

Pengukuran Faktor Beban Dinamis Struktur Jembatan Menggunakan Bridge WIM pada Jembatan Bentang Pendek di Indonesia

Widi Nugraha*

Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan - Kementerian PUPR Bandung
E-mail: widi.nugraha@pu.go.id

Indra Djati Sidi

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: indradjati@gmail.com

Made Suarjana

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: mdsuarjana@yahoo.com

Ediansjah Zulkifli

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Email: ednsjah@yahoo.com

Abstrak

Jembatan lalu lintas adalah struktur yang mengalami beban yang bersifat dinamis. Efeknya pada elemen jembatan adalah kemungkinan terjadinya amplifikasi beban yang dialami dibandingkan dengan beban kendaraan dalam kondisi statis. Besaran faktor amplifikasi beban dinamis ini harus diperhitungkan dalam desain jembatan sebagai pengali dari beban desain. Dalam Standar pembebanan jembatan SNI 1725:2016 ditetapkan faktor beban dinamis (FBD) adalah 30-40% tergantung panjang bentang jembatan. Seiring perkembangan teknologi pengukuran beban kendaraan, yaitu menggunakan Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM), FBD ini dapat diperhitungkan untuk setiap kendaraan yang melintas. Hasil pengukuran B-WIM di Ruas Jalan Nasional Pantura Jawa Tengah, Batang-Kendal, pada tahun 2018 yang memiliki kondisi beban dan lalu lintas terberat di ruas jalan nasional akan digunakan dalam penelitian ini. Pengukuran FBD terhadap kendaraan yang melintasi jembatan yang digunakan sebagai B-WIM dengan metode analisa respons elemen struktur jembatan tersebut. Nilai FBD bisa didapatkan sebagai rasio antara respons dinamis terhadap respons statis perhitungan berdasarkan algoritma B-WIM. Dari studi ini didapatkan bahwa dalam nilai FBD kendaraan sifatnya acak dan memiliki nilai rata-rata 1,18 dengan koefisien variansi 16%, yang berada di bawah nilai FBD dalam SNI. Kemudian, sebuah persamaan regresi diusulkan untuk penentuan nilai FBD bagi jembatan bentang pendek di Indonesia.

Kata-kata Kunci: Beban bergerak, beban dinamis, faktor beban dinamis, jembatan, SNI.

Abstract

Bridge is a structure that withstands dynamic loading due to traffic. The dynamic effects on bridge element could amplifies the loading to be larger than static loading. This dynamic amplification effect should be considered on bridge design and applied as multiplier factor of the design load. On SNI 1725:2016 Bridge Loading Code, the dynamic load amplification factor (DAF) is set at 30-40% depending on bridge span length. Due to recent development on vehicle live load measurement, such as Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM), DAF can be calculated for every vehicle passed the bridge. The B-WIM measurement results on North Coast National Road of Batang-Kendal, Central Java in 2018 which has busiest and also heaviest traffic loading, will be used on this research. The DAF measurement due to traffic vehicle load that passed the bridge that used as B-WIM can be done by doing analysis on bridge structure response. DAF is ratio of dynamic response and static response, the static response on B-WIM is a calculated signal based on B-WIM algorithm. From this study, DAF is a random variable, with average of 1,18 & coefficient of variation 16%, which is below DAF on SNI. Also, a bilinear equation of DAF is proposed for short span bridge in Indonesia.

Keywords: Bridge, dynamic amplification factor, dynamic load, weigh-in-motion, SNI.

