dari perusahaan beton *precast* anak BUMN. Teknik pengumpulan data meliputi pengambilan dokumen dan katalog dari divisi *engineering* serta anak perusahaan BUMN terkait.

Pemodelan PCI dan PCU girder dilakukan menggunakan *software* MIDAS Civil untuk mendapatkan nilai-nilai tegangan, defleksi, kapasitas momen, dan kehilangan prategang. Analisis dilakukan secara sistematis sesuai tahapan yang telah direncanakan untuk menghasilkan perbandingan yang valid dan akurat.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Perencanaan

Untuk menganalisis optimasi pemilihan model girder pada jembatan dengan desain *post-tension*, maka di dalam studi ini menggunakan data beberapa bentang girder dengan panjang 25,80 m, 30,80 m, 35,80 m dan 40,80 m dengan masing-masing girder memiliki tinggi girder yang berbeda-beda. Analisis PCI dan PCU girder menggunakan program MIDAS Civil dan Microsoft Excel.

Spesifikasi material pada penelitian yaitu :

a. Beton

Mutu beton yang digunakan pada analisis PCI dan PCU girder menggunakan mutu beton K-600 atau setara dengan $f_c' 49,8$ MPa dan mutu beton yang digunakan pada plat menggunakan mutu beton K-300 atau setara dengan $f_c' 24,9$ MPa.

b. Baja prategang

Spesifikasi baja prategang yang digunakan dalam analisis perbandingan PCI dan PCU girder dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data baja prategang

Data <i>strand cable</i> (ASTM 2017)		
Tegangan leleh <i>strand</i> (fpy)	1580	MPa
Kuat tarik <i>strand</i> (fpu)	1860	MPa
Diameter nominal <i>strand</i>	12,7	mm
Luas penampang nominal satu <i>strand</i> (Ast)	98,71	mm ²
Modulus elastis <i>strand</i> (Es)	196000	MPa

c. Baja non prategang

Baja non prategang yang digunakan yaitu D13 mm dengan tegangan leleh baja yang digunakan $f_y = 420$ MPa. Tinggi penampang girder dapat dilihat pada Tabel 5.

memiliki hasil yang berbeda. Dari keempat bentang, kehilangan prategang yang lebih besar ada di PCI girder yang dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

2. Perhitungan Kehilangan Prategang

Pada analisis kehilangan tegangan pada masing-masing bentang PCI dan PCU girder akibat jangka pendek dan jangka panjang, kehilangan prategang

Tabel 5. Tinggi penampang girder pada masing-masing bentang

Bentang (m)	PCI (m)	PCU (m)
40,80	2,10	1,85
35,80	1,85	1,75
30,80	1,70	1,40
25,80	1,40	1,25

Tabel 6. Perbandingan kehilangan gaya prategang pada PCI dan PCU girder pada bentang 40,80 m dan 35,80 m

Kehilangan Gaya Prategang	40,8 m				35,8 m			
	PCI 210		PCU H 185		PCI 185		PCU 175	
Setelah penegangan	1395	100%	1395	100%	1395	100%	1395	100%
Kehilangan prategang								
Jangka pendek								
Δf_{pA}	40,12	2,88%	43,89	3,15%	48,76	3,50%	51,21	3,67%
Δf_{pF}	42,40	3,04%	33,46	2,40%	41,68	2,99%	33,93	2,43%
Δf_{pES}	61,48	4,41%	36,79	2,64%	59,58	4,27%	35,95	2,58%
fps	1251	89,68%	1280,86	91,82%	1244,98	89,25%	1273,90	91,32%
Jangka panjang								
Δf_{pCR}	50,96	3,65%	46,50	3,33%	49,84	3,57%	50,13	3,59%
Δf_{pSH}	74,18	5,32%	74,18	5,32%	74,18	5,32%	74,18	5,32%
Δf_{pR}	37,92	2,72%	41,86	3,00%	37,14	2,66%	40,93	2,93%
Tegangan akhir (fpe)	1087,94	77,99%	1118,32	80,17%	1083,82	77,69%	1108,66	79,47%
Kehilangan tegangan total (loss of prestress)	307,06	22,01%	276,68	19,83%	311,18	22,31%	286,34	20,53%

Tabel 7. Perbandingan kehilangan gaya prategang pada PCI dan PCU girder pada bentang 30,80 m dan 25,80 m

