

# UJI COBA MODEL FISIK SISTEM *BRIDGE WEIGH IN MOTION* SEDERHANA PADA JEMBATAN GELAGAR BAJA KOMPOSIT (*TRIAL MODEL OF A SIMPLE BRIDGE WEIGH IN MOTION SYSTEM ON STEEL GIRDER COMPOSITE BRIDGE*)

Widi Nugraha<sup>1)</sup> dan Gatot Sukmara<sup>2)</sup>

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

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

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

Diterima: 8 Maret 2018 ; direvisi: 8 Mei 2018; disetujui: 25 Juni 2018

## ABSTRAK

*Pada umumnya, penggunaan sistem WIM untuk mengukur beban kendaraan dan lalu lintas di Indonesia saat ini masih mengandalkan sistem WIM temporer. Survei tersebut pada umumnya dilakukan untuk durasi paling lama satu minggu. Pada tahun 2015, Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR (Pusjatan) mengembangkan sebuah sistem WIM yang relatif baru di Indonesia. Sistem WIM ini memanfaatkan struktur jembatan dengan mengukur respons elemen jembatan akibat beban kendaraan yang melintas sebagai data dasar untuk diolah dengan sebuah algoritma untuk menghitung beban kendaraan (sistem bridge WIM). Luaran dari sistem bridge WIM ini adalah beban kendaraan yang dihitung berdasarkan respons struktur jembatan dan kecepatan kendaraan yang dihitung berdasarkan selisih waktu saat kendaraan melintas pada dua sensor berurutan yang jarak antarsensornya diketahui. Pusjatan pada tahun 2016 melakukan implementasi dari konsep teknologi bridge WIM sederhana dengan memasang sensor strain transducer pada Jembatan Cipeles, sebuah jembatan gelagar baja komposit dengan panjang bentang 30 m, berlokasi di Ruas Jalan Nasional Bandung-Cirebon, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat. Proses kalibrasi dari sistem ini dilakukan dengan mengukur respons struktur jembatan untuk beban kendaraan truk yang beratnya diketahui. Hasil dari perhitungan beban kendaraan dengan bridge WIM sederhana ini memberikan simpangan terhadap pengukuran beban kendaraan statis. Hasil kalibrasi menunjukkan sekitar 3,87% perbedaan dengan muatan truk yang dikenal secara statis. Perhitungan kecepatan kendaraan menggunakan sistem bridge WIM ini, memberikan simpangan sebesar 9,3% dibandingkan terhadap pengukuran dengan speed gun untuk sepuluh kendaraan yang melintas di atas jembatan.*

**Kata Kunci:** jembatan, weigh in motion, sensor, beban kendaraan, kecepatan kendaraan

## ABSTRACT

*Generally, the use of a temporarily WIM system to measure vehicular loads and traffic are common practices in Indonesia. It takes about maximum one week of survey. In 2015, a relatively new WIM system in Indonesia is developed by IRE, Ministry of Public Works and Housing. This WIM system uses bridge structural responses due to vehicle loads as input to the system which is then calculated by using an algorithm to determine the vehicle loads (bridge WIM system). The output of this bridge WIM system are vehicle loads that are calculated by using bridge structural responses and vehicle speeds that are calculated by differences of vehicle passing time on two adjacent sensors, with the distances between them as defined. The bridge responses were measured by using strain transducers attached on the bridge. In 2016, IRE implemented a simple bridge WIM concept by installing strain transducer on Cipeles Bridge. This bridge is a steel girder composite bridge with 30 m span located in Bandung-Cirebon National Road, Sumedang Regency, West Java. To calibrate the system, bridge responses were measured by statically known truck load. The calibration results shows about 3,87% differences with statically known load truck. In addition, in terms of vehicle speed, it shows about 9,3% differences with speed gun measurements.*

**Keywords:** bridge, weigh in motion, sensors, vehicular load, vehicle speed

## PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur saat ini adalah salah satu fokus utama kinerja pemerintah Indonesia. Termasuk di antaranya adalah berupa infrastruktur jalan dan jembatan yang merupakan pilihan utama transportasi di Indonesia, dimana sekitar 90% pergerakan transportasi barang nasional menggunakan moda darat (jalan) (Saleh et al. 2009). Pembangunan di sektor infrastruktur jalan dan jembatan di seluruh Indonesia ini dilakukan sebagai bentuk pemerataan konektivitas antar wilayah dan pemacu kegiatan ekonomi secara luas.

Namun, pada saat ini, kegiatan ekonomi dan pergerakan barang di Indonesia masih terpusat di Pulau Jawa dan Sumatera. Hal ini berpengaruh pada transportasi barang di wilayah tersebut yang memiliki volume yang tinggi, juga beban muatan yang besar. Kendaraan truk dengan beban muatan yang besar mengakibatkan kerusakan pada permukaan jalan dan pada struktur jembatan. Salah satu studi mengenai dampak beban berlebih pada umur layan jalan pada ruas Jalan Nasional Lintas Timur Sumatera, menyatakan bahwa dengan beban muatan yang melebihi sekitar 17,98% dari batasan beban yang diijinkan, dapat mengakibatkan kerusakan lebih cepat pada permukaan jalan menjadi 60% dari umur rencana (Sentosa dan Roza 2012).

Maka dari itu, dibutuhkan suatu teknologi pengukuran beban sebagai kontrol terhadap beban kendaraan untuk mereduksi masalah beban berlebih dan mempertahankan masa layan infrastruktur jalan dan jembatan (Gonzalez 2010). Teknologi pengukuran beban kendaraan konvensional yang umum digunakan adalah jembatan timbang statis yang memerlukan kendaraan untuk diberhentikan terlebih dahulu untuk kemudian ditimbang secara statis. Hal ini tentunya dapat mengganggu kelancaran lalu lintas untuk ruas jalan yang lalu lintasnya padat.

Teknologi pengukuran beban kendaraan terus berkembang dan salah satunya adalah teknologi pengukuran beban kendaraan bergerak *weigh in motion* (WIM). Teknologi WIM memungkinkan pengukuran beban kendaraan dilakukan saat kendaraan melintas, yang merupakan beban aktual yang diterima oleh jalan dan jembatan. Berdasarkan jenis media yang digunakan, teknologi WIM terbagi menjadi WIM berbasis perkerasan jalan (*pavement-based*) dan WIM berbasis jembatan (*bridge-based*).

WIM berbasis perkerasan jalan (*pavement-based*) menggunakan sensor yang dipasang pada permukaan perkerasan jalan untuk merekam

beban kendaraan yang melintas. Jenis sensor yang digunakan untuk *pavement WIM* bisa menggunakan *load cells* (kecepatan rendah), bending plates (baja atau aluminium dengan *strain gages*), dan sensor strip (*capacitive, piezoelectric, quartz, dan fibre optic*) (Gonzalez 2010). Pada *pavement WIM*, roda kendaraan yang melintas akan kontak langsung dengan sensor WIM, sehingga beban gandar kendaraan akan lebih mudah terukur, namun dapat menyebabkan sensor cepat rusak akibat kontak secara langsung dengan beban, khususnya apabila beban yang melintas adalah beban berlebih atau *overload* yang melebihi kapasitas sensor *pavement WIM* (Haugen et al. 2016). Selain itu, sensor *pavement WIM* yang dipasang di atas permukaan jalan perlu menjadi perhatian karena celah untuk menanam sensor dapat bertambah besar dan menyebabkan kerusakan permukaan perkerasan jalan di sekitarnya karena pengaruh beban yang melintas dan berkumpulnya air pada celah di sekitar lokasi sensor.

Di Indonesia, khususnya jalan dengan tipe perkerasan lentur, banyak umumnya dilakukan penambahan ketebalan secara rutin dalam proses perawatan dan penanganan kerusakan permukaan. Hal ini jika dilakukan pada lokasi yang dipasang *pavement WIM* akan mengganggu pengukuran beban, karena penambahan tebal perkerasan dapat menutup sensor atau sensor memerlukan pemindahan sementara dari lokasi semula. Berdasarkan uraian di atas, maka pengukuran beban kendaraan yang dilakukan dengan menggunakan *pavement WIM* di Indonesia sebagian besar adalah pengukuran sementara, dengan durasi pengukuran selama dua hingga tujuh hari. Adapun beberapa pengukuran beban dengan *pavement WIM* yang sifatnya permanen, memerlukan sensor cadangan untuk mengganti sensor secara berkala akibat kelelahan pembacaan beban yang kontak secara langsung dengan sensor.

