



Studi Efisiensi Desain Jembatan Beton Prategang dengan Variasi Tipe I-Girder

Bernardinus Herbudiman, *Badriana Nuranita, Sandhi Maulana Ivan Putra

Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung

*nuranitabadriana@itenas.ac.id

Received: 6 Februari 2025 Revised: 23 Mei 2025 Accepted: 15 Juli 2025

Abstract

The prestressed concrete type I (PC-I) girder is widely used in Indonesia's flyovers due to its strength and construction efficiency. This paper deals with a case study of the Northern Ring Road Flyover structure in Tasikmalaya. The research is focused on stress and deflection ratios of a range of PC-I girder variations, including the existing girder, a smaller girder with more tendons, and a larger girder with fewer tendons. The loading standard follows SNI 1725:2016, while prestressing and capacity analysis refer to AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Result indicated that the H-170 PC-I girder with 3 tendons provides the most efficient design, with a top fiber stress ratio 0.86 and a deflection ratio 0.27 under permanent and live loads, with a total prestress loss of 19.6%.

Keywords: PC-I girder, prestress force, girder capacity, stress ratio, deflection

Abstrak

Struktur girder beton prategang Tipe I (PC-I) sering dipilih untuk jembatan flyover di Indonesia karena kekuatannya serta kemudahan konstruksinya. Tulisan ini membahas studi kasus pada struktur Flyover Jalan Lingkar Utara Tasikmalaya, yang menggunakan girder beton pracetak Tipe PC-I. Pemilihan girder difokuskan pada efisiensi desain berdasarkan aspek kekuatan dan kekakuan jembatan. Penelitian ini membandingkan rasio tegangan dan lendutan pada beberapa variasi girder PC-I, yakni girder eksisting, dimensi girder yang lebih kecil dari eksisting dengan tendon yang lebih banyak, serta dimensi girder yang lebih besar dengan tendon lebih sedikit. Standar pembebanan merujuk SNI 1725:2016, sedangkan analisis gaya prategang dan kapasitas girder didasarkan AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Analisis menunjukkan girder PC-I tipe H-170 dengan tiga tendon menghasilkan desain paling efisien, dengan rasio tegangan 0,86 di serat atas dan rasio lendutan 0,27 akibat beban hidup dan beban permanen, serta total kehilangan gaya prategang sebesar 19,6%.

Kata kunci: Girder PC-I, gaya prategang, kapasitas girder, rasio tegangan, lendutan

Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi yang kuat terhadap tegangan tekan namun lemah terhadap tarik. Untuk mengatasi hal tersebut, maka ditambahkan material berupa baja tulangan untuk meningkatkan kapasitas dalam menahan tegangan tarik dan meningkatkan tegangan lentur (Neville *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2017).

Dalam sistem beton prategang, tendon digunakan untuk memberikan gaya prategang pada penampang beton, sehingga menimbulkan tegangan tambahan (Nawy, 2009). Beton dirancang memberikan gaya tarik melalui kabel atau tendon di dalam beton,

sebelum beban eksternal diberikan, untuk menambah kapasitas struktural beton terhadap beban tarik dan lentur (Neville *et al.*, 2010). Dengan demikian, beton memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menerima tegangan tarik akibat beban yang bekerja. Gaya prategang diberikan searah longitudinal penampang, sistem penegangan ini diberi nama pemberian gaya prategang secara linier (Budiono *et al.*, 2019). Gaya pada beton prategang diberikan sebelum beton dicor (*pre-tension*) atau setelah beton mengeras (*post-tension*).

Tipe girder jembatan yang banyak digunakan untuk konstruksi jembatan jalan raya dari bentang kecil, sedang, hingga bentang panjang adalah beton

prategang (Naik & Yashavantha, 2016; Darojatun & Nuranita, 2024). Perkembangan konstruksi jembatan beton terus mengalami perkembangan dan inovasi dalam seratus tahun terakhir, antara lain panjang jembatan beton yang awalnya terbatas untuk bentang sekitar 20 m saat ini dapat mencapai panjang 50 m bahkan lebih dengan penggunaan konstruksi prategang (Supriyadi *et al.*, 2020). Sehingga, wajar jika pengaplikasian *prestressed concrete I-Girder* atau girder PC-I di lapangan semakin meningkat, seiring bertambahnya proyek konstruksi jembatan.

Pekerjaan konstruksi menggunakan girder pracetak pada dasarnya dinilai lebih cepat selesai dibandingkan girder konvensional sehingga dapat memangkas waktu pelaksanaan konstruksi (Darojatun & Nuranita, 2024). Bentuk dan dimensi girder pracetak umumnya disediakan dari pabrik berdasarkan pengalaman pada setiap panjang bentangnya. Namun aspek ukuran ini bisa dikembangkan untuk meningkatkan hasil yang lebih baik (Prayuda *et al.*, 2021). Berbagai variasi dimensi girder PC-I diberi nama berdasarkan tingginya, mulai 60 cm sampai 210 cm. Setiap dimensi memiliki kapasitas berbeda, sehingga pemilihan girder PC-I harus berdasarkan pertimbangan kemampuannya dalam menerima beban layan maupun ultimit.