Kehilangan Gaya Prategang	30,8 m				25,8 m			
	PCI 170		PCU 140		PCI 170		PCU 140	
Setelah penegangan	1395	100%	1395	100%	1395	100%	1395	100%
Kehilangan prategang								
Jangka pendek								
Δf_{pA}	60,00	4,30%	60,39	4,33%	72,26	5,18%	71,72	5,14%
Δf_{pF}	37,23	2,67%	34,52	2,47%	33,89	2,43%	30,03	2,15%
Δf_{pES}	50,13	3,59%	36,97	2,65%	55,69	3,99%	35,44	2,54%
fps	1247,65	89,44%	1263,12	90,55%	1233,16	88,40%	1257,81	90,17%
Jangka panjang								
Δf_{pCR}	45,35	3,25%	56,53	4,05%	60,63	4,35%	45,93	3,29%
Δf_{pSH}	74,18	5,32%	74,18	5,32%	74,18	5,32%	74,18	5,32%
Δf_{pR}	37,48	2,69%	39,50	2,83%	35,63	2,55%	38,80	2,78%
Tegangan akhir (fpe)	1090,63	78,18%	1092,91	78,35%	1062,73	76,18%	1098,90	78,77%
Kehilangan tegangan total (loss of prestress)	304,37	21,82%	302,09	21,65%	332,27	23,82%	296,10	21,23%

3. Perhitungan Kebutuhan Volume Beton, Tendon, dan Strand

Hasil analisis didapatkan perbandingan kebutuhan volume beton pada PCI dan PCU girder dimasing-masing bentang yaitu bentang 40,80 m, 35,80 m, 30,80 m dan 25,80 m dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan kebutuhan volume beton pada PCI dan PCU girder

Bentang (m)	Tinggi Girder (cm)	Volume (m ³)
40,8	PCI 210	33,33
	PCU H 185	60,55
35,8	PCI 185	27,31
	PCU 175	51,42
30,8	PCI 170	22,60
	PCU 140	38,46
25,8	PCI 140	14,30
	PCU 120	29,00

Pada Tabel 8 dapat dilihat volume beton pada PCU girder dimasing-masing bentang lebih besar dari pada PCI girder. Pada perbandingan kebutuhan tendon dan *strand* pada PCI dan PCU girder dimasing-masing bentang yaitu bentang

40,80 m, 35,80 m, 30,80 m dan 25,80 m dapat dilihat pada Tabel 9.

Pada Tabel 9 dapat dilihat kebutuhan tendon dan *strand* pada PCU girder dimasing-masing bentang lebih banyak dibandingkan PCI girder.

Tabel 9. Perbandingan kebutuhan tendon dan *strand* pada PCI dan PCU girder

Bentang (m)	Tinggi Girder (cm)	Jumlah Tendon	Jumlah Strand
40,8	PCI 210	4	76
	PCU H 185	6	108
35,8	PCI 185	3	68
	PCU 175	6	98
30,8	PCI 170	3	57
	PCU 140	6	90
25,8	PCI 140	3	39
	PCU 120	4	50

4. Perhitungan Tegangan Saat Transfer

Dari hasil analisis, didapatkan perbandingan tegangan saat transfer pada PCI dan PCU girder, bisa dilihat pada Tabel 10 sampai dengan Tabel 13 untuk tegangan yang terjadi tidak melewati dari tegangan ijin yang sudah disyaratkan.

Tabel 10. Perbandingan tegangan saat transfer pada PCI dan PCU girder 40,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 210	T.girder	-12,48	20,89	-9,70	-1,28	1,63	Memenuhi
	B.girder	-12,48	-19,43	9,02	-22,88	-25,40	Memenuhi
PCU H 185	T.girder	-10,90	19,20	-14,43	-6,13	1,63	Memenuhi
	B.girder	-10,90	-17,40	13,08	-15,22	-25,40	Memenuhi

Tabel 11. Perbandingan tegangan saat transfer pada PCI dan PCU girder 35,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 185	T.girder	-11,90	19,82	-8,49	-0,58	1,63	Memenuhi
	B.girder	-11,90	-18,44	7,91	-22,44	-25,40	Memenuhi
PCU H 175	T.girder	-9,88	16,51	-11,76	-5,12	1,63	Memenuhi
	B.girder	-9,88	-14,91	10,62	-14,17	-25,40	Memenuhi

