



Analisis Kapasitas Box Girder pada Jembatan

Eka Cahya Gumilar¹, Eko Walujodjati²

Jurnal Kontruksi
Institut Teknologi Garut
Jl. Mayor Syamsu No. 1 Jayaraga Garut 44151 Indonesia
Email : jurnal@itg.ac.id

¹1711030@itg.ac.id

²eko.walujodjati@itg.ac.id

Abstrak – Proyek Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Selatan Paket 3-Induk, merupakan Tol yang terintegritas dengan Tol *Jakarta Outer Ring Road* (JORR) dan Tol Purbaleunyi di Sadang Purwakarta. Pengerjaan Jembatan menggunakan box girder sebagai gelagar utama Jembatan dengan metode kontruksi *balance cantilever* dan pengecorannya menggunakan cast in-situ pada *Traveler Form*. sehingga diperlukan analisis kapasitas box girder jembatan tersebut. Metode Penelitian yang digunakan oleh penulis adalah metode pendekatan secara kuantitatif. Aspek-aspek peraturan yang dipakai dalam perencanaan struktur jembatan beton menggunakan SNI 1725-2016 (Standar Pembebanan untuk Jembatan), dan RSNI T-12-2004 (Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan). Setelah dilakukan analisis ada beberapa kesimpulan yang diperoleh yaitu, Gaya prategang awal sebesar $P_i = 150770,11$ kN dengan Kehilangan prategang (*Loss of Prestress*) box girder diperkirakan 30 % dan total kehilangan prategang pada masing-masing box girder adalah: Box girder H = 5,620 m sebesar 16,583 %, Box girder H = 4,144 m sebesar 17,530 %, Box girder H = 3,034 m sebesar 18,588 %. Untuk kapasitas momen ultimate (M_u) = 981110,9928 kNm > momen ultimate akibat beban (M_n) = 968729,168 kNm, sehingga kontrol kapasitas momen dianggap sudah memenuhi. Lentutan maksimum yang diijinkan adalah $\delta = 0,5$ m, sedangkan total lentutan yang diperoleh adalah $\delta_T = 0,0485$ m (\downarrow), apabila melalui program analisis struktur diperoleh lentutan sebesar $\delta = 0,004216$ m, sehingga lentutan dinyatakan telah memenuhi persyaratan yang telah di tetapkan. Untuk analisis berikutnya dapat dilakukan analisis struktur bawah jembatan.

Kata Kunci – Beton Prategang; Box girder; Jembatan Citarum; Kapasitas Momen; Lentutan.

I. PENDAHULUAN

Teknologi sejatinya sudah menjadi inovasi untuk digunakan dalam segala hal baik pada kehidupan sehari-hari maupun pada bidang-bidang yang lainnya terutama pada sektor kontruksi. Pemanfaatan teknologi yang digunakan pada sektor kontruksi di Indonesia, memberikan dampak bagi kelangsungan hidup manusia baik dari segi positif maupun negative nya. Dengan berkembangnya teknologi manusia dapat mengimplementasikan teknologi salah satunya pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Selatan, di mana terdapat teknologi, yaitu penggunaan beton prategang atau precast dalam membangun fly over, jembatan dan lain-lain [1].

Pada proyek pembangunan Jalan Tol Jakarta-Cikampek II Selatan ini, terdapat pembangunan jembatan yang melintasi sungai citarum dimaksudkan untuk menjaga ekosistem di daerah bantaran sungai citarum, jembatan ini dibangun menggunakan metode *balance cantilever* dengan spasioal span box girder dan perkuatan prategang pada arah longitudinal. Penggunaan beton prategang dimulai sejak Eugene Freyssinet memperkenalkan penggunaan kawat baja berkekuatan tinggi disamping beton mutu tinggi, sejak saat itu penggunaan sistem

prategang untuk struktur jembatan khususnya untuk bentang menengah sampai bentang panjang melaju dengan pesatnya dan bersaing dengan struktur baja bahkan dikembangkannya sistem *cantilever* dan *cabl stayed* [2]. Pemasangan beton prategang berupa box girder pada jembatan citarum menggunakan pengecoran cast in-situ dengan sistem struktur pada saat kontruksi berupa balance cantilever dengan ketentuan unbalance maksimal 1, sehingga penerimaan beban dari deks jembatan yang kemudian disalurkan ke kolom (pier) [3], [4]. Maka untuk mengetahui kapasitas pada struktur Jembatan Citarum diperlukan analisis setiap element yang ada pada Jembatan Citarum terutama pada Box Girder. Oleh karena itu, dibutuhkan pemodelan dengan menggunakan Program Analisis Struktur.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Jembatan

