

# ANALISIS METODE PENGANGKATAN GELAGAR BOKS BAJA MODULAR UNTUK JEMBATAN LINTAS ATAS SUNGAI (EREKSI METHOD ANALYSIS OF MODULAR STEEL BOX GIRDER FOR BRIDGE OVER THE RIVER)

Widi Nugraha<sup>1)</sup> dan Achmad Riza Chairulloh<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>riza.achmad@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 16 Oktober 2017; direvisi: 19 Mei 2018; disetujui: 6 Juni 2018

## ABSTRAK

Percepatan pembangunan infrastruktur saat ini merupakan prioritas pemerintah, termasuk percepatan konstruksi jembatan. Salah satu solusi untuk mempercepat masa konstruksi jembatan adalah dengan menggunakan komponen pra-fabrikasi modular. Konstruksi jembatan menggunakan komponen modular ini telah diujicoba oleh Puslitbang Jalan dan Jembatan yang bekerjasama dengan POSCO Korea Selatan pada tahun 2016 di Kali Cimanis, Kabupaten Cirebon. Jembatan Gelagar Boks Baja Modular ini memiliki panjang bentang 40 m dan terdiri dari tiga segmen: 12 m, 16 m, dan 12 m. Pada umumnya, jembatan gelagar boks baja modular ini dipasang sebagai lintas atas dari sebuah jalan eksisting yang digunakan sebagai tempat untuk sebuah mobile crane melakukan pekerjaan peluncuran gelagar. Dengan lokasi ujicoba konstruksi di atas sebuah sungai dan tidak memungkinkan untuk menggunakan metode yang sama, maka dalam pelaksanaannya, digunakan alternatif metode konstruksi dengan menggunakan dua buah crane di satu sisi sungai yang merupakan lokasi perakitan dan satu buah crane di sisi lain untuk menyambut gelagar. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis dengan model FEM dengan parameter yang diamati adalah tegangan dan defleksi pada setiap tahapan metode pengangkatan gelagar tersebut untuk memastikan keamanan secara teknis. Dari hasil analisis pada tahapan konstruksi, tegangan efektif terbesar yang terjadi pada gelagar adalah 50,37 MPa dan defleksi vertikal terbesar adalah 21,98 mm. Besaran ini masih memenuhi kriteria desain jembatan ini, yaitu tegangan izin 380 MPa dan defleksi izin 50 mm. Sehingga, metode pengangkatan gelagar ini dapat digunakan dan menjadi acuan untuk metode pengangkatan gelagar boks baja modular untuk proyek jembatan lintas atas sungai lainnya.

**Kata Kunci:** percepatan konstruksi, gelagar box baja, modular, metode pengangkatan, pra-fabrikasi

## ABSTRACT

Nowadays, acceleration on infrastructure development is become government priority, include bridge construction time. One of the solutions to accelerate bridge construction time is by using modular prefabrication component. This modular bridge construction is implemented by IRE and POSCO in 2016, on Cimanis River, Cirebon Regency. This modular steel box girder bridge has length of 40 m and it consists of three segments, 12 m, 16 m, and 12 m. Usually, this type of bridge is constructed over an existing road, where the mobile crane can be placed for girder erection. But for this pilot project, the bridge will be constructed over a river with no access below for the mobile crane and thus the usual method can't be implemented. Therefore, the erection method of this pilot project will use two crane on one side and one crane on the other side to support the girder erection. In this paper, a FEM analysis was undertaken to justify the technical safety in terms of stress level and deflection check at each construction stage. From analysis, it is found that during erection, the maximum effective stress in the girder is 50,37 MPa and the maximum vertical deflection is 21,98 mm. These values are still comply with bridge design criteria, with allowable stress of 380 MPa and allowable deflection 50 mm. Therefore, this erection method can be used as reference for another modular steel box girder construction project for bridge over a river.

**Keywords:** construction acceleration, steel box girder, modular, ereksi method, prefabricated

## PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan luas wilayah yang cukup besar dan memiliki jumlah penduduk yang sangat besar di dunia. Kebutuhan akan infrastruktur untuk transportasi adalah salah satu kebutuhan utama yang harus disediakan oleh pemerintah. Infrastruktur menjadi fokus utama pembangunan saat ini untuk menyediakan akses seluas-luasnya untuk kebutuhan ekonomi. Infrastruktur jalan dan jembatan sebagai salah satu prasarana transportasi darat yang paling umum digunakan, perlu perhatian utama untuk dipercepat pembangunannya.

Pada tahun 2012, menurut World Economic Forum, infrastruktur jalan di Indonesia menempati peringkat ke-83 di dunia dengan indeks 3,5 (World Economic Forum 2012). Sedangkan tahun 2017, setelah enam tahun lamanya, peringkat Indonesia berhasil naik ke peringkat 75 dunia dengan indeks 3,9 (World Economic Forum 2017). Hal ini menunjukkan bahwa bidang infrastruktur jalan di Indonesia mengalami peningkatan dan memerlukan percepatan lagi agar daya saing ekonomi Indonesia secara keseluruhan dapat meningkat lagi di dunia.

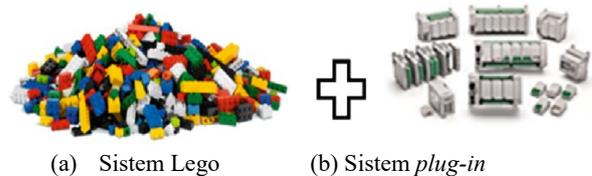
Percepatan pembangunan infrastruktur jalan dan jembatan selain perlu didukung dengan alokasi belanja negara, juga perlu didukung dengan perkembangan teknologi di bidang konstruksi. Salah satunya, teknologi terkini di bidang konstruksi jembatan yang dapat mempercepat masa konstruksi jembatan adalah teknologi percepatan konstruksi jembatan / *accelerated bridge construction* (ABC). ABC adalah konstruksi jembatan yang menggunakan inovasi dalam perencanaan, desain, material, dan metode konstruksi dengan pertimbangan keamanan dan efektivitas pembiayaan konstruksi untuk mereduksi waktu konstruksi di lapangan, baik dalam lingkup pembangunan jembatan baru atau penggantian dan rehabilitasi jembatan eksisting (Culmo 2011).

Sistem ABC, salah satunya dapat dicapai dengan menggunakan sistem elemen jembatan pra-fabrikasi / *prefabricated bridge element system* (PBES). PBES adalah komponen struktur jembatan yang dibuat di luar lokasi jembatan untuk dirakit dan dipasang di lokasi, dengan tujuan untuk mereduksi waktu konstruksi di lapangan dan mereduksi waktu mobilisasi pada konstruksi jembatan dengan metode konvensional (Culmo 2011). Adapun elemen yang dapat digunakan dalam PBES antara lain adalah elemen lantai jembatan, gelagar atau balok, pilar,

abutment elemen dinding, dan elemen pelengkap seperti lantai beton untuk oprit jembatan, parapet pra-fabrikasi, dan lain-lain (Culmo 2011).

Pada tahun 2016, atas kerjasama antara Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dengan perusahaan baja asal Korea Selatan, yaitu POSCO, salah satu teknologi PBES berupa gelagar boks baja modular dihibahkan dari POSCO untuk ujicoba konstruksi di Indonesia. Komponen gelagar boks baja yang umumnya dibuat dengan sambungan las antara pelat-pelat baja, namun untuk gelagar modular ini dibuat dengan metode tekuk (*bending*) dari satu pelat yang utuh selebar lima meter dan tebal hingga 22 mm. Hal ini dapat dilakukan oleh POSCO dengan kemajuan peralatan industri yang dimiliki, sedangkan di Indonesia belum tersedia peralatan industri baja untuk dapat membuat komponen gelagar boks baja menggunakan teknik tekuk dari lembaran pelat dengan ketebalan dan lebar pelat yang sama.

Pembuatan bentuk boks baja dari pelat dengan metode tekuk dapat meminimalisasi jumlah sambungan, khususnya sambungan las. Sambungan las perlu menjadi perhatian khusus dalam konstruksi jembatan untuk jalan raya karena akan menjadi titik lemah untuk kondisi beban lelah / *fatigue* akibat akumulasi efek beban lalu lintas yang berulang-ulang (Nugraha 2017). Sehingga, dengan meminimalisasi jumlah sambungan, kualitas konstruksi menjadi lebih terjamin dan mengurangi resiko kegagalan struktur.



**Gambar 1.** Sistem Modular (Kim et al. 2013)

Secara umum, yang dimaksud dengan teknologi modular adalah teknologi modul-modul yang dibagi bagi menjadi sistem Lego yang membuat seluruh sistem menggunakan kombinasi dari produksi dari modul-modul pra-fabrikasi yang tipikal dan sistem *plug-in* seperti pada Gambar 1. Sehingga, setiap komponen yang dibuat secara pra-fabrikasi yang tipikal dapat diterapkan satu sama lain untuk menyesuaikan kebutuhan konstruksi di lapangan. Maka, jembatan modular adalah jembatan yang komponennya dibuat sebelumnya dengan ukuran modul yang disesuaikan dengan batasan

mobilisasi, kemudian dirakit di lokasi konstruksi (Kim et al. 2013).