Maka pada tahun 2015, Puslitbang Jalan dan Jembatan mulai mengembangkan teknologi WIM baru di Indonesia, yaitu menggunakan struktur jembatan yang dilengkapi dengan sensor untuk merekam respons jembatan akibat beban kendaraan yang melintas. Respons tersebut kemudian diolah dengan algoritma tertentu untuk menentukan beban kendaraan yang melintas. Teknologi ini adalah WIM berbasis struktur jembatan (*bridge WIM*) yang menggunakan sensor *strain gauge* untuk mengukur regangan elemen lentur pada struktur jembatan, seperti gelagar maupun pelat lantai jembatan. Pada tahun 2016, dilakukan ujicoba model fisik dari konsep teknologi *bridge WIM* ini di Jembatan Cipeles,

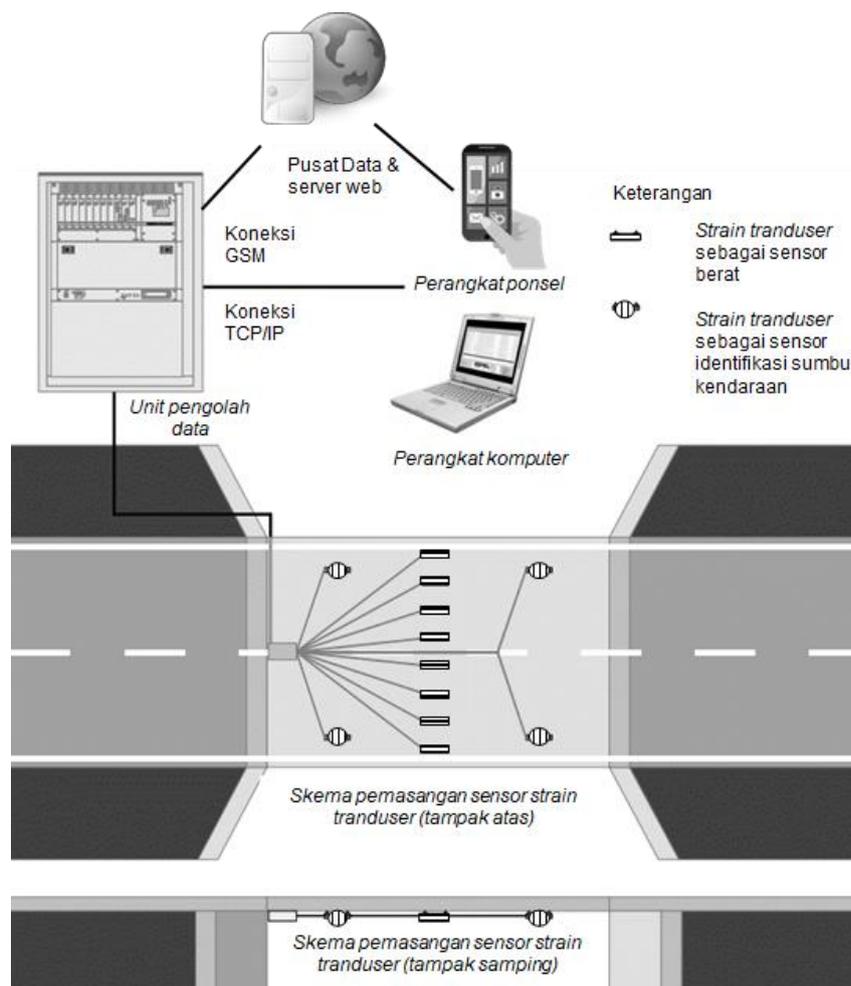
yaitu Jembatan tipe gelagar baja komposit bentang 30 m. Ujicoba model fisik ini masih sederhana, dengan tujuan dapat mengukur beban total kendaraan terlebih dahulu, dengan menggunakan sumber daya berupa komponen sensor dan unit pengambil data yang sudah tersedia di Indonesia. Jembatan Cipeles yang digunakan sebagai lokasi ujicoba ini berada di Kabupaten Sumedang, di Ruas Jalan Nasional Bandung-Cirebon, Provinsi Jawa Barat. Dari ujicoba model fisik ini, didapatkan hasil beban total kendaraan yang melintas selama waktu pengamatan, dengan tingkat selish pembacaan hasil *bridge WIM* terhadap truk yang diketahui beratnya secara statis adalah sebesar 5%. Dalam tulisan ini akan diuraikan bagaimana model fisik teknologi *bridge WIM* ini dapat diujicoba dan mendapatkan hasil beban total kendaraan yang melintas.

## KAJIAN PUSTAKA

### Perkembangan Teknologi *Bridge WIM*

Konsep teknologi *bridge WIM* pertama kali dikembangkan oleh Moses untuk mengukur beban gandar dari kendaraan (Moses 1979). Kendala

utama yang dihadapi dalam pengembangan teknologi *bridge WIM* adalah cara mendeteksi beban gandar dan jarak antar gandar. Pada awalnya, metode yang digunakan untuk mendeteksi beban gandar dan jarak antar gandar adalah menggunakan pipa pneumatik (*pneumatic tubes*) yang dipasang di permukaan perkerasan di atas jembatan atau dengan memasang *tape switches* di permukaan perkerasan jalan di atas jembatan (Zolghadri et al. 2016). Teknologi *bridge WIM* terus berkembang, diantaranya di Australia dan Eropa, lewat proyek penelitian AXWAY (Peters 1984), WAVE, COST323, 4<sup>th</sup> Framework Wave, dan 5<sup>th</sup> Framework TOP TRIAL (Jacob dan Feypell-de La Beaumelle 2010). Metode untuk mendeteksi beban gandar, jarak antar gandar, dan kecepatan kendaraan ikut berkembang, salah satunya dengan metode *free-of-axle detector (FAD)* yang pertama kali digunakan pada penelitian WAVE, tanpa memerlukan sensor apapun di atas permukaan jembatan, melainkan hanya menggunakan *strain transducer* yang dipasang pada elemen struktur di bagian bawah jembatan (Znidaric, Lavric, dan Kalin 2002).



**Gambar 1.** Skema sistem *Bridge WIM* (CESTEL dan ZAG Institute 2014)

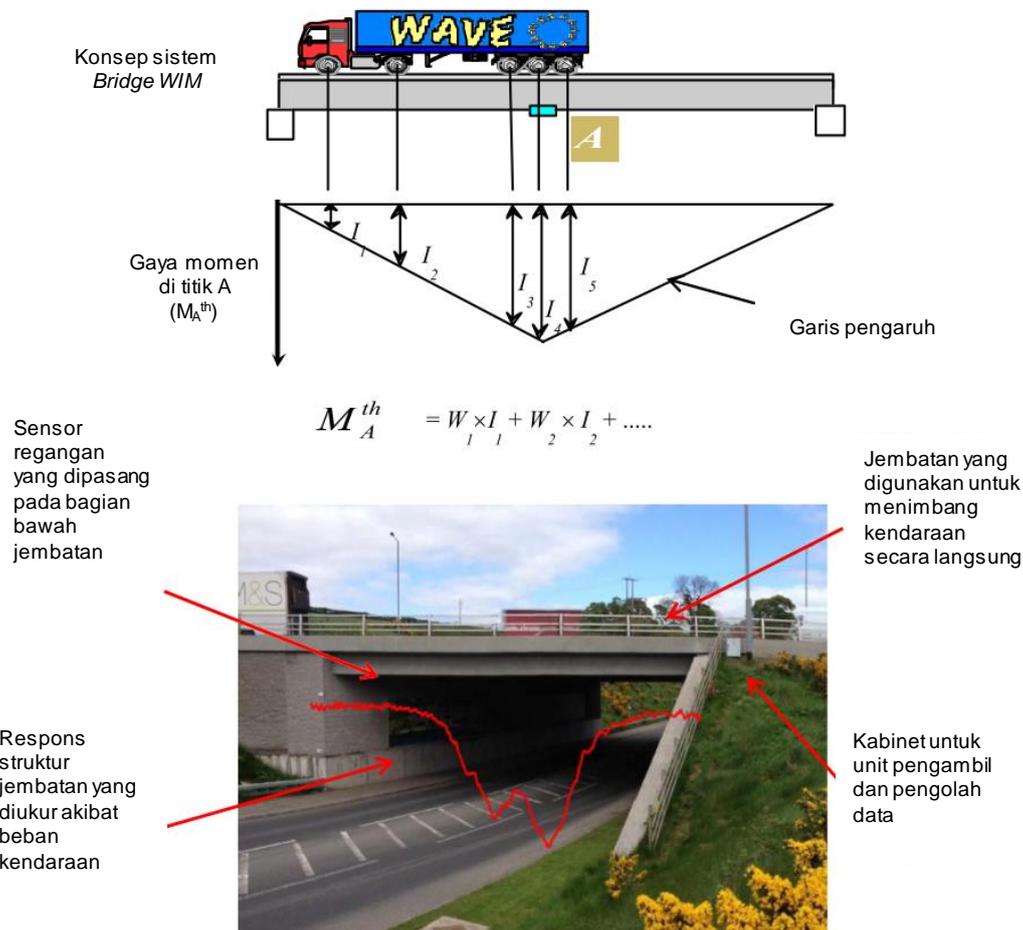
Saat ini, sudah tersedia produk *bridge WIM* dengan akurasi yang cukup tinggi dan dapat mengakomodasi pemantauan beban kendaraan secara daring lewat internet, dengan luaran berupa beban total kendaraan, beban gandar kendaraan, jarak antar gandar, kecepatan kendaraan, klasifikasi kendaraan, hingga foto dari kendaraan (CESTEL dan ZAG Institute 2014). Teknologi sensor nirkabel juga telah dicoba digunakan untuk sistem *bridge WIM* oleh *Georgia Institute of Technology*, dengan keseluruhan sistem *bridge WIM* nirkabel, yang terintegrasi dengan evaluasi tidak merusak (*nondestructive evaluation / NDE*) (Yang et al. 2014). Kemudian, pengembangan *bridge WIM* tanpa kontak (*contactless bridge WIM*) dilakukan oleh Ojio dkk. yang tidak menggunakan sensor apapun yang dipasang pada elemen jembatan, tetapi menggunakan kamera yang dilengkapi dengan teleskop untuk merekam defleksi jembatan akibat beban dengan akurat untuk diolah menjadi data beban kendaraan (Ojio et al. 2016)