*Penulis Korespondensi: widi.nugraha@pu.go.id

1. Pendahuluan

Struktur jembatan yang digunakan sebagai prasarana transportasi merupakan tipe struktur yang mengalami beban yang sifatnya dinamis akibat kendaraan yang melintas di atasnya. Beban yang dinamis adalah jenis beban yang dapat berganti arah, posisi, dan besarnya, sehingga memberikan gaya yang bervariasi pada struktur yang memikul beban dinamis tersebut (Bushman dan Pratt, 1998). Tentunya hal ini berbeda dengan beban statis, yang bersifat konstan dan menghasilkan gaya tetap. Oleh karena itu, beban dinamis akibat kendaraan bergerak dapat memberikan efek amplifikasi pada struktur jembatan jika dibandingkan efek beban kendaraan statis pada struktur jembatan untuk satu kendaraan yang sama, sehingga efek beban yang diterima oleh jembatan bisa lebih besar akibat beban yang bergerak melintas jembatan jika dibandingkan efek beban kendaraan yang berhenti di atas jembatan (Kulicki, 2017).

Dalam perencanaan struktur jembatan, tahanan elemen struktur jembatan perlu diperhitungkan terhadap efek amplifikasi beban dinamis mengingat sifat dari beban lalu lintas aktual adalah beban dinamis, sedangkan beban lalu lintas desain yang digunakan dalam standar pembebanan jembatan adalah beban statis. Untuk mengakomodasi beban dinamis tersebut, di dalam SNI 1725:2016 Standar Pembebanan Jembatan (Badan Standardisasi Nasional, 2016) ditetapkan Faktor Beban Dinamis (FBD), yaitu rasio antara beban dinamis dengan beban statis yang cukup konservatif, yaitu berkisar antara 30-40% seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengukur FBD ini di lapangan. Cara yang paling umum adalah pengukuran regangan dan defleksi struktur jembatan akibat beban yang diketahui berat statisnya untuk kemudian dilewatkan di atas jembatan yang sudah dipasang instrumen pengukuran regangan dan defleksi struktur. Kemudian kondisi statis dimana kendaraan diam di atas jembatan juga perlu diamati untuk mendapatkan respons jembatan di kondisi statis (Yang *et al.*, 2013). Metode ini memerlukan jembatan ditutup sementara karena nilai respons jembatan yang perlu diukur adalah saat kendaraan uji ada di atas jembatan dan tidak ada kendaraan lain yang melintas jembatan. Selain itu data yang didapat juga tidak bisa terlalu banyak karena terbatas dari jumlah kendaraan yang digunakan dalam pengujian (Riyono dan Sukmara, 2014).

Dalam perkembangannya, metode pengukuran FBD dapat dilakukan dengan memanfaatkan teknologi pengukuran beban kendaraan bergerak berbasis struktur jembatan (*Bridge Weigh-in-Motion/B-WIM*) (Žnidarič, Lavrič dan Kalin, 2013; Kalin *et al.*, 2021). Teknologi B-WIM di Indonesia salah satunya telah diterapkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) dalam beberapa tahun terakhir. Teknologi B-WIM ini telah diterapkan untuk mengukur beban kendaraan pada beberapa ruas jalan nasional dan juga ruas jalan tol di Indonesia, salah

satunya ruas jalan nasional Pantura Jawa Tengah Batang-Semarang dimulai dari tahun 2016 (Nugraha dan Sukmara, 2016).

Selain untuk mengukur beban kendaraan yang melintas, fungsi lain yang dapat dimanfaatkan dengan adanya B-WIM adalah mengukur FBD dengan membandingkan respons dinamik jembatan akibat beban yang melintas terhadap respons statisnya (Kalin *et al.*, 2021). Dalam studi ini, akan dilakukan pengukuran FBD menggunakan B-WIM terhadap data kendaraan yang melintas di Jembatan Pawiro Baru yang berada di ruas jalan nasional Pantura Jawa Tengah Batang-Semarang dalam rentang waktu dua minggu. Nilai FBD bisa didapatkan sebagai rasio antara respons dinamis terhadap respons statis perhitungan berdasarkan algoritma B-WIM. Hubungan antara sebaran data FBD terhadap berat total kendaraan dan kecepatan kendaraan akan dianalisis dalam penelitian ini. Kemudian, sebuah persamaan regresi akan diusulkan untuk penentuan nilai FBD bagi jembatan bentang pendek di Indonesia.

