

PENGUNAAN CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR (CFST) SEBAGAI ELEMEN STRUKTUR JEMBATAN PEJALAN KAKI

Sugeng Riyanto¹, Wahiddin², Mohamad Zenurianto³

^{1,2,3}Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang

¹gusriyan74@yahoo.com, ²wahiddin@polinema.ac.id, ³mzenpolinema@gmail.com

Abstract

The concrete filled steel tubular element (CFST) is a hollow steel profile filled with concrete. The axial capacity of CFST elements is greater than its bending capacity. The CFST element will be used as an element structure of pedestrian arc bridge. In this research, we will analyze the structure of arc bridge with variation of height ratio of arc to span of bridge (y/L) and height ratio of floor elevation to span of bridge (h/L). The ratio value $y/L = 1/6$, produces a larger axial force while the moment that occurs is very small. While the ratio of $h/L = 1/7$, it produces minimum axial force on the least element of the arch bridge.

Keywords: concrete filled steel tubular, pedestrian bridge

Pendahuluan

Kondisi yang terjadi saat ini, bahwa masih banyak daerah yang belum terhubung satu dengan yang lainnya secara optimal. Akibatnya distribusi ekonomi dan pergerakan sosial masyarakat terhambat. Masyarakat berusaha mengatasi hal tersebut dengan pembuatan jembatan yang bersifat sementara demi membantu pergerakan masyarakat memenuhi kebutuhannya. Selain belum adanya jembatan penghubung, beberapa jembatan yang telah dibangun telah mengalami kerusakan. Hal ini disebabkan jembatan tersebut bersifat sementara, rusak karena umur yang relatif lama, beban yang bekerja pada jembatan sudah tidak sesuai lagi dengan perencanaan awal, kurangnya perawatan berkala dan beberapa penyebab lainnya. Meskipun telah mengalami kerusakan, warga masih tetap menggunakan tanpa memperdulikan resiko kecelakaan yang mungkin terjadi akibat kegagalan struktur jembatan tersebut. Pengabaian resiko tersebut karena jembatan menjadi satu-satunya infrastruktur di daerah tersebut. Kalaupun ada jembatan yang lain, maka warga masyarakat harus menempuh perjalanan yang lebih jauh dan lebih lama.

Kendala yang sering ditemui dalam pembangunan jembatan ataupun pemeliharannya adalah sulitnya akses ke lokasi jembatan yang menyebabkan terkendalanya mobilisasi material dan peralatan pembangunan. Selain itu, program pemerintah untuk melibatkan warga terhadap proses pembangunan dan pemeliharaan jembatan sebagai kompensasi dihapusnya subsidi BBM juga menjadi masalah tersendiri. Oleh karena itu diperlukan teknologi yang tepat untuk membangun jembatan yang handal dengan

memanfaatkan sumber daya lokal untuk permasalahan diatas.

Concrete Filled Steel Tubular (CFST) atau elemen profil baja hollow yang diisi beton sudah banyak dimanfaatkan sebagai elemen struktur. Elemen struktur ini memiliki beberapa kelebihan dibandingkan elemen struktur beton bertulang atau elemen struktur baja yaitu memiliki kapasitas tekan yang lebih besar karena efek komposit kedua material dimana elemen baja hollow berfungsi sebagai pengikat beton; daktilitas yang lebih baik; relatif lebih murah karena elemen baja hollow berfungsi sebagai bekisting (Giakoumelis & Lam, 2003); elemen diproduksi secara precast segmental sehingga memudahkan mobilisasi ke daerah-daerah yang sulit terjangkau dan memudahkan pelaksanaannya.

