



Pengembangan Teknologi

Penggunaan Struktur Jembatan

sebagai Sensor Identifikasi Jumlah dan
Berat Kendaraan dalam Kondisi Bergerak

Gatot Sukmara & Widi Nugraha

Gatot Sukmara & Widi Nugraha

Pengembangan Teknologi

Penggunaan Struktur Jembatan

sebagai Sensor Identifikasi Jumlah dan
Berat Kendaraan dalam Kondisi Bergerak



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
www.pusjatan.pu.go.id

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGGUNAAN STRUKTUR JEMBATAN SEBAGAI SENSOR IDENTIFIKASI JUMLAH DAN BERAT KENDARAAN DALAM KONDISI BERGERAK

Gatot Sukmara & Widi Nugraha
Desember, 2015

Cetakan Ke-1 2015, 108 halaman
© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Foto Cover :

<http://www.flmove.com/wp-content/uploads/yootheme/demo/gallery/truck-on-bridge.jpg>

<http://wall.alphacoders.com/big.php?i=457375>

No. ISBN : 978-602-264-128-5
Kode Kegiatan : 033.11.04.2432.029.031.107
Kata kunci : WIM, Jembatan, Berat Kendaraan bergerak

Ketua Program Penelitian:

Gatot Sukmara, Puslitbang Jalan dan Jembatan

Ketua Sub Tim Teknis:

Prof. (R). Ir. Lanneke Tristanto, Puslitbang Jalan dan Jembatan

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2015 pada paket pekerjaan Pengembangan Teknologi Penggunaan Struktur Jembatan sebagai Sensor Identifikasi Jumlah dan Berat Kendaraan dalam kondisi bergerak.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Badan Penelitian dan Pengembangan
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan
info@pusjatan.pu.go.id



PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATAN

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PUPR dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIK & SUB TIM TEKNIK

Tim Teknis

Ir. Agus Bari Sailendra, MT.
Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahdanulirwan, M.Sc
Ir. Pantja Dharma Oetojo, M.Eng.Sc
Ir. IGW Samsi Gunarta, M.Appl.Sc
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc
DR. Drs. Max Antameng, MA
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc
Ir. George Joseph Winston Fernandez
Ir. Soedarmanto Darmonegoro
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc
Ir. Teuku Anshar
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc
Ir. Saktyanu, M.Sc
DR.Ir. Kemas Ahmad Zamhari, M.Sc
DR. Ir. Hasroel, APU
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc
DR. Ir. IF.Poernornosidhi, M.Sc
Ir. Lanneke Tristanto, APU
Ir. Saroso B.S.

Prof.(R). DR. Ir. Furqon Affandi, M. Sc
Ir. Joko Purnomo, MT
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc
Redrik Irawan, ST., MT.
Ir. Wawan Witarnawan, M.Sc
Dr.Ir.Slamet Mulyono
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc
Ir. Edward Pauner

Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto
Ir. Wawan Witarnawan, M.Sc
Ir. Abinhot Sihotang, MT.
Bernardus Herbudiman, ST., MT.
Dr.Eng. Ir. Made Suangga, MT.
Dr.tech Ir. Aswandy, MT.
Ir. Ahmad Yunaldi, MM.
Dr.Eng Ir. Fauzri Fahimuudin, M.Sc.Eng
Ir. Koesno Agus
Ir. Sumargo, M.Sc., Ph.D
Ir. Samun Haris, MT.

KATA PENGANTAR

Penyusunan naskah ilmiah ini bertujuan untuk menguraikan kriteria dan aspek-aspek yang harus dikaji dalam pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak (WIM-Bridge), yang dilatarbelakangi kebutuhan untuk mengetahui beban lalu lintas apa yang sebenarnya dialami oleh infrastruktur jalan dan jembatan di Indonesia. Diharapkan dari kajian ini dapat memberikan suatu kriteria desain yang digunakan sebagai acuan, khususnya untuk pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak (WIM-Bridge) dan kemungkinan pengaplikasian WIM-Bridge di Indonesia.

Puslitbang Jalan dan Jembatan telah mengembangkan beberapa metode untuk mengidentifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak (Weigh-in-motion /WIM) yang menggunakan sensor yang dipasang di atas lapisan perkerasan jalan. Namun, pengukuran dengan jenis teknologi ini memiliki beberapa kekurangan, diantaranya adalah daya tahannya yang cukup rendah, sehingga pengukuran hanya dapat dilangsungkan dalam waktu yang singkat, kurang dari satu minggu. Selain itu, pengukuran WIM di atas lapis perkerasan ini memiliki syarat kecepatan kendaraan yang lewat harus kurang dari 40 km/jam agar akurasinya tetap terjaga. Sehingga, selama dilakukan pengukuran WIM, lalu lintas harus dijaga dan dikontrol agar pengukuran dapat tetap akurat. Oleh karena itu, pengembangan sistem WIM yang lebih baik dilakukan oleh Puslitbang Jalan dan Jembatan. Salah satu program pengembangan sistem WIM adalah program pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak (WIM-Bridge) ini.

Dalam naskah ilmiah ini, diuraikan beberapa kriteria dan ketentuan yang perlu diperhatikan dan diacu dalam pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak (WIM-Bridge) di Indonesia. Konsep dalam naskah ilmiah ini mengacu pada beberapa teknologi serupa yang telah berkembang di dunia,

salah satunya adalah SiWIM Bridge WIM dari Slovenia yang dikembangkan oleh institusi riset ZAG Institute Slovenia dan perusahaan CESTEL.

Semoga dengan pembahasan kriteria desain dalam naskah ilmiah ini dapat lebih membuka wawasan pengetahuan teknis yang diperlukan, khususnya untuk pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak (WIM-Bridge) di Indonesia, dan umumnya untuk kemajuan infrastruktur di Indonesia.

Bandung, Desember 2015

Gatot Sukmara & Widi Nugraha

Penyusun



DAFTAR ISI

PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATAN	III
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI	VII
DAFTAR GAMBAR	X
DAFTAR TABEL	XIII
BAB 1. PENDAHULUAN	15
Latar Belakang	15
Tujuan dan Sasaran Penulisan Naskah Ilmiah	19
Ruang Lingkup	20
Sistematika Pembahasan Naskah Ilmiah	20
BAB 2. KRITERIA JEMBATAN DAN LOKASI	23
Umum	23
Tipe Struktur	24
Panjang bentang jembatan	27
Tipe tumpuan jembatan	27
Ketebalan struktur atas	28
Bahan atau Material Struktur	28
Alinemen	29
Kriteria Lain	29
BAB 3. KRITERIA SENSOR & INSTRUMENTASI WIM	31
SINDILA	31

VIII

PLATO.....	32
Load Cell WIM.....	33
Piezoelectric WIM	33
Fiber Optik WIM.....	36
WIM Bridge.....	38
Umum	38
SiWIM WIM Bridge System CESTEL d.o.o (Slovenia, 2015)	39
BAB 4. KLASIFIKASI KENDARAAN	45
Bina Marga.....	45
Perhubungan	46
EURO13.....	49
FHWA 13	50
BAB 5. ALGORITMA PARAMETERIK	55
Respon struktur.....	55
Regangan, tegangan, momen lentur	55
Garis pengaruh.....	57
Distribusi momen lentur akibat beban	58
Berat Roda	59
Kelas Kendaraan	60
Berat Kendaraan	60
Kecepatan Kendaraan	60
BAB 5. SISTEM KEAMANAN	63
Umum.....	63
Standar Spesifikasi Proteksi Instrumen.....	63

Masyarakat dan Sosial (Vandalisme).....	65
Keamanan Data (privat dan publik).....	66
BAB 7. KALIBRASI SISTEM WIM BRIDGE	69
Umum.....	69
Proses Kalibrasi.....	70
Akurasi Pengukuran	72
BAB 8. DATA LUARAN	75
Umum.....	75
Pengelola Jalan.....	75
Penegak Hukum	76
Riset dan akademisi.....	76
BAB 9. USULAN KEGIATAN LANJUTAN	81
Piranti Keras.....	81
Piranti Lunak.....	83
Database Jembatan yang dapat digunakan sebagai WIM Bridge	83
Ruas Jalan Nasional di Kabupaten Garut (Provinsi Jawa Barat).....	84
Ruas Jalan Nasional di Kabupaten Sumedang (Provinsi Jawa Barat)....	92
Integrasi sistem.....	99
BAB 10. PENUTUP	103
Kesimpulan.....	103
Saran.....	104
DAFTAR PUSTAKA.....	106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Aplikasi Strain Gage WIM pada jembatan.....	16
Gambar 1.2 Ilustrasi pengukuran beban kendaraan bergerak dengan Bridge WIM (SiWIM System, 2011).....	17
Gambar 1.3 Instrumentasi sistem Bridge WIM pada jembatan dan culvert (SiWIM System, 2011)	17
Gambar 1.4 Perkembangan sistem pengukuran beban kendaraan di dunia (Znidaric, 2015)	17
Gambar 2.1 Jembatan Box Culvert (Pintu Tol Pasteur, Bandung)	24
Gambar 2.2 Jembatan gelagar (Jalan Layang Cimindi, Bandung)	25
Gambar 2.3 Jembatan Box Girder (Jalan Layang Cipete, Jakarta).....	26
Gambar 2.4 Jembatan dengan Pelat Ortotropik (Bogor).....	26
Gambar 3.1 Skema SINDILA-01.....	30
Gambar 3.2 Aplikasi SINDILA-01 di lapangan.....	32
Gambar 3.3 Konsep aplikasi PLATO.....	33
Gambar 3.4 Aplikasi Load Cell WIM (kiri) dan detail Load Cell WIM (kanan)	33
Gambar 3.5 Sensor Piezoelectric yang dipasang di perkerasan jalan	34
Gambar 3.6 Sensor WIM Strip yang dipasang di perkerasan jalan.....	34
Gambar 3.7 Sensor Putaran Induktif (Loop).....	34
Gambar 3.8 Skema Pemasangan Sensor dan Data Logger	35
Gambar 3.9 Konsep pengembangan Piezoelectric WIM dengan virtual Loop.....	36
Gambar 3.10 Skema WIM dengan sensor Fiber Optik.....	37

Gambar 3.11 Ilustrasi pengukuran beban kendaraan bergerak dengan Bridge WIM	38
Gambar 3.12 Instrumentasi sistem Bridge WIM pada jembatan dan culvert	38
Gambar 3.13 Identifikasi kendaraan yang beratnya melebihi batas beban ijin 40 ton	39
Gambar 3.14 Pengukuran beban kendaraan secara statis dengan plate static weighing di rest area	39
Gambar 3.15 Instalasi sensor SiWIM di jembatan tipe box culvert.....	40
Gambar 3.16 Penjelasan detail komponen data logger box sistem SiWIM	41
Gambar 3.17 Sensor strain gage sistem SiWIM.....	41
Gambar 3.18 Modul amplifikasi sensor sistem SiWIM.....	41
Gambar 3.19 Detail komponen data logger box sistem SiWIM.....	42
Gambar 3.20 Sensor strain gage sistem SiWIM	42
Gambar 3.21 Modul amplifikasi sensor sistem SiWIM.....	43
Gambar 4.1 Pembagian Jenis Kendaraan menurut Standar EURO 13	49
Gambar 5.1 Deformasi elemen lentur.....	56
Gambar 5.2 Garis Pengaruh (ZAG Institute, 2015)	57
Gambar 5.3 Contoh kalibrasi garis pengaruh momen lentur jembatan tumpuan sederhana (dengan Soft Loading Test).....	58
Gambar 5.4 Contoh faktor distribusi beban pada jembatan gelagar	59
Gambar 5.5 Ilustrasi pengukuran beban kendaraan (SiWIM).....	61
Gambar 5.6 Sensor arah longitudinal jembatan pada jembatan box culvert.....	61
Gambar 6.1 Instrumen data logger, telemetri, serta kabel.....	65

Gambar 7.1 Proses kalibrasi dengan memanfaatkan kendaraan acak yang melintas.....	71
Gambar 7.2 Piranti lunak pengecekan kelas akurasi WIM Bridge dari SiWIM-F	73
Gambar 8.1 Garis Pengaruh (ZAG Institute, 2015).....	77
Gambar 8.2 Model beban lalu lintas dan faktor distribusi beban arah lateral.....	77
Gambar 8.3 Contoh pengumpulan data faktor perbesaran beban dinamis akibat beban lalu lintas	77
Gambar 9.1 Layout Pemasangan Sensor Strain Gage di Jembatan GEOSAN ...	80
Gambar 9.2 Dokumentasi kegiatan pemasangan sensor strain gage di Jembatan GEOSAN	82
Gambar 9.3 Antarmuka fitur online monitoring dari SiWIM.....	83
Gambar 9.4 Tampak atas jembatan Cikidang.....	85
Gambar 9.5 Tampak atas samping jembatan Cikidang.....	85
Gambar 9.6 Tampak atas jembatan Cipamali.....	86
Gambar 9.7 Tampak atas samping jembatan Cipamali	86
Gambar 9.8 Tampak atas jembatan Cirangkong.....	88
Gambar 9.9 Tampak atas samping jembatan Cirangkong.....	88
Gambar 9.10 Tampak atas jembatan Cipacing.....	89
Gambar 9.11 Tampak atas samping jembatan Cipacing	90
Gambar 9.12 Tampak atas jembatan Lingkar Nagreg.....	91
Gambar 9.13 Tampak atas samping jembatan Lingkar Nagreg	91
Gambar 9.14 Tampak memanjang Jembatan Cipeles.....	93
Gambar 9.15 Tampak atas dalam kondisi lalu lintas sepi	93
Gambar 9.16 Tampak atas dengan kendaraan berat beriringan	94

Gambar 9.17 Kendaraan berat dari kedua arah (multiple presences).....	94
Gambar 9.18 Tampak memanjang Jembatan Ciwija.....	95
Gambar 9.19 Jembatan dilalui kendaraan berat (Truk sedang)	96
Gambar 9.20 Tampak memanjang Jembatan Cijonggol.....	97
Gambar 9.21 Sampah dan bongkahan pasangan batu si sekitar aliran sungai	97
Gambar 9.22 Tampak melintang Jembatan Cibihbul.....	98
Gambar 9.23 Tampak memanjang Jembatan Cibihbul.....	98

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Fiber Optik WIM NEXCO.....	37
Tabel 4.1 Klasifikasi Kendaraan beserta konfigurasi sumbu Bina Marga.....	46
Tabel 4.2 Konfigurasi sumbu, kelas jalan, muatan sumbu terberat (MST), dan jumlah berat yang diizinkan (JBI)	47
Tabel 4.3 Konfigurasi sumbu, kelas jalan, muatan sumbu terberat (MST), dan jumlah berat kombinasi yang diizinkan (JBKI) untuk kendaraan penarik dan kereta tempelan.....	48
Tabel 4.4 Konfigurasi sumbu, kelas jalan, muatan sumbu terberat (MST), dan jumlah berat kombinasi yang diizinkan (JBKI) untuk kendaraan penarik dan kereta tempelan.....	48
Tabel 4.5 Jarak antar Sumbu Kendaraan per Kelas menurut Standar EURO 13 (dalam satuan m).....	50
Tabel 4.6 Skema klasifikasi FHWA 13.....	51
Tabel 6.1 Acuan proteksi IP angka pertama: proteksi terhadap benda padat.....	64
Tabel 6.2 Acuan proteksi IP angka kedua: proteksi terhadap benda cair	54

1

PENDAHULUAN

LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi *Weigh-In-Motion* (WIM) memungkinkan pengukuran beban aktual lalu lintas kendaraan yang sebenarnya diterima jalan dan jembatan, yaitu dalam keadaan bergerak (Bushman, R. dan Pratt, A.J., 1998). Data yang dapat dikumpulkan dari WIM antara lain beban gandar (*axle weight*) dan beban total (*gross weight*), jarak antar gandar (*axle spacing*), klasifikasi kendaraan, dan kecepatan kendaraan. Manfaat lain dari penggunaan WIM diantaranya adalah untuk penelitian dan pengembangan perkerasan jalan maupun struktur jembatan, penelitian dan pengembangan kapasitas dan monitoring sistem jaringan jalan raya, perhitungan tingkat kecelakaan, analisis transportasi truk kondisi aktual, dan sebagainya (Caltrans, 2014).

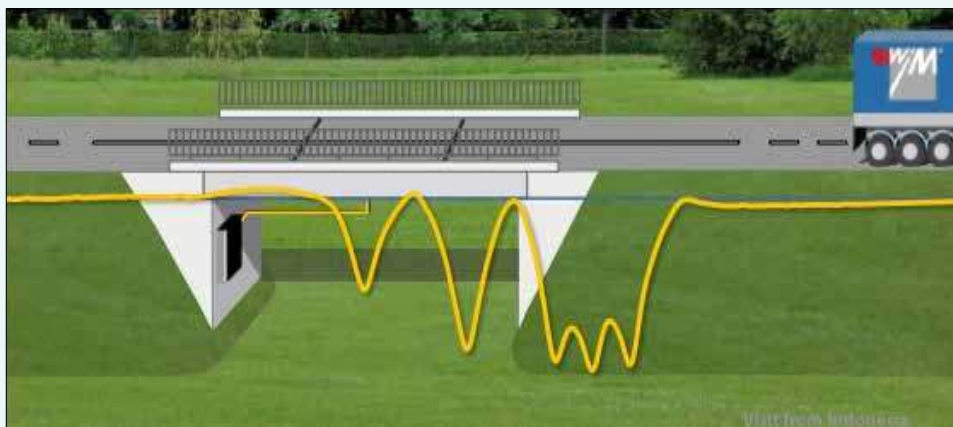
Puslitbang Jalan dan Jembatan telah mengembangkan beberapa metode untuk mengidentifikasi jumlah dan berat



Gambar 1.1 Aplikasi Strain Gage WIM pada jembatan

kendaraan dalam kondisi bergerak (WIM) yang menggunakan sensor yang dipasang di atas lapisan perkerasan jalan. Namun, pengukuran dengan jenis teknologi ini memiliki beberapa kekurangan, diantaranya adalah daya tahan-nya yang cukup rendah, sehingga pengukuran hanya dapat dilangsungkan dalam waktu yang singkat, kurang dari satu minggu. Selain itu, pengukuran WIM di atas lapis perkerasan ini memiliki syarat kecepatan kendaraan yang lewat harus kurang dari 40 km/jam agar akurasi tetap terjaga. Sehingga, selama dilakukan pengukuran WIM, lalu lintas harus dijaga dan dikontrol agar pengukuran dapat tetap akurat. Oleh karena itu, pengembangan sistem WIM yang lebih baik dilakukan oleh Puslitbang Jalan dan Jembatan. Salah satu program pengembangan sistem WIM adalah program pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak (WIM-Bridge) ini.