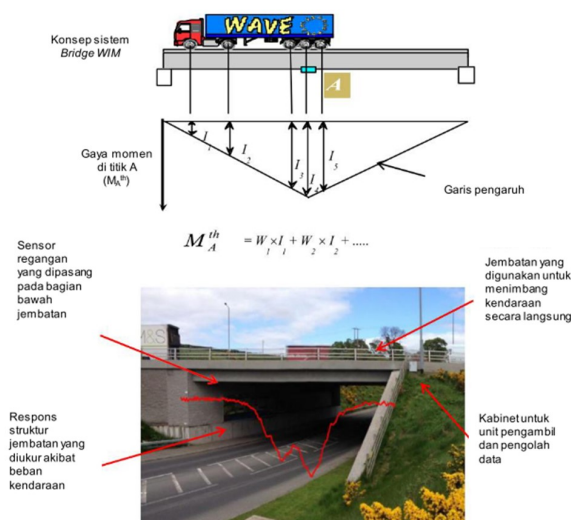
2. Teknologi B-WIM

Pada umumnya, cara mengukur beban kendaraan lalu lintas di jalan raya di Indonesia adalah dengan menggunakan jembatan timbang, yaitu timbangan statis berbasis teknologi *load cell* seperti yang dapat dijumpai di berbagai stasiun jembatan timbang yang dikelola oleh Kementerian Perhubungan. Cara kerjanya adalah dengan memberhentikan kendaraan ke lokasi jembatan timbang dan menempatkannya di atas timbangan sampai beratnya terukur secara statis. Metode ini tentunya memiliki beberapa kekurangan, salah satunya adalah hanya sebagian kecil kendaraan yang melintasi suatu ruas jalan yang dapat diukur beratnya sehingga hasil pengukuran sifatnya adalah sampel dan tidak dapat merepresentasikan sebaran beban kendaraan yang sesungguhnya melintasi ruas jalan tersebut (Nugraha dan Sukmara, 2016).

Salah satu teknologi yang dikembangkan untuk mengukur beban kendaraan tanpa perlu memberhentikan kendaraan tersebut adalah teknologi WIM. Teknologi WIM sendiri memiliki beberapa metode dan pendekatan pengukuran, berdasarkan media pengukurannya, teknologi WIM dibagi menjadi dua tipe yaitu *pavement-based WIM* dan *bridge-based WIM*. Jenis sensor yang digunakan untuk *pavement WIM* bisa menggunakan *load cells* (kecepatan rendah), *bending plates* (baja atau aluminium dengan *strain gages*), dan sensor strip (*capacitive, piezoelectric, quartz, dan fibre optic*) (González *et al.*, 2008). Sedangkan, B-WIM adalah teknologi pengukuran beban kendaraan yang mentransformasi jembatan eksisting menjadi timbangan untuk mengukur beban kendaraan yang melintas memanfaatkan respons jembatan terhadap beban yang melintas (Moses, 1979). Kedua tipe WIM tersebut dikalibrasi terhadap kendaraan yang sudah diketahui detail berat statisnya sehingga hasil akhir dari pengukuran WIM adalah berat kendaraan statis dari kendaraan yang melintas. Terkait dengan FBD pada struktur jembatan, ada dua

parameter yang perlu diketahui, yaitu efek aktual beban dinamis pada jembatan dan nilai statisnya, karena FBD adalah rasio antara efek dinamik terhadap kondisi statisnya. Sehingga, teknologi B-WIM dapat dimanfaatkan untuk penelitian pengukuran FBD pada jembatan.