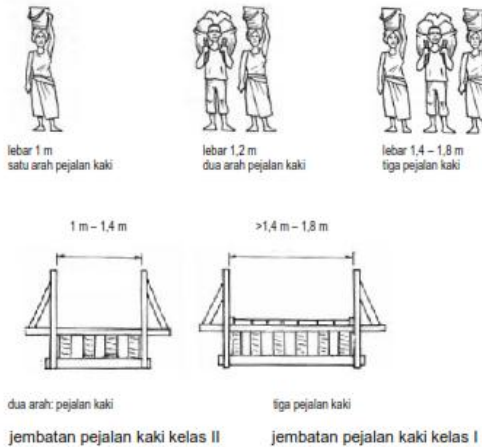
Penelitian ini akan menganalisis jembatan type pelengkung sedemikian hingga elemen struktur rangka mengalami tekan yang lebih dominan. Kemudian mengkomparasinya jika jembatan menggunakan profil WF sebagai elemen struktur jembatan pejalan kaki.

Tinjauan Pustaka

Berdasarkan SE Menteri Pekerjaan Umum No. 02/SE/M/2010 jembatan pejalan kaki hanya boleh dilewati oleh lalu lintas pejalan kaki, dan kendaraan ringan seperti sepeda, gerobak, kendaraan yang ditarik hewan, motor dan kendaraan bermotor ringan dengan maksimum roda tiga dapat lewat untuk keadaan darurat. Pengguna jembatan dan tingkat lalu lintas harus diidentifikasi secara jelas karena akan menentukan lebar lantai jembatan yang diperlukan dan beban hidup pada jembatan yang akhirnya akan menentukan biaya konstruksi (Kementerian Pekerjaan Umum, 2010).

Gambar 1 di bawah ini menunjukkan lebar yang dianjurkan untuk jalan masuk dan lintasan untuk tipe-tipe yang berbeda dan tingkat-tingkat lalu lintas. Dua lebar standar yang dianjurkan pada pedoman ini :

1. 1 m sampai dengan 1,4 m untuk pejalan kaki dua arah (jembatan pejalan kaki Kelas II);
2. 1,4 m sampai dengan 1,8 m untuk tiga pejalan kaki yang beriringan (jembatan pejalan kaki Kelas I).



Gambar 1. Penampang melintang jembatan pejalan kaki untuk berbagai pengguna

Sumber : SE Menteri PU No. 02/SE/M/2010

Lebar ini hanya akan memberikan akses satu arah pada beberapa tipe lalu lintas dan peringatan yang sesuai harus diletakkan pada setiap ujung jembatan. Jembatan kelas I dianjurkan lebar lantai jembatan dibuat 1,8 m, akses kendaraan bermotor lebih besar harus dicegah, misalnya dengan memasang tiang besi atau patok di ujung jembatan.

Jembatan pejalan kaki harus kuat dan kaku tanpa lendutan yang berlebihan untuk menerima beban vertikal dan beban samping. Beban vertikal yang diperhitungkan adalah beban mati dari berat sendiri struktur jembatan dan beban hidup dari penggunaan jembatan. Kedua beban tersebut harus dikombinasikan untuk menghasilkan beban vertikal rencana. Beban samping yang disebabkan oleh tekanan angin, gempa, pengguna yang bersandar atau membentur pagar keselamatan dan benturan ringan yang disebabkan oleh batuan-batuan yang terbawa oleh arus sungai. Beban samping yang harus dipertimbangkan dalam desain adalah beban angin yang terjadi pada sisi depan yang terbuka dari batang-batang jembatan dan beban yang diakibatkan oleh pengguna yang bersandar atau membentur pagar keselamatan dan tiang-tiang penahan. Benturan dari batuan-batuan tidak akan terjadi jika ada jarak bebas yang memadai di bawah jembatan.

Standar perencanaan untuk jembatan pejalan kaki mempertimbangkan standar perencanaan kecepatan angin 35 m/detik, yang mengakibatkan tekanan seragam pada sisi depan yang terbuka dari batang-

batang jembatan dari 130 kg/m². Karena tidak mungkin lalu lintas di atas jembatan pada angin yang besar, beban angin dipertimbangkan terpisah dari beban hidup vertikal. Beban gempa dihitung secara statik ekuivalen dengan memberikan beban lateral di puncak menara sebesar 15% sampai dengan maksimum 20% beban mati pada puncak menara. Beban gempa tidak dihitung bersamaan dengan beban angin karena tidak terjadi pada waktu yang sama.

