

PENGARUH PEMBERIAN *CAMBER* TERHADAP PERILAKU JEMBATAN KOMPOSIT BETON DENGAN GELAGAR BOKS BAJA

Urwatul Wusqo*¹, Ashar Saputra²

¹Jurusan Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, 40559, Indonesia

²Jurusan Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281, Indonesia

*E-mail penulis korespondensi: urwatul.wusqo@polban.ac.id

ABSTRAK

Camber biasanya diberikan pada jembatan untuk mengantisipasi terjadinya lendutan berlebih saat jembatan mulai beroperasi. Pada jembatan baja yang umumnya tersusun dari komponen pelat baja yang tipis, pemberian *camber* pada jembatan juga akan mempengaruhi perilaku jembatan secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh pemberian *camber* pada jembatan gelagar boks baja terhadap lendutan, frekuensi alami, dan tegangan yang terjadi pada jembatan. Jembatan gelagar boks baja dengan panjang 64 meter dimodelkan menggunakan perangkat lunak SAP2000. Tinggi *camber* yang diberikan pada jembatan antara lain 0,7m, 0,8m, 0,9m, 1m, dan 1,1m. Lendutan jangka panjang dihitung menggunakan 3 cara yaitu metode *Bridge Management System* (BMS), model Branson, dan SNI 2847:2013. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian *camber* pada jembatan meningkatkan kekakuan jembatan, yang diindikasikan dengan penurunan nilai lendutan dan peningkatan nilai frekuensi alami jembatan. Selain itu, pemberian *camber* pada jembatan dapat mereduksi nilai tegangan dan gaya geser yang terjadi pada jembatan.

Kata Kunci: Camber, Jembatan Gelagar Boks Baja, Frekuensi Alami Jembatan, Lendutan Jembatan

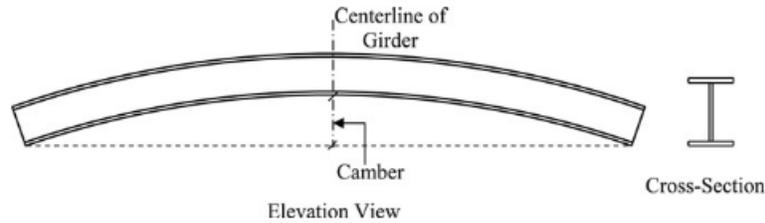
ABSTRACT

Camber is usually created in bridges to anticipate the occurrence of excessive displacement during its service life. The application of camber in steel bridges that are commonly made of thin still plates can also affect the whole performance of the bridges. This study aims to identify the effect of providing a camber to the deflection, natural frequency, as well as stresses of a steel box girder bridge. Numerical analysis of steel box girder bridges was conducted using SAP2000. The camber height applied on the bridges varies from 0.7m to 1.1m. The long-term deflection was calculated using 3 methods, including Bridge Management System (BMS), the Branson model, and SNI 2847:2013. The results show that the application of camber to the steel box girder bridge increased its stiffness, indicated by a decrease in the bridge deflection and an increase in the bridge natural frequency. In addition, the application of camber to the bridge can reduce the stress level and shear that occurs in the bridge

Keywords: *Camber, Steel Box Girder Bridge, Bridge Natural Performance, Bridge Displacement*

PENDAHULUAN

Perkembangan kegiatan perekonomian yang semakin dinamis mendorong pemerintah untuk semakin giat dalam membangun berbagai sarana dan prasana transportasi, salah satunya jalan dan jembatan. Dalam perencanaan jembatan, beberapa aspek yang perlu diperhatikan oleh perencana adalah aspek keamanan, kenyamanan, dan ekonomi. Aspek keamanan berkaitan dengan kekuatan jembatan, sementara aspek ekonomi berkaitan dengan seberapa besar dampak pembangunan jembatan terhadap kegiatan di sekitarnya serta biaya yang timbul akibat pembangunan dan perawatan jembatan. Aspek kenyamanan pada jembatan berkaitan dengan tingkat layanan yang diberikan oleh jembatan terhadap pengguna. Salah satu aspek kenyamanan yang perlu diperhatikan sesuai dengan peraturan jembatan yang berlaku ada adalah besarnya lendutan. Namun demikian, seringkali persyaratan ini tidak dapat dipenuhi sehingga dilakukan pemberian *camber* untuk melawan lendutan yang terjadi akibat beban-beban yang bekerja di atas jembatan. Beban yang bekerja mayoritas merupakan beban terdistribusi merata, sehingga lendutan yang terjadi pada struktur jembatan memiliki bentuk yang menyerupai parabola. Dengan demikian, *camber* yang diberikan pada jembatan umumnya juga mengikuti pola parabola terbalik, dan tinggi *camber* identik dengan jarak antara elevasi rencana (garis as jembatan) dengan elevasi setelah pemberian *camber* di titik tengah bentang, seperti dapat dilihat pada Gambar 1 [1]. Kajian terdahulu menunjukkan bahwa pemberian *camber* pada jembatan memiliki dampak positif pada jembatan, dimana lendutan yang terjadi pada saat beban bekerja selama masa layan jembatan masih memenuhi persyaratan yang diberikan oleh SNI [2].



