

**EVALUASI BEBAN LAYAN JEMBATAN APUNG PEJALAN KAKI  
TIPE PELENGKUNG RANGKA BAJA BERDASARKAN UJI  
PEMBEBANAN  
(EVALUATION OF SERVICE LIVE LOAD OF FLOATING ARCH-TRUSS  
PEDESTRIAN BRIDGE BASED ON LOAD TESTING)**

**Widi Nugraha<sup>1)</sup>, Gatot Sukmara<sup>2)</sup>**

<sup>1), 2)</sup>Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

<sup>1), 2)</sup>Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung 40294

e-mail: <sup>1)</sup>widi.nugraha@pusjatan.pu.go.id, <sup>2)</sup>gatot.sukmara@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 2 Oktober 2017; direvisi: 17 November 2017; disetujui: 29 November 2017

**ABSTRAK**

*Jembatan apung memanfaatkan daya apung ponton sebagai fondasi. Puslitbang Jalan dan Jembatan pada tahun 2015 mengembangkan jembatan apung tipe pelengkung rangka baja untuk pejalan kaki dengan menggunakan ponton apung sebagai fondasi. Perencanaannya masih menggunakan asumsi-asumsi pemodelan yang harus dibuktikan dan disesuaikan dengan perilaku aktual jembatan. Makalah ini mengevaluasi kondisi dan perilaku jembatan yang sesungguhnya terhadap beban, dan dilakukan penyesuaian model struktur sesuai tahapan perencanaan. Uji pembebanan dilakukan dengan menggunakan beban uji sebanyak 120 buah zak semen ukuran 40 kg, setara dengan 30% kapasitas rencana. Parameter yang diamati adalah tegangan elemen jembatan. Hasil uji pembebanan mengungkap respons jembatan sesungguhnya terhadap beban, kemudian dilakukan beberapa pemodelan, khususnya untuk tumpuan jembatan. Model struktur yang paling sesuai dengan kondisi sesungguhnya yaitu model struktur jembatan dengan ponton dimodelkan sebagai elemen solid, tumpuan ponton berupa pegas dengan koefisien 342,98 kN/m, frekuensi natural 2,20 Hz, yang sama dengan nilai aktual, dan kondisi pergerakan ponton pada arah lateral satu ponton terkekang sedangkan satu ponton lainnya bebas. Dengan model tersebut, berdasarkan kriteria keamanan struktur dan aspek kenyamanan yang diperoleh dari 2,2 Hz, jembatan apung ini layak untuk difungsikan sebagai jembatan pejalan kaki dengan beban layan setara 125% beban uji statis yaitu 1,10 kN/m<sup>2</sup>.*

**Kata Kunci:** ponton, jembatan apung, pelengkung rangka baja, uji pembebanan, frekuensi, model solid.

**ABSTRACT**

*Floating bridge is a bridge using buoyant force of a pontoon as foundation. In 2015, Puslitbang Jalan dan Jembatan started developing pedestrian floating bridge with arch steel truss bridge as the superstructure and pontoon as the substructure. There are many assumptions used in the design and structural model analysis. This paper evaluated the condition and the actual behaviour of the bridge due to loading then adjustment of structural model was made according to the design stages. The test load was conducted using 120 bags of cement with each bag weighs 40 kg which is equivalent to 30 % of design live load. The test parameter observed is the stress of bridge structural members. The results of loading test revealed structural response as actual structural behaviour due to loading, then some models of structures were made especially for abutment support with variation of the restraints. The structural model that represents actual structural behaviour which has pontoon and bridge structure modelled as one structure with spring coefficient of pontoon bottom surface is 342.98 kN/m, the same natural frequency with actual one, 2.20 Hz. and pontoon movement condition was laterally restrained another one is free. With that model, and based on the strength and service criteria, the permitted live load for this floating bridge obtained from 2.2 Hz, this floating bridge is safe to function as pedestrian bridge with permitted live load equal to 125 % of testing loads i.e. 1.10 kN/m<sup>2</sup>.*

**Keywords:** pontoon, floating bridge, steel arch-truss, load testing, frequency, solid model

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan sebuah negara kepulauan dengan luas wilayah perairan yang mencapai 64,97 % dari luas keseluruhannya (Bakosurtanal 2014). Aksesibilitas antar wilayah daratan banyak yang terpisah oleh wilayah perairan, sehingga membutuhkan adanya penghubung, antara lain dengan sebuah jembatan. Salah satu kendala dalam pembuatan jembatan di wilayah perairan adalah kondisi tanah yang bervariasi dan pada umumnya berupa tanah lunak sehingga membutuhkan pondasi jembatan yang dalam dan mahal. Solusi alternatif yang dapat digunakan adalah dengan memanfaatkan muka air sebagai landasan jembatan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes, dimana setiap benda diam yang tenggelam atau sebagian dalam fluida, bekerja sebuah gaya angkat sebesar gaya yang sama dengan berat fluida yang dipindahkan. Volume fluida yang dipindahkan sama dengan volume dari benda yang tenggelam (Encyclopaedia Britannica 2016).

Dengan memanfaatkan muka air sebagai landasan jembatan, untuk melintasi suatu wilayah perairan di antara wilayah daratan, dapat membuat suatu jembatan dengan fondasi terapung, atau jembatan apung. Jembatan apung telah banyak dimanfaatkan untuk keperluan akses di atas wilayah perairan, salah satu yang terdokumentasi dalam sejarah antara lain pada tahun 480 SM (Saleh 2010) yang dibuat dari perahu yang berjajar dengan lantai kayu di atasnya seperti dapat dilihat pada Gambar 1.

Sedangkan untuk perkembangan di masa ini, salah satu jembatan apung yang cukup besar di dunia dan selesai dibangun pada awal milenium ini adalah Yumemai Bridge di Osaka, Jepang. Jembatan dengan panjang 410 m ini dibangun di atas saluran air, dengan menumpu pada dua buah pontoon baja ( $58 \times 58 \times 8$ ) m<sup>3</sup>. Jembatan ini dapat berputar terhadap sumbu putarnya yang berada pada bagian ujung jembatan, jika sewaktu-waktu ada kapal yang sangat besar melintasi saluran air ini (Maruyama 2008) (Gambar 2).

Teknologi jembatan apung di Indonesia tengah dikembangkan oleh Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, dalam beberapa tahun terakhir. Pada tahun 2015, dilakukan pengembangan jembatan apung tipe pelengkung rangka baja untuk pejalan kaki dengan menggunakan ponton

apung sebagai fondasi, sehingga diperoleh bentang yang cukup besar dan tinggi bebas di bawah jembatan yang tinggi untuk keperluan lalu lintas perairan. Tipe jembatan apung yang dikembangkan saat ini merupakan tipe jembatan apung pertama di Indonesia. Hal ini terinspirasi dari jembatan apung Yumemai Bridge di Jepang yang memiliki tipe jembatan apung pelengkung dengan ponton sebagai penumpu jembatan.

Pada tahun 2016, jembatan apung ini menjadi bagian dari *pilot project* Sistem Modular Wahana Apung di lingkungan Badan Litbang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) untuk dilakukan prototipe. Jembatan apung ini dirakit di dermaga Majingklak, Jawa Barat dan kemudian ditarik dengan perahu ke lokasi konstruksi yang berjarak sekitar 10 km, yaitu di Motean, Desa Klaces, Kecamatan Kampung Laut, Kabupaten Cilacap, Provinsi Jawa Tengah (Pusjatan 2016).



**Gambar 1.** Jembatan apung dari deretan perahu (Saleh 2010)



**Gambar 2.** Jembatan apung yang dapat diputar: Yumemai Bridge, Jepang (Maruyama 2008)

Jembatan apung yang difungsikan untuk perlintasan pejalan kaki dan sepeda motor ini memiliki lebar lantai 1,8 m dan panjang total keseluruhan 70 m, terdiri dari 3 bentang dengan

dua ponton sebagai penyangga untuk kedua kaki jembatan pelengkung seperti dapat dilihat pada Gambar 3. Dua bentang lainnya merupakan jembatan rangka biasa yang berfungsi sebagai bentang pendekat (Pusjatan 2016).



**Gambar 3.** Jembatan apung Cilacap (Pusjatan 2016)

Karena jembatan tipe ini merupakan yang pertama di Indonesia, maka dalam perencanaannya masih menggunakan asumsi-asumsi parameter dalam pemodelan, misalnya kondisi tumpuan di atas air yang diasumsikan sendi dan rol secara sederhana. Asumsi yang digunakan harus dibuktikan dan dalam tahapan evaluasi perencanaan, parameter pemodelan perlu disesuaikan dengan perilaku sesungguhnya di lapangan setelah jembatan terbangun.

Perilaku sesungguhnya jembatan terhadap beban dapat diketahui dengan menggunakan metode uji pembebanan dengan mencari kapasitas sesungguhnya jembatan untuk difungsikan sebagai jembatan pejalan kaki, dan model struktur yang telah sesuai akan dapat dimanfaatkan untuk evaluasi kondisi jembatan.

