

Modifikasi Struktur Jembatan Pegalongan Mandirancan dengan Menggunakan *One-Span Diagonal Arch Bridge*

Farhan Natanagara Putra Setiawan, Hidajat Sugihardjo, dan Djoko Irawan
 Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: hidayat@ce.its.ac.id

Abstrak—Jembatan sebagai jalur akses yang dibuat untuk melewati rintangan direncanakan dengan mempertimbangkan aspek-aspek yang meliputi kekuatan, stabilitas struktur, kemudahan pelaksanaan, serta estetika. Jembatan Pegalongan – Mandirancan melintasi Sungai Serayu yang menghubungkan Desa Pengalongan dengan Desa Mandirancan dengan panjang 140 m dan lebar 7 m, dengan tipe rangka baja dan struktur bawah berupa dua abutment dan satu pilar. Penggunaan rangka baja kurang efisien karena membutuhkan pilar pada tengah jembatan yang mengurangi *effective linear waterway* sungai. Rangka baja juga dinilai kurang memiliki nilai estetika. Maka, dilakukan modifikasi jembatan menjadi tipe *Diagonal Arch Bridge (DAB)*. DAB adalah jembatan busur dimana busur diputar terhadap lantai kendaraannya. Perencanaan modifikasi ini dimulai dari studi literatur dan pengumpulan data, *preliminary design*, pembebanan, pemodelan dan analisa struktur, kontrol statis dan dinamis, perencanaan sambungan dan cek kabel putus, perencanaan perletakan, analisa *staging*, hingga pembuatan gambar rencana. Peraturan yang digunakan dalam melakukan perencanaan modifikasi antara lain SNI 1725-2016, SNI 2833-2016, SNI 1929-2020, dan SNI 2847-2019. Berdasarkan hasil analisis, digunakan lantai kendaraan *Steel Orthotropic Trapezoidal Box Girder* dengan lebar 18 m dan tinggi 2,5 m dengan bentang 140 m. Struktur busur diputar 20° dengan tinggi 50 m dan bentang 150 m dengan profil *Box* baja 4000.2000.50.50. Kabel penggantung menggunakan *Macalloy 520 M100*. Struktur busur menggunakan perletakan jepit serta lantai kendaraan menggunakan *Pot Bearing Freyssinet GG 6,000-1,800.400* dan *GL 4,000.400.40*. Struktur jembatan memenuhi kontrol kekuatan statik, dinamik, serta aerodinamik.

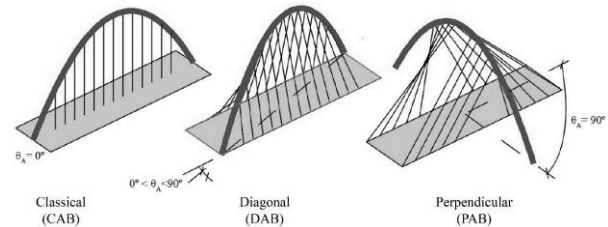
Kata Kunci—*Diagonal Arch Bridge, Kabel Penggantung, Steel Orthotropic Trapezoidal Box Girder.*

I. PENDAHULUAN

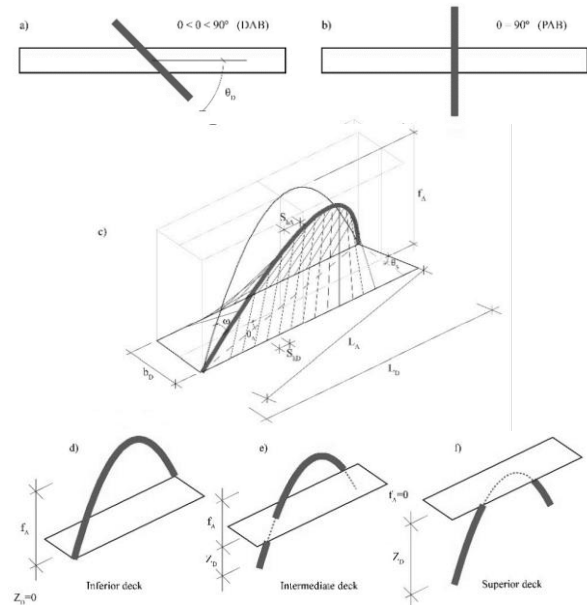
JEMBATAN adalah sebuah konstruksi suatu jalur akses yang dibuat untuk mengangkut lalu lintas atau beban bergerak lainnya dengan maksud agar dapat melewati suatu rintangan. Jembatan merupakan investasi tertinggi dari semua elemen pada sistem jalan raya, sehingga dalam perencanaannya perlu mempertimbangkan beberapa aspek-aspek meliputi kekuatan dan stabilitas struktur, kemudahan pelaksanaan, pemeliharaan, dan pemeriksaan, serta estetika.

Jembatan Pegalongan – Mandirancan adalah jembatan yang melintasi Sungai Serayu yang menghubungkan Desa Pengalongan Patikraja dengan Desa Mandirancan Kecamatan Kebasen. Jembatan ini ditujukan untuk mengurangi kemacetan di sekitar pasar patikraja dan mendukung perekonomian warga.

Jembatan Pegalongan – Mandirancan memiliki panjang total mencapai 140 meter dengan lebar 9 meter yang dibangun dengan tipe rangka baja yang terdiri dari dua bentang dengan panjang masing-masing 70 meter dan



Gambar 1. Sudut putar struktur busur pada berbagai jenis SAB.

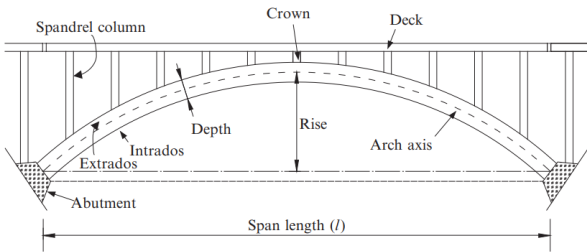


Gambar 2. Ilustrasi parameter geometrik pada DAB.

didukung struktur bawah yang terdiri atas dua abutment dan satu pilar. Pilar yang dibangun ditengah sungai tersebut dapat menurunkan *effective linear waterway* dari sungai yang mana dapat meningkatkan potensi terjadinya *local scouring* [1]. Selain itu, penggunaan tipe rangka baja bagi jembatan yang merupakan akses menuju pusat perekonomian yang besar dirasa kurang memiliki nilai estetika.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat sebuah ide untuk memodifikasi Jembatan Pegalongan – Mandirancan menjadi jembatan tipe *arch bridge* karena dirasa lebih tepat untuk jembatan bentang panjang. Kemudian penggunaan pilar pada tengah sungai juga ditiadakan dengan digunakannya sistem *one-span*. Serta digunakan konfigurasi *Diagonal Arch Bridge (DAB)*. DAB adalah salah satu bentuk dari *Spatial Arch Bridge (SAB)*, dimana struktur busur diputar terhadap lantai kendaraannya.

Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dibahas mengenai bagaimana merancang desain modifikasi Jembatan Pegalongan – Mandirancan dengan menggunakan *One-Span Diagonal Arch Bridge* dengan memenuhi aspek-aspek



Gambar 4. Komponen jembatan busur.

Tabel 1. Rekapitulasi preliminary geometri busur

Aspek Geometri	Rumus Pendekatan	Dimensi
Tinggi Struktur	$0,345 L$	50 m
Sudut Kemiringan	$0^\circ < \theta_A < 90^\circ$	20°
Tinggi Penampang	$1/80 \leq t/L \leq 1/70$	2 m

Tabel 2. Rekapitulasi preliminary geometri gelagar

Aspek Geometri	Rumus Pendekatan	Dimensi
Tinggi Gelagar	$1/50 \leq h/L \leq 1/70$	2.5 m

Tabel 3. Rekapitulasi tegangan ribs

Lokasi	σ (kg/cm ²)	σ_{ijin} (kg/cm ²)	Status
Serat Atas Support	-198,78	1666.7	OK
Serat Bawah Support	-231,06	1666.7	OK
Serat Atas Midspan	863,65	1666.7	OK
Serat Bawah Midspan	336,56	1666.7	OK

Tabel 4. Rekapitulasi tegangan floor beam

Lokasi	σ (kg/cm ²)	σ_{ijin} (kg/cm ²)	Status
Serat Atas Support	-853,38	1666.7	OK
Serat Bawah Support	-162,23	1666.7	OK
Serat Atas Midspan	287,44	1666.7	OK
Serat Bawah Midspan	54,64	1666.7	OK

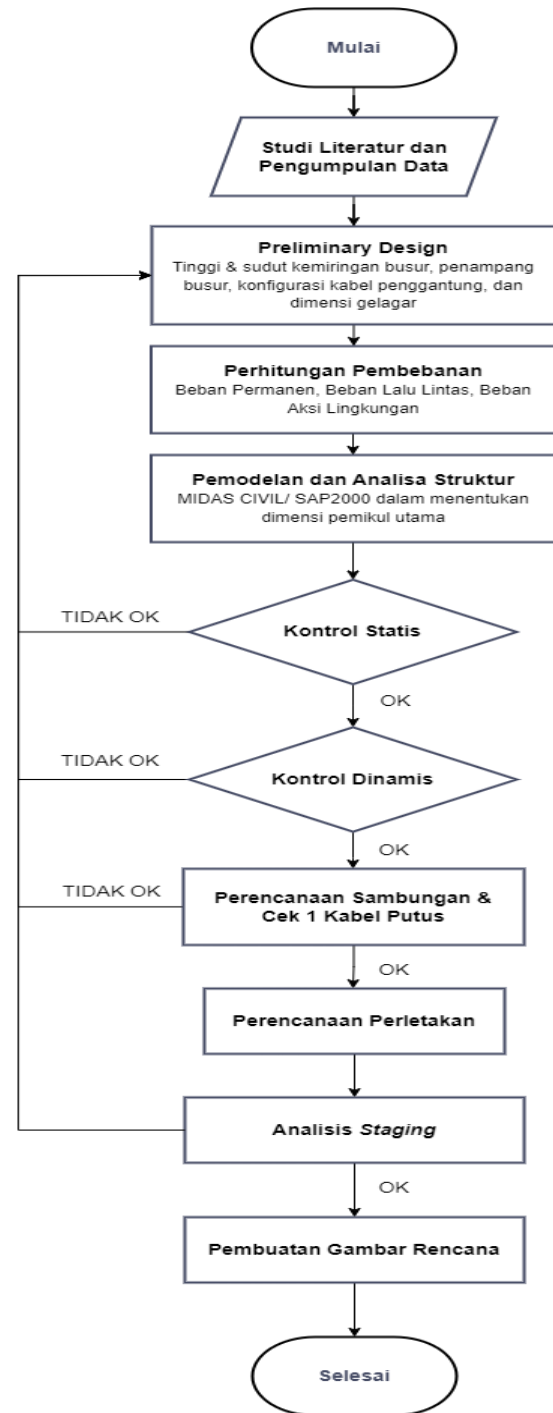
perencanaan yang ada.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Busur adalah suatu struktur melengkung yang menahan beban yang parallel terhadap sumbu simetrisnya, dan jembatan yang menggunakan busur sebagai pemikul bebannya disebut sebagai jembatan busur. Jembatan busur umumnya memiliki abutmen pada masing – masing ujungnya, dan bekerja dengan mentransfer beban baik beban mati dari struktur itu sendiri dan beban eksternal lainnya dari arah vertikal menjadi dorongan arah horizontal yang mana akan ditahan oleh abutmen [2].

Struktur busur diharuskan untuk dapat menahan aksial berupa tekan, momen, dan geser. Jembatan busur dapat dibangun sebagai *one-span* dengan dua abutment, atau dibangun *multi-span* dengan busur yang berulang [2].

SAB adalah suatu struktur yang sangat kompleks dalam hal – hal seperti konfigurasi geometrik, komposisi material, dan ketergantungan pada faktor lapangannya. Kebutuhan terhadap jembatan yang fungsional yang tetap memiliki keindahan estetika pada area perkotaan membuat perkembangan SAB menjadi sangat pesat [3]. DAB adalah salah satu bentuk dari SAB, dimana struktur busur diputar terhadap lantai kendaraannya. Agar dapat dikategorikan



Gambar 3. Diagram alir penyelesaian.

sebagai DAB, sudut putaran struktur busur harus berada diantara 0° hingga 90° , dan perletakan busurnya harus berada di sisi yang berlawanan satu sama lain. Berbeda dengan struktur jembatan busur pada umumnya, respon struktur pada DAB memiliki gaya horizontal yang besar, sehingga berimplikasi pada besarnya gaya momen dan torsi pada struktur busur dan lantai kendaraan [4]. Ilustrasi DAB dapat dilihat pada Gambar 1.