Indonesia sebagai negara yang sangat luas memiliki banyak sekali jembatan, baik yang berstatus di jalan nasional, jalan provinsi, jalan kabupaten, dan bahkan non status di jalan penghubung daerah permukiman. Banyak diantaranya merupakan jembatan lama yang sudah melewati masa umur rencana jembatan 50 tahunan dan memerlukan rehabilitasi, perbaikan, atau penggantian. Salah satunya adalah Jembatan Cimanis yang dibangun pada masa penjajahan Belanda sebagai akses untuk perkebunan tebu di Cirebon, Provinsi Jawa Barat. Jembatan Cimanis yang berupa jembatan rangka batang baja dan memiliki panjang bentang 40 m ini merupakan bagian dari jalan kabupaten di bawah kewenangan Kabupaten Cirebon.

Kondisi terbaru jembatan yang sudah berusia sekitar 80-90 tahun ini seperti dapat dilihat pada Gambar 2, mengalami korosi dan beberapa elemen batang bawah sudah hampir putus, sehingga memerlukan penggantian jembatan (Pusjatan 2016b). Bekerjasama dengan Dinas Bina Marga Kabupaten Cirebon, Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) memutuskan untuk melaksanakan *pilot project* konstruksi jembatan gelagar boks baja modular yang berasal dari kerjasama Pusjatan dengan POSCO untuk menggantikan jembatan lama di lokasi tersebut dari beberapa alternatif lokasi lain yang telah disurvei.

Teknologi jembatan modular dapat digunakan sebagai jembatan pengganti untuk jembatan lama yang mengalami kerusakan dan membutuhkan penggantian dengan cepat (Khan 2015). Penggunaan gelagar pra-fabrikasi modular saat ini tengah mengalami peningkatan sebagai modifikasi dari metode konvensional (Khan 2015). Sehingga, penggunaan Jembatan Gelagar Boks Baja Modular untuk penggantian Jembatan Cimanis sangat tepat dalam menjawab permasalahan kerusakan Jembatan Cimanis dan kebutuhan Pusjatan untuk ujicoba konstruksi jembatan modular yang pertama kali dilakukan di Indonesia.

Jembatan Gelagar Boks Baja Modular yang digunakan terdiri dari tiga buah modul, yaitu panjang 12 m, 16 m, dan 12 m. Sehingga, setelah dirakit dengan sambungan baut antar modul, menjadi gelagar boks baja panjang 40 m. Panjang modul ini merupakan modul standar yang telah dirancang dan dibuat secara pra-fabrikasi oleh tim POSCO dari Korea Selatan. Panjang modul ini juga mempertimbangkan batasan panjang dari kendaraan angkut *trailer low bed* untuk mobilisasi

komponen dari *workshop* ke pelabuhan Korea Selatan, kemudian sampai di Indonesia di pelabuhan Tanjung Priok, dan dimobilisasi ke lokasi Pilot Project di Cirebon.



**Gambar 2.** Jembatan Kali Cimanis lama

Pada umumnya, jembatan gelagar boks baja modular dipasang sebagai lintas atas dari sebuah jalan eksisting yang digunakan sebagai tempat untuk sebuah *mobile crane* melakukan pekerjaan ereksi gelagar. Sedangkan untuk lokasi konstruksi di atas sebuah sungai, tidak memungkinkan untuk menggunakan metode yang sama. Sehingga, dalam pelaksanaannya digunakan alternatif metode pengangkatan gelagar dengan menggunakan dua buah *crane* di satu sisi sungai yang merupakan lokasi perakitan dan satu buah *crane* di sisi lain untuk menyambut gelagar. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis dengan model *Finite Element Method* (FEM) dengan parameter yang diamati adalah tegangan dan defleksi pada setiap tahapan metode pengangkatan gelagar tersebut untuk memastikan keamanan secara teknis.

## KAJIAN PUSTAKA

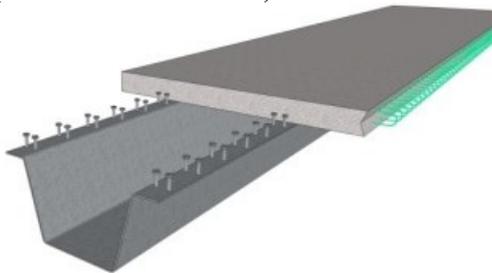
### Teknologi jembatan modular

Teknologi jembatan modular merupakan pengembangan dari teknologi pra-fabrikasi atau pracetak, dimana elemen-elemen yang digunakan adalah elemen yang sudah dibuat dalam modul-modul standar sehingga setelah disusun dapat menjadi suatu jembatan. Jembatan direncanakan berdasarkan kombinasi modul yang telah dibuat, dimana komponen modul tersebut telah difabrikasi sebelumnya (*pre-made/pre-engineered module*) sehingga tidak memerlukan waktu lama dari perencanaan hingga pengiriman modul ke lokasi pekerjaan (Kim et al. 2013).

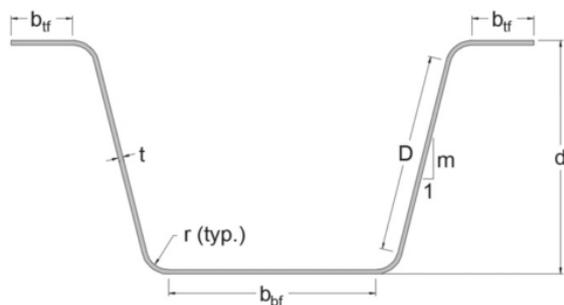
Dalam perkembangan teknologi jembatan modular, elemen-elemen yang dibuat dalam bentuk modular pada dasarnya serupa dengan

elemen pra-fabrikasi, yaitu dapat berupa lantai jembatan, gelagar atau balok, pilar, abutmen dan elemen dinding, dan elemen pelengkap seperti lantai beton untuk oprit jembatan, parapet pra-fabrikasi, dan lain-lain (Culmo 2011). Dengan menerapkan teknologi modular pada konstruksi jembatan, keuntungan yang bisa diperoleh antara lain reduksi biaya konstruksi dan waktu proyek, kualitas yang stabil, kemudahan perawatan (Kim et al. 2013).

Seperti yang diuraikan di atas, salah satu komponen jembatan yang dapat dibuat secara modular adalah elemen gelagar. Dalam perkembangan jembatan tipe gelagar modular, gelagar boks, maupun gelagar IWF telah dapat dibuat secara modular. Sebagai elemen lentur, bentuk gelagar sangat berpengaruh terhadap kapasitas lentur struktur terhadap beban yang dipikul. Dalam hal ini, gelagar bentuk boks memiliki keunggulan dibandingkan dengan gelagar IWF karena dengan kebutuhan lebar jembatan yang sama, kebutuhan jumlah gelagar lebih sedikit dan kapasitas lentur yang lebih besar (Dorka dan Pruss 2006).



**Gambar 3.** Elemen gelagar boks baja modular (Barth, Michaelson, dan Barker 2015)



**Gambar 4.** Penampang elemen gelagar boks baja modular (Barth, Michaelson, dan Barker 2015)



**Gambar 5.** Alat fabrikasi *press brake* kapasitas besar (Barth, Michaelson, dan Barker 2015)

Dalam pembuatan gelagar boks baja modular, dengan tujuan meminimalisasi jumlah sambungan, maka proses pembuatan bentuk boks dilakukan dengan cara menekuk satu lembar pelat baja dalam kondisi dingin (*cold-bent*) (Barth, Michaelson, dan Barker 2015). Bentuk gelagar baja yang didapat dari proses *cold-bent* ini adalah trapesium dengan bagian pelat lantai dari beton dengan *shear stud* pada hubungan baja dan beton sehingga terbentuk penampang gelagar boks komposit seperti dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Gelagar boks modular yang difabrikasi dengan cara ditekuk ini memungkinkan jumlah sambungan las yang dibutuhkan sangat sedikit dibandingkan gelagar tipe IWF (Nakamura 2003). Peralatan fabrikasi utama yang diperlukan untuk dapat membentuk gelagar boks baja modular dengan metode *cold-bent* adalah alat *press brake* kapasitas besar seperti dapat dilihat pada Gambar 5 (Barth, Michaelson, dan Barker 2015). Selain itu, dengan peralatan fabrikasi yang memadai, gelagar boks baja modular ini dapat diproduksi secara massal, sehingga dapat mencapai kriteria ekonomis industri (Nakamura 2003).

### Metode pengangkatan gelagar modular jembatan lintas atas jalan

Pada umumnya, jembatan gelagar boks baja modular ini dipasang sebagai lintas atas dari sebuah jalan eksisting. Pada kondisi tersebut, pekerjaan konstruksi jembatan dapat dilakukan dengan membangun bangunan bawah terlebih dahulu yang berada di samping jalan eksisting, sehingga tidak mengganggu arus lalu lintas.