Berbagai penelitian terkait efisiensi penggunaan girder PC-I berdasarkan aspek tegangan dan lendutan sudah dilakukan (Darojatun & Nuranita, 2024; Prayuda *et al.*, 2021; Azhara & Nuranita, 2023; Batubara *et al.*, 2018). Analisis struktur jembatan beton pracetak bentang 35,8 m dilakukan oleh Darojatun dan Nuranita (2024) menghasilkan dimensi girder PC-I dengan tinggi 1,7 m, lebar 0,7 m dan penggunaan 4 buah tendon yang memenuhi batas lendutan dan rasio tegangan sesuai standar. Penelitian lain oleh Sartika *et al.*, (2019) yang mengkomparasikan analisis jembatan beton prategang berdasarkan peraturan pembebanan terdahulu (RSNI T-02-2005) dengan yang berlaku saat ini (SNI 1725:2016). Hasilnya membuktikan bahwa dengan RSNI T-02-2005 menghasilkan tegangan lentur dan gaya prategang lebih besar.

Prayuda *et al.*, (2021), melakukan studi pengaruh modifikasi penampang pada girder-I dan girder *box* beton prategang terhadap kekakuan dan lendutan. Modifikasi penampang pada girder-I dan girder *box* dilakukan dengan memberlakukan kesamaan pada luasan total penampang. Tiga variasi modifikasi diterapkan pada masing-masing jenis girder untuk mengetahui kapasitas kekuatannya. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat dua tipe girder yang paling direkomendasikan berdasarkan kapasitasnya dalam menahan tegangan dan lendutan jembatan.

Hal tersebut juga berarti bahwa modifikasi penampang girder dapat meningkatkan efisiensi kinerja struktur dalam menahan beban.

Penelitian lainnya dilakukan oleh Batubara *et al.*, (2018), terkait perencanaan girder PC-I yang diaplikasikan pada jembatan dengan bentang 24 m berdasarkan standar pembebanan SNI 1725:2016 dan RSNI T-12-2004. Girder dengan tinggi 160 cm dan spasi antara girder 1,83 m dimodelkan dengan program analisis struktur yang menunjukkan bahwa tegangan dan lendutan yang terjadi lebih kecil dari batas izinnya. Seguirant *et al.*, (2005) melakukan perbandingan analisis kapasitas lentur beton bertulang dan prategang pada balok T dengan metode AASHTO LRFD, AASHTO STD, dan PCI BDM, dan memberikan rekomendasi alternatif variasi faktor tahanan yang linier untuk AASHTO LRFD. Persamaan analisis kapasitas lentur yang digunakan selanjutnya dijadikan acuan pada analisis penelitian ini.

Evaluasi sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) pada enam jembatan jalan raya yang salah satunya merupakan jembatan girder PC-I untuk mengetahui efektivitas perkuatan girder yang retak menggunakan *Carbon Fiber Reinforcement Polymer* (CFRP) dilakukan oleh Peiris *et al.*, (2020). Hasilnya menunjukkan bahwa SHM sebagai sistem pemantauan mampu mengevaluasi efisiensi desain secara *real-time*, terutama dalam deteksi kerusakan dini seperti retak dan deformasi, sehingga dapat mengantisipasi masalah serta mengurangi risiko kegagalan struktur.

Al-Kaimakchi dan Rambo-Roddenberry (2021) meneliti perilaku lentur dari beton prategang AASHTO Tipe II yang menggunakan *strand* baja *stainless* sebagai tendon prategang. Material ini merupakan inovasi baru karena tahan korosi dan berpotensi menghasilkan jembatan beton yang lebih tahan lama dengan perawatan lebih rendah. Penelitian ini mengusulkan pendekatan desain lentur baru untuk girder prategang dengan *strand* baja *stainless*.

Keandalan jembatan girder beton prategang yang dibebani oleh lalu lintas berat berupa truk beriringan (*platooning truck*) terhadap kinerja kondisi Batas Layan III (*Service III Limit State*) dikaji oleh Yang *et al.*, (2023). Kajian menitikberatkan pada nilai indeks keandalan yang tidak secara spesifik tercantum dalam AASHTO *Manual for Bridge Evaluation*. Pendekatan melalui simulasi Monte Carlo dengan mempertimbangkan variasi panjang bentang, metode kehilangan prategang, faktor beban hidup dan batas tegangan tarik izin. Hasilnya menunjukkan walaupun girder sudah didesain sesuai standar, namun terdapat

kemungkinan melebihi batas tegangan kondisi layan atau mengalami retak akibat lentur selama masa layan. Untuk mengakomodir masalah tersebut, maka diberikan rekomendasi penggunaan indeks keandalan yang konservatif untuk evaluasi Batas Layan III tersebut. Elfaz *et al.*, (2022) meneliti faktor distribusi beban hidup pada jembatan Girder I komposit, yang menunjukkan bahwa variasi konfigurasi girder dapat mempengaruhi distribusi beban transversal dan efisiensi pada sistem struktur jembatan secara keseluruhan.

Berdasarkan tinjauan pustaka, diketahui bahwa pemilihan konfigurasi girder dan variasi tendon sangat mempengaruhi kapasitas lentur, kapasitas layan seperti retak dan lendutan, serta aspek keandalan. Oleh karena itu, dilakukan studi alternatif perencanaan dimensi girder PC-I pada *Flyover* Lingkar Jalan Utara Tasikmalaya dengan membandingkan beberapa variasi girder, yakni girder PC-I eksisting yang terpasang, girder PC-I dengan dimensi lebih besar namun jumlah tendon lebih sedikit, serta girder PC-I dengan dimensi lebih kecil namun jumlah tendon yang lebih banyak. Hasil penelitian dianalisis melalui perbandingan kapasitas tegangan dan lendutan dari masing-masing girder, guna mendapatkan rekomendasi tipe girder yang paling efisien berdasarkan aspek rasio tegangan dan lendutan.

