

## PENGEMBANGAN DESAIN GEOMETRIK DAN STRUKTUR

### JEMBATAN INTERCHANGE BANYUREJO

Zafira Jovita Bayuyudo<sup>1\*</sup>, Juang Akbardin<sup>2</sup>, dan Yudi Sekaryadi<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Teknik Sipil, Universitas Pendidikan Indonesia, Kota Bandung, Indonesia

\* Email Corresponding : [zafirajovitaaa@gmail.com](mailto:zafirajovitaaa@gmail.com)

**Abstrak:** Tol Jogja-Bawen yang direncanakan mulai beroperasi pada tahun 2026 dengan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) sebesar 8.464 kendaraan. Berdasarkan proyeksi pertumbuhan lalu lintas, pada tahun 2027, LHR jalan ini diperkirakan melebihi 10.000 smp/hari, sehingga masuk dalam kategori ROW sangat tinggi. Dengan peningkatan ini, diperlukan pengembangan terhadap desain infrastruktur, terutama dalam perencanaan interchange. Interchange direncanakan menggunakan tipe directional dengan struktur jembatan menggunakan beton prategang bentuk box girder. Tujuan penelitian ini untuk merancang geometrik dan struktur atas interchange yang disesuaikan dengan interchange tipe directional. Data yang digunakan adalah data sekunder berupa data lalu lintas harian rata-rata dan layout interchange eksisting. Metode penelitian menggunakan metode kuantitatif, dimana parameter desain geometrik dan struktur akan dihitung kemudian dimodelkan perencanaan geometriknya menggunakan perangkat lunak Autodesk Civil 3D. Hasil perencanaan geometrik dihitung berdasarkan peraturan yang berlaku di Indonesia mengenai perhitungan dan pemodelan perencanaan geometrik, perhitungan struktur atas, dan evaluasi terhadap momen ultimate interchange. Perhitungan geometrik menggunakan tikungan FC pada main road pertama (arah Banyurejo) serta tikungan SCS pada main road kedua (arah Yogyakarta-Bawen). Main road pertama dan kedua dihubungkan dengan empat ramp. Ramp dirancang berupa kurva dengan tipe FC pada ramp 1 dan ramp 2 serta desain radius kelengkungan majemuk pada ramp 3 dan ramp 4 dengan  $R_{min} = 125$  m menggunakan radius 1:2 dan 1:1,5. Pada geometrik yang telah direncanakan, jembatan interchange didesain pada STA 0+700.00 – 0+840.00 menggunakan box girder menggunakan lebar 10,5 meter dan tinggi 3 meter menggunakan strand tipe 6-31.

**Katakunci:** Geometrik, Simpang Susun Tak Sebidang, Jembatan, Prategang, Box Girder

**Abstract:** The Jogja-Bawen Toll Road is planned to commence operations in 2026 with an Average Daily Traffic (ADR) of 8,464 vehicles. Based on projected traffic growth, by 2027, the ADR of this road is estimated to exceed 10,000 smp/day, thus entering the very high ROW category. With this increase, development of infrastructure design is required, especially in interchange planning. The interchange is planned to use a directional type with a bridge structure using prestressed concrete in the form of a box girder. The purpose of this study is to design the geometric and superstructure of the interchange adapted to the directional interchange type. The data used are secondary data in the form of average daily traffic data and the existing interchange layout. The research method uses a quantitative method, where geometric and structural design parameters will be calculated and then modeled using Autodesk Civil 3D software. The geometric planning results are calculated based on applicable regulations in Indonesia regarding geometric planning calculations and modeling, superstructure calculations, and evaluation of the final moments of interchanges. Geometric calculations use FC curves on the first main road (towards Banyurejo) and SCS curves on the second main road (towards Yogyakarta-Bawen). The first and second main roads are connected by four ramps. The ramps are designed as FC type curves on ramps 1 and 2 and compound curvature radius designs on ramps 3 and 4 with  $R_{min} = 125$  m using a radius of 1:2 and 1:1.5. In the planned geometry, the interchange bridge is designed at STA 0+700.00 – 0+840.00 using a box girder with a width of 10.5 meters and a height of 3 meters using strand type 6-31.

**Keywords:** Geometrik, Simpang Susun Tak Sebidang, Jembatan, Prategang, Box Girder

## PENDAHULUAN

Jalan Tol Yogyakarta-Bawen dibangun untuk meningkatkan aksesibilitas dan konektivitas di Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Tol Jogja-Bawen Seksi I, yang direncanakan mulai beroperasi pada tahun 2026 dengan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) sebesar 8.464 kendaraan. Berdasarkan standar perencanaan jalan, dengan LHR dalam rentang 5.000 – 10.000 smp/hari, jalan ini dikategorikan sebagai Right of Way (ROW) tinggi sehingga direncanakan tipe trumpet pada perencanaan bentuk Interchange Bayurejo. Namun, berdasarkan proyeksi pertumbuhan lalu lintas, pada tahun 2027, LHR jalan ini diperkirakan melebihi

