

## PERILAKU RANGKAK SUSUT TERHADAP LENDUTAN STRUKTUR JEMBATAN BENTANG PANJANG

Baskoro Abdi Praja<sup>1</sup> dan Andreas Triwiyono<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta  
Jln Babarsari 43 Yogyakarta  
baskoro\_abdi@staff.uajy.ac.id

<sup>2</sup>Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jln Bulaksumur Yogyakarta  
andreas.triwiyono@ugm.ac.id

**Abstract :** Lemah Ireng 1 bridge of Semarang toll road Bawen made of prestressed concrete with a total length of 879 m. In the construction phase there are two differences in technical condition of the plan, there are a material change of sand and schedule movement of the traveler. Both are predicted as the cause of difference design with the actual elevation that impact to make asphalt levelling with varying thickness. The bridge is designed with 100 years life span, but based on actual conditions, that is required a review of behavioral and serviceability bridge. With the influence of variations in long-term loading (creep and shrinkage) and the condition of technical changes due to the addition of asphalt, research of creep and shrinkage is necessary to determine the behavior of deflection in the box girder bridge. Several stages of loading apply a leveling asphalt, creep and shrinkage by using a variation of the long-term duration at intervals of 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80 and 100 years with the Construction Stage Analysis-Time Dependent effects on software Midas Civil, 2011. Maximum deflection of creep shrinkage and the total effect is in the longest span (P4-P5) are 17.53 cm and 25.71 cm. Minimum impact on the total creep and shrinkage deflection in Lemah Ireng 1 bridge is 45%. This shows the creep and shrinkage towards total deflection of the long-term period have a relatively large effect.

**Keyword :** creep and shrinkage, long-term deflections, box girder bridge.

**Abstrak :** Jembatan Lemah Ireng 1 pada ruas jalan Tol Semarang-Bawen terbuat dari beton prategang dengan panjang total 879 m. Pada masa konstruksi dua perbedaan kondisi teknik terhadap rencana, yakni perubahan material pasir dan perubahan perpindahan traveler. Keduanya diduga sebagai penyebab perbedaan elevasi desain dengan elevasi aktual sehingga dilakukan *levelling* aspal dengan tebal bervariasi. Jembatan ini didesain untuk memenuhi masa layan 100 tahun namun berdasarkan kondisi aktual, diperlukan peninjauan terhadap perilaku dan kuat layan jembatan hingga umur rencana. Dengan pengaruh variasi pembebanan jangka panjang (rangkak susut) dan kondisi perubahan teknis akibat penambahan aspal, penelitian rangkak susut ini perlu dilakukan untuk mengetahui perilaku lendutan pada gelagar boks jembatan hingga umur rencana. Beberapa tahapan pembebanan yang dilakukan adalah menerapkan beban *levelling* aspal, dan beban rangkak dan susut dengan menggunakan variasi durasi jangka panjang dengan interval 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80 dan 100 tahun. Analisis dilakukan secara linear statik serta memanfaatkan fasilitas *Construction Stage Analysis* untuk efek *time-dependent* pada *software* Midas Civil 2011. Penelitian ini dilakukan dengan hanya meninjau aksi tetap. Perilaku rangkak susut jembatan cukup signifikan di 5 tahun pertama setelah konstruksi selesai. Lendutan maksimum rangkak susut dan total berada di bentang terpanjang (P4-P5) masing-masing sebesar 17,53 dan 25,71 cm. Lendutan yang terjadi hingga umur rencana 100 tahun masih dalam batas izin, namun tetap perlu pengawasan yang terencana. Dampak minimum rangkak susut terhadap total lendutan pada jembatan Lemah Ireng 1 sebesar 45%. Hal ini menunjukkan rangkak susut terhadap defleksi total hingga umur rencana merupakan efek jangka panjang yang relatif besar.