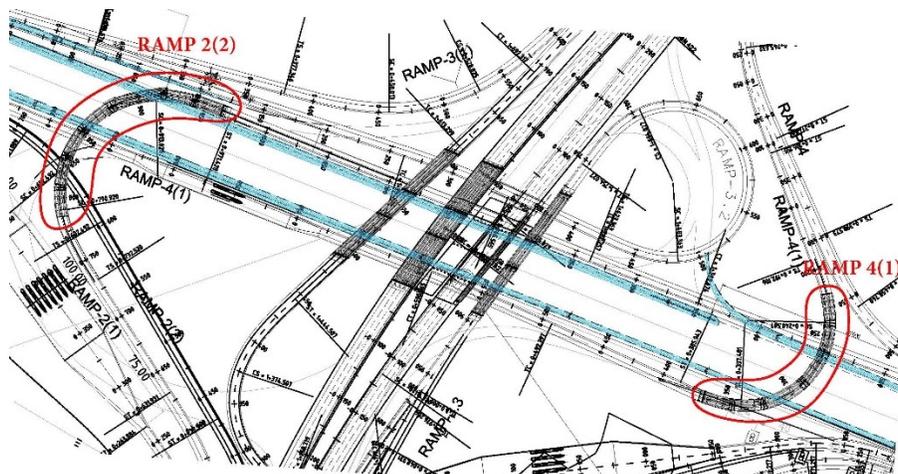
Gambar 1. Tinggi camber pada jembatan [1]

Pemberian *camber* pada jembatan harus direncanakan sejak awal tahapan desain jembatan [3]. Penentuan tinggi *camber* umumnya didasarkan pada nilai lendutan yang terjadi akibat beban yang bekerja di atas jembatan. Hal ini dapat diketahui dari analisa numerik model jembatan yang maupun melalui rumus pendekatan. Pada beberapa studi terdahulu, nilai lendutan dan tinggi *camber* yang perlu diberikan dapat diperkirakan dengan rumus pendekatan yang dihasilkan dari analisa statistik maupun penurunan teorema *force method* [4], [5].

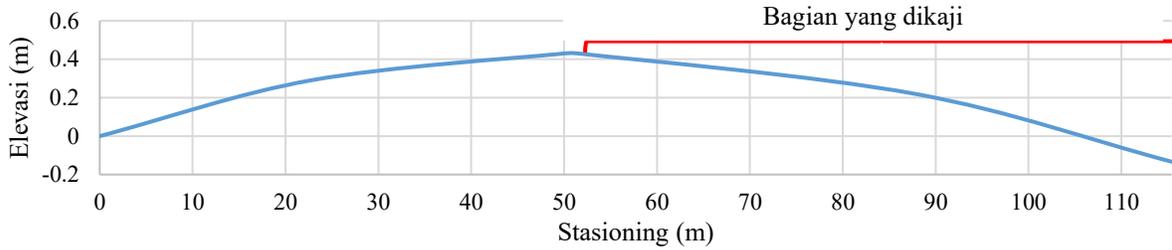
Pemberian *camber* pada jembatan tidak hanya akan berpengaruh terhadap nilai lendutan yang terjadi, namun juga pada perilaku jembatan. Jembatan baja umumnya memiliki elemen penyusun yang cukup tipis, sehingga pemberian *camber* akan memiliki pengaruh yang nyata pada performa jembatan. Pada jembatan rangka baja, semakin tinggi *camber* yang diberikan, elemen batang penyusun rangka baja juga akan menjadi semakin panjang, sehingga elemen batang tersebut menurun kekuatannya dan semakin mudah mengalami tekuk. Hal ini justru berdampak pada penurunan kekuatan jembatan [6]. Pada kasus jembatan rangka baja tersebut, meskipun kekuatannya menurun, nilai lendutan akhir yang terjadi masih memenuhi nilai yang disyaratkan [6]. Sementara itu, pengaruh pemberian *camber* pada jembatan gelagar baja belum banyak dikaji. Oleh karena itu, dilakukan kajian untuk mengetahui pengaruh pemberian *camber* terhadap perilaku jembatan boks baja pada penelitian ini. Adapun perilaku yang dikaji antara lain lendutan yang terjadi, frekuensi alami jembatan, serta tegangan dan gaya geser pada komponen penyusun jembatan. Frekuensi alami jembatan memiliki hubungan yang sangat erat dengan perilaku dinamis jembatan. Karena jembatan merupakan bagian dari jalan tol, maka beban lalu lintas yang cukup intensif akan dialami oleh jembatan, dimana beban lalu lintas akan memberikan pengaruh dinamis tambahan pada jembatan [7]–[9]. Sementara itu, tegangan dan gaya geser pada jembatan memiliki hubungan erat dengan kekuatan jembatan.