Aspek beban beban hidup yang harus dipertimbangkan yaitu:

1. Beban terpusat pada lantai jembatan akibat langkah kaki manusia untuk memeriksa kekuatan lantai jembatan;
2. Beban yang dipindahkan dari lantai jembatan ke batang struktur yang kemudian dipindahkan ke tumpuan jembatan. Aksi beban ini akan terdistribusi pendek atau menerus sepanjang batang-batang longitudinal yang menahan lantai jembatan.

Beban hidup yang paling kritis yang dipikul karena pengguna jembatan pejalan kaki ditunjukkan pada **Tabel 1**. Dipertimbangkan bahwa beban terpusat 2000 kgf (20 kN) untuk kendaraan ringan/ternak dan beban merata 5 kPa memberikan batas yang cukup untuk keselamatan untuk semua pengguna biasa dari jembatan pejalan kaki.

Tabel 1. Beban hidup dan lendutan isin jembatan pejalan kaki

Kelas Pengguna	Beban Terpusat	Beban merata	Lendutan Izin
Kelas I	20 kN	5 kPa	1/200 L
Kelas II	-	4 kPa	1/100 L

L adalah panjang bentang utama jembatan.

Kapasitas Tekan Elemen Tekan Tunggal

Berdasarkan SNI 1729:2015 tentang Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, kapasitas tekan desain elemen struktur tekan dirumuskan sebagai kekuatan tekan nominal dikalikan faktor reduksi kekuatan aksial ϕ_c (Badan Standarisasi Nasional, 2015). Kekuatan tekan nominal, P_n , elemen non langsing, harus ditentukan berdasarkan keadaan batas dari tekuk lentur dirumuskan sebagai berikut:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \tag{1}$$

Dimana:

P_n = Kuat tekan nominal

F_{cr} = Tegangan kritis

A_g = Luas penampang elemen

ϕ_c = faktor reduksi aksial, 0,9

Tegangan kritis F_{cr} ditentukan berdasarkan kondisi berikut:

$$1. \text{ Jika } KL/r \leq 4,71 \sqrt{(E/F_y)} \tag{2}$$

$$F_{cr} = 0,658^{F_y/F_e} \tag{2}$$

$$2. \text{ Jika } KL/r > 4,71 \sqrt{(E/F_y)} \tag{3}$$

$$F_{cr} = 0,877 F_e \tag{3}$$

Dengan F_e adalah tegangan tekuk kritis elastis yang dirumuskan sebagai berikut:

$$F_e = \pi^2 E / (kL/r)^2 \quad (4)$$

Dimana:

- E = Elastisitas baja (200000 MPa)
- K = Faktor panjang efektif
- L = panjang tanpa di *bressing* lateral
- r = radius girasi

Kapasitas Tekan Elemen Struktur Komposit

Kekuatan nominal penampang komposit harus ditentukan menurut metode distribusi tegangan plastis. Pada metode ini, kekuatan nominal harus dihitung dengan asumsi bahwa komponen baja telah mencapai tegangan F_y baik dalam tarik atau tekan dan komponen beton dalam tekan akibat adanya gaya aksial dan atau lentur telah mencapai tegangan $0,85f_c'$. Sedangkan untuk Profil struktur berongga bundar yang diisi beton (CFST), tegangan sebesar $0,95f_c'$ diizinkan digunakan untuk komponen beton dalam tekan akibat gaya aksial dan atau lentur untuk memperhitungkan efek dari pengekanan beton.