**Kata Kunci :** rangkak susut, lendutan jangka panjang, jembatan *box girder*.

### PENDAHULUAN

Jembatan Lemah Ireng 1 (LI1) terletak pada ruas jalan Tol Semarang-Bawen berupa jembatan beton prategang *box girder* dengan

panjang total 879 m dilaksanakan dengan *Free Cantilever Methode* (FCM) dalam pelaksanaannya. Pada masa konstruksi terjadi dua perbedaan dibandingkan dengan rencana yakni material pasir mengakibatkan berat jenis

beton menjadi 26 kN/m<sup>3</sup> dan jadwal perpindahan *traveller* mengakibatkan perbedaan pada nilai *precamber*. Kondisi tersebut diduga menyebabkan terjadinya perbedaan elevasi aktual dengan elevasi desain sehingga dilakukan *levelling* aspal dengan tebal bervariasi. Jembatan didesain untuk memenuhi masa layan hingga 100 tahun, berdasarkan perbedaan tersebut diperlukan peninjauan terhadap perilaku lendutan jangka panjang. Dalam penelitian ini dikaji lendutan jembatan jangka panjang hingga 100 tahun akibat rangkai susut (Praja, 2016).

**TINJAUAN PUSTAKA**

Penelitian Bažant dkk (2012) mengenai jembatan prategang gelagar boks Koror-Babeldaob (KB) di Palau memiliki rekor rentang 241 m, memperlihatkan paradigma mengenai perilaku jangka panjang suatu struktur jembatan. Jembatan dibangun pada tahun 1977 runtuh akibat defleksi berlebihan setelah 19 tahun masa layan. Keruntuhan terjadi setelah dilakukan *remedial prestressing* yang tertunda 3 bulan. Pengaruh lendutan yang berlebihan makin nampak setelah dilakukannya pengukuran lapangan. Hasil pengukuran yang dilakukan oleh Japan International Corporation Agency (JICA) dan ABAM US pada Tabel 1.

**Tabel 1** Hasil pengukuran lendutan (Tang, 2014).

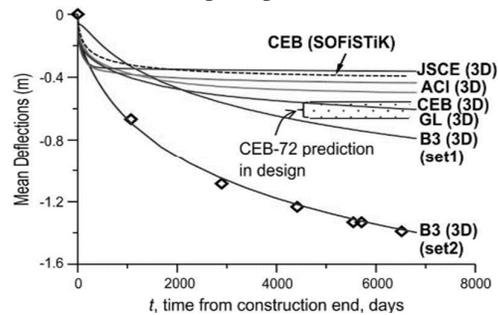
Lendutan pada Midspan (Termasuk 0,21 camber)		
Waktu Pengukuran	Lendutan	
Juli 1977 ( <i>as built</i> )	0,00 ft	0,00 m
September 1983	-2,31 ft	-0,70 m
November 1985	-3,50 ft	-1,07 m
Mei 1986	-3,69 ft	-1,14 m
Januari 1990	-4,04 ft	-1,23 m
September 1993	-5,04 ft	-1,54 m

Setelah 18 tahun, lendutan jembatan KB dari akhir konstruksi mencapai 1,31 m dan terus berkembang. *Camber* yang didesain 30 cm tidak tercapai dan adanya tambahan lendutan rangkai sebesar 22 cm yang terakumulasi selama pemasangan segmental gelagar membuat aktual *camber* hanya 7,5 cm saat dua kantilever disatukan (dikunci). Sehingga total defleksi selama 18 tahun pada tengah bentang mencapai 1,61 m.

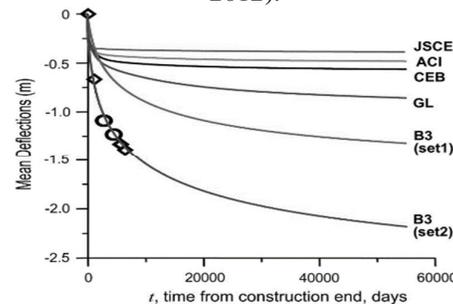
Jembatan KB dimodelkan secara numerik menggunakan software ABAQUS (SIMULIA,

Providence, Rhode Island). Jembatan dianalisis berdasarkan konsep model rangkai susut ACI, CEB-FIP, JSCE, the Gardner and the Lockman (GL) dan Model B3. Dengan kondisi bentuknya simetri, maka yang dianalisis hanya setengah jembatan saja.

Peneliti melakukan analisis terhadap defleksi, kehilangan prategang dan perbandingan terhadap hasil pengukuran dengan durasi hingga 18 tahun dan 150 tahun (asumsi tidak ada keruntuhan) seperti pada Gambar 1 dan 2.