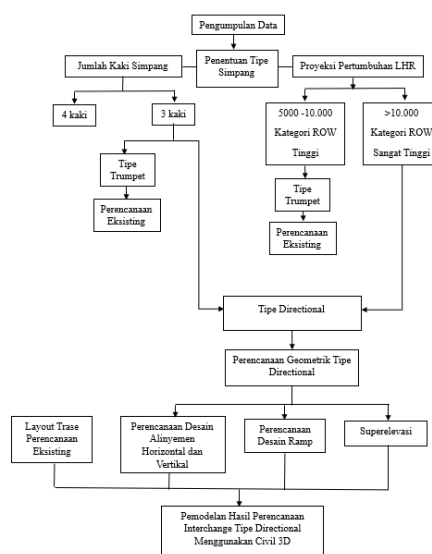
10.000 smp/hari, sehingga masuk dalam kategori ROW sangat tinggi. Dengan peningkatan ini, diperlukan evaluasi terhadap desain infrastruktur yang lebih optimal, terutama dalam perencanaan interchange. Untuk kategori ROW sangat tinggi, tipe interchange yang direkomendasikan adalah tipe *directional*, karena mampu menangani volume lalu lintas yang lebih besar dan meningkatkan efisiensi pergerakan kendaraan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, penulis mengembangkan trase eksisting Tol Jogja-Bawen Seksi I dengan desain interchange tipe *directional*, untuk mengetahui berapa hasil perhitungan dan pemodelan dari perencanaan geometrik simpang susun (*interchange*) Banyurejo dengan bentuk *interchange* tipe *directional* yang sesuai dengan aturan yang berlaku di Indonesia.

Seiring dengan meningkatnya volume lalu lintas dan bertambahnya beban kendaraan, diperlukan perencanaan struktur jembatan yang baik guna memastikan keamanan dan kelaikan jembatan dalam jangka panjang dengan mempertimbangkan pemodelan pembebanan pada jembatan sesuai dengan ketentuan SNI 1725-2016. Di Indonesia, umumnya jembatan didesain menggunakan profil I atau bentuk kotak/trapesium (*box girder*) dengan material beton prategang. Perencanaan struktur Interchange Banyurejo pada Jalan Tol Yogyakarta – Bawen Seksi I perlu direncanakan sesuai dengan peraturan pembebanan jembatan yang berlaku. Pada penelitian ini akan diperoleh berapa hasil dari perhitungan perencanaan struktur atas Jembatan Interchange Banyurejo menggunakan beton prategang pada desain geometrik tipe *directional* dan perhitungan nilai kehilangan gaya prategang serta evaluasi momen yang terjadi pada perencanaan struktur jembatan.

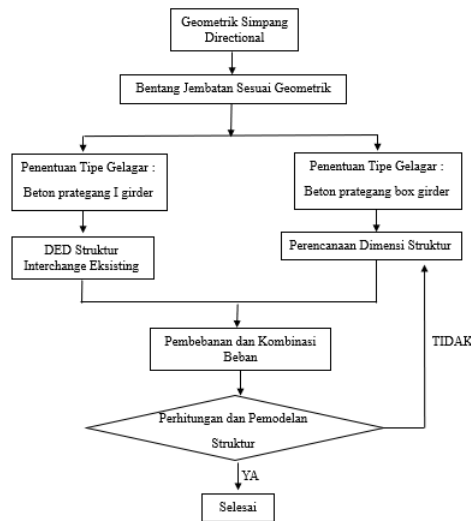
Pada penelitian terdahulu yaitu “Perancangan Geometrik Simpang Susun Jalan Raya Jemursari–Ahmad Yani Surabaya“ menjadi referensi penerapan perhitungan untuk mencari alinyemen horizontal dan alinyemen vertikal pada geometrik ramp dengan tipe interchange yang tidak jauh berbeda karakteristiknya dengan tipe interchange yang direncanakan untuk penelitian ini yaitu tipe *directional*. Kemudian, pada area ramp jalan menggunakan Standar Perencanaan Geometrik Jalan Bebas Hambatan Untuk Jalan Tol (SPGJBHUIT) No. 007/BM/2009.

**METODE**

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif yaitu metode ilmiah yang mengumpulkan data numerik dan melakukan analisis statistik untuk menjawab pertanyaan penelitian dalam perencanaan geometrik dan struktur atas jembatan interchange serta nilai kehilangan gaya prategang dan momen yang terjadi pada perencanaan struktur dengan instrument penelitian berupa perangkat lunak pendukung untuk mendapatkan foto citra satelit (*Google Earth Pro*), pembuatan peta kontur (*Global Mapper*), perangkat lunak perencanaan geometrik simpang susun (*Autodesk Civil 3D*), dan perangkat lunak untuk mengeluarkan gaya dalam dari pembebanan jembatan interchange (*MIDAS Civil 3D*). Teknik analisis pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 sebagai teknik analisis dalam perencanaan geometrik jalan tol serta teknik analisis pada Gambar 2 sebagai teknik analisis perencanaan struktur atas dari jembatan interchange geometrik jalan tol tipe *directional* yang direncanakan pada penelitian ini.



Gambar 1 Teknik Analisis Perencanaan Geometrik



Gambar 2 Teknik Analisis Perencanaan Struktur Jembatan Interchange

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. PERENCANAAN GEOMETRIK INTERCHANGE

#### Data Lalu Lintas Harian

Tabel 1 Data Lalu Lintas Harian Rata-Rata

GOL	Jarak (km)	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041
Gol I		-	-	-	7484	11102	15061	21668	19839	21306	22773	24240	25707	27173	28650	30126	31603	33080	34554	35837
Gol II		-	-	-	629	933	1266	1821	1668	1791	1914	2038	2161	2284	2408	2532	2657	2781	2905	3013
Gol III	8.8	-	-	-	222	329	447	643	588	632	675	719	762	806	850	894	937	981	1025	1063
Gol IV		-	-	-	75	112	152	218	200	214	229	244	259	274	288	303	318	333	348	361
Gol V		-	-	-	54	80	109	156	143	154	164	175	185	196	207	217	228	239	249	258
<b>Total</b>					<b>10490</b>	<b>14583</b>	<b>19063</b>	<b>26535</b>	<b>24468</b>	<b>26128</b>	<b>27787</b>	<b>29449</b>	<b>31108</b>	<b>32768</b>	<b>34439</b>	<b>36109</b>	<b>37781</b>	<b>39453</b>	<b>41121</b>	<b>42573</b>