**Gambar 6.** Ilustrasi pekerjaan peluncuran gelagar boks baja modular untuk lintas atas jalan eksisting (Pusjatan 2016a)

Kemudian tahapan peluncuran bangunan atas berupa gelagar boks baja modular yang telah difabrikasi sebelumnya, dilakukan dengan menggunakan sebuah *mobile crane* yang beroperasi di jalan eksisting di bawah jembatan yang akan dibangun. Sementara dalam proses peluncuran gelagar ini, lalu lintas harus ditutup sementara. Ilustrasi pekerjaan peluncuran gelagar boks baja modular ini dapat dilihat pada Gambar 6.

Sebelum dilakukan peluncuran gelagar, secara garis besar tahapan yang perlu dilakukan setelah pembangunan bangunan bawah antara lain sebagai berikut: pengiriman modul gelagar boks baja modular dari *workshop*, penempatan modul gelagar di lokasi kerja, kemudian sambil mempersiapkan tumpuan jembatan, dapat dilakukan perakitan modul-modul gelagar menjadi satu bentang dengan sambungan baut, kemudian dilanjutkan dengan tahapan peluncuran gelagar.

Tahapan peluncuran dimulai dengan menempatkan *mobile crane* di posisi yang memungkinkan pengangkatan gelagar ke posisinya di atas abutmen. Kemudian pasang seling baja pada lokasi titik pengangkatan gelagar dan angkat gelagar baja hingga ditempatkan pada tumpuan di atas abutmen. Lakukan untuk gelagar selanjutnya, kemudian sambungkan diafragma antar gelagar. Setelah itu, tahapan peluncuran telah selesai dan dapat dilanjutkan dengan tahapan pekerjaan rantai jembatan.

Tahapan pekerjaan rantai jembatan dilakukan dimulai dengan penulangan rantai dan pengecoran rantai jembatan. Bagian flens atas dari gelagar boks baja modular telah dipersiapkan dengan *shear stud* sebagai sambungan geser dengan pelat rantai beton, sehingga dapat terbentuk penampang komposit antara boks baja dengan pelat rantai.

Kemudian sebagai tahapan akhir, pasang *railing* jembatan di kedua sisi jembatan.

Metode konstruksi ini sudah umum dan ekonomis untuk digunakan untuk konstruksi jembatan satu bentang. Namun, dengan lokasi konstruksi di atas sebuah sungai yang tidak memungkinkan untuk menggunakan metode yang seperti yang diuraikan di atas, maka diperlukan alternatif metode konstruksi lain yang aman dan ekonomis. Beberapa alternatif metode konstruksi yang dapat digunakan antara lain menggunakan *launching gantry* atau *form traveler*, kemudian perancah atau tumpuan sementara di bawah jembatan, kemudian dengan modifikasi metode penggunaan *mobile crane*, yaitu menggunakan dua buah *mobile crane* di satu sisi sungai yang merupakan lokasi perakitan dan satu buah *mobile crane* di sisi lain untuk menyambut gelagar.

Dengan kondisi sungai yang sering mengalami kondisi banjir, penggunaan perancah atau tumpuan sementara tidak memungkinkan dan tidak cukup aman. Sedangkan penggunaan *launching gantry* aman karena posisi tumpuan konstruksi ada di atas level jembatan. Namun secara aspek ekonomis, penggunaan *launching gantry* membutuhkan biaya yang besar dan tidak cukup ekonomis jika hanya digunakan untuk konstruksi satu bentang jembatan saja (Rosignoli 2007). Maka dari itu, metode dengan penggunaan tiga buah *mobile crane* dipilih berdasarkan keamanan terhadap potensi banjir dan aspek ekonomis konstruksi jembatan satu bentang. Secara lebih lanjut, metode dengan tiga buah *mobile crane* ini akan dibahas pada bagian Metodologi.

Berdasarkan pelaksanaan *pilot project* Jembatan gelagar boks baja modular di Cirebon tahun 2016, pelaksanaan pemasangan dan pengangkatan dua buah gelagar boks baja modular dapat dilakukan dalam waktu dua hari. Hari pertama dilaksanakan perakitan masing-masing modul gelagar menjadi dua buah gelagar sepanjang 40 m di lapangan dan persiapan penempatan *crane*. Hari kedua dilaksanakan pengangkatan gelagar hingga ditempatkan di tumpuan jembatan. Dalam dua hari, dapat diangkat dua buah gelagar dengan berat total gelagar 65,6 ton, sehingga berat baja terpasang per hari adalah 32,8 ton.

Pekerjaan dilanjutkan dengan pemasangan komponen dudukan rantai beton dan pemasangan tulangan beton untuk persiapan pengecoran rantai beton. Total waktu pelaksanaan hingga konstruksi jembatan gelagar boks baja modular beserta rantai beton siap untuk digunakan adalah 18 hari kerja. Pelaksanaan ini cukup cepat dan tentunya dapat

menghemat waktu pelaksanaan dan juga biaya pelaksanaan pekerjaan konstruksi jembatan.

### **Pemodelan dan analisis struktur dengan FEM**

*Finite Element Method*(FEM) adalah metode numerik untuk menyelesaikan masalah teknik dan fisika matematis, diantaranya untuk keperluan analisis struktur. Dalam analisis struktur jembatan misalnya, terdapat permasalahan kompleks dari geometri elemen struktur, pembebanan yang diterima elemen struktur termasuk berat sendiri dan sifat material yang unik satu sama lain. Masalah tersebut sulit untuk diselesaikan secara matematis, namun dapat dibantu dengan FEM yang menyelesaikan masalah lewat persamaan menggunakan metode matriks dengan pemrograman komputer. Untuk masalah struktur, hasil analisis dengan FEM bisa didapatkan informasi deformasi dan tegangan pada elemen struktur untuk kemudian dievaluasi terhadap batasan-batasan izin yang memenuhi kaidah keamanan struktur dan kenyamanan pengguna struktur (Handayani 2011).

Dalam analisis struktur berbasis FEM, dapat dimasukkan input berupa jenis material dan sifat material yang digunakan, termasuk non-linearitas material. Misalnya untuk material baja, program FEM memerlukan mutu material yang termasuk informasi kurva tegangan regangan yang sifatnya non-linear setelah melewati batasan tegangan leleh. Terkait non-linearitas, dalam FEM juga diperhitungkan adanya non-linearitas penampang elemen struktur. Dalam memikul beban, elemen struktur dapat berdeformasi yang menyebabkan perubahan kekakuan elemen struktur, sehingga terjadi efek samping yang menyebabkan gaya lentur atau geser sehingga deformasi yang terjadi menjadi lebih besar dan tidak linear (Setiadi 2015).

Sedangkan untuk jenis elemen, ada berbagai jenis elemen yang dapat dianalisis oleh FEM, antara lain batang (*frame*), balok (*beam*), rangka batang (*truss*), pelat (*shell* atau *plate*), dan lain sebagainya. Pemilihan jenis elemen ini sangat dipengaruhi oleh perilaku aktual elemen struktur yang ingin dimodelkan. Untuk jembatan gelagar misalnya, elemen gelagar berperilaku lentur, sehingga dapat dimodelkan sebagai balok (*beam*). Kemudian, simulasi pembebanan dapat diberikan sebagai beban terpusat pada satu titik, beban merata pada pelat, atau beban garis pada sepanjang suatu batang (Setiadi 2015).

### **HIPOTESIS**

Jembatan gelagar boks baja modular dapat dibangun sebagai lintas atas sungai dengan metode pengangkatan gelagar menggunakan tiga *mobile crane*, yaitu dua buah *mobile crane* di satu sisi sungai yang merupakan lokasi perakitan dan satu buah *mobile crane* di sisi lain untuk menyambut gelagar. Metode pengangkatan gelagar ini dapat memenuhi kriteria keamanan terhadap kapasitas tegangan dan defleksi elemen gelagar untuk setiap tahapan pengangkatan yang dilaksanakan.

### **METODOLOGI**

Penelitian ini secara garis besar menggunakan metode penelitian evaluasi dengan pendekatan kuantitatif. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis elemen gelagar boks baja modular dengan model *finite element method* (FEM) terhadap setiap tahapan metode pengangkatan gelagar jembatan lintas atas sungai yang digunakan untuk Pilot Project Jembatan Gelagar Boks Baja Modular di Sungai Cimanis, Kabupaten Cirebon. Evaluasi dilakukan dengan mengamati parameter tegangan efektif terbesar dan defleksi vertikal terbesar yang terjadi pada elemen dalam model FEM pada setiap tahapan konstruksi. Kedua besaran tersebut kemudian dibandingkan terhadap batasan tegangan izin dan defleksi izin sebagai batasan kriteria keamanan struktur.

