

Analisis tampang box girder prategang pada jembatan kereta api cepat Indonesia

Rina Noor Sabrina¹, Mochamad Teguh^{2,*}
^{1,2} Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Article Info

Article history:

Available online

Keywords:

Bridge,
Flexural Capacity,
Prestress,
Shear Capacity,
SNI

Corresponding Author:

Mochamad Teguh
m.teguh@uii.ac.id

Abstract

The Jakarta-Bandung High-speed Railway development project is the construction of a fast train located in Halim (Jakarta) - Tegal Luar (Bandung). This project has a track length of 142,3 km, more than 80 km has an elevated structure, the rest are 13 tunnels and subgrades. In this project study, the reference for the conversion of Chinese standards to Indonesian National Standards had not been determined, so many interesting technical issues were found for study material in research. One of the research topics chosen in this final project is to calculate flexural and shear capacities of the Prestressed Box Girder.

In connection with these differences in specifications, the appearance of the girder is evaluated based on SNI 2847 of 2019 Requirements for Structural Concrete for Buildings and Explanations. As well as for loading refers to SNI 1725 of 2016 Loading for Bridges, RSNI T 12 of 2004 Planning for Concrete Structures for Bridges, SNI 2833 of 2016 Planning of Bridges Against Earthquake Loads, and PM No. 7 of 2022 Implementation of High-speed Railway.

The results obtained by evaluating refer to the Indonesian National Standard on 3 (three) variants of the same dimensions but with different thicknesses, namely for the mid-span area of 16,675 tons/m, while for the bearing wall area of 28,325 tons/m and 29,275 tons/m. The flexural capacities are 131335,412 kNm 149162,999 kNm, and 149975,051 kNm. The shear capacities are 3039493,158 kN/m, 3029369,854 kN/m, and 3028646,501 kN/m. With the result of loss of prestressed is 36,607%.

Copyright © 2023 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur di Indonesia dalam beberapa tahun terakhir ini menunjukkan perkembangan yang signifikan terutama untuk memenuhi kebutuhan sarana dan prasarana

transportasi di per-kotaan, seperti Jakarta, Bandung, Surabaya, Medan dan lain-lain. Untuk itu pemerintah telah memfasilitasi mobilitas semua kalangan masyarakat yang sangat mengandalkan transportasi umum, baik masyarakat

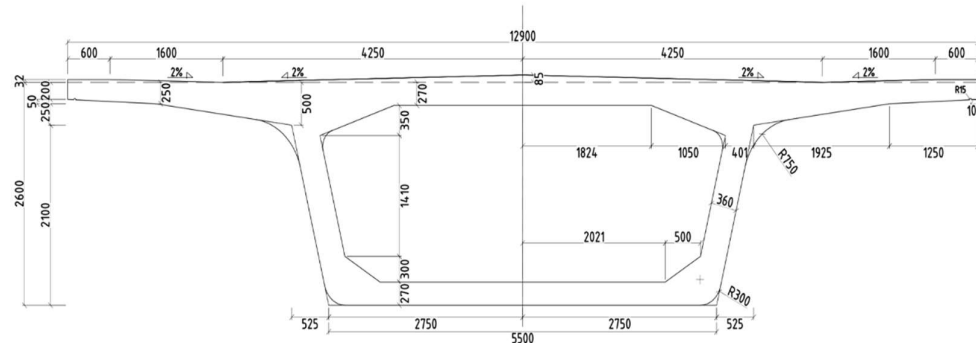
kalang-an bawah, maupun menengah, dengan menyediakan transportasi masal, seperti: KRL (Kereta Rel Listrik) dan membangun LRT (*Light Rail Transport*) dan menyusul MRT (*Mass Rapid Transport*) dan jalan tol. Namun fasilitas transportasi tersebut dirasakan masyarakat kalangan menengah atas masih belum cukup memadai seiring kebutuhan yang membutuhkan fasilitas yang lebih cepat, nyaman, dan dengan biaya terjangkau. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, pemerintah telah membangun jalan tol dan transportasi masal kereta cepat untuk melayani jalur luar kota, karena keduanya mempunyai peruntukannya masing-masing. Seiring dengan kemajuan teknologi di bidang transportasi saat ini, kemajuan pembangunan infrastruktur dan konstruksi di Indonesia semakin berkembang pesat. Salah satu pembangunan infrastruktur tersebut ialah proyek pembangunan *Jakarta-Bandung High Speed Railway (JBHSR)*. Proyek tersebut merupakan pembangunan kereta cepat yang berlokasi di Halim (Jakarta), dan mulai dibangun pada tahun 2015 dan direncanakan tahun 2023 sudah beroperasi untuk melayani jalur Halim (Jakarta) menuju Tegal Luar (Bandung) dan sebaliknya. Proyek ini memiliki panjang *trase* 142,3 km, lebih dari 80 km memiliki struktur *elevated* sisanya berupa 13 terowongan dan *subgrade*. Proyek *Jakarta-Bandung High Speed Railway* ini dibangun untuk mengatasi masalah transportasi yang begitu masif. Dengan latar belakang Indonesia yang belum pernah memiliki pengalaman dalam hal teknologi kereta cepat, maka pemerintah bekerja sama dengan pihak pemerintah Cina dalam hal pembangunan kereta cepat tersebut. Pihak Cina mendesain dan merencanakan jalur kereta cepat tujuan Jakarta-Bandung. Proyek ini merupakan proyek kereta cepat pertama di Indonesia, baik dalam hal perencanaan maupun dalam pelaksanaannya terdapat banyak aspek