Struktur girder beton prategang Tipe I merupakan tipe jembatan yang banyak diterapkan di Indonesia. Meskipun berbagai tipe dan dimensi PC-I girder telah tersedia secara standar, namun kajian efisiensi tipe girder berdasarkan kombinasi dimensi girder dan jumlah tendon masih perlu pengembangan.

Melalui penelitian ini, dapat direkomendasikan alternatif desain girder PC-I berdasarkan aspek kekuatan dan kekakuan struktur dari beberapa variasi dimensi dan jumlah tendon, yang mengacu standar pembebanan SNI 1725:2016, Manual Perencanaan Struktur Beton Pratekan untuk Jembatan dan metode analisis AASHTO LRFD. Selain itu, dilakukan analisis terhadap kehilangan gaya prategang, sehingga didapatkan alternatif girder paling efisien berdasarkan nilai rasio tegangan dan lendutan. Hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan teknis untuk perencana dalam merancang alternatif desain girder PC-I yang efisien berdasarkan aspek kekuatan dan kekakuan struktur.

Metode

Secara umum, penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data yang mencakup data geometri, tipe, dimensi, material dan data teknis lainnya untuk digunakan saat proses pemodelan maupun analisis

struktur. Selanjutnya, tahap pendefinisian dan penginputan beban-beban jembatan serta kombinasi jembatan untuk mendapatkan gaya dalam maksimum pada girder akibat beban. Kemudian dilakukan perhitungan dan analisis terhadap jumlah tendon dan *strands*, jumlah tulangan, kontrol tegangan, serta lendutan girder hingga didapatkan rekomendasi desain girder yang paling efisien serta memenuhi kriteria keamanan jembatan.

Material

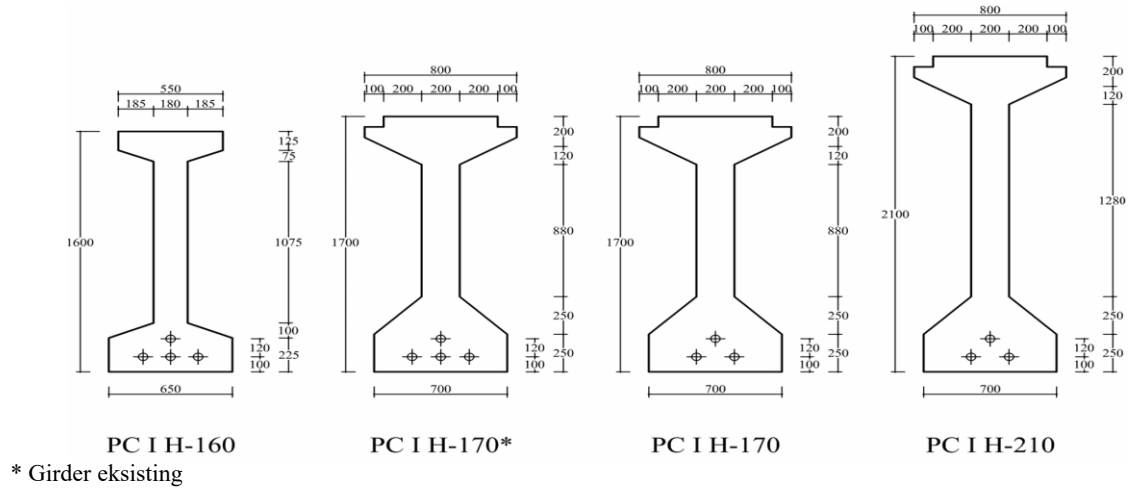
Data teknis untuk studi ini diambil dari gambar *shop drawing* lanjutan pembangunan *flyover* di Ruas Jalan Lingkar Utara Tasikmalaya (2020). Panjang bentang adalah 35,8 m yang dibangun di atas jalan rel kereta api untuk menghindari perpotongan sebidang antara jalur rel dan jalan raya.

Penelitian ini menggunakan PC-I tipe H-170, H-160, dan H-210 dari katalog *Bridge Concrete Product* WIKA Beton, dengan dimensi penampang dan jumlah tendon sesuai Gambar 1. Girder PC-I, H-170 dengan 4 tendon adalah girder eksisting yang terpasang pada *flyover*. Tipe H-160 adalah variasi girder dengan dimensi lebih kecil dan tendon lebih banyak. Sedangkan tipe H-210 memiliki dimensi lebih besar dan tendon lebih sedikit. Adapun spesifikasi material girder adalah kuat tekan beton f'_c 45 MPa dan panjang bentang jembatan 35,8 m.

Tipe pelat cor ditempat dengan spesifikasi material: kuat tekan beton f'_c 28 Mpa dan tebal pelat 250 mm. Untuk spesifikasi material baja prategang yang digunakan adalah tipe strand, KBjP-P7 R B *low relaxation*, diameter strand 12,7 mm, luas penampang strand 98,71 mm², tegangan putus baja prategang f_{pu} 1860 MPa, tegangan leleh baja prategang f_{py} 1674 MPa, dan modulus elastisitas *strand* E_{ps} 195000 MPa. Spesifikasi material baja tulangan yang digunakan adalah tegangan leleh baja tulangan, untuk diameter ≥ 10 mm (BJTS 420) dan untuk diameter < 10 mm (BJTP 280). Modulus elastisitas baja tulangan adalah E_s 200000 Mpa.