WIM Bridge adalah sistem pengukuran beban kendaraan secara aktual tanpa perlu memberhentikan kendaraan tersebut terlebih dahulu, dengan memanfaatkan struktur jembatan eksisting yang terinstrumentasi sebagai transduser (SiWIM System, 2011). Sistem ini menggunakan strain gages di beberapa titik pada struktur jembatan yang ditunjukkan **Gambar 1.1** (FHWA). Agar lebih sederhana, sistem ini biasanya digunakan pada jembatan dengan



Gambar 1.2 Ilustrasi pengukuran beban kendaraan bergerak dengan Bridge WIM (SiWIM System, 2011)



Gambar 1.3 Instrumentasi sistem Bridge WIM pada jembatan dan culvert (SiWIM System, 2011)



Gambar 1.4 Perkembangan sistem pengukuran beban kendaraan di dunia (Znidaric, 2015)

sistem struktur statis tertentu, yaitu terletak pada dua tumpuan sederhana, dengan lokasi pemasangan strain gages biasanya ditempatkan di serat bawah tengah bentang jembatan maupun di seperempat bentang jembatan. Ketika kendaraan melintasi jembatan, dapat diketahui regangan yang tercatat pada strain gages, yang kemudian dapat dianalisis balik untuk mendapat besaran beban akibat regangan struktur jembatan yang terjadi. Prinsipnya, teknologi WIM Bridge ini memanfaatkan respon dinamis elemen jembatan terhadap beban kendaraan yang melintas jembatan.

Dalam perkembangan teknologi dan sistem pengukuran beban kendaraan, sistem WIM Bridge adalah sistem paling mutakhir di antara sistem WIM lain yang telah dikembangkan sebelumnya. Sistem WIM yang merupakan perkembangan dari pengukuran beban statis, pada awalnya hanya dapat mengukur beban kendaraan pada kecepatan rendah kemudian berkembang hingga kini dapat mengukur beban kendaraan pada kecepatan tinggi, sehingga dapat diterapkan di jalan bebas hambatan. Dibandingkan WIM sistem tertanam pada perkerasan seperti diuraikan sebelumnya, Bridge WIM relatif lebih mutakhir dari sistem sensor dan algoritma karena membutuhkan proses perhitungan balik dari respon struktur jembatan menjadi beban kendaraan. Namun, sistem Bridge WIM dapat mengukur lebih akurat dibanding WIM yang terpasang pada perkerasan, hingga tingkat akurasi 95% (SiWIM, 2011).

Secara historis, Sistem Bridge WIM dikembangkan pertama kali pada tahun 1979-1994 di Amerika Serikat dan Australia pada struktur culvert. Kemudian pada 1994-2000, proyek riset Uni Eropa yaitu COST 323 dan WAVE menghasilkan progres substansial dan prototipe SiWIM berhasil dibuat oleh ZAG. Selanjutnya, dari tahun 2000 sampai sekarang, SiWIM sudah berhasil dikomersialisasi oleh perusahaan CESTEL dari Slovenia. Sampai saat ini sudah dilakukan pemasangan SiWIM pada lebih dari 700 jembatan di 20 negara di dunia. Perkembangan terakhir, SiWIM dikembangkan untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas jangka panjang, Bridge WIM untuk kereta api, dan untuk monitoring jembatan.

Keuntungan yang dapat diperoleh dengan menerapkan sistem Bridge WIM ini antara lain sebagai berikut (SiWIM System, 2011):

- Cukup akurat untuk mengukur berat GVW (Gross Vehicle Weight), Single Axe Weight dan Axle Group Weight.

- Mudah dipasang, tanpa mengganggu lalu lintas karena dipasang di bagian bawah jembatan
- Portable, dapat dipindahkan dari satu jembatan ke jembatan lainnya, tanpa mengganggu akurasi pengukuran
- Mendukung pemeriksaan keamanan jembatan
- Dalam praktik pengukuran WIM, dengan instrumentasi pada jembatan, kendaraan yang ingin menghindari terukurnya berat akan kesulitan karena jembatan tidak dapat dihindari. Lain halnya dengan WIM pada perkerasan yang akan tidak akurat jika pengemudi menggeserkan kendaraannya ke bahu jalan untuk menghindari sensor WIM yang kasat mata pada perkerasan.

Selain itu, sistem Bridge WIM ini juga memiliki beberapa kekurangan, antara lain sebagai berikut (SiWIM System, 2011):

- Dibutuhkan jembatan yang masih dalam kondisi baik dan permukaan jalan pendekat yang mulus agar pengukuran tidak terganggu dan tetap akurat.
- Tidak semua jembatan cocok dengan penerapan sistem SiWIM, contoh jembatan yang cocok antara lain jembatan *simple span* atau menerus tipe girder maupun pelat bentang pendek, pelat orthotropik, *box culvert*.
- Diperlukan pemahaman mengenai perilaku struktur jembatan untuk dipasang instrumentasi sistem SiWIM, agar dapat mengkonversi respons akibat beban menjadi beban itu sendiri.

TUJUAN DAN SASARAN PENULISAN NASKAH ILMIAH

Tujuan dari penulisan naskah ilmiah ini adalah untuk sebagai kriteria dasar mengenai pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan di Indonesia, sehingga tersedia suatu acuan ilmiah relevan dalam pengembangan teknologi tersebut di masa yang akan datang.

Sasaran dari penulisan naskah ilmiah ini adalah sebagai berikut :

1. Menguraikan kriteria mengenai pemilihan struktur jembatan yang dapat digunakan sebagai tranduser penguran beban *Weigh-in-Motion*.

2. Menguraikan kriteria sensor dan instrumentasi WIM pada sistem WIM eksisting (tipe WIM tertanam pada perkerasan jalan) dan pada sistem WIM Bridge.
3. Menguraikan klasifikasi kendaraan yang dapat digunakan untuk membedakan kelas kendaraan dalam pengukuran WIM.
4. Menguraikan algoritma secara garis besar untuk menghitung parameter keluaran dari pengukuran WIM dengan sistem WIM Bridge.
5. Menguraikan sistem keamanan yang digunakan dalam sistem WIM Bridge.
6. Menguraikan validasi data yang harus dilakukan dalam sistem WIM Bridge.
7. Menguraikan data luaran yang dihasilkan dari pengukuran WIM dengan sistem WIM Bridge.

RUANG LINGKUP

Ruang lingkup dari penulisan naskah ilmiah ini adalah sebagai berikut:

1. Kriteria dasar teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan (*WIM Bridge*) sesuai perkembangan IPTEK dan teknologi serupa yang telah diterapkan di beberapa negara lain di dunia, dalam hal ini digunakan acuan utama SiWIM Bridge WIM dari Slovenia.
2. Usulan penerapan dari sistem WIM di Indonesia yang disesuaikan perkembangan IPTEK dan karakteristik lalu lintas dan alam di Indonesia.

SISTEMATIKA PEMBAHASAN NASKAH ILMIAH

BAB I : Pendahuluan, berisikan latar belakang, tujuan penulisan naskah ilmiah, ruang lingkup, dan sistematika pembahasan naskah ilmiah

BAB II : Kriteria Jembatan dan Lokasi, berisikan tipe struktur, panjang bentang jembatan, tipe tumpuan jembatan, ketebalan struktur atas, bahan atau material struktur, alinemen, dan kriteria lain

BAB III : Kriteria Sensor & Instrumentasi WIM, berisikan SINDILA, PLATO, Load Cell WIM, Piezoelectric WIM, Fiber Optik WIM, dan WIM Bridge

- BAB IV : Klasifikasi Kendaraan, terdiri dari klasifikasi yang dikeluarkan oleh Bina Marga, Perhubungan, EURO13, dan FHWA 13
- BAB V : Algoritma Parameterik, terdiri dari Respon struktur, Berat Roda, Kelas Kendaraan, Berat Kendaraan, dan Kecepatan Kendaraan
- BAB VI : Sistem Keamanan, terdiri dari Umum, Standar Spesifikasi Proteksi Instrumen, Masyarakat dan Sosial (Vandalisme), dan Keamanan Data (privat dan publik)
- BAB VII : Kalibrasi Sistem WIM Bridge terdiri dari Umum, Proses Kalibrasi, dan Akurasi Pengukuran
- BAB VIII : Data Luaran, terdiri dari Umum, data untuk Pengelola Jalan, data untuk Penegak Hukum, dan data luaran untuk kepentingan Riset dan akademisi.
- BAB IX : Usulan Kegiatan Lanjutan, terdiri dari usulan Piranti Keras, Piranti Lunak, Database Jembatan yang dapat digunakan sebagai WIM Bridge, dan usulan untuk Integrasi sistem.
- BAB X : Penutup, berisikan kesimpulan yang dapat penulis tarik dari penulisan naskah ilmiah ini dan saran penulis untuk pengembangan teknologi jembatan untuk identifikasi berat dan jumlah kendaraan secara bergerak (WIM-Bridge). ■

2

KRITERIA JEMBATAN DAN LOKASI

UMUM

Dalam penggunaan struktur jembatan sebagai identifikator beban dan kecepatan kendaraan secara bergerak (WIM), perlu dilakukan pemilihan jembatan dan lokasi yang memenuhi kriteria teknis terkait efektifitas pengukuran WIM. Mayoritas jembatan standar cukup cocok untuk dimanfaatkan dalam pengukuran WIM, namun hal penting yang perlu menjadi perhatian adalah kecocokan karakteristik suatu jembatan yang terukur dengan sistem sensor, *software*, algoritma, termasuk kalibrasi dan prosedur *post-processing*. Beberapa kriteria yang dimaksud dalam pemilihan jembatan yang cocok untuk digunakan dalam pengukuran WIM antara lain tipe struktur atas, bahan atau material struktur jembatan, panjang bentang jembatan, tipe perletakan, ketebalan struktur atas, alinemen jembatan termasuk kemiringan (*skewness*), dan karakteristik lain dari suatu jembatan seperti karakteristik terhadap efek perubahan temperatur, kekasaran lapisan permukaan jalan, dan lain sebagainya.

TIPE STRUKTUR

Berdasarkan sudut pandang struktur, tipe jembatan yang cukup baik untuk digunakan sebagai WIM Bridge antara lain jembatan pelat (slab bridges) atau box culvert, jembatan gelagar, jembatan box girder, jembatan dengan pelat ortotropik. Tipe jembatan yang paling mudah untuk dipasang instrumentasi WIM Bridge adalah jembatan pelat (slab bridges) atau box culvert. Hal ini disebabkan bentang jembatan tipe ini biasanya pendek dan ketebalan bangunan atas cukup tipis, sehingga respon yang diberikan akan memberikan hasil pengukuran gandar tunggal dan grup gandar yang lebih akurat. Selain itu, pemasangan sensor dan instrumen pada jembatan tipe ini lebih mudah begitu pula dengan perawatan dari instrumen tersebut akan lebih mudah. Jumlah jembatan ini cukup dominan di beberapa bagian dunia, hampir mencapai 60% populasi jembatan yang ada.



Gambar 2.1 Jembatan Box Culvert (Pintu Tol Pasteur, Bandung)



Gambar 2.2 Jembatan gelagar (Jalan Layang Cimindi, Bandung)

Hal yang perlu menjadi pertimbangan lain adalah jembatan tipe ini cukup sensitif terhadap perubahan temperatur karena biasanya bersifat integral dan sering mengalami retak di lokasi dengan fluktuasi temperatur.

Jembatan gelagar pada umumnya terdiri dari elemen gelagar (baja, beton bertulang atau beton prategang) dan lantai (baja atau beton) yang dipasang di atas gelagar. Jembatan gelagar yang umumnya memiliki panjang bentang yang lebih panjang dibanding tipe box culvert, akan memberikan estimasi yang lebih akurat terhadap beban total kendaraan. Selain itu, regangan yang terjadi akan lebih mudah terukur dibanding pada box culvert atau tipe pelat karena tegangan yang terjadi akibat beban lalu lintas terkonsentrasi pada gelagar pada arah memanjang. Jembatan tipe ini lebih tahan terhadap perubahan temperatur.



Gambar 2.3 Jembatan Box Girder (Jalan Layang Cipete, Jakarta)



Gambar 2.4 Jembatan dengan Pelat Ortotropik (Bogor)

PANJANG BENTANG JEMBATAN

Pada dasarnya, jembatan dengan panjang bentang berapapun dapat dimanfaatkan untuk pengukuran WIM selama pengukuran regangan masih memiliki amplitudo dan akurasi resolusi yang cukup. Jembatan dengan bentang yang lebih panjang akan menghasilkan data perhitungan berat total yang lebih akurat. Namun, pada jembatan dengan bentang panjang dapat mengalami multievent presence, yaitu kejadian dimana beberapa kendaraan berada di atas jembatan secara bersamaan, yang berpengaruh buruk pada tingkat akurasi hasil pengukuran WIM. Apalagi dengan tingkat kepadatan lalu lintas seperti yang sering dijumpai di jalur utama jaringan jalan di Indonesia, panjang bentang jembatan harus dibatasi.

Tetapi, jika pada elemen struktur atas jembatan bentang panjang menggunakan pembagi bentang seperti pengaku atau balok melintang pada jembatan pelat dengan balok tipe grillage atau pelat ortotropik, hasil pengukuran WIM dapat cukup akurat, bahkan untuk karakteristik jembatan bentang panjang yang kurang menguntungkan dalam pengukuran WIM.

TIPE TUMPUAN JEMBATAN

Dalam perencanaan jembatan, terdapat dua jenis kondisi tumpuan jembatan, yaitu perletakan tumpuan sederhana dan integral. Jembatan integral berperilaku layaknya struktur frame, dimana momen akibat aksi beban pada gelagar dan lantai diteruskan secara langsung pada pilar atau kepala jembatan layaknya hubungan balok dan kolom pada bangunan gedung. Sedangkan jembatan dengan perletakan sederhana dapat mengakomodasi rotasi struktur atas pada tumpuan tanpa transfer momen lentur.

Pada kenyataannya, sangat sedikit jembatan yang berperilaku sebagai jembatan perletakan sederhana seutuhnya. Bearing sebagai perletakan struktur atas mengalami penurunan kondisi dari waktu ke waktu dan tidak dapat mengakomodasi rotasi struktur atas seutuhnya sehingga perilaku yang terjadi lebih mirip jembatan integral dimana momen lentur struktur atas harus ditransfer ke bangunan bawah karena rotasi tidak terakomodasi bearing yang terdeteriorasi. Maka dari itu, garis pengaruh beban pada jembatan harus diketahui lewat pengukuran terlebih dahulu, karena pada kenyataannya banyak ditemukan

jembatan yang didesain sebagai jembatan tumpuan sederhana namun sudah berperilaku layaknya jembatan integral seperti diuraikan di atas.

Dari tinjauan akurasi pengukuran, jembatan dengan bentang lebih pendek dengan tipe perletakan integral akan menyediakan tingkat akurasi penentuan gandar dan beban gandar yang lebih tinggi. Namun, kekurangannya adalah jembatan tipe ini sensitif terhadap perubahan temperatur sehingga perlu dilakukan koreksi terhadap faktor temperatur dalam masa pengukuran.

KETEBALAN STRUKTUR ATAS

Pada jembatan tipe pelat (slab bridge), ketebalan pelat pada umumnya cukup tipis (30 hingga 60 cm) jika dibandingkan dengan jarak minimum antar gandar kendaraan. Hal ini memberikan akurasi dan resolusi yang baik untuk mengantisipasi efek beban gandar satuan. Ketebalan gelagar atau pelat dari suatu jembatan yang dapat melebihi 1 meter, dapat melebihi jarak minimum antar gandar kendaraan, sehingga dibutuhkan tambahan sensor pada pelat diantara gelagar untuk menambah akurasi dan resolusi pengukuran. Sehingga semakin tipis struktur atas baik gelagar atau pelat, maka akan semakin baik resolusi dan akurasi pengukuran, khususnya terhadap efek beban gandar satuan.

BAHAN ATAU MATERIAL STRUKTUR

Untuk struktur jembatan dengan material beton yang cukup umum digunakan, pada dasarnya sangat memungkinkan untuk dimanfaatkan dalam pengukuran WIM karena pemasangan sensor relatif mudah. Namun, sifat dari beton yang dapat mengalami retak, perlu menjadi perhatian khusus dan menjadi lokasi yang dihindari dalam pemasangan sensor strain gage.

Sedangkan untuk elemen struktur baja, pengukuran regangan dengan strain gage sangat cocok dan mudah dilaksanakan. Kemudian, dapat juga memanfaatkan pengukuran regangan ini untuk perhitungan fatik yang mungkin dapat terjadi pada elemen struktur baja.