Elemen CFST dikatakan sebagai elemen struktur komposit jika luas penampang melintang baja minimal 1% dari total penampang melintang komposit. Kekuatan tekan yang tersedia dari elemen CFST simetri ganda yang dibeban secara aksial harus ditentukan untuk keadaan batas tekuk lentur sebagai berikut:

1. Penampang kompak

$$P_{n0} = P_p \quad (5)$$

$$P_p = F_y \cdot A_s + C_2 F_c' (A_c + A_{sr} \cdot E_s/E_c) \quad (6)$$

Dimana nilai C_2 sebesar 0,85 untuk penampang persegi dan 0,95 untuk penampang bundar

2. Penampang non kompak

$$P_{n0} = P_p - (P_p - P_y) / (\lambda_r - \lambda_p)^2 (\lambda - \lambda_p)^2 \quad (7)$$

$\lambda, \lambda_p, \lambda_r$ adalah rasio kelangsingan elemen

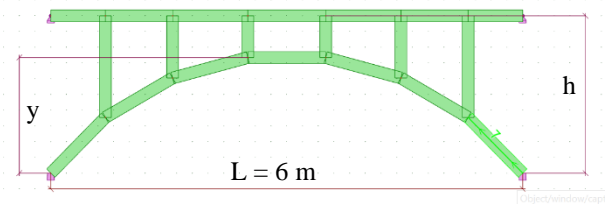
$$P_y = F_y \cdot A_s + 0,7 \cdot F_c' [A_c + A_{sr} (E_s/E_y)] \quad (8)$$

3. Penampang langsing

$$P_{n0} = F_{cr} \cdot A_s + C_2 \cdot F_c' [A_c + A_{sr} (E_s/E_y)] \quad (9)$$

Rancangan Penelitian

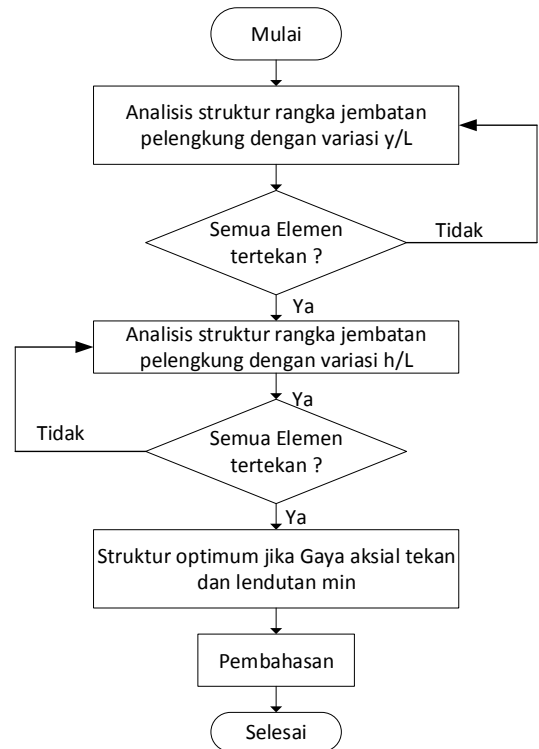
Dengan mempertimbangkan bahwa elemen CFST memiliki kapasitas aksial yang lebih besar, maka bentuk struktur jembatan pejalan kaki yang didesain sedemikian hingga menyebabkan elemen struktur menerima beban aksial tekan yang lebih dominan dibandingkan lenturnya. Oleh karena itu maka bentuk struktur yang dipilih adalah jembatan type pelengkung seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Struktur jembatan pejalan kaki

Dengan alat bantu software aplikasi struktur, struktur jembatan pelengkung akan dianalisis secara 2D dengan beban yang bekerja pada lantai kendaraan berupa beban vertikal. Panjang bentang ditetapkan 6 m, nilai y dan h divariasikan sedemikian hingga seluruh elemen rangka jembatan mengalami tekan. Pada saat elemen jembatan pelengkung mengalami gaya aksial maksimum dan gaya lentur sangat kecil, maka struktur dikatakan optimum.

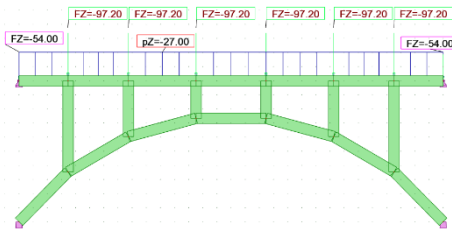
Langkah pelaksanaan penelitian ini seperti pada **Gambar 3**.