Sumber: (Jasa Marga, 2025)

#### Data Perencanaan

Tabel 2 Kriteria Desain Perencanaan Simpang Susun

Data Jalan		
Fungsi Jalan	Arteri Kelas I	
SPPJ	JBH	
LHRT Tahun Rencana	42573	smp/hari
q <sub>jd</sub>	4683.03	smp/jam
Klasifikasi Medan	Datar	
Konfigurasi Jalan	4/2 T	
Kriteria Desain	Desain	Satuan
Kecepatan Rencana	80	km/h
Lebar Rumaja	30	m
Lebar Rumija	40	m
Lebar Lajur	3.5	m
Lebar Bahu Dalam	1	m
Lebar Bahu Luar	2.5	m

Kriteria Desain	Desain	Satuan
Lebar Median (termasuk bahu dalam)	2.5	m
Superelevasi Normal	3	%
Superelevasi Bahu	5	%
Superelevasi Maksimum	8	%
Kelandaian Maksimum	4	%

Sumber: (Hasil Analisis, 2025)

Tabel 3 Kriteria Desain Perencanaan Ramp

Kriteria Desain	Desain	Satuan
Kecepatan Rencana	60	km/h
Lebar Lajur	3.5	m
Lebar Bahu Dalam	1	m
Lebar Bahu Luar	2.5	m
Lebar Median (termasuk bahu dalam)	2.5	m
Superelevasi Normal	3	%
Superelevasi Bahu	5	%
Superelevasi Maksimum	8	%
Kelandaian Maksimum	5	%

Sumber: (Hasil Analisis, 2025)

Contoh Perhitungan Parameter Perencanaan Geometrik pada PI pada Main Road 1

**Sudut Tikungan**

Titik awal = (422166,715 ; 9149637.488)

PI Main Road 1 = (420937, 055 ; 9150371,879)

**Jarak Antar Titik (Panjang Trase)**

Contoh Perhitungan pada  $\Delta X_1$  dan  $\Delta Y_1$

$$\Delta X_1 = X_{PI} - X_{awal} = 420937.055 - 422166.715 = -1229.66$$

$$\Delta Y_1 = Y_{PI} - Y_{awal} = 9150371.879 - 9149637.488 = 734.391$$

$$L_{Awal-PI} = \sqrt{(\Delta X_1)^2 + (\Delta Y_1)^2} = 1432.268779 \text{ meter}$$

Nilai  $\Delta X_1$  negatif dan  $\Delta Y_1$  positif, maka garis awal – PI terletak pada kuadran 3

**Sudut Azimuth ( $\alpha$ )**

Untuk kuadran 3, nilai azimuth dihitung dengan rumus Sudut Azimuth ( $\alpha$ ) =  $180^\circ + \arctan \frac{\Delta X_1}{\Delta Y_1}$

$$\alpha_{awal} = 180^\circ + \arctan \frac{\Delta X_1}{\Delta Y_1} = 180^\circ + \arctan \frac{-1229,66}{734,391} = 239,153^\circ$$

**Sudut Belok Tikungan**

$$\Delta PI = \alpha_{akhir} - \alpha_{awal} = 239,153^\circ - 303,525^\circ = 64,373^\circ$$

**Jari-jari Tikungan**

Sperelevasi maksimum ( $e_{max}$ ) 8%

Kecepatan rencana pada main road 80 km/jam

Koefisien gesek =  $F_{maks} = -0,00065 \times V_D + 0,192 = 0.12$

Berikut contoh perhitungan jari-jari tikungan (R) minimum pada titik PI main road 1 :

$$R_{min} = \frac{VD^2}{127(e_{maks} + f_{maks})} = \frac{80^2}{127(0.08 + 0.12)} = 251,968 \text{ m}$$

**Lengkung Peralihan**

Panjang lengkung peralihan ( $L_s$ ) dihitung berdasarkan syarat minimum dan maksimum, kemudian nilai  $L_s$  dihitung berdasarkan beberapa kondisi dan diambil nilai konservatif yang memenuhi syarat.

Panjang lengkung peralihan minimum

$$L_s \text{ min} = \sqrt[2]{24(P_{min})R} = \sqrt[2]{24(0.02)1500} = 44,44$$

Panjang lengkung peralihan maksimum

$$L_s \text{ maks} = \sqrt[2]{24(P_{maks})R} = \sqrt[2]{24(1)1500} = 189,74$$

Tabel 4 Lengkung Peralihan

Kode Jalan	Main Road 1	Main Road 2
Titik	PI 1	PI 1
Waktu Tempuh , $L_s = \frac{V_R}{3,6} T$	44,44	44,44
Perubahan Kelandaian, $L_s = \frac{(\frac{e_m - e_n}{100})V_R}{3,6 r_e}$	44,44	62,22
Gaya Sentrifugal, $L_s = \frac{0.0214V^3}{RC}$	6,09	36,52
Ls (m)		
berdasarkan Kelandaian Relatif, $L_s = \frac{(wn_1)e_d}{\Delta} (b_w)$	31,50	63,00
PDGJ 2021	44,00	44,00
Tabel Hubungan $L_s$ dan Parameter $e_n$ dan VD (PDGJ 2021)	21,00	43,00
Ls Desain	180,00	77,00