Pembebanan dan kombinasi beban

Item dan besar beban, faktor beban dan kombinasi pembebanan jembatan mengacu pada SNI 1725:2016. Beban permanen terdiri dari beban mati sendiri (MS) dan beban mati tambahan (MA). Beban transien terdiri dari beban lajur "D" yang terdiri dari beban garis terpusat dan beban terbagi rata (BGT dan BTR), beban truk "T" (TT), dan rem (TB). Beban aksi lingkungan yang diperhitungkan adalah beban angin pada kendaraan (EWL). Selain itu, digunakan juga faktor beban dinamis (FBD) yang mewakili interaksi antara lalu lintas kendaraan di atas jembatan.



Gambar 1. Variasi penampang girder PC-I (satuan dalam mm)

Kombinasi pembebanan struktur jembatan terdiri dari beban permanen dan beban transien. Beban tersebut dikombinasikan dan dikalikan dengan faktor beban sehingga didapatkan kondisi yang paling kritis. Pada penelitian ini keadaan batas yang digunakan adalah Kuat I-V dan Daya Layan I-IV sesuai SNI 1725:2016, atau diringkas pada Tabel 1.

Tabel 1. Kombinasi Pembebanan

Batas	MS	MA	TD, TT, TI	EW _L
Kuat I	1,20	2,00	1,80	-
Kuat II	1,20	2,00	1,40	-
Kuat III	1,20	2,00	-	-
Kuat V	1,20	2,00	-	1,00
Layan I	1,00	1,00	1,00	1,00
Layan II	1,00	1,00	1,30	-
Layan III	1,00	1,00	0,80	-
Layan IV	1,00	1,00	-	-

Pemodelan struktur

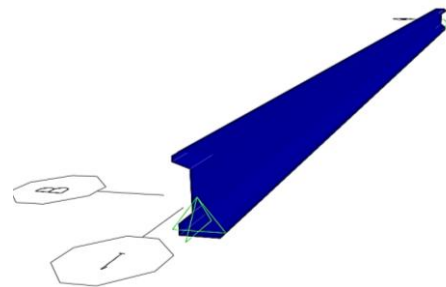
Girder PC-I yang dimodelkan sebanyak 3 model yaitu girder PC-I H-160, girder PC-I H-170, girder PC-I H-210 pada interior *flyover* menggunakan bantuan program *structural analysis software* berbasis *finite element analysis (FEA)*. Struktur girder dimodelkan sebagai balok sederhana di atas dua tumpuan sendi-rol sepanjang 35,8 meter. Penampang girder didefinisikan melalui item *section designer* untuk mendapatkan model yang sama sesuai perencanaan. Pemodelan girder dilakukan menggunakan elemen batang (*beams elements*), dengan ukuran *mesh* mengikuti default standar program.

Analisis sensitivitas terhadap kehalusan mesh tidak dilakukan secara eksplisit, karena hasil analisis lebih berfokus pada perilaku global girder seperti rasio tegangan dan lendutan, dibanding distribusi lokal tegangan. Pendefinisian perletakan dan pemodelan girder dapat dilihat pada pada Gambar 2

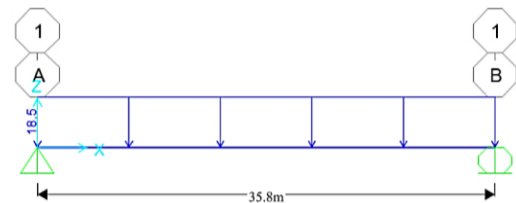
dan Gambar 3. Beban-beban yang didefinisikan sesuai SNI 1725:2016 diaplikasikan pada model girder melalui *frame load*, baik sebagai beban merata maupun beban terpusat, dengan besaran sesuai jenis dan arah masing-masing beban. Beban tersebut disajikan pada Gambar 4 – 9.