keilmuan yang menarik untuk dikaji lebih mendalam. Proyek ini direncanakan oleh pihak Cina, sedangkan pihak Indonesia sendiri memiliki tim yang bertugas dalam mengkaji hasil perencanaan mereka secara eksperimental dan dilakukan oleh pihak Laboratorium Institut Teknologi Bandung. Dari hasil kajian tersebut disimpulkan bahwa perencanaan tersebut disetujui untuk digunakan di Indonesia karena dianggap telah memenuhi spesifikasi beberapa standar SNI terkait desain jembatan.

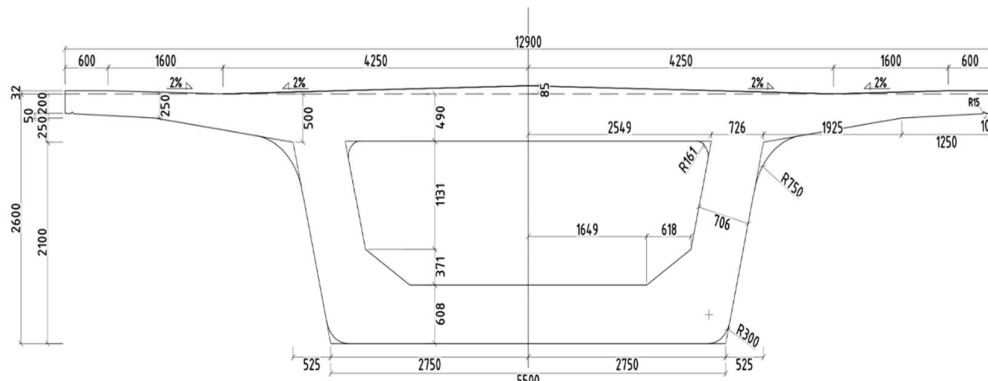
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tampang balok beton prategang pada salah satu seksi di bagian P76-P77 dari jembatan panjang untuk lintasan kereta api cepat. Mengingat desain jembatan kereta cepat ini sepenuhnya didesain menggunakan standar Cina, dan belum ada konversinya terhadap standar SNI yang telah ada di Indonesia, maka analisis tampang ini difokuskan pada kapasitas lentur dan geser balok tersebut dengan mengikuti standar SNI terkait dengan desain jembatan. Proyek pembangunan JBHSR ini menginspirasi banyak hal teknis yang menarik untuk dikaji dalam penelitian mendatang, karena proyek ini merupakan *pilot project* pertama untuk kereta cepat Indonesia. Salah satu topik kajian yang dipilih dalam penelitian ini adalah menganalisis tampang *box girder* prategang untuk menentukan kapasitas lentur dan geser *prestressed box girder*. Penelitian ini mengambil subjek pada bagian P76-P77 berpenampang tipe *prestressed box girder* dengan dimensi terluar: tinggi 2,6 m, lebar 12,9 m, dan panjang bentangan 32,6 m. Jembatan ini menggunakan tampang balok berbentuk *box girder* sistem *post tension* dengan variasi ketebalan pada keempat sisi-sisinya, namun memiliki dimensi terluar sama. Sepanjang bentangan jembatan *box girder* dipasang sebanyak 3 (tiga) tipe tampang, seperti terlihat pada Gambar 1-3 dengan susunan tampang

tipe 1 dipasang di sepanjang bentangan (daerah lapangan), sedangkan tampang tipe 2 dan 3 dipasang di daerah dekat tumpuan sederhana (*simple beam support*). Penelitian ini hanya difokuskan pada titik P76-P77 tersebut mengingat bahwa jembatan ini merupakan jembatan

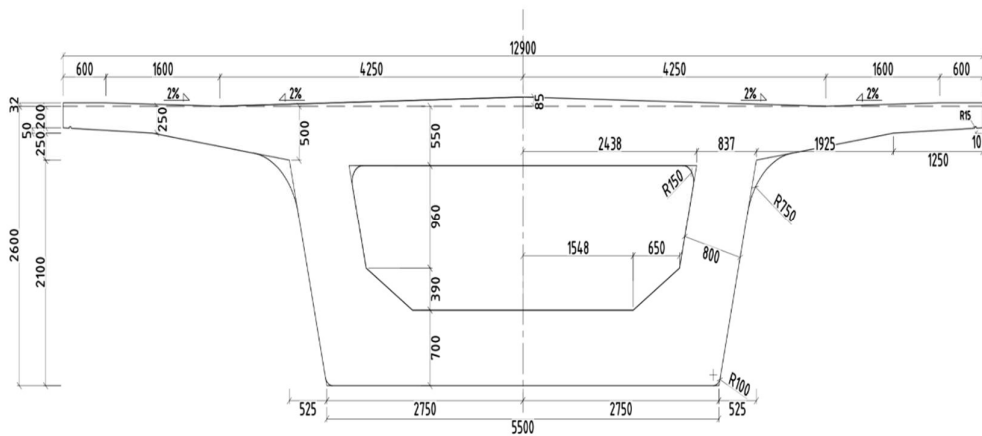
bentangan panjang, yang memiliki kompleksitas permasalahan desain dan pelaksanaan yang cukup tinggi, sehingga untuk menganalisis secara keseluruhan akan membutuhkan *team work* dari multi disiplin.