Sumber: (Hasil Analisis, 2025)

**Perhitungan nilai Tc**

$$T_c = R \tan \frac{1}{2} \Delta = 1500 \tan \frac{1}{2} 64,373 = 944,101 \text{ m}$$

**Perhitungan nilai Lc**

$$L_c = \frac{\Delta}{360^\circ} 2\pi R = \frac{64,373}{360^\circ} \cdot 2\pi \cdot 1500 = 1685,273 \text{ m}$$

**Perhitungan nilai E**

$$E_c = T_c \tan \frac{1}{4} \Delta = 944,101 \tan \frac{1}{4} 64,373 = 272,379 \text{ m}$$

Parameter lengkung pada alinyemen horizontal tipe SCS pada contoh perhitungan PI1 main road 2 :

**Perhitungan nilai  $\theta_s$**

$$\theta_s = \frac{L_s}{2R} \frac{360}{2\pi} = \frac{77}{2 \cdot 250} \frac{360}{2\pi} = 8,824^\circ$$

**Perhitungan nilai  $\Delta_c$**

$$\Delta_c = \Delta - 2\theta_s = 122,249 - 2(8,824) = 104,601$$

**Perhitungan nilai Lc**

$$L_c = \frac{\Delta_c}{360} 2\pi R = \frac{104,601}{360} 2\pi \cdot 250 = 456,410 \text{ m}$$

**Perhitungan nilai k**

$k = (L_s - \frac{L_s^3}{40R^2}) - R \sin \theta_s$  dengan nilai Ls pilih sebagai lengkung peralihan desain.

$$k = (77 - \frac{77^3}{40 \cdot 250^2}) - 250 \sin 8,824$$

$$k = 38,469 \text{ m}$$

**Perhitungan nilai p**

$$p = \frac{L_s^2}{6R} - R(1 - \cos \theta_s) = \frac{77^2}{6 \cdot 250} - 250(1 - \cos(8,824))$$

$$p = 0,994 \text{ m}$$

**Perhitungan nilai Ts**

$$T_s = (R + p) \tan \frac{122,249}{2} + k = (250 + 0,994) \tan \frac{\Delta}{2} + 38,469$$

$$T_s = 493,6 \text{ m}$$

**Perhitungan nilai Es**

$$E_s = \frac{(R+p)}{\cos \frac{\Delta}{2}} - R = \frac{(250+0,994)}{\cos \frac{122,249}{2}} - 250$$

$$E_s = 269,751 \text{ m}$$

**Lengkung Tikungan Ramp (Lc)**

$$VR \text{ Ramp} = 60 \text{ km/jam}$$

$$E_{maks} = 8\%$$

$$R_{min} = 125 \text{ m}$$

$$L_s \text{ minimum} = 35 \text{ m}$$

$$L_s \text{ ideal} = 55 \text{ m}$$

$$L_c = \frac{\pi R}{180^\circ} \Delta = \frac{3,14 \times R}{180^\circ} 180^\circ$$

$$L_c = 233,7004 \text{ m} > L_{\text{min}} = 35 \text{ m} \text{ (OK)}$$

#### **Panjang Lajur Perlambatan/Percepatan**

Panjang Lajur Perlambatan Minimum = 80 meter

Panjang Lajur Percepatan Minimum = 65 meter

#### **Panjang Taper Memisah/Menggabung**

Panjang Taper Minimum Memisah = 90 meter

Panjang Taper Minimum Menggabung = 180 meter

#### **Alinyemen Vertikal**

Kelandaian rencana = 4% (JBH pada medan datar)

$$\text{Perebedaan Kelandaian (A) pada} = |g_1 - g_2| = |0\% - 3,29\%| = 3,29 \%$$

#### **Perencanaan Jarak Pandang Berhenti Kendaraan (Ss)**

Perencanaan yang digunakan dalam perhitungan jalan 4/2D dengan  $V = 80 \text{ km/jam}$  diperoleh jarak pandang berhenti ( $S_s$ ) = 130 meter

#### **Lengkung Vertikal ( $L_v$ ) Berdasarkan Nilai $S_s$**

Menentukan panjang lengkung berdasarkan jarak pandang untuk  $S_s > L$

$$L = 2 \times S_s - \frac{658}{A} = 2 \times 130 - \frac{658}{3,29\%}$$

$$L = 59,77 \text{ m}$$

#### **Perencanaan Jarak Pandang Menyalip (S)**

Perencanaan yang digunakan dalam perhitungan jalan dengan  $V = 80 \text{ km/jam}$  diperoleh jarak pandang menyalip ( $S$ ) = 245 meter serta nilai kurvatur vertikal ( $K$ ) = 69