Makalah ini dimaksudkan untuk mengevaluasi kondisi dan perilaku jembatan yang sesungguhnya terhadap beban, kemudian dilakukan penyesuaian model struktur berdasarkan asumsi perencanaan.

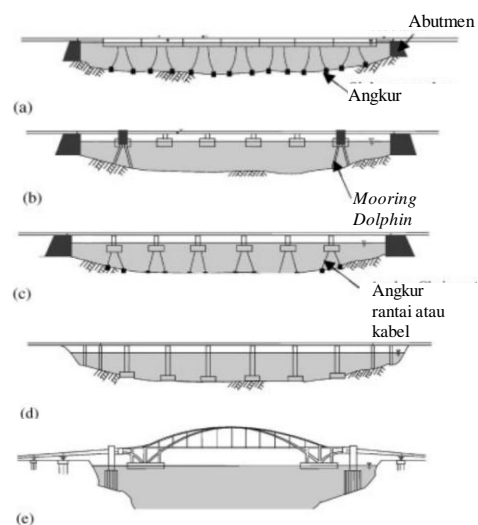
## KAJIAN PUSTAKA

### Perencanaan Jembatan Apung

Dalam perencanaan sebuah jembatan apung, terdapat beberapa tipe atau klasifikasi yang perlu diperhatikan (Watanabe and Utsunomiya 2003). Klasifikasi tersebut membagi berbagai tipe jembatan apung berdasarkan kondisi lantai jembatan dan pontonnya, antara lain jembatan ponton menerus (a), jembatan apung dengan

fondasi terapung terpisah (b), jembatan apung dengan fondasi semi-tenggelam (c), jembatan dengan fondasi gravitasi (d), dan jembatan apung bentang panjang dengan fondasi terpisah (e), seperti dapat dilihat pada Gambar 4.

Menurut klasifikasi di atas, untuk bentang bukaan lintasan bawah yang cukup besar, dapat digunakan jembatan apung tipe (e), yaitu bentang panjang dengan fondasi terpisah, seperti Jembatan Yumemai di Jepang. Pada tipe tersebut, terdapat bentang tengah yang merupakan tipe jembatan pelengkung yang ditumpu dua buah ponton pada kaki pelengkungnya, dan dua jembatan bentang pendekat yang berfondasi gravitasi.



**Gambar 4.** Klasifikasi jembatan apung (Watanabe and Utsunomiya 2003)

Tipe jembatan apung bentang panjang inilah yang digunakan pada jembatan apung yang dikembangkan oleh Pusjatan, namun dengan beberapa modifikasi. Modifikasi tersebut antara lain dengan merubah struktur bentang utama pelengkung beton dengan pelengkung rangka baja. Kemudian jembatan bentang pendekat menggunakan rangka batang baja yang bebas berotasi pada hubungan dengan bentang utama dan bebas berdeformasi memanjang ke arah tumpuan darat jembatan. Ponton pada Jembatan Yumemai menggunakan ponton baja (Watanabe dan Utsunomiya 2003), sedangkan pada Jembatan Apung Cilacap menggunakan *Construction-grade expanded polystyrene (EPS)* yang dilapis dengan proteksi berupa *fiber reinforced polymer (FRP)* dan lapisan cat polimer *marine-grade* di bagian samping dan bawah, ditambah struktur balok dan pelat beton

bertulang di bagian atas ponton tersebut (Pusjatan 2016).

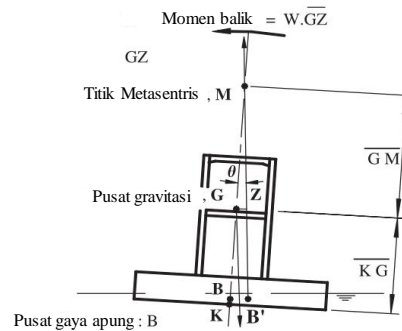
Dalam perencanaan jembatan apung, ada beberapa hal utama yang perlu diperhatikan sebagai kriteria desain. Kriteria desain yang harus dipenuhi dalam perencanaan antara lain memuat kriteria stabilitas, kriteria batasan defleksi, dan kekuatan struktur (Watanabe and Utsunomiya 2003). Untuk jembatan apung pejalan kaki Cilacap, berikut merupakan kriteria desain yang digunakan sebagai dasar perencanaan jembatan apung tersebut.

### 1) Stabilitas fondasi apung:

Fondasi terapung dinyatakan stabil saat titik metasentrisnya berada di atas titik pusat gravitasi ponton tersebut. Kondisi ini dikatakan stabil karena momen yang diakibatkan oleh gaya apung tambahan dan gaya apung yang hilang bersifat mengembalikan ponton ke posisi semula (Watanabe and Utsunomiya 2003). Ilustrasi kondisi stabil ditunjukkan pada Gambar 5. Pada jembatan apung, stabilitas statis perlu diperhatikan terhadap kemungkinan guling dari ponton jembatan, hal ini hampir mirip dengan stabilitas sebuah kapal laut (Wang, Watanabe and Utsunomiya 2008).

### 2) Kriteria defleksi:

Jembatan perlu direncanakan untuk memenuhi batasan defleksi dalam kondisi layan beban lalu lintas sebagai pemenuhan aspek kenyamanan pengguna jembatan (AASHTO 2012). Sebagai jembatan sederhana untuk pejalan kaki, jembatan apung Cilacap belum memiliki acuan untuk batasan kriteria defleksi, sehingga digunakan batasan defleksi untuk jembatan pejalan kaki dari kriteria jembatan gantung pejalan kaki, yaitu  $< L/100$  (Indonesia 2010). Selain itu, terdapat beberapa kriteria defleksi horizontal untuk jembatan apung akibat pengaruh luar terkait stabilitas dinamisnya, seperti akibat pengaruh arus dan angin (Watanabe, Utsunomiya, and Wang 2004), dimana jembatan apung harus direncanakan sehingga masih dalam kondisi aman dan nyaman saat dilintasi untuk kondisi normal dan harus cukup kuat untuk kondisi angin dan arus ekstrim dalam perencanaan kekuatan elemen strukturnya (Watanabe and Utsunomiya 2003), seperti dapat dilihat pada Tabel 1.



**Gambar 5.** Struktur apung dalam kondisi stabil (Watanabe and Utsunomiya 2003)

**Tabel 1.** Kriteria defleksi dan pergerakan akibat beban pejalan kaki, sepeda motor, angin, dan arus

Kondisi Pembebanan	Tipe defleksi/pergerakan	Defleksi maks.	Pergerakan maks.
Beban pejalan kaki & sepeda motor (statis)	Vertikal	$L/100$	
Angin (statis)	Lateral ( <i>drift</i> )	0,3 m	
	Rotasi ( <i>heel</i> )	$0,5^\circ$	
Arus (dinamis)	Vertikal ( <i>heave</i> )	$\pm 0,3$ m	$0,5 \text{ m/s}^2$
	Lateral ( <i>sway</i> )	$\pm 0,3$ m	$0,5 \text{ m/s}^2$
	Rotasi ( <i>roll</i> )	$\pm 0,5^\circ$	$0,5 \text{ rad/s}^2$

Sumber: (Watanabe, Utsunomiya, and Wang 2004)

### 3) Kriteria kekuatan elemen struktur:

Struktur jembatan apung seperti jembatan pada umumnya, harus direncanakan untuk memiliki kekuatan yang mampu memikul beban-beban dan kombinasi beban *ultimate*, yang dapat bekerja pada jembatan, berdasarkan prinsip *Load and Resistance Factored Design (LRFD)* (AASHTO 2012). Prinsip ini merupakan prinsip perencanaan struktur jembatan yang digunakan dalam standar pembebanan dan perencanaan struktur jembatan yang berlaku di Indonesia, SNI 1725-2016 (Indonesia 2016) dan RSNI T-03-2005 (Indonesia 2005). Prinsip *LRFD* mensyaratkan kombinasi beban *ultimate* harus lebih kecil dari kapasitas struktur tereduksi, sehingga didapat tingkat keamanan dan keandalan struktur (Nugraha dan Sidi 2016).

Kapasitas tereduksi dari elemen struktur jembatan perlu diperiksa terhadap efek kombinasi pembebanan *ultimate* terbesar yang dapat terjadi berdasarkan standar pembebanan

yang berlaku. Beban rencana yang disyaratkan untuk jembatan pejalan kaki biasa adalah 5 kPa dengan masa layan 50 tahun (Indonesia 2016). Namun, dengan fungsi jembatan apung Cilacap ini sebagai jembatan sementara dengan masa layan 15 tahun, beban lalu lintas rencana tersebut dapat direduksi menjadi 0,60 dari nilai semula (Indonesia 2016). Sehingga dalam perencanaan jembatan apung Cilacap ini digunakan beban lalu lintas rencana 3 kPa (Pusjatan 2015).