#### **Tahapan peluncuran gelagar**

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, metode konstruksi yang digunakan untuk peluncuran gelagar pada konstruksi Jembatan Gelagar Baja Boks Modular lintas atas sungai Cimanis adalah menggunakan tiga *mobile crane*, yang terdiri dari dua buah *mobile crane* di salah satu sisi sungai, dimana lokasi perakitan gelagar dilakukan yaitu sisi timur (Gambar 7), dan satu buah *mobile crane* lainnya di sisi barat untuk menyambut gelagar yang akan diangkat ke atas tumpuan pada abutmen jembatan. Ilustrasi penempatan *mobile crane* ini dapat dilihat pada Gambar 8.

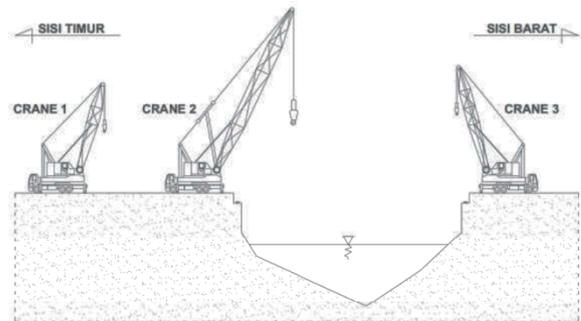
*Mobile crane* yang digunakan adalah *mobile crane* yang memiliki lengan rangka batang baja (*lattice work boom*) dengan kapasitas angkat maksimal masing-masing 45 ton untuk *crane 1* sisi timur, 160 ton untuk *crane 2* sisi timur, dan 45 ton untuk *crane 3* di sisi barat sungai. Dengan keterbatasan ruang kerja dan manuver putaran lengan *mobile crane*, maka diperlukan perencanaan tahapan peluncuran gelagar yang

dapat dilakukan dengan lancar dan aman terhadap kriteria kekuatan elemen struktur gelagar. Secara umum, tahapan peluncuran gelagar meliputi pengangkatan satu gelagar ke atas tumpuan, kemudian gelagar kedua, dan hingga pengecoran lantai jembatan.

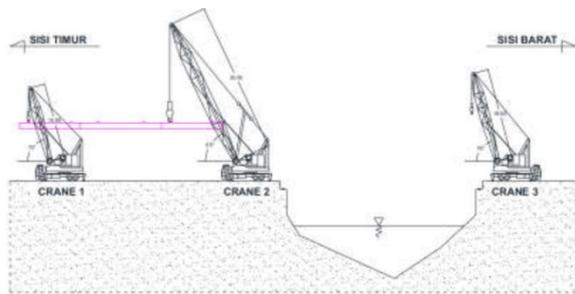
Tahapan peluncuran gelagar yang digunakan terdiri tahap delapan tahap. Pertama, *crane 1* dan *crane 2* mengangkat gelagar pertama dari lokasi perakitan di sisi timur secara vertikal. Kedua, *crane 1* dan *crane 2* memindahkan gelagar pertama yang diangkat tadi ke arah barat hingga berada di dekat jangkauan *crane 3*. Ketiga, *crane 1* maju hingga kabel penggantung dari *crane 3* di sisi barat dapat dipasang pada gelagar pertama. Pada transisi antara tahap kedua dan ketiga, seorang pekerja berada di atas gelagar, tentunya dengan memenuhi kaidah keselamatan dan keamanan kerja. Kemudian pekerja tersebut menyambut kabel penggantung dari *crane 3* di sisi barat dan menghubungkannya dengan *lug* pada gelagar. Setelah itu, pekerja tersebut turun ke sisi timur kembali.



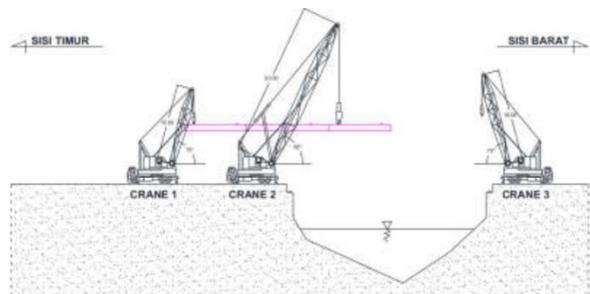
**Gambar 7.** Lokasi perakitan gelagar (sisi timur Sungai Cimanis) (Pusjatan 2016a)



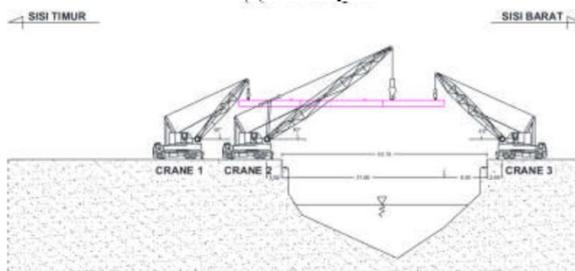
**Gambar 8.** Ilustrasi penempatan *mobile crane* (Pusjatan 2016a)



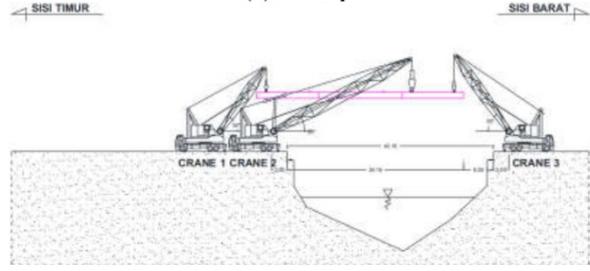
(a) Tahap 1



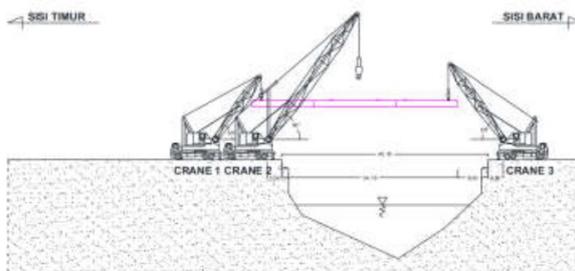
(b) Tahap 2



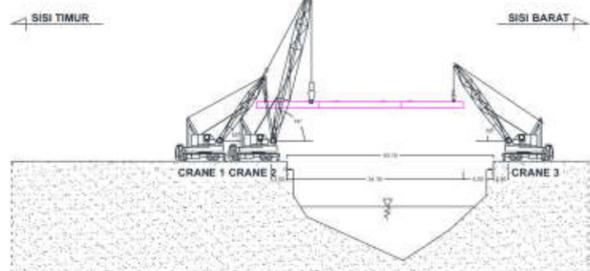
(c) Tahap 3



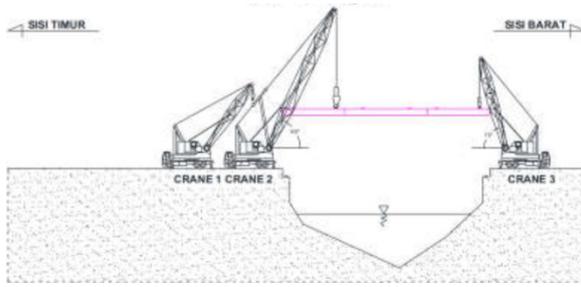
(d) Tahap 4



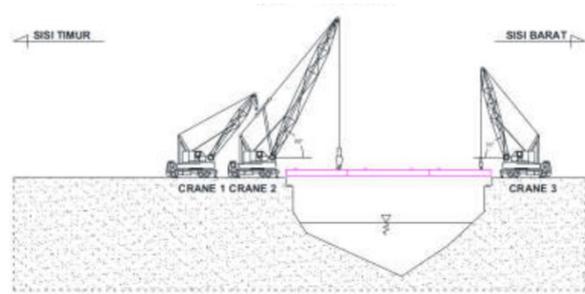
(e) Tahap 5



(f) Tahap 6



(g) Tahap 7



(h) Tahap 8

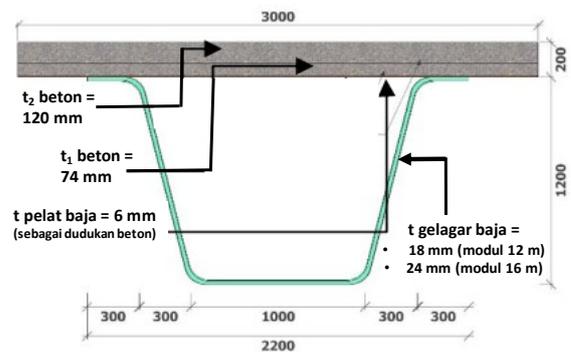
**Gambar 9.** Tahapan peluncuran gelagar boks baja modular (Pusjatan 2016a)

Keempat, *crane 1* maju dan lengan *crane 2* diturunkan, sedangkan lengan *crane 1* dan lengan *crane 3* diangkat. Kelima, kabel penggantung *crane 2* dilepas, sehingga yang memikul gelagar hanya *crane 1* dan *crane 3*. Keenam, pasang kabel penggantung *crane 2* pada kupingan modul gelagar paling timur. Ketujuh, lepaskan kabel penggantung *crane 1*, sehingga yang memikul gelagar hanya *crane 2* dan *crane 3*. Terakhir, turunkan gelagar ke tumpuan dengan mengulur kabel penggantung *crane 2* dan *crane 3*.