**Gambar 1.** Lendutan KB 19 tahun (Bažant, Z.P. 2012).



**Gambar 2.** Lendutan KB 150 tahun (Bažant, Z.P. 2012).

Terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2 berdasarkan model JSCE (3D) menghasilkan lendutan paling minimum yang tipis dibawah 40 cm, model ACI (3D) mengalami lendutan hingga 40 cm, model CEB (3D) menghasilkan lendutan sedikit diatas model ACI, model B3 (3D-Set 1) mencapai lendutan sebesar 80 cm. Model B3 (3D-Set2) yang paling mendekati hasil pengukuran lapangan, yakni 140 cm dan 225 cm. Gambar 1 dan Gambar 2 memiliki pola lendutan yang relatif seragam. Khusus model B3 dapat mengakomodasi efek dari perbedaan ketebalan *slab* dan *web* dalam nilai pengeringan.

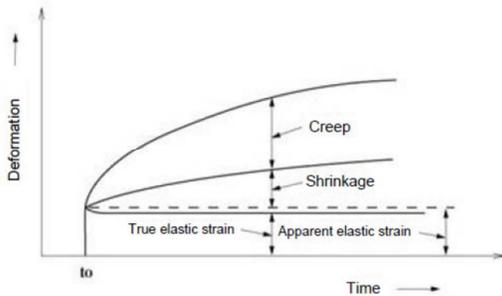
Model JSCE, ACI, CEB dan GL dalam analisis lendutan 18 tahun hanya memperkirakan 50-77% lebih rendah daripada pengukuran

lapangan. Dengan model B3, peneliti mencapai 42% lebih rendah dari pengukuran lapangan. Namun dengan adanya penyesuaian dengan laboratorium pengujian jangka panjang dari Brooks dalam pemodelan B3-Set2, didapatkan lendutan yang hampir mencapai pengukuran lapangan.

Pengaruh rangkak dan susut bisa fatal jika diabaikan, hal inilah yang menjadi obyek penelitian dalam Jembatan Lemah Ireng 1. Dengan mempertimbangkan efek lendutan jangka panjang, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui perilaku jangka panjang Jembatan Lemah Ireng 1.

**LANDASAN TEORI**

Sifat-sifat beton yang tergantung waktu, seperti : rangkak, susut, dan kekuatan tekannya dapat dimodelkan dalam Midas Civil. Rangkak dan susut secara bersamaan terjadi dalam struktur dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Deformasi beton berdasarkan waktu (Midas Civil, 2011).

Untuk analisis dan tujuan desain, perpendekan elastis, serta rangkak dan susut dianggap secara terpisah. Regangan elastis yang ditunjukkan pada Gambar 3 mewakili pengurangan regangan elastis sebagai akibat dari kekuatan beton berdasarkan waktu.

**Rangkak**

Rangkak menyebabkan deformasi elemen struktur. Rangkak merupakan fungsi dari tegangan berkelanjutan dan menghasilkan kekuatan beton berdeformasi relatif terhadap kekuatan lebih rendah, beton dibawah tegangan izin. Rangkak menyebabkan deformasi 1,5 ~ 3,0 kali lipat dibandingkan deformasi elastis. Sekitar 50% deformasi

terjadi dalam beberapa bulan pertama dan terjadi sekitar 5 tahun pertama.

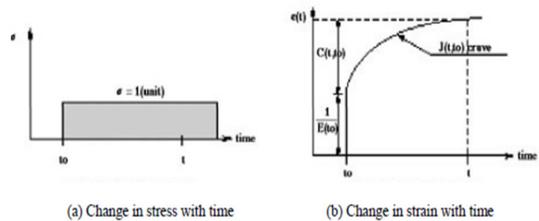
Pada struktur beton normal, beban mati yang terjadi terus-menerus dapat menyebabkan rangkak. Jika satuan tegangan aksial  $\sigma = 1$  pada suatu jenis beton dengan umur  $t_0$  maka hasil regangan aksial pada umur  $t$  didefinisikan sebagai  $J_{(t,t_0)}$  (Midas Civil, 2011).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i(t_0) + \varepsilon_c(t, t_0) = \sigma \cdot J(t, t_0) \quad (1)$$

dimana  $J(t, t_0)$  mewakili total yang terjadi dalam satuan tegangan dan didefinisikan sebagai fungsi rangkak. Gambar 4 menunjukkan bahwa fungsi rangkak  $J(t, t_0)$  dapat diwakili oleh jumlah awal regangan elastis dan regangan rangkak sebagai berikut:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + C(t, t_0) \quad (2)$$

dimana  $E(t_0)$  mewakili modulus elastisitas pada saat beban diaplikasikan, dan  $C(t, t_0)$  mewakili rangkak deformasi yang dihasilkan pada usia  $t$ , yang disebut sebagai spesifik rangkak.