DAB memiliki beberapa parameter geometrik dalam proses penentuan dimensinya, parameter geometrik yang digunakan dalam desain DAB dapat dilihat pada Gambar 2.

Jembatan busur terdiri dari 3 bagian utama, lantai kendaraan (*deck girder*), penggantung (*hanger*), dan batang lengkung (*arch bridge*) [2]. Komponen dari jembatan busur dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 5.
Rekapitulasi diafragma

Lokasi	σ (kg/cm ²)	σ_{ijin} (kg/cm ²)	Status
Diafragma Tarik	430,89	1666.7	OK
Diafragma Tekan	1394,80	1666.7	OK

Tabel 6.
Rekapitulasi perhitungan sandaran & trotoar

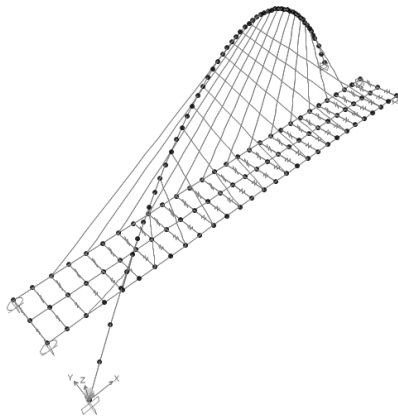
Fungsi	Bentang (m)	Profil Baja
Sandaran	2,5	CHS 48.6x3.2
Tiang Sandaran	1,2	WF 100x100x7.5x11

Tabel 7.
Rekapitulasi gaya dalam lantai kendaraan

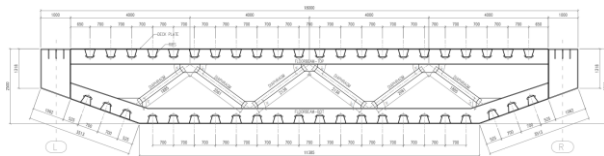
Frame	Pu (kN)	Vu (kN)	Mu (kN.m)	Tu (kN.m)
M6	-6381,39	-2189,46	63499,59	-10873,9

Tabel 8.
Rekapitulasi gaya dalam busur

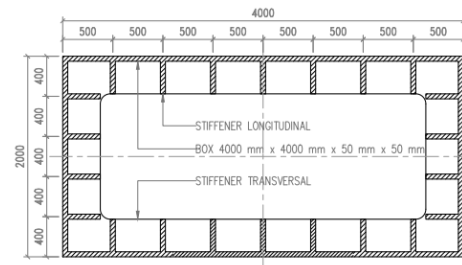
Frame	Pu (kN)	Vux (kN)	Vuy (kN.m)	Mux (kN)	Muy (kN)	Tu (kN.m)
M6	33535,94	1695,89	2222,83	19332,49	70093,01	1897,76



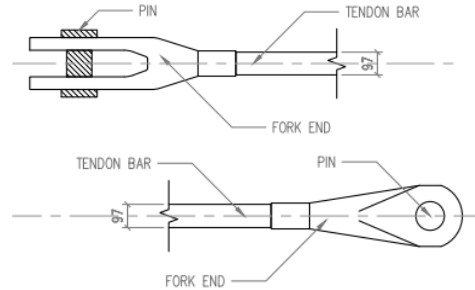
Gambar 5. Pemodelan struktur model jembatan pada program bantu analisa struktur SAP2000.



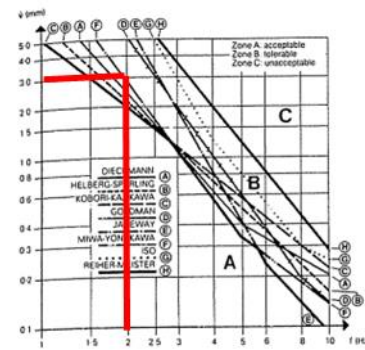
Gambar 6. Detail penampang lantai kendaraan.



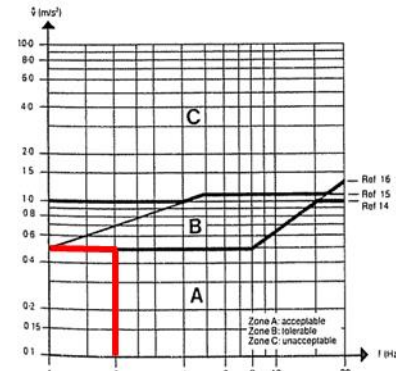
Gambar 7. Detail penampang busur.



Gambar 8. Detail kabel penggantung.



Gambar 9. Klasifikasi efek fisiologis berdasarkan amplitudo.



Gambar 10. Klasifikasi efek fisiologis berdasarkan percepatan.

III. METODOLOGI

Urutan penyelesaian perencanaan ini dapat dilihat pada bagan alir pada Gambar 4.

Adapun pada perencanaan ini perencanaan struktur jembatan akan dimodifikasi dengan data-data sebagai berikut:

- Nama : Jembatan Pegalongan – Mandirancan
- Lokasi : Kec.Patikraja, Kab. Banyumas
- Bentang (L) : 140 m
- Lebar : 16 m
- Jumlah Abutmen : 2 buah
- Jumlah Pilar : 0 buah
- Material Rencana : ASTM A36

IV. HASIL PERENCANAAN

A. Preliminary Design

Preliminary design yang digunakan dalam penelitian ini ada dua, yaitu geometri busur dan geometri gelagar.

1) Geometri Busur

Preliminary design geometri busur direncanakan berdasarkan rumusan pendekatan dengan hasil perhitungan yang disajikan pada Tabel 1.

2) Geometri Gelagar

Gelagar direncanakan menggunakan profil box girder dengan sistem orthotropic, dimensi gelagar direncanakan

Tabel 9.