2. METODE

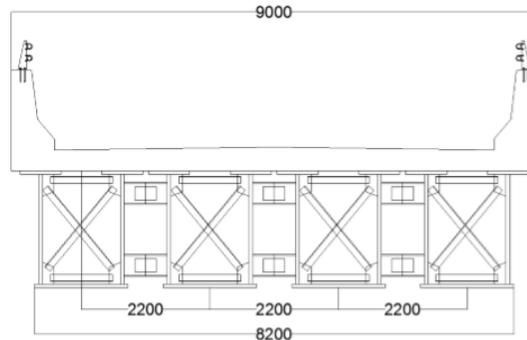
Dalam penelitian ini, jembatan yang akan dikaji merupakan bagian dari *ramp 2(2)* jalan tol seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Jembatan ini merupakan jembatan boks baja yang memiliki kelengkungan secara horisontal dengan radius 74m dan kelengkungan secara vertikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Jembatan ini terdiri atas 2 bentang, dengan panjang bentang pertama adalah 51,4m dan bentang kedua adalah 64m. Dalam penelitian ini, fokus utama dilakukan pada bentang kedua jembatan. Adapun dimensi penampang jembatan dan mutu material dari jembatan yang menjadi objek kajian pada makalah ini disajikan dalam Tabel 1 dan Gambar 4.



Gambar 2 Layout jembatan yang dikaji



Gambar 3 Elevasi titik-titik sepanjang jembatan

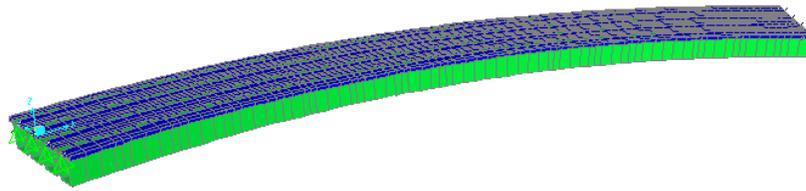


Gambar 4 Potongan melintang jembatan

Tabel 1. Informasi umum jembatan

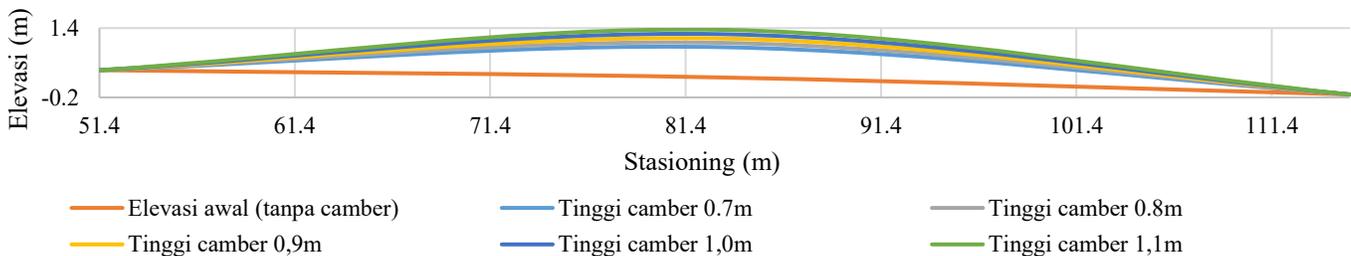
Spesifikasi	Keterangan
Lebar total jembatan	9m
Lebar lajur lalu lintas	8m
Lebar sandaran (atas)	0,25 m
Lebar sandaran (bawah)	0,5 m
Tinggi sandaran	0,8 m
Tebal lapisan aspal dan <i>overlay</i>	0,1 m
Tebal pelat beton	0,3 m
Mutu beton	30 MPa
Mutu baja <i>girder</i> dan <i>stiffener</i>	JIS G 3106:1999 SM490Y ($f_u = 490$ MPa $f_y = 365$ MPa)
Mutu baja <i>bracing</i>	JIS G 3101:1995 SS400 ($f_u = 400$ MPa $f_y = 245$ MPa)
Kedalaman <i>box girder</i>	1900 mm
Lebar total <i>box girder</i>	2100 mm
Lebar pelat sayap atas	600 mm
Tebal pelat sayap atas	50 mm
Lebar pelat sayap bawah	1500 mm
Tebal pelat sayap bawah	50 mm
Jarak <i>bracing</i>	2000 mm
Profil untuk <i>bracing</i>	Baja profil siku L 120x120x12x12