#### **Lengkung Vertikal ( $L_v$ ) Berdasarkan Nilai $S$**

Menentukan panjang lengkung berdasarkan jarak pandang untuk menyalip untuk  $S > L$

$$L = 2 \times S_s - \frac{864}{A}$$

$$L = 2 \times 245 - \frac{864}{3,29\%}$$

$$L = 227,08 \text{ m}$$

#### **Lengkung Vertikal ( $L_v$ ) Berdasarkan Nilai $K$**

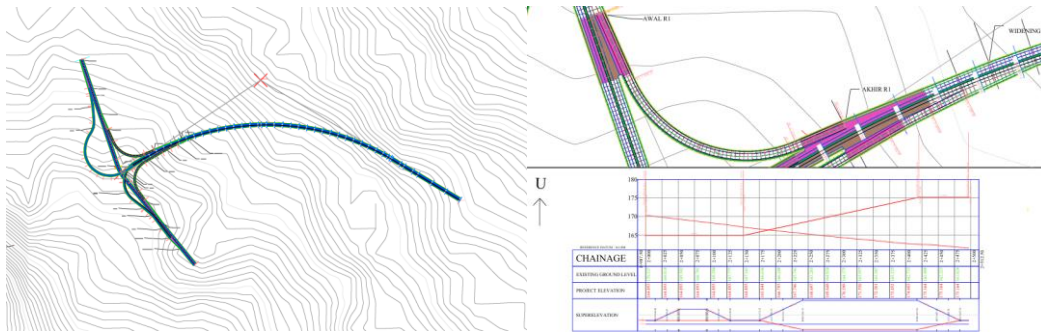
$$L = K \times A$$

$$L = 69 \times 3,29$$

$$L = 226,75 \text{ m}$$

#### **Pemodelan Geometrik Struktur**

Hasil dari seluruh perhitungan geometrik struktur dimodelkan menggunakan perangkat lunak Autodesk Civil 3D ditunjukkan pada Gambar 3.

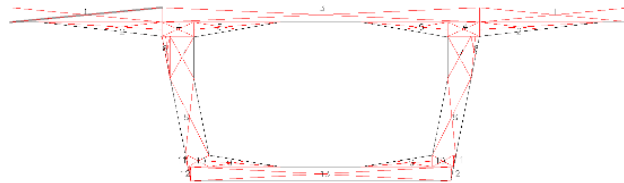


Gambar 3 Pemodelan Geomterik Jalan Tol Tipe Directional

**B. PERENCANAAN STRUKTUR ATAS INTERCHANGE**

**Data Umum Struktur Jembatan Interchange**

Box girder pada bentang tengah jembatan dibagi menjadi beberapa bagian seperti ditunjukkan Gambar 5. Untuk memperoleh nilai inersia box girder jembatan.



Gambar 4 Section Properties Box Girder (Tengah)

Momen inersia pada bentang tengah :

Tabel 5 Section Properties Box Girder (Tengah)

No	Dimensi		Luas	Jarak Dari Alas	Momen Statis	Inersia	Momen Inersia
	Lebar	Tinggi					
	xi (m)	yi (m)					
1	2,625	0,25	1,31	2,88	3,77	10,85	6,84 x 10 <sup>-3</sup>
2	2,125	0,25	0,53	2,67	1,42	3,78	1,84 x 10 <sup>-3</sup>
3	5,50	0,25	1,38	2,88	3,95	11,37	7,16 x 10 <sup>-3</sup>
4	0,55	0,25	0,28	2,63	0,72	1,89	1,43 x 10 <sup>-3</sup>
5	1,5	0,26	0,39	2,66	1,04	2,77	1,46 x 10 <sup>-3</sup>
6	0,144	0,72	0,10	2,26	0,23	0,53	2,99 x 10 <sup>-3</sup>
7	0,406	0,72	0,58	2,14	1,25	2,67	2,53 x 10 <sup>-2</sup>
8	0,406	1,33	0,54	1,12	0,60	1,34	1,59 x 10 <sup>-1</sup>
9	1,232	0,20	0,25	0,32	0,08	0,02	5,48 x 10 <sup>-4</sup>
10	0,368	0,20	0,15	0,35	0,05	0,02	4,91 x 10 <sup>-4</sup>
11	0,04	0,20	0,01	0,38	0,00	0,00	1,78 x 10 <sup>-5</sup>
12	0,05	0,25	0,01	0,17	0,00	0,00	4,34 x 10 <sup>-5</sup>
13	4,50	0,25	1,13	0,13	0,14	0,02	5,86 x 10 <sup>-3</sup>

Sumber: (Hasil Analisis, 2025)

**Pembebanan Jembatan SNI 1725:2016**

Tabel 6 Pembebanan Pada Girder (Tumpuan)

No	Jenis Beban	Kode Notasi	Beban	Beban	Momen M
			Merata Q (kN/m)	Terpusat P (kN)	
1	Berat Sendiri Box Girder	bs'	225.69	-	-
2	Beban Sendiri	ms'	252.74	-	-
3	Beban Mati Tambahan	ma	29.76	-	-
4	Beban Lajur D	td	42.14	377.30	-
5	Beban Pejalan Kaki	tp	20.00	20.00	-
6	Gaya Rem	tb'	-	-	417.34
7	Beban Angin	ew	3.01	15.02	-
8	Beban Gempa	eq'	28.25	-	-
9	Beban Temperatur	et	-	-	79.16

Sumber: (Hasil Analisis, 2025)

**Pembebanan Gaya Prategang**

Perhitungan besar gaya prategang awal dihitung dengan persamaan tegangan di kondisi saat transfer.