### Prinsip Kerja *Bridge WIM*

Dalam skema yang digunakan pada teknologi *bridge WIM*, seperti dapat dilihat pada **Gambar 1**

terdapat beberapa komponen utama, yaitu sensor *strain gage* yang dipasang pada bagian bawah jembatan (baik pada gelagar maupun lantai jembatan) berfungsi untuk mengambil respons struktur akibat beban kendaraan yang melintas di atas jembatan. Kemudian, respons dari sensor ini dihubungkan melalui kabel menuju unit pengolah data, berupa piranti komputer (piranti keras dan piranti lunak), berfungsi untuk mengolah data respons dari sensor menjadi data data beban total, beban gandar, jarak antar gandar, kecepatan, klasifikasi dan jenis dari kendaraan yang melintas di atas jembatan (Gonzalez 2010).

Dari unit pengolah data, dapat dikembangkan skema pemantauan secara langsung dengan akses internet, seperti sistem *bridge WIM* yang dikembangkan oleh lembaga riset ZAG, Slovenia dengan perusahaan CESTEL (CESTEL dan ZAG Institute 2014). Fitur pemantauan daring hasil pengukuran beban kendaraan dengan *bridge WIM* dapat dimanfaatkan untuk penindakan masalah kendaraan *overload*, dimana hasil pengukuran beban kendaraan berupa foto dan detail beban kendaraan yang melintas dapat ditampilkan, untuk langsung dibandingkan dengan beban yang diijinkan.



**Gambar 2.** Konsep kerja sistem *bridge WIM* (Lydon et al. 2016)

Berdasarkan tingkat akurasi yang dapat diperoleh, tipe jembatan yang baik untuk digunakan sebagai *bridge WIM* antara lain adalah tipe gelagar dan tipe pelat atau *box culvert*. Selain itu, jembatan dengan lantai pelat ortotropik juga memberikan akurasi yang cukup baik untuk digunakan sebagai *Bridge WIM* (Gonzalez 2010). Tipe-tipe jembatan tersebut memberikan reaksi berupa momen lentur yang cukup dominan akibat beban kendaraan yang melintas, sehingga respons serat bawah elemen lentur jembatan tipe ini adalah tegangan tarik yang dapat diukur menggunakan sensor *strain transducer*.

Pada Gambar 1, sensor *strain transducer* yang dipasang pada tengah bentang jembatan adalah untuk mengukur berat kendaraan, karena respons struktur regangan tarik akibat momen lentur pada lokasi tersebut adalah yang paling besar. Sedangkan sensor *strain transducer* untuk mengukur kecepatan, mendeteksi beban gandar, dan mengukur jarak antar gandar dipasang pada jarak sekitar 4 m hingga 8 m tergantung dari panjang bentang jembatan yang digunakan (CESTEL dan ZAG Institute 2014). Respons struktur yang diukur dengan *strain transducer* ini dapat dikonversi menjadi beban gandar dan beban total kendaraan dengan sebuah algoritma pengolahan data, yang merupakan pengembangan dari algoritma Moses (Moses 1979). Pada algoritma Moses, diasumsikan bahwa momen lentur pada elemen jembatan ( $M_{th}$ ) proporsional terhadap beban bergerak yang bekerja pada jembatan ( $W$ ) dan ordinat garis pengaruh dari jembatan ( $I$ ). Konsep umum dari algoritma Moses yang bekerja pada sistem *bridge WIM* ini digambarkan pada Gambar 2.

## HIPOTESIS

Teknologi *bridge WIM* sederhana dapat diaplikasikan pada jembatan eksisting di Indonesia dengan memasang sensor *strain transducer* pada bagian bawah elemen lentur struktur jembatan, untuk mengukur beban kendaraan yang melintas di atas jembatan.

## METODOLOGI

Penelitian ini secara garis besar menggunakan metode penelitian eksperimental dengan model fisik dari teknologi *Bridge WIM* sederhana. Tahap pertama yang dilakukan pada

penelitian ini adalah melakukan survei detail terhadap jembatan yang akan digunakan. Kemudian, dilakukan pemasangan sensor *strain transducer* pada serat bawah dari elemen gelagar jembatan. Selanjutnya, data respons *strain transducer* akibat beban kendaraan yang melintas direkam dengan unit pengambil data (*Data Acquisition Device*). Data tersebut disimpan untuk kemudian diolah dengan data hasil kalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan beban kendaraan truk yang sudah diketahui beratnya secara statik.

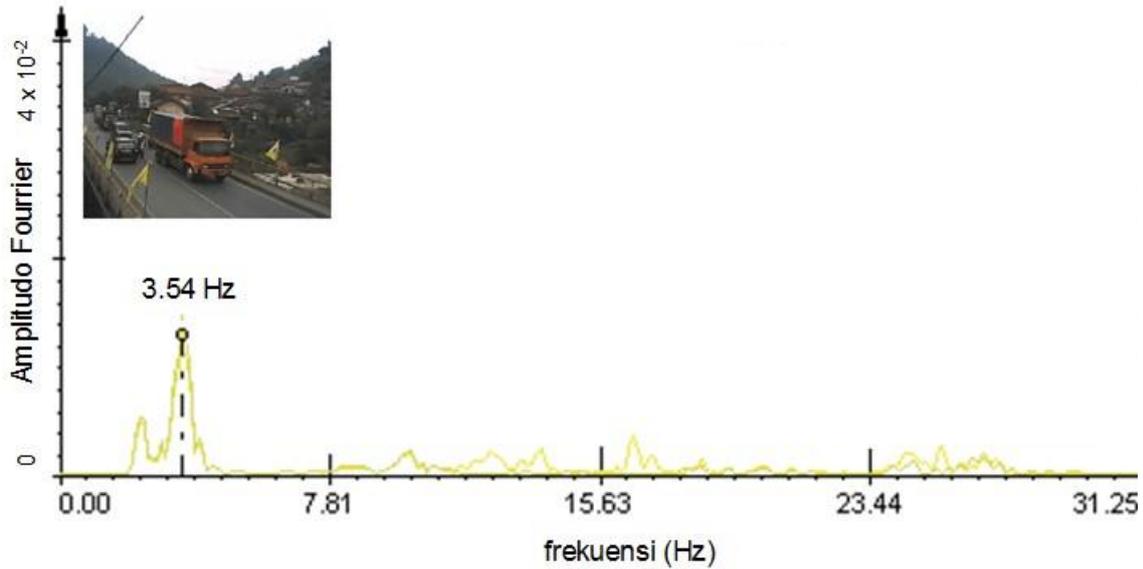
Dari data hasil survei detail jembatan berupa dimensi struktur jembatan, karakteristik material, dan frekuensi natural struktur jembatan, dapat dilakukan pembuatan model struktur jembatan dengan *Finite Element Method* dengan bantuan piranti lunak *CSI Bridge*. Model struktur jembatan dibuat dengan penyesuaian hasil kalibrasi dan frekuensi natural struktur jembatan sehingga dapat dilakukan simulasi pembebanan lain yang dapat memberikan respons berupa regangan akibat kendaraan lain yang melintas di atas jembatan. Dari simulasi dengan model ini dapat diketahui berat total kendaraan yang melintas berdasarkan respons yang sudah direkam.