Jembatan yang menjadi objek kajian merupakan jembatan komposit, yang tersusun atas gelagar boks baja dengan pelat beton di atasnya. Dalam penelitian ini, pemodelan struktur jembatan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000 v14.2.2. Pada kedua ujung jembatan, diberikan tumpuan sederhana (*sendi-rol*). Pemodelan struktur dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SAP 2000 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Bagian yang berwarna hijau menunjukkan komponen jembatan yang terbuat dari baja (gelagar boks baja), sementara bagian yang berwarna biru menunjukkan komponen jembatan yang terbuat dari beton.



Gambar 4. Model struktur pada software SAP 2000

Model jembatan dibuat dalam beberapa variasi dengan ketinggian *camber* yang berbeda. Adapun tinggi *camber* yang diberikan adalah 0,7m , 0,8m, 0,9m, 1,0m, dan 1,1m, yang besarnya didasarkan pada hasil analisis awal jembatan sesuai dengan geometri rencana. Tinggi *camber* yang diberikan masih lebih kecil dibandingkan dengan nilai tinggi *camber* maksimum berdasarkan peraturan yang dikutip dari *Departement Of Transportation Structure Design & Construction Division* [6]. Adapun gambaran mengenai elevasi jembatan sebelum dan sesudah adanya *camber* disajikan pada Gambar 5. Pada saat analisis struktur, dilakukan pembebanan pada jembatan sesuai dengan ketentuan *AASHTO LRFD Bridge Design Specification 7th Edition*, dengan kombinasi pembebanan seperti yang disajikan pada Tabel 2 [10].



Gambar 5. Elevasi jembatan sebelum dan sesudah pemberian *camber* (skala vertikal dan skala horizontal tidak memiliki ukuran yang sama)

Tabel 2 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi Beban	
Kuat I	1,25 MS + 1,50 MA + 1,75 TB + 1,75 (LL+IM) + 1,75TR + 1,2TU
Kuat II	1,25 MS + 1,50 MA + 1,35 TB + 1,35 (LL+IM) + 1,35TR + 1,2TU
Kuat III	1,25 MS + 1,50 MA + 1,40 WS + 1,2TU
Kuat IV	1,50 MS + 1,50 MA + 1,2TU
Kuat V	1,25 MS + 1,50 MA + 1,35 TB + 1,35 (LL+IM) + 1,35TR, + 0,40 WS + 1,00 WL
Layan I	1,00 MS + 1,00 MA + 1,00 TB + 1,00 (LL+IM) + 1,00TR + 0,30 WS + 1,00 WL + 1,2TU
Layan II	1,00 MS + 1,00 MA + 1,35 TB + 1,35 (LL+IM)+1,35TR + 1,2TU
Layan III	1,00 MS + 1,00 MA + 0,80 TB + 0,80 (LL+IM) + 0,8 TR + 1,2TU
Layan IV	1,00 MS + 1,00 MA + 0,70 WS+1,2TU
Ekstrim I	1,25 MS + 1,50 MA + 1,00 TB + 1,00 (LL+IM)+ 1,00TR + 1,00EQ
Ekstrim II	1,25 MS + 1,50 MA + 0,50 TB + 0,50 (LL+IM) +0,50TR + 1,00EQ

Pada Tabel 2, MS merupakan berat sendiri struktur, MA adalah beban mati tambahan/utilitas, TB merupakan gaya rem, LL merupakan beban lalu lintas, IM merupakan *dynamic load allowance*, TR merupakan gaya sentrifugal, TU merupakan beban temperatur, dan EQ merupakan beban gempa.