Gambar 1. Dimensi tampang tipe 1 (dalam mm)



Gambar 2. Dimensi tampang tipe 2 (dalam mm)



Gambar 3. Dimensi tampang tipe 3 (dalam mm)

Metode Penelitian

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian bertempat di Kantor Kereta Cepat Indonesia China, yang terletak di Jalan Tol Jakarta – Cikampek KM 0+800, Halim Perdanakusuma, Kecamatan Makasar, Jakarta Timur. Penelitian hanya terfokus pada salah satu bagian kecil yaitu P76-P77.

Tahapan Penelitian

Tahapan dalam analisis kapasitas tampang *prestressed box girder*, yaitu:

1. mengidentifikasi data proyek dan melengkapinya bila diperlukan,
2. menghitung pembebanan yang terjadi pada jembatan sesuai dengan mengacu:
 - a. SNI 1725 Tahun 2016 Pembebanan Pada Jembatan,
 - b. SNI 2833 Tahun 2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa,
 - c. RSNI T 12 2004 Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan, dan
 - d. PM No 7 Tahun 2022 Penyelenggaraan Kereta Api Kecepatan Tinggi,
3. selanjutnya, perhitungan untuk kehilangan prategang, kapasitas lentur, dan kapasitas geser didasarkan pada SNI 2847 Tahun 2019

Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasannya, 4. melakukan pembahasan terkait hasil perhitungan analisis, dan kesimpulan.

Data Teknis

Data teknis jembatan: panjang, $L = 32,6$ m, lebar *box girder*, $B = 12,9$ m. Tinggi *box girder*, $h = 2,6$ m. Detail penampang tertulis secara lengkap dalam Gambar 1 – 3.

Data Material

Spesifikasi desain jembatan pada proyek KCIC Halim-Tegal Luar menggunakan standar Cina yaitu *Code for Design of Concrete Structure of Railway Bridge and Culvert (TB10092-2017)* dan *Standard for Constructional Quality Acceptance of Railway Concrete Engineering (TB10424-2010)*. Selanjutnya hasil desain tersebut dianalisis dan dikonversi ke dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) terkait sebagai jembatan tersebut.

Mutu beton yang digunakan adalah C50 atau setara dengan beton K-500 dengan kuat tekan setara dengan $f'_c = 33,5$ MPa. Modulus elastisitas beton, $E_c = 3,55 \times 10^4$ MPa, dan modulus geser, $G = 15265$ MPa serta rasio poisson, $\alpha = 0,2$. Mutu baja prategang berdasarkan 1x7-15,2-1860-GB/T 5224-2014 *Steel Strands for Prestressed Concrete* seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data strands for prestressed concrete

Jenis strand	Uncoated Stress Relieved 7 Wire Strands		
Kuat tarik strand	f_{pu}	1860	MPa
Diameter nominal strand	D	15,2	mm
Modulus elastik strand	E_s	195000	MPa
Rasio relaksasi		0,24	%
Slip pada angkur	Δ_A	0,006	m
Koefisien friksi	μ	0,55	-
Koefisien wobble	K	0,0015	-
Luas tampang nominal strand	A_{st}	140	mm ²
Beban putus minimal strand	P_{bs}	260	kN

Metode analisis

Beton prategang

Beton dengan komposisi bahan material campuran berupa kerikil, pasir, semen,

dan air yang dapat menahan kuat tekan, akan tetapi lemah dalam menahan kuat tarik, sehingga memerlukan baja sebagai material yang dapat menahan tarikan.

Dengan mengombinasikan kedua bahan material tersebut akan menjadi material beton bertulang, yang dapat memiliki kuat tekan yang baik tetapi kuat tariknya berkisar 8-15% dari kuat tekannya. Beton prategang didefinisikan sebagai beton yang mengalami tegangan internal yang cukup besar dan distribusinya sedemikian rupa, sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal. Di dalam praktek di lapangan beton prategang dibedakan menjadi 2 jenis yaitu pratarik (*pretension*) dan paska tarik (*post tension*). Prinsip dari pratarik (*pretension*) ialah tendon diberikan penegangan pada *strand* terlebih dahulu sebelum dilakukan pengecoran, sedangkan pada paska tarik (*post tension*) prinsipnya adalah beton

dibiarkan mengeras terlebih dahulu (28 hari), kemudian setelah beton mengeras dilakukan penegangan pada *strand*-nya.