Tabel 12. Perbandingan tegangan saat transfer pada PCI dan PCU girder 30,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 170	T.girder	-10,44	16,58	-6,85	-0,71	1,63	Memenuhi
	B.girder	-10,44	-15,46	6,38	-19,51	-25,40	Memenuhi
PCU H 140	T.girder	-11,29	16,45	-11,31	-6,16	1,63	Memenuhi
	B.girder	-11,29	-14,66	10,08	-15,87	-25,40	Memenuhi

Tabel 13. Perbandingan tegangan saat transfer pada PCI dan PCU girder 25,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 140	T.girder	-13,07	16,39	-5,63	-2,31	1,63	Memenuhi
	B.girder	-13,07	-15,62	5,36	-23,33	-25,40	Memenuhi
PCU H 120	T.girder	-9,20	15,33	-9,44	-3,31	1,63	Memenuhi
	B.girder	-9,20	-13,55	8,34	-14,41	-25,40	Memenuhi

5. Perhitungan Tegangan Saat Konstruksi

Pada perbandingan tegangan saat konstruksi pada PCI dan PCU girder, bisa dilihat pada Tabel 14 sampai dengan Tabel 17 untuk tegangan yang terjadi tidak melewati dari tegangan ijin yang sudah disyaratkan.

6. Perhitungan Tegangan Saat Layan

Sesuai syarat tegangan ijin saat layan, pada serat atas tegangan ijin pada girder tidak boleh melebihi dari -22,41 MPa dan pada serat bawah tegangan ijin pada tidak boleh melebihi dari 3,53 MPa. Untuk perbandingan tegangan saat layan disajikan pada Tabel 18 sampai dengan Tabel 21.

Tabel 14. Perbandingan tegangan saat konstruksi pada PCI dan PCU girder 40,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 210	T.girder	-12,48	20,89	-19,38	-10,96	1,63	Memenuhi
	B.girder	-12,48	-19,43	18,02	-13,88	-25,40	Memenuhi
PCU H 185	T.girder	-10,90	19,20	-22,40	-14,10	1,63	Memenuhi
	B.girder	-10,90	-17,40	20,30	-7,99	-25,40	Memenuhi

Tabel 15. Perbandingan tegangan saat konstruksi pada PCI dan PCU girder 35,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 185	T.girder	-11,90	19,82	-17,54	-9,62	1,63	Memenuhi
	B.girder	-11,90	-18,44	16,33	-14,02	-25,40	Memenuhi
PCU H 175	T.girder	-9,88	16,51	-18,37	-11,74	1,63	Memenuhi
	B.girder	-9,88	-14,91	16,60	-8,19	-25,40	Memenuhi

Tabel 16. Perbandingan tegangan saat konstruksi pada PCI dan PCU girder 30,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 170	T.girder	-10,44	16,58	-14,47	-8,33	1,63	Memenuhi
	B.girder	-10,44	-15,46	13,49	-12,41	-25,40	Memenuhi
PCU H 140	T.girder	-11,29	16,45	-18,78	-13,63	1,63	Memenuhi
	B.girder	-11,29	-14,66	16,74	-9,21	-25,40	Memenuhi

Tabel 17. Perbandingan tegangan saat konstruksi pada PCI dan PCU girder 25,80 m

Tipe Girder	Lokasi	Pt/Ag (MPa)	Pt.emid/S (MPa)	Mk/Sa (MPa)	Total (MPa)	Teg. Ijin (MPa)	Keterangan
PCI H 140	T.girder	-13,07	16,39	-14,28	-10,96	1,63	Memenuhi
	B.girder	-13,07	-15,62	13,61	-15,08	-25,40	Memenuhi
PCU H 120	T.girder	-9,20	15,33	-16,38	-10,25	1,63	Memenuhi
	B.girder	-9,20	-13,55	14,48	-8,28	-25,40	Memenuhi

Tabel 18. Perbandingan tegangan saat *service* pada PCI dan PCU girder 40,80 m

Tipe Girder	Kombinasi Beban	Serat	Lokasi Momen di Sambungan (MPa)					
			0,4	4	8	12	16	20,4
PCI H 210	Layan I	Top	-9,06	-13,53	-17,27	-19,31	-20,24	-19,66
		Bottom	-11,45	-8,35	-5,78	-4,45	-3,91	-4,49
	Layan III	Top	-9,08	-13,03	-16,32	-18,06	-18,83	-18,19
		Bottom	-11,44	-8,71	-6,47	-5,35	-4,93	-5,55
	Ekstrim II	Top	-9,10	-12,37	-15,07	-16,43	-16,98	-16,26
		Bottom	-11,42	-9,19	-7,37	-6,53	-6,27	-6,94
PCU H 185	Layan I	Top	-6,64	-12,40	-17,15	-19,75	-21,49	-21,13
		Bottom	-10,49	-6,32	-2,91	-1,08	0,11	-0,26
	Layan III	Top	-6,63	-11,87	-16,17	-18,49	-20,01	-19,59
		Bottom	-10,50	-6,71	-3,64	-2,02	-0,98	-1,40
	Ekstrim II	Top	-6,61	-11,17	-14,87	-16,82	-18,07	-17,56
		Bottom	-10,51	-7,23	-4,60	-3,25	-2,42	-2,89