Selama masa layannya, jembatan dapat mengalami kerusakan yang disebabkan oleh pengaruh dari beban berulang yang berasal dari lalu lintas di atas jembatan, pelapukan, dan kondisi lingkungan [11]. Pada kajian ini, dilakukan pengecekan lendutan pada jembatan baik untuk lendutan seketika maupun lendutan jangka panjang. Jembatan yang menjadi objek kajian merupakan jembatan komposit

yang terbuat dari baja dan beton. Dalam *Bridge Management System* disebutkan bahwa untuk beban tetap yang bekerja pada gelagar komposit, maka pengaruh rangkai beton harus diperhitungkan dengan menggunakan nilai reduksi dari modulus elastisitas beton. Modulus yang direduksi harus sebesar sepertiga dari nilai yang telah ditentukan. Pengaruh rangkai dan susut pada jembatan ini bisa disetarakan dengan pemberian beban berupa penurunan suhu sebesar 15°C [12]. Selain itu, pengaruh rangkai beton juga dapat diadopsi dari model Branson, dimana nilai faktor rangkai C_t pada kondisi standar dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 1 [13].

$$C_t = \frac{t^{0,6}}{10 + t^{0,6}} C_u \quad (1)$$

Nilai C_u adalah nilai koefisien rangkai ultimit yang rata-rata bisa diambil sebesar 2,35 dan t adalah waktu dalam satuan hari sepanjang diterapkannya beban pada struktur. Selain itu, SNI 2847:2013 juga memberikan nilai penambahan lendutan jangka panjang akibat rangkai dan susut dari komponen struktur lentur, dimana faktor pengali lendutannya dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 [14]. Nilai faktor tergantung waktu ξ , dapat diambil sebesar 2 untuk struktur yang direncanakan berusia 5 tahun atau lebih dan ρ' adalah rasio tulangan.

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (2)$$

Selain melakukan evaluasi terhadap lendutan jangka panjang jembatan, dilakukan pula evaluasi terhadap tegangan yang terjadi pada jembatan. Pehitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan yang disediakan oleh *AASHTO LRFD Bridge Design Specification 7th Edition*. Secara umum tegangan yang terjadi (f) dapat dihitung dengan membagi nilai momen lentur (M) dengan modulus penampang (S), atau secara matematis dituliskan sebagai Persamaan 3. Nilai momen lentur dan modulus penampang disesuaikan dengan jenis beban yang bekerja sesuai dengan masa konstruksi maupun kondisi batas yang ditinjau yang tercantum pada *AASHTO* [10].

$$f = \sum \frac{M}{S} \quad (3)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengaruh Pemberian Camber terhadap deformasi Jembatan

Pemberian *camber* dimaksudkan untuk memperkecil lendutan yang terjadi pada jembatan saat beban di atasnya mulai bekerja. Hasil analisis pada Tabel 3 menunjukkan bahwa pemberian *camber* berpengaruh pada nilai lendutan yang terjadi pada struktur jembatan gelagar boks baja. Semakin tinggi *camber* yang diberikan, nilai lendutan yang terjadi pada jembatan semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh adanya peningkatan kekakuan struktur secara keseluruhan. Selanjutnya, dengan pemberian *camber* pada jembatan, persyaratan lendutan maksimal sebesar $L/800$ pada AASHTO dapat terpenuhi.

Tabel 3 Hasil lendutan pada jembatan sebelum dan sesudah pemberian *camber*

Camber (m)	Lendutan seketika (m)	Lendutan total seketika (m)	Lendutan total jangka panjang (m)		
			BMS	Model Branson	SNI 2847:2013
0	-0,819	-0,819	-0,878	-1,719	-1,200
0,7	-0,763	-0,063	-0,122	-0,902	-0,418
0,8	-0,746	0,054	-0,005	-0,766	-0,293
0,9	-0,727	0,173	0,114	-0,626	-0,165
1	-0,707	0,293	0,234	-0,484	-0,036
1,1	-0,687	0,413	0,358	-0,342	0,094

*Catatan:

- Lendutan seketika merupakan besarnya lendutan yang dihitung dari as jembatan
- Lendutan total merupakan besarnya lendutan yang dihitung dari as elevasi rencana jembatan