Pembebanan pada jembatan

Pada pembebanan jembatan kereta api kecepatan tinggi didasarkan pada SNI 1725 Tahun 2016 tentang Pembebanan Untuk Jembatan dan PM No 7 Tahun 2022 Penyelenggaraan Kereta Api Kecepatan Tinggi, sedangkan untuk pembebanan gempa berdasarkan SNI 2833 Tahun 2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa. Pada PM No 7 Tahun 2022 diadaptasi dari peraturan Cina yaitu *Code for Design on Railway Bridges and Culvert*. Pembebanan pada jembatan kereta api kecepatan tinggi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pembebanan pada kereta api cepat

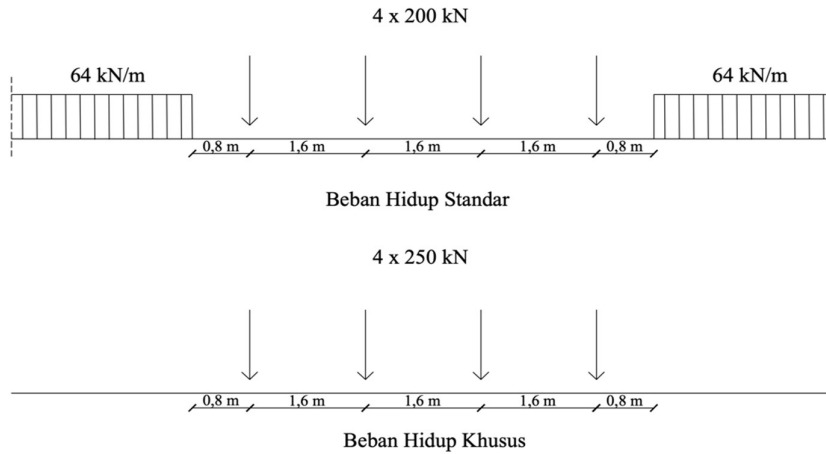
Klasifikasi Beban	Beban
Beban Mati	Beban sendiri dan beban mati tambahan
	Gaya prategang
	Efek rangkai dan susut beton
	Tekanan tanah
	Tekanan air statis atau gaya apung
Beban Utama	Efek akibat penurunan fondasi
	Beban statis kereta
	Efek dinamis kereta
	Beban akibat muai susut rel
	Gaya sentrifugal
	Beban <i>hunting/nosing</i>
	Beban hidup kereta diinduksi tekanan tanah
Beban pejalan kaki	
Beban Tambahan	Beban aerodinamis
	Beban pengereman
	Beban traksi
	Beban angin
Beban Khusus	Pengaruh perubahan suhu
	Beban <i>derailment</i>
	Pengaruh tumbukan kendaraan
	Beban konstruksi
	Efek gempa bumi
	Gaya pengereman rel panjang

Beban Mati

Berdasarkan PM No 7 Tahun 2022, berat mati mencakup berat masing-masing bagian struktural dan elemen-elemen non struktural.

Beban Hidup

Beban hidup yang digunakan pada jembatan kereta api kecepatan tinggi terdiri dari beban hidup standar dan beban hidup khusus dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Beban hidup standar dan beban hidup khusus

Skema pembebanan antara beban hidup standar dan beban hidup khusus ditinjau dari panjang bentang jembatan yang akan direncanakan. Efek beban dinamis dari beban hidup vertikal kereta harus dimasukkan dalam hitungan struktur. Nilai dari efek beban dinamis untuk jembatan harus dihitung dengan berdasarkan persamaan (1) dan tidak boleh kurang dari 1,0 ($\leq 1,0$).

$$1 + \mu = 1 + \left(\frac{1,44}{\sqrt{L_\phi} - 0,2} - 0,18 \right) \tag{1}$$

dengan L_ϕ adalah panjang beban (m).

Kehilangan prategang

Kehilangan prategang terdiri dari 2 (dua) jenis yaitu kehilangan prategang jangka pendek dan jangka panjang. Kehilangan prategang jangka pendek dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut.

1. Pemendekan elastis

Hal ini disebabkan oleh memendeknya beton pada saat gaya prategang bekerja memenuhi persamaan (2):

$$\Delta f_{ES} = \varepsilon_{ES} \times E_p \tag{2}$$

dengan:

$$\Delta_{ES} = L \times \frac{P_i}{A \times E_c} \tag{3}$$

keterangan:

- L = panjang lintasan tendon (m).
- P_i = gaya prategang awal (kN).
- A = luas tampang beton (m²).
- E_c = modulus elastisitas beton (MPa).
- Δf_{ES} = kehilangan prategang (MPa).
- E_p = modulus elastis prategang (MPa).