B-WIM menggunakan sensor *strain transducer* untuk mengukur respons jembatan akibat beban kendaraan yang melintas. Respons struktur yang diukur dengan *strain transducer* ini dapat dikonversi menjadi beban gandar dan beban total kendaraan dengan algoritma Moses (Moses, 1979). Pada algoritma Moses, diasumsikan bahwa momen lentur pada elemen jembatan (M_{th}) proporsional terhadap beban bergerak yang bekerja pada jembatan (W) dan ordinat garis pengaruh dari jembatan (I) seperti digambarkan pada **Gambar 1** sebagai berikut



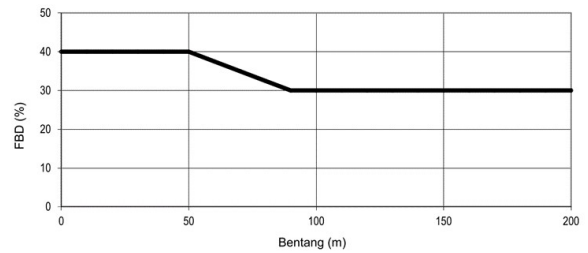
Gambar 1. Ilustrasi prinsip kerja B-WIM

3. Faktor Beban Dinamis

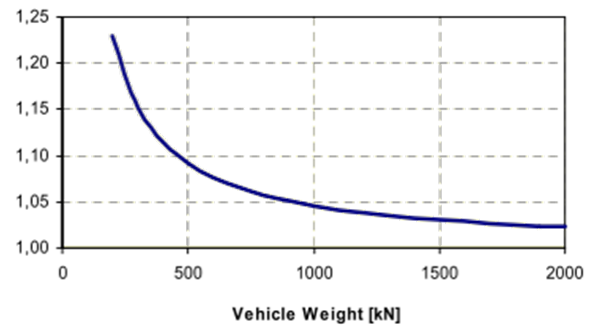
Untuk mengantisipasi amplifikasi efek beban lalu lintas pada struktur jembatan, dalam perencanaan struktur jembatan umum digunakan FBD sebagai faktor pengali beban lalu lintas desain. Dalam SNI 1725-2016 Standar Pembebanan Jembatan yang berlaku di Indonesia, FBD diatur dalam pasal 8.6 untuk beban lalu lintas rencana D maupun T dengan besaran berkisar 30-40% tergantung bentang jembatan seperti dapat dilihat pada Gambar 2 sebagai berikut (Badan Standardisasi Nasional, 2016)

Konsep penggunaan FBD dalam desain mulai diperkenalkan *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), dalam *Standard Specifications for Highway Bridges* pada tahun 1928 (AASHTO, 1928) dengan nilai 25%, yang kemudian diubah menjadi 30% pada tahun 1989 (AASHTO, 1989). Sedangkan dalam *Load Model 1 Eurocode*, FBD ditetapkan nilai 10% hingga 30% untuk bentang yang lebih pendek (CEN, 2011).

Selain variasi terhadap panjang bentang, dimana umumnya bentang lebih pendek mengalami amplifikasi



Gambar 2. FBD untuk beban truk T dan beban lajur D dalam SNI 1725:2016 (Badan Standardisasi Nasional, 2016)



Gambar 3. Model FBD terhadap berat kendaraan oleh RBBA Code Direktorat Jalan Denmark (Danish Roads Directorate, 2004)

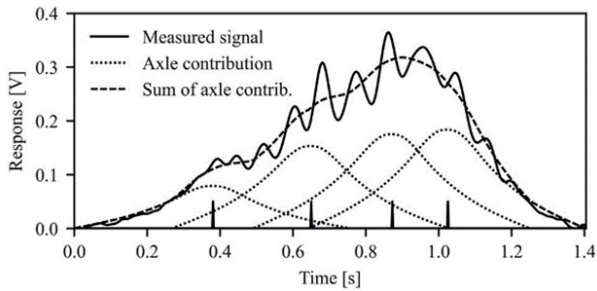
beban dinamik yang lebih tinggi, salah satu model FBD yang dipublikasikan dalam RBBA Code oleh Direktorat Jalan Denmark (Danish Roads Directorate, 2004), menetapkan bahwa FBD bervariasi terhadap berat kendaraan, dimana semakin berat beban kendaraan, semakin berkurang nilai FBD, seperti dapat dilihat di **Gambar 3**.