Jenis elemen struktur yang digunakan pada Jembatan Apung Cilacap ini adalah baja struktural dengan spesifikasi ASTM A36 atau setara, yang memiliki kuat leleh  $f_y$  240 MPa dan kuat ultimate  $f_u$  360 MPa. Pelat lantai merupakan pelat lantai baja mutu ASTM A36 tebal 6 mm. Komponen utama ponton yang digunakan adalah EPS yang memiliki berat jenis 392,4 N/m<sup>3</sup> sehingga jika lapisan pelindung ponton mengalami kerusakan, ponton jembatan ini tetap dapat mengapung karena memiliki kapasitas apung yang tinggi dan memiliki volume yang tetap dengan berat yang lebih ringan dari air dengan volume yang sama.

Dalam perencanaan awal pada tahun 2015, jembatan apung Cilacap tipe pelengkung rangka baja ini diasumsikan sebagai jembatan dengan kaki jembatan pelengkung yang diberi tumpuan sendi dan kaki jembatan pendekat pada tumpuan diberi tumpuan rol (Pusjatan 2015). Model struktur yang dibuat dengan metode *Finite Element Method (FEM)* menggunakan *software MIDAS Civil* dengan beban rencana yang diaplikasikan antara lain akibat beban lalu lintas, beban angin, beban arus, dan lain sebagainya diberikan pada model untuk mendapatkan penampang elemen struktur yang dapat memenuhi kriteria kekuatan dan kenyamanan sesuai Tabel 1 (Pusjatan 2015). Resume hasil perencanaan jembatan apung Cilacap ini dapat dilihat pada Tabel 2.

### Uji pembebanan pada jembatan

Uji pembebanan merupakan salah satu upaya yang dilakukan untuk mengevaluasi respons struktur jembatan tanpa menyebabkan kerusakan, terhadap respons teoritis dalam pemodelan yang digunakan dalam perencanaan (Hou and Lynch 2006). Perencanaan tahapan-tahapan yang akan dilaksanakan pada uji pembebanan perlu dilakukan, yang terdiri dari pemasangan *marking* juga *benchmark* untuk mengukur lendutan dan pemasangan sensor

**Tabel 2.** Resume hasil perencanaan jembatan apung Cilacap

Parameter	Hasil
Tipe struktur	Pelengkung rangka baja (bentang utama) dan rangka baja (bentang pendekat)
Jumlah bentang	3 bentang (2 bentang pendekat dan 1 bentang utama)
Panjang bentang (m)	10 + 52 + 10
Clearance (m)	Vertikal: 5 m, horizontal: 30 m
Tipe ponton	EPS, proteksi FRP dan cat polimer <i>marine-gade</i> , ditambah struktur balok dan pelat beton bertulang
Tipe Mooring	Tiang pancang baja <i>Hollow steel section pipe</i> 300x8 mm, tinggi total 18 m (Mutu ASTM A36 atau setara)
Dimensi	
Penampang:	
- Pelengkung utama	<i>Hollow steel section box</i> (100x100x4) mm (Mutu ASTM A36 atau setara)
- Ikatan Angin	<i>Hollow steel section pipe</i> (60,3x4,8) mm (Mutu ASTM A36 atau setara)
- Rangka utama bentang pendekat	<i>Hollow steel section box</i> (100x100x4) mm (Mutu ASTM A36 atau setara)
- Pelat Lantai	<i>Checkered plate</i> baja tebal 7 mm (Mutu ASTM A36 atau setara) dengan lapisan epoxy+aspal di bentang pendekat
- Ponton	EPS: (4,6x8x1,2) m, Balok: (20x40) cm dengan mutu (fc' 30 MPa kedap air) Pelat lantai: tebal 15 cm (fc' 30 MPa kedap air)
- Daya apung per ponton	400 kN, beban layan dari atas 274 kN, sisa <i>freeboard</i> 40 cm

Sumber: (Pusjatan 2015) dan (Pusjatan 2016)

*strain gage* di lokasi elemen struktur yang ditinjau.

Selain itu, beban uji perlu ditentukan besaran, jenis, skema penempatan beban uji, dan kemudian membuat alternatif pemodelan struktur, dan penentuan batasan parameter uji berupa tegangan dan lendutan yang masih berada di bawah batas kekuatan dan kenyamanan struktur (Pusjatan 2017).

Dalam uji pembebanan jembatan apung Cilacap, beban uji yang digunakan adalah 120 buah zak semen dengan berat per zak 40 kg. Jumlah zak semen yang digunakan berdasarkan perhitungan setara dengan 30 % beban rencana 3 kPa. Sehingga didapatkan jumlah zak semen untuk total panjang jembatan adalah 120 buah zak semen. Pengambilan besaran beban uji yang lebih kecil dari beban rencana dimaksudkan agar

uji pembebanan dapat berjalan sesuai prinsip pengujian tidak merusak (*non-destructive test*) dan struktur masih berperilaku linier setelah uji pembebanan selesai (Hou and Lynch 2006).

### **Evaluasi beban layan ijin**

Evaluasi beban layan ijin dapat dilakukan dengan uji pembebanan karena dalam uji pembebanan dapat diketahui besaran dan konfigurasi beban yang dapat menyebabkan tegangan elemen dan lendutan sistem struktur akan mencapai batasan ijinnya (Cai et al. 2012). Dalam pengujian beban, dapat dicoba beberapa konfigurasi beban untuk mengevaluasi perilaku dan respons dari jembatan yang sesungguhnya terhadap beban tersebut (Hou and Lynch 2006).

Pembuatan model yang paling sesuai dengan kondisi dan perilaku jembatan sesungguhnya terhadap beban perlu dilakukan karena perencanaan jembatan apung ini masih relatif baru dan belum ada standar yang baku terkait analisis dan pemodelan strukturnya, sehingga masih banyak menggunakan asumsi yang perlu dievaluasi (Pusjatan 2016). Selain pemodelan dengan menganggap tumpuan kaki jembatan pelengkung sebagai sendi sederhana atau rol sederhana (Pusjatan 2015), ponton dapat dianggap menumpu pada permukaan air sehingga dapat dimodelkan sekaligus sebagai elemen *solid* pada pemodelan dengan *FEM*, menjadi satu kesatuan model struktur dan ponton yang dapat diamati perilakunya (Maruyama 2008).

Besaran beban uji yang telah ditentukan dapat diproyeksikan pada model yang didapatkan dengan mencocokkan perilaku jembatan aktual ke dalam model, untuk kemudian dianalisis dan mendapatkan besaran beban yang masih aman terhadap kriteria kekuatan struktur dan kriteria kenyamanan jembatan.

### **HIPOTESIS**

Uji pembebanan berupa uji statis dan uji dinamis terhadap jembatan dapat menggambarkan perilaku struktur jembatan apung yang sesungguhnya untuk digunakan sebagai acuan penyesuaian pemodelan.

### **METODOLOGI**

kN sepanjang 30 m bentang utama. Kemudian beban tahap kedua yaitu setara 30 %

Penelitian ini secara garis besar menggunakan metode penelitian evaluasi dengan pendekatan kuantitatif terhadap model struktur dalam perencanaan awal terhadap perilaku jembatan terhadap uji pembebanan pada jembatan apung Cilacap. Tahap awal dari penelitian ini adalah melakukan uji pembebanan pada jembatan yang meliputi perencanaan beban uji, penempatan sensor dan titik pengamatan deformasi, uji pembebanan sesuai rencana konfigurasi posisi beban dan besaran beban uji, serta evaluasi.

Tahap berikutnya adalah evaluasi beban layan ijin, terdiri dari pembuatan alternatif pemodelan jembatan apung, evaluasi perilaku jembatan dengan pemodelan yang paling mewakili perilaku aktual, dan kemudian proyeksi beban ujicoba pada model yang didapat hingga mencapai batasan kriteria keamanan dan kenyamanan struktur, yang disebut beban layan ijin. Secara lebih detail, metodologi yang digunakan dalam penelitian ini diuraikan secara berurutan sebagai berikut.

### **Uji pembebanan pada jembatan**

Uji pembebanan yang dilakukan pada jembatan apung Cilacap menggunakan metode pengujian beban secara statis, dimana beban uji ditempatkan pada pelat lantai dan kemudian respons dari jembatan dicatat dan diamati, baik berupa tegangan elemen maupun deformasi dari titik-titik pengamatan. Respons tegangan didapat dari konversi regangan statis yang diperoleh dari bacaan sensor *strain gage* pada elemen jembatan yang dihubungkan dengan *data logger* yang berfungsi sebagai perekam dan pemantau data respons regangan dari sensor. Sedangkan deformasi jembatan diukur dengan pengamatan menggunakan alat *Total Station*.