2. Pergeseran pada ankur

Kehilangan prategang ini dikarenakan adanya blok-blok pada ankur pada saat gaya *jacking* ditransfer ke ankur, sehingga digunakan persamaan (4):

$$\Delta f_A = \varepsilon \Delta_A \times E_p \tag{4}$$

keterangan:

- Δ_A = slip pada ankur (2-6 mm).
- Δf_A = kehilangan prategang (MPa).
- E_p = modulus elastis prategang (MPa).

3. Efek kelengkungan dan *wobble*

Pada saat ditarik, ujung pendongkrakan tendon tersebut akan mengalami gesekan antara tendon dan beton di sekelilingnya akibat efek *wobble* (penyimpangan lintasan tak terencana). Persamaan (5) dipakai untuk menentukan pengaruh kelengkungan dan *wobble*:

$$\Delta f_F = \frac{(P_o - P_x)}{A_p} \tag{5}$$

dengan:

$$P_x = P_o \times e^{-(kl_x + \mu \alpha)} \tag{6}$$

keterangan:

P_x = gaya prategang setelah kehilangan akibat friksi (kN).

P_o = gaya prategang awal (kN).

K = koefisien *wooble*.

μ = koefisien friksi.

L_x = panjang lengkung (m).

α = jumlah total perubahan sudut sepanjang lintasan.

- Pengaruh rangkak
Rangkak merupakan bertambahnya deformasi beton secara bertahap pada suatu tegangan tertentu, sehingga pengaruh rangkak ini dapat ditentukan menurut persamaan (7):

$$\Delta f_{CR} = \varepsilon_{cc,t} \times E_s \quad (7)$$

dengan:

$\varepsilon_{cc,t}$ = regangan pada rangkak beton.

ε_e = regangan *elastic shortening*.

- Pengaruh susut
Susut pada beton diakibatkan oleh menguapnya air pada adukan beton setelah dicor yang dapat menyebabkan pengurangan volume. Susut pada beton juga dapat mengakibatkan perpendekan kabel-kabel yang ditegangkan, dan persamaan (8) dipakai untuk menentukan efek ini.

$$\Delta f_{SH} = \varepsilon_{SH} \times E_s \quad (8)$$

dengan:

ε_{SHu} = tegangan susut ultimit (820×10^{-6} mm/mm).

- Relaksasi tendon
Hal ini diakibatkan dari perpanjangan konstan terhadap waktu. Persamaan (9) dapat digunakan untuk menghitung relaksasi tentu:

$$\Delta f_R = f'_{pi} \frac{\log \log t}{10} \left(\frac{f'_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (9)$$

dengan:

Δf_{pR} = kehilangan prategang yang terjadi (MPa).

f'_{pi} = tegangan leleh tendon prategang (MPa).

T = durasi waktu kondisi terbebani (jam).

Kapasitas Lentur

Berdasarkan SNI 2847-2019, kapasitas lentur dapat ditentukan menurut persamaan (10):

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} \frac{f_y}{f'_c} (\rho - \rho') \right] \right\} \quad (10)$$

dengan:

f_{ps} = tegangan tarik prategang (MPa).

f_{pu} = kuat tarik stand (MPa).

f'_c = kuat tekan beton (MPa).

β_1 = distribusi tegangan.

d = kedalaman tulang non prategang (mm).

d_p = kedalaman tulangan prategang (mm).

ρ = rasio tulangan tarik non prategang.

ρ' = rasio tulangan tekan non prategang.

Kapasitas Geser

Mengacu pada SNI 2847-2019, untuk kapasitas geser ditentukan dari nilai yang mendekati V_c dari persamaan-persamaan sebagai berikut ini.

$$V_c = \left[0,05\lambda \sqrt{f'_c} + 4,8 \frac{V_u d_p}{M_u} \right] b_w d \quad (11)$$

$$V_c = \left[0,05\lambda \sqrt{f'_c} + 4,8 \right] b_w d \quad (12)$$

$$V_c = 0,42\lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (13)$$

dengan:

f'_c = kuat tekan beton (MPa).

V_u = Gaya geser ultimit (kN/m).

d_p = letak tulangan baja prategang (mm).

M_u = Momen ultimit (kNm).

d = jarak serat tekan terjauh ke sentroid prategang dan tulangan longitudinal non prategang (mm).

Hasil dan Pembahasan

Section Properties

Rekapitulasi hasil perhitungan *section properties* setiap tampang didasarkan pada Gambar 1-3, dan selengkapnya disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil *Section Properties*

Tipe Tampang	Luas	Titik Berat		Momen Inersia		Modulus Ratio		Radius Girasi
	A_c (m ²)	y_b (m)	y_a (m)	I_b (m ⁴)	I_x (m ⁴)	S_b (m ³)	S_a (m ³)	r^2 (m)
1	6,67	1,629	0,971	24,117	6,418	3,939	6,613	0,963
2	11,33	1,450	1,150	33,214	9,396	6,479	8,171	0,830
3	11,71	1,404	1,196	32,953	9,865	7,025	8,249	0,842

Pembebanan Pada Jembatan

Rekapitulasi hasil pembebanan dapat dilihat pada Tabel 4-6 dengan 3 (tiga) variasi dimensi luar yang sama, tetapi ketebalan dinding berbeda-beda (tipe 1-3).