4. Pengukuran FBD dengan B-WIM

Dalam sistem B-WIM, digunakan sensor regangan pada elemen lentur jembatan untuk mengukur respons dinamik jembatan terhadap beban lalu lintas. Perhitungan berat kemudian dilakukan dengan menggunakan algoritma yang meminimalisasi perbedaan antara sinyal dinamik terukur dengan sinyal statik hasil perhitungan. Memanfaatkan proses perhitungan tersebut, komponen statik dalam mencari nilai FBD bisa didapatkan.

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, FBD adalah rasio antara respons dinamis terhadap respons statis. Respons dinamis akibat beban lalu lintas tentunya sudah bisa didapatkan dari setiap kendaraan yang melintas B-WIM. Kemudian, respons statis bisa didapatkan dengan algoritma B-WIM yang melakukan perhitungan sinyal statis ekuivalen yang bertujuan untuk mendapatkan berat kendaraan statis dari kendaraan yang melintas (Kalin *et al.*, 2021). Sebagai contoh, perhatikan hasil respons pengukuran beban sebuah kendaraan truk 4 sumbu pada **Gambar 4**.

Gambar 4 merupakan hasil pengukuran beban kendaraan dari sebuah truk 4 sumbu, dengan hasil berat 40.5 tonf yang melintasi jembatan slab beton integral dengan bentang 10.5 m pada kecepatan 50 km/jam.



Gambar 4. Hasil respons pengukuran beban truk 4 sumbu dengan B-WIM (Kalin et al., 2021)

Garis utuh merupakan respons dinamik terukur akibat beban truk. Kemudian garis titik-titik merupakan garis pengaruh dari beban sumbu kendaraan, yang jika dijumlahkan keempatnya akan menjadi garis putus-putus yang dapat mewakili nilai respons statik ekivalen/terhitung jembatan akibat kendaraan truk tersebut. Maka, FBD dapat dihitung sebagai rasio terbesar antara respons dinamik terukur akibat beban truk dengan nilai respons statik ekivalen/terhitung berdasarkan algoritma B-WIM.

Data beban kendaraan beserta detail respons dinamik hasil pengukuran B-WIM dikumpulkan untuk durasi 14 hari pada jembatan Pawiro Baru yang memiliki panjang bentang 18 meter, termasuk kategori jembatan bentang pendek. Dari kurva hasil pengukuran beban masing-masing kendaraan dilakukan perhitungan rasio antara respons dinamik akibat kendaraan dengan respons statik ekivalen/terhitung berdasarkan hasil algoritma B-WIM. Sebagai contoh, salah satu data hasil pengukuran kendaraan dengan BWIM sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 5, adalah kendaraan truk 6 sumbu yang melaju 33.21 km/jam pada tanggal 8 Mei 2022 pukul 7:15:30 dengan berat total 72.56 ton dengan konfigurasi sumbu 1-2-3. Selain data hasil pengukuran berupa data beban dan dimensi, BWIM juga dapat mengeluarkan grafik respons dinamik (hasil pengukuran) dengan respons statik (hasil perhitungan algoritma B-WIM) untuk sebuah kendaraan, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada Gambar 6 terdapat kurva biru yang menggambarkan hasil pengukuran respons dari strain transducer akibat beban kendaraan yang melintasi jembatan yang digunakan sebagai BWIM dan kurva ungu yang menggambarkan respons ekivalen hasil perhitungan algoritma BWIM yang akan digunakan untuk menghitung beban kendaraan yang melintas. Sumbu Y menggambarkan besaran respons yang terbaca dari pengukuran strain transducer (V), sedangkan sumbu x adalah waktu pengukuran (s). Sifat dari kurva biru adalah kurva dari sinyal dinamik hasil pengukuran dari sensor sedangkan kurva ungu adalah respons statik hasil kalkulasi algoritma BWIM. Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, nilai FBD pada jembatan merupakan rasio antara respons dinamik struktur dengan respons statik struktur akibat beban kendaraan yang melintas, dimana dalam penelitian ini respons statik struktur jembatan didapat