Untuk ujicoba beban statis, penempatan beban pada lantai jembatan harus dilakukan secara bertahap dan perlahan untuk meminimalisasi efek dinamis pada jembatan. Pada Tabel 3, penempatan beban untuk uji pembebanan jembatan apung Cilacap direncanakan terdiri dari tujuh tahap, termasuk kondisi awal tanpa beban dan kondisi pengosongan beban (*unloading*). Pemberian beban terdiri dari empat tahap di luar kondisi awal dan *unloading*. Beban pertama adalah setara 15 % beban hidup desain, yaitu total 24 beban hidup desain, yaitu total 47,1 kN sepanjang 30 m

bentang utama. Beban ketiga yaitu beban *unbalance* setara 30 % beban desain tetapi hanya pada setengah bentang utama (15 m), dan beban tahap terakhir yaitu beban setara 30 % beban hidup desain pada satu sisi bentang pendekat, yaitu total 18,83 kN sepanjang 12 m bentang pendekat.

Beberapa elemen struktur utama yang cukup signifikan respons terhadap beban untuk dipasang sensor regangan antara lain batang atas dan batang bawah dari bagian puncak dari struktur rangka pelengkung utama, batang kaki pelengkung utama, dan batang atas dari bentang pendekat. Sedangkan titik pengamatan deformasi berada di kaki jembatan pelengkung utama, kemudian di tengah bentang pelengkung utama, dan di seperempat bentang dan tiga perempat bentang pelengkung utama. Kemudian untuk uji beban dinamis, dipasang sensor *accelerometer* di tengah bentang, di seperempat bentang, dan di atas kaki jembatan, untuk mengetahui frekuensi natural dari struktur. Skema penempatan sensor dan titik pengamatan deformasi ini dapat dilihat pada Gambar 6.

### **Pemodelan dan analisis struktur jembatan apung**

Model struktur jembatan yang digunakan pada tahapan perencanaan memerlukan penyesuaian terhadap kondisi lapangan, antara lain penyesuaian *camber* jembatan model terhadap kondisi aktual, pergerakan di tumpuan ponton, dan sebagainya. Pada model perencanaan, tumpuan kaki jembatan pelengkung dianggap sebagai tumpuan sendi sederhana atau rol sederhana (Pusjatan 2015), yang memberikan respons teoritis dari model perencanaan cukup kecil dan berbeda jika dibandingkan dengan perilaku yang teramati pada uji pembebanan, sehingga memerlukan penyesuaian pemodelan.

Pemodelan yang dilakukan adalah menggunakan metode *FEM* dengan bantuan piranti lunak *MIDAS Civil*. Analisis struktur dilakukan berdasarkan skema dan tahapan pembebanan pada uji pembebanan sesuai Tabel 3, dengan luaran berupa tegangan di elemen struktur dan juga deformasi yang diamati sesuai Gambar 6. Pada alternatif pemodelan ponton sebagai bagian struktur, variasi pemberian kekangan arah lateral sangat berpengaruh pada perilaku struktur. Selain itu, kekakuan dan

kapasitas struktur jembatan juga terpengaruh terhadap nilai kekakuan permukaan air terhadap ponton, sehingga kapasitas yang diijinkan akan berbeda dengan kapasitas rencana yang dibuat untuk asumsi kondisi tumpuan jembatan sendi rol sederhana pada model tumpuan sendi dan rol sederhana pada tahapan perencanaan. Pemodelan alternatif yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 7.

Model pertama adalah model struktur jembatan apung beserta ponton dengan dua tiang di belakang masing-masing ponton dimodelkan sebagai tumpuan ke arah x dan y. Selanjutnya, model kedua dibuat dengan modifikasi berupa dua tiang di belakang salah satu ponton berperilaku sebagai tumpuan ke arah x dan y. Ponton yang dikekang ini adalah ponton yang berada di sisi selatan. Sedangkan model ketiga dibuat seperti model kedua, namun ponton yang dikekang ini adalah ponton yang berada di sisi utara, dan ponton sisi selatan dibebaskan. Kemudian, model keempat dibuat dengan satu tiang pada kedua ponton dimodelkan sebagai tumpuan ke arah x dan y, pada sisi barat.

Model kelima dan keenam merupakan model ideal yang digunakan dalam perencanaan, dimana titik kontak kaki jembatan dianggap sebagai titik tumpuan dan tidak mengganggu ponton yang menumpu pada air sebagai bagian dari struktur. Model kelima memodelkan kaki jembatan sebagai tumpuan sendi. Sedangkan model keenam dibuat serupa dengan model kelima namun dengan kaki jembatan dimodelkan dengan tumpuan sendi di sisi utara dan tumpuan rol di sisi selatan.

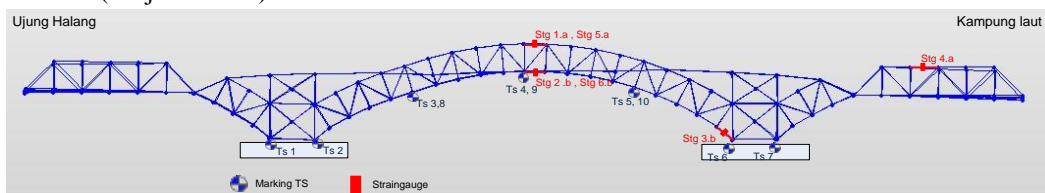
### **Evaluasi beban layan ijin**

Evaluasi beban layan ijin dilakukan setelah mendapatkan pemodelan yang paling mewakili perilaku jembatan aktual akibat uji pembebanan. Dari pemodelan tersebut kemudian dilakukan analisis struktur dengan proyeksi beban ujicoba pada model hingga mencapai batasan kriteria keamanan dan kenyamanan struktur, yang disebut beban layan ijin. Hal ini perlu dilakukan, karena beban rencana yang digunakan dalam perencanaan masih dibuat berdasarkan pemodelan dengan tumpuan jembatan sendi dan rol sederhana yang tidak menggambarkan perilaku jembatan secara aktual.

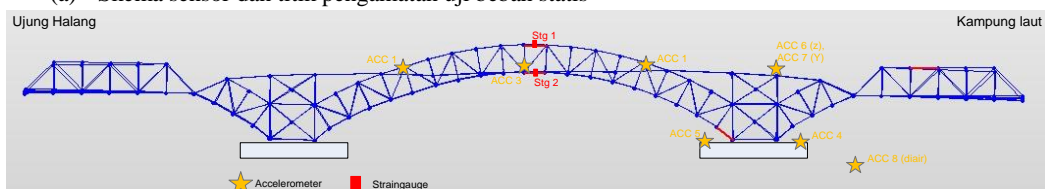
**Tabel 3.** Tahapan pembebanan uji pembebanan jembatan apung Cilacap

Tahapan pembebanan	Sketsa pembebanan
Tahap 0: (tanpa beban hidup)	
Tahap 1: beban 23,54 kN (beban 60 zak semen) 2 zak/m	
Tahap 2: beban 47,1 kN (beban 120 zak semen) 4 zak/m	
Tahap 3: beban 23,54 kN <i>unbalance</i> (beban 60 zak semen) 4 zak/m setengah bentang utama	
Tahap <i>unloading</i> : (tanpa beban hidup)	
Tahap 4 bentang pendekat: beban 18,83 kN (beban 48 zak semen di salah satu bentang pendekat) 4 zak/m seluruh bentang di salah satu jembatan pendekat	
Tahap <i>unloading</i> akhir: (tanpa beban hidup)	

Sumber: (Pusjatan 2017)



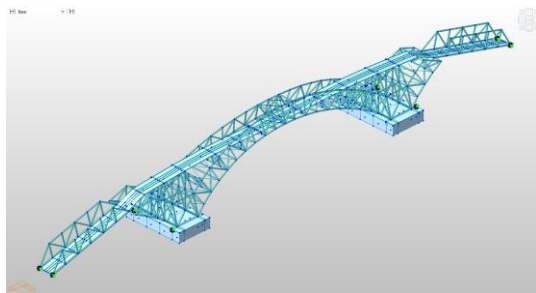
Tsx: Titik pengamatan total station ke-x, Stg x.y: Lokasi sensor regangan ke-x sisi-y (sisi a: barat, sisi b: timur)  
(a) Skema sensor dan titik pengamatan uji beban statis



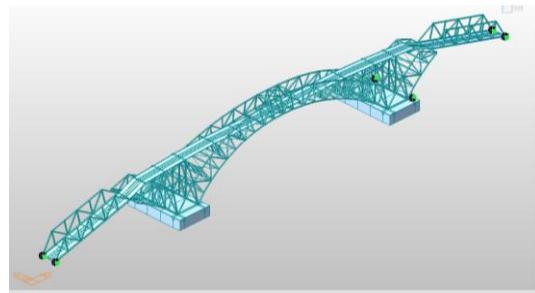
Accx: Lokasi sensor accelerometer ke-x  
(b) Skema sensor dan titik pengamatan uji beban dinamis

**Gambar 6.** Skema penempatan sensor dan titik pengamatan deformasi uji pembebanan Jembatan Apung Cilacap (Pusjatan 2017)