Tabel 4. Rekapitulasi hasil pembebanan pada tampang tipe 1

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	V (kN)
1	Berat sendiri	MS	166,75		11609,1	1967,65
2	Beban mati tambahan	MA	160		11139,2	1888
3	Beban "T"	TT	64	9375,459	55692,8	5442,93
4	Beban pejalan kaki	TP	7,5		522,15	88,5
5	Beban gaya rem	TB			472	40,000
6	Beban angin	EW	2,849		198,332	33,616
7	Beban gempa	EQ	32,675		2274,834	385,565

Tabel 5. Rekapitulasi hasil pembebanan pada tampang tipe 2

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	V (kN)
1	Berat sendiri	MS	283,25		318,656	1274,625
2	Beban mati tambahan	MA	160		180	240
3	Beban "T"	TT	64	9375,459	7103,594	4783,730
4	Beban pejalan kaki	TP	7,5		8,438	11,25
5	Beban gaya rem	TB			60	40,000
6	Beban angin	EW	2,849		3,205	4,273
7	Beban gempa	EQ	44,325		49,866	66,488

Tabel 6. Rekapitulasi hasil pembebanan pada tampang tipe 3

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	V (kN)
1	Berat sendiri	MS	292,75		82,336	219,563
2	Beban mati tambahan	MA	160		45	120
3	Beban "T"	TT	64	9375,46	3533,8	4735,73
4	Beban pejalan kaki	TP	7,5		2,109	5,625
5	Beban gaya rem	TB			30	40,000
6	Beban angin	EW	2,849		0,801	2,137
7	Beban gempa	EQ	45,275		12,734	33,956

Tegangan Ijin dan Tendon

Tegangan ijin beton

1. Saat Transfer

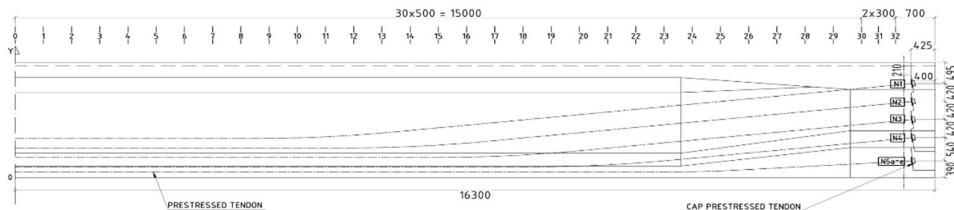
$$f_{ti} = 0,25 \times \sqrt{f_{ci}'} = 1,294 \text{ MPa}$$

$$f_{ci} = 0,6 \times f_{ci}' = 16,08 \text{ MPa}$$

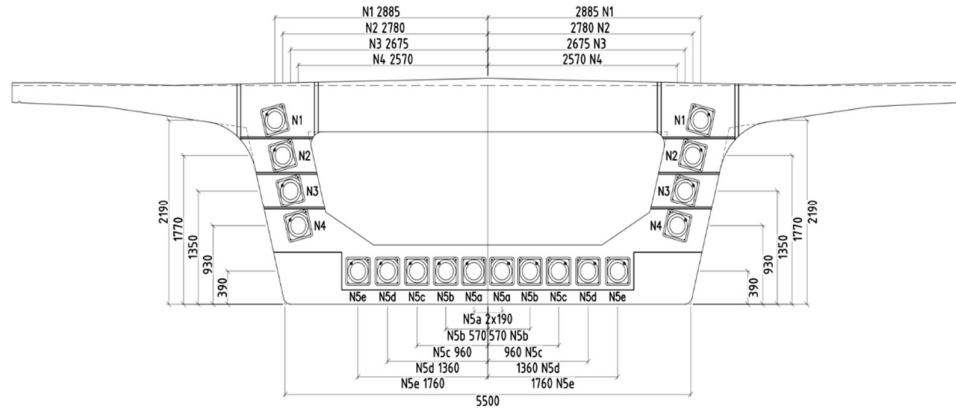
2. Saat Service

$$f_t = 0,5 \times \sqrt{f_c'} = 2,894 \text{ MPa}$$

$$f_c = 0,6 \times f_c' = 20,100 \text{ MPa}$$



Gambar 5. Lintasan tendon



Gambar 6. Posisi tendon

Gambar 5 menunjukkan lintasan tendon dan posisi tampang tipe 1-3. Gambar 6 memperlihatkan posisi tendon. Jarak titik berat dari bawah, $y_b = 1,494$ m.

Eksentrisitas tendon, $e_s = 1104,333$ mm. Diameter tendon, $D = 15,2$ mm. Luas satu tendon, $A_p = 181,458$ mm².