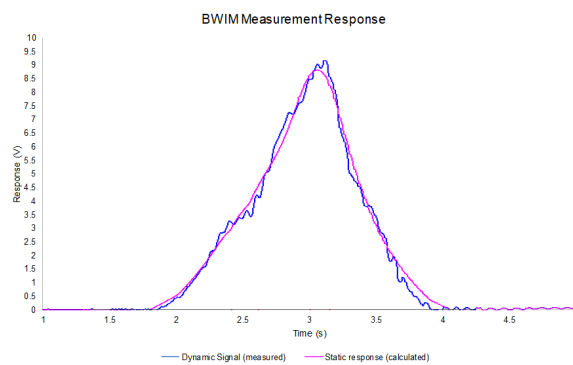
Vehicle:



Mass: 72.56 t
 Distribution: 5.90 t - 12.72 t - 12.72 t - 13.74 t - 13.74 t - 13.74 t
 Axle distance: 3.39 m - 1.35 m - 7.68 m - 1.32 m - 1.32 m
 Tyre types: 1 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2

Time: 8. 5. 2022 7:15:30
 Classification: 120
 Axle group: 1-2-3
 Lane: 1
 Direction: Semarang
 Speed: 33.21 km/h

Gambar 5. Hasil pengukuran beban truk 6 sumbu dengan B-WIM



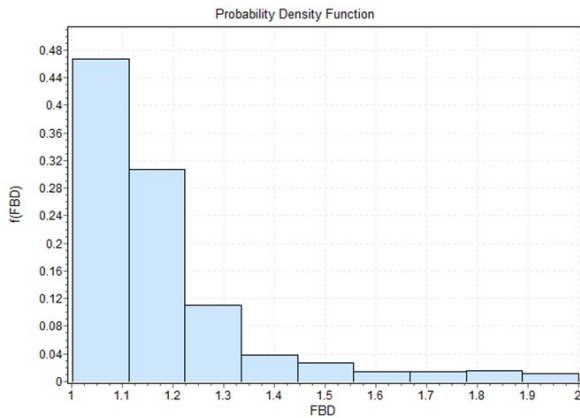
Gambar 6. Kurva respons hasil pengukuran BWIM

dari hasil perhitungan algoritma BWIM, dari data kedua kurva setiap kendaraan, maka nilai FBD untuk setiap kendaraan yang diukur beratnya dengan BWIM, dapat diperhitungkan. Karena nilai nya yang bervariasi terhadap waktu, maka rasio FBD ditentukan sebagai nilai rata-rata rasio respons dinamik dengan respons statik, untuk kasus kendaraan dengan kurva respons pengukuran pada Gambar 6. di atas, nilai FBD-nya adalah 1,10.

5. Analisis Data

Untuk mendapatkan FBD aktual pengukuran berdasarkan data B-WIM yang representatif untuk berbagai kondisi pembebanan lalu lintas, digunakan data dalam durasi pengukuran selama dua minggu. Dalam durasi pengukuran tersebut terdapat 15.732 kendaraan yang terdiri dari berbagai jenis kendaraan dengan variasi besaran berat total kendaraan juga variasi kecepatan kendaraan, yang kemudian diolah untuk perhitungan FBD. Dengan metode yang telah diuraikan sebelumnya, maka sebaran nilai FBD akibat tiap kendaraan untuk jembatan bentang pendek ini direkapitulasi sehingga didapatkan sebaran data FBD untuk semua kendaraan yang melintas dalam rentang durasi pengukuran B-WIM selama 14 hari tersebut yang divisualisasikan dalam histogram pada Gambar 7. berikut dan deskripsi sifat statistik pada Tabel 1 di bawah ini. Dalam histogram pada Gambar 7. tersebut terlihat bahwa nilai FBD didominasi oleh nilai 1 s/d 1,10 dan 1,10 s/

d 1,20 dengan kumulasi jumlah data kedua kategori tersebut mencapai 72% dari populasi data.