ALINEMEN

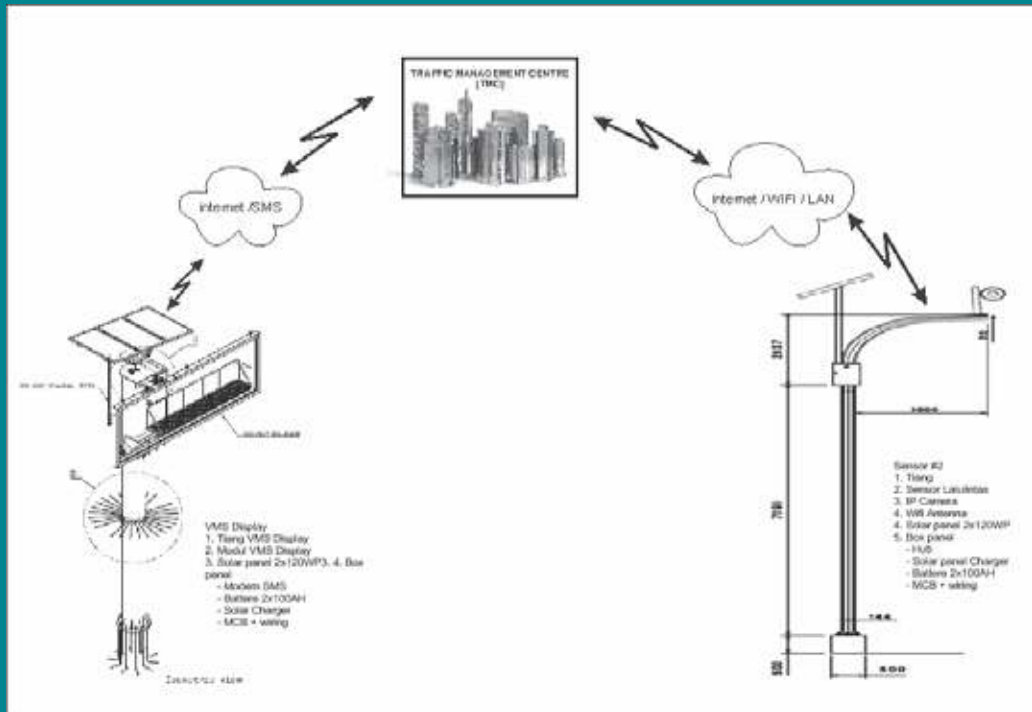
Jembatan yang akan digunakan dalam pengukuran WIM harus memiliki kriteria alinemen tertentu agar akurasi hasil pengukuran terjaga. Jembatan yang digunakan harus berada pada jalan terbuka dengan lalu lintas yang lancar. Lokasi yang dekat dengan simpang atau perlintasan kereta api dengan proporsi lalu lintas berhenti kemudian maju yang cukup tinggi, tidak direkomendasikan untuk pengukuran WIM, termasuk WIM Bridge. Penggunaan jembatan di lokasi seperti ini hanya dapat diterima jika akurasi data yang dibutuhkan relatif lebih rendah.

KRITERIA LAIN

Terdapat beberapa kriteria umum lain yang dapat digunakan untuk memilih jembatan yang dapat digunakan untuk pengukuran WIM pada sistem WIM Bridge. Kebutuhan penggunaan hasil pengukuran WIM sangat penting untuk dipahami, dalam arti kualitas hasil pengukuran (tingkat akurasi dan banyaknya kendaraan yang diukur) seperti apa yang dibutuhkan. Untuk kebutuhan yang lebih sederhana, seperti kebutuhan untuk pengumpulan data statistik beban lalu lintas, hanya membutuhkan hasil dengan akurasi yang lebih rendah sehingga memungkinkan pemilihan tipe struktur jembatan yang lebih luas.

Jembatan dengan jalan pendekat yang mulus tanpa efek bumping di dekat bentang yang dilakukan pengukuran WIM, akan memberikan hasil yang lebih akurat karena efek beban dinamis akan lebih kecil. Untuk jembatan bentang tunggal, bentang optimal jembatan untuk pengukuran WIM adalah 6 sampai 12 meter, sedangkan untuk jembatan dengan banyak bentang dapat diambil panjang berapapun hingga 12 meter.

Karena sistem WIM bekerja untuk mengevaluasi beban gandar dari efek keseluruhan dari seluruh gandar yang ada pada jembatan pada suatu waktu, maka keberadaan lebih dari satu kendaraan berat pada jembatan pada waktu yang sama, dapat mempengaruhi tingkat akurasi dari pengukuran. Struktur jembatan tua atau dalam kondisi yang sudah terdeteriorasi memerlukan perhatian khusus dalam masa pemasangan, sebagai contoh, hindari pemasangan transduser regangan di lokasi yang dekat dengan retak pada beton. ■



Gambar 3.1 Skema SINDILA-01

3

KRITERIA SENSOR & INSTRUMENTASI WIM

SINDILA

Sistem Informasi Dini LaluLintas (SINDILA-01) merupakan produk litbang Puslitbang Jalan dan Jembatan yang memiliki fungsi memberikan informasi mengenai kondisi lalu lintas (macet, padat, lancar dan lengang), kecepatan rata-rata kendaraan di ruas jalan tersebut, informasi umum (contohnya sosialisasi penggunaan helm ber-SNI). Kemampuan sensor SINDILA-01 adalah dapat membaca antrian kendaraan, menghitung jumlah kendaraan, melakukan klasifikasi jenis kendaraan serta menghitung kecepatan rata-rata kendaraan. Skema yang digunakan dari SINDILA ini ditampilkan pada **Gambar 3.1**.

Cara kerja sistem ini adalah sensor yang digunakan berupa kamera berfungsi untuk menerjemahkan gambar visual menjadi data-data kendaraan mulai data kecepatan, volume, jarak antar kendaraan hingga panjang kendaraan berdasarkan *virtual*



Gambar 3.2 Aplikasi SINDILA-01 di lapangan

loops yang diletakkan secara virtual di atas badan jalan, kemudian diolah menggunakan perangkat lunak (*software*) menjadi data arus kendaraan. Dari data arus kendaraan lalu diolah menjadi data kondisi lalu lintas di ruas jalan tersebut secara *realtime*.

PLATO

PLATO atau Penghitung dan Pencatatan Volume Lalu Lintas Otomatis, merupakan instrumen untuk pencacahan dan pencatatan volume lalu lintas secara otomatis hasil pengembangan Puslitbang Jalan dan Jembatan, 2006. Pengembangan instrumen ini ditujukan untuk mendapatkan kebutuhan data lalu lintas yang akurat, cepat dan berkesinambungan, serta memperkecil ketergantungan akan produk luar negeri untuk kegiatan pencatatan volume lalu lintas. Secara prinsip kerja, PLATO berfungsi sebagai *Automatic Traffic Counter* (ATC), menghitung dan mencatat volume lalu lintas secara otomatis. Manfaat dari PLATO ini antara lain untuk menghitung, mencatat, dan menyimpan

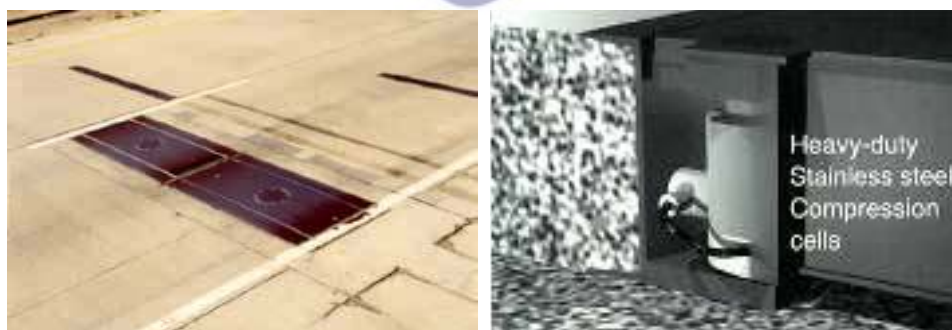


Gambar 3.3 Konsep aplikasi PLATO

data volume lalu lintas berdasarkan jenis kendaraan, arah lalu lintas, lajur lalu lintas dan interval waktu tertentu. Aplikasi yang pernah dilakukan secara skala penuh di lakukan di empat belas lokasi di PANTURA JAWA.

LOAD CELL WIM

Sistem WIM dengan teknologi load cell seperti ditunjukkan **Gambar 3.4** (FHWA dan Cardinal Scales), menggunakan sebuah pelat yang dilengkapi dengan load cell. Ketika kendaraan bergerak melintasi pelat, sistem merekam beban dinamik yang bekerja pada load cell. Jenis load cell yang digunakan dapat berupa heavy-duty stainless steel compression cell maupun hydraulic load cell dengan kapasitas sangat besar.



Gambar 3.4 Aplikasi Load Cell WIM (kiri) dan detail Load Cell WIM (kanan)

PIEZOELECTRIC WIM

Sistem WIM dengan teknologi sensor piezoelectric adalah yang paling banyak digunakan untuk keperluan pengambilan data. Sistem sensor piezoelectric



Gambar 3.5 Sensor Piezoelectric yang dipasang di perkerasan jalan



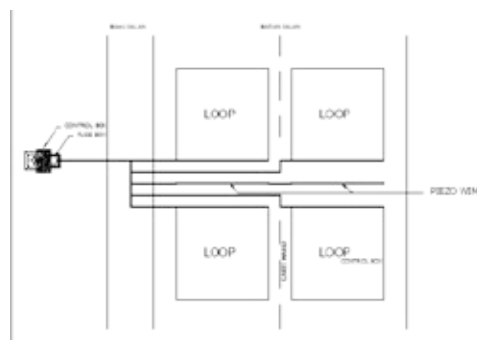
Gambar 3.6 Sensor WIM Strip yang dipasang di perkerasan jalan



Gambar 3.7 Sensor Putaran Induktif (Loop)

yang tipikal seperti pada **Gambar 3.5** (FHWA, 2014) pada dasarnya terdiri dari kawat tembaga, diselubungi oleh material piezoelectric, dan dibungkus lagi dengan tembaga yang memiliki sifat konduktor. Selain itu, sensor jenis ini dapat berbentuk WIM Strip seperti terlihat pada **Gambar 3.6** (Pusjatan, 2010). WIM Strip berbentuk pelat alumunium yang dibalut karet sehingga dapat diletakkan dan direkatkan pada permukaan perkerasan. Cara kerja dari sensor ini adalah saat tekanan diberikan pada material piezoelectric, arus listrik akan terproduksi.

Sensor ini dipasang di perkerasan jalan dan beban kendaraan yang diterima sensor adalah yang ditransfer lewat perkerasan jalan. Dalam hal ini, karakter perkerasan juga mempengaruhi sinyal output dari sensor. Dengan menghitung dan menganalisis arus yang diproduksi, sensor dapat digunakan untuk menghitung berat dari roda yang melintas atau gabungan gandar dari kendaraan. Saat ini sudah diproduksi banyak variasi sensor *piezoelectric* dari bentuk, ukuran, pengemasan sensor, dan sebagainya, untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, pemasangan yang lebih mudah, dan jangka waktu pemakaian yang lebih lama.



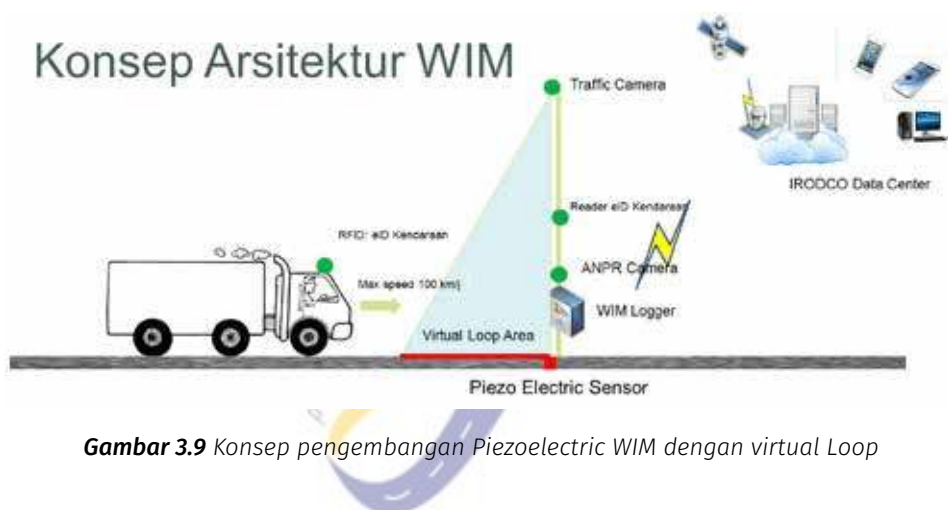
Gambar 3.8 Skema Pemasangan Sensor dan Data Logger

Untuk keperluan pengumpulan data yang lebih lengkap, pada umumnya sensor WIM dipasang dengan kelengkapan dua putaran induktif (*loop*) dan dua sensor pada setiap lajur yang dipantau. Sensor dipasang di perkerasan jalan dengan orientasi tegak lurus arah lalu lintas, sementara kedua putaran induktif (*loop*) dipasang di perkerasan jalan dengan letak di depan dan belakang sensor WIM yang digunakan. Fungsi *loop* adalah pengukur kecepatan kendaraan yang melintas dengan cara mendeteksi roda saat melintasi bagian awal *loop* kemudian menghitung waktu tempuh sampai roda tersebut melintasi bagian akhir *loop*, sehingga kecepatan kendaraan dapat dihitung sebagai fungsi jarak antar bagian *loop* dengan waktu tempuh kendaraan melintasi *loop* tersebut.

Loop adalah sensor yang berupa kabel yang dipasang dalam bentuk empat persegi panjang ukuran 2 x 1 meter dalam perkerasan jalan. Untuk 1 arah 1 lajur dibutuhkan 2 *loop* yang terpasang. Untuk instalasi sensor *loop* diperlukan bahan perekat/*double tape* untuk kabel dan dilapisi oleh lakban hitam khusus. Pembuatan *loop* untuk mengitari 4 putaran untuk 1 *loop*, kabel tersebut terlihat pada **Gambar 3.7** (Pusjatan, 2010).

Semua kelengkapan sensor WIM tersebut kemudian dihubungkan dengan *data logger* yang mencatat berupa data jumlah gandar kendaraan, jarak antar gandar kendaraan, berat setiap gandar dan berat total kendaraan tersebut. Data hasil pengukuran dari setiap kendaraan dan interval waktu akan direkam dan disimpan kedalam memori. Interval waktu yang digunakan dapat diatur sesuai dengan kebutuhan pengambilan data, misal interval harian, yaitu data yang direkam akan disalin setiap hari (24 jam) kedalam 1 *file*. Proses pencatatan data yang digunakan adalah *vehicle by vehicle* sehingga alat akan mencatat setiap kendaraan yang melintasi sensor. Layout tipikal penempatan sensor dan alat (*data logger*) ditampilkan pada **Gambar 3.8** (Pusjatan, 2010).

Pada tahun 2015 ini, Pusjatan dan PT INTI mengembangkan WIM Piezo-electric eksisting dengan mengganti loop kabel menjadi loop virtual dengan memanfaatkan kamera lalu lintas seperti yang digunakan pada SINDILA. Selain pengembangan dari sisi hardware, pada sistem pengiriman data luaran dari WIM Logger dapat dilakukan dengan GSM langsung menuju database yang tengah dikembangkan, yaitu IRODCO Data Center. Adapun konsep atau gambaran dari sistem WIM yang dikembangkan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 3.9** sebagai berikut.

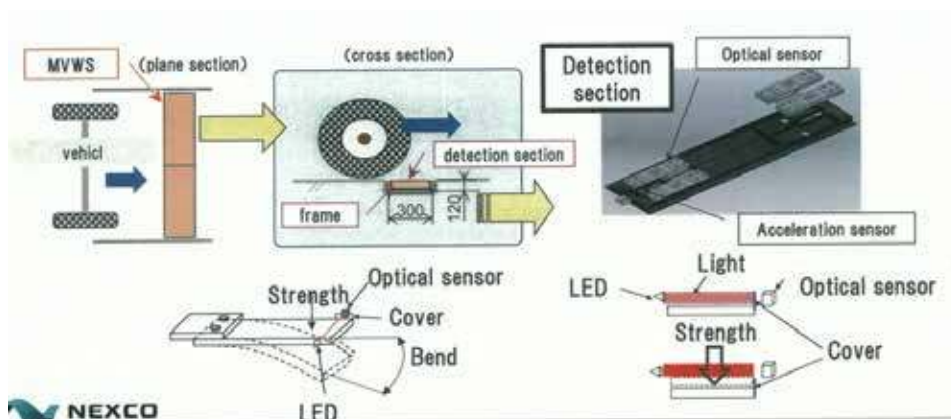


Gambar 3.9 Konsep pengembangan Piezoelectric WIM dengan virtual Loop

FIBER OPTIK WIM

WIM tipe Fiber Optik ini adalah tipe WIM tertanam pada perkerasan yang memanfaatkan serat fiber optik sebagai sensor berat dan juga sensor akselerasi untuk melakukan pengukuran WIM. Tipe sensor WIM ini lebih baik dibanding sensor WIM lain seperti Load Cell dan Piezoelectric, diantaranya dari segi kemampuan mengukur kendaraan dengan kecepatan yang lebih tinggi (hingga 80 km/jam dibanding 40 km/jam pada Load Cell dan Piezoelectric) dengan durabilitas hingga 10 tahun.

Secara prinsip, sistem ini bekerja dimana jika ada kendaraan yang melintas, maka pelat di atas sensor yang terlintas akan mengalami lenturan sehingga terdeteksi sensor optik di bawahnya. Sensor optik ini selalu memancarkan sinar LED sehingga jika pelat penutup berdeformasi dan menutupi sinar LED



Gambar 3.10 Skema WIM dengan sensor Fiber Optik

Tabel 3.1 Spesifikasi Fiber Optik WIM NEXCO

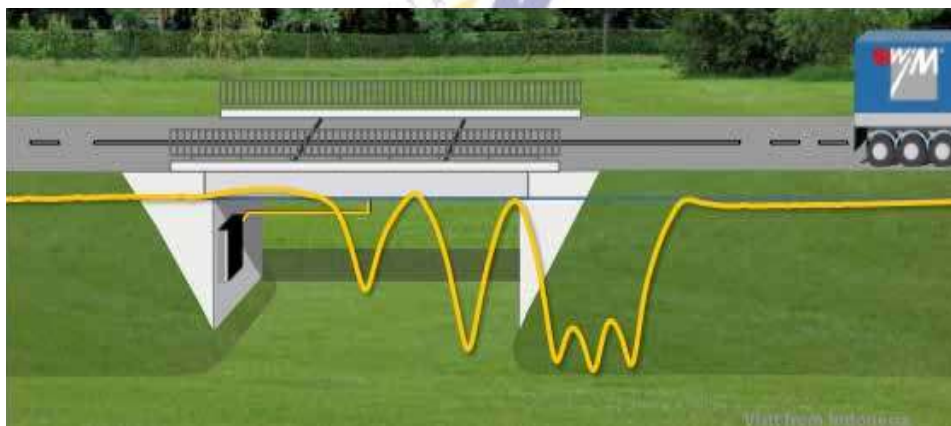
Item	Specifications
Detection section dimension	Length : about 300mm, Width : about 1,750mm, (#2 sets per lane) Weight : about 300kgf
Vehicle passing speed	80km/h
Detection rating	Axle weight : 20t(Full Scale)
System accuracy	$\leq 20t$ Within $\pm 5\%$ (F.S.) : An error of less than 1 ton.($\leq \pm 1t$) $> 20t$ Within $\pm 5\%$ (READ)
Overload	150% of rating
Measurable maximum number of axles	The 9-axles units per vehicle
Detection of gross vehicle weight	By measuring the number of axles and the axle weight are calculated from that value.
Detection section lifetime	10 million axles or more than 10 years after installation

ini, besaran deformasi akan terukur dan besaran beban dapat dihitung dan didapatkan. Adapun sebagai gambaran, spesifikasi dari salah satu sistem Fiber Optik WIM dapat dilihat pada **Tabel 3.1** (NEXCO Jepang, 2015).