Tabel 7. Rekapitulasi Tendon

No	Tendon		Jarak Dari Bawah		Tendon Properties	
	Type	#Tendon	e_s end	e_s mid	Strand	Luas (mm ²)
1	N1	2	2290	850	15	181,458
2	N2	2	1840	650	15	181,458
3	N3	2	1390	450	15	181,458
4	N4	2	940	250	15	181,458
5	N5a	1	390	125	10	181,458
6	N5b	2	390	125	10	181,458
7	N5c	2	390	125	11	181,458
8	N5d	2	390	125	11	181,458
9	N5e	2	390	125	11	181,458
10	N5f	2	390	125	11	181,458

Kehilangan prategang

1. Pergeseran Angkur
Slip pada ankur (2-6 mm), $\Delta_A = 6$ mm.
Kehilangan prategang,
 $\Delta f_A = \epsilon \Delta_A \times E_s$
 $= 35,890$ MPa
2. Efek Kelengkungan dan *Wooble*
Koefisien *wooble*, $K = 0,0015$.
Koefisien friksi, $\mu = 0,55$.
Kehilangan prategang akibat gesekan kabel,
 $\Delta f_F = \frac{(P_i - P_x)}{A_{ps}} = 93$ MPa
3. Pemendekan Elastis
Kehilangan prategang akibat pemendekan elastis,
 $\Delta f_{ES} = n \times f_{CS} = - 55,056$ MPa

4. Pengaruh Rangkak
Koefisien rangkak, $K_{cr} = 1,6$ (pasca tarik).
Kehilangan prategang akibat pengaruh rangkak,
 $\Delta f_{CR} = n \times K_{cr} \times (f_{CS} - f_{csd})$
 $= - 92,352$ MPa
5. Pengaruh Susut
Kehilangan prategang akibat pengaruh susut,
 $\Delta f_{pSH} = \epsilon_{SH} \times E_s = 73,8$ MPa
6. Relaksasi Tendon
Kehilangan prategang akibat relaksasi tendon,
 $\Delta f_{PR} = f_{pi} \times \left(\frac{\log \log t_2 - \log \log t_1}{45} \right) \times \frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55$
 $= 126,72$ MPa

Hasil perhitungan kehilangan prategang disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Kehilangan prategang

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (MPa)	(%)
1	Sesudah penarikan	1302	100
2	Pergeseran angkur	35,890	2,756
3	Pemendekan elastik	55,056	4,229
4	Efek Kelengkungan dan <i>Wooble</i>	93	7,143
5	Pengaruh rangkai	92,352	7,093
6	Pengaruh susut	73,608	5,653
7	Relaksasi tendon	126,720	9,733
	Total	476,625	36,61

Kapasitas lentur

Perhitungan kapasitas lentur ini didasarkan pada SNI 2847 Tahun 2019.

Distribusi tegangan, $\beta_l = 0,811$.

Rasio tulangan prategang,

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{A_c} = 0,009$$

Nilai γ_p diperoleh dari perbandingan:

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = \frac{1581}{1860} = 0,85$$

Nilai γ_p yang digunakan adalah 0,4.

Tegangan pada tendon,

$$f_{ps} = 1399,783 \text{ MPa}$$

Momen nominal,

$$M_n = A_{ps} \times f_{ps} \times \left(d_p - \frac{a}{2}\right) = 164169,27 \text{ kNm}$$

Faktor reduksi, $\phi = 0,8$.

Kapasitas geser

Mengacu SNI 2847-2019, kapasitas geser diperoleh dapat dihitung dengan persamaan berikut.

Jarak dari serat tekan ke tulangan tarik,

$$d = \frac{A_{ps} \times d_p + A_c \times d_s}{A_{ps} + A_c} = 2536,01 \text{ mm}$$

Persamaan untuk pendekatan nilai lentur ialah:

$$V_{c1} = 3039473,513 \text{ N}$$

$$V_{c2} = 70005641,96 \text{ N}$$

$$V_{c3} = 25440042,66 \text{ N}$$

Kapasitas lentur dan geser setiap tipe tampang dirinci pada Tabel 9.

Tabel 9. Kapasitas lentur dan geser

Tipe tampang	Kapasitas tampang (kN)	
	Lentur	Geser
1	131335,412	3039473,513
2	149162,999	3029374,340
3	149975,051	3028652,541

Proyek *Jakarta-Bandung High-speed Railway* merupakan salah satu bentuk kerjasama Indonesia di bidang konstruksi dengan Cina dalam pembangunan kereta api cepat. *Pilot project* ini mendorong semua pemangku kepentingan terhadap penyediaan sarana dan prasarana transportasi di Indonesia untuk belajar dan mengadopsi teknologi dari Cina, sehingga diharapkan terjadi *transfer of knowledge* kepada bangsa Indonesia untuk menguasai teknologi modern yang akan menjadi

kebutuhan masyarakat Indonesia dari semua kalangan. Namun kenyataan di lapangan menunjukkan kondisi lain yang tidak sepenuhnya sesuai dengan harapan, karena dokumen perencanaan kereta cepat Jakarta-Bandung ini sangat dirahasiakan. Sebagai contoh dalam desain jembatan masih sepenuhnya menggunakan standar Cina, tanpa ada dokumen konversi/kesesuaian dengan standar Indonesia (SNI) yang berlaku. Untuk meyakini terhadap desain-desain dari Cina tersebut, maka

pemerintah Indonesia menugaskan Institut Teknologi Bandung untuk melakukan pengujian eksperimental terhadap *box girder* yang digunakan untuk jembatan kereta api cepat, namun hasilnya juga tidak bisa diakses publik, jika ingin melakukan penelitian.