Tahapan peluncuran gelagar ini digunakan sebagai dasar dalam pembuatan model dengan posisi titik kabel penggantung *crane* menggambarkan lokasi tumpuan vertikal dari elemen gelagar. Ilustrasi dari seluruh tahapan peluncuran gelagar yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 9.

### Model FEM pada masing-masing tahapan peluncuran

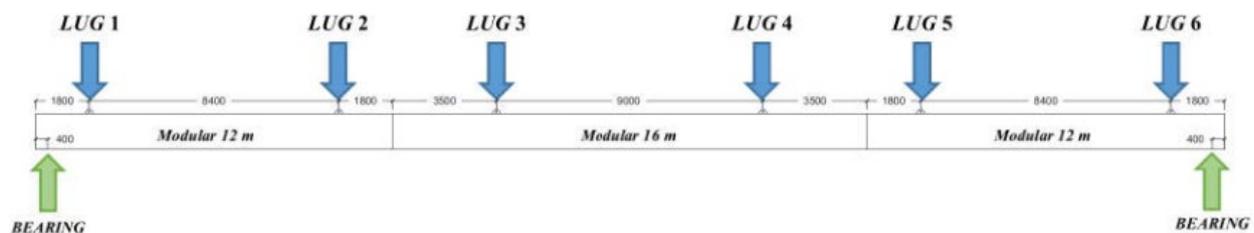
Untuk kebutuhan analisis setiap tahapan, diperlukan pembuatan model gelagar boks baja modular yang sudah dirakit dari modul 12 m, 16 m, dan 12 m menjadi satu kesatuan panjang 40 m. Model elemen gelagar ini dibuat menggunakan piranti lunak Midas Civil. Setiap tahapan yang sudah direncanakan, dimulai dari pengangkatan gelagar dari lokasi perakitan dengan dua *crane* sisi timur, kemudian diangkat ke lokasi atas sungai, hingga ditransfer ke *crane 3* di sisi barat, sampai penurunan gelagar ke atas tumpuan pada abutmen jembatan, perlu dianalisis dampaknya terhadap elemen struktur gelagar. Dalam hal ini, parameter yang diamati adalah tegangan elemen terhadap kondisi tahapan peluncuran gelagar.



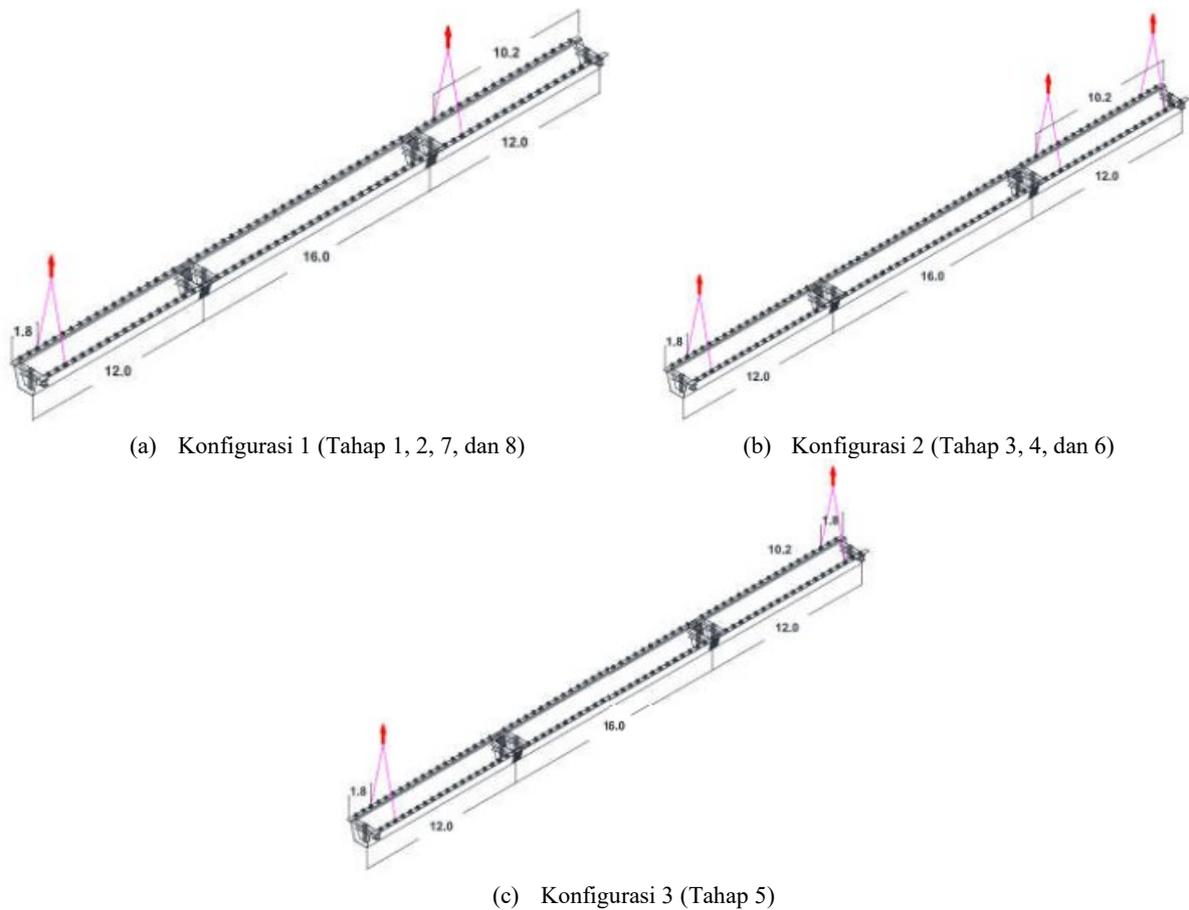
**Gambar 10.** Penampang elemen gelagar boks baja modular (Hee 2016)

Untuk parameter elemen struktur gelagar yang digunakan adalah sesuai mutu baja HSB500, yaitu kuat leleh 380 MPa dan kuattarik ultimit 500 MPa. Sedangkan dimensi gelagar yang dibuat modelnya adalah berbentuk trapesium dengan lebar atas 2200 mm, lebar bawah 1000 mm, tinggi 1200 mm, dan tebal pelat 18 mm untuk modul 12 m dan tebal pelat 24 mm untuk modul 16 m. Model dibuat sesuai tahapan pelaksanaan pekerjaan peluncuran jembatan, dimulai dari pengangkatan satu gelagar ke atas tumpuan, kemudian gelagar kedua, dan hingga pengecoran lantai jembatan. Detail penampang yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 10.

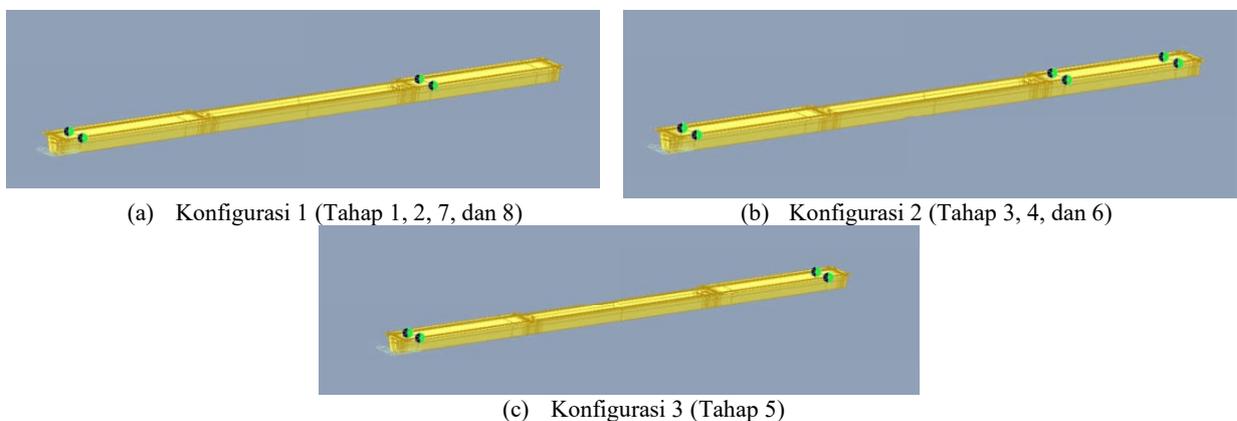
Dari tahapan pembuatan model struktur, dilanjutkan dengan analisis model struktur tersebut terhadap tahapan peluncuran gelagar, dengan memperhatikan perpindahan lokasi tumpuan terhadap gantungan *crane*, yaitu bagian kupingan pada gelagar. Kapasitas kupingan juga perlu diperhatikan dalam analisis ini, untuk mengantisipasi tahapan peluncuran mana yang merupakan tahap kritis.