**Gambar 4.** Definisi fungsi rangkak dan spesifik rangkak (Midas Civil, 2011).

Fungsi rangkak  $J(t, t_0)$  juga dapat dinyatakan dalam perbandingan relatif terhadap deformasi elastis

$$J(t, t_0) = \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E(t_0)} \quad (3)$$

dimana  $\phi(t, t_0)$  didefinisikan sebagai koefisien rangkak yang mewakili rasio rangkak ke deformasi elastis. Spesifik rangkak juga dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\phi(t, t_0) = E(t_0) \cdot C(t, t_0) \quad (4)$$

$$C(t, t_0) = \frac{\phi(t, t_0)}{E(t_0)} \quad (5)$$

Dalam *software Midas Civil* memungkinkan kita menentukan koefisien rangkak dan susut berdasarkan persamaan CEB-FIP, ACI, dan lain-lain atau dapat juga secara langsung ditentukan dengan nilai-nilai yang diperoleh dari percobaan.

### Susut

Penyusutan adalah fungsi dari waktu yang bebas dari tekanan dalam elemen beton. Regangan akibat penyusutan biasanya dinyatakan berdasarkan waktu dari  $t_0$  ke  $t$  (Midas Civil, 2011).

$$\varepsilon_s(t, t_0) = \varepsilon_{s0} \cdot f(t, t_0) \quad (6)$$

dimana  $\varepsilon_{s0}$  mewakili koefisien penyusutan pada waktu akhir  $f(t, t_0)$  adalah fungsi waktu,  $t$  merupakan waktu pengamatan dan  $t_0$  adalah waktu awal penyusutan.

### METODE PENELITIAN

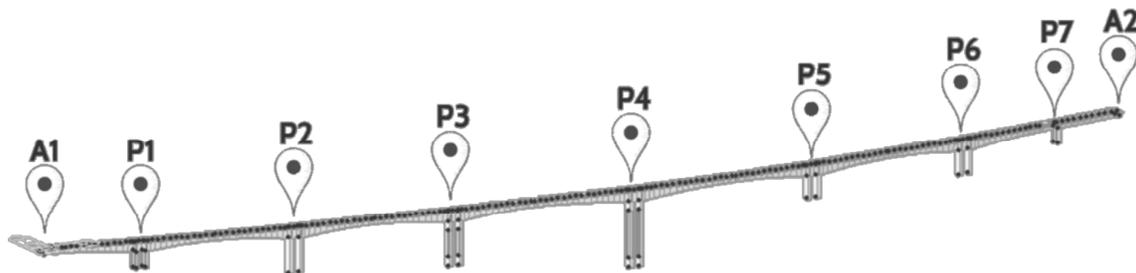
Secara umum penelitian ini didasarkan pada data sekunder struktur jembatan berupa *as built drawing* serta wawancara kepada pihak pelaksana berkaitan tentang kondisi pelaksanaan proyek. Pelaksanaan analisis linear jembatan hingga 100 tahun berdasarkan kondisi eksisting jembatan setelah tahap konstruksi selesai, penarikan kesimpulan mengenai perilaku dan kondisi jembatan hingga 100 tahun.

Jembatan *box girder* LI1 dimodelkan elemen frame 3D metode *balanced cantilever* secara keseluruhan. Beberapa idealisasi pemodelan yang dilakukan yakni gelagar jembatan yang berupa *box* beserta pilar dimodelkan sebagai elemen *frame*; tumpuan struktur dimodelkan sendi pada bagian *bearing pad* di abutmen;

hubungan pilar dengan *box girder* dimodelkan dengan *elastic link* tipe *rigid*; ujung bawah pilar dimodelkan sebagai jepit.