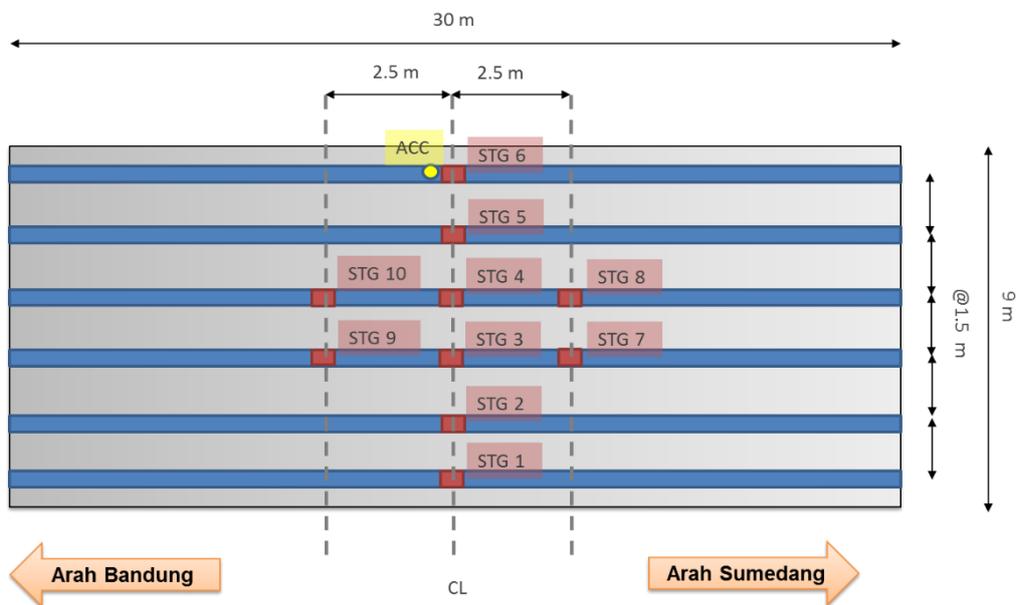
**Gambar 3.** Kondisi truk beriringan di atas Jembatan Cipeles (Nugraha dan Sukmara 2016)

## Survei Detail Jembatan

Jembatan yang digunakan sebagai lokasi untuk ujicoba model fisik teknologi *bridge WIM* sederhana adalah Jembatan Cipeles, Sumedang. Lokasi jembatan ini berada pada ruas Jalan Nasional Bandung-Cirebon, yang banyak dilintasi oleh truk bermuatan berat, di antaranya truk muatan pasir dari Cimalaka maupun truk muatan batubara dari Pelabuhan Cirebon, seperti terlihat pada Gambar 3. Hal ini akan memudahkan pembacaan respons regangan elemen gelagar jembatan, karena beban yang melintas cukup besar.

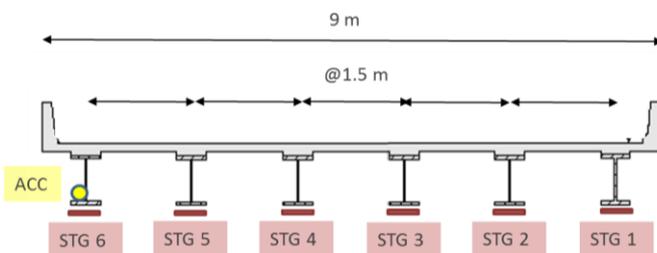


**Gambar 4.** Respons getaran Jembatan Cipeles untuk mendapatkan frekuensi natural struktur jembatan



Keterangan: ■ : gelagar baja; ■ : pelat lantai beton; ■ : sensor strain transducer (STG); ● : sensor accelerometer (ACC)

**Gambar 5.** Skema pemasangan sensor strain transducer (STG) dan accelerometer (ACC) di Jembatan Cipeles (tampak bawah)



**Gambar 6.** Skema pemasangan sensor strain transducer (STG) dan accelerometer (ACC) di Jembatan Cipeles (tampak melintang-tengah bentang)

Jembatan Cipeles merupakan jembatan tipe gelagar baja komposit Jepang (MBJ) dengan panjang bentang 30 m dan lebar jembatan 9 m.

Dalam survei detail, dilakukan juga pengukuran dimensi dari jembatan dan elemen gelagar. Dari hasil pengukuran, didapat jarak antar gelagar

adalah 1,5 m dengan jumlah total gelagar adalah 6 buah gelagar. Dimensi gelagar adalah sebagai berikut: tinggi total 1.390 mm, lebar flens 420 mm, tebal pelat badan 12,5 mm, dan tebal flens 25,6 mm. Kemudian karakteristik material baja gelagar diukur dengan menggunakan metode *non destructive test (NDT)* yaitu menggunakan *Hardness Test* untuk material baja. Dari hasil pengujian dengan metode *Hardness Test* baja didapat mutu dari baja adalah mutu tegangan leleh  $f_y$  410 MPa, dan tegangan *ultimate*  $f_u$  550 MPa.

Sedangkan frekuensi natural dari jembatan didapat dengan melakukan perekaman respons dinamis jembatan dengan sensor *accelerometer* pada kondisi getaran bebas. Kondisi getaran bebas ini adalah kondisi saat jembatan bergetar tepat setelah sebuah kendaraan melintas di atas jembatan. Data rekaman berupa data seri percepatan terhadap waktu diolah dengan metode *fourrier transform* untuk merubah domain data waktu menjadi data frekuensi. Untuk jembatan Cipeles ini, didapatkan nilai frekuensi natural struktur jembatan sebesar 3,54 Hz, seperti dapat dilihat pada Gambar 4. Nilai ini dapat diacu untuk membuat model dengan nilai frekuensi struktur model jembatan yang mendekati nilai frekuensi natural struktur jembatan aktual tersebut.

### Pemasangan Sensor Pada Jembatan

Setelah dilakukan survei detail jembatan, diketahui dimensi jembatan berupa panjang jembatan dan lebar jembatan, juga jumlah gelagar baja yang digunakan. Informasi ini digunakan untuk menentukan jumlah sensor dan lokasi pemasangan sensor pada jembatan. Mengacu pada skema *bridge WIM*, pada Gambar 1, sensor *strain transducer* untuk mengukur beban kendaraan dipasang di tengah bentang jembatan dengan jarak tertentu. Untuk jembatan tipe gelagar, sensor *strain transducer* dipasang di setiap gelagar, dengan jumlah total gelagar sebanyak enam buah. Sedangkan sensor untuk mengukur kecepatan dipasang dengan jarak 2,5 m sebelum dan sesudah tengah bentang pada gelagar nomor 3 dan nomor 4. Skema pemasangan sensor pada Jembatan Cipeles dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Dalam uji coba model fisik teknologi *Bridge WIM* sederhana ini, dipasang juga kamera untuk merekam dan memberikan gambaran kendaraan apa yang melintas saat

terjadi suatu respons yang terbaca pada unit pengambil data. Informasi berupa gambar kendaraan ini diperlukan dalam proses evaluasi perhitungan beban dari data respons regangan dari sensor *strain transducer*.

### Kalibrasi dengan Truk Beban

Kalibrasi dari sistem *bridge WIM* sederhana pada uji coba model fisik ini dilakukan dengan menggunakan beban kendaraan truk yang sudah diketahui beratnya secara statik. Adapun truk uji yang digunakan untuk kalibrasi adalah truk tipe tiga sumbu dengan muatan batu bara, seperti dapat dilihat pada Gambar 7. Truk tiga sumbu dengan muatan batu bara seperti ini banyak melintasi ruas Bandung-Cirebon. Truk ini ditimbang terlebih dahulu secara statis dengan berat total kendaraan 40.860 kg.



**Gambar 7.** Truk uji yang digunakan untuk keperluan kalibrasi (Nugraha dan Sukmara 2016)

Truk uji ini akan melintas di atas jembatan dalam tiga skema, dengan tiap skema dilakukan untuk kedua arah. Skema pertama adalah truk berhenti di tengah jembatan dimana lalu lintas akan ditutup sementara. Skema kedua adalah truk bergerak melintasi jembatan dengan kecepatan relatif rendah (sekitar 10-20 km/jam). Sedangkan skema terakhir adalah truk bergerak melintasi jembatan dengan kecepatan lebih tinggi (sekitar 20-35 km/jam).