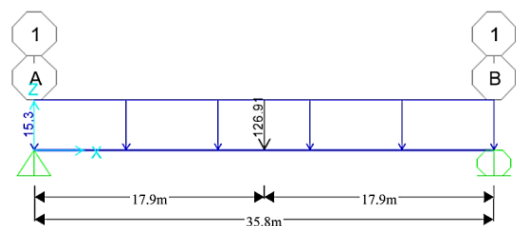
Gambar 2. Pemodelan tumpuan sendi-rol



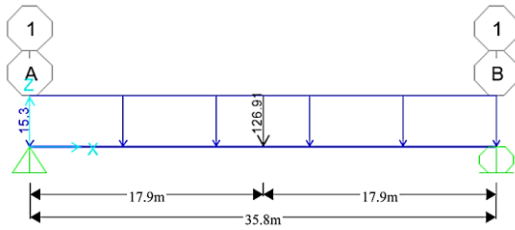
Gambar 3. Tampak extrude girder PC-I



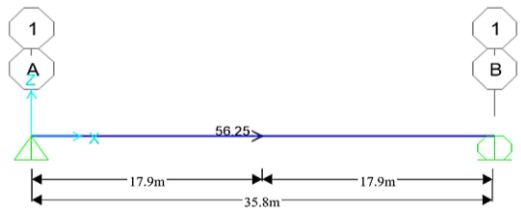
Gambar 4. Beban mati tambahan MA



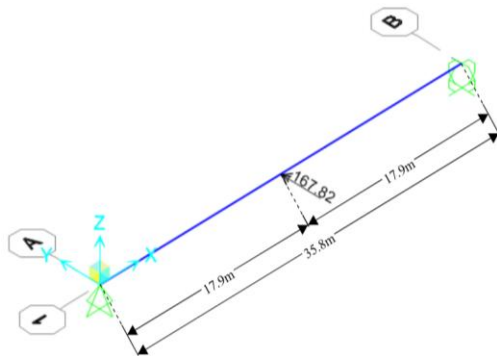
Gambar 5. Beban lalu lintas BGT dan BTR



Gambar 6. Beban truk TT



Gambar 7. Beban rem TB-point



Gambar 8. Beban rem TB-moment



Gambar 9. Beban angin EWL

Analisis tegangan dan lendutan

Analisis yang dilakukan adalah kontrol tegangan dan lendutan serta perbandingan efisiensi penggunaan pada seluruh variasi girder PC-I. Nilai tegangan dan lendutan akan dihitung dari gaya dalam pada pemodelan girder. Perbandingan efisiensi penggunaan girder dilakukan melalui rasio nilai tegangan dan lendutan dari masing-masing variasi girder PC-I.

Tegangan izin pada girder mengacu kepada RSNI-T-12-2004. Tegangan izin tarik kondisi transfer gaya prategang selain di perletakkan ditulis pada Persamaan 1, tegangan izin tekan saat kondisi ditulis pada Persamaan 2, tegangan izin tarik kondisi layan ditulis pada Persamaan 3 dan

tegangan izin tekan kondisi layan ditulis pada Persamaan 4.

$$\sigma \leq 0,25 \times \sqrt{f_{ci}'} \quad (1)$$

$$\sigma \leq -0,6 \times \sqrt{f_{ci}'} \quad (2)$$

$$\sigma \leq 0,5 \times \sqrt{f_c'} \quad (3)$$

$$\sigma \leq -0,45 \times \sqrt{f_c'} \quad (4)$$

Dengan, f_{ci}' adalah Kuat tekan beton pada saat transfer [MPa], f_c' adalah Kuat tekan beton pada umur 28 hari [MPa].

Lendutan aktual pada girder tidak boleh melewati batas izin sesuai RSNI-T-12-2004. Dengan L adalah panjang bentang girder [mm], lendutan izin akibat beban permanen sesuai Persamaan 5, lendutan izin akibat beban hidup sesuai Persamaan 6, dan lendutan izin untuk daya layan sesuai Persamaan 7.

$$\delta \leq \frac{L}{300} \quad (5)$$

$$\delta \leq \frac{L}{800} \quad (6)$$

$$\delta \leq \frac{L}{250} \quad (7)$$

Analisis kapasitas lentur dan geser

Mengacu pada AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2020, tahanan momen terfaktor pada penampang lentur harus lebih besar dari momen ultimit akibat kombinasi pembebanan, sesuai Persamaan 8. Elemen lentur harus memiliki tahanan lentur sama dengan atau lebih besar dari yang terkecil diantara (1) 1,33 kali dari momen ultimit terbesar akibat kombinasi pembebanan, dan (2) Momen retak dengan beberapa variabel sesuai Persamaan 9. Tahanan geser terfaktor pelat tidak melebihi gaya geser ultimit akibat pembebanan, sesuai Persamaan 10.

$$M_r = \phi_f \times M_n > M_u \quad (8)$$

Dengan, M_r merupakan tahanan lentur terfaktor [kNm], ϕ_f merupakan faktor tahanan lentur, M_n merupakan tahanan lentur nominal [kNm], M_u merupakan momen lentur ultimit [kNm].

$$M_{cr} = \gamma_3 \times (\gamma_1 \times f_r + \gamma_2 \times f_{cpe}) \times S_{bcg} - M_{dn} \times \left(\frac{S_{bcg}}{S_b} \right) \quad (9)$$

Dengan, f_r merupakan tegangan retak beton [MPa], f_{cpe} merupakan tegangan akibat gaya prategang [MPa], S_{bcg} merupakan modulus penampang komposit serat bawah [mm³], S_b merupakan modulus penampang non-komposit serat bawah [mm³], M_{dn} merupakan momen akibat berat sendiri non-komposit [kNm], γ_1 merupakan variabel retak

lentur, γ_2 merupakan variabel faktor prategang, dan γ_3 merupakan variabel rasio kuat leleh dan tarik baja non-prategang.

$$V_r = \phi_v \times V_n \geq V_u \quad (10)$$

Dengan, V_r merupakan tahanan geser terfaktor [kN], ϕ_v merupakan faktor tahanan geser, V_n merupakan tahanan geser nominal [kN], V_u merupakan gaya geser ultimit [kN].

Hasil dan Pembahasan

Gaya dalam akibat kombinasi pembebanan

Analisis gaya dalam didapat dari berbagai kombinasi pembebanan, kemudian diambil kombinasi yang menghasilkan gaya dalam terbesar pada girder. Dari hasil perhitungan gaya dalam tersebut, beban akibat lanjur (TD) memiliki kontrol yang lebih besar dari beban kendaraan truk (TT), sehingga beban lalu lintas menggunakan beban TD. Gaya geser dan momen ultimit akibat kombinasi *envelope* pada variasi girder PC-I H-160, PC-I H-170 dan PC-I H-210 ditunjukkan pada Tabel 2.

Kehilangan gaya prategang

Setiap variasi girder PC-I memperhitungkan kehilangan gaya prategang seketika dan jangka panjang. Rekapitulasi data prategang pada variasi girder ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil analisis seperti terlihat pada tabel tersebut, total kehilangan gaya prategang terbesar dihasilkan oleh tipe girder H-160 sebesar 27,27%, sementara yang terkecil dihasilkan oleh tipe girder H-170 sebesar 19,6%. Pada girder H-170 memiliki persentase kehilangan tegangan yang termasuk paling efisien dibandingkan girder H-160.