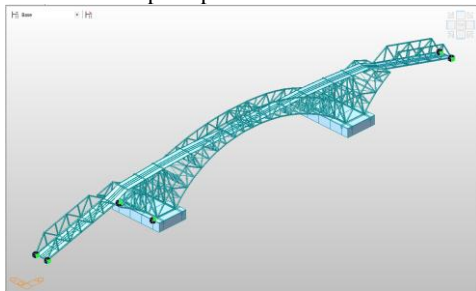




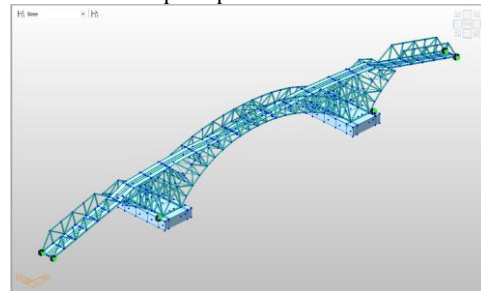
a. Model 1 – Tumpuan ponton sendi-sendi



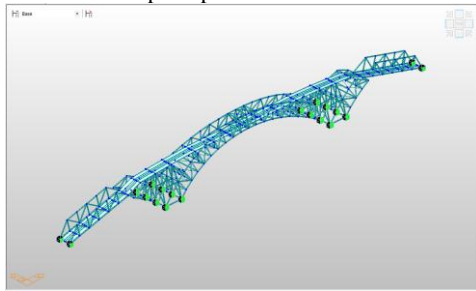
b. Model 2 – Tumpuan ponton sendi-rol 1



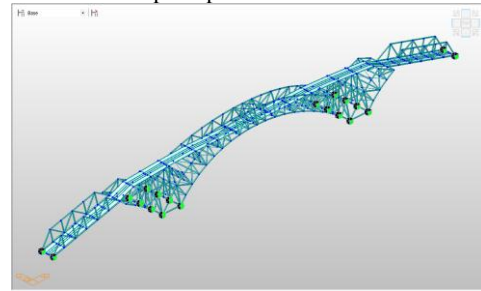
c. Model 3 – Tumpuan ponton sendi-rol 2



d. Model 4 – Tumpuan ponton sendi-sendi asimetris



e. Model 5 – Tumpuan sendi-sendi (ideal)



f. Model 6 – Tumpuan sendi rol (ideal)

**Gambar 7.** Pemodelan alternatif dari struktur jembatan apung (Pusjatan 2017)

## HASIL DAN ANALISIS

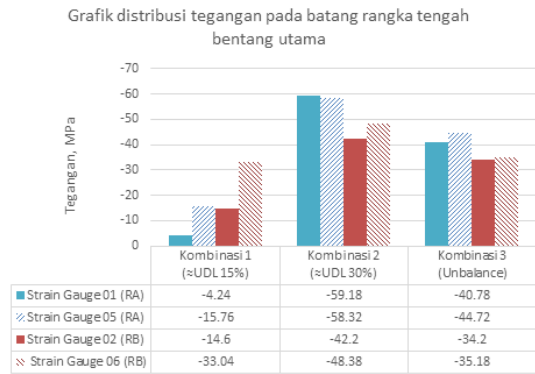
Hasil uji beban dinamis berupa frekuensi natural struktur, dapat menggambarkan kekakuan struktur jembatan terhadap getaran. Sedangkan hasil uji beban statis berupa deformasi dan tegangan akibat beban, dapat menggambarkan perilaku jembatan terhadap beban. Model struktur jembatan apung yang didapat dengan mencocokkan hasil uji beban statis dan dinamis terhadap respons dinamis dan statis pada analisis struktur dapat digunakan untuk mengevaluasi batasan beban layan ijin.

### Uji pembebanan pada jembatan

Respons struktur terhadap setiap tahapan uji pembebanan diamati dan dicatat, antara lain deformasi pada titik pengamatan deformasi dan respons tegangan yang terjadi pada elemen struktur (Gambar 6). Titik pengamatan deformasi antara lain di kaki jembatan, di tengah bentang, di seperempat bentang, dan tiga

perempat bentang. Hasil pembacaan deformasi dari setiap tahapan pembebanan kemudian dikoreksi terhadap penurunan yang terjadi pada kaki depan ponton sisi Ujung Alang (Ts 2), dengan nilai deformasi selalu dianggap nol sebagai titik acuan deformasi nol. Pada Tabel 4, deformasi vertikal maksimum yang terjadi pada struktur rangka utama untuk kombinasi beban penuh (tahap 2) dengan beban setara 30 % beban rencana, yaitu 47,1 kN, adalah sebesar -47,9 mm pada Ts 5 ( $\frac{3}{4}$  bentang utama) untuk sisi barat dan -60 mm pada Ts 9 ( $\frac{1}{2}$  bentang utama) untuk sisi timur. Sedangkan pada kondisi pembebanan *unbalance* atau tahap ke 3 dengan beban 2,4 ton ditempatkan hanya pada setengah bentang utama, deformasi vertikal maksimum yang terjadi adalah pada Ts 9 ( $\frac{1}{2}$  bentang utama) sisi timur sebesar -68,4 mm.

Sedangkan untuk respons tegangan akibat uji pembebanan, hasil tegangan yang terjadi akibat uji pembebanan dapat dilihat pada dan Gambar 8. Tegangan maksimum yang terjadi pada rangka atas tengah bentang utama



**Gambar 8.** Distribusi tegangan elemen struktur pada bentang tengah terhadap uji pembebanan (Pusjatan 2017)

*Strain Gauge (Stg 01)* akibat uji pembebanan untuk kombinasi pembebanan tahap 2, yaitu setara 30 % beban rencana (4,8 Ton) adalah sebesar 59,18 MPa.

Pada elemen struktur rangka jembatan pendekat tegangan maksimum yang terjadi akibat uji pembebanan adalah pada tengah bentang rangka batang atas (*Stg 04*) sebesar 20.6 MPa. Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa distribusi tegangan pada rangka atas antara sisi barat (*Stg 01*) dengan sisi timur (*Stg 05*) memiliki nilai yang hampir sama (selisih  $\pm 1$  MPa), begitu juga pada rangka bagian bawah (*Stg 02* dan *Stg 06*) yang memiliki selisih yang relatif hampir sama. Hal ini menunjukkan bahwa respons struktur terhadap beban sudah terdistribusi dengan cukup baik kepada dua sisi struktur rangka pelengkung. Kemudian, respons dinamik jembatan apung terhadap uji beban dinamik untuk pemicu getaran dari pejalan kaki dan sepeda motor didapat frekuensi puncak pertama 2,20 Hz yang merupakan frekuensi natural dari struktur jembatan apung ini.

### Pemodelan dan analisis struktur jembatan apung

Respons tegangan struktur aktual, struktur pelengkung pada tahapan awal pembebanan (tahap 1) seperti terlihat pada Tabel 5, mengalami gaya tarik pada batang bawah dan tekan pada batang atas, dengan adanya pergerakan ponton ke arah luar / menuju darat. Hal ini terjadi sebelum dilakukan penambahan beban tahap 2 yang membuat pergerakan ponton terkekang arah memanjangnya karena terhalang tiang pancang *mooring* di belakang ponton, sehingga berdampak pada perilaku rangka pelengkung yang mengalami gaya tekan pada

batang atas maupun bawah pada tahap pembebanan ke 2.

Perilaku struktur terhadap uji pembebanan ini belum dapat digambarkan dengan baik oleh model struktur yang digunakan dalam perencanaan. Sehingga diperlukan pemodelan alternatif dengan memodelkan ponton bersama struktur menjadi satu kesatuan dengan memvariasikan tipe tumpuan lateral pada ponton, terhadap simulasi uji pembebanan pada piranti lunak pemodelan *FEM* yang digunakan.

Tegangan pada batang atas tengah bentang utama (*Stg 01* dan *Stg 05*) untuk seluruh model maupun pada struktur aktual dapat dilihat pada Gambar 9.a. Tegangan pada batang bawah tengah bentang utama (*Stg 02* dan *Stg 06*), untuk model dan struktur aktual dapat dilihat pada Gambar 9.b. Pada sensor yang dipasang di atas batang, tanda bacaan dapat berbalik, walau elemen rangka secara teoritis akan mengalami aksial, pada kondisi aktual dapat terjadi kombinasi aksial lentur akibat sambungan baut yang cukup kaku. Tanda bacaan ini dikoreksi terhadap perilaku deformasi dilapangan dimana batang bawah mengalami tarik (+) karena ponton bergerak saling menjauh saat diberikan pembebanan.

Kemudian untuk tegangan yang terjadi pada kaki pelengkung utama dapat diamati pada *Stg 03* yang dipasang pada elemen kaki sisi utara dan *Stg 08* yang dipasang pada elemen kaki sisi selatan. Namun, pada *Stg 08* ini bacaannya tidak valid karena panjang kabel yang sangat panjang sehingga pengaruh suhu, lingkungan, akibat panjang kabel menjadi sangat mengganggu sehingga tidak digunakan pada analisis ini.