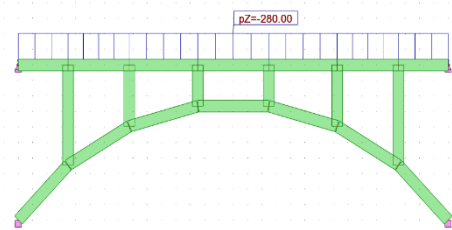
Gambar 3. Flow chart penelitian

Hasil dan Pembahasan

Sistem pembebanan struktur jembatan pelengkung pejalan kaki akibat kombinasi beban mati (**Gambar 4**) dan beban hidup (**Gambar 5**).



Gambar 4. Sistem pembebanan beban mati



Gambar 5. Sistem pembebanan beban hidup

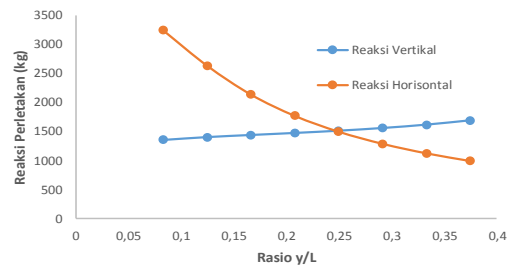
Hasil analisis struktur akibat kombinasi pembebanan tersebut dengan variasi tinggi pelengkung jembatan (y) sedangkan tinggi elevasi lantai jembatan (h) tetap seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil analisis struktur jembatan dengan variasi tinggi pelengkung jembatan

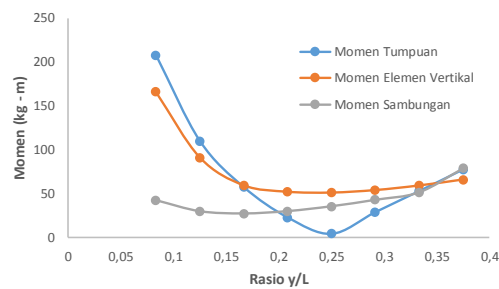
Rasio y/L	Reaksi (kg)		Momen (kg - m)			Gaya Aksial	Lendutan (cm)
	Vert	Hors	Tumpuan	Btg Vert	Sambungan		
0,375	1686,7	994,32	77,27	65,82	78,71	1953,8	0,57
0,333	1613,4	1126,2	52,8	58,98	51,44	1965,5	0,53
0,292	1556,5	1289,6	28,83	53,71	42,92	2020,6	0,46
0,25	1510,8	1497,6	4,25	50,85	35,55	2127,3	0,43
0,208	1472,6	1769,9	23,01	51,8	30	2302,1	0,46
0,167	1438,2	2136,3	57,52	59,19	27,36	2573,2	0,55
0,125	1402,4	2633,7	110	91,12	29,9	2976,6	0,77
0,083	1354,2	3242	207,51	166,18	42,46	3491,3	1,25

Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio y/L maka reaksi perletakan vertikal jembatan pelengkung akan meningkat. Sedangkan reaksi perletakan horisontal akan mengecil jika rasio y/L semakin besar. Seperti terlihat pada grafik pengaruh rasio y/L terhadap reaksi perletakan jembatan pelengkung pada Gambar 6.

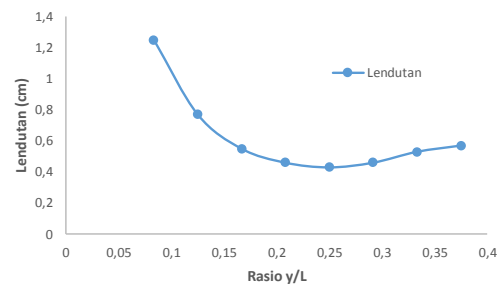
Grafik hubungan rasio y/L terhadap momen tumpuan, momen pada elemen vertikal dan momen pada maksimum pada elemen pelengkung jembatan seperti tampak pada Gambar 7. Momen tumpuan dan momen pada batang atau elemen vertikal jembatan bernilai kecil (optimum) pada saat rasio $y/L = 0,25$ atau tinggi pelengkung dari tumpuan jembatan, $y = 1,5$ m. Sedangkan momen ujung (sambungan) pada elemen pelengkung jembatan memiliki nilai optimum (minimum) pada saat rasio $y/L = 0,167$ atau pada saat $y = 1,0$ m.