Tegangan pada serat bawah,

$$f'_{ic} \geq -\frac{P_{ib}}{A_c} - \frac{P_{ib} \times e'_t \times y_t}{I_x} + \frac{M_{bs} \times y_t}{I_x}$$

$$f'_{ic} = 21.91 \text{ Mpa} \rightarrow 21912.00 \text{ kPa}$$

Tegangan pada serat atas,

$$f'_{it} \geq -\frac{P_{it}}{A_c} + \frac{P_{it} \times e'_t \times y_b}{I_x} - \frac{M_{bs} \times y_b}{I_x}$$

$$f'_{it} = 0.25 \times \sqrt{f'_{ci} \times 1000} = 1.51 \text{ MPa} \rightarrow 47.78 \text{ kPa}$$

Beban Putus Minimum Satu *Strand*,  $P_{bs} = 183 \text{ kN}$

$$\text{-Di Serat Atas (Tarik), } P_{it} = \frac{f'_{it} + \frac{M_{bs}}{s_b}}{-\frac{1}{A_c} + \frac{e'_t}{s_b}} = 233376.1608 \text{ kN}$$

$$\text{-Di Serat Bawah (Tekan), } P_{ib} = \frac{f'_{ic} - \frac{M_{bs}}{s_t}}{\frac{1}{A_c} + \frac{e'_t}{s_t}} = 78347,14 \text{ kN}$$

Diambil nilai terkecil untuk Gaya Prategang Awal,  $P_i = 78347,14 \text{ kN}$

**Data Strands Cable**

<b>DATA STRANDS CABLE - STANDAR VSL</b>	
	Uncoated 7 wire
Jenis strands	= super strands unit 6-31
Tegangan leleh strand	fpy = 1676,00 MPa
Kuat tarik strand	fpu = 1860,00 MPa
Diameter nominal strands	Øns = 15,70 mm
Luas tampang nominal satu strands	Ast = 150 mm <sup>2</sup>
Beban putus minimal satu strands	Pbs = 260,7 kN
Jumlah kawat untaian(strands cable)	nt = 20 tendon
Diameter selubung ideal	Øc = 127,00 mm
Beban putus satu tendon	Pbs = 260,70 kN
Modulus elastis strands	Es = 1,95E+05 MPa

Sumber: (Hasil Analisis, 2025)

**Jumlah Tendon**

Gaya prategang awal,  $P_t = 78347,14$  kN

Kuat tarik *strand*,  $f_{pu} = 1860$  MPa

Tegangan leleh *strand*,  $f_{py} = 1676$  MPa

Tegangan ijin tendon sesaat setelah transfer,

$$f_{pi} = 0,74 \cdot f_{pu} = 0,74 \cdot 1860 = 1376,40 \text{ MPa}$$

$$f_{pi} = 0,82 \cdot f_{py} = 0,82 \cdot 1676 = 1373,5 \text{ MPa}$$

Karena  $0,82 \cdot f_{py} = 1373,5 \text{ MPa} < 0,74 \cdot f_{pu} = 1376,4 \text{ MPa}$ , maka digunakan tegangan ijin tendon sesaat setelah transfer  $f_{pu} = 1373,5 \text{ MPa}$

Luas area baja prategang yang diperlukan,

$$A_s = P_t / f_{pi} = 78347,14 / 1373,5 \times 10^3 = 57041,96 \text{ mm}^2$$

Jumlah kawat untaian (strands cable) = 31 kawat untaian tiap tendon Beban putus minimum 1 tendon,

$$P_{b1} = P_{bs1} \cdot \text{jumlah strands per tendon} = 260,7 \cdot 31 = 8081,7 \text{ kN}$$

$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \times 0,8 \times P_{b1}} = \frac{78347,14}{0,85 \times 0,8 \times 8081,7} = 14,25 \text{ tendon}$$

Jumlah tendon aktual yang digunakan,  $n_t = 20$  tendon

### Daerah Aman Tendon

Momen akibat berat sendiri balok

Berat sendiri balok,  $WG = 194,62 \text{ kN/m}$

$$M = \frac{1}{8} WG L^2 = \frac{1}{8} w L^2 = 44329,23 \text{ kNm}$$

Momen akibat beban mati box girder

Berat sendiri balok,  $MS = 29,76 \text{ kN/m}$

$$MMS = \frac{1}{8} MS L^2 = \frac{1}{8} w L^2 = 6778,42 \text{ kNm}$$

Momen akibat beban hidup lalu lintas

$$M = \frac{1}{8} Q_{lajur D} L^2 + \frac{1}{8} Q_{pejalan kaki D} L^2 = 12618,98 \text{ kNm} + 4715,47 \text{ kNm} = 17334,45 \text{ kNm}$$

Gaya prategang awal,  $P_o = 78347,14 \text{ kN}$

Kehilangan gaya prategang (LOF) untuk paskatarik diperkirakan sebesar 30%, maka rasio kehilangan gaya prategang ( $R$ ) =  $1 - \text{LOF} = 1 - 30\% = 70\%$ .

Maka gaya prategang efektif

$$P_{eff} = R \cdot P_o = 70\% \cdot 78347,14 = 54842,99 \text{ kN}$$

Luas penampang *box girder* prategang,  $A = 7,3631 \text{ m}^2$

$$\text{Radius girasi, } r_2 = \frac{I}{Ac} = \frac{8,72}{7,09} = 1,22$$

#### Batas Kern Atas

$$k_t = \frac{r^2}{cb} = \frac{1,22^2}{1,92} = 0,637$$

$$a_{\max} = \frac{MT}{Pe} = \frac{68442,10}{49480,47} = 1,38 \text{ m}$$

$$e_t = a_{\max} - k_t = 1,38 + 0,63 = 0,745 \text{ m}$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik:

$$e_t' = \frac{f_{ts} \cdot Ac \cdot k_t}{Pe} = 0,000138$$

$$e_{t1} = e_t + e_t' = a_{\max} + k_t + e_t' = 1,65 + 0,63 + 0,000138 = 0,745 \text{ m}$$