**Gambar 11.** Lokasi titik kabel penggantung pada gelagar boks baja modular (tampak samping) (Pusjatan 2016a)



**Gambar 12.** Konfigurasi tumpuan gelagar berdasarkan lokasi titik kabel penggantung (Pusjatan 2016a)



**Gambar 13.** Model struktur elemen gelagar, dibuat dengan Midas Civil (Pusjatan 2016a)

Selain itu, tentu saja tegangan yang terjadi pada elemen gelagar pada setiap tahapan peluncuran gelagar diamati untuk dievaluasi terhadap kapasitas tegangan yang diizinkan sesuai mutu baja yang digunakan. Selain itu, defleksi vertikal yang terjadi pada tahapan konstruksi juga tidak melebihi defleksi izin. Adapun defleksi yang diizinkan adalah  $L/800$  sesuai batasan defleksi izin layan pada RSNI T-03-2005 Standar Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan (Indonesia 2005). Sedangkan reaksi tumpuan titik gantung crane berupa *lug* perlu diperiksa terhadap kapasitas tarik

dari *lug* tersebut. Metode konstruksi yang digunakan harus memenuhi kriteria keamanan terhadap kapasitas elemen-elemen tersebut.

Pada tahapan peluncuran gelagar, yang digambarkan pada Gambar 9, terdapat beberapa konfigurasi lokasi titik gantung kabel dari *mobile crane*. Masing-masing modul gelagar memiliki empat titik kupingan untuk kabel penggantung (*lug*), dengan dua buah di masing-masing sisi gelagar seperti dapat dilihat pada Gambar 11. Dari delapan tahapan peluncuran, lokasi titik gantung hanya berubah dua kali, sehingga konfigurasi titik

gantung hanya ada tiga, seperti dapat dilihat pada Gambar 12. Lokasi titik gantung ini merupakan lokasi tumpuan arah vertikal model gelagar yang akan dianalisis. Berdasarkan data penampang dan material baja yang digunakan juga lokasi tumpuan vertikal dari konfigurasi titik gantung pada Gambar 12, dapat dibuat model tiap konfigurasi yang dapat dilihat pada Gambar 13.

Pada konfigurasi pertama, sesuai kondisi titik gantung pada Gambar 13 (a), pada tahap 1 dan 2, titik gantung berada pada *lug 1* dan *lug 5*, kemudian pada tahap 7 dan tahap 8, titik gantung berada pada *lug 2* dan *lug 6*. Karena secara struktur, gelagar ini sifatnya simetris untuk kedua sisi, kombinasi tumpuan titik gantung ini dapat dikelompokkan dalam konfigurasi pada model yang sama. Begitu juga untuk konfigurasi kedua dan ketiga, dimana titik gantung *crane* pada gelagar simetris sehingga dapat dikelompokkan dalam konfigurasi pada model yang sama, seperti yang digambarkan pada Gambar 13.

## HASIL DAN ANALISIS

### Respons struktur pada masing-masing tahapan peluncuran gelagar

Dari analisis struktur terhadap ketiga konfigurasi lokasi titik gantung *crane* sesuai Gambar 12, dihasilkan data respons struktur berupa reaksi tumpuan yang menggambarkan gaya yang bekerja pada kupingan titik gantung gelagar, tegangan maksimum dan defleksi vertikal yang terjadi pada gelagar. Untuk respons berupa reaksi tumpuan pada titik gantung gelagar untuk ketiga konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 14 dan Tabel 1. Sedangkan untuk respons berupa distribusi kontur tegangan efektif (von Mises) pada elemen gelagar untuk semua konfigurasi, dapat dilihat pada Gambar 15. Terakhir, respons distribusi kontur defleksi vertikal yang terjadi pada gelagar dapat dilihat pada Gambar 16.

Pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa pada tahap 1 dan 2, gaya reaksi yang terjadi pada *lug 1* yang dipikul oleh *crane 1* lebih kecil dibandingkan gaya reaksi pada *lug 5* yang dipikul oleh *crane 2*. Begitupun pada tahapan selanjutnya, gaya yang dipikul oleh *crane 2* relatif lebih besar dengan jangkauan lengan yang harus cukup jauh, sehingga diperlukan kapasitas *crane 2* yang cukup besar. Sedangkan untuk respons berupa distribusi kontur tegangan efektif (von Mises) pada elemen gelagar untuk semua konfigurasi, seperti dapat dilihat pada Gambar 15, tegangan terbesar terjadi di sekitar titik pengangkatan. Hal ini terjadi karena gaya reaksi akibat berat sendiri gelagar

terkonsentrasi pada titik pengangkatan, yang besarnya sesuai respons reaksi perletakan pada Tabel 1. Besaran tegangan ini perlu diperiksa terhadap batasan tegangan izin dari material gelagar dan juga kekuatan dari kupingan lokasi titik pengangkatan, dimana tegangan terbesar berada di sekitar lokasi kupingan tersebut dan akan diuraikan pada bagian Pembahasan.

Kemudian, seperti dapat dilihat pada Gambar 16 defleksi vertikal terbesar yang terjadi pada gelagar terjadi pada daerah di antara dua tumpuan pengangkatan, yaitu di sekitar setengah jarak antara dua titik pengangkatan gelagar. Besaran defleksi ini akan diperiksa terhadap batasan defleksi izin  $L/800$  sesuai RSNI T-03-2005 Standar Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan (Indonesia 2005), yang berarti defleksi terbesar yang diizinkan untuk panjang bentang 40 m adalah 50 mm.

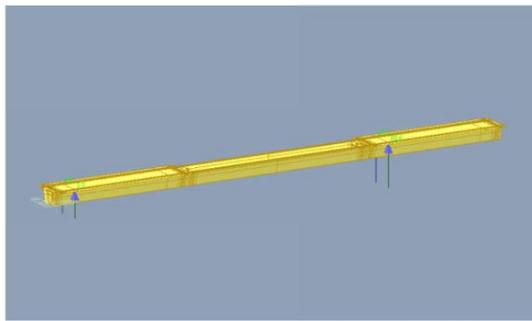
**Tabel 1.** Respons struktur berupa reaksi tumpuan pada titik gantung gelagar (dalam tonf)

Tahap ke-	Reaksi yang bekerja pada satu <i>Lug</i> (tonf)					
	<i>Lug 1</i>	<i>Lug 2</i>	<i>Lug 3</i>	<i>Lug 4</i>	<i>Lug 5</i>	<i>Lug 6</i>
1	5,75	-	-	-	10,65	-
2	5,75	-	-	-	10,65	-
3	6,10	-	-	-	9,05	1,25
4	6,10	-	-	-	9,05	1,25
5	8,20	-	-	-	-	8,20
6	1,25	9,05	-	-	-	6,10
7	-	10,65	-	-	-	5,75
8	-	10,65	-	-	-	5,75

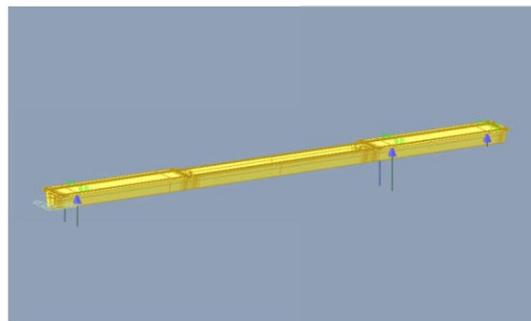
Sumber: (Pusjatan 2016a)

### Kapasitas *crane* pada tahapan peluncuran

Kapasitas *mobile crane* untuk memikul beban vertikal pada dasarnya sangat ditentukan oleh dua parameter, yaitu sudut lengan *crane* (*boom*) dengan panjang *boom* tersebut. Dalam manual operasi suatu *mobile crane* terdapat diagram kapasitas beban *crane* untuk hubungan dengan kedua parameter tersebut. Berdasarkan tahapan peluncuran gelagar pada Gambar 9, diketahui posisi *crane*, panjang *boom*, dan sudut *boom* pada setiap tahap, sehingga dapat diketahui kapasitas angkut vertikal dari setiap *crane* pada setiap tahap. Untuk kapasitas angkut vertikal *crane* terhadap parameter sudut *boom* pada setiap tahapan peluncuran gelagar ditampilkan pada Tabel 2.