### Pengukuran Respons *Strain Transducer*

Respons *strain transducer* akibat beban kendaraan direkam menggunakan unit pengambil data. Sebelum dihubungkan dengan unit pengambil data, masing-masing kabel yang terhubung dengan sensor *strain transducer* dihubungkan dengan resistor presisi, untuk dilakukan kalibrasi bacaan sensor dengan metode *shunt calibration*. *Shunt calibration*

adalah metode untuk mensimulasikan regangan pada sebuah *strain transducer piezo-resistive* dengan rangkaian jembatan *wheatstone* dengan memasang *shunt* pada satu kaki dari rangkaian jembatan *wheatstone*. Dari proses ini didapat faktor kalibrasi yang dapat dimasukkan ke dalam piranti lunak unit pengolah data (Nugraha dan Sukmara 2016).

Unit pengambil data yang digunakan dalam ujicoba model fisik teknologi *bridge WIM* sederhana ini adalah DEWETRON tipe *portable*, dengan piranti lunak pengambil data DEWESOFT. Hasil bacaan respons *strain transducer* dapat ditampilkan secara langsung pada layar unit pengambil data lewat penggunaan piranti lunak ini. Perekaman data respons dari sensor dilakukan sebelum sebuah kendaraan melintasi jembatan hingga kendaraan tersebut selesai melintasi jembatan secara kontinu.

### Perhitungan Kecepatan Kendaraan

Berdasarkan skema pemasangan sensor *strain transducer* pada Gambar 5, pada setiap lajur dipasang dua sensor masing-masing berjarak 2.5 m dari tengah bentang. Pemasangan sensor di lokasi ini dimaksudkan untuk mengukur kecepatan kendaraan yang melintasi jembatan. Perhitungan kecepatan dilakukan dengan data dasar berupa respons sensor berurutan di masing-masing lajur lalu lintas.

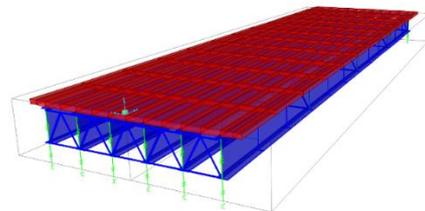
Untuk mendapatkan besaran kecepatan, puncak respons regangan untuk masing-masing lajur lalu lintas sensor (STG 7, STG 3, STG 9 untuk arah Bandung dan STG 10, STG 4, STG 8 untuk arah Sumedang) akibat beban suatu kendaraan yang melintas perlu diperhatikan. Dengan selisih waktu antar kejadian puncak regangan dari masing masing sensor yang berurutan, dengan jarak antar sensor yang diketahui, maka kecepatan kendaraan relatif saat melintasi jembatan dapat diperhitungkan. Sebagai data pembanding, dilakukan pengukuran kecepatan dengan bantuan alat *Speed gun* dari tepi jalan untuk sepuluh sampel kendaraan yang direkam.

### Pemodelan dan Analisis Struktur Jembatan

Model struktur dari Jembatan Cipeles dibuat menggunakan *software* CSI Bridge secara 3 dimensi, dapat dilihat pada Gambar 8. Jembatan Cipeles ini merupakan jembatan gelagar baja tipe komposit dengan panjang bentang 30 m

dengan peletakan sederhana, lebar jembatan 9 m. Besaran nominal dari karakteristik material struktur yang digunakan adalah beton dengan mutu kuat tekan  $f_c' = 20$  MPa dengan spesifikasi berat unit ( $\gamma$ ) = 2.400 kg/m<sup>3</sup>, dan baja gelagar dengan mutu tegangan leleh  $f_y = 410$  MPa.

Frekuensi natural jembatan hasil pengukuran 3,54 Hz digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan model yang memiliki kekakuan yang sama dengan kondisi aktual Jembatan Cipeles, dengan menyesuaikan modulus Elastisitas dari elemen gelagar. Pada model, didapat frekuensi natural struktur 3,55 Hz yang sudah menggambarkan frekuensi natural hasil uji dinamis. Sehingga dapat dilakukan simulasi pembebanan untuk kendaraan kalibrasi dan juga kendaraan lain. Simulasi pembebanan untuk kendaraan lain yang direkam dengan unit pengambil data dilakukan dengan memberikan beban pada model untuk kemudian dicocokkan respons pada model dengan respons regangan aktual yang direkam saat kendaraan tersebut melintas di atas jembatan. Sehingga, dengan simulasi pembebanan pada model ini, dapat diketahui berat total kendaraan yang melintas dengan menyesuaikan respons aktual yang sudah direkam dengan respons pada simulasi pembebanan model.



**Gambar 8.** Model struktur Jembatan Cipeles (Nugraha dan Sukmara 2016)

## HASIL DAN ANALISIS

### Kalibrasi dengan Truk Beban

Kalibrasi dilakukan dengan merekam respons dari sensor *strain transducer*, akibat beban kendaraan truk kalibrasi yang melintas di atas jembatan. Seperti yang telah diuraikan pada bagian Metodologi, kalibrasi dilakukan dalam tiga skema, salah satu skema yaitu skema pertama, dimana truk masuk ke jembatan arah ke Bandung dan berhenti sementara di tengah bentang jembatan, menghasilkan grafik respons regangan pada *strain transducer* nomor 1, 2, dan 3 (skema penomoran sensor mengacu pada

Gambar 5 dan Gambar 6) yang ditampilkan pada Gambar 9.

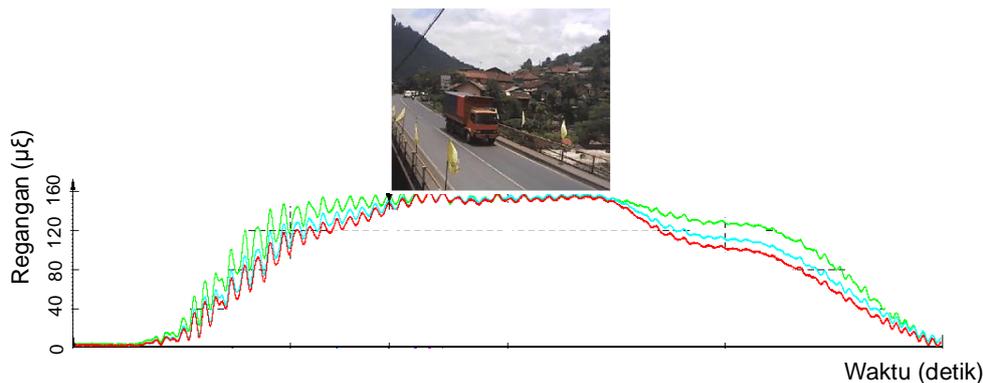
Untuk skema pertama, didapatkan respon regangan maksimal yang relatif statis terhadap waktu, selama truk masih berada di atas jembatan dan belum ada kendaraan lain yang melintas. Selisih bacaan regangan maksimal yang terjadi saat truk berada di atas jembatan dengan regangan minimal yang terjadi pada kondisi jembatan kosong, adalah besaran perubahan regangan yang terjadi akibat beban truk uji. Besaran ini dapat diolah dan disandingkan dengan model yang dibuat untuk acuan penentuan berat kendaraan lainnya. Adapun hasil respon struktur terhadap beban truk uji untuk semua tahapan kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 1.

### Pemodelan dan Analisis Struktur

Setelah respons *strain transducer* pada jembatan akibat beban truk uji pada tahapan kalibrasi didapatkan, maka proses kalibrasi selanjutnya adalah mengkalibrasi model struktur yang telah dibuat, agar mendapatkan respons model yang paling mendekati perilaku aktual jembatan. Hal ini dilakukan agar model yang terkalibrasi dapat digunakan untuk menghitung beban kendaraan lain yang melintasi jembatan dari respons *strain transducer* yang telah direkam selama ujicoba berlangsung.

Setelah model struktur disesuaikan kekakuan dinamisnya dengan mendapatkan frekuensi natural struktur yang sama dengan kondisi aktual, yaitu 3,54 Hz. Selanjutnya, model struktur diberikan beban kendaraan sesuai dengan beban kendaraan truk uji yang digunakan untuk proses kalibrasi. Kendaraan truk diberikan pada model dengan fitur *moving load*, dengan memasukkan data dimensi berupa jarak antar sumbu dan jarak antar dua roda dan data besaran beban masing-masing sumbu kendaraan truk uji. Adapun jarak sumbu pertama dan sumbu kedua adalah 4 m dan jarak sumbu kedua dengan sumbu ketiga adalah 1,35 m. Jarak antara roda kiri dan kanan adalah 1,9 m. Berat sumbu pertama adalah 6,13 ton dan berat sumbu kedua dan ketiga adalah sama, yaitu 17,37 ton. Berat ini didapat dari hasil pengukuran statis, dimana didapat beban total 48,03 ton.