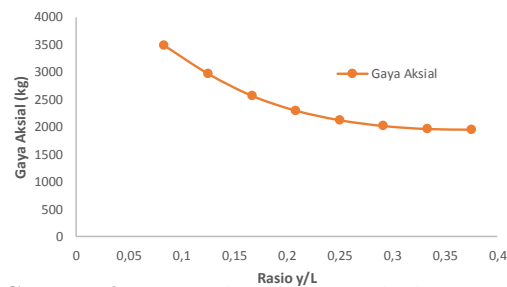
Gambar 6. Pengaruh rasio y/L terhadap reaksi perletakan jembatan pelengkung



Gambar 7. Pengaruh rasio y/L terhadap momen pada elemen jembatan pelengkung



Gambar 8. Pengaruh rasio y/L terhadap lendutan jembatan pelengkung



Gambar 9. Pengaruh rasio y/L terhadap Gaya Aksial tekan jembatan pelengkung

Pada Gambar 8 diperlihatkan grafik pengaruh rasio y/L terhadap lendutan jembatan pelengkung. Nilai optimum atau lendutan minimum terjadi pada saat nilai rasio $y/L = 0,25$ atau tinggi jembatan pelengkung, $y = 1,5$ m.

Gambar 9 menampilkan grafik pengaruh rasio y/L terhadap gaya aksial tekan yang terjadi pada elemen

jembatan pelengkung. Bentuk grafik akibat variasi rasio y/L terhadap gaya aksial sebanding dengan grafik reaksi perletakan horisontal seperti pada **Gambar 6**.

Berdasarkan tampilan pada **Gambar 6**, **Gambar 7** dan **Gambar 8**, dapat disimpulkan bahwa nilai rasio y/L yang memberikan nilai paling optimum pada jembatan pelengkung pejalan kaki adalah 0,25 atau tinggi jembatan pelengkung, $y = 1,5$ m. Dimana reaksi perletakan horisontal dan vertikal optimum, momen tumpuan dan momen pada batang vertikal yang terjadi kecil dan lendutan yang terjadi pada saat itu paling kecil pula.

Dengan menetapkan nilai $y = 1,5$ m, dilakukan analisis kembali dengan variasi tinggi elevasi lantai kendaraan jembatan pelengkung tersebut. Hasil analisis dapat dilihat pada **Tabel 3**.

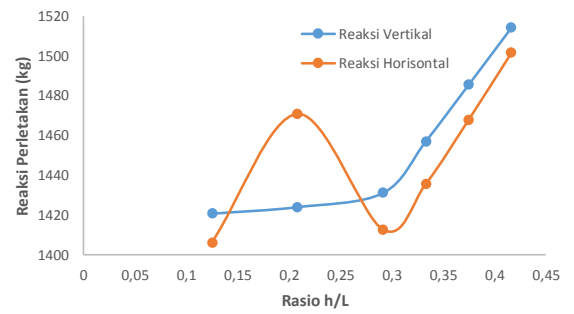
Tabel 3. Hasil analisis struktur jembatan dengan variasi tinggi lantai jembatan pelengkung

Rasio y/L	Reaksi		Momen Max			Aksial	Lendutan
	Vert	Hors	Tumpuan	Btg Vert	Sambungan		
0,417	1514,3	1501,6	4,48	50,31	35,63	2132,5	0,44
0,375	1485,6	1467,9	2,65	55,3	35,01	2088,4	0,41
0,333	1457,1	1435,7	1,34	61,7	34,42	2045,6	0,39
0,292	1431,2	1412,6	2,57	68,13	33,19	2010,9	0,37
0,208	1424	1470,9	23,99	7,2	22,43	2046,6	0,51
0,125	1420,7	1406,3	2,01	37,2	12,99	1999	0,37