(a) Konfigurasi 1 (Tahap 1, 2, 7, dan 8)

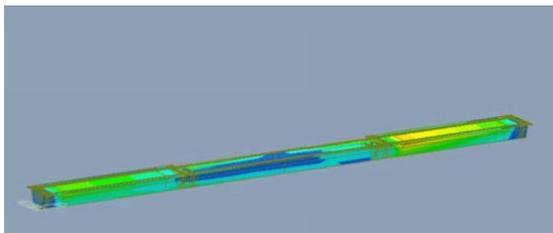


(b) Konfigurasi 2 (Tahap 3, 4, dan 6)

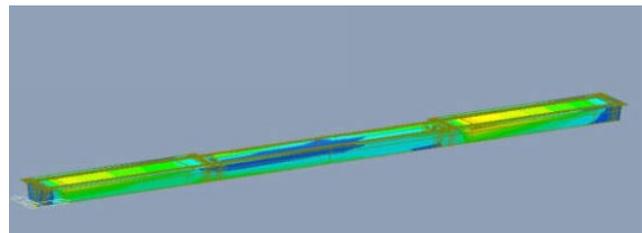


(c) Konfigurasi 3 (Tahap 5)

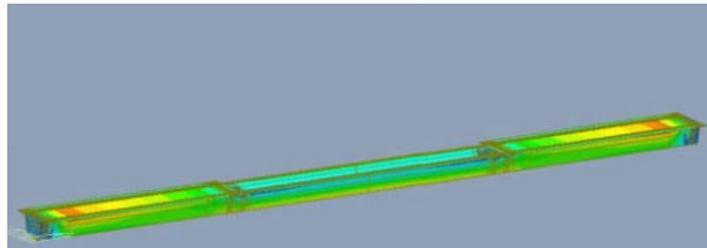
**Gambar 14.** Respons struktur berupa reaksi tumpuan pada titik gantung gelagar (Pusjatan 2016a)



(a) Konfigurasi 1 (Tahap 1, 2, 7, dan 8): 50,37 MPa

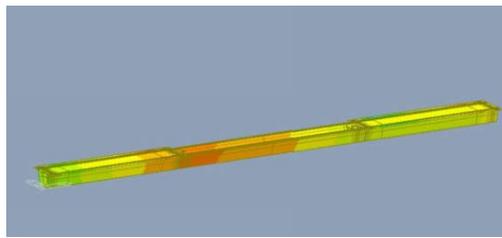


(b) Konfigurasi 2 (Tahap 3, 4, dan 6): 40,25 MPa

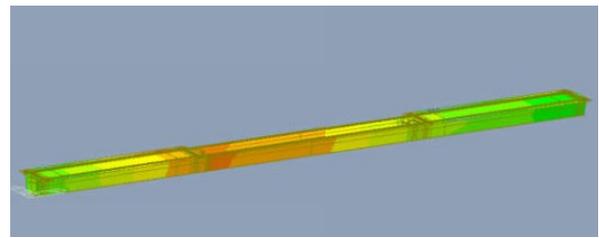


(c) Konfigurasi 3 (Tahap 5): 38,92 MPa

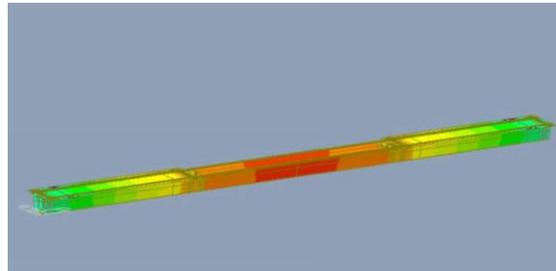
**Gambar 15.** Respons struktur berupa distribusi tegangan efektif (von Mises) pada gelagar (Pusjatan 2016a)



(a) Konfigurasi 1 (Tahap 1, 2, 7, dan 8): 7,60 mm



(b) Konfigurasi 2 (Tahap 3, 4, dan 6): 8,26 mm



(c) Konfigurasi 3 (Tahap 5): 21,98 mm

**Gambar 16.** Respons struktur berupa distribusi defleksi vertikal pada gelagar (Pusjatan 2016a)

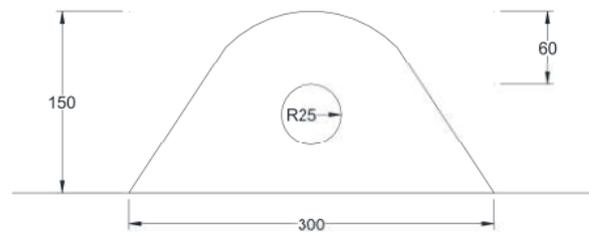
**Tabel 2.** Kapasitas *crane* terhadap sudut *boom* pada tahapan peluncuran gelagar

Tahap ke-	Sudut <i>boom</i> (°) <i>crane</i>			Kapasitas angkut (tonf) <i>crane</i>		
	1	2	3	1	2	3
1	75	65	-	25,8	80	-
2	75	65	-	25,8	80	-
3	60	40	45	18,2	16,6	12,1
4	55	28	55	18	8	18
5	55	-	55	18	-	18
6	55	78	55	18	150	18
7	-	65	75	-	80	25,8
8	-	65	75	-	80	25,8

## PEMBAHASAN

### Evaluasi kapasitas elemen gelagar pada masing-masing tahapan peluncuran

Untuk reaksi tumpuan pada titik gantung gelagar, gaya reaksi tersebut akan bekerja pada kupingan (*lug*) di lokasi tersebut berupa gaya tarik ke atas, sebelum didistribusikan sebagai gaya dalam pada seluruh gelagar. Oleh karena itu, gaya tarik tersebut perlu dicek terhadap kapasitas tarik dari *lifting lug*. Adapun dimensi dari *lug* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 17, dengan tinggi 150 mm dengan jarak tepi ke lubang 60 mm, lebar dasar 300 mm, tebal pelat kupingan 20 mm dan lubang untuk kabel penggantung dengan jari-jari 25 mm.



Catatan :  $t=20$  mm, satuan dalam mm

**Gambar 17.** Dimensi elemen kupingan/ *lug* pada gelagar boks baja modular

Berdasarkan dimensi elemen *lug* seperti dapat dilihat pada Gambar 17, dapat dihitung kapasitas elemen *lug* dalam memikul gaya tarik yang setara dengan perhitungan elemen tarik dengan sambungan baut, atau ada lubang pada elemen tarik tersebut. Perhitungan dilakukan terhadap beberapa skenario kegagalan elemen tarik yang mungkin dapat terjadi, dimana kapasitas elemen tarik diambil dari gaya terkecil yang dapat menyebabkan skenario kegagalan tertentu dapat terjadi. Dari hasil perhitungan, kegagalan yang paling menentukan adalah kondisi geser pelat dengan kapasitas gaya tarik nominal yang dapat dipikul *lug* adalah 39,47 ton.

Kemudian, berdasarkan Tabel 1, gaya tarik terbesar yang terjadi pada *lug* adalah 10,65 ton, yaitu pada *lug* nomor 2 untuk tahap 7 & 8, dan nomor 5 untuk tahap 1 & 2. Sehingga, kapasitas pengangkatan gelagar untuk tahapan peluncuran gelagar pada metode pengangkatan gelagar ini masih aman, berdasarkan gaya tarik pada *lug* dengan rasio kapasitas terhadap gaya terbesar adalah 3,71.

Untuk kapasitas elemen, gaya dalam terbesar yang terjadi pada elemen gelagar baja dari setiap tahapan konstruksi berupa tegangan efektif (von Mises) maksimum adalah 50,37 MPa seperti dapat dilihat pada Gambar 15(a), yaitu pada Konfigurasi 1 (Tahap 1, 2, 7, dan 8). Sedangkan, kapasitas leleh dari material baja yang digunakan adalah  $f_y$  380 MPa (mutu material baja HSB500). Sehingga, kapasitas pengangkatan gelagar untuk tahapan peluncuran gelagar pada metode ini masih aman, berdasarkan gaya dalam berupa tegangan efektif (von Mises) maksimum gelagar, dengan rasio kapasitas tegangan izin terhadap tegangan efektif (von Mises) terbesar adalah 7,54.

Sedangkan untuk defleksi vertikal terbesar yang terjadi pada tahapan peluncuran gelagar adalah 21,98 mm pada konfigurasi 3 (Tahap 5). Pada tahap 5, gelagar dipikul oleh *crane 1* dan *crane 3* pada *lug* terluar di masing-masing ujung, yaitu *lug 1* dan *lug 6*. Hal ini mengakibatkan jarak antar tumpuan pada gelagar yang merupakan elemen lentur, menjadi paling maksimal di antara tahapan peluncuran yang lain. Sehingga, untuk parameter defleksi vertikal yang berbanding lurus dengan panjang bentang antar tumpuan, maka defleksi vertikal yang terjadi adalah yang paling besar untuk kondisi panjang bentang antar tumpuan yang paling besar ini.

Evaluasi besaran defleksi vertikal terbesar yang terjadi pada kondisi masa konstruksi dapat dilakukan dengan membandingkan defleksi aktual tersebut dengan defleksi maksimal desain terhadap beban mati yaitu  $L/800$ , yaitu 50 mm. Defleksi vertikal terbesar pada tahapan peluncuran seperti yang dapat dilihat pada Gambar 16 adalah 21,98 mm. Maka, besaran defleksi ini masih dapat diterima, dan peluncuran gelagar dengan metode pengangkatan gelagar dengan tiga *crane* ini aman untuk dilaksanakan.