Analisis terhadap beban kendaraan bergerak pada model ini kemudian dilakukan hingga didapatkan respons berupa regangan di lokasi sensor *strain transducer* dipasang pada jembatan aktual, yaitu di tengah bentang masing-masing gelagar. Besaran ini kemudian dibandingkan dengan respon aktual perubahan regangan untuk ketiga skema kalibrasi yang telah dilakukan, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 10 untuk arah Bandung (lajur 1) dan Gambar 11 untuk arah Sumedang (lajur 2)



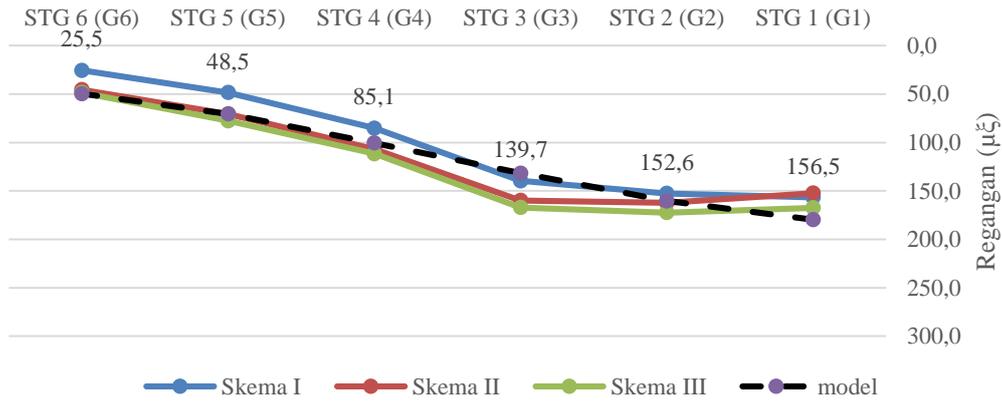
Keterangan: hijau – STG 1, biru – STG2, merah – STG 3

**Gambar 9.** Respons sensor *strain transducer* akibat beban truk kalibrasi di lajur 1 (arah Bandung)

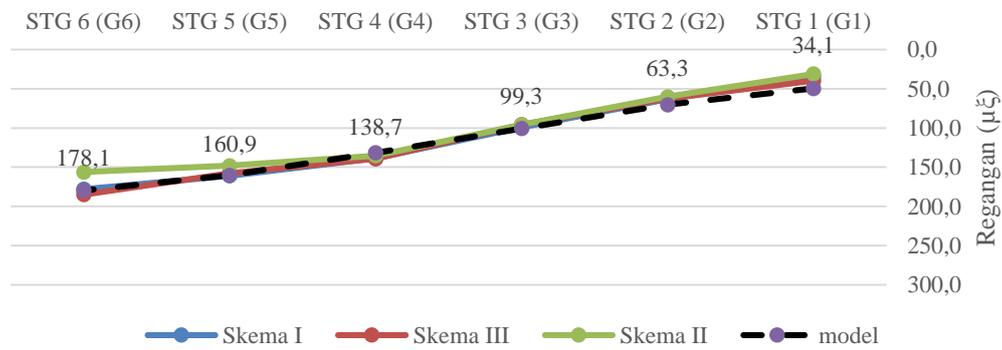
**Tabel 1.** Resume respons *strain transducer* untuk seluruh proses kalibrasi

No	Jenis Kendaraan	Berat total (ton)	Skema	Arah	Kecepatan (km/jam)	Perubahan regangan <i>strain transducer</i> ( $\mu\epsilon$ )					
						STG1 (G1)	STG2 (G2)	STG3 (G3)	STG4 (G4)	STG5 (G5)	STG6 (G6)
1	Truk 3 sumbu - batu bara	48.03	Skema I	BDG	0 (statis)	156,5	152,6	139,7	85,1	48,5	25,5
2			I	SMD		34,1	63,3	99,3	138,7	160,9	178,1
3			Skema II	BDG	20,89	152,3	162,4	159,8	107,0	70,7	45,5
4			II	SMD	22,43	31,1	60,2	95,8	135,2	148,1	156,2
5			Skema III	BDG	20,93	167,5	172,3	167,1	111,5	77,6	48,4
6			III	SMD	14,32	39,9	62,3	95,8	139,2	157,6	185,0

Keterangan: BDG – Bandung; SMD – Sumedang



**Gambar 10.** Kalibrasi model dengan Truk arah Bandung (lajur 1)



**Gambar 11.** Kalibrasi model dengan Truk arah Sumedang (lajur 2)

**Tabel 2.** Perhitungan beban total kendaraan dari model *bridge WIM* dan simpangan terhadap beban statis

No	Jenis Kendaraan	Arah	Skema	Rata-rata perubahan regangan <i>strain transducer</i> ( $\mu\epsilon$ )			Berat hasil perhitungan (ton)	Error	Rata-rata Error
				STG1, STG2, STG3	STG4, STG5, STG6	Model			
1	Truk 3 sumbu - batu bara	BDG	I	149,6			45,7	4,8%	3,87%
2			II	158,2			48,3	0,6%	
3			III	169,0			51,6	7,5%	
4		SMD	I		159,2	157,2	48,6	1,3%	
5			II		146,5		44,8	6,8%	
6			III		160,6		49,1	2,2%	

Untuk memisahkan efek beban kendaraan di masing-masing lajur, maka dalam perhitungan berat kendaraan, hanya digunakan respons rata-rata dari tiga buah sensor *strain transducer* untuk masing-masing lajur (Gonzalez 2010). *Strain transducer* STG1, STG2, STG3 digunakan sebagai acuan perhitungan untuk arah Bandung (lajur 1) dan STG4, STG5, STG6 untuk arah

Sumedang (lajur 2). Berdasarkan hal tersebut, akurasi model yang dibuat untuk menghitung beban kendaraan dapat dihitung berdasarkan algoritma Moses, dengan garis pengaruh yang diwakili oleh model struktur yang dibuat dengan kondisi yang serupa dengan kekakuan aktual jembatan (Zolghadri et al. 2016).

**Tabel 3.** Hasil perhitungan beban total kendaraan dari model *bridge WIM* untuk semua kendaraan selain truk uji

No	Jenis Kendaraan	Arah	Rata-rata perubahan regangan <i>strain transducer</i> ( $\mu\epsilon$ )			Berat hasil perhitungan (ton)
			STG1, STG2, STG3	STG4, STG5, STG6	Model	
1	Truk 2 sumbu A	BDG	51,1			15,6
2	Truk 2 sumbu B	BDG	72,9			22,3
3	Truk 2 sumbu A	BDG	56,5			17,3
4	Truk 2 sumbu B	BDG	63,2			19,3
5	Truk 3 sumbu	SMD		143,6		43,9
6	Truk 3 sumbu Kargo	BDG	114,9			35,1
7	TRUK 2 sumbu	BDG	54,1			16,5
8	Truk 3 sumbu batu bara	BDG	154,8			47,3
9	Truk 2 sumbu	SMD		75,6		23,1
10	Truk 3 sumbu	BDG	124,9			38,2
11	Truk 2 sumbu	BDG	68,5			20,9
12	Truk 2 sumbu	SMD		39,1	157,2	12,0
13	Truk 3 sumbu	BDG	122,7			37,5
14	Truk 3 sumbu	BDG	106,7			32,6
15	Truk 2 sumbu	BDG	44,3			13,5
16	Truk 2 sumbu	BDG	53,2			16,3
17	Truk 3 sumbu-batu bara	BDG	156,4			47,8
18	Truk 2 sumbu	BDG	58,8			18,0
19	Truk 3 sumbu - pasir	BDG	122,2			37,3
20	Truk 2 sumbu	BDG	72,7			22,2
21	Truk 2 sumbu	BDG	70,0			21,4
22	Truk 2 sumbu	BDG	61,6			18,8

Secara sederhana, berat kendaraan dari model bisa didapat dengan menghitung rasio respons model terhadap respons aktual, dikalikan dengan berat kendaraan statis aktual. Pada Tabel 2 ditampilkan hasil perhitungan berat total kendaraan dari model *bridge WIM* dan akurasiya dibandingkan dengan beban kendaraan statis aktual. Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2, simpangan (*error*) rata-rata perhitungan beban total kendaraan dengan menggunakan model *bridge WIM* ini adalah 3,87%. Dalam spesifikasi pengukuran beban kendaraan dengan *WIM* di Eropa, yaitu COST323, untuk besaran beban total kendaraan, pengukuran beban dengan *WIM* yang menghasilkan simpangan bacaan kurang dari 5% dibanding dengan pengukuran statis, dapat dikategorikan sebagai pengukuran *WIM* dengan

akurasi kelas A(5) atau kelas akurasi paling tinggi dari pengukuran *WIM* (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 2002).