WIM BRIDGE

Umum

WIM Bridge adalah sistem pengukuran beban kendaraan secara aktual tanpa perlu memberhentikan kendaraan tersebut terlebih dahulu, dengan memanfaatkan struktur jembatan eksisting yang terinstrumentasi sebagai transduser (SiWIM System, 2011). Sistem ini menggunakan strain gages di beberapa titik pada struktur jembatan. Agar lebih sederhana, sistem ini biasanya digunakan pada jembatan dengan sistem struktur statis tertentu, yaitu terletak pada dua tumpuan sederhana, dengan lokasi pemasangan strain gages biasanya ditempatkan di serat bawah tengah bentang jembatan maupun di seperempat bentang jembatan. Ketika kendaraan melintasi jembatan, dapat diketahui regangan yang tercatat pada strain gages, yang kemudian dapat dianalisis balik untuk mendapat besaran beban akibat regangan struktur jembatan yang terjadi. Prinsipnya, teknologi WIM Bridge ini memanfaatkan respon dinamis elemen jembatan terhadap beban kendaraan yang melintas jembatan.



Gambar 3.11 Ilustrasi pengukuran beban kendaraan bergerak dengan Bridge WIM



Gambar 3.12 Instrumentasi sistem Bridge WIM pada jembatan dan culvert

SiWIM WIM Bridge System CES-TEL d.o.o (Slovenia, 2015)

Dalam pengenalan sistem SiWIM sebagai salah satu sistem WIM Bridge di dunia, dilakukan kunjungan lapangan ke lokasi dimana terdapat instalasi dari SiWIM Bridge WIM System, yaitu di *highway* di utara Ljubljana, ibukota Slovenia yang menuju Austria. Dalam kesempatan ini, diukur berat kendaraan yang melintas jembatan yang terpasang sistem SiWIM secara *real time* dan dapat dipantau lewat *website* secara mobile dari telepon genggam maupun laptop yang terkoneksi internet. Terpantau terdapat beberapa kendaraan yang terindikasi memiliki berat statis yang melebihi batasan ijin (*overload*) di Slovenia, yaitu melebihi 40 ton.

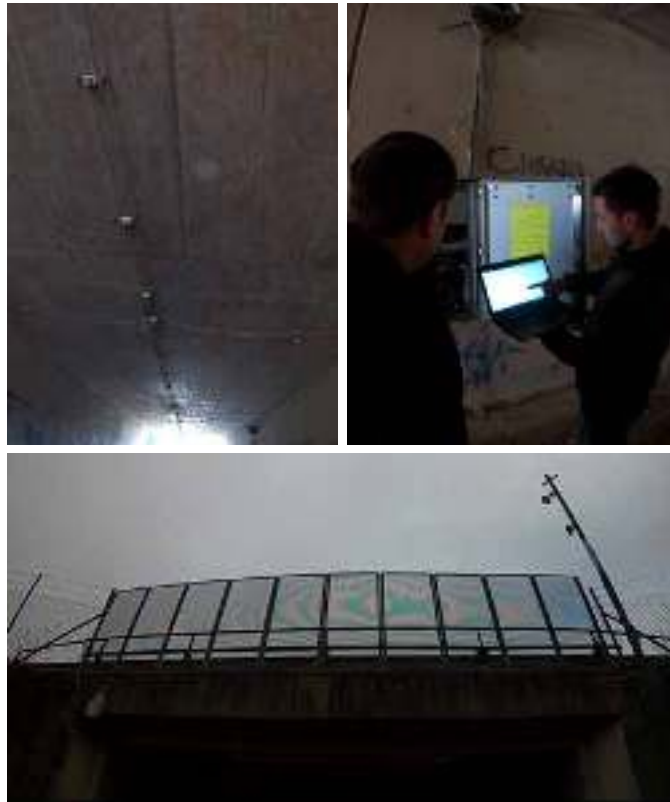
Pada pengenalan sistem ini, salah satu fungsi dari SiWIM untuk penegakan hukum terkait beban berlebih diperlihatkan. Dari indikasi kendaraan yang *overload* pada sistem SiWIM, kendaraan tersebut diberhentikan oleh polisi untuk diukur beratnya secara statis di rest area highway, dan ternyata terbukti dengan selisih berat terukur SiWIM secara dinamis dengan berat terukur statis pada pengukuran kali ini hanya selisih 0.4 ton. Dengan demikian, sesuai hukum yang berlaku



Gambar 3.13 Identifikasi kendaraan yang beratnya melebihi batas beban ijin 40 ton



Gambar 3.14 Pengukuran beban kendaraan secara statis dengan plate static weighing di rest area



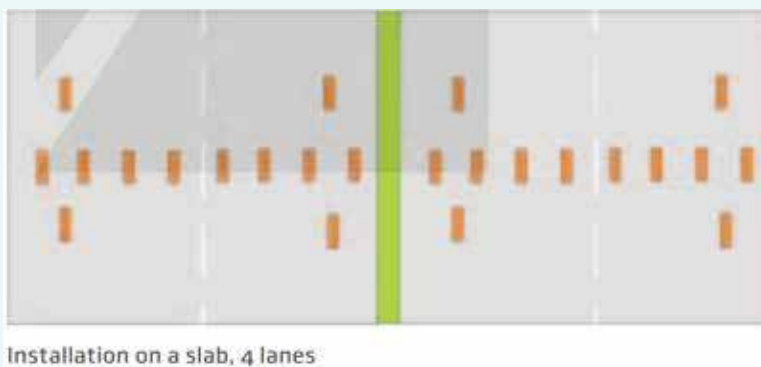
Gambar 3.15 Instalasi sensor SiWIM di jembatan tipe box culvert

di Slovenia, supir dan juga perusahaan yang mengoperasikan truk *overload* ini dihukum dengan denda yang cukup besar, yaitu sekitar 2000 Euro.

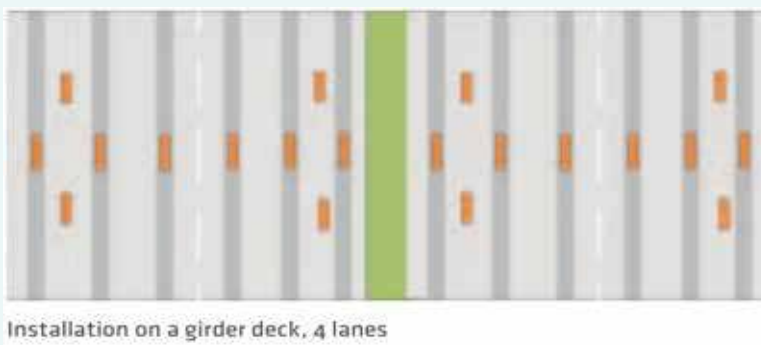
Selanjutnya, jembatan yang dipasang sistem SiWIM ini kemudian ditinjau dari bagian bawahnya. Jembatan ini adalah jembatan tipe *box culvert* dengan bentang sekitar 8 m dan lebar lalu lintas dua lajur per arah untuk dua arah. Sistem sensor yang terpasang terdiri dari sensor kecepatan yang dipasang pada arah longitudinal jembatan dan sensor berat dipasang seri dengan jarak sekitar ketebalan pelat sepanjang arah lateral jembatan. Sebagai tambahan, dipasang juga kamera untuk menangkap gambar dari kendaraan yang melintas. Sensor ini seluruhnya merupakan sensor berupa *strain gage* yang berfungsi mengukur deformasi atau regangan yang dapat dikonversi menjadi tegangan. Seluruh sensor tersebut terhubung ke *data logger* kemudian di dalamnya



Gambar 3.16 Layout tipikal instalasi sensor di jembatan 2 lajur tipe slab, girder, box girder



Gambar 3.17 Layout tipikal instalasi sensor di jembatan 4 lajur tipe slab



Gambar 3.18 Layout tipikal instalasi sensor di jembatan 4 lajur tipe girder



Gambar 3.19 Detail komponen data logger box sistem SiWIM



Gambar 3.20 Sensor strain gage sistem SiWIM

terdiri dari fungsi amplifikasi, fungsi komputasi untuk merubah gaya dalam atau tegangan menjadi beban gandar dan kendaraan yang melintas, kecepatan, klasifikasi kendaraan, dan fungsi pengiriman data atau telemetri.

Berikut merupakan penjelasan lebih lanjut adalah mengenai sistem sensor dan sistem proses data di dalam *data logger box*.

- Komponen sensor berbasis strain gage analog dengan formasi wheatstone full bridge
- Data sensor di konversi oleh DAC module dan diamplifikasi sehingga data diinterpretasi respon dari struktur yang dibebani kendaraan/truk
- Data beban yang direkam hanya untuk beban berat berupa truk tidak termasuk kendaraan kecil
- Parameter mendasar yang direkam adalah respon dari sifat garis pengaruh jembatan terbebani, pembesaran dinamis, distribusi beban kendaran diatas jembatan dan kecepatan kendaraan
- Validasi perekaman kendaraan beban lebih digunakan camera yang direkam pada database sensor di station lapangan, dan diakses sesuai permintaan (Retrieve on demand)



- Raw data respon disimpan di satu unit station yang terdiri dari hard-disk yang diberi catu daya (dapat berupa solar panel atau jaringan listrik) dengan backup listrik berupa accu kering yang bertahan sampai dengan 2 hari.
- Data dikirim ke database server menggunakan GSM (hanya data text dan sudah dikalkulasi pada station lokal)
- Pelaporan dan penyajian pelaporan berbasis interface web ■

Gambar 3.21 Modul amplifikasi sensor sistem SiWIM

Tabel 4.1 Klasifikasi Kendaraan beserta konfigurasi sumbu Bina Marga

No	Klasifikasi Kendaraan	Konfigurasi Sumbu
1	Kendaraan Ringan	MP 1.1
2	Medium Truck/Bus Kecil	T 1.2 & B. 1.2
3	Truk 2 Sumbu	T 1.2
4	Truk 3 Sumbu	T 1.22
5	Truk 4 Sumbu	T 12. 22
6	Truk Gandengan	T 1.2 + 22
	Truk 3 Sumbu + Gandengan 2 Sumbu	T 1.22 + 22
7	Traktor 2 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	T 12 - 2
8	Traktor 2 Sumbu + Trailer 2 Sumbu	T 1.22 - 22
	Traktor 3 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	T 1.22-2
	Traktor 3 Sumbu + Trailer 2 Sumbu	T 1.22-22
9	Traktor 2 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	T 1.22 - 222
	Traktor 3 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	T 1.22-222
10	Bus Besar	B 1.2

4

KLASIFIKASI KENDARAAN

BINA MARGA

Klasifikasi kendaraan yang dikeluarkan oleh Bina Marga ini merupakan acuan kelas kendaraan yang digunakan untuk keperluan perencanaan infrastruktur jalan di Indonesia. Adapun pembagian kelas kendaraan menjadi 10 kelas kendaraan didasarkan pada konfigurasi sumbu roda dari kendaraan yang ada. Klasifikasi Bina Marga ini terdiri dari Kelas 1 Kendaraan Ringan; Kelas 2 Medium Truck/Bus Kecil; Kelas 3 Truk 2 Sumbu; Kelas 4 Truk 3 Sumbu; Kelas 5 Truk 4 Sumbu; Kelas 6 Truk Gandengan atau Truk 3 Sumbu + Gandengan 2 Sumbu; Kelas 7 Traktor 2 Sumbu + Trailer 1 Sumbu; Kelas 8 Traktor 2 Sumbu + Trailer 2 Sumbu atau Traktor 3 Sumbu + Trailer 1 Sumbu atau Traktor 3 Sumbu + Trailer 2 Sumbu; Kelas 9 Traktor 2 Sumbu + Trailer 3 Sumbu atau Traktor 3 Sumbu + Trailer 3 Sumbu; dan Kelas 10 yaitu Bus Besar.

PERHUBUNGAN

Klasifikasi kendaraan yang diatur oleh Kementerian Perhubungan (dahulu Departemen Perhubungan) lewat Direktorat Jenderal Perhubungan Darat lewat surat edaran yang ditujukan kepada seluruh dinas perhubungan/LLAJ di masing-masing wilayah di Indonesia dikeluarkan pada tahun 2008. Surat edaran tersebut berisi panduan batasan maksimum perhitungan JBI (Jumlah berat yang diizinkan) dan JBKI (jumlah berat kombinasi yang diizinkan) untuk mobil barang, kendaraan khusus, kendaraan penarik berikut kereta tempelan/kereta gandengan.

Maksud dari klasifikasi ini adalah untuk penertiban dan penegakan aturan muatan beban ijin untuk kendaraan dari kelas-kelas kendaraan yang dimaksud untuk melintasi suatu jalan dengan kelas jalan tertentu. Batasan beban JBI maupun JBKI dalam klasifikasi ini adalah beban maksimum dari kendaraan dari masing-masing kelas kendaraan yang dimaksud, yang didasarkan pada JBB (Jumlah berat yang diperbolehkan), berat kosong kendaraan bermotor (tanpa pengemudi, penumpang, dan muatan), jarak sumbu (*wheel base*), jarak titik berat muatan (q) yang diukur dari sumbu paling depan, jarak antar sumbu depan dengan titik berat ruang tempat duduk pengemudi (p) / titik berat kabin dan jumlah penumpang.




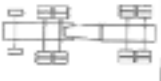

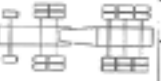
Adapun lampiran dari surat edaran nomor: SE.02/AJ.108/DEJD/20008 Departemen Perhubungan tersebut antara lain sebagai berikut.

Tabel 4.2 Konfigurasi sumbu, kelas jalan, muatan sumbu terberat (MST), dan jumlah berat yang diizinkan (JBI)

HUBUNGAN KONFIGURASI SUMBU, KELAS JALAN, MST (MUATAN SUMBU TERBERAT) dan JBI (JUMLAH BERAT YANG DIZINKAN)											
No	KONFIGURASI SUMBU	GAMBAR KONFIGURASI SUMBU		KELAS JALAN	MST MAKSIMAL					JBI	
		SAMPING	ATAR		Sb I	Sb II	Sb III	Sb IV	Sb V	MAX	KETERANGAN
1	1.1			II III	6 T 8 T	6 T 8 T	-	-	-	12 T 10 T	MST = MST MAKSIMAL = KEKUATAN RANCANG SUMBU
2	1.2			II III	6 T 6 T	10 T 8 T	-	-	-	16 T 14 T	MST = MST MAKSIMAL = KEKUATAN RANCANG SUMBU
3	11.2			II III	8 T 8 T	4 T 6 T	10 T 8 T	-	-	24 T 19 T	MST = MST MAKSIMAL = KEKUATAN RANCANG SUMBU
4	1.2.2			II III	6 T 8 T	9 T 7,5 T	9 T 7,5 T	-	-	24 T 21 T	MST = MST MAKSIMAL = KEKUATAN RANCANG SUMBU
5	1.1.2.2			II	6 T	6 T	9 T	9 T	-	30 T	Suspensi Biasa
					6 T	7 T	10 T	10 T	-	33 T	Sb 2,3,4: Air Bag Suspension
					6 T	7 T	8 T	9 T	-	31 T	Sb 2 : Air Bag Suspension
				III	6 T	6 T	7,5 T	7,5 T	-	27 T	Suspensi Biasa
					6 T	7 T	8 T	8 T	-	29 T	Sb 2,3,4: Air Bag Suspension
					6 T	7 T	7,5 T	7,5 T	-	28 T	Sb 2 : Air Bag Suspension
6	1.1.2.2.2			II	6 T	6 T	7 T	7 T	7 T	33 T	Suspensi Biasa
					6 T	7 T	8 T	8 T	8 T	37 T	Sb 2,3,4,5 = Air Bag Suspension
					6 T	7 T	7 T	7 T	7 T	34 T	Sb 2 : Air Bag Suspension
				III	6 T	6 T	6 T	6 T	6 T	30 T	Suspensi Biasa
					6 T	7 T	7 T	7 T	7 T	34 T	Sb 2, 3, 4, 5 = Air Bag Suspension
					6 T	7 T	6 T	6 T	6 T	31 T	Sb 2 : Air Bag Suspension
7	1.2.2.2			II	6 T	7 T	7 T	7 T	-	27 T	Suspensi Biasa
					6 T	8 T	8 T	8 T	-	30 T	Sb 2,3,4: Air Bag Suspension
				III	6 T	6 T	6 T	6 T	-	24 T	Suspensi Biasa
					6 T	7 T	7 T	7 T	-	27 T	Sb 2,3,4: Air Bag Suspension

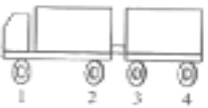
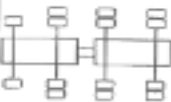
Keterangan : T dalam Ton

Tabel 4.3 Konfigurasi sumbu, kelas jalan, muatan sumbu terberat (MST), dan jumlah berat kombinasi yang diizinkan (JBKI) untuk kendaraan penarik dan kereta tempelan