Pembebanan dilakukan dengan mengacu pada RSNI T-04-2005 Perencanaan Jembatan Beton. Pembebanan pada tahap konstruksi meliputi sebagai berikut : berat sendiri struktur, beban pengaruh tendon prategang; beban *form traveler*, beban beton basah, beban *form traveler* sebesar 650 KN dan berat beton basah diidealisasikan sebagai beban titik berupa gaya vertikal searah gravitasi dan momen akibat eksentrisitas gaya vertikal sebesar  $0,5L_s$  (setengah panjang segmen); beban hidup pelaksanaan konstruksi yang diidealisasikan sebagai beban merata sebesar 2 KN/m<sup>2</sup>; beban mati tambahan dengan memasukkan *barrier* yang dimodelkan sebagai beban merata; dan beban aspal dimodelkan sebagai beban merata dengan berat satuan sebesar 22 KN/m<sup>3</sup>.

Analisis rangkak susut jangka panjang didasarkan pada standar CEB-FIP 1990. Analisis dilaksanakan memperhatikan deformasi jembatan akibat tahap konstruksi. Analisis lendutan jangka panjang dilakukan dengan mempertimbangkan lendutan akibat rangkak dan susut pada gelagar setelah berumur beberapa tahun dengan kondisi pembebanan *levelling* aspal. Dalam penelitian ini, jangka waktu yang diambil sebagai perhitungan umur jembatan mencapai 100 tahun. Lendutan ditinjau pada tengah bentang yang terdiri berturut-turut bentang A1-P1, P1-P2, P2-P3, P3-P4, P4-P5, P5-P6, P6-P7, P7-A2 seperti pada Gambar 5. Bentang tersebut dihubungkan dengan segmen pengunci (*closure*). Notasi A1, A2 sebagai Abutment 1 dan 2, sedangkan P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 berturut-turut sebagai Pilar 1, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7.