Rekapitulasi gaya dalam kabel penggantung kondisi normal

Frame	Pu (kN)	β_2 (kN)	Status	P (kN)	$0,45\beta_2$ (kN)	Status
C1 & C14	1167.06	4551	OK	801.36	2048	OK
C2 & C15	1955.66	4551	OK	1411.89	2048	OK
C3 & C16	2213.50	4551	OK	1611.81	2048	OK
C4 & C17	2270.80	4551	OK	1655.94	2048	OK
C5 & C18	2315.90	4551	OK	1689.79	2048	OK
C6 & C19	2397.00	4551	OK	1749.03	2048	OK
C7 & C20	2485.15	4551	OK	1812.35	2048	OK
C8 & C21	2499.37	4551	OK	1839.36	2048	OK
C9 & C22	2439.54	4551	OK	1806.62	2048	OK
C10 & C23	2274.31	4551	OK	1691.20	2048	OK
C11 & C24	1983.04	4551	OK	1478.20	2048	OK
C12 & C25	1566.20	4551	OK	1167.50	2048	OK
C13 & C26	1047.73	4551	OK	775.63	2048	OK
C14 & C27	1167.06	4551	OK	801.36	2048	OK

Tabel 10.

Rekapitulasi gaya dalam kabel penggantung kondisi 1 kabel putus

Frame	Pu (kN)	β_2 (kN)	Status
C1 & C14	1092.34	4551	OK
C2 & C15	1919.52	4551	OK
C3 & C16	2257.03	4551	OK
C4 & C17	2437.99	4551	OK
C5 & C18	2637.44	4551	OK
C6 & C19	2870.83	4551	OK
C7 & C20	3033.82	4551	OK
C8 & C21	-	4551	OK
C9 & C22	2873.80	4551	OK
C10 & C23	2575.47	4551	OK
C11 & C24	2182.32	4551	OK
C12 & C25	1691.76	4551	OK
C13 & C26	1121.11	4551	OK
C14 & C27	1092.34	4551	OK

berdasarkan rumusan pendekatan dengan hasil perhitungan yang disajikan pada Tabel 2.

B. Perencanaan Struktur Sekunder

Struktur sekunder pada jembatan ini sistem lantai ortotropik yang terdiri dari *deck plate, ribs, floor beam*, dan *diafragma* yang direncanakan menggunakan *Pelikan – Esslinger (P-E) Method* serta komponen pelengkap berupa sandaran dan trotoar.

1) Deck Plate

Ketebalan dari *deck plate* dapat didekati dengan rumus berikut [5]:

$$t_p = 0,0065 \times a \times \sqrt[3]{P}$$

$$t_p = 0,0065 \times 28 \times \sqrt[3]{113,129} = 0,88 \text{ in} = 2,3 \text{ cm}$$

Tabel 11.

Rekapitulasi partisipan massa

Mode	Sum Ux (Longitudinal)	Sum Uy (Transversal)
1	0.89698	5.96E-05
2	0.89702	0.82361
3	0.89702	0.82361
4	0.89808	0.82959
5	0.89808	0.82959
6	0.902	0.83073
7	0.902	0.83073
8	0.90215	0.83079
9	0.90222	0.8308
10	0.90222	0.8308
11	0.90222	0.8308
12	0.90222	0.91696

Tabel 12.

Rekapitulasi periode fundamental struktur

Mode	Sum Ux (Longitudinal)	Sum Uy (Transversal)
1	0.89698	5.96E-05
2	0.89702	0.82361
3	0.89702	0.82361
4	0.89808	0.82959
5	0.89808	0.82959
6	0.902	0.83073
7	0.902	0.83073
8	0.90215	0.83079
9	0.90222	0.8308
10	0.90222	0.8308
11	0.90222	0.8308
12	0.90222	0.91696



Gambar 11. Penamaan titik perletakan.

Berdasarkan analisa dengan menggunakan *P-E Method*, diperoleh:

$$M_s = 48.827,55 \text{ kg c} , \quad S = 61,70 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{ijin} = \frac{2}{3} \times Fy = \frac{2}{3} \times 2.500 = 1.666,7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{transvesal} = \frac{M_s}{S} = 77,98 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \leq \sigma_{ijin} \quad (OK)$$

$$\sigma_{longitudinal} = 0,3 \times \sigma_{transvesal} = 233,69 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \leq \sigma_{ijin} \quad (OK)$$

Dilakukan juga kontrol lendutan yang diperoleh:

$$\Delta_{max} = \frac{a}{300} = \frac{28}{300} = 0,093 \text{ in} = 2,37 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{actual} &= \frac{5}{6} \times \frac{1}{384} \times \frac{P \times a^4}{EI} \\ &= \frac{5}{6} \times \frac{1}{384} \times \frac{113,13 \times 28^4}{2,9E + 0,7 \times 0,056} \\ &= 0,091 \text{ in} = 2,32 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\Delta_{max} \geq \Delta_{actual} \quad (OK)$$

2) Ribs

Digunakan *ribs* dengan tipe *closed ribs* dengan dimensi 355 x 200 x 255 x 10 dengan jarak antar ribs 700 mm yang dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 13.
Rekapitulasi sambungan lantai kendaraan

Elemen	Sambungan	Tebal las (mm)
Ribs – Deck Plate	Las Sudut	8
Ribs – Floor Beam	Las Sudut	8
Floor Beam – Side Girder	Las Sudut	10
Diafragma – Floor Beam	Las Sudut	8
Antar Segmen Box Girder	Las Tumpul	Penetrasi Penuh

Tabel 14.
Rekapitulasi sambungan struktur busur

Segmen	n Baut Badan	n Baut Sayap	
B1 – B2	B30 – B29	81	80
B2 – B3	B29 – B28	72	80
B3 – B4	B28 – B27	63	80
B4 – B5	B27 – B26	54	64
B5 – B6	B26 – B25	45	64
B6 – B7	B25 – B24	45	80

Tabel 15.
Rekapitulasi sambungan kabel penggantung

Elemen	Sambungan	Keterangan
Fork End – Gusset Plate	Pin	D = 118 mm
Gusset Plate – Pelat Tarik	Las Sudut	a = 8 mm
Pelat Tarik – Dek/Busur	Baut	16M24

Tabel 16.
Rekapitulasi pot bearing lantai kendaraan

Titik Perletakan	Jenis	Tipe
1	Longitudinal Guided	Freyssinet GG6,000-1,800.400
2	Free Sliding	Freyssinet GL4,000 400.40
3	Free Sliding	Freyssinet GL4,000 400.40
4	Longitudinal Guided	Freyssinet GG6,000-1,800.400