### Beban Total dan Kecepatan Kendaraan

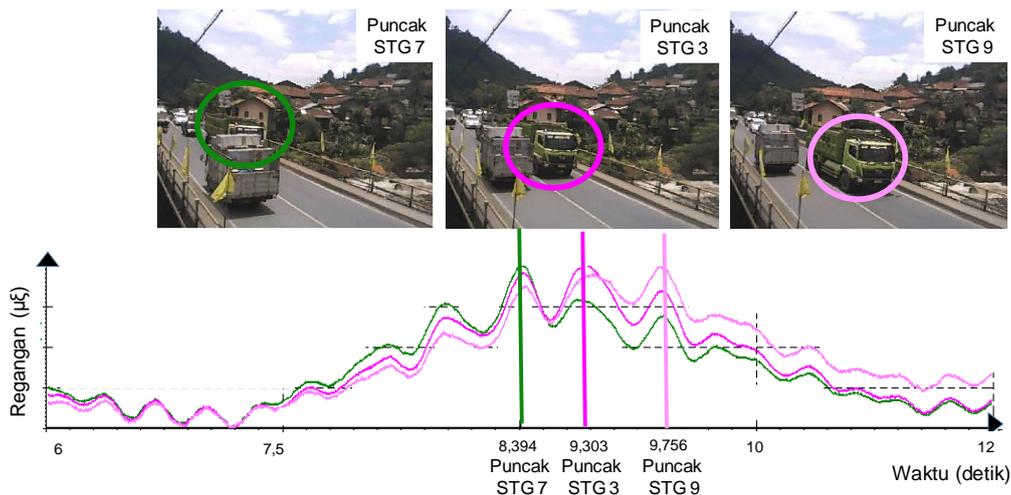
Dari data respons jembatan yang diambil dengan sensor *strain transducer* akibat beban kendaraan yang melintas (selain truk uji), dapat dihitung kecepatan dan beban total kendaraan sesuai metode yang digunakan dalam penelitian ini. Untuk beban total kendaraan, digunakan perhitungan dengan rasio terhadap model yang telah diuraikan di atas untuk beban truk uji pada tahapan kalibrasi. Hasil perhitungan beban total untuk beberapa kendaraan yang direkam selama masa ujicoba model fisik ditampilkan pada Gambar 13 (termasuk kecepatan kendaraan yang

perhitungannya akan dibahas pada paragraf selanjutnya) dan Tabel 3.

Sedangkan untuk kecepatan kendaraan, sesuai metode yang digunakan pada penelitian ini, berikut adalah contoh perhitungan kecepatan untuk salah satu kendaraan yang merupakan truk 3 sumbu arah Bandung. Untuk lajur arah Bandung, respons yang perlu diamati adalah respons dari *strain transducer* STG7, STG3, dan STG9 yang dipasang berurutan pada arah lalu lintas, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 13. Berdasarkan pencatatan waktu terjadinya regangan puncak untuk masing-masing respons *strain transducer*, dapat dihitung kecepatan kendaraan berdasarkan jarak antar sensor dan selisih waktu terjadinya puncak regangan pada masing-masing sensor tersebut.

Untuk kendaraan ini seperti dapat dilihat pada Gambar 12, puncak pertama terjadi pada waktu 8,394 detik sejak respons direkam, yaitu pada STG7. Puncak kedua, yaitu di tengah

bentang, pada STG3, terjadi puncak regangan saat waktu berjalan 9,303 detik. Puncak regangan ketiga, pada STG9, terjadi saat waktu berjalan 9,756 detik. Dengan jarak masing-masing sensor berurutan adalah 2,5 m, maka kecepatan saat melintas antara STG7 dan STG3 adalah  $(2,5 \text{ m}) / (9,303 - 8,394 \text{ detik}) = 5,52 \text{ m/detik}$  atau setara 19,87 km/jam. Sedangkan saat melintas antara STG3 dan STG9, kecepatan kendaraan ini adalah 24,39 km/jam. Sehingga kecepatan rata-rata kendaraan ini di atas jembatan adalah 22,13 km/jam. Hasil pengolahan data kecepatan kendaraan ini beserta sembilan sampel lainnya dapat dilihat pada Tabel 4. Pada tabel tersebut dapat dilihat perbandingan kecepatan terukur oleh *bridge WIM* dan terukur dengan *Speed Gun* dan didapatkan galat perhitungan rata-rata untuk sepuluh sampel yaitu 9,3%.



**Gambar 12.** Puncak regangan untuk ketiga sensor kecepatan, arah Bandung

**Tabel 4.** Hasil perhitungan kecepatan *bridge WIM* untuk sepuluh sampel kendaraan dibandingkan hasil pengukuran *speed gun*

No.	Jenis Kendaraan	Waktu puncak regangan <i>strain transducer</i> (detik)			Kecepatan (km/jam) <i>Bridge WIM</i>		Kecepatan (km/jam) <i>Speed Gun</i>	Galat
		STG7/ STG10 (x=12,5m)	STG 3/ STG4 (x=15m)	STG9/ STG8 (x=17,5m)	v1	v2		
1	Truk 3 sumbu	8,934	9,303	9,756	19,87	24,39	24	7,8%
2	Truk 3 sumbu	6,629	6,956	7,357	22,44	27,52	24	4,1%
3	Truk 2 sumbu	6,474	6,782	7,288	17,79	29,22	21	11,9%
4	Truk 2 sumbu	5,880	6,231	6,535	29,61	25,64	28	1,3%
5	Truk 3 sumbu-batu bara	24,320	24,833	25,181	25,86	17,54	26	16,5%
6	Truk 2 sumbu	15,779	16,139	16,590	19,96	25,00	20	12,4%
7	Truk 3 sumbu - pasir	7,853	8,327	8,748	21,38	18,99	24	15,9%
8	Truk 2 sumbu	7,844	8,139	8,679	16,67	30,51	21	12,3%
9	Truk 2 sumbu	28,596	28,949	29,286	26,71	25,50	23	13,5%
10	Truk 2 sumbu	36,258	36,607	36,993	23,32	25,79	25	1,8%
Rata-rata galat								9,8%



**Gambar 13.** Hasil perhitungan beban total kendaraan dan kecepatan kendaraan dari *bridge WIM*

## PEMBAHASAN

Konsep teknologi *bridge WIM* sederhana dapat diterapkan pada penelitian ini untuk mengukur beban kendaraan yang melintas, khususnya untuk besaran beban total kendaraan dan kecepatan kendaraan. Penggunaan prinsip Moses, yang menyatakan berat kendaraan yang melintas di atas jembatan adalah sebanding dengan garis pengaruh gaya dalam momen lentur yang terjadi pada elemen lentur jembatan, berhasil dilakukan dengan membuat model struktur jembatan yang disesuaikan dengan kondisi aktual sebagai representasi dari garis pengaruh momen lentur dari jembatan aktual. Sehingga, respons aktual bisa diperhitungkan menjadi beban kendaraan dengan melakukan simulasi pembebanan dengan respons dari kendaraan yang telah diketahui beratnya secara statis pada tahapan kalibrasi.

Untuk besaran beban sumbu kendaraan, pemasangan sensor pendeteksi sumbu kendaraan yang dipasang pada gelagar tidak memberikan respons yang signifikan terhadap pengaruh sumbu kendaraan, dimana untuk satu kendaraan hanya muncul satu puncak respons regangan. Hal ini kemungkinan disebabkan jarak antara kontak roda dari kendaraan dengan sensor terlalu jauh (setinggi gelagar ditambah pelat lantai, sekitar 1,6 m).

Pada jembatan tipe *culvert*, semua sensor dipasang pada permukaan bawah dari pelat lantai jembatan, sehingga respons yang dihasilkan memiliki beberapa puncak respons regangan untuk satu kendaraan. Jumlah puncak respons regangan untuk satu kendaraan ini mengindikasikan jumlah sumbu dari kendaraan. Posisi masing-masing puncak regangan untuk

satu kendaraan ini mengindikasikan posisi dan jarak antar sumbu dari kendaraan tersebut. Hal ini bisa terjadi kemungkinan karena jarak dari sensor terhadap kontak roda kendaraan cukup dekat, hanya setebal pelat lantai jembatan *culvert*, sehingga respons yang dihasilkan akibat beban sumbu kendaraan bisa lebih jelas terlihat.