#### Batas Kern Bawah

$$k_b = \frac{r^2}{ct} = \frac{1,22^2}{1,07} = 1,14$$

$$a_{\min} = \frac{M_o}{P_i} = \frac{0,675}{70686,38} = 0,67$$

$$e_b = a_{\min} + k_b = 0,67 + 1,14 = 1,82 \text{ m}$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik:

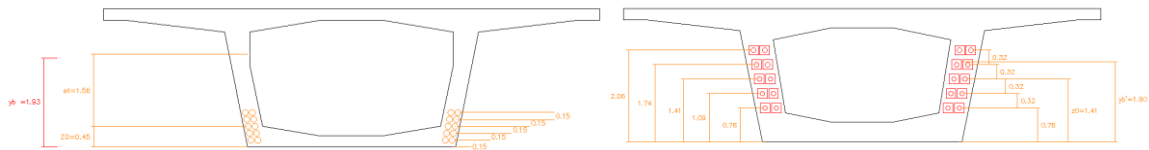
$$e_b' = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot k_b}{P_i} = 0,00252$$

$$e_{b1} = e_b + e_b' = a_{\min} + k_b + e_b' = 0,67 + 1,14 + 0,00252 = 1,4460 \text{ m}$$

Eksentrisitas tengah bentang aktual yang diasumsikan,  $e_t = 0,745 \text{ m} < e = 1,47 \text{ m} < e_b = 1,822 \text{ m}$  (OK)

### Tata Letak Tendon

Tata letak tendon ditunjukkan Gambar 6a untuk tata letak tendon pada girder bentang tengah jembatan, dan Gambar 6b untuk tata letak tendon pada girder bagian tumpuan jembatan.



(a) Tata Letak Tendon Girder Tengah

(b) Tata Letak Tendon Girder Tumpuan

Gambar 6. Tata Letak Tendon

### Kehilangan Gaya Prategang

No	Level Tegangan	Notasi	Tegangan Baja	Persentase
			$\Delta f_{p,i}$ (MPa)	$\% \Delta f_{p,i}$ (%)
<b>Pada Tumpuan Tengah</b>				
	Tegangan Tendon Setelah Penegangan ( <i>Jacking</i> )	$f_{pj}$	894.20	100.00
1	Kehilangan Tegangan Akibat Gesekan Kabel	$\Delta f_{p,F}$	68.68	7.68
2	Kehilangan Tegangan Akibat Slip Pengangkuran	$\Delta f_{p,A}$	23.10	2.58
3	Kehilangan Tegangan Akibat Pemendekan Elastis	$\Delta f_{p,ES}$	37.63	4.21
4	Kehilangan Tegangan Akibat Relaksasi	$\Delta f_{p,R}$	-4.40	-0.49
5	Kehilangan Tegangan Akibat Susut	$\Delta f_{p,SR}$	71.96	8.05
6	Kehilangan Tegangan Akibat Rangkak	$\Delta f_{p,CR}$	111.98	12.52

Sumber: (Hasil Analisis, 2025)

### C. EVALUASI KAPASITAS MOMEN ULTIMIT STRUKTUR ATAS INTERCHANGE

Momen Ultimit Positif Beban,  $M_u = 79308 \text{ kNm}$

Luas Total Tendon Strands,  $A_{ps} = 0,06 \text{ m}^2$

Tegangan Leleh baja Pre Stress Saat Kuat Lnetur Nominal,  $f_{ps1} = 1675,00 \text{ Mpa}$

Gaya Internal Tendon Baja pre-stress

$$T'_p = A_{ps} \times f_{ps1}$$
$$T'_p = 102,50 \text{ MPa}$$

Gaya tekan beton pre stress

$$C'_p = 0,85 \times f'_c \times B'_{eq} \times t_b$$
$$C'_p = 73,50 \text{ MPa}$$

Tinggi balok beton bawah

$$a' = \frac{A_{ps} \times f_{ps1}}{0,85 \times f'_c \times B'_{eq}}$$

$$a' = 0,63 \text{ m}$$

Faktor tinggi blok tegangan tekan ekivalen,  $\beta_1 = 0,77$

Letak Gars Netral Dari Bawah

$$C'_p < T'_p \rightarrow c' \Rightarrow \text{Di atas pelat bawah } c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$c' = 0,82 \text{ m Di atas pelat bawah}$$

Jarak Dari Serat Tekan Terluar Ke Titik Berat Tendon Prategang

$$d'_p = H - Z'_o$$

$$d'_p = 2,78 \text{ m}$$

Regangan Maksimum Serat Beton Terluar,  $\varepsilon_c = 3,00 \times 10^{-3}$

Regangan Pada Baja Pre Stress

$$\varepsilon'_{ps} = \frac{d'_p - c'}{c'} \times \varepsilon_c$$

$$\varepsilon'_{ps} = 0,01$$

Momen Nominal

$$M'_n = A_{ps} \times f_{ps1} \times 1000 \times \left( d'_p - \frac{a'}{2} \right)$$

$$M'_n = 352021,11 \text{ kNm}$$

Faktor Reduksi Kekuatan Lentur,  $\phi = 0,8$

Kapasitas Momen Positif Ultimit Rencana Box Girder

$$M_r^- = \phi \times M'_n$$

$$M_r^- = 281616,89 \text{ kNm}$$

$$\text{Syarat} \rightarrow M_r^+ = 281616,89 \text{ kNm} \geq M_u^+ = 79308 \text{ kNm (OK)}$$