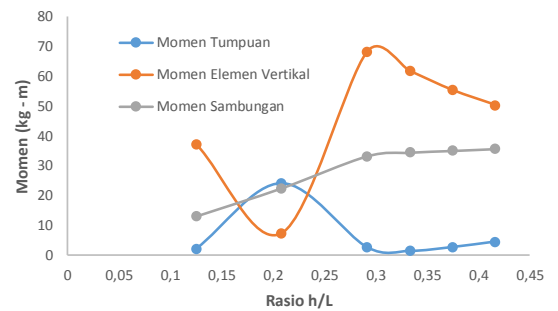
Variasi tinggi elevasi lantai kendaraan berhubungan langsung dengan berat sendiri struktur jembatan. Semakin tinggi elevasi lantai kendaraan jembatan maka akan semakin besar pula berat sendiri struktur sekaligus memperbesar reaksi vertikal dan horisontal jembatan pelengkung. Hal ini juga terlihat pada **Gambar 10**. Reaksi horisontal yang paling kecil terjadi pada saat rasio $h/L = 0,292$ atau saat tinggi lantai kendaraan jembatan, $h = 1,75$ m. Nilai optimum reaksi perletakan berada diantara rasio h/L 0,25 – 0,29.

Pada **Gambar 11** menampilkan grafik pengaruh rasio h/L terhadap momen tumpuan, momen ujung pada elemen vertikal dan momen ujung pada elemen pelengkung jembatan. Momen tumpuan secara keseluruhan relatif sangat kecil sehingga dapat dikatakan bahwa momen tumpuan ini lebih dipengaruhi oleh rasio y/L dibandingkan rasio h/L . Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa nilai optimum momen elemen jembatan pelengkung saat rasio h/L berada pada nilai 0,2 – 0,25.

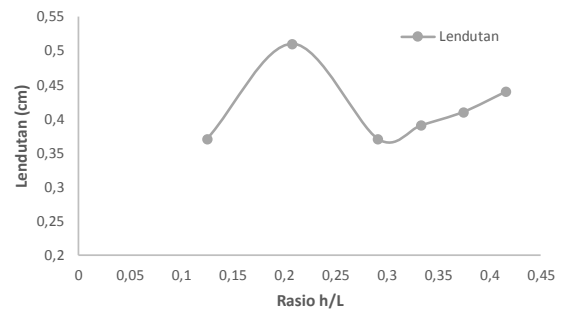
Grafik pengaruh rasio h/L terhadap lendutan ditampilkan pada **Gambar 12**. Pada grafik terlihat bahwa ada lonjakan nilai lendutan saat rasio $h/L = 0,2$. Hal ini terjadi karena letak lantai kendaraan yang langung menumpu pada pelengkung jembatan.. Nilai optimumnya terjadi pada saat rasio $h/L = 0,292$ atau tinggi elevasi lantai kendaraan jembatan, $h = 1,75$ m.



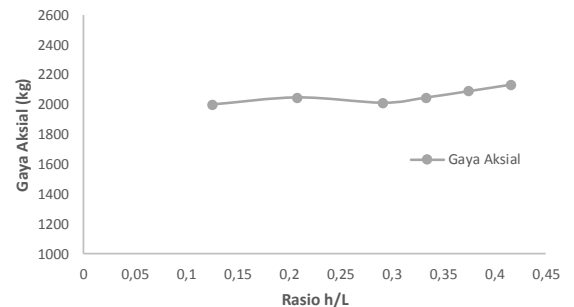
Gambar 10. Pengaruh rasio h/L terhadap reaksi perletakan jembatan pelengkung



Gambar 11. Pengaruh rasio h/L terhadap momen elemen jembatan pelengkung



Gambar 12. Pengaruh rasio h/L terhadap lendutan jembatan pelengkung



Gambar 13. Pengaruh rasio h/L terhadap gaya aksial jembatan pelengkung

Pemeriksaan Kapasitas Penampang CFST

Material penyusun CFST adalah beton dengan $f'_c = 25$ MPa dan $E_c = 25278$ MPa, tegangan leleh baja hollow $f_y = 240$ MPa dan $E_s = 200000$ MPa. Tinggi hollow, $h_s = 15$ cm; lebar, $b_s = 10$ cm; tebal, $t_s = 0,23$ cm; panjang elemen, $L_s = 100$ cm. Sedangkan ukuran beton pengisi hollow, tinggi $h_c = 14,54$ cm; lebar, $b_c = 9,54$ cm; luas penampang, $A_c = 138,71$ cm².