Tabel 19. Perbandingan tegangan saat *service* pada PCI dan PCU girder 35,80 m

Tipe Girder	Kombinasi Beban	Serat	Lokasi Momen di Sambungan (MPa)					
			0,4	2	7	10	14	17,9
PCI H 185	Layan I	Top	-9,07	-11,41	-16,69	-18,55	-19,36	-18,74
		Bottom	-10,61	-9,06	-5,61	-4,44	-4,03	-4,60
	Layan III	Top	-9,09	-11,13	-15,73	-17,31	-17,94	-17,26
		Bottom	-10,59	-9,25	-6,27	-5,29	-5,00	-5,62
	Ekstrim II	Top	-9,12	-10,76	-14,45	-15,64	-16,05	-15,29
		Bottom	-10,57	-9,50	-7,15	-6,44	-6,30	-6,97
PCU H 175	Layan I	Top	-7,22	-9,81	-15,82	-17,96	-20,09	-19,87
		Bottom	-9,16	-7,32	-3,10	-1,62	-0,18	-0,44
	Layan III	Top	-7,20	-9,54	-14,90	-16,76	-18,53	-18,18
		Bottom	-9,17	-7,52	-3,76	-2,49	-1,31	-1,66
	Ekstrim II	Top	-7,18	-9,18	-13,68	-15,15	-16,42	-15,90
		Bottom	-9,19	-7,78	-4,65	-3,66	-2,84	-3,31

Tabel 20. Perbandingan tegangan saat *service* pada PCI dan PCU girder 30,80 m

Tipe Girder	Kombinasi Beban	Serat	Lokasi Momen di Sambungan (MPa)					
			0,4	3	6	9	12	15,4
PCI H 170	Layan I	Top	-7,55	-11,28	-14,45	-16,45	-17,06	-16,68
		Bottom	-9,68	-7,29	-5,29	-4,07	-3,76	-4,12
	Layan III	Top	-7,57	-10,82	-13,56	-15,25	-15,74	-15,31
		Bottom	-9,67	-7,60	-5,88	-4,86	-4,63	-5,03
	Ekstrim II	Top	-7,60	-10,19	-12,36	-13,62	-13,97	-13,46
		Bottom	-9,65	-8,02	-6,68	-5,94	-5,81	-6,25
PCU H 140	Layan I	Top	-10,38	-14,86	-18,67	-20,62	-21,79	-21,59
		Bottom	-8,22	-5,33	-2,90	-1,70	-1,03	-1,26
	Layan III	Top	-10,36	-14,31	-17,63	-19,28	-20,18	-19,79
		Bottom	-8,23	-5,69	-3,59	-2,59	-2,09	-2,46
	Ekstrim II	Top	-10,34	-13,57	-16,22	-17,46	-18,01	-17,33
		Bottom	-8,24	-6,19	-4,52	-3,80	-3,52	-4,08

Tabel 21. Perbandingan tegangan saat *service* pada PCI dan PCU girder 25,80 m

Tipe Girder	Kombinasi Beban	Serat	Lokasi Momen di Sambungan (MPa)					
			0,4	3	6	9	12	15,4
PCI H 140	Layan I	Top	-10,51	-13,39	-17,36	-19,24	-19,90	-19,52
		Bottom	-11,16	-9,59	-7,47	-6,49	-6,25	-6,58
	Layan III	Top	-10,55	-13,00	-16,38	-17,94	-18,46	-18,02
		Bottom	-11,14	-9,81	-8,02	-7,23	-7,06	-7,44
	Ekstrim II	Top	-10,59	-12,47	-15,04	-16,15	-16,48	-15,96
		Bottom	-11,11	-10,12	-8,79	-8,24	-8,18	-8,60
PCU H 120	Layan I	Top	-7,45	-10,76	-15,39	-17,32	-18,55	-18,41
		Bottom	-8,06	-6,07	-3,32	-2,19	-1,52	-1,68
	Layan III	Top	-7,44	-10,34	-14,36	-16,01	-17,01	-16,74
		Bottom	-8,07	-6,33	-3,95	-2,99	-2,46	-2,70
	Ekstrim II	Top	-7,42	-9,76	-12,95	-14,22	-14,90	-14,45
		Bottom	-8,08	-6,69	-4,82	-4,09	-3,75	-4,11