Besarnya penurunan nilai lendutan seketika pada jembatan dengan tinggi *camber* sebesar 0,7m, 0,8m, 0,9m, 1,0m, dan 1,1m masing-masing adalah 6,84%, 8,91%, 11,23%, 13,68%, dan 16,12%. Selanjutnya, pada kajian ini dilakukan juga perhitungan lendutan jangka panjang dengan menggunakan tiga metode yang diadopsi dari BMS, model Branson, dan SNI 2847:2013. Dari ketiga metode ini, perhitungan lendutan jangka panjang menggunakan model Branson memberikan nilai yang paling besar dibandingkan dengan

metode lainnya. Hal ini disebabkan oleh nilai faktor pengali yang diberikan oleh model Branson ini jauh lebih besar disbanding dengan SNI. Selanjutnya, dari hasil analisis menggunakan metode BMS, besarnya penambahan lendutan akibat pengaruh rangkai adalah sama

Dengan mengadopsi metode BMS, pada jembatan yang diberikan camber setinggi 0,8m, nilai lendutan total jangka panjangnya sudah mendekati 0. Artinya, pada saat semua beban bekerja pada jembatan, nilai lendutan pada jembatan sudah sangat minim dan mendekati elevasi rencana jembatan. Camber setinggi 0,8m dinilai sudah cukup optimal untuk diaplikasikan pada jembatan. Pemberian nilai camber lebih dari 0,8m justru akan menghasilkan lendutan yang positif (ke atas) untuk kasus jembatan ini.

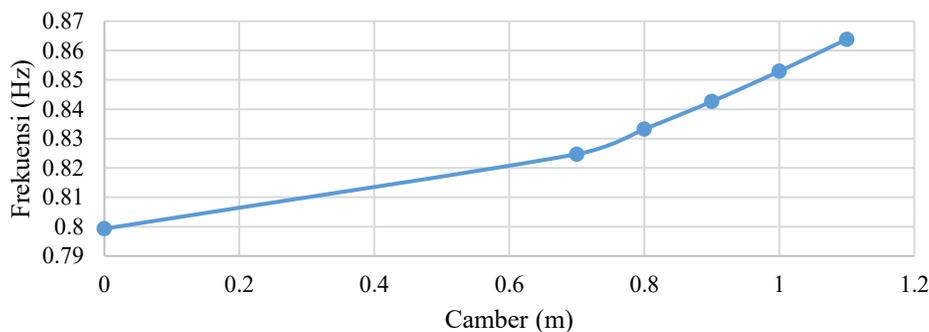
3.2 Pengaruh Pemberian Camber terhadap Frekuensi dan Periode Alami Jembatan

Tabel 4 menunjukkan nilai frekuensi alami jembatan gelagar boks girder baja. Pada mode pertama, nilai frekuensi jembatan (baik dengan camber maupun tanpa camber) terletak pada rentang 0,7 hingga 0,9 Hz. Besarnya frekuensi natural pada jembatan perlu dievaluasi sedemikian rupa sehingga tidak mendekati nilai 1,5 Hz hingga 4,5 Hz, yang mana pada besaran frekuensi inilah biasanya beban lalu lintas bekerja [15]. Oleh karena itu, jembatan perlu didesain agar memiliki frekuensi natural pada rentang frekuensi beban lalu lintas untuk menghindari terjadinya resonansi. Dalam kasus ini, nilai frekuensi alami jembatan (baik yang diberi camber maupun tidak diberi camber) masih cukup jauh dari rentang nilai frekuensi alami beban lalu lintas.

Tabel 4 Frekuensi jembatan pada beberapa nilai camber

Camber (m)	T ₁	f ₁	T ₂	f ₂	T ₃	f ₃
0	1,251	0,799	0,220	4,538	0,202	4,952
0,7	1,213	0,825	0,217	4,606	0,209	4,792
0,8	1,200	0,833	0,216	4,623	0,209	4,794
0,9	1,187	0,843	0,215	4,642	0,209	4,796
1	1,172	0,853	0,215	4,662	0,208	4,799
1,1	1,158	0,864	0,214	4,683	0,208	4,803

Selain itu, dari Gambar 5, terlihat pula adanya tren peningkatan nilai frekuensi jembatan terhadap besaran *camber* yang diberikan. Peningkatan nilai frekuensi ini berkisar antara 3%-8%. Hal ini menunjukkan adanya penambahan kekakuan pada struktur jembatan akibat penambahan tinggi *camber*. Peningkatan kekakuan ini juga diindikasikan oleh adanya penurunan nilai lendutan pada jembatan seperti yang dijelaskan pada subbab sebelumnya.