- Kontrol tekuk lokal penampang:

$$\begin{aligned} \lambda &= b/t \\ &= (10 - 2 \times 0,23) / 0,23 \\ &= 41,478 \\ \lambda &= (15 - 2 \times 0,23) / 0,23 \\ &= 63,217 \\ \lambda_p &= 2,26 \sqrt{(200000/240)} \\ &= 65,24 > 63,217 \end{aligned}$$

Maka kriteria penampang adalah kompak

- Kapasitas tekan penampang

$$\begin{aligned} P_{n0} &= P_p \\ P_p &= 2400 \cdot 7,944 + 0,85 \cdot 250 \cdot 138,71 \\ &= 48542,29 \text{ kg} \\ E \cdot I_{eff} &= E_s \cdot I_s + C_1 \cdot E_c \cdot I_c \\ &= 2000000 \cdot 368,73 + 0,3 \cdot 235000 \cdot 2443,77 \\ &= 9097 \times 10^6 \\ P_e &= \pi^2 EI / (kL)^2 \\ &= 3,14 \cdot 9097 \times 10^6 / (1 \cdot 100)^2 \\ &= 896972,7 \text{ kg} \\ P_{n0} / P_e &= 48542,29 / 896972,7 \\ &= 0,054 < 2,25 \end{aligned}$$

Maka

$$\begin{aligned} P_n &= P_{n0} [0,658^{P_{n0}/P_e}] \\ &= 48542,29 [0,658^{0,054}] \\ &= 47.455,12 \text{ kg} \\ \phi P_n &= 0,75 \cdot 47455,12 \\ &= 35.591,34 \text{ kg} \end{aligned}$$

Hasil analisis struktur menunjukkan nilai gaya aksial maksimum yang terjadi adalah $P_u = 2010,88$ kg dan faktor reduksi, $\phi = 0,75$, maka rasio desain adalah :

$$\begin{aligned} R &= P_u / \phi P_n \\ &= 2010,88 / 35591,34 \\ &= 0,057 < 1,00 \end{aligned}$$

Dengan demikian elemen CFST dengan penampang 10x15 sangat kuat untuk memikul beban yang bekerja pada jembatan pelengkung untuk pejalan kaki.

Kesimpulan

Beberapa hal menjadi kesimpulan dalam penelitian ini berdasarkan analisis dan pembahasan di atas sebagai berikut:

- a. Rasio tinggi elevasi lantai kendaraan terhadap panjang bentang jembatan terhadap panjang bentang jembatan pelengkung (y/L) menghasilkan kondisi yang optimal ketika bernilai 0,25. Kondisi optimum terjadi ketika reaksi perletakan horisontal dan vertikal menunjukkan nilai paling optimum, momen pada tumpuan relatif sangat kecil dan lendutan yang terjadi pun paling minimum.

- b. Rasio tinggi elevasi lantai kendaraan terhadap panjang bentang jembatan pelengkung (h/L) dimana rasio y/L tetap, optimum pada saat bernilai 0,292. Namun penentuan elevasi lantai kendaraan lebih ditentukan oleh kondisi tinggi bebas dari muka air sungai ke lantai kendaraan.
- c. Elemen CFST dapat digunakan sebagai elemen struktur jembatan pelengkung untuk pejalan kaki.

Daftar Pustaka

Badan Standarisasi Nasional. (2015). *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural, SNI 1729 : 2015*. Jakarta: BSN.

Giakoumelis, G., & Lam, D. (2003). Axial Capacity of Circular Concrete-Filled Tube Columns. *Journal of Construction Steel Research*, 1049-1068.

Kementerian Pekerjaan Umum. (2010, Pebruari). *Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung untuk Pejalan Kaki*. Jakarta.