HUBUNGAN KONFIGURASI SUMBU, KELAS JALAN, MST (MUATAN SUMBU TERBERAT) dan JBKl (JUMLAH BERAT KOMBINASI YANG DIZINKAN) untuk KENDARAAN PENARIK dan KERETA TEMPELAN												
No	KONFIGURASI SUMBU	GAMBAR		KELAS JALAN	MST MAKSIMAL						JBKl	
		TAMPAK SAMPING	TAMPAK ATAS		Sb I	Sb II	Sb III	Sb IV	Sb V	Sb VI	MAX	KETERANGAN
1	1.2-22			II	6 T	10 T	9 T	9 T	-	-	34 T	SUSPENSİ BİASA
				III	6 T	8 T	7,5 T	7,5 T	-	-	29 T	
2	1.22-22			II	6 T	9 T	9 T	9 T	9 T	-	42 T	SUSPENSİ BİASA
				III	6 T	7,5 T	7,5 T	7,5 T	7,5 T	-	36 T	
				II	6 T	10 T	10 T	10 T	10 T	-	46 T	SUMBU 2,3,4,5 MENGGUNAKAN AIR BAG SUSPENSION
				III	6 T	8 T	8 T	8 T	8 T	-	38 T	
				II	6 T	9 T	9 T	10 T	10 T	-	44 T	SUMBU 4 dan 5 MENGGUNAKAN AIR BAG SUSPENSION
				III	6 T	7,5 T	7,5 T	8 T	8 T	-	37 T	
3	1.22-222			II	6 T	9 T	9 T	7 T	7 T	7 T	45 T	Suspensi Biasa
				III	6 T	7,5 T	7,5 T	6 T	6 T	6 T	39 T	
				II	6 T	10 T	10 T	10 T	10 T	10 T	56 T	Sb 2, 3, 4, 5, 6 = Air Bag Suspension + Steering Axle
				III	6 T	8 T	8 T	8 T	8 T	8 T	46 T	
				II	6 T	9 T	9 T	10 T	10 T	10 T	54 T	Sb 1, 2, 3 = suspensi biasa Sb 4, 5, 6 = Air Bag Suspension + Steering Axle
				III	6 T	7,5 T	7,5 T	8 T	8 T	8 T	45 T	
				II	6 T	10 T	10 T	10 T	10 T	10 T	56 T	Sb 2, 3 : Air Bag Suspension Sb 4, 5, 6 : Air Bag Suspension + Steering Axle
				III	6 T	8 T	8 T	8 T	8 T	8 T	46 T	

Keterangan : T dalam Ton

Tabel 4.4 Konfigurasi sumbu, kelas jalan, muatan sumbu terberat (MST), dan jumlah berat kombinasi yang diizinkan (JBKI) untuk kendaraan penarik dan kereta tempelan









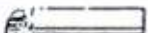


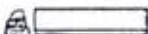
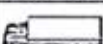

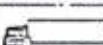
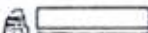

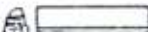
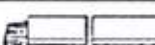

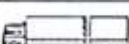

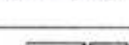

HUBUNGAN KONFIGURASI SUMBU, KELAS JALAN, MST (MUATAN SUMBU TERBERAT) dan JBKl (JUMLAH BERAT KOMBINASI YANG DIZINKAN) untuk KENDARAAN PENARIK dan KERETA TEMPELAN												
No	KONFIGURASI SUMBU	GAMBAR		KELAS JALAN	MST MAKSIMAL						JBKl	
		TAMPAK SAMPING	TAMPAK ATAS		Sb I	Sb II	Sb III	Sb IV	Sb V	Sb VI	MAX	KETERANGAN
1	1.2 + 2.2			II III	6 T 6 T	10 T 8 T	10 T 8 T	10 T 8 T	-	-	36 T 30 T	-

Keterangan : T dalam Ton



EURO13

Sistem EURO13 ini merupakan acuan pengelompokan jenis kendaraan standar di Eropa dengan skema pengelompokan menjadi 13 jenis kendaraan, seperti terlihat pada **Gambar 4.1** di bawah ini. Sementara jarak antar as kendaraan mengacu pada **Tabel 4.5**. Sistem ini diterapkan pada data logger yang digunakan pada WIM Piezoelectric yang digunakan oleh Pusjatan yang disetarakan dengan klasifikasi kendaraan Bina Marga.

Vehicle Classification Table			GR03-EUR13		
1	Car, Light Van		6	Rigid 3-Axle HGV & 2-Axle Drawbar Trailer	
	Light Goods Vehicle (LGV)			Rigid 3-Axle HGV & 3-Axle Drawbar Trailer	
	Car/LGV & 1-Axle Caravan/Trailer				
	Car/LGV & 2-Axle Caravan/Trailer		7	Artic, 2-Axle Tractor & 1-Axle Semi-Trailer	
2	Rigid 2-Axle Truck (HGV)		8	Artic, 2-Axle Tractor & 2-Axle Semi-Trailer	
3	Rigid 3-Axle Truck (HGV)				
	Rigid 3-Axle Truck (HGV)		9	Artic, 2-Axle Tractor & 3-Axle Semi-Trailer	
4	Rigid 4-Axle Truck (HGV)		10	Artic, 3-Axle Tractor & 1-Axle Semi-Trailer	
	Rigid 4-Axle Truck (HGV)			Artic, 3-Axle Tractor & 2-Axle Semi-Trailer	
5	Rigid 2-Axle Truck & 2-Axle Drawbar Trailer		11	Artic, 3-Axle Tractor & 3-Axle Semi-Trailer	
	Rigid 2-Axle Truck & 3-Axle Drawbar Trailer		12	Bus or Coach 2-Axle	
	Rigid 2-Axle Truck & 1-Axle Caravan/Trailer			Bus or Coach 3-Axle	
	Rigid 2-Axle Truck & 2-Axle Trailer/Caravan		13	Vehicle with 7 or more Axles	
				Vehicle not classified above	

Gambar 4.1 Pembagian Jenis Kendaraan menurut Standar EURO 13

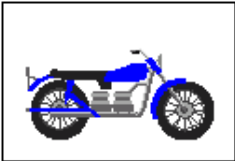


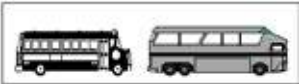
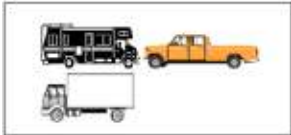
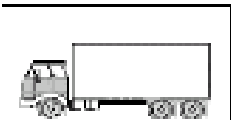

Tabel 4.5 Jarak antar Sumbu Kendaraan per Kelas menurut Standar EURO 13
(dalam satuan m)

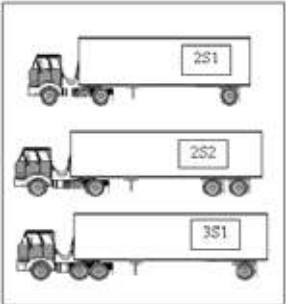
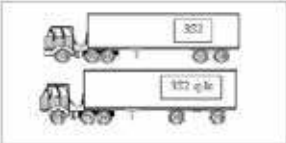
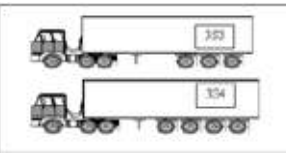



Kelas	Tipe	SP1		SP2		SP3		SP4		SP5	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	EUR13-1	1.71	2.99								
2	EUR13-2	2.99	4.51								
3	EUR13-3	2.00	7.01	1.00	1.91						
4	EUR13-4	1.00	1.91	2.00	12.01	1.00	1.91				
5	EUR13-5	2.96	12.01	2.00	12.01	2.50	12.01				
6	EUR13-6	2.00	12.01	1.00	1.91	1.90	12.01	2.50	12.01		
7	EUR13-7	1.89	4.00	4.01	15.01						
8	EUR13-8	1.89	4.00	3.50	15.01	1.05	2.51				
9	EUR13-9	2.00	12.01	2.00	15.01	0.70	1.81	0.70	1.81		
10	EUR13-10	1.70	5.26	1.00	1.91	2.00	15.01	1.00	2.51		
11	EUR13-11	1.90	5.25	1.00	1.90	2.00	15.00	1.00	1.90	1.00	1.90
12	EUR13-12	4.51	6.41								

FHWA 13

Sistem FHWA 13 ini merupakan acuan pengelompokan jenis kendaraan standar di Amerika Serikat yang dikeluarkan oleh *Federal Highway Administration* (FHWA) dengan skema pengelompokan menjadi 13 jenis kendaraan beserta ilustrasi jenis kendaraan masing-masing kelas dapat dilihat pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4.6 Skema klasifikasi FHWA 13

Kategori Umum	No Kelas	Deskripsi Umum	Definisi	Identifikasi tambahan	Sub kelas
KENDARAAN PENUMPANG	1	 Sepeda Motor	Kendaraan 2 sumbu, 2 atau 3 roda.	Termasuk skuter, moped, dan sepeda motor roda 3	
	2	 Mobil Penumpang	Kendaraan 2 sumbu. Dapat memiliki trailer dengan 1 atau 2 sumbu	Pickup dengan bak pendek (+2 m); SUV; minivan; sedan	
	3	 Pickup, panel, van	Kendaraan 2 sumbu, 4 roda. Dapat memiliki trailer dengan 1 atau 2 sumbu	Pickup dengan bak panjang (+ 3 m); short-bed and conversion van; full-size work van; limousine.	
	4	 Bus	Kendaraan 2 atau 3 sumbu, dengan panjang penuh	Bus sekolah; transit; swasta; komersial.	
KENDARAAN BARANG	5	 Truk tunggal	Truk tunggal dengan 2 sumbu, 6 roda, (roda belakang ganda).	Truk sampah atau truk air (dengan atau tanpa trailer 2 sumbu); bus sekolah; limousin panjang.	
	6	 Truk tunggal	Truk tunggal dengan 3 sumbu	Truk sampah; traktor tunggal dengan 3 sumbu tanpa trailer; peralatan berat.	
	7	 Truk tunggal	Truk tunggal dengan 4 sumbu atau lebih	Truk dengan 4 sumbu atau lebih pada rangka tunggal.	

KENDARAAN BARANG	8	 <p>Truk trailer tunggal</p>	Truk trailer tunggal dengan 3 atau 4 sumbu	Truk/traktor 2 sumbu dengan trailer tunggal 1 sumbu; truk 2 sumbu dengan trailer 2 sumbu; truk 3 sumbu dengan trailer tunggal 1 sumbu.	2S1 2S2 3S1
	9	 <p>Truk trailer tunggal</p>	Truk trailer tunggal dengan 5 sumbu	Truk/traktor 3 sumbu dengan trailer tunggal 2 sumbu (18 wheeler); truk 2 sumbu dengan trailer 3 sumbu; truk sampah dengan trailer tunggal 2 sumbu.	3S2 3S2-Split
	10	 <p>Truk trailer tunggal</p>	Truk trailer tunggal dengan 6 sumbu atau lebih	Truk/traktor 3 sumbu dengan trailer tunggal 3 sumbu atau lebih.	3S3 3S4
	11	 <p>Truk multi-trailer</p>	Truk multi-trailer dengan 5 sumbu atau kurang	Truk/traktor 3 sumbu dengan 2 trailer, trailer pertama 1 sumbu dan trailer kedua 2 sumbu.	2S1-2
KENDARAAN BARANG	12	 <p>Truk multi-trailer</p>	Truk multi-trailer dengan 6 sumbu	Truk/traktor 2-3 sumbu dengan 2 trailer, trailer pertama 1-2 sumbu dan trailer kedua 2 sumbu.	2S2-2 3S1-2
	13	 <p>Truk multi-trailer</p>	Truk multi-trailer dengan 7 sumbu	Truk/traktor 3 sumbu dengan 2 trailer atau lebih.	3S2-2

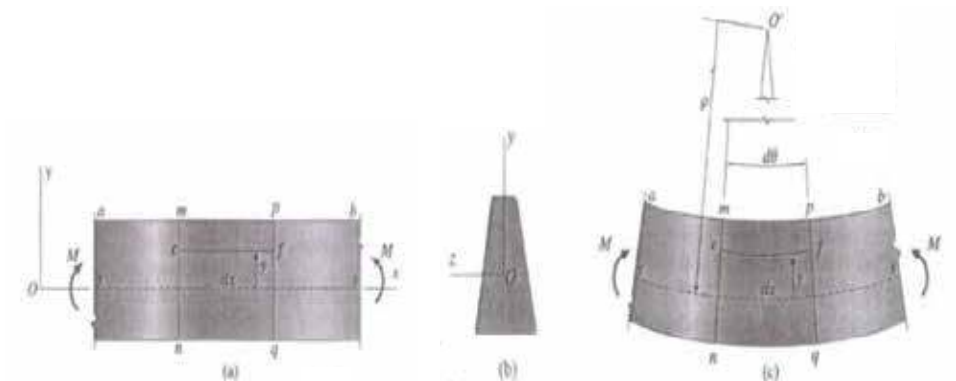
5

ALGORITMA PARAMETERIK

RESPON STRUKTUR

Regangan, tegangan, momen lentur

Respon struktur berupa regangan didapat secara langsung dari sensor strain gage. Dari jembatan yang dimanfaatkan sebagai transduser WIM umumnya memanfaatkan elemen lentur untuk mendapatkan respon akibat beban kendaraan yang melintas. Dari strain gage pada elemen lentur, didapat data regangan yang kemudian dapat diolah menjadi gaya dalam sebagai respon struktur jembatan terhadap beban seperti momen lentur gelagar atau lantai. Pada dasarnya, proses pengolahan dari data bacaan sensor regangan dapat dilakukan dengan metode perhitungan tegangan dan regangan pada mekanika bahan.



Gambar 5.1 Deformasi elemen lentur

Elemen yang mengalami lentur positif akan merespon dengan serat atas elemen tertekan dan serat bawah tertarik seperti tergambar di atas. Sesuai hukum Hooke, tegangan adalah regangan dikalikan dengan modulus young (E).

$$\sigma_x = E \cdot \epsilon_x$$

Dengan:

σ_x = tegangan longitudinal penampang

E = Modulus Young

ϵ_x = regangan longitudinal penampang

Sehingga, hubungan antara regangan dan tegangan adalah sebanding dan searah. Akibat momen positif, maka tegangan positif atau tarik akan terjadi di bawah garis netral penampang dan tegangan negatif atau tekan akan terjadi di atas garis netral penampang. Dari tegangan regangan ini, dapat diolah menjadi besaran momen yang terjadi di masing-masing lokasi sensor *strain gage*, dengan persamaan tegangan penampang sebagai berikut.

$$\sigma_x = - \frac{M \cdot y}{I}$$

Dengan:

σ_x = tegangan longitudinal penampang

M = momen lentur penampang

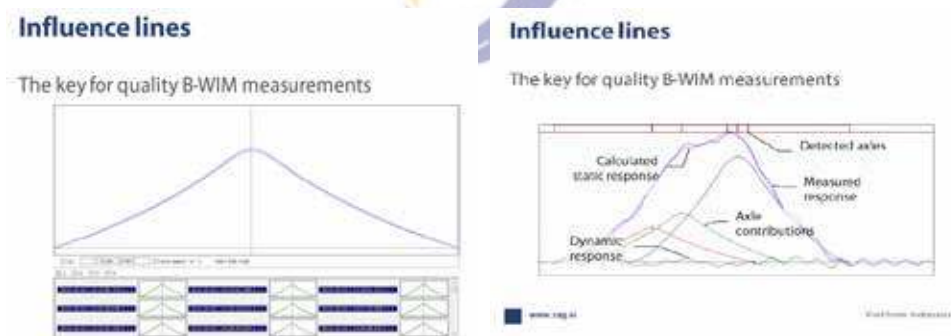
y = jarak dari sumbu netral ke suatu titik yang ditinjau tegangannya

I = momen inersia penampang

Garis pengaruh

Garis pengaruh dari gaya dalam pada bentang jembatan juga harus ditinjau dan diketahui, sehingga untuk lokasi beban yang berbeda atau bergerak, gaya dalam yang terjadi dapat diketahui. Sehingga, untuk menghitung balik berapa beban bergerak yang menyebabkan suatu regangan pada elemen lentur jembatan, dapat diketahui dari garis pengaruh.

Garis pengaruh dapat diperhitungkan dari analisis struktur sederhana, namun perlu dikoreksi terhadap fakta yang ditemukan pada pengukuran secara aktual. Pada umumnya, sifat perletakan jembatan yang tidak bersifat ideal seperti pemodelan dimana perletakan sendi yang seharusnya bebas berotasi atau rol yang seharusnya dapat bergerak bebas pada arah longitudinal, pada kenyataannya tidak sepenuhnya dapat mengakomodasi rotasi dan gerakan longitudinal tersebut. Sehingga, perlu dilakukan kalibrasi terhadap garis pengaruh dari hasil pengukuran yang dilakukan dengan memasang sensor secara seri pada arah longitudinal sehingga didapat garis pengaruh dari gaya dalam elemen lentur jembatan yang aktual sesuai kondisi jembatan tersebut.