Jembatan adalah bangunan pelengkap lalu lintas jalan raya yang menghubungkan suatu kawasan dengan kawasan yang lainnya, dan berfungsi sebagai titik penghubung bagi lalu lintas yang terganggu oleh rintangan seperti sungai, rel kereta api, lautan, dan lembah [5], [6]. Jembatan juga merupakan bagian jalan yang sangat penting dalam prasarana transportasi, sehingga harus memenuhi persyaratan yaitu:

1. Keamanan
2. Kenyamanan
3. Estetika
4. Keawetan
5. Kemudahan pengerjaan dan
6. Ekonomis

Jenis jembatan yang sering ditemukan adalah jembatan dengan beton prategang karena mempunyai efisiensi yang tinggi dan mampu menahan gaya yang bekerja pada jembatan dengan baik [2]. Jembatan beton prategang atau yang sering dikenal dengan prestressed concrete bridge merupakan salah satu jenis jembatan dengan material konstruksi berupa beton yang berisi kawat baja untuk memberikan tegangan berupa tegangan tekan terhadap beton agar dapat mengurangi lendutan akibat beban kerja [5].

B. Beton Prategang

Beton prategang adalah jenis beton dimana tulangan bajanya ditarik atau ditegangkan terhadap betonnya. Penarikan ini menghasilkan sistem keseimbangan pada tegangan dalam (Tarik pada baja dan tekan pada beton) yang akan meningkatkan kemampuan beton menahan beban luar [7].

Menurut ACI, beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan dalam dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban luar [8]. Untuk mengurangi atau mencegah berkembangnya retak tersebut, gaya konsentris atau eksentris diberikan dalam arah longitudinal elemen structural. Gaya ini sangat mengurangi tegang tarik di bagian tumpuan dan daerah kritis pada kondisi beban bekerja, sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan torsional penampang tersebut.

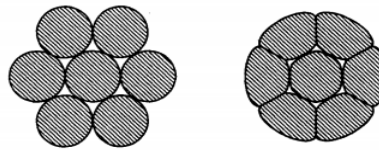
C. Material Beton Prategang

1. Beton
Beton merupakan campuran antara semen, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat. beton yang mempunyai kuat tekan silinder f_c' melebihi 60 MPa adalah beton dengan mutu tinggi, sedangkan beton normal dengan berat isi ± 2400 kg/m³, antara 20 MPa s.d 60 MPa, sehingga mutu beton yang kurang dari 30 MPa tidak disyaratkan untuk digunakan untuk struktur beton prategang [9].

2. Tulangan Prategang

Kehilangan tegangan akibat rangkak (*creep*) dan susut (*shrinkage*) pada beton cukup besar, sehingga pemberian tegangan tekan pada beton akan lebih efektif bila menggunakan baja mutu tinggi. Pemakaian tendon untuk tulangan beton prategang harus memenuhi salah satu spesifikasi berikut [5], [10]:

- a. Kawat yang memenuhi “Spesifikasi untuk baja *stress-relieved* tanpa lapisan untuk beton prategang” (ASTM A421).
- b. Kawat dengan relaksasi rendah yang memenuhi “Spesifikasi untuk kawat baja *stress-relieved* tanpa lapisan untuk beton prategang termasuk kawat dengan relaksasi rendah” (ASTM A421).
- c. Strand yang sesuai dengan “Spesifikasi untuk strand baja, tujuh kawat tanpa lapisan untuk beton prategang” (ASTM A416M).
- d. Tulangan yang sesuai “Spesifikasi untuk baja tulangan mutu tinggi tanpa lapisan untuk beton prategang” (ASTM A722).



Gambar 1: Strands Prategang 7 kawat

Sumber: [5]

Tabel 1: Jenis Tulangan Prategang

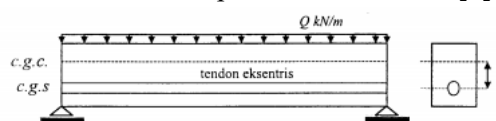
Jenis Material	Nominal Diameter	Luas	Gaya Putus Minimum	Tegangan Tarik Minimum, F_{pu}
	mm	mm ²	kN	MPa
Kawat (wire)	5	19,6	30,4	1550
	5	19,6	33,3	1700
	7	38,5	65,5	1700
7-wire strand Super grade	9,3	54,7	102	1860
	12,7	100	184	1840
	15,2	143	250	1750
7-wire strand Reguler grade	12,7	94,3	165	1750
Bar	23	415	450	1080
	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

Sumber: [5]

D. Konsep Prategang

1. Sistem Prategang untuk mengubah beton menjadi bahan elastis

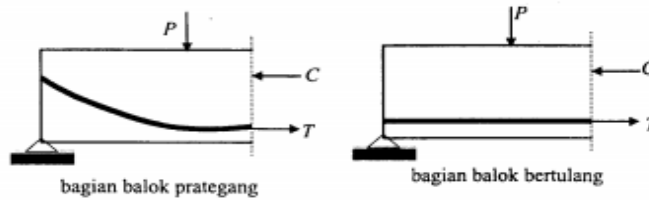
Konsep ini merupakan pemikiran dari Eugene Freyssinet yaitu memvisualisasikan beton prategang pada dasarnya adalah beton yang ditransformasikan dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dan membenturkan tekanan terlebih dahulu pada bahan tersebut [7].