Analisis tegangan dan kapasitas

Analisis tegangan pada setiap variasi girder dilakukan di serat atas dan bawah dengan beberapa kondisi, yakni pada saat transfer, masa konstruksi dan kondisi layan, kemudian dibandingkan dengan tegangan ijinnya sehingga dapat diketahui rasio perbandingannya. Perbandingan ini dijadikan dasar untuk menentukan variasi girder yang efektif dan

efisien dari segi kapasitas tegangan dan lendutan. Adapun hasilnya tampak pada Tabel 4.

Berdasarkan tabel tersebut, girder PC-I H-160 tidak memenuhi persyaratan tegangan dimana tegangan di serat atas girder lebih besar dari tegangan izin, dengan rasio tegangan 1,07. Adapun rasio tegangan yang mendekati tegangan izin dihasilkan oleh variasi girder PC-I H-170 sebesar 0,86 di serat atas girder. Rasio tegangan dengan selisih lebih besar dihasilkan oleh PC-I H-210 sebesar 0,59 di serat atas girder sehingga lebih cenderung boros. Dari keempat tipe tersebut, yang lebih direkomendasikan berdasarkan tingkat keamanan dan efisiensi tegangannya yakni girder tipe PC-I H-170. Pemeriksaan kapasitas girder berupa analisis lentur, geser, *strands* serta penulangan untuk setiap variasi girder dilakukan pada seluruh variasi girder PC-I. Rekapitulasi hasil analisis tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 2. Gaya dalam ultimit akibat kombinasi pembebanan

Tipe girder	Jarak tinjau [m]	P [KN]	V2 [KN]	M3 [KNm]
PC-I H-160	35,8	0	1549,41	-8,39E-12
	17,9	0	-105,77	14965,09
	1,539*	0	-1409,83	2263,28
	0	101,25	-1532,50	1,72E-12
PC-I H-170	35,8	0	1637,53	-1,631E-11
	17,9	0	122,66	15753,64
	1,624*	0	-1483,21	2518,29
	1,646*	0	-1481,35	2550,71
	0	101,25	-1620,65	3,197E-15
PC-I H-210	35,8	0	1681,08	1,41E-11
	17,9	0	-105,19	16148,69
	2,015*	0	-1487,66	3173,77
	0	101,25	-1663,02	-9,10E-13

Catatan: *bidang kritis geser

Hasil analisis lendutan

Lendutan izin akibat beban permanen sebesar 119,33 mm, akibat beban hidup sebesar 44,75 mm, dan pada kondisi layan sebesar 143,2 mm. Hasil analisis lendutan girder serta rasio lendutan terhadap lendutan ijin diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 3. Gaya prategang untuk setiap variasi girder

Data	Tipe Girder PC-I			
	H-160	H-170*	H-170	H-210
Jumlah tendon (strand)	4 (76)	4 (63)	3 (57)	3 (57)
Kehilangan prategang seketika (MPa)	181,85	136,10	118,79	124,03
Kehilangan prategang jangka panjang (MPa)	198,58	162,89	154,45	156,21
Total kehilangan prategang (MPa)	380,42	298,99	273,24	280,23
Gaya prategang efektif (kN)	7611,31	6815,82	6311,56	6272,20
% total kehilangan gaya prategang	27,27	21,43	19,59	20,09

Catatan: *girder eksisting

Tabel 4. Perbandingan tegangan pada variasi girder

Girder	Tegangan [MPa]						Rasio tegangan terhadap tegangan izin			
	H-160	H-170*	H-170	H-210	Tegangan Izin		H-160	H-170*	H-170	H-210
					Tekan	Tarik				
Serat atas girder	-21,65	-16,26	-17,41	-11,96	-20,25	3,4	1,07	0,80	0,86	0,59
Serat bawah girder	-3,75	-0,44	1,92	-2,02	-20,25	3,4	0,19	0,02	0,57	0,10
Serat atas pelat	-6,85	-5,63	-5,66	-4,41	-12,6	2,6	0,54	0,45	0,45	0,35
Serat bawah pelat	-4,44	-3,89	-3,90	-3,24	-12,6	2,6	0,35	0,31	0,31	0,26

Catatan: *girder eksisting

Tabel 5. Rekapitulasi kapasitas pada variasi girder

Analisis kapasitas		Tipe Girder PC-I			
		H-160	H-170*	H-170	H-210
Lentur	Perilaku balok	Balok T	Balok T	Balok T	Balok T
	Kontrol penampang	<i>Under-reinforced</i>	<i>Under-reinforced</i>	<i>Under-reinforced</i>	<i>Under-reinforced</i>
	Faktor reduksi lentur	1,0	1,0	1,0	1,0
	Tahanan lentur terfaktor [kNm]	20367,98	19445,23	17591,19	22114,01
	Momen ultimit [kNm]	14965,16	15753,64	15753,64	16148,69
Syarat tulangan minimum	Keterangan	OK	OK	OK	OK
	Momen retak [kNm]	10051,05	10783,29	9876,33	12643,80
	1,33 Momen ultimit [kNm]	19903,67	20952,34	20952,34	21477,76
Geser	Keterangan	OK	OK	OK	OK
	Faktor reduksi geser	0,9	0,9	0,9	0,9
	Tahanan geser terfaktor [kN]	1877,65	2053,74	1889,69	2429,34
	Geser ultimit pada bidang kritis [kN]	1409,83	1481,35	1483,212	1487,66
	Keterangan	OK	OK	OK	OK
Tulangan	Jumlah strand	76	63	57	57
	Tulangan longitudinal	22D13	22D13	22D13	24D13
	Tulangan transversal	2D10 - 200	2D10 - 200	2D10 - 200	2D10 - 200