Berdasarkan hal tersebut, untuk jembatan tipe gelagar, sebaiknya sensor untuk kebutuhan mengidentifikasi sumbu kendaraan dipasang pada bagian pelat lantai. Sedangkan untuk sensor pengukur berat kendaraan, tetap dipasang pada flens bawah gelagar di tengah bentang, untuk mendapatkan respons terbesar akibat beban kendaraan yang melintas. Dengan memasang sensor identifikasi sumbu kendaraan pada bagian pelat lantai, seperti pada jembatan *culvert*, bisa dihasilkan respons akibat sumbu kendaraan yang lebih jelas, sehingga memudahkan untuk perhitungan kontribusi beban sumbu kendaraan dari berat total kendaraan yang sudah dapat dihasilkan dari ujicoba model fisik teknologi *bridge WIM* sederhana yang sudah dilakukan ini, dengan akurasi yang cukup tinggi (simpangan terhadap pengukuran statis <5%, lihat Tabel 2).

Tingkat akurasi dari pengukuran beban kendaraan bergerak dengan sistem *bridge WIM* bergantung pada tipe struktur, kualitas pemasangan instrumen pengukuran, tipe kalibrasi dan kondisi permukaan perkerasan di atas jembatan dan jalan pendekat (CESTEL dan ZAG Institute 2014). Selain itu, menurut Gonzalez, sistem *bridge WIM* memang cenderung untuk lebih akurat dalam memperhitungkan beban total kendaraan dibanding dengan beban sumbu kendaraan (Gonzalez 2010).

Sedangkan untuk besaran kecepatan kendaraan, jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan *speed gun*, simpangan perhitungan yang didapat dengan perhitungan *bridge WIM* sederhana kurang dari 10% (lihat Tabel 4). Penggunaan *speed gun* cukup sensitif terhadap pengaruh dari cara pemakaian *speed gun* itu sendiri. Sehingga perbandingan untuk besaran kecepatan ini sebaiknya dilakukan dengan pengukuran pembanding yang lebih akurat, misal menggunakan *speedometer* pada kendaraan atau menggunakan pengukur kecepatan GPS oleh penumpang kendaraan saat melintas di atas jembatan. Sebagai langkah awal, ujicoba konsep teknologi *bridge WIM* sederhana di Indonesia ini cukup baik, dengan kekurangan-kekurangan yang didapat bisa menjadi pembelajaran untuk penelitian *bridge WIM* selanjutnya.

Sebagai perbandingan biaya yang diperlukan untuk pengukuran beban kendaraan selama satu minggu dengan sistem *bridge WIM* sederhana dengan sistem *bridge WIM ZAG* dan Cestel dari Slovenia dengan sistem sewa sistem, yaitu sekitar 45% s.d. 50% (Nugraha dan Sukmara 2016). Komponen biaya terbesar untuk sistem *bridge WIM ZAG* dan Cestel ada di perangkat lunak pengolahan data, sedangkan pada sistem *bridge WIM* sederhana, pengolahan data dilakukan manual seperti yang dilakukan pada tulisan ini.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari uji coba model fisik teknologi *bridge WIM* sederhana yang dilakukan dengan memanfaatkan Jembatan Cipeles, Sumedang yang berada di ruas jalan nasional Bandung-Cirebon ini didapat bahwa beban total kendaraan yang melintas di atas jembatan ini dapat diukur dan diperhitungkan, dengan simpangan pengukuran dibandingkan pengukuran beban statis adalah 3,8%. Tingkat akurasi ini, menurut spesifikasi pengukuran beban kendaraan dengan sistem *WIM* (baik sistem *pavement-based WIM* maupun *bridge WIM*), merupakan akurasi kelas paling tinggi, yaitu A(5), dengan simpangan rata-rata kurang dari 5% terhadap pengukuran secara statis.

Selain besaran beban total kendaraan, kecepatan kendaraan dapat diukur berdasarkan waktu kendaraan melintas di atas sensor *strain*

*transducer* yang dipasang pada arah memanjang di masing-masing lajur lalu lintas, dengan simpangan pengukuran terhadap pengukuran kecepatan dengan *speed gun* adalah 9,8%. Dengan demikian, teknologi *bridge WIM* sederhana ini memiliki kinerja yang cukup baik untuk mengukur beban total kendaraan dan kecepatan kendaraan yang melintas di atas jembatan.

### Saran

Untuk keperluan pengukuran beban kendaraan dengan *bridge WIM*, masih banyak yang perlu dibenahi dan ditambahkan dari model fisik ini, antara lain adalah pemasangan sensor untuk mendeteksi sumbu kendaraan pada jembatan tipe gelagar sebaiknya dilakukan pada bagian bawah pelat lantai agar puncak respons regangan akibat beban sumbu dapat lebih jelas terekam. Selain itu pada proses pengolahan data, sebaiknya dikembangkan piranti lunak dengan algoritma pengolahan data beban kendaraan secara langsung di tempat, bahkan dapat dipantau hasilnya secara langsung lewat akses web seperti yang telah dilakukan oleh ZAG dan Cestel dari Slovenia (CESTEL dan ZAG Institute 2014). Pengembangan sistem *bridge WIM* sederhana dapat dilanjutkan untuk kebutuhan pengukuran *WIM* di daerah dengan biaya yang lebih murah.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR karena telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan penelitian uji coba model fisik *WIM Bridge* pada tahun 2016 lewat kegiatan Litbang Teknologi Identifikasi Berat dan Jumlah Kendaraan dengan Memanfaatkan Struktur Jembatan Sebagai Transduser (*WIM Bridge*).

## DAFTAR PUSTAKA

- CESTEL, dan ZAG Institute. 2014. *SiWIM Manual*. Ljubljana: CESTEL.
- Gonzalez, Arturo. 2010. *Development of a bridge weigh-in-motion system: A technology to convert the bridge response to the passage of traffic into data on vehicle configurations, speeds, times of travel and weights*. Germany: LAP Lambert Academic Publishing AG

- & Co. KG. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing AG & Co. KG.
- Haugen, Torbjorn, Jorunn R. Levy, Erlend Aakre, and Maria Elena Palma Tello. 2016. "Weigh-in-Motion Equipment - Experiences and Challenges." In *Transportation Research Procedia*. Vol. 14. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.215.
- Jacob, Bernard, dan Véronique Feypell-de La Beaumelle. 2010. "Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology." *IATSS Research* 34 (1): 9–15. doi:10.1016/j.iatssr.2010.06.003.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 2002. "COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report (1993-1998)." Paris.
- Lydon, Myra, S. E. Taylor, D. Robinson, A. Mufti, and E. J O'Brien. 2016. "Recent developments in bridge weigh in motion (B-WIM)." *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 6 (1): 69–81. doi:10.1007/s13349-015-0119-6.
- Moses, F. 1979. "Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges." *Transportation Engineering Journal of ASCE* 105 (3): 233–49.
- Nugraha, Widi, dan Gatot Sukmara. 2016. *WIM Bridge: Uji Coba Model Fisik Teknologi Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak menggunakan Jembatan Terinstrumentasi*. Bandung: Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Ojio, T, C Carey, E O'Brien, C Doherty, and S Taylor. 2016. "Contactless Bridge Weigh-in-Motion." *Journal of Bridge Engineering*. doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000776.
- Peters, R J. 1984. "AXWAY-a system to obtain vehicle axle weights." *Australian Road Research* 12 (1).
- Saleh, Sofyan M., Ofyar Z. Tamin, Ade Sjafruddin, and Russ Bona Frazila. 2009. "Pengaruh Muatan Truk Berlebih Terhadap Biaya Pemeliharaan Jalan." *Jurnal Transportasi* 9 (1): 79–89. <http://journal.unpar.ac.id/index.php/journaltransportasi/article/view/348>.
- Sentosa, Leo, dan Asri Awal Roza. 2012. "Analisis dampak beban overloading kendaraan pada struktur rigid pavement terhadap umur rencana perkerasan ( studi kasus ruas jalan simp lago – sorek km 77 s/d 78 )." *Jurnal Teknik Sipil* 19 (2): 161–68.
- Yang, Wang, Uddin Nasim, Jacobs Laurence J., and Kim Jin-Yeon. 2014. "Next-Generation Wireless Bridge Weigh-in-Motion ( WIM ) System Integrated with Nondestructive Evaluation ( NDE ) Capability for Transportation Infrastructure Safety." Atlanta.
- Znidaric, A, I Lavric, dan Jan Kalin. 2002. "The next generation of bridge weigh-in-motion systems." In *Third International Conference on Weigh-in-Motion (ICWIM3) Iowa State University, Ames*.
- Zolghadri, N., M.W. Halling, N. Johnson, and P.J. Barr. 2016. "Field Verification of Simplified Bridge Weigh-in-Motion Techniques." *Journal of Bridge Engineering* 21 (10): 1–17. doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000930.