Gambar 2: Pemberian gaya prategang pada balok

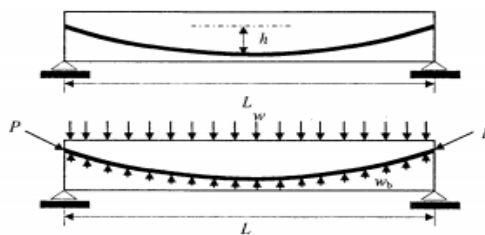
Sumber: [7]

2. Sistem prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton
Beton prategang sebagai kombinasi dari baja dan beton seperti pada beton bertulang, dimana baja menahan tarikan dan beton menahan tekanan dengan demikian beton prategang dapat menahan momen external.



Gambar 3: Momen tahan internal pada balok dan beton prategang
Sumber: [7]

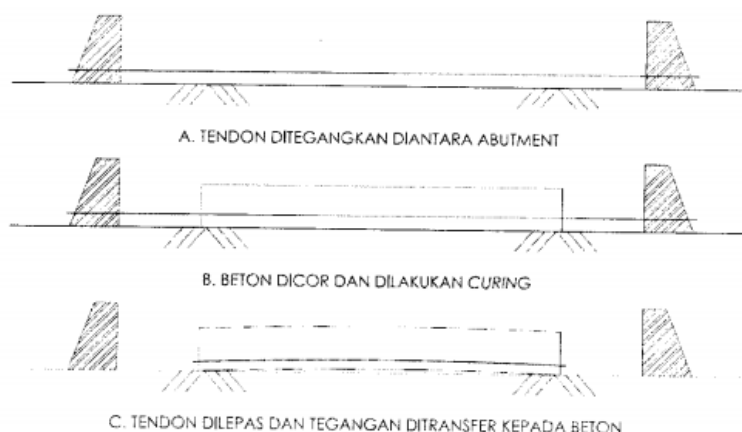
3. Sistem prategang untuk mencapai perimbangan beban
Pada konsep ini prategang sebagai usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah batang. Pada keseluruhan desain struktur beton prategang dipandang sebagai keseimbangan berat sendiri sehingga batang yang mengalami lenturan seperti plat, balok, gelagar tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan yang terjadi [2].



Gambar 4: balok prategang dengan tendon parabola
Sumber: [7]

E. Metode Prategang

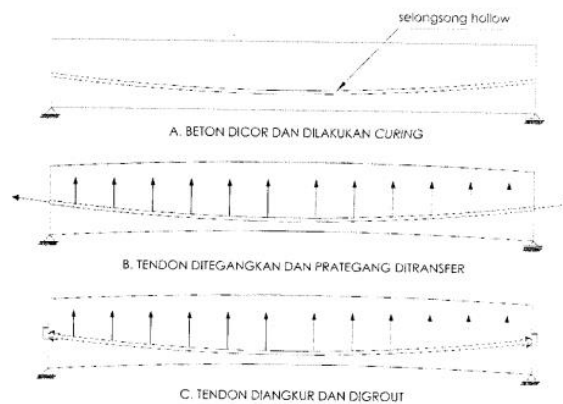
1. Pra-tarik (Pre-Tensioning)
Beton prategang dimana tendon prategang ditarik sebelum dilaksanakan pengecoran pada beton [9].



Gambar 5: prosedur pra-tarik
Sumber: [9]

2. Pasca-tarik (Post-Tensioning)

Beton prategang dimana tendon prategang ditarik setelah beton mengeras. Strand diletakan pada saluran longitudinal didalam elemen beton pracetak.



Gambar 6: Prosedur pasca-tarik
Sumber: [9]

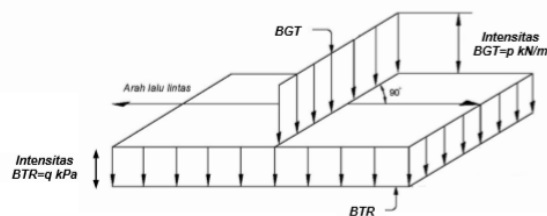
F. Pembebanan

1. Berat sendiri

Berat sendiri adalah berat bagian dari element-element strukktur lain yang dipikul oleh jembatan termasuk didalamnya adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen structural, ditambah dengan elemen nnonstruktural yang dianggap tetap [11].