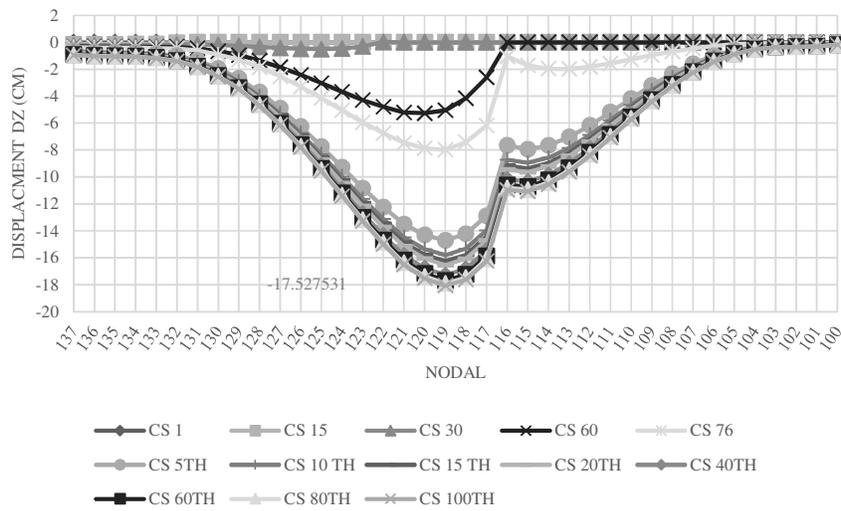
Gambar 5. Notasi Bentang

## HASIL DAN PEMBAHASAN

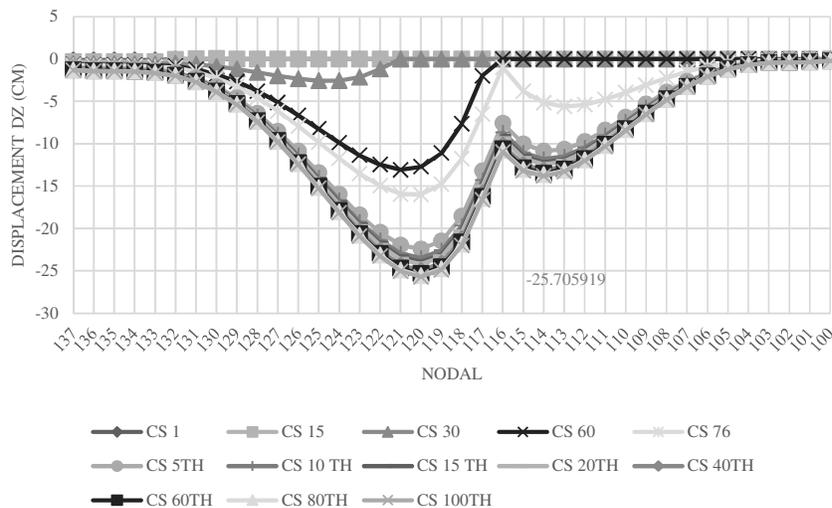
### Perilaku Lendutan Bentang P4-P5

Bentang P4-P5 merupakan gelagar boks kantilever yang menumpu pada pilar P4 dan pilar P5 yang dihubungkan dengan segmen pengunci (*closure*). Pilar P4 dan pilar P5 dinyatakan pada nodal 137 dan 100. Sedangkan elemen pengunci (*keysegment*) antara dua kantilever dinyatakan dengan 2 nodal yakni nodal 117-116. Pergerakan *displacement* pada bentang P4-P5 dari awal konstruksi hingga umur rencana 100 tahun

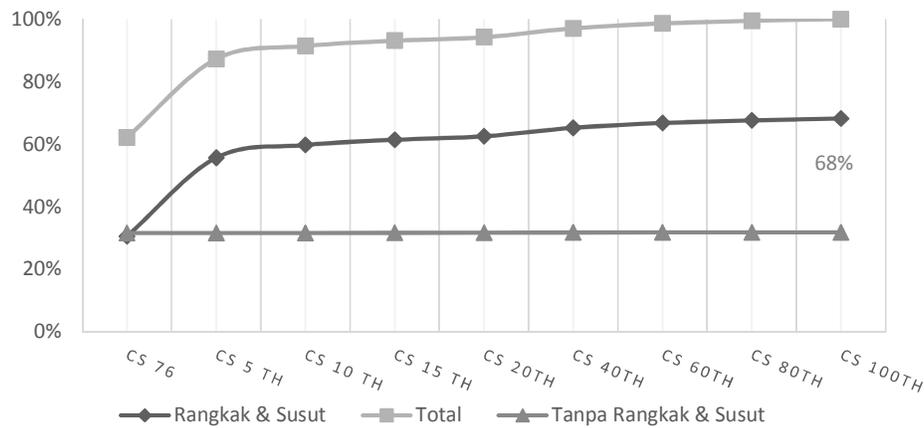
dapat dilihat pada Gambar 6 akibat rangkai susut dan Gambar 7 untuk defleksi total jembatan. Berdasarkan pada Gambar 6 dan 7, *displacement* rangkai susut dan total yang terjadi sebesar 17,53 cm dan 25,71 cm. Perkembangan rangkai susut yang rapat dari awal konstruksi hingga pada selesainya pembangunan dan penambahan aspal yang dinyatakan dalam garis kurva CS (*Construction Stage*) 76 lalu diteruskan hingga CS 100 tahun.



Gambar 6. Grafik *Displacement* akibat rangkai susut jangka panjang bentang P4-P5.



Gambar 7. Grafik *Summation Displacement* pada defleksi total bentang P4-P5.



**Gambar 8.** Grafik pengaruh rangkak susut pada defleksi total bentang P4-P5.

Lendutan rangkak susut sebesar 17,53 cm adalah 68% dari lendutan total 25,71 cm seperti pada Gambar 8. Hal ini menunjukkan bahwa rangkak susut memberikan dampak yang besar pada lendutan jangka panjang.

Kemudian dengan cara yang sama untuk bentang lainnya dirangkum dalam Tabel 2. Prosentase rangkak susut bentang P7-A2