Catatan: *girder eksisting

Tabel 6. Perbandingan lendutan pada variasi girder

Lendutan	Aktual [mm]				Ijin [mm]	Rasio aktual terhadap ijin			
	H-160	H-170*	H-170	H-210		H-160	H-170*	H-170	H-210
Saat transfer	-109,49	-56,86	-43,59	-36,93	119,33	-0,92	-0,48	-0,36	-0,31
Setelah kehilangan prategang	-28,31	-18,81	-14,06	-12,80	119,33	-0,24	-0,16	-0,12	-0,11
Akibat beban permanen	-1,33	2,39	7,13	-0,25	119,33	-0,01	0,02	0,06	-0,00
Akibat beban hidup	40,55	31,87	31,87	18,87	44,75	0,91	0,71	0,71	0,42
Akibat beban permanen dan hidup	39,22	34,26	39,00	18,62	143,20	0,27	0,24	0,28	0,13

Catatan: *girder eksisting

Berdasarkan hasil perbandingan lendutan, seluruh variasi girder PC-I memenuhi persyaratan lendutan izin. Lendutan akibat layan (beban permanen dan beban hidup) dari urutan terbesar hingga terkecil dihasilkan berturut-turut oleh girder PC-I H-160, girder PC-I H-170, girder PC-I H-170*, dan girder PC-I H-210. Selanjutnya, rasio antara lendutan aktual dengan lendutan ijin akibat beban layan, dari yang paling mendekati lendutan izin, dihasilkan oleh girder PC-I H-160 sebesar 0,27, diikuti girder

PC-I H-170 sebesar 0,27 dan girder PC-I H-170 sebesar 0,24. Rasio lendutan terkecil dihasilkan oleh girder PC-I H-210 sebesar 0,13.

Analisis perbandingan variasi girder

Meskipun girder PC-I tipe H-210 dengan 3 tendon menghasilkan kapasitas lentur dan geser terbesar berdasarkan hasil perhitungan, namun penggunaan tipe ini dinilai kurang efisien jika dibandingkan

dengan tipe lainnya, karena nilai rasio tegangan dan lendutan yang terlalu rendah. Hal tersebut mengindikasikan bahwa dimensi girder terlalu besar dibandingkan dengan kebutuhannya menahan beban aktual (*over capacity*), yang berpotensi menyebabkan terjadinya pemborosan material. Girder PC-I tipe H-170 dengan dimensi sedang dan jumlah tendon yang sama, mampu menghasilkan performa struktur yang lebih mendekati batas desain yang diizinkan. Dengan performa tersebut mengindikasikan bahwa girder PC-I tipe H-170 lebih optimal dalam menyeimbangkan kapasitas terhadap beban luarnya.

Kontribusi penelitian dan rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka penelitian ini memberikan sudut pandang lain dalam merancang jembatan girder PC-I melalui pendekatan komparatif, berdasarkan kombinasi antara dimensi penampang dan jumlah tendon. Berbeda dengan studi-studi sebelumnya yang lebih menekankan pada perbandingan bentuk penampang (Prayuda *et al.*, 2020), metode pembebanan (Sartika *et al.*, 2019), modifikasi jenis tendon (Al-Kaimakchi dan Rambo-Roddenberry, 2021) dan aspek keandalan dan sistem monitoring (Yang *et al.*, 2023; Peiris *et al.*, 2020), penelitian ini menitikberatkan pada pentingnya kesesuaian antara konfigurasi geometri dan tendon prategang. Kesesuaian ini dimaksudkan guna mencapai efisiensi struktur girder jembatan PC-I yang optimal.

Dengan menganalisis tiga tipe girder yang berbeda dalam konteks proyek nyata, penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi tidak hanya bergantung pada kapasitas paling besar, namun juga pada proporsionalitas antara kapasitas kekuatan struktur dengan beban luarnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa girder H-170 dengan tiga tendon, memiliki kinerja paling mendekati batas tegangan dan lendutan izin, serta menghasilkan kehilangan prategang terkecil diantara yang lain. Hal ini mengindikasikan bahwa efisiensi dalam penggunaan material sekaligus efektifitas dalam menahan beban layan dan ultimit. Sehingga, posisi penelitian ini dapat turut memperkaya literasi mengenai perencanaan girder PC-I, khususnya dalam konteks efisiensi konfigurasi tendon terhadap dimensi penampang.

Hasil penelitian menunjukkan, perencanaan girder PC-I sebaiknya dapat mempertimbangkan efisiensi rasio tegangan dan lendutan secara evaluatif. Regulasi atau pedoman teknis yang lebih adaptif terhadap praktik desain berbasis efisiensi perlu dikembangkan dalam mengoptimalkan performa struktur jembatan. Penelitian ini diharapkan dapat