Secara umum, gaya dalam pada kaki jembatan bentang utama cukup besar karena yang meneruskan beban yang bekerja pada jembatan ke tumpuan, sehingga menjadi salah satu lokasi yang ditinjau. Pada dasarnya, gaya dalam yang terjadi pada elemen ini sama dengan batang bawah pada tengah bentang, yaitu gaya aksial tarik untuk kondisi tumpuan ponton masih berperilaku rol, dan menjadi gaya aksial tekan saat kondisi ponton telah menumpu tiang pancang *mooring* dan berperilaku sendi. Sedangkan untuk bentang pendekat, (*Stg 04* & *Stg 07*), gaya dalam yang diamati pada lokasi ini adalah saat pembebanan bentang pendekat saja (*unloading 1*- tahap 4- *unloading 2*). Untuk sensor yang dipasang di atas batang, tanda bacaan dapat berbalik karena sifat rangka yang

jika dimodelkan akan berperilaku aksial, pada kondisi lapangan dengan sambungan baut yang cukup kaku, akan bersifat kombinasi aksial lentur. Tanda bacaan pada Gambar 9. dikoreksi

terhadap perilaku deformasi dilapangan dimana batang bawah mengalami tarik (+) karena ponton bergerak saling menjauh saat diberikan pembebanan.

**Tabel 4.** Deformasi vertikal jembatan apung Cilacap terhadap uji pembebanan

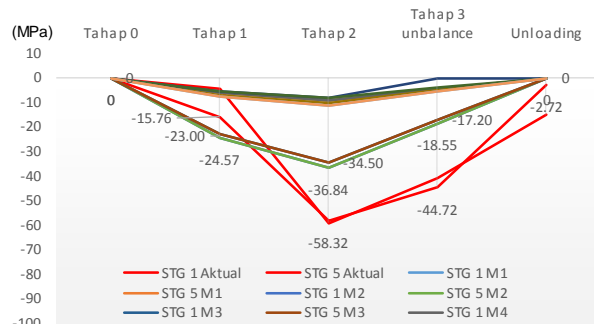
Lokasi Ts	Satuan	Tahap 0	Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3 unbalance	Unloading 1	Initial 2	Tahap 4 pendekat	Unload 2
Ts 1 ponton	mm	0,00	14,45	18,50	1,75	12,75	12,75	-8,30	9,45
Ts 2 ponton	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ts 3 ¼ bentang	mm	0,00	-11,10	-25,60	-26,40	-22,50	-22,50	-15,30	-4,20
Ts 4 ½ bentang	mm	0,00	-15,00	-31,90	-33,10	-27,50	-27,50	-17,40	-5,00
Ts 5 ¾ bentang	mm	0,00	-23,90	-35,70	-38,10	-32,70	-32,70	-28,50	-15,00
Ts6 ponton	mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ts 7 ponton	mm	0,00	-1,75	2,70	15,95	3,55	3,55	16,60	3,35
Ts 8 ¼ bentang	mm	0,00	-14,20	-39,40	-64,70	-60,10	-60,10	-29,30	20,80
Ts 9 ½ bentang	mm	0,00	-27,40	-52,10	-72,70	-66,80	-66,80	-43,80	9,20
Ts 10 ¾ bentang	mm	0,00	-12,90	-34,20	-50,20	-52,90	-52,90	-31,00	26,10

**Tabel 5.** Tegangan pada elemen struktur jembatan apung Cilacap terhadap uji pembebanan

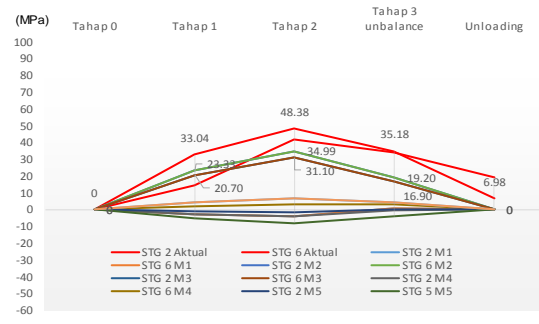
Lokasi Stg	Satuan	Tahap 0	Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3 unbalance	Unloading
Stg 01 ½ span atas	MPa	0	-4,24	-59,18	-40,78	-14,98
Stg 05 ½ span atas	MPa	0	-15,76	-58,32	-44,72	-2,72
stg 02 ½ span bawah	MPa	0	-14,60	-42,20	-34,20	-19,6
Stg 06 ½ span bawah	MPa	0	-33,04	-48,38	-35,18	-6,98
Stg 03 kaki	MPa	0	-2,00	-24,00	-18,00	-3,8
Stg 08 kaki	MPa	0	-60,40	16,80	-6,80	20,8

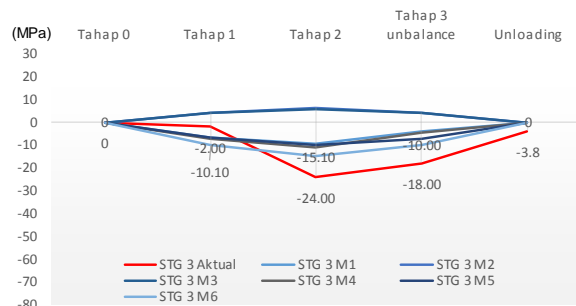
Lokasi Stg	Satuan	Initial 2	Tahap 4 unbalance pendekat	Unload 2
Stg 04 pendekat	MPa	0	20,60	17,6
Stg 07 pendekat	MPa	0	13,80	10,4



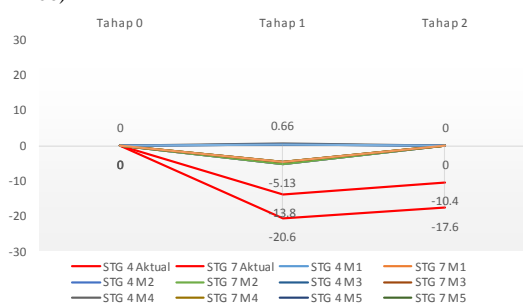
a. Tegangan batang atas tengah bentang utama (Stg 01 & Stg 05)



b. Tegangan batang bawah tengah bentang utama (Stg 02 & Stg 06)



c. Tegangan kaki pelengkung bentang utama (Stg 03)



d. Tegangan batang atas rangka bentang pendekat (Stg 04 & Stg 07)

**Gambar 9.** Perbandingan respons tegangan semua alternatif model dengan aktual terhadap uji pembebanan (Pusjatan 2017)

Berdasarkan perbandingan tegangan, didapat dua model yang cukup mendekati perilaku aktual untuk semua kondisi, yaitu Model 2 dan Model 3. Kedua model tersebut menggunakan model tumpuan vertikal ponton dan tumpuan lateral ponton Sendi-rol. Deviasi antara tegangan keluaran model teoritis dengan kondisi aktual bervariasi untuk setiap titik pengamatan, antara 7,21 MPa hingga 22,34 MPa.

Untuk parameter deformasi, titik pengamatan bisa dikelompokkan menjadi deformasi tengah bentang (Ts4 dan Ts9), deformasi  $\frac{1}{4}$  bentang (Ts 3 dan 8) dan  $\frac{3}{4}$  bentang (Ts 5 dan Ts 10), deformasi ponton 1 (Ts 1 dan 2) dan ponton 2 (Ts 6 dan 7). Sama seperti penamaan untuk sensor *strain gage*, untuk setiap kelompok elemen yang sama, nomor lebih kecil menunjukkan titik pengamatan deformasi tersebut berada di rangka sisi barat dan nomor lebih besar menunjukkan bahwa titik pengamatan deformasi tersebut berada di rangka sisi timur.

Deformasi pada tengah bentang dengan titik pengamatan Ts 4 dan Ts 9 adalah titik dengan deformasi terbesar yang terjadi pada jembatan tipe struktur rangka pelengkung, sehingga menjadi lokasi utama yang ditinjau untuk dievaluasi terhadap kriteria kenyamanan. Perbandingan respons deformasi vertikal dan lateral aktual di titik Ts 4 dan Ts 9 dengan beberapa jenis pemodelan dapat dilihat secara berurutan pada Gambar 10.a. dan Gambar 10.b. Kemudian, perbandingan respons deformasi vertikal dan lateral aktual pada  $\frac{1}{4}$  bentang (Ts 3 dan Ts 8) dan  $\frac{3}{4}$  bentang (Ts 5 dan Ts 10) dengan beberapa jenis pemodelan dapat dilihat secara berurutan pada Gambar 10.c. sampai dengan Gambar 10.f.