Gambar 5.2 Garis Pengaruh (ZAG Institute, 2015)

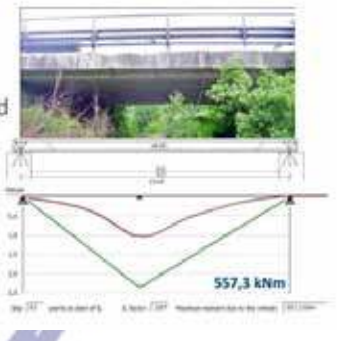
Soft load testing

- 9.2 m slab bridge
- built in 1980
- simply supported



Soft load testing

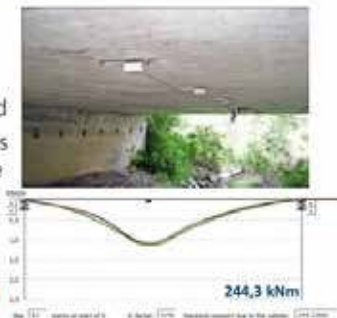
- 9.2 m slab bridge
- built in 1980
- **not** simply supported



Soft load testing

- 9.2 m slab bridge
- built in 1980
- not simply supported
- influence of thickness of the superstructure

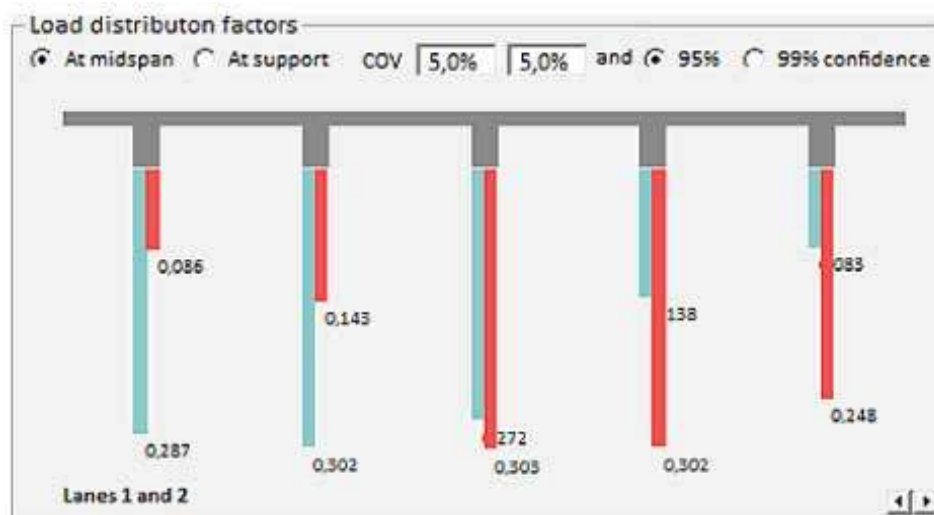
$$M = 44\% \times M_{THEOR}$$



Gambar 5.3 Contoh kalibrasi garis pengaruh momen lentur jembatan tumpuan sederhana (dengan Soft Loading Test)

Distribusi momen lentur akibat beban

Perilaku struktur lain yang perlu diketahui adalah distribusi momen lentur akibat beban pada elemen-elemen jembatan pada arah lateral. Sebagai



Gambar 5.4 Contoh faktor distribusi beban pada jembatan gelagar

contoh, jembatan gelagar akan mendistribusikan beban menjadi gaya dalam pada masing-masing gelagar dengan besaran yang berbeda satu sama lain berdasarkan posisi beban, seperti terlihat pada **Gambar 5.4** (Znidaric, 2015). Dari besaran yang berbeda di tiap gelagar yang dipasang sensor strain gage, dapat diketahui faktor atau rasio besaran momen lentur pada satu gelagar dibandingkan dengan pada gelagar lain, yang merupakan faktor distribusi beban. Faktor distribusi beban ini dapat digunakan untuk menghitung balik besaran beban dari respon struktur yang terbaca pada sensor. Selain besaran beban, hal yang dapat diketahui adalah posisi beban roda pada arah lateral.

BERAT RODA

Berat roda dapat dihitung balik dari respon struktur yang telah didapat dari bacaan sensor strain gage, yang diolah menjadi momen lentur, kemudian dicocokkan posisinya pada distribusi momen lentur pada arah lateral dan garis pengaruh momen lentur pada arah longitudinal, sehingga didapat suatu besaran beban yang mewakili berat roda yang melintas. Posisi roda kontak juga dapat diketahui dengan menggunakan faktor distribusi beban yang telah diketahui. Dari beban roda ini dapat diolah menjadi beban gandar atau beban sumbu roda kendaraan.

KELAS KENDARAAN

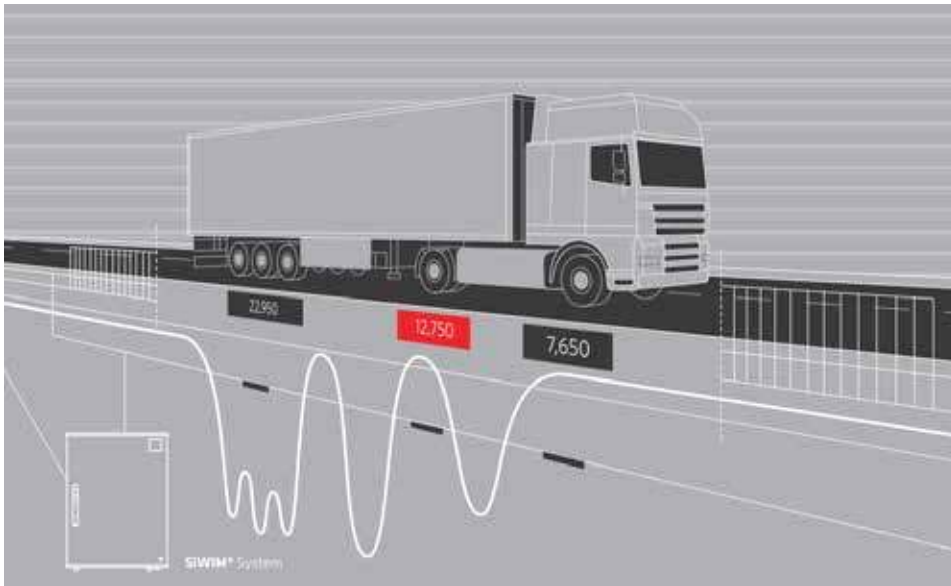
Kelas kendaraan dibedakan berdasarkan sistem klasifikasi yang diacu. Dari sistem klasifikasi yang diacu tersebut, terdapat batasan kriteria untuk masing-masing kelas kendaraan, diantaranya klasifikasi berdasarkan jarak antar sumbu roda kendaraan dan berat maksimal masing-masing sumbu roda kendaraan seperti yang telah diuraikan pada BAB IV Klasifikasi Kendaraan. Dari batasan tersebut, satu kendaraan yang tunggal pada prinsipnya dapat dibedakan dengan kendaraan yang lain berdasarkan kecepatan tempuh yang sama untuk keseluruhan sumbu roda kendaraan melintasi sensor pada arah longitudinal. Dari berat roda, didapat beban gandar, kemudian beban gandar untuk kendaraan yang sama dengan jarak antar gandar yang sesuai kelas kendaraan berdasarkan klasifikasi yang diacu, dan kecepatan yang sama untuk setiap sumbu roda kendaraan tersebut, dapat diacu menjadi satu kendaraan tunggal yang terukur beratnya.

BERAT KENDARAAN

Seperti terurai di atas, berat suatu kendaraan didapat dari penjumlahan beban gandar yang terdeteksi sebagai satu kendaraan dengan kriteria klasifikasi kendaraan dan kecepatan yang sama dalam melintasi sensor arah longitudinal. Parameter ini merupakan salah satu luaran utama yang ingin diketahui dari pengukuran dengan sistem WIM Bridge ini dan dapat dibandingkan dengan beban statis. Maka, untuk validasi data dan algoritma, dapat dilakukan kalibrasi dari besaran berat kendaraan ini. Faktor kalibrasi dapat dimasukkan pada penentuan berat dengan meninjau berat kendaraan terukur sistem ini dibandingkan dengan berat terukur statis dari kendaraan yang sama.

KECEPATAN KENDARAAN

Kecepatan kendaraan didapat dari waktu tempuh satu roda kontak yang sama dari satu sensor ke sensor lain pada arah longitudinal dengan jarak yang diketahui, untuk satu kendaraan yang terdeteksi sebagai satu kendaraan tunggal. Sensor arah longitudinal jembatan ini dapat dipasang satu garis lurus seperti terlihat pada **Gambar 5.6** sebagai berikut. Pencatatan kecepatan ini



Gambar 5.5 Ilustrasi pengukuran beban kendaraan (SiWIM)



Gambar 5.6 Sensor arah longitudinal jembatan pada jembatan box culvert

perlu dilakukan untuk proses kalibrasi dan peningkatan akurasi pengukuran agar mengurangi pengaruh kecepatan ke dalam hasil pengukuran (*speed dependance*). ■

6

SISTEM KEAMANAN

UMUM

Sistem WIM Bridge menggunakan instrumen elektronik berupa sensor, perangkat penyimpan data, pengolah data, telemetri, dan pendukungnya seperti kamera, kabel dan catu daya tentunya memiliki kerawanan tertentu terhadap kondisi di sekitar jembatan yang sulit untuk diawasi secara terus menerus. Oleh karena itu, dalam masa operasional harus direncanakan sistem keamanan untuk melindungi instrumentasi dari jembatan yang digunakan sebagai WIM Bridge ini, baik dari kondisi lingkungan, kerawanan pencurian atau vandalisme, maupun keamanan data yang dihasilkan dari pengukuran WIM Bridge ini.

STANDAR SPESIFIKASI PROTEKSI INSTRUMEN

Secara umum, peralatan elektronik yang digunakan untuk instrumentasi jembatan yang digunakan sebagai sistem

pengukuran dengan WIM Bridge harus dilindungi dari kondisi lingkungan. Spesifikasi minimal dari proteksi peralatan elektronik terhadap lingkungan yang digunakan dalam sistem WIM Bridge setidaknya mencapai rating IP67.

IP merupakan singkatan “Ingress Protection” atau proteksi celah/bukaan, dan dua angka dibelakangnya menunjukkan rating spesifikasi proteksi peralatan elektronik terhadap kondisi lingkungan. Rating ini terdiri dari dua angka, angka pertama menunjukkan spesifikasi proteksi terhadap benda padat dan angka kedua menunjukkan spesifikasi proteksi terhadap benda cair. Semakin tinggi nilai rating IP ini, semakin baik proteksi yang digunakan. Nilai spesifikasi rating IP mengacu pada dua tabel berikut ini.

Tabel 6.1 Acuan proteksi IP angka pertama: proteksi terhadap benda padat

Angka Pertama	
0	Tanpa proteksi (bisa juga diganti X)
1	Proteksi terhadap benda padat hingga 50 mm ³
2	Proteksi terhadap benda padat hingga 12 mm ³
3	Proteksi terhadap benda padat hingga 2.5 mm ³
4	Proteksi terhadap benda padat hingga 1 mm ³
5	Proteksi terhadap debu, celah terbatas
6	Proteksi total terhadap debu

Tabel 6.2 Acuan proteksi IP angka kedua: proteksi terhadap benda cair

Angka Kedua	
0	Tanpa proteksi (bisa juga diganti X)
1	Proteksi terhadap tetesan vertikal air (contoh: kondensasi)
2	Proteksi terhadap cipratan air hingga arah 15 derajat dari vertikal
3	Proteksi terhadap cipratan air hingga arah 60 derajat dari vertikal
4	Proteksi terhadap cipratan air dari segala arah – celah yang diijinkan dibatasi
5	Proteksi terhadap semprotan air tekanan rendah dari segala arah – celah yang diijinkan dibatasi
6	Proteksi terhadap semprotan air tekanan rendah – celah yang diijinkan dibatasi (contoh: lantai kapal)
7	Proteksi terhadap efek rendaman di antara 15 cm hingga 1 m
8	Proteksi terhadap efek rendaman dalam tekanan jangka panjang

Maka, IP67 merupakan spesifikasi proteksi celah/bukaan pada peralatan elektronik yang mengharuskan proteksi total terhadap debu dan proteksi terhadap efek rendaman di antara 15 cm hingga 1 m. Hal ini perlu dilakukan agar peralatan yang digunakan dalam instrumentasi jembatan yang digunakan sebagai WIM Bridge terlindung dari bahaya kerusakan akibat benda padat maupun cair di lingkungan bawah jembatan yang cukup sulit untuk dikontrol.

MASYARAKAT DAN SOSIAL (VANDALISME)

Pada beberapa wilayah di Indonesia, ditemukan kasus vandalisme terhadap suatu infrastruktur. Beberapa kasus yang sering ditemukan antara lain pencurian kabel, pencurian baut struktur jembatan ataupun baut rel kereta api, coretan dengan cat, dan lain sebagainya. Dengan instrumen WIM Bridge yang terdiri dari kabel dan peralatan elektronik, maka diperlukan proteksi secara langsung maupun tidak langsung terhadap kerawanan vandalisme ini.

Sosialisasi pemahaman terhadap instrumen yang dipasang kepada masyarakat sekitar lokasi dapat dilakukan untuk pencegahan secara tidak langsung. Cara lainnya adalah dengan pemasangan instrumen maupun kabel



Gambar 6.1 Instrumen data logger, telemetri, serta kabel

di ketinggian yang sulit dicapai dengan mudah oleh masyarakat umum atau membuat blokade terkunci terhadap akses sensor maupun data *logger box*. Pada beberapa kasus pengukuran non permanen dan wilayah yang sangat rawan, mungkin diperlukan pengawas atau penjaga untuk mengamankan instrumen yang terpasang di jembatan selama pengukuran berlangsung.

KEAMANAN DATA (PRIVAT DAN PUBLIK)

Data yang dihasilkan sebagai luaran dari sistem WIM Bridge ini dapat dibedakan berdasarkan sifat aksesibilitas data, yaitu data publik yang dapat diakses oleh kalangan umum dan data privat yang hanya dapat diakses oleh kalangan tertentu yang diijinkan. Hal ini dilakukan untuk memastikan data yang ada tidak disalahgunakan oleh pihak tertentu dan pengukuran tetap valid serta akurat.

Perlindungan data pertama yang dapat dilakukan adalah dengan melindungi data box di lapangan sehingga terjaga aksesnya dari masyarakat umum. Jalur komunikasi telemetri juga harus aman sehingga tidak akses data untuk pemantauan dari jauh dapat berjalan lancar. Fungsi untuk penegakan hukum kelebihan beban sangat bergantung dari akses telemetri ini, jika sistem tidak aman dan hasil pengukuran menjadi tidak akurat, fungsi preseleksi kendaraan kelebihan muatan dapat terganggu. ■

KALIBRASI SISTEM WIM BRIDGE

UMUM

Kalibrasi Sistem WIM Bridge pada prinsipnya sama dengan Sistem WIM yang digunakan dalam pengukuran beban kendaraan bergerak tidak luput dari kesalahan pengukuran, baik kesalahan pengukuran sistematis maupun kesalahan pengukuran secara acak. Oleh karena itu, untuk meminimalisasi kesalahan pengukuran, kalibrasi sistem WIM Bridge perlu dilakukan sebelum melakukan pengukuran yang sesungguhnya.

Beberapa cara atau metode kalibrasi dapat diaplikasikan untuk mengkalibrasi sistem WIM, tergantung pada jenis sensor pengukur beban kendaraan, penggunaan dan kebutuhan dari pengguna dan juga waktu dan biaya yang tersedia untuk kalibrasi. Beberapa metode kalibrasi antara lain kalibrasi statis, menggunakan alat variasi tegangan listrik dan tekanan, menggunakan kendaraan dengan beban yang diketahui sebelumnya, menggunakan kendaraan dengan beban yang dapat diubah-ubah (instrumentasi), atau menggunakan perangkat lunak atau prosedur kalibrasi sendiri secara otomatis.

Metode yang paling umum digunakan dalam kalibrasi sistem WIM adalah dengan menggunakan beban kendaraan truk yang

sudah diketahui beratnya secara statik. Hal ini dikarenakan metode ini relatif lebih sederhana dan lebih *direct*, juga karena metode ini cocok digunakan untuk kalibrasi semua sistem WIM. Metode ini secara parsial mengeliminasi efek dinamis dari perkerasan, tetapi sensitif terhadap karakteristik dari kendaraan kalibrasi, seperti tipe suspensi, *dry friction*, dan sebagainya (COST 323, 2002).

Prinsip kerja utama dari metode kalibrasi ini yaitu kendaraan kalibrasi yang diberikan muatan tertentu sehingga diketahui berat kendaraan dan berat masing-gandar dan roda kendaraan tersebut, kemudian dilewatkan pada sensor WIM dengan kecepatan tertentu yang kurang lebih sama secara berulang-ulang kali.

Besaran berat truk yang diberikan dalam kalibrasi diberikan variasi dari berat kosong sampai muatan penuh yang besarananya diketahui secara statik sebelumnya. Setiap penambahan beban, bacaan sistem WIM juga harus bertambah secara linear dan jika dibuat kurva antara beban statik yang diketahui terhadap beban yang terukur WIM selama kalibrasi akan terbentuk kurva linear dengan gradien ideal adalah bernilai 1. Jika terdapat ketidaksesuaian yang cukup jauh terhadap beban statik yang telah diketahui, maka alat harus dikalibrasi ulang. Lalu langkah tersebut diulangi lagi sampai mendapatkan berat yang cukup sesuai antara bacaan sensor dengan berat statik yang diketahui. Jika kalibrasi sudah selesai, sistem WIM tersebut siap untuk digunakan untuk kegiatan pengukuran beban kendaraan bergerak di lokasi survei.

PROSES KALIBRASI

WIM Bridge, seperti sistem WIM lain, harus dikalibrasi agar menghasilkan pengukuran yang seakurat mungkin. Truk dengan berat yang diketahui dapat digunakan untuk mengkalibrasi sistem WIM Bridge dengan mengacu pada prosedur kalibrasi COST 323, untuk mencapai tingkat kepercayaan dan target akurasi yang paling tinggi. Kalibrasi dilakukan untuk memastikan bahwa beban statik estimasi yang dihasilkan dari sistem WIM sedapat mungkin sama dengan beban statik acuan.

Proses kalibrasi juga dipengaruhi oleh kondisi lapangan, seperti temperatur perkerasan yang bervariasi, kondisi kekasaran permukaan perkerasan, dan kecepatan kendaraan yang melintas. Faktor-faktor tersebut dapat mempengaruhi perhitungan beban-gandar yang terukur. Akurasi sistem dapat bertambah dengan mendefinisikan parameter kalibrasi untuk klasifikasi kendaraan yang berbeda.