Pada Tabel 18 sampai dengan Tabel 21 dapat dilihat pada PCI dan PCU girder pada masing-masing bentang dan tinggi girder tegangan yang terjadi pada girder dengan kombinasi beban layan I, layan III, dan ekstrim II tidak terjadi tarik pada girder dan tidak melebihi tegangan ijin

7. Perhitungan Kapasitas Momen

Pada analisis PCI dan PCU girder untuk masing-masing bentang didapatkan momen maksimum yang terjadi pada girder dan kapasitas pada masing-masing penampang girder yang dapat dilihat pada Tabel 22.

Tabel 22. Perbandingan kapasitas momen PCI dan PCU girder pada masing-masing bentang

Bentang (m)	Tinggi Girder (cm)	Mmax (kN.m)	Momen (kN.m)	Kapasitas Penampang
40,8	PCI 210	25325,02	25718,81	88%
	PCU H 185	28376,94	29150,26	100%
35,8	PCI 185	20124,64	20473,98	82%
	PCU 175	24200,01	24894,66	100%
30,8	PCI 170	15608,33	15699,51	87%
	PCU 140	17716,97	17943,97	100%
25,8	PCI 140	11272,10	11351,74	90%
	PCU 120	12498,99	12662,14	100%

Pada Tabel 22 dapat dilihat momen yang terjadi pada masing-masing girder. Kapasitas PCU girder lebih besar walaupun tingginya lebih rendah dibandingkan PCI girder.

8. Perhitungan Lendutan

Syarat batas lendutan akibat beban lalu lintas yaitu $L/800$. Maka dengan bentang girder yaitu 40,80 m syarat batas lendutan yaitu 51 mm. Perbandingan lendutan dapat dilihat pada Tabel 23.

Tabel 23. Perbandingan defleksi pada PCI dan PCU girder

Bentang (m)	Tinggi Girder (cm)	Defeksi (LL) mm MIDAS	Syarat Defleksi (mm) $L/800$
40,8	PCI 210	28,66	51
	PCU H 185	28,15	51
35,8	PCI 185	25,49	44,75
	PCU 175	26,065	44,75
30,8	PCI 170	19,421	38,5
	PCU 140	25,463	38,5
25,8	PCI 140	17,92	32,25
	PCU 120	19,309	32,25

Pada Tabel 23 dapat dilihat lendutan yang terjadi akibat beban hidup pada girder. Pada bentang 40,80 m, lendutan terbesar terjadi pada PCI girder dengan tinggi 2,10 m. Pada bentang 35,80 m, 30,8 m, dan 25,80 m lendutan terbesar terjadi pada PCU girder.

E. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan didapatkan kesimpulan bahwa pada bentang 40,80 m, PCU girder memerlukan tinggi 1,85 m, sementara PCI girder memerlukan 2,10 m. Untuk bentang 35,80 m, PCU hanya membutuhkan tinggi 1,75 m, sedangkan PCI girder 1,85 m. Pada bentang 30,80 m, tinggi PCU girder adalah 1,40 m, sedangkan PCI girder mencapai 1,70 m. Bahkan pada bentang pendek 25,80 m, PCU girder tetap lebih efisien dengan tinggi hanya 1,20 m, dibandingkan PCI girder sebesar 1,40 m.

Hasil analisis terhadap empat variasi bentang jembatan dengan sistem post-tension, diketahui bahwa kehilangan prategang secara konsisten lebih besar terjadi pada PCI girder dibandingkan dengan PCU girder. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi gaya prategang pada girder tipe PCI girder cenderung mengalami efisiensi yang lebih rendah akibat faktor-faktor seperti geometri penampang, panjang saluran kabel, serta friksi yang lebih tinggi. Sebaliknya, PCU girder mampu mempertahankan gaya prategang lebih baik, sehingga memberikan kontribusi struktural yang lebih optimal.