Berdasarkan analisa dengan menggunakan *P-E Method*, diperoleh tegangan yang terjadi yang disajikan pada Tabel 3. Dilakukan juga kontrol lendutan yang diperoleh :

$$\Delta_{max} = \frac{a}{500} = \frac{197}{300} = 0,39 \text{ in} = 9,44 \text{ mm}$$

$$\Delta_{actual} = \frac{5}{384} \times \frac{P \times a^4}{EI} = \frac{5}{384} \times \frac{113.13 \times 28^4}{2,9E+0,7 \times 0,056} = 0,278 \text{ in} = 7,07 \text{ mm}$$

$$\Delta_{max} \geq \Delta_{actual} \quad (OK)$$

3) Floor Beam & Diafragma

Digunakan *floor beam* dengan tipe *inverted T* dengan dimensi 400 x 400 x 20 x 20 dengan jarak antar *floor beam* 5.000 m yang dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan analisa dengan menggunakan *P-E Method*, diperoleh tegangan yang terjadi pada *floor beam* dan *diafragma* yang disajikan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

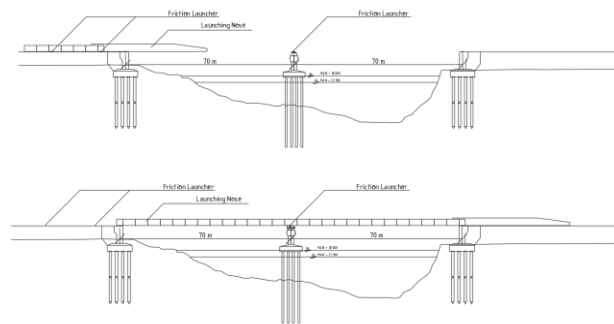
4) Sandaran & Trotoar

Sandaran direncanakan menggunakan baja profil dengan detail yang tersaji dalam Tabel 6.

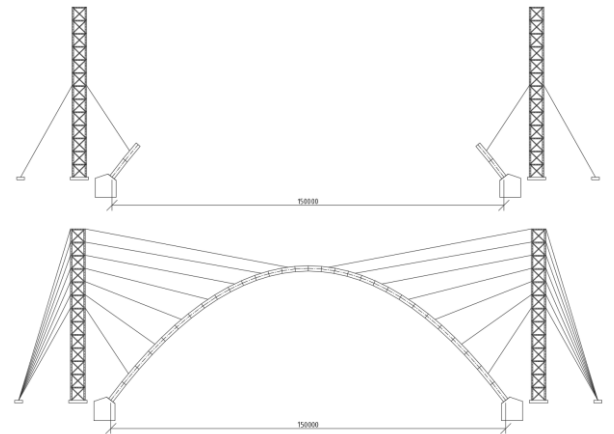
Trotoar direncanakan menggunakan beton bertulang dengan tulangan lentur D12-120 dan tulangan bagi D9-150.

C. Pemodelan Struktur

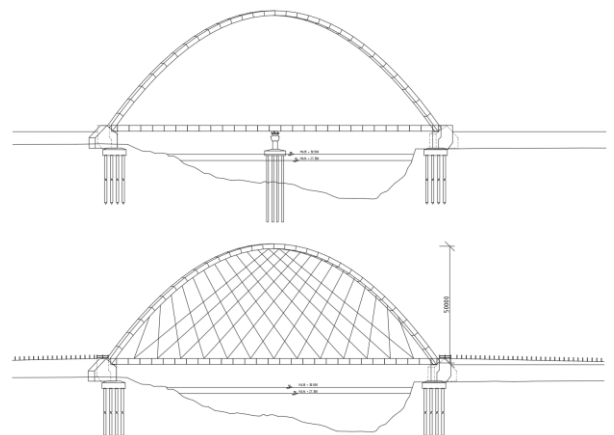
Pemodelan struktur dilakukan dengan program bantu SAP2000 v20.2. dengan metode *Fishbone* dimana dilakukan penyederhanaan pada pemodelan dengan menggunakan



Gambar 12. Proses *launching* lantai kendaraan.



Gambar 13. Proses *erection* busur.



Gambar 14. Proses pemasangan kabel penggantung.

elemen garis yang merepresentasikan suatu elemen atau bagian dari suatu elemen. Bentuk pemodelan model jembatan pada program bantu dapat dilihat pada Gambar 7.

D. Perencanaan Struktur Utama

Struktur utama terdiri dari *box girder* lantai kendaraan, *box girder* busur, dan kabel penggantung.

1) Lantai Kendaraan

Struktur lantai kendaraan secara keseluruhan direncanakan menggunakan *Orthotropic Single Trapezoidal Steel Box Girder* dengan 29 segmen dengan kode segmen M sepanjang 5 meter per segmen dengan detail penampang yang dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan *output* dari program bantu SAP2000 v20.2, diperoleh gaya dalam pada lantai kendaraan terbesar pada kombinasi Ekstrem 1x yang tersaji pada Tabel 7.

Dilakukan perhitungan kapasitas penampang berdasarkan SNI 1729:2020 [6].

Tabel 17.
Rekapitulasi gaya dalam lantaikendaraan saat launching

Fra me	Momen <i>Staging</i> (kN.m)				ØMn (kN)	Sta tus	Fra me	Momen <i>Staging</i> (kN.m)				ØMn (kN)	Sta tus
	1	2	3	4				1	2	3	4		
M1	-	-	-	11971.65	181130.06	OK	M16	-	-	48038.82	-59040.1	181130.06	OK
M2	-	-	-	24538.97	181130.06	OK	M17	-	-	49669.40	-46452.9	181130.06	OK
M3	-	-	-	34424.53	181130.06	OK	M18	-	-	49666.76	-27581.6	181130.06	OK
M4	-	-	-	40996.16	181130.06	OK	M19	-	653.73	47135.35	6997.025	181130.06	OK
M5	-	-	736.91	44061.18	181130.06	OK	M20	-	-1935.54	39681.14	21262.67	181130.06	OK
M6	-	-	-1834.59	44214.52	181130.06	OK	M21	-	-7806.60	28426.31	32144.08	181130.06	OK
M7	-	-	-7807.63	43573.88	181130.06	OK	M22	-	-17045.29	-9732.34	39536.88	181130.06	OK
M8	-	-	-17118.89	39536.88	181130.06	OK	M23	-	-28446.23	-33225.68	43573.88	181130.06	OK
M9	-	-	-28015.93	32144.08	181130.06	OK	M24	-	-58967.98	-63906.95	44214.52	181130.06	OK
M10	-	-	-58634.41	21262.67	181130.06	OK	M25	-	-58853.66	-63641.17	44061.18	181130.06	OK
M11	-	-	-57414.19	6997.025	181130.06	OK	M26	-	-29790.88	-41205.18	40996.16	181130.06	OK
M12	-	-	-21196.45	-27581.6	181130.06	OK	M27	-	-19198.36	-21734.94	34424.53	181130.06	OK
M13	-	-	15393.21	-46452.9	181130.06	OK	M28	-	-9770.61	-1158.80	24538.97	181130.06	OK
M14	-	-	31189.86	-59040.1	181130.06	OK	M29	-	-3204.22	-4150.92	11971.65	181130.06	OK
M15	-	-	41546.61	-59040.1	181130.06	OK							