Pergerakan vertikal dan lateral dari Ts 1 dan Ts 2 untuk ponton sisi utara dan Ts 6 dan Ts 7 untuk ponton sisi selatan juga diamati. Pengamatan ini dimaksudkan sebagai titik kontrol deformasi vertikal dan juga pengamatan pergerakan lateral ponton untuk dibandingkan dengan model. Sehingga deformasi vertikal di kaki jembatan khususnya di kaki depan (Ts 1 dan Ts 6) dikoreksi menjadi nilai nol untuk seluruh deformasi vertikal struktur. Selanjutnya, perbandingan respons deformasi lateral aktual

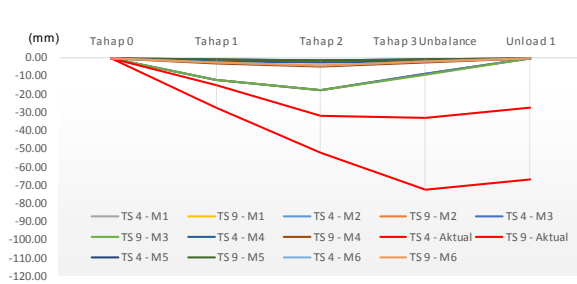
bacaan Ts di titik Ts 1 dan Ts 2 untuk ponton sisi utara dan Ts 6 dan Ts 7 untuk ponton sisi selatan, dengan beberapa jenis pemodelan dapat dilihat secara berurutan pada Gambar 10.g. dan Gambar 10.h.

Pada perbandingan deformasi, didapat model yang cukup mendekati perilaku aktual yaitu Model 2 yang menggunakan model tumpuan vertikal ponton dan tumpuan lateral ponton sendi-rol. Deviasi antara deformasi vertikal dan lateral keluaran model teoritis dengan kondisi aktual secara berurutan bervariasi antara 5 mm sampai dengan 55 mm dan antara 1,6 hingga 3,34 mm. Perbedaan bacaan ini juga dapat dijustifikasi dengan perbedaan perilaku tegangan dalam uraian sebelumnya.

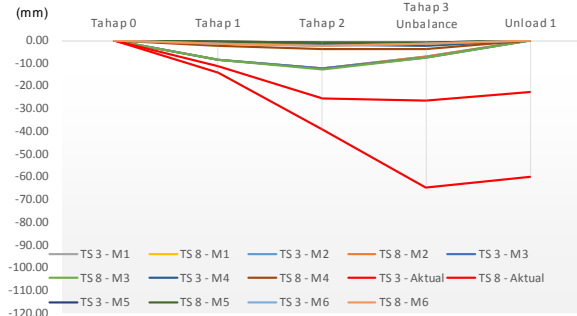
Sehingga, dari hasil perbandingan respons deformasi seluruh titik pengamatan deformasi dan juga respons tegangan terhadap uji pembebanan di atas, dapat disimpulkan bahwa Model 2 yang menggunakan model tumpuan vertikal dan lateral ponton sendi-rol adalah model yang paling menggambarkan perilaku jembatan secara aktual. Dari hasil uji dinamis, didapat frekuensi natural struktur adalah 2,20 Hz. Sedangkan frekuensi natural dari Model 2 adalah 1,88 Hz yang artinya Model 2 masih lebih kaku dibanding frekuensi natural struktur aktual. Dengan penyesuaian nilai kekakuan struktur yang dipengaruhi nilai koefisien tumpuan air terhadap ponton Model 2, bisa didapatkan deviasi yang lebih kecil terhadap respons aktual. Dari perhitungan secara *trial and error*, didapat nilai koefisien tumpuan air yang paling optimal agar frekuensi natural Model 2 mencapai nilai 2,20 Hz adalah 342,98 kN/m.

### **Evaluasi beban layan ijin**

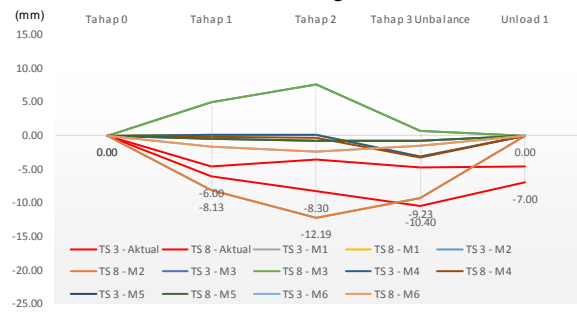
Berdasarkan hasil uji pembebanan, perilaku aktual struktur yang didapat secara umum lebih besar dibandingkan perilaku struktur pada pemodelan yang digunakan dalam perencanaan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terkait beban layan ijin untuk struktur aktual berdasarkan hasil pengujian beban yang diproyeksikan menjadi beban layan yang masih dapat diakomodasi secara aman oleh struktur eksisting.



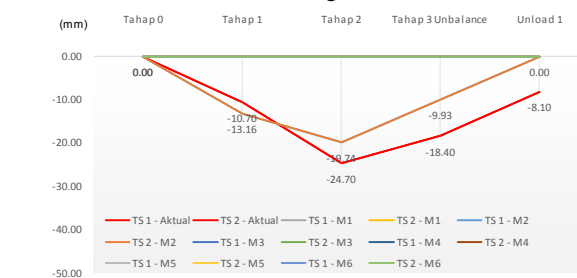
a. Deformasi vertikal tengah bentang utama (Ts 4 dan Ts 9)



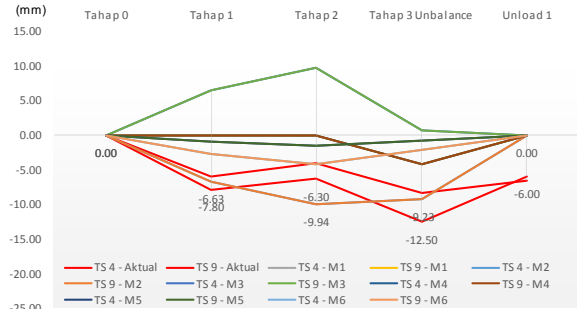
c. Deformasi vertikal ¼ bentang utama (Ts 3 dan Ts 8)



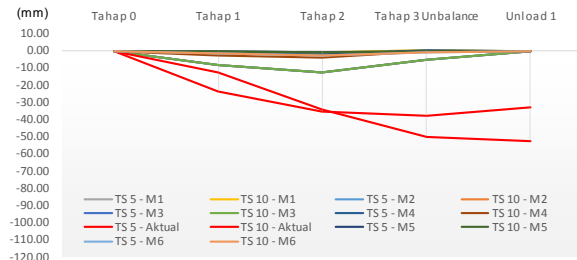
e. Deformasi lateral ¼ bentang utama (Ts 3 dan Ts 8)



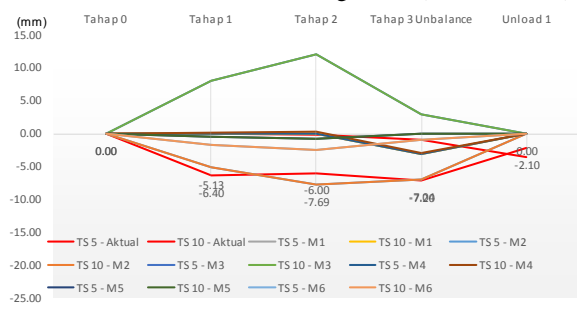
g. Deformasi lateral ponton 1 sisi utara (Ts 1 dan Ts 2)



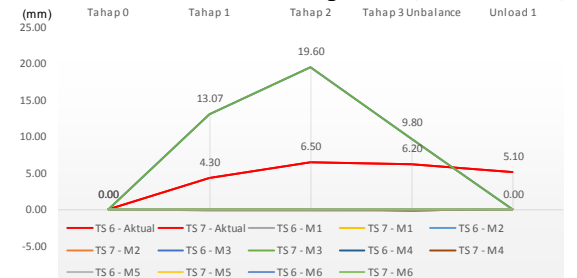
b. Deformasi lateral tengah bentang utama (Ts4 dan Ts9)



d. Deformasi vertikal ¾ bentang utama (Ts 5 dan Ts10)



f. Deformasi lateral ¾ bentang utama (Ts 5 dan Ts 10)



h. Deformasi lateral ponton 2 sisi selatan (Ts6 dan Ts7)

**Gambar 10.** Perbandingan respons deformasi semua alternatif model dengan aktual terhadap uji pembebanan (Pusjatan 2017)

Respons terbesar struktur baik regangan maupun deformasi didapat akibat beban tahap kedua atau beban 30 % dari beban hidup rencana. Dengan asumsi perilaku struktur masih linier, maka jika struktur eksisting dibebani hingga beban 100 % beban rencana, maka efek beban akan melebihi kapasitas rencana dari elemen struktur. Hal ini disebabkan penampang elemen struktur yang direncanakan berdasarkan perilaku pemodelan struktur awal, secara umum

memiliki respons yang lebih kecil dibanding respons aktual.

Maka dari itu, dengan pembatasan *strength ratio* yang sama dengan perencanaan awal, maka besaran beban layan ijin akan dihitung berdasarkan proyeksi linier perilaku struktur aktual, yang tentunya akan lebih kecil dari beban layan rencana, menggunakan model yang paling menggambarkan perilaku struktur aktual, yaitu Model 2. Konsekuensinya, pada

struktur jembatan apung ini perlu diberikan pembatasan beban layan di bawah besaran beban layan aktual yang dihasilkan dari evaluasi hasil pengujian beban ini.