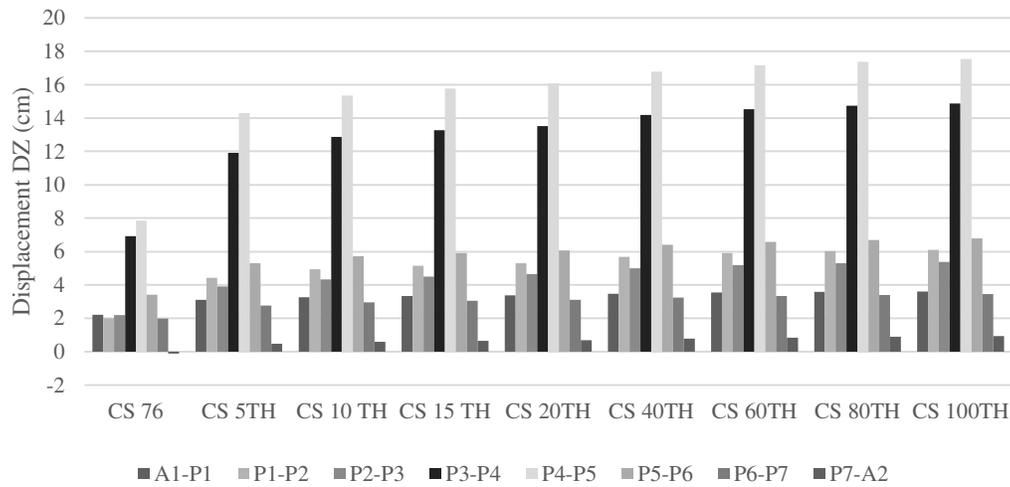
terlampau besar akibat ketidaksempurnaan memodelkan *link* pilar dengan gelagar boks.

**Perbandingan Perilaku Lendutan Struktur**

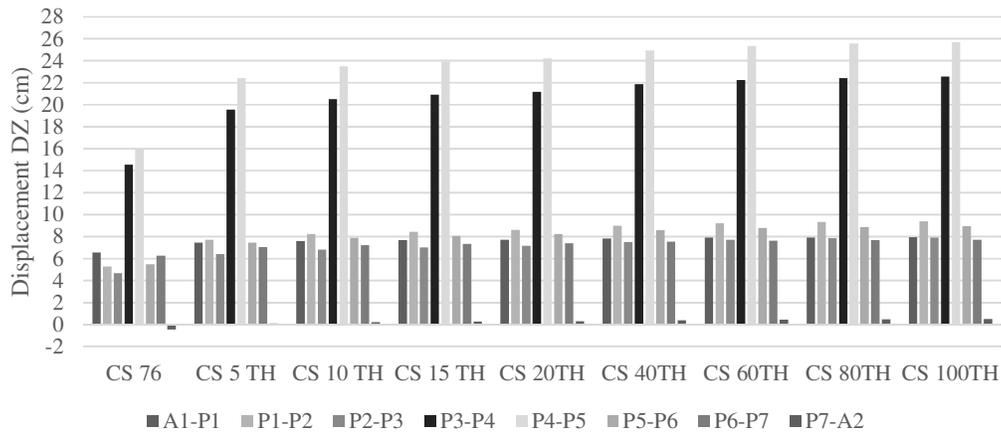
Lendutan rangkak susut dan lendutan total terbesar diperoleh pada bentang P4-P5, disusul dengan bentang P3-P4 seperti terlihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.

**Tabel 2** Pengaruh rangkak susut dan Lendutan terhadap batas izin.

Bentang	L (m)	Pengaruh Rangkak Susut terhadap Defleksi Total	Defleksi Total Maksimum (cm)	Batas izin lendutan 1/300 L (cm)
A1-P1	72	45%	7.95	24
P1-P2	115.5	82%	9.91	38.50
P2-P3	120	68%	7.92	40
P3-P4	136	66%	22.56	45.33
P4-P5	136	68%	25.71	45.33
P5-P6	120	76%	8.96	40
P6-P7	74.5	45%	7.72	24.83
P7-A2	50	180%	0.51	16.67