Tabel 18.
Rekapitulas gaya dalam busur saat erection (1)

Fra me	Aksial <i>Staging</i> (kN.m)				ØPn (kN)	Sta tus	Fra me	Aksial <i>Staging</i> (kN.m)				ØPn (kN)	Sta tus
	5	6	7	8				5	6	7	8		
B1	-784.45	-1893.26	-3108.30	-4358.17	213077.1	OK	B16	-	-	-	-	213077.1	OK
B2	-336.65	-1444.71	-2657.88	-3907.74	213077.1	OK	B17	-	-	-	-	213077.1	OK
B3	-	-1074.01	-2267.88	-3506.38	213077.1	OK	B18	-	-	-	-	213077.1	OK
B4	-	-691.77	-1885.44	-3123.61	213077.1	OK	B19	-	-	-	-	213077.1	OK
B5	-	-	-1274.42	-2547.87	213077.1	OK	B20	-	-	-	-	213077.1	OK
B6	-	-	-959.84	-2233.17	213077.1	OK	B21	-	-	-	-	213077.1	OK
B7	-	-	-	-1438.79	213077.1	OK	B22	-	-	-	-	213077.1	OK
B8	-	-	-	-1190.97	213077.1	OK	B23	-	-	-	-1190.97	213077.1	OK
B9	-	-	-	-	213077.1	OK	B24	-	-	-	-1438.79	213077.1	OK
B10	-	-	-	-	213077.1	OK	B25	-	-	-959.84	-2233.17	213077.1	OK
B11	-	-	-	-	213077.1	OK	B26	-	-	-1274.42	-2547.87	213077.1	OK
B12	-	-	-	-	213077.1	OK	B27	-	-691.77	-1885.44	-3123.61	213077.1	OK
B13	-	-	-	-	213077.1	OK	B28	-	-1074.01	-2267.88	-3506.38	213077.1	OK
B14	-	-	-	-	213077.1	OK	B29	-336.65	-1444.71	-2657.88	-3907.74	213077.1	OK
B15	-	-	-	-	213077.1	OK	B30	-784.45	-1893.26	-3108.30	-4358.17	213077.1	OK

Kontrol Kekuatan Tekan :

$$\phi P_n = 182.520,01 \text{ kN} \geq 6.381,39 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Kuat Geser :

$$\phi V_n = 66.229,61 \text{ kN} \geq 2.189,46 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Kuat Momen :

$$\phi M_n = 181.130,06 \text{ kN} \geq 63.499,59 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Kuat Torsi :

$$\phi T_n = 307.243,23 \text{ kN} \geq 10.873,9 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Interaksi pada Lentur dan Aksial :

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1$$

$$\frac{5363.51}{2 * 182520.01} + \frac{66817.89}{181130.06} \leq 1, \quad 0,38 \leq 1$$

2) Busur

Struktur busur direncanakan menggunakan *Box Girder* dengan *stiffener* dengan 30 segmen dengan kode segmen B sepanjang ±5 meter per segmen dengan detail penampang yang dapat dilihat pada Gambar 7.

Berdasarkan *output* dari program bantu SAP2000 v20.2, diperoleh gaya dalam pada busur terbesar pada kombinasi

Ekstrem 1x yang tersaji pada Tabel 8.

Dilakukan perhitungan kapasitas penampang berdasarkan SNI 1729:2020 [6],didapat:

Kontrol Kekuatan Tekan :

$$\phi P_n = 213.077,08 \text{ kN} \geq 33.535,94 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Kuat Geser :

$$\phi V_{nx} = 36.145,71 \text{ kN} \geq 1.695,89 \text{ kN (OK)}$$

$$\phi V_{ny} = 57.949,29 \text{ kN} \geq 2.222,83 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Kuat Momen :

$$\phi M_{nx} = 160.065 \text{ kN} \geq 19.332,49 \text{ kN (OK)}$$

$$\phi M_{ny} = 270.675 \text{ kN} \geq 70.093,01 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Kuat Torsi :

$$\phi T_n = 115.464,93 \text{ kN} \geq 1.897,76 \text{ kN (OK)}$$

Kontrol Interaksi pada Lentur dan Aksial :

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1$$

$$\frac{33535.94}{2 * 213077.08} + \left(\frac{19332.49}{160065} + \frac{70093.01}{270675} \right) \leq 1 ; \quad 0,72 \leq 1$$

Tabel 19.
Rekapitulasi gaya dalam busur saat erection (1)

Frame	Aksial Staging (kN.m)				ØPn (kN)	Status	Frame	Aksial Staging (kN.m)				ØPn (kN)	Status
	9	10	11	12				9	10	11	12		
B1	-5613.65	-6864.27	-8109.55	-8698.76	213077.1	OK	B16	-	-	-	-509.32	213077.1	OK
B2	-5166.00	-6422.75	-7677.79	-8271.94	213077.1	OK	B17	-	-	-1727.13	-2271.15	213077.1	OK
B3	-4759.18	-6015.72	-7275.34	-7873.62	213077.1	OK	B18	-	-	-1803.50	-2370.81	213077.1	OK
B4	-4378.32	-5640.15	-5640.15	-7511.56	213077.1	OK	B19	-	-1587.03	-3113.78	-3700.24	213077.1	OK
B5	-3825.82	-5108.06	-6398.53	-7005.96	213077.1	OK	B20	-	-1713.18	-3253.64	-3853.89	213077.1	OK
B6	-3511.36	-4796.83	-6094.79	-6704.74	213077.1	OK	B21	-1396.48	-2836.06	-4245.76	-4853.31	213077.1	OK
B7	-2792.81	-4127.89	-5466.54	-6080.52	213077.1	OK	B22	-1580.77	-3025.50	-4438.56	-5052.11	213077.1	OK
B8	-2543.63	-3878.41	-5220.62	-5833.93	213077.1	OK	B23	-2543.63	-3878.41	-5220.62	-5833.93	213077.1	OK
B9	-1580.77	-3025.50	-4438.56	-5052.11	213077.1	OK	B24	-2792.81	-4127.89	-5466.54	-6080.52	213077.1	OK
B10	-1396.48	-2836.06	-4245.76	-4853.31	213077.1	OK	B25	-3511.36	-4796.83	-6094.79	-6704.74	213077.1	OK
B11	-	-1713.18	-3253.64	-3853.89	213077.1	OK	B26	-3825.82	-5108.06	-6398.53	-7005.96	213077.1	OK
B12	-	-1587.03	-3113.78	-3700.24	213077.1	OK	B27	-4378.32	-5640.15	-5640.15	-7511.56	213077.1	OK
B13	-	-	-1803.50	-2370.81	213077.1	OK	B28	-4759.18	-6015.72	-7275.34	-7873.62	213077.1	OK
B14	-	-	-1727.13	-2271.15	213077.1	OK	B29	-5166.00	-6422.75	-7677.79	-8271.94	213077.1	OK
B15	-	-	-	-509.32	213077.1	OK	B30	-5613.65	-6864.27	-8109.55	-8698.76	213077.1	OK

3) Kabel Penggantung

Kabel penggantung direncanakan menggunakan *Macalloy 520 Bar System M100* dengan spesifikasi.

Min. Yield Load = 3585 kN
Min. Break Load (β_2) = 4551 kN

Ilustrasi kabel penggantung dapat dilihat pada Gambar 8.

Perencanaan kabel penggantung dilakukan dengan 2 simulasi kasus, yaitu kondisi seluruh kabel bekerja dan kondisi terdapat 1 kabel putus (*accidental load*) pada kabel yang memiliki gaya dalam terbesar. Kontrol gaya dalam kabel penggantung pada kondisi normal harus direncanakan pada kondisi ultimit dengan kapasitas β_2 dan kondisi layan dengan kapasitas $0,45\beta_2$ [7].

Berdasarkan *output* dari program bantu SAP2000 v20.2, didapat gaya dalam kabel setiap kasusnya yang tersaji dalam Tabel 9 dan Tabel 10.

4) Kontrol Lentutan

Berdasarkan SNI 1725:2016 [8], beban hidup untuk evaluasi lentutan adalah diambil nilai yang terbesar dari lentutan akibat beban satu truk, atau lentutan akibat BTR. Berdasarkan *output* dari program bantu SAP2000 v20.2, diperoleh:

$$\Delta_{ijin} = \frac{L}{1.000} = \frac{140}{1.000} = 0,14 \text{ in} = 140 \text{ mm}$$

$$\Delta_{Truk} = 3,1 \text{ mm} , \quad \Delta_{BTR} = 28,3 \text{ mm} \text{ (Menentukan)}$$

$$\Delta_{BTR} \leq \Delta_{ijin} \quad (OK)$$

E. Kontrol Desain Struktur

Pada pemodelan dilakukan validasi untuk memverifikasi pemodelan terhadap kondisi nyata. Validasi pemodelan yang dilakukan antara lain kontrol partisipasi massa, dan kontrol periode fundamental struktur.

1) Partisipasi Massa

Berdasarkan AASHTO LRFD *Seismic Bridge Design* [9], jumlah mode dalam pemodelan yang dianalisis harus minimal mencapai 90% partisipasi massa dalam arah longitudinal dan transversal. Rekapitulasi partisipasi massa disajikan dalam Tabel 11.

2) Periode Fundamental Struktur

Berdasarkan hasil analisis dengan program bantu SAP2000

v.20, didapat nilai frekuensi alami melalui analisis mode dengan jenis mode yang diambil dari nilai partisipasi massa dominan pada setiap modenya. Rekapitulasi periode fundamental struktur tersaji pada Tabel 12.

F. Kontrol Perilaku Aerodinamis

Analisa struktur terhadap perilaku aerodinamis jembatan yang dilakukan antara lain kontrol angka *mathivat*, *vortex-shedding*, dan *flutter*.

1) Angka Mathivat

Nilai frekuensi natural akibat lentur balok pertama (f_B) dan torsi balok pertama (f_T) harus memenuhi Angka Mathivat.

$$\frac{f_T}{f_B} \cong 2,5 , \quad f_B = 2,09 \text{ Hz} , \quad f_T = 5,49 \text{ H}$$

$$\frac{f_T}{f_B} = \frac{5.49}{2.09} = 2,6 \quad (OK)$$

2) Vortex Shedding

Struktur jembatan perlu direncanakan terhadap efek *vortex shedding* agar didapatkan efek fisiologis jembatan akibat gaya *uplift* [7]. Berdasarkan parameter lingkungan dan dimensi pada struktur jembatan, didapatkan kategori jembatan yang tersaji pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Berdasarkan pengklasifikasian tersebut, diperoleh struktur jembatan termasuk Kategori B (*Tolerable*) untuk efek fisiologis berdasarkan amplitudo dan termasuk Kategori A (*Acceptable*) untuk efek fisiologis berdasarkan percepatan.

3) Flutter

Efek *flutter* terjadi pada suatu kecepatan angin kritis (V_{kritis}) dimana gaya aerodinamis yang bekerja pada dek jembatan mengakibatkan struktur terosilasi secara bersamaan pada kondisi lentur dan torsi yang membahayakan struktur jembatan. Berdasarkan perhitungan efek *flutter* [7], diperoleh:

$$\eta = 0,8 , \quad V_{kritis \text{ teoritis}} = 76,8 \text{ m/s}$$

$$V_{kritis \text{ aktual}} = \eta \times V_{kritis \text{ teoritis}} = 0,8 \times 76,8 \frac{m}{s} = 61,44 \frac{m}{s} = 221,2 \text{ km/h}$$

$$V_{rencana} = 126 \frac{m}{s} , \quad V_{rencana} \leq V_{kritis \text{ aktual}} \quad (OK)$$

G. Perencanaan Sambungan dan Perletakan

Perencanaan sambungan dan perletakan yang diperhatikan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1) Sambungan Lantai Kendaraan

Pada perencanaan sambungan lantai kendaraan, sambungan direncanakan menggunakan las dengan mutu E90xx. Hasil perhitungan sambungan lantai kendaraan disajikan pada Tabel 13.

2) Sambungan Struktur Busur

Pada perencanaan sambungan struktur busur, sambungan direncanakan dengan sambungan momen dengan menggunakan baut dengan mutu A325 M27 dengan ulir diluar bidang geser. Pelat penyambung menggunakan baja dengan mutu ASTM A36. Hasil perhitungan sambungan struktur busur disajikan pada Tabel 14.

3) Sambungan Kabel Penggantung

Sambungan kabel penggantung menuju lantai kendaraan dan busur direncanakan pada kabel dengan gaya dalam terbesar menggunakan las E70xx dan baut dengan mutu A325 M24 dengan ulir diluar bidang geser. Pelat penyambung menggunakan baja dengan mutu ASTM A36. Hasil perhitungan sambungan kabel penggantung disajikan pada Tabel 15.

4) Perletakan Lantai Kendaraan

Lantai kendaraan direncanakan menggunakan perletakan *pot bearing* dari *Freyssinet* dengan tipe *free sliding* dan *longitudinal guided* dengan ilustrasi penamaan titik perletakan pada Gambar 11 dan rekapitulasi yang disajikan pada Tabel 16.

5) Perletakan Struktur Busur

Perletakan struktur busur direncanakan menggunakan base plate. Berdasarkan perhitungan *AISC Design Guide 1 – Base Plate and Anchor Rod Design* [10], diperoleh eksentrisitas base plate termasuk eksentrisitas kecil pada seluruh kombinasi, sehingga diperoleh:

$$tp = 1,5 \times m \times \sqrt{\frac{fp}{Fy}} = 1,5 \times 600 \times \sqrt{\frac{13,63}{495}} \approx 150 \text{ mm}$$

Digunakan angkur M50 pada perletakan untuk menahan gaya geser pada base plate, diperoleh:

$$V_u = 6.558,24 \text{ kN} , \phi V_n = 690,66 \text{ k} , n = \frac{V_u}{\phi V_n} = \frac{6.558,24}{690,66} \approx 16 \text{ Buah}$$

H. Analisa Staging

Tahap pelaksanaan dari pada struktur jembatan direncanakan menggunakan metode *incremental launching* untuk lantai kendaraan dan kantilever *tieback* /kantilever sebagian untuk busur.

1) Launching Lantai Kendaraan

Proses *launching* pada lantai kendaraan dikategorikan sebagai *stage* 1-4 yang dapat dilihat pada Gambar 12. Berdasarkan *output* dari program bantu CSiBridge v20, didapatkan gaya dalam lantai kendaraan pada proses *launching* yang disajikan pada Tabel 17.

2) Erection Struktur Busur

Proses *erection* pada struktur busur dikategorikan sebagai *stage* 5 – 12 yang dapat dilihat pada Gambar 13. Berdasarkan *output* dari program bantu CSiBridge v20, didapatkan gaya dalam struktur busur pada proses *erection* yang disajikan pada Tabel 18 dan Tabel 19.

3) Pemasangan Kabel Penggantung

Proses pemasangan kabel penggantung dikategorikan sebagai *stage* 13 – 15 yang dapat dilihat pada Gambar 14. Setelah semua kabel terpasang, pilar eksisting dibongkar dan kabel dilakukan *tuning*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut: (1) Seluruh elemen struktur sekunder telah memenuhi syarat terhadap kontrol tegangan yang mengacu pada SNI 1729:2020 [6]. (2) Seluruh elemen struktur primer telah memenuhi syarat terhadap kontrol aksial, kontrol geser, kontrol momen, kontrol torsi, kontrol interaksi aksial dan lentur dan kontrol lendutan yang mengacu kepada SNI 1729:2020 [6] dan SNI 1725:2016 [8]. (3) Struktur jembatan telah memenuhi kontrol perilaku aerodinamis berupa angka *mathivat*, *vortex shedding*, dan *flutter*. (4) Metode konstruksi direncanakan menggunakan metode *incremental launching* dan kantilever *tieback*. (5) Metode konstruksi jembatan yang direncanakan memenuhi analisa *staging* berdasarkan syarat kuat penampang yang mengacu pada SNI 1729:2020 [6].

Saran yang diberikan adalah pada studi berikutnya diharapkan dapat dilakukan analisis dan pemodelan menggunakan metode *finite element* untuk sistem lantai kendaraan *orthotropic*, serta dilakukan juga analisa perilaku aerodinamis menggunakan *wind tunnel* untuk mendapat perencanaan yang lebih mendetail.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. B. Rustiati, "Gerusan lokal di sekitar abutment jembatan labuan," *SMARTek*, vol. 5, no. 3, 2007.
- [2] W. Lin and Yoda Teruhiko, *Bridge Engineering: Classifications, Design Loading, and Analysis Methods*, 1st ed. Tokyo: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [3] M. Hudecek, "Structural Behavior of Spatial Arch Bridges," Dept. of Civil Engineering, University of Calgary, Calgary, 2017. doi: 10.11575/PRISM/27901.
- [4] J. A. Aguilar-Jiménez, J. M. García-Guerrero, and J. J. Jorquera-Lucerna, "The diagonal arch bridge, a particular case of spatial arch bridges," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, Feb. 2021, doi: 11041869.
- [5] C. P. Heins and D. A. Firmage, *Design of Modern Steel Highway Bridges*, 1st ed. New York: Jhon Wiley & Sons, 1979.
- [6] Badan Standarisasi Nasional, *Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2020.
- [7] R. E. Walther, B. Houriet, W. E. Isler, P. Moia, and J.-F. Klein, *Cable Stayed Bridges: 2nd Edition*, 2nd ed. London: Cable Stayed Bridges: 2nd Edition, 1988.
- [8] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, *Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standar Nasional Indonesia, 2016.
- [9] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 2nd Edition, 2022 Interim Revisions*, 2nd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [10] J. M. Fisher and L. A. Kloiber, *Base Plate and Anchor Rod Design*. Washington DC: American Institute of Steel Construction, 2006.