## KESIMPULAN

Hasil perencanaan geometrik yang dilakukan dihasilkan tikungan FC pada main road pertama (arah gerbang tol Banyurejo) dengan jari-jari kelengkungan 1500 m dan lengkung peralihan semu 180 m serta tikungan SCS pada main road kedua (arah Yogyakarta-Bawen) dengan jari-jari kelengkungan 250 m dan lengkung peralihan 77 m. Sedangkan untuk perencanaan ramp dihasilkan 4 ramp dengan jari-jari minimum 125 m untuk desain ramp 60 km/jam Ramp didesain tikungan dengan tipe FC pada ramp 1 dan ramp 2 dengan jari-jari terbesar 800 m dan lengkung peralihan 130 m serta desain jari-jari kelengkungan majemuk pada ramp 3 dan ramp 4 dengan  $R_{\min} = 125$  m menggunakan perbandingan radius 1:2 dan 1:1,5

Jembatan interchange didesain pada STA 0+700.00 – 0+840.00 menggunakan box girder menggunakan lebar 10,5 meter dan tinggi 3 meter menggunakan strand tipe 6-31 dengan jumlah tendon sebanyak 20 tendon yang dipasangkan lima baris pada area batas aman tendon yang ditentukan. Jembatan interchange banyurejo didesain menggunakan box girder bentang total 139 meter dengan total empat span, perhitungan dilakukan terhadap span terpanjang yaitu 42 meter. Dengan hasil momen maksimum pada kombinasi Kuat I sebesar 79308 kNm.

Jembatan beton prategang menggunakan box girder yang didesain memiliki presentase total kehilangan gaya prategang sebesar 27,92 % dengan gaya prategang awal 73375.12 kN dan gaya prategang efektif sebesar 70% gaya prategang awal. Diperoleh momen nominal box girder prategang 281616,89 kNm.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afrilda Sari, M. (2019). REKAYASA ULANG PERENCANAAN GEOMETRIK PENGATURAN PERSIMPANGAN. *Jurnal UMSB Rang Teknik Journal*, Vol. 2 No. 1.
- Agni, E. M. (2023). Analisis Geometri Pada Ramp On Gerbang Tol Cibubur 2 Dengan Metode MKJI 1997. *Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir 2023*, 874.
- Almoshaogeh, M. (2020). Sustainable Design of Diverging Diamond Interchange: Development of Warrants for Improving Operational Performance. *Sustainability*, 12, 5840.
- Antonios, T. E., Konstantinos, A., & Basil, P. (2023). Vehicles lateral acceleration and speed profiles investigation at the entry area of interchange ramps as a criterion of geometric road design. *Transportation Research Procedia*, 13-20.
- Apriyanto, D., & Siswoyo. (2021). Perencanaan Girder Jembatan Beton Prategang Jl. Raya Sememi Benowo Surabaya Section 0 - 152. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi*, Vol. 9, No.1, Hal. 035-040.
- Bassan, S. (2021). Interchange Sight Distance and Design: Aspects. *Open Journal of Civil Engineering*, 358-377.
- Bassan, S. (2023). Interchange and Compact Grade Separated Junction: Classifications System Considerations, Traffic Safety, and Operations Overview. *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 25, no. 12, pp. 43-59.
- Bina-Marga. (2009). *Geometri Jalan Bebas Hambatan Untuk Jalan Tol*. Jakarta: Standar Konstruksi dan Bangunan.
- Bina-Marga. (2022). *Pembahasan Penyelenggaraan Keamanan Jembatan Khusus*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.

- Bina-Marga. (2023). *Perencanaan Teknis Fasilitas Pejalan Kaki*. Jakarta Selatan: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Cahyanti, N. D., Istiar, & Herijanto, W. (2024). Redesain Geometrik Ramp Margajaya Jalan Tol Bekasi-Cawang-Kampung Melayu. *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 13, No. 1.
- Darojatun, B. K., & Nuranita, B. (2024). Kajian Analisis Struktur PC-I Girder Prestressed pada Jembatan Bentang 35,8 meter. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 10 No 01 Hal. 1-9.
- Ernesto, M. (2023). AUTOMATIC DESIGN OF THE HORIZONTAL ALIGNMENT OF A ROAD INTERCHANGE: THE CASE OF A TRUMPET-TYPE. *Journal of Surveying Engineering*.
- Liu, H., & Chen, J. (2022). Research on Common Problems and Countermeasures of Highway Interchange Design. *International Journal of Frontiers in Engineering Technology*, Vol.4, Issue 4: 93-98.
- Rodji, A. P., Sihombing, S. M., & Hariyanto, Q. A. (2022). Perencanaan Geometrik Jalan Tol Cibitung - Cilincing Interchange Tambelang Kabupaten Bekasi. *Jurnal Teknokris*, Vol. 8 No 1.
- Safitri, A., & Herijanto, W. (2020). Perancangan Geometrik Simpang Susun Jalan. *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 9, No. 2.
- Sjadaja'ah, S. N., Herijanto, W., & Istiar. (2023). Perancangan Geometrik Simpang Susun Jalan Tol Yogyakarta-Bawen. *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 12, No. 1.
- SNI-1725. (2016). *Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Sun, J. (2015). The Land Occupation Analysis Of The Loop-ramp Patterns Of Freeway Trumpet Interchanges. *Trans Tech Publications*, 1065-1069.
- Xie, H. C. (2019). A Geometry Elements Based Speed Prediction Model for Interchange Ramps of Mountainous Motorways. *IOP Conference Series : Earth and Env. Science*, 267.
- Xu, G. (2021). Research on deceleration lane length for B-type trumpet interchange. *International Conference on Smart Transportation and City*.