Gambar 5. Grafik hubungan antara nilai *camber* dengan frekuensi alami struktur

3.2 Pengaruh Pemberian Camber terhadap Tegangan dan Gaya Geser pada Jembatan

Perhitungan nilai tegangan didasarkan pada gaya-gaya dalam yang merupakan keluaran dari perangkat lunak SAP2000. Tegangan yang terjadi pada jembatan akibat beban dihitung mengikuti ketentuan yang ada pada *AASHTO LRFD Bridge Design Specification 7th Edition*, dimana persamaan yang digunakan secara umum dapat dilihat pada Persamaan 3. Hasil perhitungan diberikan pada beberapa Tabel 5, sedangkan besarnya penurunan nilai tegangan dan gaya geser karena pemberian camber ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 5 menunjukkan adanya tren atau kecenderungan yang sama, baik pada nilai tegangan maupun gaya geser yang terjadi pada jembatan. Meskipun tidak berubah secara signifikan, *camber* yang semakin tinggi nilainya menyebabkan semakin menurunnya tegangan pada jembatan. Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 6, penurunan nilai tegangan akibat pemberian *camber* pada jembatan komposit dengan gelagar boks baja berkisar antara nilai 3%-11%. Sementara itu, untuk gaya geser yang terjadi pada jembatan, terlihat adanya perubahan nilai yang cukup signifikan, dimana nilai gaya geser akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya tinggi *camber* pada jembatan. Pemberian *camber* pada jembatan memberikan nilai penurunan gaya geser sebesar 25% hingga 40%.

Tabel 5 Hasil perhitungan tegangan pada jembatan

	Masa Konstruksi					
	Tanpa camber	Camber 0,7m	Camber 0,8m	Camber 0,9m	Camber 1m	Camber 1,1m
Tegangan maksimum (MPa)						
1. Tegangan tekan pada Sayap atas	227,970	216,374	213,008	209,474	205,727	202,161
2. Sayap atas : ketahanan terhadap tekuk lokal	201,053	191,017	188,114	185,062	181,828	178,751
3. Sayap atas : ketahanan terhadap tekuk torsi lateral	201,053	191,017	188,114	185,062	181,828	178,751
4. Ketahanan terhadap tekuk lentur badan	187,594	178,339	175,667	172,857	169,879	167,046
5. Sayap bawah	166,780	158,552	156,176	153,678	151,031	148,512
Gaya Geser (kN)						
6. Geser	2060,366	1495,796	1419,105	1368,449	1293,009	1222,728
Kondisi Batas Layan						
Tegangan maksimum (MPa)						
1. Lentur pada Sayap atas	158,718	152,674	150,816	148,855	146,764	144,769
2. Lentur pada Sayap bawah	175,556	169,978	168,204	166,320	164,302	162,3729
Gaya Geser (kN)						
3. Geser	2372,008	1877,156	1785,136	1708,923	1636,597	1569,040
Kondisi Batas Kekuatan						
Tegangan maksimum (MPa)						
1. Lentur pada Sayap atas	-193,951	-185,911	-183,474	-180,905	-178,172	-175,565
2. Lentur pada Sayap bawah	210,250	202,500	200,105	197,566	194,857	192,271
Gaya Geser (kN)						
3. Geser	3367,016	2608,326	2478,241	2373,361	2268,702	2164,044

Tabel 6. Nilai penurunan tegangan dan gaya geser pada masing-masing nilai camber pada jembatan terhadap kondisi jembatan tanpa camber

Masa Konstruksi					
Penurunan tagangan/gaya geser terhadap kondisi tanpa camber					
	Camber 0,7m	Camber 0,8m	Camber 0,9m	Camber 1m	Camber 1,1m
1. Tegangan tekan pada sayap atas	5,09%	6,56%	8,11%	9,76%	11,32%
2. Sayap atas : ketahanan terhadap tekuk lokal	4,99%	6,44%	7,95%	9,56%	11,09%
3. Sayap atas : ketahanan terhadap tekuk torsi lateral	4,99%	6,44%	7,95%	9,56%	11,09%
4. Ketahanan terhadap tekuk lentur badan	4,93%	6,36%	7,86%	9,44%	10,95%
5. Sayap bawah	4,93%	6,36%	7,86%	9,44%	10,95%
6. Geser	27,40%	31,12%	33,58%	37,24%	40,65%
Kondisi Batas Layan					
1. Lentur pada Sayap atas	3,81%	4,98%	6,21%	7,53%	8,79%
2. Lentur pada Sayap bawah	3,18%	4,19%	5,26%	6,41%	7,51%
3. Geser	20,86%	24,74%	27,95%	31,00%	33,85%
Kondisi Batas Kekuatan					
1. Lentur pada Sayap atas	4,15%	5,40%	6,73%	8,14%	9,48%
2. Lentur pada Sayap bawah	3,69%	4,83%	6,03%	7,32%	8,55%
3. Geser	22,53%	26,40%	29,51%	32,62%	35,73%
Kondisi Batas Ekstrim					
1. Tegangan tekan pada Sayap atas	4,75%	6,15%	7,63%	9,21%	10,70%
2. Tegangan tarik pada Sayap bawah	4,65%	6,04%	7,50%	9,06%	10,54%
3. Geser	22,81%	26,79%	30,25%	33,49%	36,56%