Penelitian ini merupakan kajian analitis terhadap *box girder* untuk menentukan kapasitas tampang terhadap 3 (tiga) tipe tampang. Tabel 9 memperlihatkan kapasitas tampang lentur dan geser untuk setiap tipe menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan. Kondisi ini disimpulkan kekuatan *box girder* sepanjang bentangan memiliki kapasitas yang cukup memadai untuk ketiga tumpangannya, meskipun tidak dapat dibandingkan secara actual dengan hasil pengujian eksperimental.

Kesimpulan

Hasil dari analisis yang dilakukan, didapatkan bahwa:

1. Pada pembebanan jembatan dan kehilangan prategang yang terjadi didapatkan hasil:
 - a. Pada pembebanan khususnya berat sendiri balok didapatkan hasil pada penampang tipe 1 dengan luas 6,67 m² dan panjang 23,6 m didapatkan berat sendiri balok sebesar 166,75 kN/m. Pada penampang tipe 2 dengan luas 11,33 m² dan Panjang 3 m menghasilkan berat sendiri balok sebesar 283,25 kN/m. Serta pada penampang tipe 3 dengan luas 11,71 m² dan Panjang 1,5 m didapatkan sebesar 292,75 kN/m.
 - b. Kehilangan prategang yang didapatkan sebesar 36,607%.
2. Hasil perhitungan untuk kapasitas lentur dan kapasitas geser diperoleh:
 - a. Kapasitas lentur yang didapatkan dari penampang tipe 1 sebesar 131335,412 kNm, penampang tipe 2 sebesar 149162,999 kNm, dan penampang tipe 3 sebesar 149975,051 kNm.
 - b. Kapasitas geser yang dihasilkan untuk analisis penampang tipe 1 ialah 3039473,513 kN, penampang tipe 2 ialah 3029374,340 kN, dan penampang tipe 3 ialah 3028652,541 kN.

Daftar Pustaka

- Allen, A. H. Tanpa Tahun. *An Introduction To Prestressed Concrete*. Cement and Concrete Association.
- Badan Standarisasi Nasional. 2017. *Baja Tulangan Beton*. SNI 2052:2017. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2004. *Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan*. RSNI T-12-2004. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2016. *Pembebanan Untuk Jembatan*. SNI 1725:2016. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2016. *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*. SNI 2833:2016. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta.
- China Railway Design Corporation. 2019. *Jakarta to Bandung High-Speed Railway, Indonesia Halim-Tegal Luar Section Construction Drawing Post Tensioned Prestressed Concrete Simply Supported Box Girder for Ballasted Tracks*. Tianjin.
- Gumilar, E. Cahya dan Walujodjati, E. 2022. Analisis Kapasitas Box Girder Pada Jembatan. *Jurnal Konstruksi*. Vol.20 No.1:126-138. Garut.
- Ilham, M. Noer. 2010. *Bridge Engineer and Building Structure Engineer*, (<http://mnoerilham.blogspot.com>, Diakses 10 Desember 2021).
- Lin, T. Y and Burns, Ned H. 1981. *Prestressed Concrete Construction*. John Wiley and Sons. New York.
- Nawy, Edward G. Tanpa Tahun. *Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar*. Terjemahan oleh Bambang Suryoatmono. 2001. Erlangga. Jakarta.
- Rahmawati, A. W. Suci. 2019. Perbandingan Desain Struktur Balok Sederhana Bentang 50 m Menggunakan Prestressed TGirder dan Prestressed Box Girder. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Rezki, Muhammad. 2018. Analisa Jembatan Box Girder Prestressed. *Tugas*

- Akhir.* (Tidak Diterbitkan).
Universitas Muhammadiyah
Sumatera Utara. Sumatera Utara.
- Peraturan Menteri Perhubungan. 2022.
*Penyelenggaraan Kereta Api
Kecepatan Tinggi.* PM 7 Tahun
2022. Jakarta.
- Peraturan Menteri Perhubungan. 2012.
*Persyaratan Teknis Jalur Kereta
Api.* PM 60 Tahun 2012. Jakarta
- Presiden Republik Indonesia. 2007.
Perkeretaapian. Undang-Undang
Republik Indonesia Nomor 23
Tahun 2007. Jakarta.
- Presiden Republik Indonesia. 2004. *Jalan.*
Undang-Undang Republik
Indonesia Nomor 38 Tahun 2004.
Jakarta.
- PT. Kereta Cepat Indonesia China. 2016.
*Detailed Engineering Design Halim
Tegal Luar Section.* Jakarta.
- Supriyadi, Bambang dan Muntohar, Agus
Setyo. 2007. *Jembatan.* Beta Offset.
Yogyakarta.