Seperti halnya sensor WIM lainnya, dengan melakukan kalibrasi untuk seluruh sistem pengukuran (jembatan dan peralatan Bridge WIM) maka akan didapatkan indikasi jelas dari akurasi hasil pengukuran berat kendaraan. Dalam lingkup prosedur kalibrasi, beban gandar dari kendaraan acuan yang telah diukur beratnya secara statis akan dibandingkan dengan hasil pengukuran berat kendaraan yang sama yang dilewatkan secara berulang-ulang di atas sistem WIM Bridge. Truk dengan beratnya yang diketahui digunakan dalam kalibrasi ini mengacu pada prosedur dalam spesifikasi WIM Eropa (COST 323). Prosedur pengujian ini dipilih berdasarkan target akurasi dan tingkat kepercayaan dari hasil pengukuran. Semakin tinggi kebutuhan tingkat akurasi, maka dibutuhkan pengujian yang lebih rumit dan memakan waktu yang lebih lama. Untuk kalibrasi yang lebih sederhana, direkomendasikan untuk pengukuran WIM sementara atau periodik dengan akurasi kelas C(15) atau lebih tinggi, pengukuran dalam kondisi yang berulang (dengan 1 kendaraan kalibrasi saja) sudah cukup. Jika memungkinkan, jumlah pengujian kalibrasi dilakukan lebih dari 10 kali, seperti yang disyaratkan dalam Spesifikasi COST 323, terutama jika pengaruh kecepatan kendaraan terhadap akurasi juga diamati.

Kalibrasi awal dari sistem WIM Bridge yang dipasang, khususnya untuk tingkat akurasi kelas B(10) atau lebih tinggi, membutuhkan kalibrasi dengan kondisi terbatas (dengan 2 hingga 10 kendaraan yang diukur beban statisnya terlebih dulu). Hal ini bergantung pada target akurasi dan tingkat kepercayaan hasil pengukuran yang diinginkan, proses kalibrasi ini dapat dilakukan dengan pengulangan 20 hingga 110 kali lintasan kendaraan. Kendaraan acak yang



Gambar 7.1 Proses kalibrasi dengan memanfaatkan kendaraan acak yang melintas

melintas dan diambil sebagai sampel untuk ditimbang secara statis dapat juga digunakan untuk proses kalibrasi sistem WIM Bridge. Jika penimbangan statis diulang, hasil timbangan statis dapat digunakan untuk kalibrasi ulang permanen dari sistem WIM Bridge.

AKURASI PENGUKURAN

Akurasi dari pengukuran dengan sistem WIM Bridge bergantung pada tipe struktur, kualitas pemasangan instrumen pengukuran, tipe kalibrasi dan kondisi permukaan perkerasan di atas jembatan dan jalan pendekat. Kelas akurasi berdasarkan COST323 yang dapat dicapai pengukuran dengan sistem WIM Bridge dari kelas *excellent* A(5) pada lokasi yang ideal, hingga kelas *still acceptable* D(25) pada jembatan yang kurang ideal. Pada kondisi umumnya, akurasi yang diharapkan adalah kelas B(10) atau setidaknya kelas C(15).

Akurasi dari sistem WIM bergantung pada dua faktor utama, yaitu varians inheren sistem WIM itu sendiri dan kondisi lapangan. Varians inheren dari sistem WIM bergantung pada teknologi yang digunakan dalam sistem WIM. Untuk WIM Bridge, kondisi lapangan yang dimaksud adalah karakteristik jembatan, termasuk tipe struktur, ukuran dan kondisi deteriorasi jembatan, pengaruh perubahan temperatur pada jembatan, kemulusan permukaan jalan, dan lain sebagainya.

Akurasi dari sistem WIM didefinisikan sebagai seberapa dekat atau selisih dari besaran estimasi terukur terhadap besaran acuan yang dapat diterima, biasanya didefinisikan secara tipikal dalam interval keterpercayaan 95%. Hal ini berarti, untuk berada dalam akurasi kelas tertentu, 95% kesalahan dalam pengukuran harus kurang dari kelas akurasi yang ditentukan.

Sistem WIM Bridge memiliki potensi untuk lebih akurat dibanding sistem WIM tipe lainnya, karena platform pengukuran beban yang jauh lebih panjang. Kekasaran (efek bumping atau penurunan) di jalan pendekat jembatan adalah faktor utama yang menurunkan tingkat akurasi pengukuran dengan WIM Bridge, yang merupakan sumber utama dari hasil pengukuran beban yang bergantung pada kecepatan, dimana kendaraan terdorong akibat suspensi dan kecepatannya sehingga mempengaruhi aksi kontak roda pada jembatan.

Untuk mengevaluasi akurasi pengukuran beban WIM, hasil pengukuran WIM harus dibandingkan dengan hasil pengukuran beban dari kendaraan yang

Accuracy calculation:

	Count	Mean	Std. dev.	Delta	Delta_min	Delta_max	Delta_class	P _{1,0}	P ₁	P _{1,04}	Class
Wt	11	0.00	2.29	0.00	0.76	0.45	10	95.40	95.40	96.23	B(10)
Group	11	0.05	2.62	0.00	7.09	0.90	7	95.40	95.40	95.80	B(7)
Single	22	0.05	3.47	12.00	10.56	0.06	10	97.84	97.84	98.95	B(10)

Calculation parameters:
 Calibration conditions:
☐ Full repeatability (1 vehicle under the same traffic conditions) ☒ Initial calibration
 Environmental conditions:
☐ Environmental repeatability (first measurements in highly constant environmental condition) **B(10)**

Gambar 7.2 Piranti lunak pengecekan kelas akurasi WIM Bridge dari SiWIM-F

sama dengan menggunakan timbangan dengan akurasi setidaknya 3 kelas lebih baik daripada sistem WIM, artinya satu-satunya pilihan realistis untuk acuan akurasi sistem WIM adalah menggunakan timbangan statis. Pengukuran beban statis adalah syarat umum untuk kalibrasi dan pengecekan akurasi.

Penggunaan data WIM yang berbeda akan membutuhkan tingkat akurasi minimum hasil pengukuran beban WIM yang berbeda. Sebagai contoh, pengukuran dari dampak beban pada perkerasan seringkali melibatkan formula matematis dengan pangkat 4 atau lebih dari pembebanan gandar (ESAL – *Equivalent single axle loading* atau beban gandar tunggal ekuivalen). Hal ini sangat mengamplifikasi efek dari kalibrasi yang buruk dan mengakibatkan kesalahan yang signifikan dalam menentukan dampak beban, masa layan jembatan dan perkerasan, dan lain sebagainya. Sebagai contoh, dengan pangkat eksponen 4, kesalahan 5% dalam hasil faktor kalibrasi dapat mengakibatkan 20% kesalahan pada dampak beban estimasi, dan 10% kesalahan kalibrasi dapat menghasilkan 45% kesalahan pada dampak beban estimasi, dan seterusnya. ■

8

DATA LUARAN

UMUM

Data luaran yang dihasilkan dari pengukuran beban kendaraan dengan menggunakan sistem WIM Bridge, dapat dikategorikan berdasarkan pengguna atau pemanfaat dari data luaran tersebut. Kategori pengguna data WIM tersebut antara lain adalah untuk pengelola jalan, penegak hukum, dan riset/akademisi.

PENGELOLA JALAN

Pengelola jalan atau pemilik jalan atau pihak yang berwenang dalam sektor perencanaan & pemeliharaan jalan dapat memanfaatkan data luaran WIM sebagai input dalam perencanaan dan pemeliharaan jalan. Dengan memiliki data WIM, program penganggaran untuk kegiatan pemeliharaan dan perencanaan jalan dan jembatan dapat dilakukan secara lebih presisi, sehingga tidak terjadi kekurangan atau kelebihan budget dalam pengelolaan jalan dan jembatan.

PENEGAK HUKUM

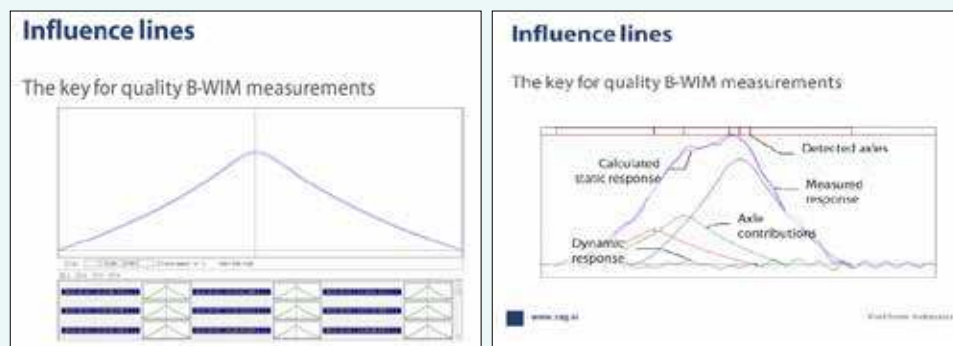
Data luaran dapat dimanfaatkan untuk keperluan penegakan hukum, seperti Kepolisian dan Kementerian/Dinas Perhubungan, juga sektor rekayasa lalu lintas. Dengan tersedianya data WIM ini, dapat dimanfaatkan untuk seleksi awal kendaraan yang diduga bermuatan berlebih dari batas ijin berat kendaraan, untuk kemudian diberhentikan dan diperiksa secara statis. Selain itu pola pelanggaran peraturan beban kendaraan dapat diketahui sehingga memudahkan penentuan waktu operasi penegakan hukum. Sehingga kinerja penegakan hukum tentang beban kendaraan akan lebih akurat dan efisien.

RISET DAN AKADEMISI

Data luaran dari WIM Bridge ini dapat dimanfaatkan oleh ahli terapan jembatan dan keamanan jembatan di bidang riset dan akademik. Dengan tersedianya data WIM ini, dapat dimanfaatkan untuk penilaian keamanan jembatan terhadap beban yang sesungguhnya terjadi dibanding kapasitas eksisting jembatan. Dalam pemeriksaan keamanan jembatan, data yang diperlukan selain beban lalu lintas aktual, diperlukan juga data mengenai kondisi kapasitas struktur jembatan eksisting, yang pada umumnya sudah mengalami penurunan kapasitas dari kondisi awal desain. Data yang bisa dikumpulkan terkait kapasitas struktur jembatan antara lain usia jembatan, kondisi visual saat ini, gambar as built, metode perhitungan, peraturan perencanaan yang digunakan. Sementara data pembebanan lalu lintas aktual dari WIM dapat dilengkapi dengan data lokasi, tipe jalan, spesifikasi jembatan, tingkat penegakan hukum, dan amplifikasi dinamis yang dapat terjadi. Sementara efek beban pada struktur yang perlu dicermati adalah garis pengaruh arah longitudinal dan distribusi beban arah lateral.

Momen lentur akibat beban lalu lintas juga dapat dimodelkan dari data lalu lintas yang didapatkan. Selain itu, data distribusi beban arah lateral juga bisa didapatkan. Kemudian data faktor pembesaran dinamis akibat beban lalu lintas bisa didapatkan untuk kemudian menjadi evaluasi dari faktor beban dinamis dalam peraturan perencanaan.

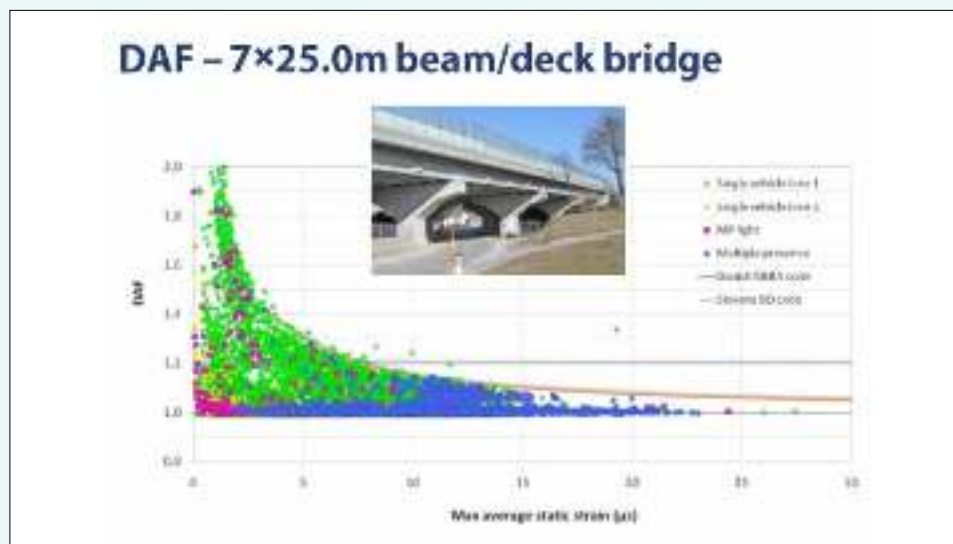
Dalam pemeriksaan jembatan, salah satu langkah yang dapat digunakan adalah pengujian pembebanan dari suatu struktur jembatan, yang berfungsi



Gambar 8.1 Garis Pengaruh (ZAG Institute, 2015)



Gambar 8.2 Model beban lalu lintas dan faktor distribusi beban arah lateral

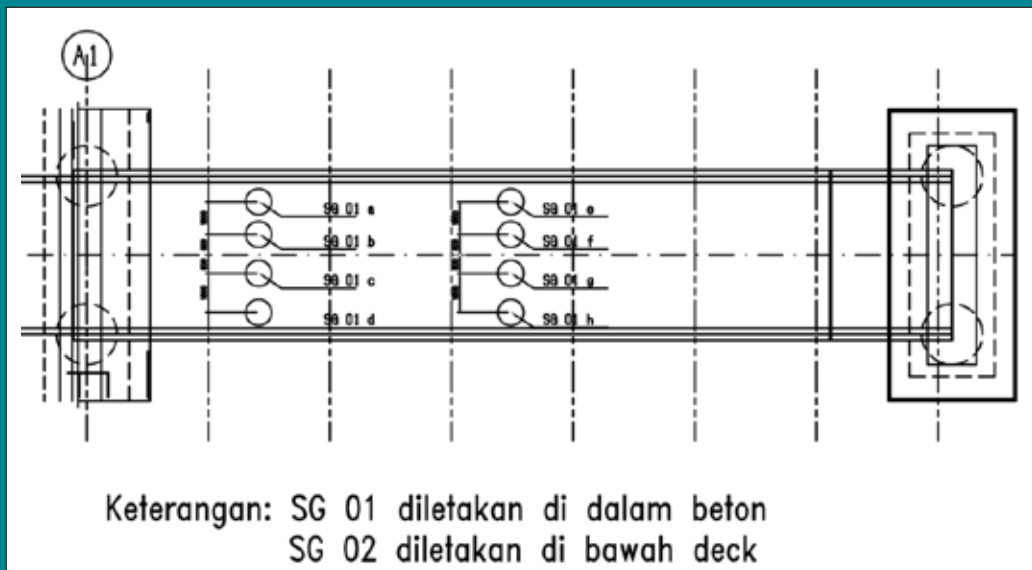


Gambar 8.3 Contoh pengumpulan data faktor perbesaran beban dinamis akibat beban lalu lintas

untuk memverifikasi kesesuaian struktur dengan desain dan mempelajari bagaimana pembebanan dapat dikonversi menjadi efek beban berupa garis pengaruh dan distribusi beban arah lateral. Selain itu, dengan pengujian beban, dapat diketahui perilaku struktur yang sesungguhnya dan kemudian menjadi dasar optimasi model struktur yang digunakan untuk pemeriksaan jembatan.

Tipe pengujian beban menurut tujuannya adalah sebagai pembuktian, sebagai proses diagnosis, dan uji pembebanan ringan. Pengujian pembebanan ringan (soft loading test) dapat menggunakan Bridge WIM untuk mendapatkan data lalu lintas, informasi mengenai perilaku struktur yang sesungguhnya akibat beban lalu lintas. Pengujian ini dapat dilakukan secara cepat dan efisien dalam hal biaya yang dikeluarkan karena tidak memerlukan kendaraan yang diketahui beratnya sebelumnya dan tidak perlu menutup akses lalu lintas. Selain itu, resiko kerusakan atau overloading pada struktur sangat kecil. Dengan pengujian tipe ini, dapat dilakukan verifikasi untuk kondisi batas layan (serviceability), bukan kondisi batas ultimate. ■





Gambar 9.1 Layout Pemasangan Sensor Strain Gage di Jembatan GEOSAN

9

USULAN KEGIATAN LANJUTAN

PIRANTI KERAS

Dalam penelitian WIM Bridge yang sedang dilakukan dari tahun 2015, dilakukan ujicoba pemasangan sensor di Jembatan GEOSAN, yang berada di lingkungan jaringan jalan di Kantor Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR di Bandung, Jawa Barat. Ujicoba ini dilakukan sebagai langkah awal dalam pembuatan prototipe sistem WIM Bridge. Adapun sensor yang dipasang adalah sensor strain gage yang berfungsi mengukur regangan pada elemen dimana sensor tersebut dipasang. Pada ujicoba ini strain gage dipasang pada tulangan memanjang dalam pelat beton dan di permukaan bawah pelat lantai beton pada salah satu bentang dari jembatan GEOSAN yang terdiri dari dua bentang, seperti terlihat pada **Gambar 9.1**.

Pemasangan sensor dilaksanakan pada saat penulangan pelat lantai jembatan, sebelum dilaksanakan pengecoran lantai. Dari sensor yang telah dipasang, dihubungkan dengan kabel ke sisi lantai pejalan kaki yang merupakan bagian overhang



Gambar 9.2 Dokumentasi kegiatan pemasangan sensor strain gage di Jembatan GEOSAN

dari struktur utama. Hal ini dilakukan untuk memudahkan pengukuran dan pengumpulan data pada data logger yang dapat disimpan pada rantai pejalan kaki tersebut.

Setelah jembatan selesai, ujicoba sensor yang telah dipasang untuk menghasilkan respon dari beban bergerak dapat dilakukan. Pada prinsipnya, respon yang dihasilkan sensor ketika ada beban kendaraan melintas akan terjadi tegangan tarik dan menyebabkan regangan dapat terbaca oleh strain gage. Dengan pemasangan di dua lokasi pada arah longitudinal, dapat dibuat garis pengaruh tegangan lentur pelat akibat beban bergerak di sepanjang bentang jembatan. Dengan seri sensor longitudinal juga bisa didapatkan kecepatan kendaraan dan dapat digunakan untuk membedakan satu kendaraan dengan kendaraan lainnya. Garis pengaruh dapat digunakan untuk menghitung balik dalam proses perhitungan sehingga didapatkan beban kendaraan. Sensor yang dipasang pada arah lateral dimaksudkan untuk menentukan posisi roda dari kendaraan.