menjadi rujukan teknis bagi perencana maupun pemangku kepentingan dalam merancang jembatan girder prategang dengan lebih efisien.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pada penelitian ini, tipe girder PC-I H-210 dengan 3 tendon menghasilkan kapasitas yang paling besar di antara seluruh variasi girder, hal ini dapat dilihat berdasarkan nilai rasio tegangan dan lendutan terkecil yang dihasilkan dibanding tipe girder lainnya. Namun, penggunaan variasi girder PC-I H-170 dengan 3 tendon lebih direkomendasikan untuk digunakan pada *flyover* ini, karena menghasilkan nilai rasio tegangan maupun lendutan yang paling mendekati persyaratan ijinnya, bahwa artinya girder tersebut sudah cukup efektif dan efisien berdasarkan aspek kekuatan dan kekakuan. Selain itu, variasi girder PC-I H-170 dengan 3 tendon memberikan kinerja yang paling efisien dengan persentase kehilangan tegangan sebesar 19,6%, mengindikasikan terdapatnya keseimbangan antara jumlah tendon, gaya prategang efektif dan efisiensi desain. Sedangkan pada girder PC-I H-160, meskipun menghasilkan lendutan yang memenuhi standar, namun kapasitas tegangannya tidak memenuhi syarat tegangan izin, sehingga belum memenuhi kriteria kekuatan.

Adapun syarat tegangan izin yang tidak terpenuhi pada girder PC-I H-160 dapat disebabkan oleh luas penampang yang lebih kecil. Girder ini memiliki luas bagian sayap atas yang lebih kecil dari variasi girder lain, sehingga modulus penampang pada girder ini cenderung lebih kecil. Selain itu, girder H-160 menghasilkan persentase kehilangan tegangan tertinggi dibanding tipe lain. Kehilangan tegangan yang lebih tinggi pada girder H-160 diindikasikan oleh tingginya gaya prategang awal dan jumlah tendon yang lebih banyak, sehingga dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kehilangan tegangan akibat gesekan dan relaksasi tendon.

Ucapan Terima Kasih

Tulisan ini merupakan hasil penelitian yang disusun berdasarkan kegiatan Praktik Kerja Mahasiswa Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional Bandung pada Proyek Pembangunan *Flyover* Jalan Lingkar Utara Tasikmalaya (Lanjutan). Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada para pihak yang telah memberikan informasi dan penyediaan data teknis yang diperlukan pada kegiatan tersebut, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

AASHTO. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.). Washington: AASHTO.

- Al-Kaimakchi, A., & Rambo-Roddenberry, M. (2021). Full-scale AASHTO type II girders prestressed with stainless steel strands. *Journal of Bridge Engineering*, 26(9), 04021065.
- Azhara, U.I., Nuranita, B. (2023). Evaluasi Struktur Atas Jembatan Precast Concrete-I Girder (Studi Kasus: Tol Cisumdawu Fase 2). *Prosiding FTSP Series* (6), 670-674.
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). RSNi T-12-2004, *Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). SNI 1725:2016, *Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Batubara, Samsuardi., & Simatupang, Larno. (2018). Perencanaan Jembatan Beton Prategang dengan Bentang 24 Meter Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI). *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, 1 (2):45-61.
- Bina Marga. (2011). *Manual Konstruksi dan Bangunan, Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Budiono, B. (2019). *Perancangan Beton Prategang*. Bandung: ITB Press.
- Darojatun, B., & Nuranita, B. (2024). Kajian Analisis Struktur PC-I Girder Prestressed pada Jembatan Bentang 35,8 meter. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 10(1), 1-9.
- Efaz, I., Yazdani, N., & Beneberu, E. (2022). Live Load Distribution Factors for a Partially Composite I-Girder Bridge. *Special Publication*, 352, 51-67.
- Naik, V.T & Yashavantha. (2016). Comparative Study of Precast RCC I-Girder Configuration for Various Span Arrangements in A Bridge Super Structure. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(8):129.
- Nawy E.G. (2009). *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach (5th ed.)*. New Jersey: wijaya karya Pearson Education.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*. London: Pearson Education Limited.
- Peiris, A., Sun, C., & Harik, I. (2020). Lessons learned from six different structural health monitoring systems on highway bridges. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 39(3), 616-630.
- Prayuda, H., Maulana, T.I., Hidayat, A., & Anggraini, K. (2021). Pengaruh Modifikasi Penampang pada I-Girder dan Box Girder Beton Prategang terhadap Kekakuan dan Lendutan. *Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil*, 27(1):97-106.
- Precast/Prestressed Concrete Institute. (2014). *PCI Bridge Design Manual (3th ed.)*. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute.
- PT. Wijaya Karya. (2012). *Brosur Bridge Concrete Products, 1st Edition*. Jakarta: PT. Wijaya Karya (Persero).
- Sartika, D., Herbudiman, B., & Pribadi, A. (2019). Studi Komparasi Pembebanan Analisis Jembatan Cibaruyan dengan Pembebanan Jembatan Berdasarkan RSNi T-02-2005 dan SNI 1725:2016. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 5(4), 75-86.
- Seguirant, Stephen J., et al. (2005). Flexural Strength of Reinforced and Prestressed Concrete T-Beams. *PCI Journal*, 50(1), 44-73.
- Shop Drawing Lanjutan Pembangunan flyover di Ruas Jalan Lingkar Utara Tasikmalaya. (2020).
- Supriyadi, B., Siswosukarto, S., Muslikh., & Triwiyono, A. (2020). Economic Review of Variation of Prestressed Girder Length on Bridge Construction Practices. *International Journal of GEOMATE*, 19(76), 165-172.
- Wang, C.-K., Salmon, C. G., & Pincheira, J. A. (2017). *Reinforced Concrete Design (8th ed.)*. New Jersey: Wiley.
- Yang, B., Steelman, J. S., Puckett, J. A., & Linzell, D. G. (2023). Reliability-based service III evaluation for prestressed girder bridges under platoon loads. *Transportation Research Record*, 2678(7), 515-536.