### Evaluasi kapasitas *mobile crane* pada masing-masing tahapan peluncuran

Dari analisis kapasitas *mobile crane* untuk setiap tahapan peluncuran gelagar yang dapat dilihat pada Tabel 2, dapat dibandingkan kapasitas terhadap kebutuhan gaya angkut vertikal, yaitu terhadap respons reaksi tumpuan pada lokasi titik gantung gelagar, yang dapat dilihat pada Tabel 1. Evaluasi dilakukan dengan perbandingan rasio kapasitas terhadap kebutuhan gaya untuk setiap tahapan peluncuran gelagar. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui tahapan mana yang merupakan tahapan kritis, sehingga dapat diantisipasi dengan tindakan pencegahan dan pengamanan.

**Tabel 3.** Rasio kapasitas angkut *crane* terhadap kebutuhan gaya pada titik gantung gelagar

Tahap ke-	Rasio kapasitas terhadap kebutuhan gaya pada satu <i>lug</i>					
	Lug 1	Lug 2	Lug 3	Lug 4	Lug 5	Lug 6
1	4,49	-	-	-	7,51	-
2	4,49	-	-	-	7,51	-
3	3,01	-	-	-	1,84	9,68
4	2,98	-	-	-	0,89	14,40
5	2,21	-	-	-	-	2,22
6	14,40	16,67	-	-	-	2,98
7	-	7,51	-	-	-	4,49
8	-	7,51	-	-	-	4,49

Rasio antara kapasitas *crane* terhadap kebutuhan gaya pada setiap *lug* untuk setiap tahapan peluncuran gelagar dapat dilihat pada Tabel 3. Dari tabel tersebut, kondisi yang paling kritis adalah tahap 4 dengan rasio kurang dari 1, yang merupakan peralihan dari tahap 3 dimana ketiga *crane* menurunkan gelagar sehingga *boom* menurun dan kapasitas *crane 2* mengecil karena sudut *boom* yang semakin kecil, hingga mencapai tahap 5. Pada tahap 5, kabel penggantung *crane 2* dilepaskan, sehingga hanya *crane 1* dan *crane 3* yang memikul gelagar.

Pada tahapan ke 4 ini, *crane 2* sudah memiliki sudut *boom* yang kecil sehingga kapasitas angkut vertikal dari *crane 2* semakin kecil. Sehingga, diperlukan pengamanan agar *crane 1* dan *crane 3* pada peralihan tahap 3 ke tahap 5, agar tahap 4 bisa dilakukan dengan cepat, dimana kabel gantung *crane 2* segera dilepaskan setelah kabel penggantung *crane 1* dan *crane 3* terpasang dan siap memikul gelagar. Hal ini bisa dilakukan saat kapasitas *crane 2* masih memenuhi kebutuhan gaya pada *lug 5*, atau jika diperhitungkan berdasarkan kapasitas *crane* terhadap pengaruh sudut *boom*, saat rasio  $\geq 1$ , yaitu saat sudut *boom*  $\geq 30^\circ$ .

Pada umumnya, rasio kapasitas *crane* terhadap kebutuhan gaya untuk setiap tahapan peluncuran gelagar seperti dapat dilihat pada Tabel 3 bernilai lebih dari 1, yang artinya, *crane* mampu memikul beban vertikal dari gelagar dan peluncuran gelagar dengan metode konstruksi ini dapat dilakukan. Namun, perlu diperhatikan tahapan kritis yaitu tahap 4, agar sudut *boom* dijaga untuk diturunkan perlahan sampai bisa dilakukan tahapan ke 5 dimana kabel *crane 2* dilepaskan dan gelagar dipikul oleh *crane 1* dan *crane 3*.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil analisis pada tahapan konstruksi dengan metode pengangkatan gelagar boks baja modular dengan tiga *crane* untuk jembatan lintas atas sungai ini, didapatkan tegangan efektif terbesar yang terjadi pada gelagar adalah 50,37 MPa dan defleksi vertikal terbesar adalah 21,98 mm. Besaran tegangan dan defleksi ini masih memenuhi kriteria desain jembatan ini, yaitu tegangan izin 380 MPa dan defleksi izin 50 mm.

Kemudian, rasio yang paling kritis (terkecil) dari kapasitas *lug* terhadap gaya reaksi terbesar pada kabel gantung adalah 3,71. Terakhir, rasio kapasitas angkut *mobile crane* terhadap gaya reaksi terbesar setiap posisi penggantung gelagar untuk setiap tahapan bernilai lebih dari 1, dengan tahapan 4 sebagai kondisi tahapan kritis. Penanganan yang perlu dilakukan pada tahapan 4 adalah peralihan dari tahapan 3 ke tahapan 5 yang perlahan dan menjaga sudut *boom* agar lebih dari 30 derajat agar rasio kapasitas *crane* tetap lebih dari 1. Dapat disimpulkan dari seluruh analisis terhadap setiap tahapan peluncuran gelagar, metode konstruksi ini dapat digunakan dan menjadi acuan untuk metode konstruksi jembatan gelagar boks baja modular untuk lintas atas sungai.

### Saran

Untuk konstruksi jembatan gelagar boks baja modular sebagai lintas atas sungai yang tidak memungkinkan akses untuk *crane* atau perancah di bawah lokasi rencana jembatan, dapat dilakukan dengan metode peluncuran gelagar menggunakan tiga buah *mobile crane*. Sebaiknya *mobile crane* yang digunakan memiliki panjang *boom* dan kapasitas yang lebih tinggi untuk sudut *boom* yang cukup kecil sekitar 30<sup>0</sup>, mengacu pada tahapan kritis dalam peluncuran gelagar yang diketahui pada penelitian ini, yaitu saat peralihan antara gelagar ditopang tiga *crane* hingga kabel gantung salah satu *crane* dilepas hingga gelagar menjadi ditopang oleh dua *crane*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan tim penelitian Pilot Project Jembatan Modular dari Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR. Terima kasih juga disampaikan kepada POSCO dari Korea Selatan atas bantuan berupa Gelagar Boks Baja Modular sehingga penerapan konstruksi dan penelitian terkait Jembatan Gelagar Boks Baja Modular di Indonesia ini dapat berjalan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Barth, Karl E, Gregory K Michaelson, dan Michael G Barker. 2015. "Development and Experimental Validation of Composite Press Brake – Formed Modular Steel Tub Girders for." *Journal of Bridge Engineering* 20 (11): 1–7. doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000770.
- Culmo, Michael P. 2011. "Accelerated Bridge Construction - Experience in Design, Fabrication and Erection of Prefabricated Bridge Elements and Systems (No. FHWA-HIF-12-013)." *FHWA-HIF-12-013*. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/abc/docs/abcmanual.pdf>.
- Dorka, Uwe E., dan Jörk Pruss. 2006. "Short Span Modular Composite Bridges." In *Composite Construction in Steel and Concrete V*, 87–92. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/40826(186)9.
- Handayani. 2011. "Metode Elemen Hingga." Surabaya. <http://personal.its.ac.id/files/material/>.
- Hee, Park Chan. 2016. "Modular Girder Bridge Analysis." Pohang.
- Indonesia. 2005. *RSNI T-03-2005 Standar Perencanaan Baja untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Khan, Mohiuddin Ali. 2015. "Accelerated Bridge Construction." *Accelerated Bridge Construction*. doi:10.1016/B978-0-12-407224-4.00006-X.
- Kim, Dong-hyun, Jin-woong Choi, Hyeong-yeol Kim, dan Sun-kyu Park. 2013. "An Experimental Study on Behavior of Transverse Connection Appropriate for Modular Girder Bridge." *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* 7 (5): 358–66.
- Nakamura, Shun-ichi. 2003. "Bending Behavior of Composite Girders with Cold Formed Steel U Section." *Journal of Structural Engineering* 128 (September 2002): 1169–76. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445.
- Nugraha, Widi. 2017. "Evaluasi Umur Fatik Elemen Baja Jembatan Standar Tipe Komposit Menggunakan Data WIM." *Jurnal Jalan-Jembatan* 34 (1): 21–33. <http://jurnal.pusjatan.pu.go.id/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/70>.

- Pusjatan. 2016a. "Laporan Akhir Pilot Project Jembatan Gelagar Boks Baja Modular." Bandung.
- . 2016b. "Laporan Survey Calon Lokasi Jembatan Modular." Bandung.
- Rosignoli, Marco. 2007. "Robustness and stability of launching gantries and movable shuttering systems - Lessons learned." *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)* 17 (2): 133–40. doi:10.2749/101686607780680673.
- Setiadi, Ryan R. 2015. "Nonlinearitas Geometri pada Kolom." <https://ryanrahmats.wordpress.com/2015/03/21/ppt-tentang-analisis-bukling-dengan-fem-dan-deformasi-jangka-panjang-pelat-2-arah/>.
- World Economic Forum. 2012. "The Global Competitiveness Report 2011-2012."
- . 2017. "The Global Competitiveness Report 2016-2017."