2. Beban lalu lintas

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri atas beban lajur "D" dan beban truk "T". Beban "D" harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga menimbulkan maksimum.



Gambar 7: Beban lajur "D" Sumber: [11]

Jika beban terbagi rata (BTR) dengan mempunyai intensitas q kPa dengan besaran q tergantung pada bentang total yang dibebani L yaitu:

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m} : q = 9.0 \text{ kPa} \quad (\text{II.1})$$

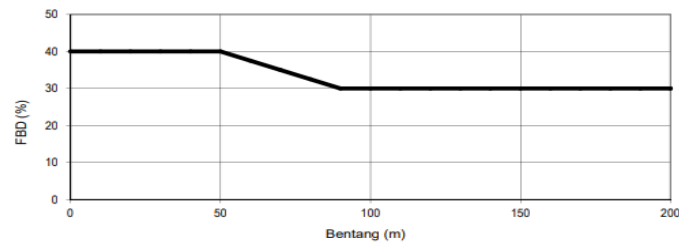
$$\text{Jika } L > 30 \text{ m} : q = 9.0 \left(0.5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \quad (\text{II.2})$$

Dimana:

q = Intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan (kPa)

L = Panjang total yang dibebani (m)

Untuk factor beban dinamis (FBD) pada pembebanan truck "T", diambil 30% karena dihitung pada seluruh bagian bangunan yang berada di atas permukaan tanah.



Gambar 8: Factor beban dinamis untuk beban T untuk pembebanan lajur "D"
Sumber: [11]

3. Gaya Rem

Menurut SNI 1725:2016 pasal 8.7 Gaya rem harus diambil yang terbesar dari:

- 25% dari berat gandar truk desain atau,
- 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata BTR

Pengaruh pengereman dari lalu-lintas diperhitungkan sebagai gaya dalam arah memanjang, dan dianggap bekerja pada jarak 1.80 m di atas permukaan lantai jembatan.

4. Beban Angin

Beban garis merata tambahan arah horizontal pada lantai jembatan akibat angin yang meniup kendaraan di atas lantai jembatan dihitung dengan rumus:

$$T_{EW} = 0,0012 \times C_W \times (V_w^2) \quad (\text{II.3})$$

Dimana:

V_w = kecepatan angina rencana (m/s)

C_w = koefisien seret

G. Perhitungan struktur beton prategang

1. Gaya prategang

Pemberian gaya prategang pada beton prategang diatur sesuai dengan tegangan izin yang ada pada SNI 2847-2013. Besarnya tegangan maksimum pada beton prategang menggunakan rumus:

$$\sigma = \frac{-P}{A} \pm \frac{P \cdot e}{W} \pm \frac{M}{W} \quad (\text{II.4})$$

2. Tegangan ijin beton prategang

Menurut SNI 2847-2013, Tegangan pada beton sesaat setelah penyaluran prategang (sebelum kehilangan prategang):

- Tegangan serat terjauh dalam kondisi tekan ($0,6 \times f'_{ci}$)
- Tegangan serat terjauh pada kondisi tarik ($0,5\sqrt{f'_{ci}}$)

Tegangan pada beton saat layan (setelah mengalami kehilangan prategang):

- Tegangan serat terjauh dalam kondisi tekan ($0,45 \times f'_{ci}$)
- Tegangan serat terjauh dalam kondisi tarik ($0,5\sqrt{f'_{ci}}$)

Persamaan untuk perhitungan tegangan:

Kondisi Awal

$$\sigma_a = -\frac{P_i}{A_c} + \frac{P_i \cdot e_o \cdot y_t}{I} - \frac{M_{min} \cdot y_t}{I} \leq \overline{\sigma_{ti}} \quad (\text{II.5})$$

$$\sigma_b = -\frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i \cdot e_o \cdot y_b}{I} + \frac{M_{min} \cdot y_t}{I} \leq \overline{\sigma_{ci}} \quad (\text{II.6})$$

Kondisi Layan

$$\sigma_a = -\frac{P}{A_c} + \frac{P \cdot e_o \cdot y_t}{I} - \frac{M_{max} \cdot y_t}{I} \leq \overline{\sigma_{cs}} \quad (\text{II.7})$$

$$\sigma_b = -\frac{P}{A_c} - \frac{P \cdot e_o \cdot y_b}{I} + \frac{M_{max} \cdot y_t}{I} \leq \overline{\sigma_{ts}} \quad (\text{II.8})$$

3. Kehilangan Prategang

Menurut Naaman (1982), kehilangan prategang total umumnya merupakan kontribusi dari beberapa hal yaitu:

- a. Perpendekan elastic beton[12],
- b. Relaksasi tendon prategang,
- c. Susut pada beton,
- d. Rangkak pada beton, dan
- e. Gesekan penganker.