**Gambar 9.** Perbandingan nilai lendutan rangkai susut tiap bentang.



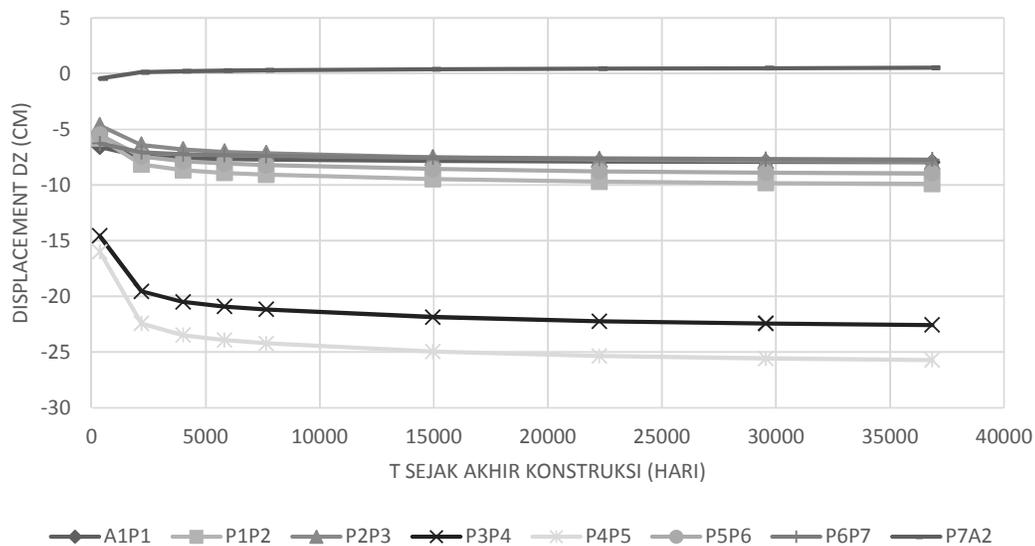
**Gambar 10.** Perbandingan nilai lendutan total tiap bentang.

Berdasarkan Gambar 9 dan Gambar 10 juga dapat terlihat pola perilaku kenaikan dari tahap akhir konstruksi (CS 76) hingga umur rencana 100 tahun bahwa ada keseragaman kenaikan nilai lendutan tiap bentangnya.

Penelitian Bažant selain sebagai kepustakaan, juga digunakan sebagai acuan dalam meninjau hasil dan perilaku lendutan yang terjadi. Untuk tinjauan model yang diambil adalah model CEB 3D. Model tersebut menghasilkan lendutan mencapai 50 cm, sedangkan dalam penelitian jembatan LI1 diperoleh lendutan maksimal sebesar 25,71 cm. Jembatan LI1 memiliki lendutan lebih kecil daripada KB, juga disebabkan karena bentang struktur lebih pendek daripada KB. Efek jangka panjang

pada KB lebih besar daripada jembatan LI1. Meskipun belum mencapai 100 tahun, namun berdasarkan CEB 3D, lendutan KB hampir mencapai 50 cm. Hal ini menunjukkan dampak jangka panjang yang besar. Berbeda dengan LI1, dengan analisis hingga 100 tahun hanya mencapai 25 cm.

Jembatan KB yang ditinjau hingga 19 tahun dan 150 tahun memiliki pola kurva lendutan yang relatif sama. Jika rentang waktu diperpanjang, area signifikansinya akan semakin memendek, namun pola kurvanya relatif sama. Jembatan LI1 pada Gambar 11 memiliki pola kurva lendutan yang relatif sama dengan jembatan KB pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 11. Lendutan tiap bentang dalam skala normal.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Perilaku rangkai susut jembatan cukup signifikan di 5 tahun pertama setelah konstruksi selesai. Lendutan maksimum rangkai susut dan total berada di bentang terpanjang (P4-P5) masing-masing sebesar 17,53 dan 25,71 cm. Lendutan yang terjadi hingga umur rencana 100 tahun masih dalam batas izin, namun tetap perlu pengawasan yang terencana. Pergerakan lendutan rangkai susut jangka panjang juga ditentukan oleh kondisi tahap konstruksi yang telah terjadi.
2. Dampak minimum rangkai susut terhadap total lendutan pada jembatan Lemah Ireng 1 sebesar 45%. Hal ini menunjukkan efek rangkai susut terhadap defleksi total jembatan jangka panjang relatif besar.

### Saran

Saran yang dapat diberikan terkait dengan penelitian ini adalah penggunaan analisis dinamik dan *time-dependent* dari peraturan yang lain serta Penggunaan kombinasi pembebanan kondisi ultimit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bazant, Z.P. et al, 2012, *Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms*, J. Struct. Eng. ASCE, 676-686.
- Midas Civil, 2011, *Analysis Reference, Midas User Support System*.
- Praja, B.A., 2016, *Perilaku Rangkai Susut Struktur Jembatan Terhadap Variasi Durasi Jangka Panjang (Studi Kasus : Jembatan Lemah Ireng 1 Jalan Tol Semarang-Bawen Tahap 1 Ruas Semarang-Bawen Paket V)*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Tang, M.C., 2014, *Study Case: The Story of The Koror Bridge*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich.