

EVALUASI PERFORMA JEMBATAN GANTUNG TIPE SUSPENDED PEJALAN KAKI DENGAN LANTAI KACA BERDASARKAN UJI PEMBEBANAN STATIS (PERFORMANCE EVALUATION OF A GLASS FLOOR SUSPENDED TYPE SUSPENSION FOOTBRIDGE BASED ON STATIC LOAD TESTING)

Widi Nugraha¹⁾, Budi Subrata²⁾, Indra Sidik Permadi³⁾, Gatot Sukmara⁴⁾, Achmad Riza Chairulloh⁵⁾, Hari Triwibowo⁶⁾, dan Umar Saripudin⁷⁾

¹⁾Institut Teknologi Bandung

^{2) 3) 5) 6) 7)}Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR

⁴⁾Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Kepulauan Riau, Kementerian PUPR

¹⁾Jl Ganesha No 10, Bandung

^{2) 3) 5) 6) 7)}Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung

⁴⁾Komplek Terpadu Kementerian PUPR, Jl. S Parman, Batam

¹⁾widi.nugraha@pu.go.id, ²⁾budisubrata@pu.go.id, ³⁾indrasidik@pu.go.id, ⁴⁾gatot.sukmara@pu.go.id, ⁵⁾riza.achmad@pu.go.id,

⁶⁾hari.triwibowo@pu.go.id, ⁷⁾umarsaripudin@pu.go.id

Diterima: 19 Januari 2023 ; direvisi: 12 Mei 2023 ; disetujui: 6 April 2023

ABSTRAK

Jembatan Kaca Bromo merupakan jembatan gantung tipe suspended dengan lantai kaca struktural yang dibangun oleh Kementerian PUPR di Kawasan Strategis Prioritas Nasional (KSPN) Taman Nasional Bromo Tengger Semeru, Jawa Timur, Indonesia. Jembatan ini dibangun untuk memberikan pengalaman yang unik bagi para pengunjung, yaitu dengan melihat pemandangan indah di sekitar gunung Bromo dari atas lantai jembatan yang transparan. Penggunaan kaca struktural sebagai lantai jembatan perlu diuji terhadap aspek keamanan dan kenyamanan dengan pengujian pembebanan pada segmen lantai kaca struktural dan struktur jembatan secara keseluruhan. Uji pembebanan bertujuan untuk mengetahui apakah jembatan mampu menahan beban yang akan dilewatinya, dalam hal ini beban pejalan kaki. Pada penelitian ini, uji pembebanan pada Jembatan Kaca Bromo dilakukan dengan beban operasional rencana, yaitu sekitar 100 orang pejalan kaki. Besaran beban tersebut dikonversi menjadi 240 buah karung pasir yang digunakan untuk uji pembebanan dengan berat masing masing karung sekitar 35 kg. Respons maksimum jembatan hasil pengukuran akibat beban uji terbesar antara lain deformasi vertikal 72.70 mm pada kondisi beban merata sepanjang bentang, gaya kabel maksimum sebesar 19.84 ton, dan tegangan frame baja sistem lantai kaca sebesar 125.96 MPa. Besaran respons struktur jembatan hasil pengukuran tersebut dapat dimodelkan dengan baik melalui model struktur yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga dapat dilakukan simulasi pembebanan yang lebih besar untuk evaluasi beban layan. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa Jembatan Kaca Bromo aman untuk digunakan dengan pembatasan beban layan hingga 400 kg/m². Selain itu, jembatan tersebut memiliki deformasi yang relatif kecil dibanding deformasi izin, sehingga memenuhi kriteria kenyamanan.

Kata kunci: jembatan gantung, tipe suspended, sistem lantai kaca struktural, uji pembebanan, lendutan.

ABSTRACT

The Glass Bridge of Bromo is a suspended type of footbridge with a structural glass floor that was built by the Ministry of Public Works and Public Housing in the Bromo Tengger Semeru National Park, East Java, Indonesia. The bridge was built to provide a unique experience for visitors by allowing them to enjoy the beautiful scenery around Mount Bromo from the transparent floor of the bridge. The use of structural glass as a bridge floor needs to be tested for safety and comfort aspects by testing the load on the structural glass floor segment and the entire bridge structure. Load testing aims to determine whether the bridge is capable of withstanding the load that will pass over it, in this case, pedestrian load. In this study, load testing was carried out on the Glass Bridge of Bromo with an operational planned load of around 100 pedestrians. The load was converted to 240 sandbags with a weight of approximately 35 kg each. The maximum bridge response due to the largest test load was a vertical deformation of 72.70 mm over the entire span, maximum cable force of 19.84 tons, and steel frame stress of the glass floor system of 125.96 MPa. The structural response due to the measured load was well-modeled using the structure model used in this study, allowing for simulation of larger loads for service load evaluation. The analysis results show that the Glass Bridge of Bromo is safe to use with a service load restriction of up to 400 kg/m². Additionally, the bridge has relatively small deformations compared to the allowable deformation, thus meeting comfort criteria.

Keywords: suspension bridge, suspended type, structural glass floor system, load testing, vertical deformation.

PENDAHULUAN

Pada tahun 2022, Kementerian PUPR menyelesaikan konstruksi Jembatan Kaca Bromo, seperti dapat dilihat pada Gambar 1, yang merupakan jembatan gantung pejalan kaki tipe *suspended* dengan lantai kaca struktural. Jembatan tipe *suspended* merupakan jembatan gantung dengan sistem lantai yang dipasang di atas kabel utama jembatan, sehingga pada arah memanjang, jembatan tipe ini memiliki pelat lantai yang cekung, mengikuti lengkungan *catenary* dari kabel. Sistem ini digunakan karena di lokasi dibangunnya Jembatan Kaca Bromo, kondisi kedua sisi tumpuan jembatan berada di elevasi yang cukup tinggi, sehingga dengan menggunakan sistem *suspended*, kondisi seperti ini bisa dimanfaatkan dan secara sistem struktur tidak memerlukan pilon seperti jembatan gantung pada umumnya. Jembatan Kaca Bromo ini dibangun di Seruni Point yang terletak di Kawasan Taman Nasional Bromo Tengger Semeru, Provinsi Jawa Timur, yang merupakan salah satu Kawasan Strategis Prioritas Nasional (KSPN). Tujuannya adalah untuk memberikan pengalaman yang unik bagi para pengunjung, yaitu dengan melihat pemandangan indah di sekitar gunung Bromo dari atas jembatan dengan lantai kaca yang transparan.

Kaca merupakan salah satu material yang memiliki karakteristik estetik dan transparan, sehingga mulai banyak digunakan sebagai material pemikul beban struktural pada lantai bangunan dan jembatan (Pariafsai 2016). Contoh dari penggunaan kaca pada bangunan dan jembatan yang terkenal adalah Glacier Skywalk di Kanada dan Skydeck Chicago di Amerika Serikat. Di Tiongkok, terdapat setidaknya enam belas jembatan yang menggunakan sistem lantai kaca sebagai pemikul beban, salah satunya adalah Jembatan Grand Canyon Zhangjiajie (Gong et al. 2021). Serupa dengan Jembatan Kaca Bromo, seperti dapat dilihat pada Gambar 2, Jembatan Grand Canyon Zhangjiajie yang dibangun di kawasan pariwisata Provinsi Hunan, memiliki panjang bentang 430 meter dan lebar 6 meter, memanfaatkan karakteristik kaca yang estetik dan transparan pada elemennya untuk memberikan pengalaman yang unik bagi para pengunjung, sekaligus meningkatkan daya tarik kawasan wisata tersebut (Ma, Guo, and Sun 2017).

Perkembangan teknologi laminasi kaca telah memungkinkan penggunaan kaca sebagai material lantai yang kuat dan tahan lama. Kaca laminasi terdiri dari beberapa lapisan kaca yang ditempelkan satu sama lain dengan material perekat, seperti *polyvinil butyral* (PVB) atau *sentryglas plus* (SGP). Teknologi laminasi memungkinkan lapisan interlayer maupun lapisan kaca berikutnya masih dapat bertahan jika terjadi kehancuran pada salah satu lapisan kaca, sehingga memberikan sifat kegagalan *ductile* yang tidak terjadi secara tiba-tiba (Luo and Wang 2017). Dalam hal ini, kaca laminasi dipandang sebagai material yang sangat kuat dan tahan lama.

Keunggulan kaca laminasi tidak hanya terletak pada sifat kekuatannya, namun juga pada sifat visualnya. Kaca laminasi masih transparan dan estetik, sehingga penggunaannya untuk tujuan estetika struktur menjadi sangat menarik. Selain itu, lantai kaca struktural dianggap sebagai material yang ramah lingkungan karena tidak memerlukan perawatan khusus seperti lantai baja yang perlu dicat ulang agar terhindar dari korosi atau lantai kayu yang akan lapuk akibat pengaruh cuaca dan usia (Ma, Guo, and Sun 2017). Oleh karena itu, penggunaan kaca laminasi sebagai material lantai struktural semakin banyak diminati dan diaplikasikan dalam proyek-proyek bangunan dan jembatan modern.



Gambar 1. Jembatan Kaca Bromo



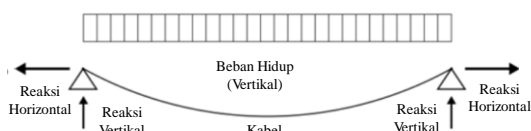
Gambar 2. Jembatan Kaca Zhangjiajie Grand Canyon (Haim Dotan Ltd. 2022)

Sistem struktur lantai kaca berikut pagar dipasang pada fase kedua dalam tahapan konstruksi Jembatan gantung dengan lantai kaca, yaitu setelah kabel dan *frame* lantai dipasang. Lantai kaca diperhitungkan sebagai beban mati tambahan dan tidak diperhitungkan dalam desain distribusi beban, sehingga gelagar melintang yang dibutuhkan lebih besar dibanding jembatan gantung dengan sistem lantai konvensional (Ma, Guo, and Sun 2017).

Penggunaan kaca sebagai material pemikul beban secara struktural pada jembatan menimbulkan tantangan tersendiri dalam hal keamanan dan kenyamanan. Oleh karena itu, uji pembebanan pada jembatan perlu dilakukan dengan lantai kaca sebelum dibuka untuk umum, untuk memastikan keamanan dan kenyamanan pengunjung. Pada penelitian ini, akan dilakukan uji pembebanan pada Jembatan Kaca Bromo dengan menambahkan beban yang sebanding dengan beban yang akan dilewatinya pada masa operasional, yaitu sekitar 100 orang pejalan kaki. Respons jembatan akibat beban tersebut akan diamati dan diukur sehingga dapat dilakukan evaluasi Jembatan Kaca Bromo terhadap kriteria keamanan dan kenyamanan untuk memastikan kondisi jembatan layak untuk beroperasi.

Perencanaan Jembatan Kaca Bromo

Jembatan Kaca Bromo direncanakan sebagai jembatan pariwisata dengan kategori jembatan gantung kelas 2 (untuk pejalan kaki dan sepeda motor). Adapun besaran beban desain dan lendutan izin untuk jembatan gantung kelas 2 ini diatur dalam Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 02/SE/M/2010 tentang Pemberlakuan Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung Untuk Pejalan Kaki (Kementerian Pekerjaan Umum 2010). Berikut pada Tabel 1 merupakan kriteria teknis yang digunakan dalam perencanaan Jembatan Kaca Bromo.



Gambar 3. Respons transfer gaya jembatan gantung tipe *suspended*

Jembatan Kaca Bromo secara prinsip merupakan jembatan gantung tipe *suspended* dengan elemen kabel sebagai elemen struktur utama pemikul beban. Sistem lantai langsung

dipasang di atas kabel *walkway* sehingga transfer beban dari lantai terjadi langsung pada *frame* pemikul lantai kemudian pada kabel utama yang berlokasi di samping kiri kanan lantai. Kemudian transfer beban terjadi pada pylon di kedua sisi jembatan, selanjutnya kabel *backstay* dan di angkur pada blok angkur di sisi paling ujung dari struktur jembatan. Secara sederhana, proses transfer beban pada jembatan tipe *suspended* digambarkan pada **Gambar 3**. Sebagai gambaran, pada Gambar 4 ditampilkan tampak atas desain Jembatan Kaca Bromo.

Tabel 1. Kriteria Teknis Jembatan Kaca Bromo

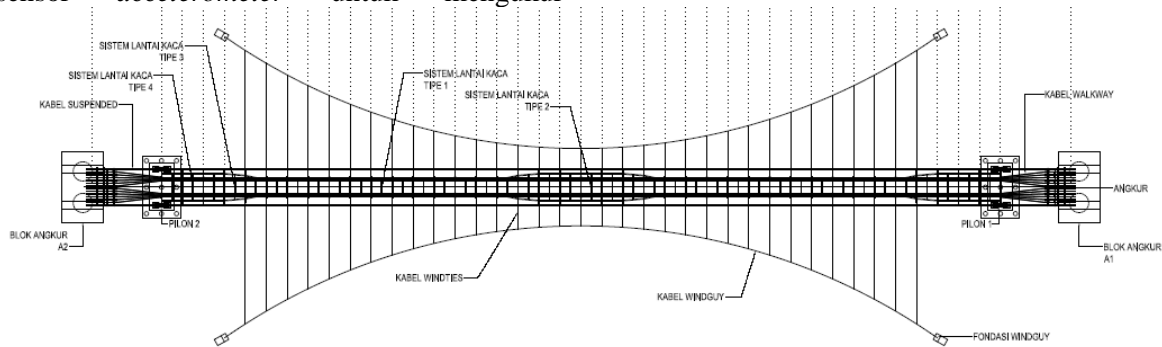
Parameter	Keterangan
Penggunaan	Jembatan gantung pejalan kaki kelas II Penggunaan dibatasi untuk pejalan kaki saja
Tipe Jembatan	<i>Suspended-cable</i>
Lebar	1.8 m
Panjang bentang (m)	120 m
Clearance (m)	>80 m
Tipe <i>fondasi</i>	Tiang bor dan sumuran
Material kaca lantai	Kaca pengaman berlapis (<i>Laminated Glass</i>) terdiri dari dua lembar kaca atau lebih, direkatkan satu sama lain dengan lapisan laminasi (<i>interlayer</i>) Sentryglas Plus (SGP). Kapasitas hingga 1500 kPa
Beban desain	Beban Merata 5 kPa
Lendutan izin	L/100
Properties elemen struktur	
- Kabel utama	<i>Wire rope</i> tipe <i>Independent Wire Rope Core</i> (IWRC) kuat tarik 1770 MPa diameter 44 mm
- Beton struktural (abutmen dan pile cap)	f'_c 30 MPa
- Baja struktural (<i>frame</i> lantai dan pagar)	f_y 250 MPa
- Baja tulangan	$D < 13$ mm: f_y 240 MPa $D \geq 13$ mm: f_y 400 MPa
- Baut	f_y 830 MPa
- Las	490 MPa

Uji pembebanan pada jembatan

Pada jembatan yang akan dioperasikan, uji pembebanan lazim dilakukan sebagai tahapan pengujian tanpa merusak (*non destructive test*) untuk mengetahui performa jembatan aktual terhadap simulasi pembebanan desain maupun

operasional (Nugraha et al. 2017). Fungsi utama dari pengujian beban adalah untuk meyakinkan bahwa jembatan layak dan aman untuk digunakan oleh khalayak publik (Alampalli et al. 2021). Adapun jenis sensor yang akan digunakan untuk uji beban ini adalah sensor *strain gage* untuk mengukur tegangan elemen struktur, sensor *accelerometer* untuk mengukur

percepatan yang terjadi pada elemen struktur yang dapat diolah untuk menghitung frekuensi natural jembatan dan tegangan elemen kabel, dan alat survei seperti Total Station untuk mengukur posisi titik yang diamati deformasi akibat beban yang diberikan (Alampalli et al. 2021).



Gambar 4. Tampak atas Desain Jembatan Kaca Bromo

Sebelum dilakukan uji pembebanan, perlu dilakukan persiapan berupa perencanaan tahapan uji pembebanan, perencanaan lokasi *marking* titik pengukuran deformasi, berikut juga *benchmark* atau titik acuan yang digunakan, dan perencanaan lokasi pemasangan sensor *strain gage* dan *accelerometer* pada elemen struktur yang diamati (Faber, Val, and Stewart 2000). Selain itu, penentuan besaran, skema penempatan beban uji, dan jenis beban uji juga perlu dilakukan, dan kemudian dilakukan simulasi uji pembebanan pada pemodelan struktur, dan penentuan batasan parameter uji berupa tegangan dan lendutan di batas yang masih berada di bawah kriteria batasan kekuatan dan kenyamanan dari struktur (Nugraha et al. 2017)

Evaluasi beban layan izin

Dalam uji pembebanan, dapat diketahui besaran dan konfigurasi beban yang dapat menyebabkan kondisi dimana tegangan elemen dan lendutan sistem struktur maksimal sehingga beban layan izin dapat dievaluasi (Cai et al. 2012). Perilaku dan respons dari struktur jembatan terhadap beban dapat diketahui dari uji pembebanan (Hou and Lynch 2006). Untuk mendapatkan nilai beban layan izin, diperlukan model struktur jembatan yang sesuai dengan kondisi dan perilaku jembatan sesungguhnya akibat pemberian beban (Lantsoght et al. 2017).

Besaran beban uji dan konfigurasi pembebanan yang digunakan dalam uji

pembebanan dapat diterapkan pada model struktur jembatan, untuk kemudian yang didapatkan perilaku jembatan berupa respons struktur seperti frekuensi natural jembatan, deformasi dan gaya dalam efek dari beban. Hasil pengukuran kondisi aktual jembatan pada uji beban perlu digunakan untuk penyesuaian model struktur jembatan agar menghasilkan respons yang mendekati kondisi aktual (Hester et al. 2017). Kemudian simulasi beban hingga beban maksimal dapat dilakukan sehingga dapat dihitung besaran beban yang masih aman terhadap kriteria kekuatan struktur dan kriteria kenyamanan jembatan.

HIPOTESIS

Perilaku struktur Jembatan Kaca Bromo dapat diprediksi dengan menggunakan model FEM yang telah disesuaikan dengan respons struktur jembatan terhadap uji pembebanan. Dengan demikian, evaluasi terhadap beban rencana dapat diproyeksikan untuk memastikan bahwa aspek keamanan dan kenyamanan jembatan sesuai dengan kriteria perencanaan.

METODOLOGI

Dalam penelitian ini akan digunakan metode penelitian eksperimental terbatas dengan melakukan pengidentifikasian respon struktur statis dan dinamis jembatan dengan hasil penerapan beban yang terukur pada struktur

jembatan gantung tipe *suspended* dengan sistem lantai kaca struktural. Pengukuran respon struktur dilakukan dengan menggunakan sensor-sensor yang dapat mengukur besaran kuantitatif dengan beberapa teknik pengukuran. Pertama-tama, akan dilakukan uji pembebanan pada jembatan yang terdiri atas kegiatan perencanaan beban uji dan konfigurasi pembebanan, penempatan titik pengamatan deformasi dan sensor, uji pembebanan sesuai rencana konfigurasi pembebanan dan besaran beban uji, dan kemudian dilakukan analisis.

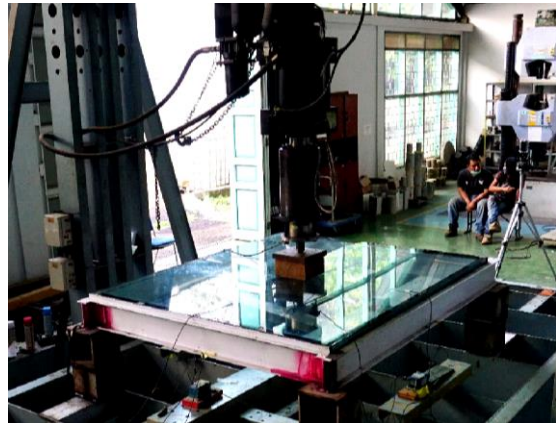
Selanjutnya, dilakukan evaluasi beban layan izin, terdiri dari atas penyesuaian pemodelan terhadap perilaku jembatan aktual pada uji beban. Proyeksi simulasi penambahan beban pada model dilakukan hingga mencapai batasan kriteria keamanan dan kenyamanan struktur, yang disebut beban layan izin.

Uji pembebanan jembatan

Sebelum melakukan uji pembebanan di lapangan, dilakukan pengujian terhadap sistem lantai kaca yang digunakan untuk Jembatan Kaca Bromo di laboratorium. Pengujian yang dilakukan adalah uji beban merata dan uji beban titik (*point load*). Fungsi dari uji beban terhadap panel sistem lantai kaca struktural ini adalah untuk menguji kemampuan sistem lantai kaca akibat beban rencana dan mengukur beban terbesar yang masih dapat dipikul oleh sistem lantai kaca hingga mengalami kerusakan.

Untuk pengujian beban merata, metode yang digunakan adalah menggunakan simulasi beban pejalan kaki merata berupa beban orang sedemikian sehingga mencapai beban rencana yaitu 500 kg/m^2 yang terdistribusi merata seluas panel lantai jembatan yaitu $1,8 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$, kemudian pada tahapan berikutnya beban ditingkatkan menjadi 1250 kg/m^2 yang didistribusikan secara merata pada luasan panel lantai. Pengujian beban titik (*point load*) dilakukan dengan pemberian beban dari aktuator dengan bidang kontak $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ untuk mensimulasikan kondisi ekstrim jika beban pejalan kaki terkonsentrasi di salah satu titik segmen lantai jembatan, seperti dapat dilihat pada Gambar 5. Adapun beban diberikan secara bertahap, melewati beban rencana ekuivalen, yaitu $1,39 \text{ ton}$ (500 kg/m^2 dikali luasan panel lantai $1,5 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$), kemudian terus ditambah hingga kedua lapis kaca mengalami kerusakan

sehingga didapatkan besaran beban titik maksimal hasil pengujian.



Gambar 5. Pengujian *point load* pada sistem lantai kaca struktural

Beban uji yang digunakan adalah 240 buah karung berisi pasir dengan berat setiap karung adalah sebesar 35 kg dengan penempatan seperti dapat dilihat pada Gambar 6. Jumlah beban karung pasir yang digunakan berdasarkan perhitungan setara dengan 10% beban rencana 5 kPa, yaitu total sekitar 8400 kg. Sehingga didapatkan jumlah karung pasir untuk total panjang jembatan adalah 240 buah karung pasir.

Pengambilan besaran beban uji ini dimaksudkan untuk menggambarkan rencana beban operasional yaitu sekitar 100 orang. Selain itu, besaran beban yang lebih kecil dari beban rencana dipilih agar uji pembebanan dapat berjalan sesuai prinsip pengujian tidak merusak (*non-destructive test*) dan struktur masih berperilaku linear setelah uji pembebanan selesai (Hou and Lynch 2006). Sebuah model struktur yang telah disesuaikan dengan hasil uji pembebanan, dapat digunakan untuk simulasi pembebanan maksimum (Alampalli et al. 2021).



Gambar 6. Pembebanan karung pada Uji beban statis Jembatan Kaca Bromo

Respon tegangan statis diperoleh dengan menempatkan *sensor strain gauge* pada elemen

balok sistem pemikul lantai yang terhubung pada *data logger* sebagai perekam data, tegangan pada kabel *backstay* jembatan saat jembatan diberikan beban uji, diperoleh dengan mengukur frekuensi getar saat jembatan diberikan beban uji dengan alat *accelerometer*, massa kabel *backstay* dengan menghitung dimensi dan berat jenis baja kabel, dan juga panjang kabel *backstay*, kemudian pengukuran deformasi jembatan menggunakan alat *total station* yang mengukur perubahan koordinat dari beberapa titik acuan pada struktur jembatan akibat beban uji (Alampalli et al. 2021).

Pada uji pembebanan statis, penempatan beban pada lantai jembatan dilakukan secara bertahap dan perlahan untuk meminimalisasi efek dinamis pada jembatan dan juga kerusakan pada permukaan lantai kaca. Adapun tahapan penempatan beban untuk uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo terdiri atas enam tahapan, termasuk kondisi awal tanpa beban dan kondisi pengosongan beban (*unloading*), seperti ditampilkan pada Tabel 2.

Tahapan beban pertama adalah sebesar 5600 kg, dengan jumlah 160 karung yang ditempatkan merata sepanjang bentang jembatan. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, beban berupa karung pasir yang digunakan memiliki berat 35 kg untuk setiap karung. Kemudian pada tahap kedua diberikan beban 8400 kg, dengan jumlah 240 karung pasir, dimana dilakukan penambahan 80 karung dari tahap pembebanan pertama, penambahan karung ditempatkan di tengah bentang dan disusun merata pada kedua sisi lantai jembatan, seperti terlihat pada Gambar 6. Tahapan pembebanan ketiga yaitu beban *unbalance*, total beban 2800 kg yang terdiri atas 80 karung pasir ditempatkan pada setengah bentang utama jembatan untuk memeriksa respons jembatan akibat efek beban *unbalance*, dan kemudian pembebanan tahap terakhir yaitu beban *unbalance* satu sisi sebesar 1400 kg, beban 40 karung isi pasir hanya diberikan pada setengah bentang utama jembatan dan di satu sisi lantai untuk memeriksa respons jembatan akibat efek torsi beban *unbalance*.



Gambar 7. Pengujian frekuensi getar kabel *backstay* dengan *trigger* getaran *impact hammer*



Gambar 8. Uji getar Jembatan Kaca Bromo dengan *trigger* orang berjalan kaki

Jembatan ini merupakan jembatan bertipe *suspended-cable* sehingga parameter deformasi adalah parameter yang paling penting untuk diamati. Titik pengamatan deformasi ditandai dengan *sticker* khusus yang ditempatkan pada *frame* lantai setiap dua segmen lantai (jarak antar pengamatan setiap 6 m). Sedangkan sensor *strain gauge* dipasang pada flens bawah pada batang melintang dan memanjang pada salah satu segmen sistem *frame* penyangga lantai. Kemudian untuk mengukur tegangan kabel *backstay*, dipasang sensor *accelerometer* pada enam kabel *backstay* untuk mengukur tegangan kabel pada setiap tahapan pembebanan uji. Untuk dapat mengukur getaran natural kabel, dilakukan *trigger* getaran dengan memukul semua kabel yang diukur bergantian menggunakan *impact hammer* seperti terlihat pada Gambar 7 setiap tahapan pengujian. Adapun titik pengamatan deformasi dan juga skema penempatan sensor untuk uji beban ini dapat dilihat pada Gambar 9.

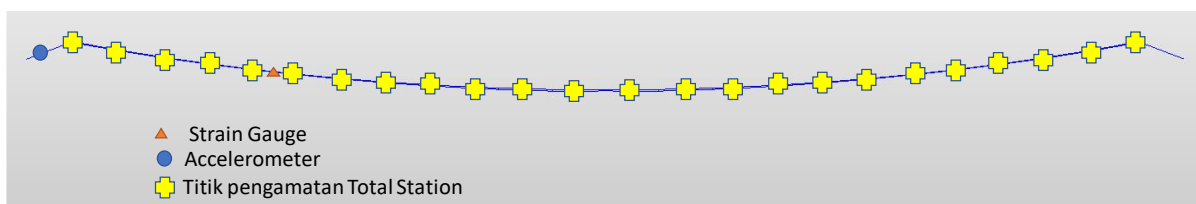
Untuk mendapatkan parameter tambahan dalam rangka memudahkan penyesuaian model dengan kondisi aktual jembatan, dalam uji pembebanan dilakukan pula uji getar jembatan. Uji getar jembatan ini dilakukan dengan

memberikan *trigger* berupa getaran akibat tiga orang berjalan kaki berdampingan melintasi jembatan seperti terlihat pada Gambar 7, sehingga jembatan bergetar secara natural setelah *trigger* tersebut melintas. Pada kondisi getaran bebas jembatan tersebut respons percepatan jembatan direkam dengan menggunakan sensor *accelerometer*. Kemudian pada rekaman getaran bebas tersebut dilakukan pengolahan sinyal berupa *Fast Fourier Transform* (FFT) sehingga didapatkan frekuensi natural jembatan. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan beberapa sensor *accelerometer* yang terhubung dengan sebuah *data logger* sebagai perekam data.

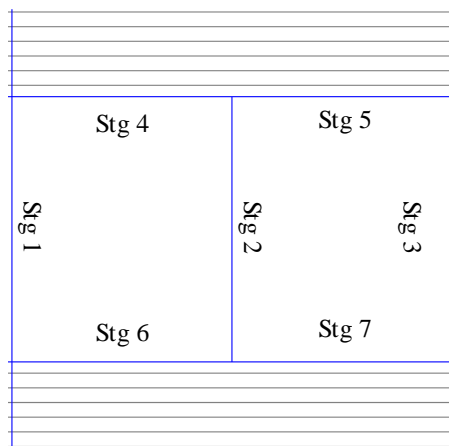
Pemodelan dan analisis struktur jembatan

Untuk digunakan dalam prediksi respons struktur jembatan akibat simulasi beban yang

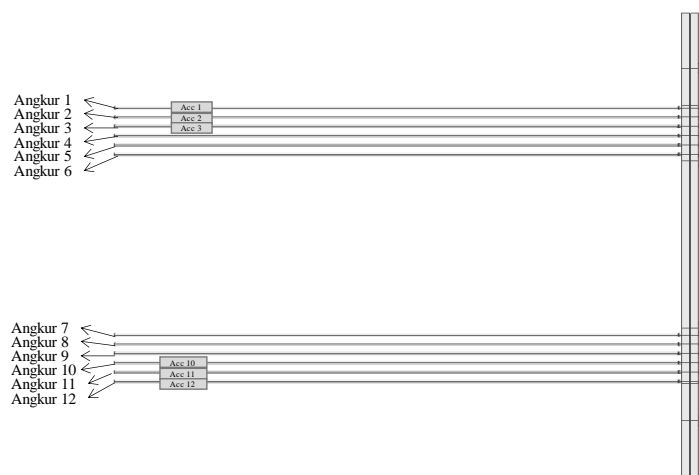
lebih besar dari uji beban, model struktur jembatan yang digunakan pada tahapan perencanaan memerlukan penyesuaian terhadap kondisi aktual lapangan, khususnya respons jembatan yang diukur pada uji pembebanan. Dalam penelitian ini, pemodelan dan analisis struktur menggunakan metode FEM dengan bantuan piranti lunak *MIDAS Civil*. Pertama-tama, model struktur awal diberikan simulasi pembebanan uji berdasarkan skema dan tahapan pembebanan pada uji pembebanan sesuai dengan yang ditampilkan pada Tabel 2. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan deformasi struktur dan juga tegangan di elemen struktur yang diamati pada uji beban. Selain itu, analisis moda getar juga dilakukan untuk mendapatkan frekuensi natural jembatan teoritis untuk kemudian nanti disesuaikan dengan hasil uji getar pada jembatan.



(a) Tampak samping jembatan




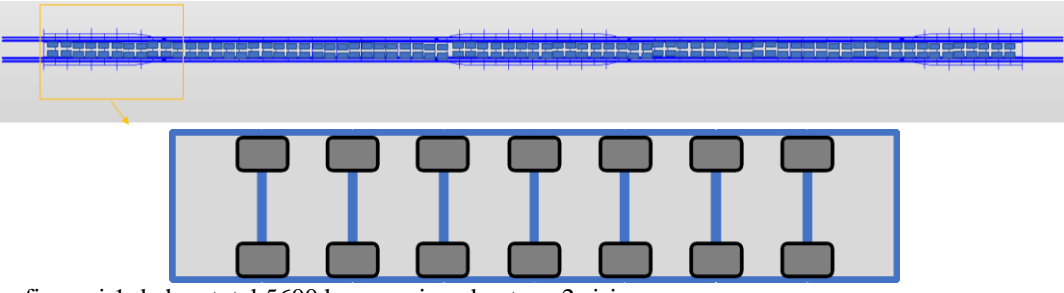
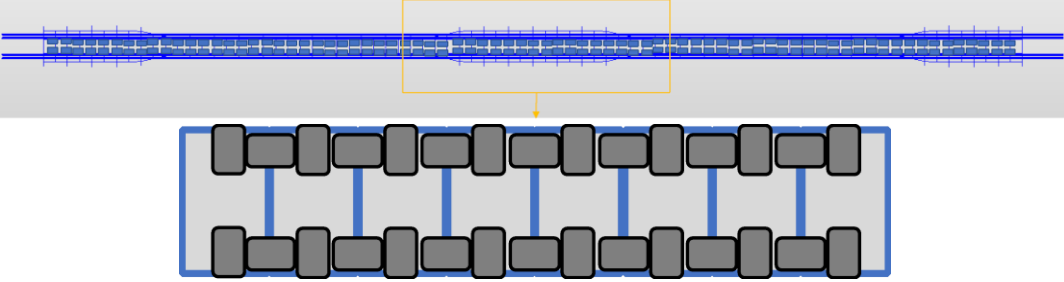
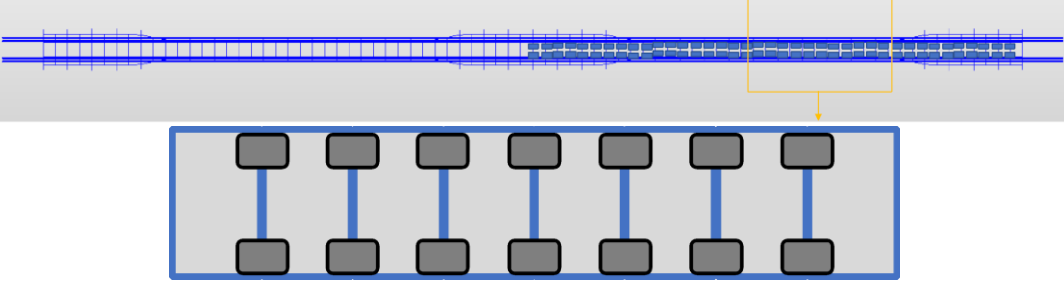
(b) Penempatan sensor *strain gauge* pada segmen lantai jembatan

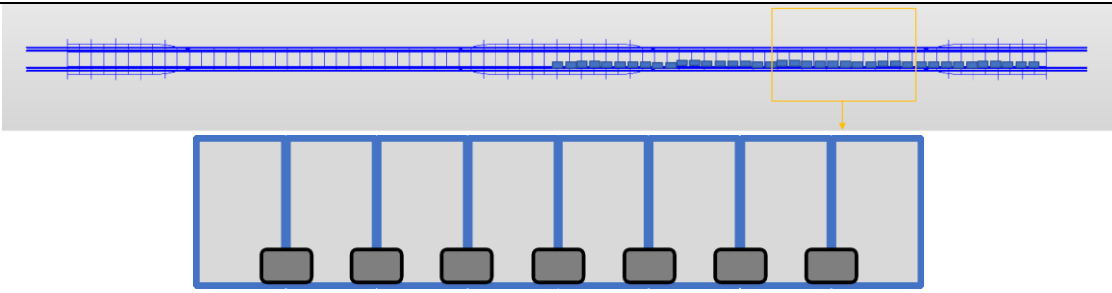
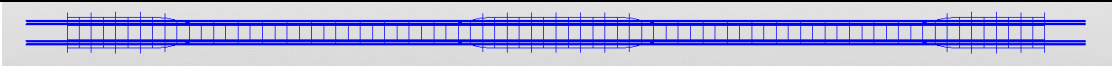


(c) Penempatan sensor *accelerometer* pada kabel *backstay* jembatan

Gambar 9. Titik pengamatan deformasi dan lokasi penempatan sensor uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo

Tabel 2. Tahapan pembebanan uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo

No	Sketsa dan keterangan
1	 <p>Konfigurasi <i>Initial</i>: dimana jembatan dilakukan pengukuran tanpa adanya beban uji</p>
2	 <p>Konfigurasi 1: beban total 5600 kg sepanjang bentang 2 sisi dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 160 karung isi pasir dengan jarak penempatan 1.5 m antar karung yang ditempatkan di atas <i>frame</i> lantai pada kedua sisi lantai</p>
3	 <p>Konfigurasi 2: beban total 8400 kg sepanjang bentang 2 sisi dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 240 karung isi pasir dimana dilakukan penambahan 80 karung dari konfigurasi 1, penambahan karung ditempatkan tengah bentang dengan jarak penempatan 0.75 m antar karung yang disusun di atas lantai kaca pada kedua sisi lantai, di antara karung yang sudah ditempatkan pada konfigurasi 1</p>
4	 <p>Konfigurasi 3: beban total 2800 kg setengah bentang 2 sisi (<i>unbalance</i>) dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 80 karung isi pasir dengan jarak penempatan 1.5 m antar karung yang ditempatkan di atas <i>frame</i> lantai pada kedua sisi lantai. Beban hanya diberikan pada setengah bentang utama jembatan untuk memeriksa respons jembatan akibat efek beban <i>unbalance</i></p>

5	 <p>Konfigurasi 4: beban total 1400 kg setengah bentang 1 sisi (<i>unbalance</i> + puntir) dimana jembatan dilakukan pengukuran dengan beban 40 karung isi pasir dengan jarak penempatan 1.5 m antar karung yang ditempatkan di atas <i>frame</i> lantai pada kedua sisi lantai. Beban hanya diberikan pada setengah bentang utama jembatan dan di satu sisi lantai untuk memeriksa respons jembatan akibat efek torsi beban <i>unbalance</i></p>
6	 <p>Konfigurasi <i>unloading</i> akhir: dimana jembatan dilakukan pengukuran tanpa adanya beban uji</p>

Evaluasi beban layan izin

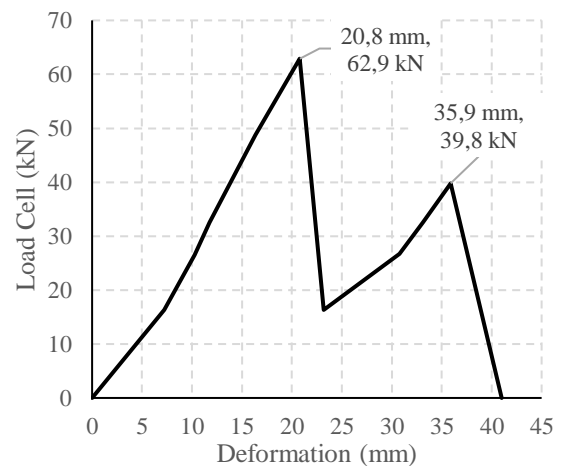
Setelah model struktur jembatan disesuaikan dengan perilaku jembatan aktual akibat uji pembebanan, dapat dilakukan evaluasi beban layan izin. Dari model yang sudah disesuaikan dengan kondisi aktual tersebut kemudian dilakukan analisis struktur dengan proyeksi penambahan beban yang lebih besar daripada beban uji coba pada model struktur jembatan hingga ditemukan besaran beban yang masih memenuhi batasan kriteria keamanan dan kenyamanan, yang kemudian dapat disebut sebagai beban layan izin.

HASIL DAN ANALISIS

Pengujian laboratorium lantai kaca

Pengujian terhadap sistem lantai struktur Jembatan Gantung Lantai Kaca Bromo dilakukan di laboratorium Kementerian PUPR. Adapun panel sistem lantai struktur Jembatan Gantung Lantai Kaca Bromo memiliki ukuran 1.8 m x 1.5 m dan terdiri dari dua lapis kaca dengan tebal masing-masing 12 mm dan interlayer tipe SGP setebal 1.52 mm. Panel tersebut diberikan beban uji beban merata 500 kg/m² sesuai dengan beban desain pejalan kaki SNI 1725 2016 (Badan Standardisasi Nasional 2016), dan kemudian dilanjutkan hingga beban 1250 kg/m². Pada pengujian dengan beban 500 kg/m² maupun 1250 kg/m² tersebut, tidak terlihat kerusakan secara visual, namun terdapat lendutan kaca sebesar 3 mm dengan tegangan 12

MPa yang masih berada di bawah batasan lendutan izin.



Gambar 10. Hasil pengujian beban titik sistem lantai kaca

Pengujian sistem lantai kaca dengan jenis beban titik (*point load*) dilakukan, dimana beban dari aktuator disalurkan ke benda uji melalui bidang kontak 15 cm x 15 cm, seperti dapat dilihat pada Gambar 5. Untuk tipe pengujian dengan beban titik ini, terjadi kerusakan pertama pada lapisan pertama kaca saat diberikan beban sebesar 6.29 ton dengan defleksi yang dihasilkan sebesar 20.8 mm, beban dilepaskan untuk kemudian diberikan beban titik untuk menguji lapisan kedua kaca yang masih belum mengalami kerusakan. Pada pengujian dengan beban kedua, terjadi kerusakan pada lapisan kedua kaca pada beban uji sebesar 3.98 ton dengan defleksi 35.9 mm. Hasil pengujian untuk beban titik ini dapat dilihat pada Gambar 11.

Meskipun terjadi kerusakan, pada saat kerusakan pertama, pecahan kaca menjadi serpihan tetapi tidak lepas dari lapisan interlayer. Pada saat terjadi kerusakan kedua, kedua lapis kaca pecah tetapi kerusakan yang terjadi tidak *brittle*.

Jika dibandingkan dengan beban rencana yaitu 500 kg/m² yang berupa beban merata yang dikonversi menjadi beban titik ekuivalen, yaitu 500 kg/m² dikali luas penampang panel 1.5 m x 1.8 m sehingga didapat beban titik ekuivalen sebesar 1.35 ton. Berdasarkan uji beban sistem lantai, dimana sistem lantai direncanakan untuk mampu memikul beban titik ekuivalen sebesar 1.35 ton dan beban merata 500 kg/m², sistem lantai kaca mampu memikul beban yang lebih besar, dimana untuk pengujian beban titik lantai kaca baru mengalami kerusakan pertama pada beban 6.29 ton, sedangkan untuk uji beban merata, tidak terjadi kerusakan pada sistem lantai hingga beban 1250 kg/m². Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem lantai kaca struktural dari Jembatan Kaca Bromo aman untuk digunakan untuk lantai jembatan pejalan kaki sesuai SNI 1725-2016.

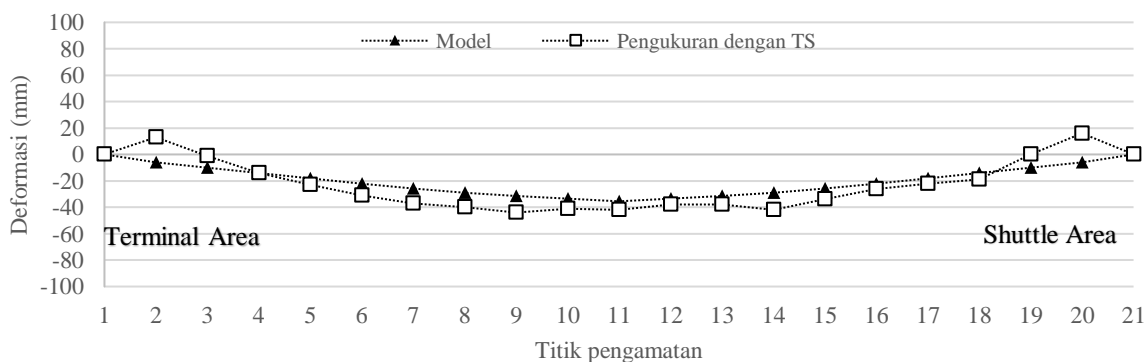
Pengujian beban struktur Jembatan Kaca

Berdasarkan hasil uji pembebanan Struktur Jembatan Kaca Bromo yang dilakukan di lapangan, seperti dapat dilihat pada Gambar 11, Gambar 12, Gambar 13, dan Gambar 14 di bawah ini, pada perbandingan deformasi hasil pengukuran dengan model untuk setiap tahapan pembebanan, terlihat kemiripan pola deformasi, walaupun secara besaran memiliki beberapa perbedaan. Deformasi terbesar terjadi pada kondisi pembebanan tidak merata, yaitu pada pembebanan tahap ke 3 dan ke 4, seperti terlihat

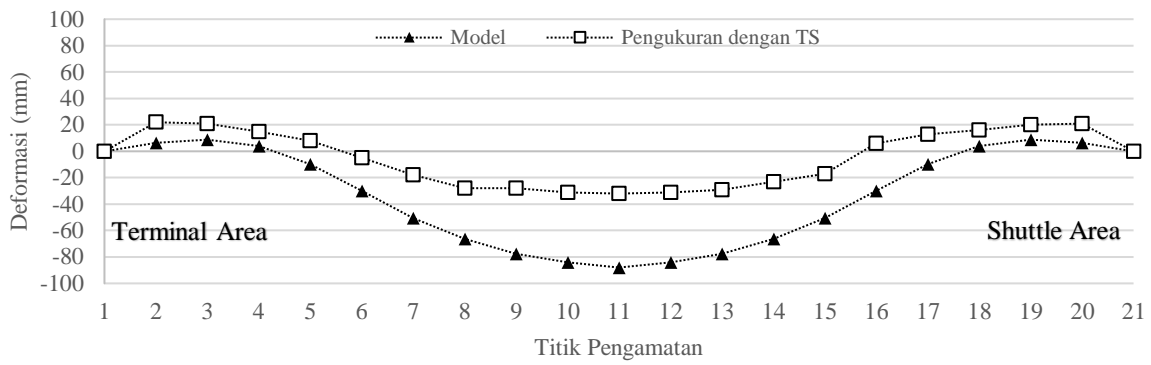
pada Gambar 13 dan Gambar 14. Untuk menghindari kondisi deformasi vertikal terbesar yang dapat terjadi sesuai tahapan uji beban tersebut, maka saat operasional kondisi yang perlu dihindari adalah konsentrasi pengguna jembatan di setengah bentang saja dan atau di salah satu sisi saja seperti simulasi pembebanan tahap ke 3 dan 4.

Untuk gaya kabel *backstay* dari model akibat simulasi tahapan pembebanan uji tahap 1 sampai dengan tahap 4, gaya terbesar terjadi pada kabel *backstay* dengan nomor ankur 2, 3, 11, 12 dengan skema nomor ankur kabel *backstay* dapat dilihat pada Gambar 9.(c)., dengan nilai terbesar terjadi pada pembebanan tahap kedua seperti dapat dilihat pada **Gambar 12**, dengan gaya kabel bernilai 19.53 tonf. Sebagai pembandingan, gaya kabel *backstay* terbesar akibat beban mati saja pada model adalah sebesar 10.7 tonf.

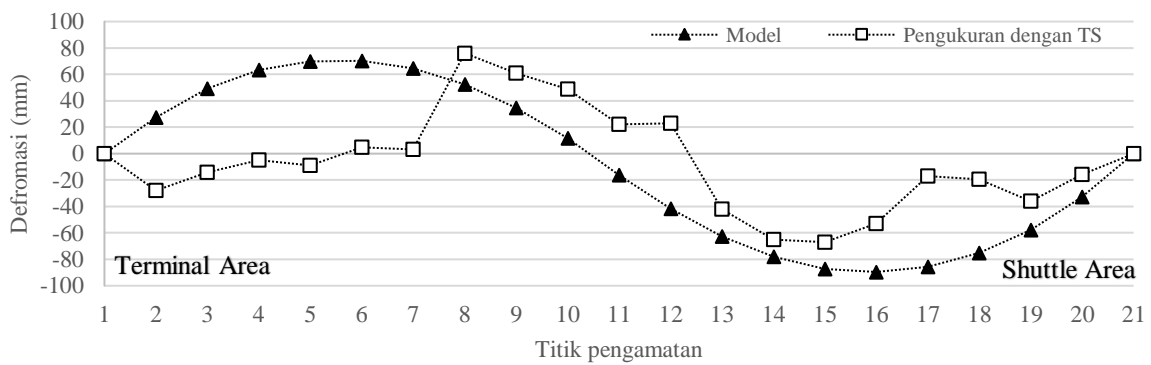
Perbandingan hasil uji lapangan dari gaya kabel *backstay* (Tabel 3) dengan gaya kabel hasil simulasi pada model ditampilkan pada Gambar 15. Pada perbandingan tersebut, gaya kabel yang terjadi antara model dan hasil uji cukup berbeda, hal ini kemungkinan terjadi karena distribusi tegangan kabel yang terjadi lebih besar terjadi pada kabel di tengah bentang, dan membutuhkan waktu cukup lama untuk redistribusi ke bagian *backstay*/angkur jembatan, terkait perilaku tumpuan kabel/*saddle* aktual yang tidak dapat mereplikasi kondisi ideal *saddle* model yang licin sempurna. Namun, secara umum kondisi operasional jembatan masih dalam batasan yang aman untuk besaran setara beban uji yang digunakan dalam pelaksanaan pengujian beban ini.



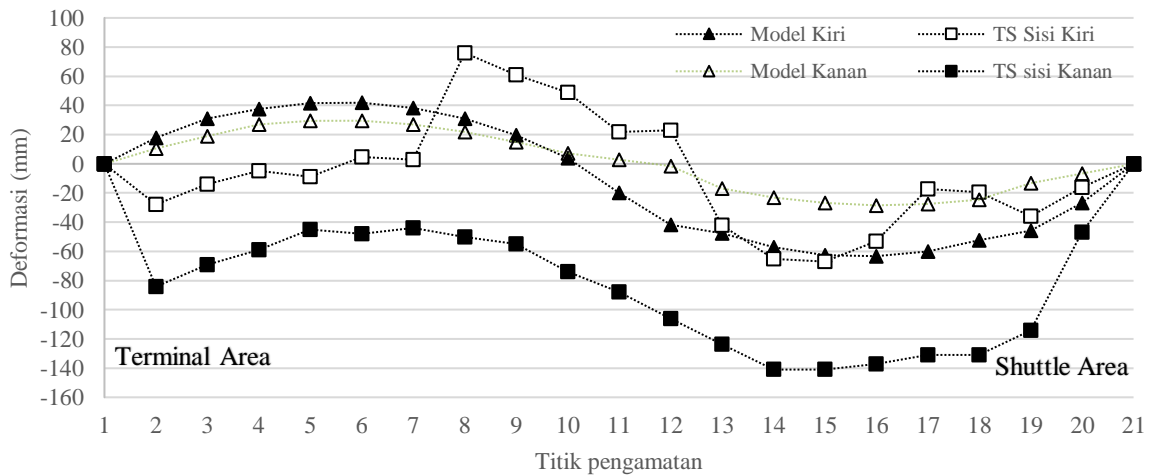
Gambar 11. Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 1, dengan beban total 5600 kg sepanjang bentang 2 sisi



Gambar 12. Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 2, dengan beban total 8400 kg sepanjang bentang 2 sisi



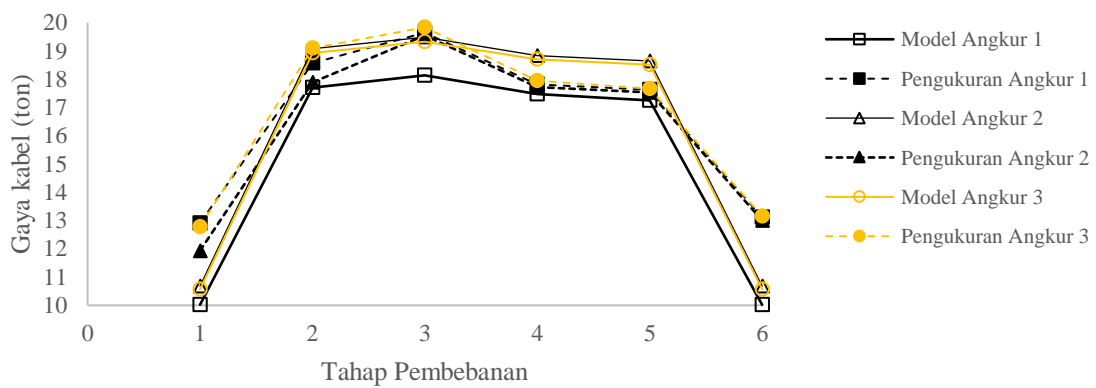
Gambar 13. Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 3, dengan beban total 2800 kg setengah bentang 2 sisi (*unbalance*)



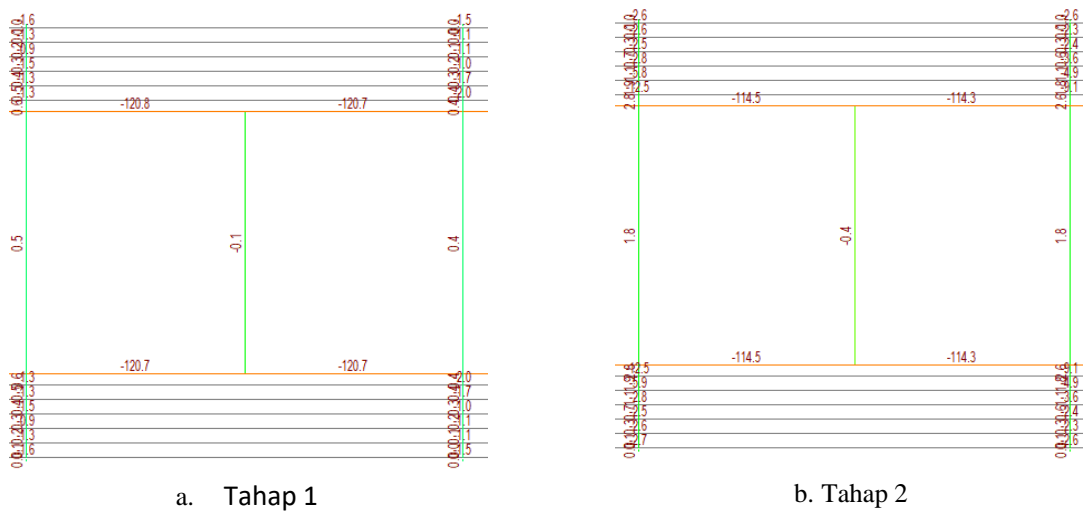
Gambar 14 Perbandingan Deformasi untuk Konfigurasi Pembebanan 4, dengan beban total 1400 kg setengah bentang 1 sisi (*unbalance + puntir*)

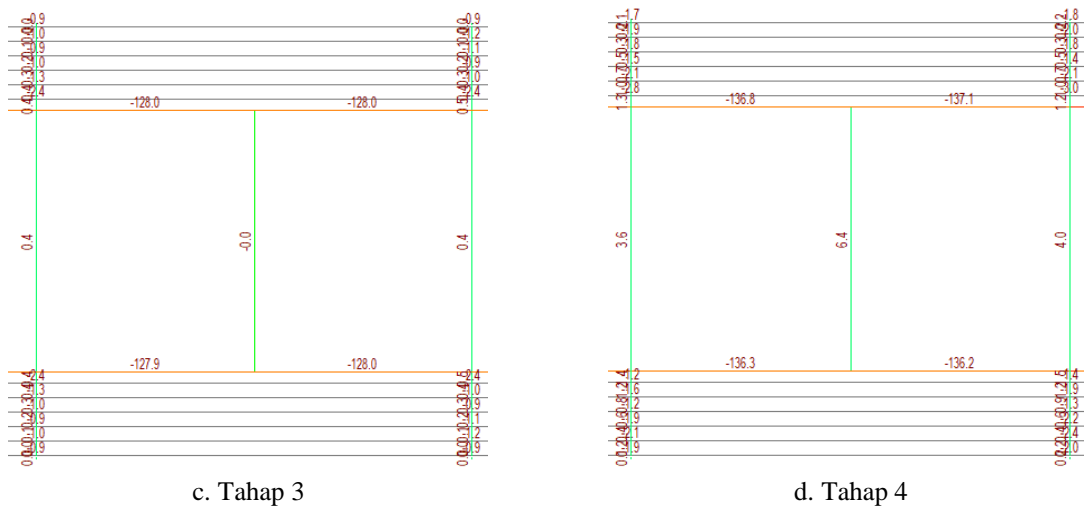
Tabel 3. Gaya kabel *backstay* uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo

Lokasi	Panjang Kabel (m)	Speksifikasi kabel (kg/m)	Gaya Kabel (Ton)					Unload
			Initial (Beban Mati)	Beban Tahap 1	Beban Tahap 2	Beban Tahap 3	Beban Tahap 4	
Angkur 1	13.07	8.182	12.913	18.572	19.649	17.811	17.624	13.121
Angkur 2	13.06	8.182	11.936	17.893	19.551	17.723	17.540	13.003
Angkur 3	13	8.182	12.775	19.095	19.838	17.954	17.675	13.163
Angkur 10	13.04	8.182	13.099	19.045	19.818	17.953	17.701	13.204
Angkur 11	13	8.182	12.455	18.427	19.091	17.043	17.311	13.106
Angkur 12	13	8.182	13.099	19.095	19.493	17.341	17.513	13.066



Gambar 15. Perbandingan gaya kabel *backstay* model dan hasil pengukuran akibat tahapan pembebanan

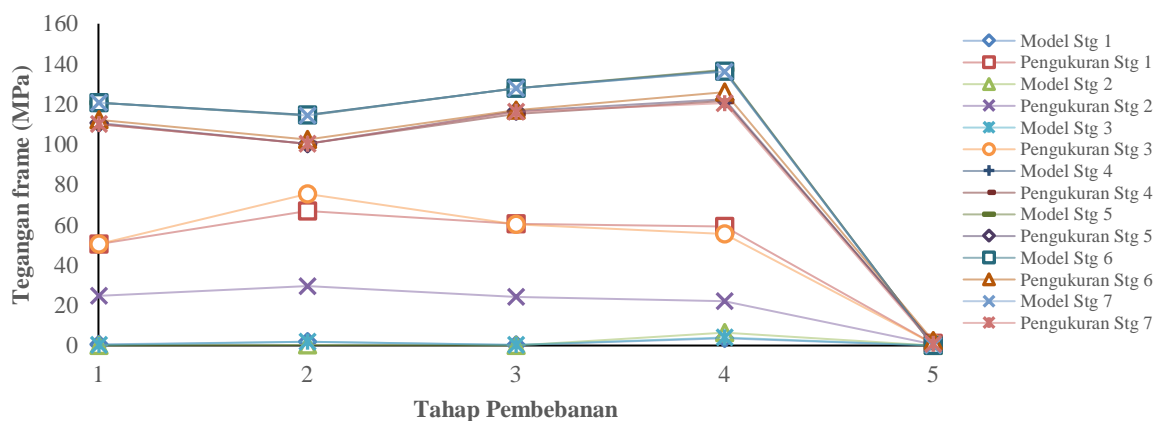




Gambar 16. Tegangan *frame* sistem pemikul lantai model akibat uji pembebanan

Tabel 4. Tegangan *frame* sistem pemikul lantai hasil pengukuran akibat uji pembebanan

Lokasi	Tegangan serat bawah <i>frame</i> lantai akibat pembebanan (MPa)				
	Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3	Tahap 4	Unload
Stg 1	50.32	66.88	60.37	59.11	0.97
Stg 2	24.71	29.56	24.17	22.12	0.60
Stg 3	50.43	75.37	60.36	55.37	0.95
Stg 4	110.21	100.18	115.12	121.60	1.80
Stg 5	110.53	100.16	116.48	122.43	1.47
Stg 6	112.14	102.49	117.11	125.96	2.53
Stg 7	110.07	100.40	116.27	120.54	0.78



Gambar 17. Perbandingan tegangan *frame* sistem pemikul lantai model dan hasil pengukuran akibat tahapan pembebanan

Untuk parameter tegangan serat bawah *frame* sistem pemikul lantai, hasil simulasi pada model seperti dapat dilihat pada Gambar 16, terlihat bahwa tegangan terbesar terjadi pada *frame* memanjang pada kedua sisi sistem lantai

yaitu *frame* pada lokasi sensor *strain gage* nomor 4, 5, 6, dan 7 sesuai Gambar 9), dengan nilai terbesar bernilai 137.10 MPa yang masih berada dalam batasan izin. Sebagai pembandingan, tegangan *frame* terbesar akibat beban mati di

lokasi yang sama model adalah sebesar 71.60 MPa.

Jika dibandingkan dengan hasil uji lapangan pada Tabel 4, besaran yang dihasilkan cukup mirip, seperti dapat dilihat pada Gambar 17. Namun, untuk tegangan pada kondisi uji lapangan lebih terdistribusi pada balok melintang. Hal ini karena asumsi yang digunakan dalam pemodelan adalah pendefinisian beban sebagai beban titik sehingga memberikan konsentrasi tegangan yang lebih besar dibanding kondisi aktual di lapangan dimana beban yang digunakan adalah beban karung dengan luasan tapak yang lebih besar. Hal ini memungkinkan untuk beban terdistribusi lebih baik pada elemen struktur *frame* pemikul lantai dan performa distribusi tegangan menjadi lebih baik dibanding pemodelan. Secara umum, sistem *frame* dalam kondisi aman untuk memikul beban layan.

PEMBAHASAN

Perilaku struktur jembatan eksisting terhadap uji pembebanan secara keseluruhan menyerupai pemodelan. Untuk parameter deformasi sebagai batasan aspek kenyamanan, deformasi vertikal tengah bentang yang merupakan deformasi terbesar akan diacu untuk dibandingkan dengan batasan lendutan izin. Dalam hal ini, dengan asumsi target tingkat kenyamanan dalam penggunaan Jembatan Kaca adalah setara dengan tingkat kenyamanan dalam penggunaan jembatan gantung kelas 2, dengan besaran lendutan izin $L/100$ seperti dapat dilihat di kriteria teknis pada Tabel 1.

Untuk Jembatan Kaca yang memiliki panjang bentang utama 200 m, lendutan izin adalah 2000 mm akibat beban hidup. Pada uji beban statis, untuk beban maksimal 8.4 ton, didapat deformasi vertikal terbesar pada bentang utama jembatan adalah 72.70 mm. Maka dari itu jika beban layan disesuaikan untuk beban desain, yaitu setara dengan 20 kali beban uji statis, maka lendutan yang terjadi jika perilakunya dianggap linear adalah sebesar 727.00 mm. Perilaku kabel pada dasarnya adalah material yang bersifat non-linear, namun untuk jembatan gantung pejalan kaki yang telah melewati tahapan konstruksi bertahap dan telah terpasang sempurna dimana beban mati struktur dan tambahan sudah bekerja, efek beban hidup operasional pejalan kaki besarnya cukup kecil sehingga dapat

diasumsikan berperilaku linear terbatas (Gong et al. 2021).

Besaran lendutan yang dihitung dengan regresi linear ini cukup dekat dengan hasil simulasi pembebanan desain pada model yang sudah disesuaikan dengan perilaku aktual jembatan, yaitu 731.98 mm. Hal ini didukung dengan simulasi tahapan pembebanan dimana beban bersifat linear dan perubahan deformasi yang terjadi juga sifatnya linear. Sehingga besaran deformasi simulasi beban desain maksimal ini lebih kecil dibandingkan lendutan izin 2000 mm. Maka dapat disimpulkan bahwa jembatan telah memenuhi aspek kenyamanan, sehingga beban layan tidak perlu disesuaikan lagi, cukup mengikuti batasan beban layan dari aspek keamanan dari parameter tegangan.