4. KESIMPULAN

Untuk menghindari terjadinya lendutan yang berlebihan pada jembatan, diberikan camber atau lawan lendut yang nilainya dapat ditentukan melalui analisis struktur. Pemberian camber pada jembatan tidak hanya memberikan pengaruh terhadap lendutan yang terjadi, namun juga berpengaruh pada deformasi, frekuensi alami dan tegangan yang terjadi pada jembatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar nilai camber yang diberikan, maka frekuensi alami struktur jembatan gelagar boks baja semakin meningkat diiringi dengan adanya penurunan nilai deformasi jembatan. Selain itu, pemberian camber yang semakin besar dapat menurunkan nilai tegangan dan gaya geser pada jembatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. N. Gergess, R. Sen, Cambering structural steel I-girders using cold bending, J. Constr. Steel Res., vol. 64 no. 4, (2008) 407–417.
- [2] W. Apriani, F. Lubis, R. Suryanita, Y. Firzal, The Evaluation of changes in camber position to deflection of arch steel bridge in extreme loads, in Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 53 (2020) 843–853.
- [3] E. Petzek, E. Meteş, D. Grecea, R. Băncilă, Pre-cambering in steel and composite bridge structures, Adv. Mater. Res., vol. 1111 (2015) 169–174, DOI: [10.4028/www.scientific.net/amr.1111.169](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1111.169).
- [4] S. Yao, B. Peng, L. Wang, H. Chen, Estimation formula of finished bridge pre-camber in continuous rigid-frame bridges, Sci. Rep., vol. 12 no. 1 (2022) 1–10, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20449-4>.
- [5] Y. Sun, W. Zhang, D. Wang, Pre-camber study on the steel-concrete composite beam constructed by the incremental launching method, Key Eng. Mater., vol. 619 (2014) 43–50, DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.619.43](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.619.43).

- [6] A. Prayogi, A. Zacoeb, A. Wibowo, Pengaruh Variasi camber terhadap perilaku jembatan rangka baja, J. Mhs. Jur. Tek. Sipil Univ. Brawijaya, vol. 1, no. 2, (2021).
- [7] I. Paeglite A. Paeglitis, The dynamic amplification factor of the bridges in Latvia, Procedia Eng., vol. 57 (2013) 851–858, 2013, DOI: [10.1016/j.proeng.2013.04.108](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.108).
- [8] F. Rezaie, G. Ahmadi, S. M. Farnam, Load test and model calibration of a horizontally curved steel box- girder bridge, Civ. Eng. Infrastructures J., vol. 48 no. 2 (2015) 305–322:
- [9] L. Ma, W. Zhang, W. S. Han, J. X. Liu, Determining the dynamic amplification factor of multi-span continuous box girder bridges in highways using vehicle-bridge interaction analyses, Eng. Struct., vol. 181 (2019) 47–59, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.059>.
- [10] AASHTO, AASHTO Bridge Design Specifications (LRFD), vol. 6 (2014).
- [11] H. Aied, A. González, D. Cantero, Identification of sudden stiffness changes in the acceleration response of a bridge to moving loads using ensemble empirical mode decomposition, Mech. Syst. Signal Process., vol. 66–67 (2016). 314–338.
- [12] Anonim, Bridge Management System (BMS) Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan. Jakarta: Direktorat Jendral Bina Marga, (1992).
- [13] E. G. Nawy, Prestressed Concrete: A Fundamental Approach, 5th editio. New Jersey: Prentice-Hall International, (1992).
- [14] BSN, SNI 2847:2013 - Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, (2013).
- [15] I. Mohseni, A. K. A. Rashid, J. Kang, A Simplified method to estimate the fundamental frequency of skew continuous multicell box girders brdiges, Lat. Am. J. Solids Struct., vol. 11, (2014) 649–658.