## PEMBAHASAN

Perilaku struktur jembatan eksisting terhadap uji pembebanan secara keseluruhan menyerupai pemodelan dengan satu ponton terkekang lateral dan satu ponton bebas lateral, dimana terdapat pergerakan lateral pada ponton akibat pembebanan yang berdeformasi ke arah darat. Hal ini menggambarkan kondisi tumpuan ponton layaknya sendi-rol, namun dengan respons yang lebih besar. Pemodelan yang paling mendekati dengan perilaku aktual ini adalah Model 2 yang menggunakan model tumpuan vertikal ponton dan tumpuan lateral ponton sendi-rol, berdasarkan perbandingan respons Model 2 dengan respons struktur jembatan apung aktual terhadap uji pembebanan, baik berupa tegangan maupun deformasi.

Respons tegangan terbesar terjadi pada batang atas bentang tengah struktur pelengkung, *Stg 1* dan *Stg 5*, untuk kondisi beban tahap kedua yaitu 58,32 MPa, yang kemudian akan diacu untuk penentuan beban layan ijin dari evaluasi ini. Jika dibandingkan dengan respons struktur model yang paling mendekati yaitu model 2, besaran tegangan di lokasi tersebut adalah 36,84 MPa. Sedangkan dalam model dalam perencanaan, yaitu model tanpa ponton dimana kaki jembatan langsung berperilaku sendi di kaki pelengkung pertama dan rol di kaki pelengkung kedua, tegangan di lokasi tersebut adalah 11,30 MPa. Namun, dengan beban rencana 3 kN/m<sup>2</sup> tegangan kondisi kombinasi beban *ultimate* yang terjadi pada model perencanaan di lokasi tersebut adalah 4,92 MPa dengan *strength ratio* 0,52 dan pada kaki pelengkung 56,92 MPa dengan *strength ratio* 0,72.

Jika struktur masih linier, maka beban rencana yang dapat diijinkan untuk menjadi beban layan struktur eksisting dibatasi dengan *strength ratio* < 0,85, dalam hal ini kisaran tegangan akibat beban hidup yang boleh terjadi ada di kisaran (50–60) MPa. Berdasarkan hasil bacaan tegangan aktual terbesar dari uji pembebanan sebesar 58,32 MPa, dengan perilaku yang diprediksi linier terhadap pemodelan dan diharapkan *strength ratio* maksimal 0,85 (dari Model 2 didapat *strength*

*ratio* 0,825 untuk beban layan ini), maka untuk parameter kekuatan struktur, maka beban layan struktur eksisting maksimal yang diberlakukan adalah setara dengan 1,25 kali beban uji statis, yaitu maksimal 6 ton dengan posisi paling kritis yaitu di tengah bentang utama sepanjang 30 m, atau setara dengan 100 orang dengan berat rata-rata 60 kg per orang.

Untuk parameter deformasi sebagai batasan aspek kenyamanan, deformasi vertikal tengah bentang yang merupakan deformasi terbesar dibandingkan dengan batasan lendutan ijin. Dalam hal ini, target tingkat kenyamanan dalam penggunaan jembatan apung mengacu pada Tabel 1, yaitu L/100. Maka untuk bentang utama 30 m, lendutan maksimal yang diizinkan akibat beban hidup adalah 300 mm.

Lendutan vertikal terbesar pada bentang pelengkung utama untuk beban maksimal 4,8 ton adalah 72,70 mm. Jika beban layan disesuaikan terhadap batasan parameter tegangan, yaitu setara dengan 1,25 kali beban uji statis, dengan posisi paling kritis yaitu di tengah bentang utama sepanjang 30 m, maka lendutan yang terjadi adalah sebesar 90,88 mm, yang masih lebih kecil dibandingkan lendutan izin 300 mm, sehingga masih memenuhi kriteria. Maka, berdasarkan evaluasi beban layan ijin yang telah dilakukan dengan uji pembebanan, didapatkan hasil bahwa struktur jembatan layak untuk difungsikan sebagai jembatan pejalan kaki dengan pembatasan beban layan yang diijinkan, yaitu setara dengan 125 % beban uji statis atau 1,10 kN/m<sup>2</sup>, atau setara dengan 2 orang yang berjalan bersama dalam luasan lantai satu meter persegi dengan berat rata-rata 55 kg per orang.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Jembatan apung tipe pelengkung rangka baja yang diterapkan di Kampung Laut Cilacap memiliki perilaku jembatan pada arah sumbu vertikal tertumpu permukaan air dan perilaku pada arah sumbu horizontal satu sisi kaki jembatan menumpu pada tiang lateral dan satu sisi lainnya bebas bergerak sehingga berperilaku secara sendi dan rol pada arah horizontal. Kekakuan dan kapasitas struktur jembatan dalam model akan sangat terpengaruh terhadap nilai kekakuan permukaan air terhadap ponton, sehingga kapasitas yang diijinkan akan berbeda dengan kapasitas rencana yang dibuat untuk

asumsi kondisi tumpuan jembatan sendi rol sederhana.

Berdasarkan evaluasi beban layan ijin yang telah dilakukan berdasarkan uji pembebanan, didapatkan hasil bahwa struktur jembatan layak untuk difungsikan sebagai jembatan pejalan kaki dengan pembatasan beban layan yang diijinkan yaitu setara dengan 125 % beban uji statis atau 1,10 kN/m<sup>2</sup> dan setara dengan 2 orang yang berjalan bersama dalam luasan lantai 1 m x 1 m dengan berat rata-rata 55 kg per orang. Pembatasan beban ini dilakukan untuk memenuhi aspek keamanan penggunaan jembatan. Selain itu, didapat juga hasil uji dinamis, yaitu frekuensi natural jembatan sebesar 2,2 Hz, sehingga jembatan apung ini layak untuk digunakan dan memenuhi aspek keamanan serta kenyamanan struktur jembatan, baik secara statis maupun dinamis.

### Saran

Dalam perencanaan jembatan apung, sebaiknya dilakukan pemodelan dengan kondisi yang paling mendekati kondisi aktualnya. Dari penelitian ini diketahui bahwa ponton dan bangunan atas struktur jembatan seharusnya dimodelkan sebagai satu kesatuan untuk mendapatkan perilaku yang mendekati kondisi aktual.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR atas kesempatan untuk terlibat dalam penelitian Jembatan Apung, khususnya rekan rekan tim penelitian dan umumnya kegiatan penelitian terpadu Sistem Modular Wahana Apung di lingkungan Badan Litbang Kementerian PUPR.

### DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO). 2012. "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 6<sup>th</sup> Edition, Section 6." Washington: AASHTO.
- Bakosurtanal. 2014. *Badan Informasi Geospasial*. Diakses 17 September 2017. <http://www.bakosurtanal.go.id>.
- Cai, Hubo, Osama Abdudayyeh, Ikhlas Abdel-Qader, Upul Attanayke, Joseph Barbera and Eyad

- Almaita. 2012. "Bridge deck load testing using sensors and optical survey equipment". *Advances in Civil Engineering Vol.2012*. London: Hindawi Publishing Corporation
- Encyclopaedia Britannica. 2016. *Encyclopaedia Britannica*. Diakses 17 September 2017. <https://www.britannica.com>.
- Indonesia. 2005. "RSNI T-03-2005 Standar Perencanaan Baja untuk Jembatan." Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- . 2010. *SE Menteri PU No. 02/SE/M/2010. Pedoman perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jembatan gantung untuk pejalan kaki* . Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- . 2016. "SNI 1725 : 2016 Standar Pembebanan untuk Jembatan." Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Pusjatan. 2015. *Laporan Akhir Penelitian dan Pengembangan Jembatan Apung Pejalan Kaki*. Laporan Penelitian, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan.
- . 2016. *Laporan Akhir Pilot Project Sistem Modular Wahana Apung*. Laporan Akhir Penelitian, Bandung: Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR.
- . 2017. *Laporan Hasil Pengujian Beban Jembatan Apung Kampung Laut Cilacap*. Laporan Hasil Pengujian, Bandung: Pusat Litbang Jalan dan Jembatan.
- Saleh, Ali Halim. 2010. *Mega Floating Concrete Bridges*. M.Sc. thesis, Delft: TU Delft.
- Wang, C.M., Watanabe, E., and Utsunomiya, T. 2008. "Very Large Floating Structures: applications, analysis and design." *Taylor & Fransis*.
- Watanabe, Eiichi, and Tomoaki Utsunomiya. 2003. "Analysis and design of floating bridges." *Progress in Structural Engineering and Materials* 5 (3): 127–44.
- Watanabe, E., Utsunomiya, T., and Wang, C. M. 2004. "Hydroelastic analysis of pontoon-type VLFS: A literature survey." *Engineering Structures* 26 (2): 245–56.