1) Komponen struktur Pratarik

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} \tag{II.9}$$

$$\text{Dimana } \Delta f_{pR} = \Delta f_{pR}(t_0, t_{tr}) + \Delta f_{pR}(t_{tr}, t_s) \tag{II.10}$$

t_0 = waktu pada saat pendongkrakan

t_{tr} = waktu pada saat transfer

t_s = waktu pada saat kehilangan telah stabil

untuk perhitungan relaksasi baja harus dilakukan untuk selang waktu t_1 dan t_2 dari tahapan pembebanan, dimana pada saat tahap transfer $t_{tr} = t_2$ dan $t_0 = t_1$, pada saat pembebanan telah stabil, maka $t_2 = t_1$. Jika f_{pi} tegangan prategang awal pada elemen beton dan f_{pj} adalah tegangan pendongkrak pada tendon, maka

$$\Delta f_{pi} = \Delta f_{pj} - \Delta f_{pR}(t_0, t_r) - \Delta f_{pES} \tag{II.21}$$

2) Komponen struktur pascatarik

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pSH} \tag{II.32}$$

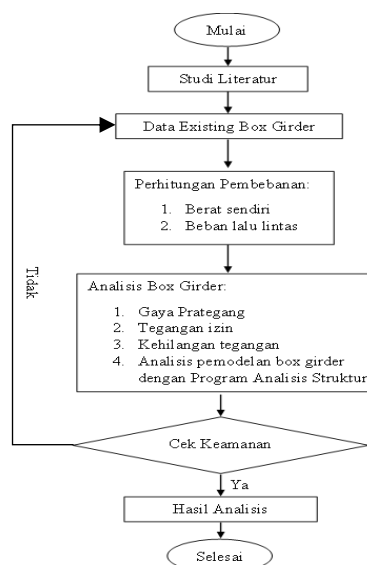
Dari persamaan diatas jika Δf_{pES} hanya berlaku apabila tendon didongkrak secara sekuensial buan secara simultan. Perhitungan kehilangan tegangan akibat relaksasi dimulai antara waktu transfer yaitu $t_1 = t_{tr}$ dan akhir selang waktu t_2 , maka.

$$\Delta f_{pi} = \Delta f_{pj} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pF} \tag{II.13}$$

H. Metode Penelitian

1. Diagram Alir Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan oleh penulis adalah metode pendekatan secara kuantitatif. Dimana dalam tahapan penelitian pada box girder jembatan citarum dimulai dengan mengumpulkan data-data yang diperlukan.



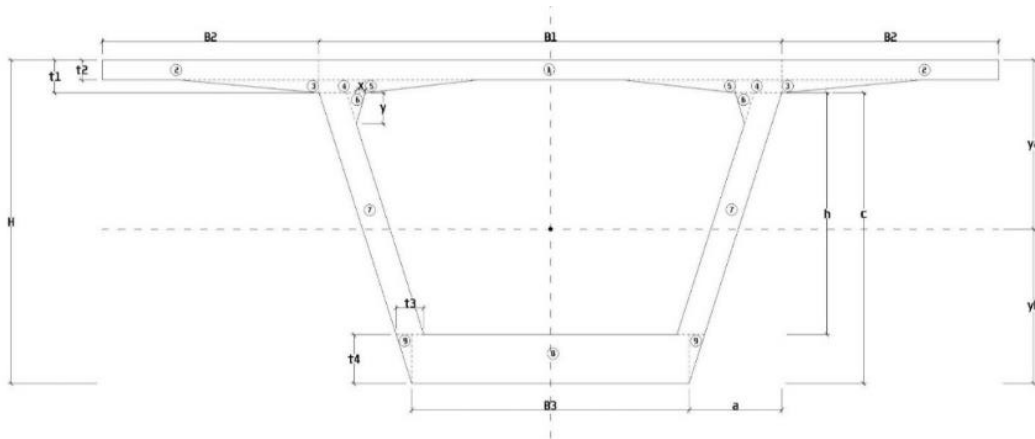
Gambar 9: Diagram Alir Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Perencanaan Box Girder

1. Analisis Penampang

Untuk menganalisis box girder penulis meninjau 3 segment box girder, yaitu: $H = 5,620$ m, $H = 4,144$ m, $H = 3.034$ m.



Gambar 10 Penampang Box Girder $H = 5,620$ M

Tabel 2: Dimensi Box Girder $H = 5,620$ M

Slab atas bag. Tengah	B_1	=	8.410	m
	t_1	=	0.571	m
Slab atas bagian tepi	B_2	=	3.945	m
	t_2	=	0.350	m
Tinggi box girder, dinding tepi	H	=	5.620	m
	t_3	=	0.500	m
Slab bawah	B_3	=	5.044	m
	t_4	=	0.850	m
	x	=	0.161	m
	y	=	0.55	m
Lebar Total Box Girder				
	$B_{tot} = B_1 + 2*B_2$	=	16,300	m
	$h = H - t_1 - t_4$	=	4,199	m
	$a = (B_1 - B_3)/2$	=	1,683	m
	$c = h + t_4$	=	5,049	m

2. Section Propertis Box Girder

Tabel 3: Properti penampang box girder $H = 5,620$ m

No	Dimensi Lebar (m)	Dimensi Tebal (m)	Shape Factor	Jumlah Penampang	Luas Penampang A (m ²)	Jarak thd Alas y (m)	Statis Momen $A*y$ (m ³)	Inersia Momen $A*y^2$ (m ⁴)	Inersia Momen I_o (m ⁴)
1	8.41	0.35	1.0	1	2.944	5.45	16.03	87.27	0.03005
2	3.95	0.35	1.0	2	1.381	5.45	7.52	40.94	0.01410

No	Dimensi		Shape Factor	Jumlah Penampang	Luas Penampang A (m ²)	Jarak thd Alas y (m)	Statis Momen A*y (m ³)	Inersia Momen A*y ² (m ⁴)	Inersia Momen I _o (m ⁴)
	Lebar (m)	Tebal (m)							
3	2.55	0.22	0.5	2	0.281	5.20	1.46	7.59	0.00076
4	0.84	0.22	1.0	2	0.186	5.16	0.96	4.94	0.00076
5	2.04	0.22	0.5	2	0.225	5.20	1.17	6.08	0.00061
6	0.55	0.16	0.5	2	0.044	4.61	0.13	0.94	0.00006
7	4.20	0.50	1.0	2	4.198	2.95	12.38	36.51	0.04373
8	5.04	0.85	1.0	1	4.287	0.43	1.82	0.77	0.25814
9	0.85	0.28	0.5	2	0.120	0.57	0.07	0.04	0.00054
Jumlah					13.67		41.54	185.08	0.35

1. Tinggi box girder	H =	5.62	m
2. Luas penampang box girder	A =	13.67	m ²
3. Letak titik berat	$y_b = \sum A*y / \sum A =$	3.04	m
	$y_a = h - y_b =$	2.58	m
4. Momen inersia terhadap alas balok	$I_b = \sum A*y^2 + \sum I_o =$	185.43	m ⁴
5. Momen inersia terhadap titik berat balok	$I_x = I_b - A* y_b^2 =$	59.19	m ⁴
6. Tahanan momen sisi atas	$W_a = I_x / y_a =$	22.94	m ³
7. Tahanan momen sisi bawah	$W_b = I_x / y_b =$	19.48	m ³
8. Radius girasi	$r_2 = I_x / A =$	4.33	m
9. Batas Kern	$K_a = r_2 / y_b =$	1.43	m
	$K_b = r_2 / y_a =$	1.68	m

Tabel 4: Rekapitulasi perhitungan penampang box girder

H	5,620 m	4.144 m	3.034 m
A (m ²)	13.67	11.27	10.15
y _b (m)	3.04	2.43	1.82
y _a (m)	2.58	1.71	1.22
I _b (m ⁴)	185.43	91.58	45.15
I _x (m ⁴)	59.19	24.93	11.57
W _a (m ³)	22.94	14.56	9.52
W _b (m ³)	19.48	10.25	6.36
r ₂ (m)	4.33	2.21	1.14
K _a (m)	1.43	0.91	0.63
K _b (m)	1.68	1.29	0.94

a. Momen akibat box girder

1) Momen maksimum di tengah bentang

$$M_{bs} = \frac{1}{8} * Q_{bs} * L^2 = \frac{1}{8} * 348.50 * 120^2 = 627299.35 \text{ kNm}$$

2) Gaya geser maksimum di tumpuan

$$V_{bs} = \frac{1}{2} * Q_{bs} * L = \frac{1}{2} * 348.50 * 120 = 20909.98 \text{ kN}$$

b. Momen akibat berat sendiri

1) Momen maksimum di tengah bentang

$$M_{bs} = \frac{1}{8} * Q_{ms} * L^2 = \frac{1}{8} * 357.78 * 120^2 = 644005.60 \text{ kNm}$$

2) Gaya geser maksimum di tumpuan

$$V_{bs} = \frac{1}{2} * Q_{ms} * L = \frac{1}{2} * 357.78 * 120 = 21466.85 \text{ kN}$$

B. Analisis Box Girder

1. Rekapitulasi Pembebanan

Rekapitulasi pembebanan box girder pada masing-masing tinggi dan persamaan momen gaya dan gaya geser pada box girder dapat dilihat pada table di bawah ini.

a. Berat sendiri (MS)

Tabel 5: Berat sendiri

No	Jenis Berat Sendiri Kontruksi	Berat (kN/m)
1	Box Girder Prestress	348.50
2	Parafet	9.28
Q_{MS}		375.78

b. Beban mati tambahan (MA)

Tabel 6: Beban mati tambahan

No	Jenis Beban Mati Tambahan	b (m)	h (m)	A (m ²)	w (kN/m ³)	Q_{MA} (kN/m)
1	Lapisan Aspal +Overlay	8.41	0.10	0.841	22.00	18.50
2	Air Hujan	8.41	0.05	0.4205	9.80	4.12
3	Tiang Listrik					0.10
Total Beban					Q_{MA}	22.72

Tabel 7: Rekapitulasi perhitungan beban box girder H = 5,620 m

No	Jenis Beban	Kode beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	Keterangan
1	Berat sendiri box girder	bs	348.50	-	-	Beban merata, Q_{bs}
2	Berat sendiri	MS	357.78	-	-	Beban merata, Q_{MS}
3	beban mati tambahan	MA	22.72	-	-	Beban merata, Q_{MA}
4	Beban lajur "D"	TD	30.94	63.7 0	-	Beban merata, Q_{TD} dan terpusat P_{TD}
5	Beban pejalan kaki	TP	1.8	-	-	Beban merata, Q_{TP}
6	Gaya rem	TB	-	-	1568.3	Beban merata, M_{TB}
7	Beban angin	EW	1.48	-	-	Beban merata, Q_{EW}

2. Rekapitulasi Kehilangan Tegangan

Total kehilangan gaya prategang pada beberapa sampel box girder dapat dilihat di bawah ini.

a. Kehilangan tegangan akibat angkur

- Panjang tarik masuk berkisar antara 2 – 7 mm
- Pergeseran angkur, ΔA = 6 mm = 0,006 m
- Modulus elastisitas baja prategang, E_s = 190000 MPa
- Panjang tendon, L = 120 m
- Kehilangan prategang akibat pergeseran angkur;

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta A}{L} \cdot E_s = \frac{0,006}{120} \cdot 190000 = 9,5 \text{ MPa}$$

b. Kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis

$$\Delta f_{pF} = f_{pj} \cdot [1 - e^{-(\mu \cdot \alpha) + (\beta \cdot Lx)}]$$

$$\Delta f_{pF} = 1166,921 \cdot [1 - 2,27^{-(0,25 \cdot 0,184) + (0,001 \cdot 120)}]$$

$$\Delta f_{pF} = 85,245 \text{ MPa}$$

Tabel 8: Total perhitungan kehilangan gaya prategang H = 5,620 m

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persentase (%)
	Setelah Penegangan	1166,921	100
Kehilangan Tegangan			
1	Pergeseran Angkur (<i>Anchorage Friction</i>)	9,5	0,814
2	Gesekan Kabel (<i>Jack Friction</i>)	85,245	7,305
3	Perpendekan Elastis Beton (<i>Elastic Shortening</i>)	0,022	0,002
4	Rangkak Beton (<i>Creep</i>)	6,909	0,592
5	Susut Beton (<i>Shrinkage</i>)	70,154	6,012
6	Ralaksasi Tendon (<i>Relaxation of Tendon</i>)	8,724	0,748
Beban Mati Tambahan			
1	Beban Mati Tambahan Topping	12,962	1,111
Total Kehilangan Tegangan (<i>Loss of Prestress</i>)			16,583

3. Rekapitulasi Momen Kapasitas dan Momen Ultimate Box Girder

Tabel 9: Total perhitungan momen akibat beban yang bekerja

No	Aksi Beban	Factor beban	Momen (kNm)	Momen Ultimate
1	Berat Sendiri	K_{MS} 1,2	644005.60	772806.720
2	Beban Mati Tambahan	K_{MA} 2	40901.22	81802.440
3	Baban Lajur "D"	K_{TD} 1,8	57598.50	103677.300
4	Beban Pejalan Kaki	K_{TP} 1,8	3240	5832.000
5	Gaya Rem	K_{TB} 1,8	784.13	1411.440
6	Beban Angin	K_{EW} 1,2	2666.06	3199.269
Total Momen <i>Ultimate</i> Yang Bekerja				968729.168

Kontrol momen kapasitas,

$M_u > M_n$

981110,993 kNm > 968729,168 kNm (OK)

4. Rekapitulasi Lendutan pada Box Girder

Tabel 10: Rekapitulasi Perhitungan lendutan H = 5,620 m

No	Jenis Beban	Kode Beban	Lendutan (m)	Keterangan
A	Lendutan Ke Atas	PR	-0,2078	Chamber
B	Lendutan Ke Bawah			
1	Berat Sendiri	MS	0,0418	Deflection
2	Mati Tambahan	MA	0,0027	Deflection
3	Lajur "D"	TD	0,0037	Deflection
4	Pejalan Kaki	TP	0,0002	Deflection
5	Gaya Rem	TB	0,0000021	Deflection
6	Angin	EW	0,0002	Deflection
Total Lendutan			0,0485	

Total lendutan $\delta_T = 0,0485$ m (\downarrow) ke bawah

Lendutan maksimum yang di iijinkan,

$$\delta = \frac{L}{240} = \frac{120}{240} = 0,5 \text{ m} > \delta_T = 0,0485 \text{ m} \dots\dots (OK)$$

IV. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis baik secara teknis maupun non teknis ada beberapa kesimpulan yang diperoleh yaitu:

1. Panjang bentang jembatan citarum adalah 120 m untuk tengah bentang dengan lebar 16,30 m.
2. Gaya prategang awal sebesar $P_t = 150770,11$ kN
3. Pada perhitungan (*Loss of Prestress*) pada box girder diperkirakan = 30 % dan didapat total kehilangan prategang pada masing-masing box girder adalah:
 - a. Box girder H = 5,620 m sebesar 16,583 %
 - b. Box girder H = 4,144 m sebesar 17,530 %
 - c. Box girder H = 3,034 m sebesar 18,588 %
4. Dalam kontrol momen kapasitas pada box girder untuk kapasitas momen ultimate (M_{uk}) dan momen ultimate akibat beban (M_n) didapatkan bahwa $M_{uk} > M_n = 981110,9928$ kNm $>$ $968729,168$ kNm, sehingga kontrol kapasitas momen pada box girder dianggap sudah memenuhi.
5. Lendutan maksimum yang diijinkan pada pada perhitungan box girder jembatan citarum didapatkan $\delta = \frac{L}{240} = \frac{120}{240} = 0,5$ m sedangkan total lendutan yang diperoleh adalah $\delta_r = 0,0485$ m (\downarrow), apabila melalui program analisis struktur didapatkan lendutan sebesar $\delta = 0,004216$ m, sehingga lendutan dinyatakan telah memenuhi persyaratan yang telah di tetapkan.

B. Saran

Dari kesimpulan diatas penulis menyarankan beberap hal yaitu:

1. Kontrol tegangan dan analisis yang didapatkan sebaiknya disesuaikan dengan keadaan dilapangan.
2. Untuk analisis berikutnya dapat dilakukan analisis struktur bawah jembatan.
3. Dalam melakukan analisis dapat dilakukan dengan menggunakan metode lain, sehingga dapat memperoleh hasil analisis yang lebih efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. J. M. Japek Selatan, "PT. Jasa Marga Japek Selatan Pengumuman Pelelangan Umum dengan Pra Kualifikasi," Jakarta, 2018.
- [2] B. Supriyadi and A. S. Muntohar, *Jembatan*, Ke-1. Yogyakarta, 2007.
- [3] W. Kosim and F. X. Supartono, "Analisis Jembatan Beton Prategang Box Girder dengan Metode Balance Cantilaver," vol. 3, no. 2, 2020.
- [4] J. Ongkosurya and F. Supartono, "Analisis Struktur Jembata Box Girder dengan Penampang Kurva Parabolik Single Cell," vol. 2, no. 3, pp. 255–264, 2019.
- [5] E. G. Nawy, *Beton Prategang: Suatu Pendekatan Mendasar*, Ke-3. Jakarta: Erlangga, 2001.
- [6] N. Iqbaliah, Roestaman, and E. Walujodjati, "Analisis Nilai Kapasitas Beton Prategang Tipe-I Jembatan Cimanuk Maktal," no. 1, pp. 11–21, 2021.
- [7] T. Y. Lin and H. Burns, "Desain Struktur Beton Prategang," 1988.
- [8] M. S. El Faid, "Perencanaan Ulang Jembatan Curahmalang Jember Menggunakan Box Girder Pratekan," 2019.
- [9] Direktorat Jenderal Bina Marga, "Manual Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan." 2011.
- [10] Badan Standarisasi Nasional RSNi T-12-2004, "Perencanaan struktur beton untuk jembatan," 2004.
- [11] S. N. Indonesia and B. S. Nasional, "Pembebanan untuk jembatan," 2016.
- [12] S. R. Rizkia, "Analisis Perbandingan Kehilangan Prategang akibat Metode Stressing Satu Arah dan Dua Arah pada Jembatan Beton Prategang," vol. 5, no. 3, pp. 1–12, 2017.