Pada keempat bentang (40,8 m, 35,8 m, 30,8 m, dan 25,8 m), girder tipe PCU secara konsisten mencapai kapasitas penampang maksimum sebesar 100%, sedangkan PCI girder hanya mencapai antara 82% hingga 90%. Selain itu, untuk mencapai kapasitas maksimal tersebut, PCU girder memerlukan tinggi girder yang lebih rendah dibandingkan PCI

girder di setiap bentang. Sebagai contoh, pada bentang 40,8 m, PCI girder membutuhkan tinggi 210 cm untuk mencapai kapasitas 88%, sedangkan PCU girder hanya memerlukan 185 cm untuk mencapai kapasitas penuh 100%. Hal ini menunjukkan bahwa secara struktural, PCU girder lebih efisien dalam memikul beban lentur maksimum.

Girder tipe PCU memerlukan jumlah tendon, *strand*, dan volume beton yang lebih besar dibandingkan girder tipe PCI pada setiap bentang. Sebagai contoh, pada bentang 40,8 m, PCU girder membutuhkan 6 tendon, 108 *strand*, dan volume beton 60,55 m³, sedangkan PCI hanya membutuhkan 4 tendon, 76 *strand*, dan 33,33 m³ beton. Pola serupa juga terlihat pada bentang lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun PCU girder lebih unggul dalam kapasitas struktural, penggunaannya memerlukan lebih banyak material. Sebaliknya, PCI girder lebih hemat dalam penggunaan beton dan *strand*, sehingga lebih efisien dari sisi material. Pemilihan girder perlu disesuaikan dengan prioritas antara efisiensi struktural dan efisiensi material.

Berdasarkan analisis tegangan pada keempat tipe bentang untuk girder PCI maupun PCU, diperoleh bahwa pada saat transfer maupun saat layan, tegangan yang terjadi baik pada serat atas maupun serat bawah girder tidak melebihi batas tegangan ijin yang telah ditetapkan.

Berdasarkan hasil analisis defleksi akibat beban hidup (LL) pada keempat bentang jembatan, diketahui bahwa seluruh tipe girder, baik PCI maupun PCU, menunjukkan nilai defleksi yang masih berada di bawah batas syarat defleksi yang diperbolehkan.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan*.

- <https://binamarga.pu.go.id/uploads/files/338/pembebanan-untuk-jembatan.pdf>
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 1154:2016 Tujuh Kawat Baja Tanpa Lapisan Dipilin Untuk Konstruksi Beton Pratekan (PC strand/KBjP-P7)*.
<https://binamarga.pu.go.id/otomasi9>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*.
https://lmsspada.kemdiktisaintek.go.id/pluginfile.php/543340/mod_resource/content/1/SNI%202847-2019%20
- Iqbaliah, N., Roestaman, R., & Walujodjati, E. (2021). Analisis Nilai Kapasitas Beton Prategang Tipe-I Jembatan Cimanuk Maktal. *Jurnal Konstruksi*, 19(1), 11–21.
<https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.19-1.884>
- Leo, E., & Agung, N. (2017). Kajian Efisiensi Bulb-tee Shape and Half Slab Girder dengan Blister Tunggal Terhadap PC-I Girder. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran, dan Ilmu Kesehatan*, 1(1), 309–317.
<https://doi.org/10.24912/jmstkik.v1i1.444>
- Mulyadi, M. (2011). Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif serta Pemikiran Dasar Menggabungkannya. *Jurnal Studi Komunikasi dan Media*, 15(1), 127–138.
<https://doi.org/10.31445/jskm.2011.150106>
- Priadana, S., & Sunarsi, D. (2021). *Metode Penelitian Kuantitatif*. Pascal Books, Bandung.
<https://pascalbooks.com/product/metode-penelitian-kuantitatif/>
- Richarlim, J. (2020). Kajian Efisiensi Perencanaan PC-I Girder dengan Menggunakan Sistem Strand 0,5” dan 0,6” Terhadap Kekuatan dan Biaya. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(1), 11–18.
<https://doi.org/10.24912/jmts.v3i1.6930>
- Side, S. T. (2020). Analysis Comparison Loss of Prestress. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 1–7.
<https://journal.unhas.ac.id/index.php/jts/article/view/10158>
- Tumpu, M., & Rangan, P. R. (2020). *Struktur Beton Prategang (Teori dan Prinsip Desain)*.
<https://www.researchgate.net/publication/357576126>



© 2025 Siklus Jurnal Teknik Sipil All rights reserved. This is an open access article distributed under the terms of the CC BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).