Untuk kegiatan selanjutnya, untuk piranti keras, diperlukan ujicoba pemasangan sensor dan juga amplifier dari bacaan sensor di beberapa tipe jembatan lain.

Online monitoring Login to SiWIM (Zine stream)

Status	Exit	Settings	mph or km/h	Filter	weight, velocity, ...
Vehicle type	Time	GVW	Velocity	Lane	
 CL5-B4	13:05:23	58.9t	106.6km/h	1	✓
 CL5-B4	13:05:11	58.9t	106.6km/h	1	✓
 CL5-130	13:05:06	70.9t	81.7km/h	1	✓
 CL5-B3	13:03:35 Axis number: 1 2 3	60.1t Axis weight: 3.0t Rt 0.0t	85.3km/h Axis distance: 9.3 1.4 7.9	1	✓

Gambar 9.3 Antarmuka fitur online monitoring dari SiWIM

PIRANTI LUNAK

Tahapan selanjutnya dari kegiatan percobaan di sisi piranti keras, tentu perlu didukung dengan pengembangan piranti lunak untuk mengolah data luaran dari data logger untuk dihitung data luaran yang diinginkan dengan menggunakan algoritma yang disusun. Selain itu piranti lunak yang dibutuhkan adalah sistem antarmuka untuk menampilkan laporan hasil pengukuran sesuai dengan penggunaan data yang dibutuhkan. Dalam perkembangan teknologi saat ini, dibutuhkan fitur antarmuka yang dapat digunakan secara *mobile online monitoring* menggunakan ponsel pintar dengan koneksi internet yang banyak digunakan masyarakat luas. Sebagai referensi, **Gambar 9.3** berikut merupakan tampilan dari antarmuka piranti lunak dari SiWIM yang dapat diakses dari ponsel.

DATABASE JEMBATAN YANG DAPAT DIGUNAKAN SEBAGAI WIM BRIDGE

Pengumpulan data jembatan yang dapat digunakan sebagai WIM Bridge telah beberapa kali dilakukan pada tahun 2015 dengan mengacu kriteria pemilihan jembatan yang telah diuraikan pada Bab II. Adapun survey yang telah

dilakukan pada ruas jalan nasional di Kabupaten Sumedang dan Kabupaten Garut, Provinsi Jawa Barat. Pengumpulan data jembatan ini perlu terus dilakukan pada penelitian selanjutnya sehingga dapat dibuat database jembatan yang dapat digunakan sebagai WIM Bridge untuk keperluan aplikasi dari prototipe sistem maupun produk akhir dari penelitian WIM Bridge ini. Berikut data teknis beberapa jembatan yang telah disurvey pada tahun 2015 untuk dimasukkan ke dalam database jembatan yang dapat digunakan sebagai WIM Bridge.

Ruas Jalan Nasional di Kabupaten Garut (Provinsi Jawa Barat)

1. Jembatan Cikidang

a. Letak Jembatan

Nama : Jembatan Cikidang KM.BDG.77+950
Koordinat GPS : 07° 07' 00,6" LS
108° 07' 42.0" BT

b. Bangunan Atas (Super Structure) :

Tipe jembatan : Gelagar Beton Indonesia (GTI)
Jumlah gelagar : 7 buah
Tipe lintasan : Sungai
Sistem : Simple Beam
Pelat lantai : Beton bertulang
Panjang jembatan : 17.45 m
Lebar lantai kendaraan : 9.20 m
Jumlah bentang : 1 bentang
Jumlah jalur / Lajur : 2 jalur / 1 lajur



Gambar 9.4 Tampak atas jembatan Cikidang



Gambar 9.5 Tampak atas samping jembatan Cikidang



Gambar 9.6 Tampak atas jembatan Cipamali



Gambar 9.7 Tampak atas samping jembatan Cipamali

2. Jembatan Cipamali

a. Letak Jembatan

Nama : Jembatan Cipamali
 Koordinat GPS : 07° 09' 09,4" LS
 108° 08' 50.6" BT

b. Bangunan Atas (*Super Structure*) :

Tipe jembatan : Box Culvert
 Tipe lintasan : Sungai
 Pelat lantai : Beton bertulang
 Panjang jembatan : 1.5 m
 Lebar lantai kendaraan : 9.20 m
 Jumlah bentang : 1 bentang
 Jumlah jalur / Lajur : 2 jalur / 1 lajur



3. Jembatan Rangkong

a. Letak Jembatan

Nama : Jembatan Cirangkong KM.BDG.78.900
 Koordinat GPS : 07° 03' 30,1" LS
 108° 03' 43.7" BT

b. Bangunan Atas (*Super Structure*) :

Tipe jembatan : Komposit Baja Indonesia (MBI)
 Jumlag gelagar : 18 buah
 Tipe lintasan : Sungai
 Sistem : Simple Beam
 Pelat lantai : Beton bertulang
 Panjang jembatan : 7.00 m
 Lebar lantai kendaraan : 9.60 m



Gambar 9.8 Tampak atas jembatan Cirangkong



Gambar 9.9 Tampak atas samping jembatan Cirangkong

Lebar Trotoar	: 2 x 0.8 m
Jumlah bentang	: 1 bentang
Jumlah jalur / Lajur	: 2 jalur / 1 lajur

4. Jembatan Cipacing

a. Letak Jembatan

Nama	: Jembatan Cipacing KM.BDG.52.800
Koordinat GPS	: 07° 02' 43.7" LS 107° 59' 41.3" BT

b. Bangunan Atas (Super Structure) :

Tipe jembatan	: Pelengkung Beton
Tipe lintasan	: Sungai
Panjang jembatan	: 7.00 m
Lebar lantai kendaraan	: 7.50 m



Gambar 9.10 Tampak atas jembatan Cipacing



Gambar 9.11 Tampak atas samping jembatan Cipacing

Lebar Trotoar : 2 x 1.85 m
Jumlah bentang : 1 bentang
Jumlah jalur / Lajur : 2 jalur / 1 lajur

5. Jembatan Lingkar Nagreg

a. Letak Jembatan

Nama : Jembatan Lingkar Nagreg
Koordinat GPS : 07° 02' 26.3" LS
107° 54' 23.1" BT

b. Bangunan Atas (*Super Structure*) :

Tipe jembatan : Box Culvert
Tipe lintasan : Sungai
Panjang jembatan : 13.00 m
Lebar lantai kendaraan : 19.00 m
Jumlah bentang : 2 bentang
Jumlah jalur / Lajur : 1 jalur / 3 lajur



Gambar 9.12 *Tampak atas jembatan Lingkar Nagreg*



Gambar 9.13 *Tampak atas samping jembatan Lingkar Nagreg*

Ruas Jalan Nasional di Kabupaten Sumedang (Provinsi Jawa Barat)

1. Jembatan Cipeles

a. Letak Jembatan

Nama : Jembatan Cipeles

Koordinat GPS : 07° 09' 59,7" LS
112° 38' 58.8" BT

b. Bangunan Atas (*Super Structure*) :

Tipe jembatan : Komposit Baja Jepang (MBJ)

Jumlag gelagar : 6 buah

Tipe lintasan : Sungai

Sistem : Simple Beam

Pelat lantai : Beton bertulang

Panjang jembatan : 29.90 m

Lebar lantai kendaraan : 7.10 m

Jumlah bentang : 1 bentang

Jumlah jalur / Lajur : 2 jalur / 1 lajur

c. Bangunan Bawah (*Sub Structure*)

Kepala Jembatan : Dinding penuh

Struktur Perletakan (Landasan)

Gelagar menumpu di atas perletakan karet



Gambar 9.14 *Tampak memanjang Jembatan Cipeles*



Gambar 9.15 *Tampak atas dalam kondisi lalu lintas sepi*



Gambar 9.16 Tampak atas dengan kendaraan berat beriringan



Gambar 9.17 Kendaraan berat dari kedua arah (multiple presences)

2. Jembatan Ciwija

a. Letak Jembatan

Nama	: Ciwija
Lokasi	: KM.BDG.66.140
Koordinat GPS	: Awal 06° 47' 31,6" LS 108° 03' 46,3" BT Akhir 06° 47' 31,5" LS 108° 03' 46,6" BT
Tahun pembangunan	: 1981

b. Bangunan Atas (*Super Structure*) :

Tipe jembatan	: Gorong gorong persegi (Box culvert)
Tipe lintasan	: Sungai
Pelat lantai	: Beton bertulang
Panjang jembatan	: 5.50 m
Lebar lantai kendaraan	: 7.20 m
Jumlah bentang	: 1 bentang
Jumlah jalur / Lajur	: 2 jalur / 1 lajur



Gambar 9.18 Tampak memanjang Jembatan Ciwija



Gambar 9.19 Jembatan dilalui kendaraan berat (Truk sedang)

3. Jembatan Cijanggol

a. Letak Jembatan

Nama : Cijonggol
 Lokasi : KM.BDG.77.600
 Koordinat GPS : Tengah 06° 46' 41,10" LS 108° 06' 18,70" BT

b. Bangunan Atas (*Super Structure*) :

Tipe jembatan : Gorong gorong persegi (Box culvert)
 Tipe lintasan : Sungai
 Pelat lantai : Beton bertulang
 Panjang jembatan : 11.20 m
 Panjang Bentang : 4.20 m
 Lebar lantai kendaraan : 7.20 m
 Trotoar : 2 x 1.00 m
 Jumlah bentang : 1 bentang
 Jumlah jalur / Lajur : 2 jalur / 1 lajur



Gambar 9.20 Tampak memanjang Jembatan Cijonggol



Gambar 9.21 Sampah dan bongkahan pasangan batu si sekitar aliran sungai



Gambar 9.22 Tampak melintang Jembatan Cibihbul



Gambar 9.23 Tampak memanjang Jembatan Cibihbul

4. Jembatan Cibihbul

a. Letak Jembatan

Nama : Cibihbul

Lokasi : KM.BDG.71.580

Koordinat GPS : Tengah 06° 46' 41,1" LS 108° 06' 18,7" BT

b. Bangunan Atas (*Super Structure*) :

Tipe jembatan : Gorong gorong persegi (Box culvert)

Tipe lintasan : Sungai

Pelat lantai : Beton bertulang

Panjang jembatan : 6.40 m

Panjang Bentang : 4.00 m

Lebar lantai kendaraan : 9.00 m

Trotoar : 2 x 1.00 m

Jumlah bentang : 1 bentang

Jumlah jalur / Lajur : 2 jalur / 1 lajur



INTEGRASI SISTEM

Dalam penelitian yang bertujuan akhir menghasilkan prototipe sistem WIM Bridge, sehingga dapat dilakukan penerapan sistem WIM Bridge di Indonesia, langkah awal yang dilakukan adalah pengembangan dan studi komparasi dengan sistem WIM Bridge yang sudah ada di dunia untuk dapat diterapkan di Indonesia, dengan penyesuaian terhadap kondisi di Indonesia, termasuk sumber dayanya. Selain itu, sistem yang dikembangkan ini perlu diintegrasikan dengan program penelitian dan pengembangan lainnya di bidang jalan dan jembatan, salah satu diantaranya yaitu program penelitian dan pengembangan *Structural Health Monitoring System* (SHMS atau Simbagas) yang memasang instrumentasi pada jembatan untuk mengetahui kinerja kesehatan dari struktur jembatan tersebut.

Pada prinsipnya, pemasangan sensor yang berfungsi mengetahui beban yang diterima jembatan dan perilaku struktur jembatan ini juga dapat dilengkapi dan diintegrasikan dengan sistem pengukuran beban dalam program penelitian dan pengembangan sistem Bridge WIM ini. Kemudian dari data yang berhasil didapatkan dari sistem ini, dapat diintegrasikan kedalam database jalan dan jembatan IRODCO yang tengah dikembangkan dengan kerjasama tiga instansi yaitu PUPR, Perhubungan, dan Kepolisian sehingga data yang didapatkan dapat bermanfaat lebih luas. ■



10

PENUTUP

KESIMPULAN

Dari penyusunan naskah ilmiah “Pengembangan Teknologi Penggunaan Struktur Jembatan sebagai Sensor Identifikasi Jumlah dan Berat Kendaraan dalam kondisi bergerak” ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Kemajuan teknologi dalam bidang pengukuran beban kendaraan secara bergerak memanfaatkan jembatan terinstrumentasi memudahkan pengumpulan data lalu lintas dan data beban di Indonesia yang sangat diperlukan untuk kemajuan di bidang pengelolaan jalan dan jembatan, penerapan hukum muatan kendaraan, riset akademisi di bidang keamanan dan keselamatan jembatan, dan lain sebagainya.
2. Pengembangan WIM Bridge ini memiliki manfaat lain antara lain sebagai berikut:
 - a. WIM Bridge dapat diterapkan untuk mendukung dan melengkapi sistem WIM eksisting di Indonesia dalam

pengukuran beban kendaraan bergerak di jaringan jalan dan jembatan Indonesia, sebagai stasiun WIM BRIDGE

- b. WIM Bridge dapat diintegrasikan dan dapat diterapkan dalam Structural Health Monitoring System (SHMS) atau SIMBAGAS
- c. WIM Bridge merupakan teknologi yang lebih maju dari WIM eksisting namun relatif lebih mudah untuk diaplikasikan
- d. WIM Bridge dapat digunakan pada jenis jembatan yang banyak terdapat di Indonesia, khususnya jembatan eksisting, dimana mayoritas jembatan di Indonesia merupakan jembatan gelagar dengan tumpuan sederhana.
- e. WIM Bridge cocok untuk digunakan pada elemen pelat dan balok pada jembatan yang dapat dengan relatif cukup mudah untuk dilaksanakan pemasangan sensor.

SARAN

Saran dari kegiatan penelitian dan pengembangan teknologi penggunaan struktur jembatan sebagai sensor identifikasi jumlah dan berat kendaraan dalam kondisi bergerak atau WIM Bridge ini, antara lain sebagai berikut:

- a. Melakukan *pilot project* aplikasi sistem SiWIM (CESTEL, Slovenia dengan Pusjatan, Indonesia) di Indonesia pada tahun 2016. Dengan pertimbangan sebagai berikut:
 - *Pilot project* serupa sudah dilaksanakan oleh CESTEL di Malaysia dan Thailand
 - Besaran biaya yang dikeluarkan berkisar 20.000 EUR, dengan kegiatan pengukuran sekitar 7 hari, mengacu *pilot project* serupa di Malaysia dan Thailand
 - Dana tersebut didistribusikan sesuai beban kerja, antara CESTEL, Pusjatan, dan Perusahaan lokal (terdapat draft RAB yang diberikan pihak CESTEL untuk lebih detailnya)
 - Dalam *pilot project* tersebut, sistemnya adalah meminjam alat CESTEL, namun sistem dan teknologi dapat dilanjutkan dengan perusahaan lokal.

- Lingkup kegiatan Pilot Project antara lain perencanaan, pemilihan jembatan dan lokasi, pemasangan sensor, kalibrasi, kontrol data, telemetri, hingga output data sesuai kebutuhan, baik untuk riset, kontrol beban berlebih, dan data lalu lintas
- b. Melakukan inventarisasi lebih lanjut terhadap jembatan yang cocok untuk penerapan WIM Bridge di Indonesia.
- c. Melanjutkan ujicoba WIM Bridge di jembatan GEOSAN (Puslitbang Jalan dan Jembatan) dan menyusun algoritma dari respon keluaran sensor yang telah dipasang dan mensimulasikannya hingga sistem telemetri dan pelaporan data dan informasi. ■



DAFTAR PUSTAKA

- Ang, A.H.S. and Tang, W.H., 1984. *Probability concepts in engineering planning and design*.
- George, Y. and Antoniou, C., 2005. Integration of weigh-in-motion technologies in road infrastructure management. *Institute of Transportation Engineers. ITE Journal*, 75(1), p.39.
- Hwang, E.S. and Nowak, A.S., 1991. Simulation of dynamic load for bridges. *Journal of structural engineering*, 117(5), pp.1413-1434.
- Jacob, B. O'Brien, E., dan Jehaes, S., 2002. COST 323, Weigh-in-Motion of Road Vehicles, Final Report (1993-1998), *Laboratoire Centra des Ponts et Chaussees*.
- Kulauzovic, B., Znidaric, A., & Brozovic, R., 2012. *SiWIM Catalogue*. CESTEL & ZAG, Slovenia.
- Masyhur, A. H., 2010. Perancangan Peralatan dan Uji Laboratorium *Weigh In Motion* untuk Kendaraan Roda Dua. Tugas Akhir Program Sarjana, Institut Teknologi Bandung, 5-14.
- NEXCO, 2015. *Moving-Vehicle Weighing System*.
- Nowak A.S., 1999. Calibration of LRFD Bridge Design Guide, NCHRP Report 368, 37-125.
- O'Brien, E.J. et al., 2009. Characteristic dynamic traffic load effects in bridges. *Engineering Structures*, 31(7), pp.1607-1612.
- O'Brien, E.J. & Caprani, C.C., 2005. Headway modelling for traffic load assessment of short to medium span bridges. *Structural Engineer*, 83(16), pp.33-36.
- Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PU, 2010. Laporan Teknis Survey Beban Kendaraan Metoda WIM Ruas Bandung-Bojongsoang.
- Nugraha, W., 2015. Evaluasi Pembebanan Jembatan dengan Pendekatan Probabilitas menggunakan Hasil Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak / WIM (*Weigh-in-Motion*). Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.

- Žnidarič, a, Lavrič, I. & Kalin, J., 2008. Measurements of bridge dynamics with a bridge weigh-in-motion system. ... *Weigh-In-Motion*, pp.388–397.
- Žnidarič, A., Lavrič, I. and Kalin, J., 2005. *Nothing-on-the-road axle detection with threshold analysis*.





PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN
Badan Penelitian dan Pengembangan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
www.pusjatan.pu.go.id