Untuk parameter gaya kabel *backstay*, kabel dengan respon haya terbesar akan diacu untuk penentuan beban layan izin dari evaluasi ini. Kabel dengan respon gaya terbesar tersebut adalah kabel kedua dari sisi luar, dimana gaya terbesar yang bekerja pada lokasi dipasangnya accelerometer ini terjadi pada kondisi konfigurasi beban kedua dengan berat total beban 8.4 tonf (240 karung pasir dengan berat 35 kg untuk setiap karung) yaitu 10.42 tonf. Jika dibandingkan dengan respon struktur model yang paling mendekati, besaran gaya di lokasi tersebut adalah 8.8 tonf. Karena kemungkinan distribusi gaya kabel aktual lebih terkonsentrasi di kabel tengah bentang karena perilaku *saddle* jembatan aktual yang tidak 100% ideal seperti perilaku *saddle* pada model yang licin sempurna, maka perlu dilakukan pembatasan beban operasional untuk mengantisipasi gaya berlebih pada kabel khususnya yang terjadi di tengah bentang jembatan. Dengan distribusi gaya terbesar kabel tengah bentang terhadap gaya terbesar kabel *backstay* pada model adalah 14.40 tonf berbanding 8.4 tonf atau setara 1,7: 1. Maka jika diasumsikan perbandingan lebih besar pada kondisi aktual akibat perilaku *saddle* yang tidak seideal model, diambil rasio 2:1, maka perlu dilakukan pembatasan beban operasional menjadi sekitar 80% dari beban rencana, yaitu menjadi 4 kPa atau setara 400 kg / m².

Untuk parameter tegangan *frame* lantai, batang dengan respon tegangan terbesar akan diacu untuk penentuan beban layan izin dari evaluasi ini. Batang dengan respon tegangan terbesar tersebut adalah memanjang di kedua sisi sistem *frame* lantai, dimana tegangan terbesar

yang bekerja pada lokasi dipasangnya *strain gage* STG 5 dan STG 6 ini terjadi pada kondisi konfigurasi beban kedua dimana terdapat 10 karung pasir di atas satu panel lantai tersebut, dengan nilai tegangan terbesar yaitu 137.10 MPa.

Jika dibandingkan dengan hasil uji lapangan, besaran yang dihasilkan cukup mirip, namun tegangan pada kondisi uji lapangan lebih terdistribusi pada balok melintang. Hal ini karena asumsi yang digunakan dalam pemodelan adalah pendefinisian beban sebagai beban titik sehingga memberikan konsentrasi tegangan yang lebih besar dibanding kondisi aktual di lapangan dimana beban yang digunakan adalah beban karung dengan luasan tapak yang lebih besar. Selain itu, dari hasil pengujian sistem segmen lantai struktural di laboratorium, didapatkan hasil berupa kemampuan memikul beban dari panel lantai kaca struktural Jembatan Kaca Bromo cukup tinggi, dimana kerusakan baru terjadi untuk beban titik sekitar 450%. Faktanya, beban aktual pejalan kaki terdistribusi lebih merata pada elemen struktur frame pemikul lantai dan performa distribusi tegangan menjadi lebih baik dibanding pemodelan maupun uji segmen di laboratorium. Secara umum, sistem *frame* dan lantai kaca struktural dalam kondisi aman untuk memikul beban layan dengan mengikuti pembatasan dari parameter tegangan kabel, yaitu 400 kg/m².

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan evaluasi beban layan izin yang telah dilakukan berdasarkan uji pembebanan, didapatkan hasil bahwa struktur jembatan layak untuk difungsikan sebagai jembatan pejalan kaki dengan pembatasan beban layan yang diizinkan yaitu setara dengan 80% beban desain atau 400 kg/m². Pembatasan beban ini dilakukan untuk memenuhi aspek keamanan penggunaan jembatan. Secara teknis Jembatan Kaca ini dapat memikul beban cukup besar, namun dengan mempertimbangkan aspek lokasi wisata dan karakter jembatan yang direncanakan sebagai wisata yang membutuhkan penyesuaian psikologis pengguna jembatan dalam melintasi jembatan karena lantai yang digunakan adalah kaca yang tembus pandang hingga dapat terlihat dasar dari jurang di bawahnya, maka sebaiknya dilakukan pembatasan jumlah orang yang

diizinkan menjadi 100 orang dengan berat rata-rata 70 kg sesuai beban uji yang digunakan dalam pengujian ini.

Secara teknis Jembatan Kaca ini dapat memikul beban cukup besar, namun dengan mempertimbangkan aspek penggunaannya untuk digunakan sebagai fasilitas pariwisata yang membutuhkan penyesuaian psikologis bagi pengguna jembatan untuk melintasi lantai yang transparan dengan ketinggian *clearance* vertikal hingga 80 meter, maka dilakukan pembatasan beban operasional yang diizinkan menjadi 100 orang dengan berat rata-rata 70 kg sesuai beban uji yang digunakan dalam pengujian ini.

Saran

Dalam penelitian ini, belum dilakukan analisis terhadap pengaruh angin dan pengaruh percepatan dinamis pengguna jembatan terhadap perilaku jembatan. Oleh karena itu, untuk melengkapi kajian yang telah dilakukan dalam penelitian ini, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan yang fokus pada aspek tersebut. Penelitian ini dapat memperdalam pemahaman kita tentang respons struktural jembatan terhadap beban angin dan pengaruh gerakan dinamis pengguna jembatan, sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keamanan jembatan dalam kondisi lingkungan yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR atas kesempatan untuk terlibat dalam Uji pembebanan Jembatan Kaca Bromo. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Pengelola Taman Nasional Bromo Tengger Semeru dan Pemerintah Provinsi Jawa Timur yang telah memberikan dukungan penuh dalam pembangunan Jembatan Kaca Bromo ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alampalli, Sreenivas, Dan M. Frangopol, Jesse Grimson, Marvin W. Halling, David E. Kosnik, Eva O. L. Lantsoght, David Yang, and Y. Edward Zhou. 2021. "Bridge Load Testing: State-of-the-Practice." *Journal of Bridge Engineering* 26 (3): 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001678](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001678).
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *SNI 1725-2016 Pembebanan Untuk Jembatan*. Badan

- Standardisasi Nasional*. Jakarta: Indonesia: Badan Standarisasi Nasional.
- Cai, Hubo, Osama Abudayyeh, Ikhlas Abdel-Qader, Upul Attanayake, Joseph Barbera, and Eyad Almaita. 2012. "Bridge Deck Load Testing Using Sensors and Optical Survey Equipment." *Advances in Civil Engineering* 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/493983>.
- Faber, Michael H., Dimitri V. Val, and Mark G. Stewart. 2000. "Proof Load Testing for Bridge Assessment and Upgrading." *Engineering Structures* 22 (12): 1677–89. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00111-X).
- Gong, Ming, Yunsheng Li, Ruili Shen, and Xinxin Wei. 2021. "Glass Suspension Footbridge: Human-Induced Vibration, Serviceability Evaluation, and Vibration Mitigation." *Journal of Bridge Engineering* 26: 5021014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001788](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001788).
- Haim Dotan Ltd. 2022. "Zhangjiajie Grand Canyon Glass Bridge." Architonic. 2022. <https://www.architonic.com/en/project/haim-dotan-ltd-zhangjiajie-grand-canyon-glass-bridge/5105373>.
- Hester, David, James Brownjohn, Mateusz Bocian, and Yan Xu. 2017. "Low Cost Bridge Load Test: Calculating Bridge Displacement from Acceleration for Load Assessment Calculations." *Engineering Structures* 143: 358–74. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.04.021>.
- Hou, T.-C., and J P Lynch. 2006. "Rapid-to-Deploy Wireless Monitoring Systems for Static and Dynamic Load Testing of Bridges: Validation on the Grove Street Bridge." *Proceedings of SPIE* 6178. <https://doi.org/10.1117/12.658902>.
- Kementerian Pekerjaan Umum. 2010. "Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No . 02 / SE / M / 2010 Tentang Pemberlakuan Pedoman Perencanaan Dan Pelaksanaan Konstruksi Jembatan Gantung Untuk Pejalan Kaki." *Kementerian Pekerjaan Umum*, no. 02.
- Lantsoght, Eva O.L., Cor van der Veen, Ane de Boer, and Dick A. Hordijk. 2017. "State-of-the-Art on Load Testing of Concrete Bridges." *Engineering Structures* 150: 231–41. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.050>.
- Luo, H.-Y, and Z.-B Wang. 2017. "Design of Foundations of Zhangjiajie Grand Canyon Glass Floor Bridge." *Bridge Construction* 47: 96–100.
- Ma, L, K Guo, and S.-K Sun. 2017. "Principal Construction Techniques of Zhangjiajie Grand Canyon Glass Floor Bridge." *Bridge Construction* 47: 99–104.
- Nugraha, Widi, Gatot Sukmara, Pusat Litbang, and Jalan Dan Jembatan. 2017. "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)." *Jurnal Jalan-Jembatan* 34 (2): 64–78.
- Pariafsai, Fatemeh. 2016. "A Review of Design Considerations in Glass Buildings." *Frontiers of Architectural Research* 5 (2): 171–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.01.006>.