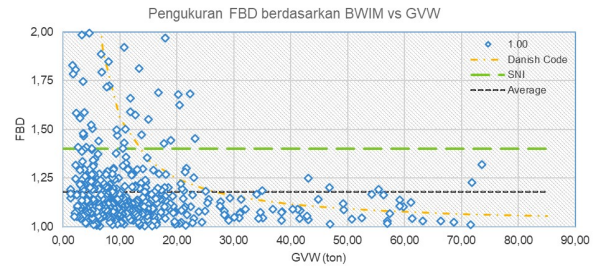
Gambar 7. Histogram data FBD

Tabel 1. Deskripsi statistik data FBD

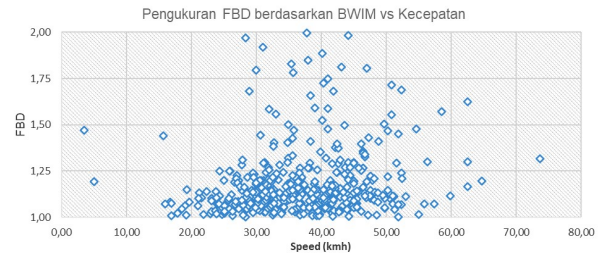
Statistik	Nilai	Percentile	Nilai
Jumlah Sampel	15372	Min	1,0028
Rentang	0,99722	5%	1,0181
Rata-rata	1,1763	10%	1,0343
Varians	0,03205	25% (Q1)	1,0685
Std. Deviasi	0,17902	50% (Median)	1,1213
Koefisien Variasi	0,15218	75% (Q3)	1,2072
Std. Error	0,00838	90%	1,3959
Skewness	2,3433	95%	1,5853
Excess Kurtosis	6,0985	Maks	2

Sedangkan pada **Gambar 8**, digambarkan hubungan antara sebaran data FBD terhadap berat total kendaraan yang menyebabkannya. Setiap titik merepresentasikan satu kejadian pembebanan akibat kendaraan yang melintas di atas jembatan yang digunakan sebagai B-WIM, yaitu Jembatan Pawiro Baru yang merupakan jembatan bentang pendek, dengan panjang bentang 18 meter. Menurut SNI 1725-2016 Standar Pembebanan Jembatan yang berlaku di Indonesia, FBD yang digunakan untuk jembatan bentang pendek ini adalah 1,4. Seperti dapat dilihat pada Gambar 8 tersebut, hanya kendaraan relatif ringan dengan GVW di bawah 20 ton yang memberikan nilai FBD terukur di atas nilai nominal SNI, walaupun secara jumlah mencapai 10.53% dari sebaran data karena volume kendaraan ringan cukup besar.

Jika diamati pola dari sebaran data hasil pengukuran FBD pada **Gambar 8**, terlihat bahwa kendaraan dengan berat total kendaraan yang lebih besar berpotensi menghasilkan FBD yang lebih tinggi, sedangkan kendaraan dengan berat total kendaraan yang lebih besar, secara umum menghasilkan FBD yang lebih rendah mendekati nilai 1. Hubungan pola FBD terhadap berat total kendaraan ini secara umum menyerupai model FBD yang dipublikasikan dalam RBBA *Code* Direktorat Jalan Denmark (Danish Roads Directorate, 2004), yang menetapkan bahwa dimana semakin besar berat total kendaraan, semakin kecil nilai FBD.



Gambar 8. Nilai FBD berdasarkan pengukuran beban kendaraan dengan B-WIM terhadap Berat Total kendaraan (GVW)



Gambar 9. Nilai FBD berdasarkan pengukuran beban kendaraan dengan B-WIM terhadap Kecepatan kendaraan

Teramati bahwa kendaraan dengan GVW di bawah 25 ton yang berpotensi memberikan nilai FBD terukur di atas nilai nominal SNI 1,4. Hal ini dapat disebabkan oleh efek resonansi jika frekuensi getaran kendaraan ringan tersebut mendekati frekuensi natural jembatan, sehingga menyebabkan efek dinamis struktur jembatan menjadi lebih tinggi. Sementara untuk efek kecepatan kendaraan, seperti dapat dilihat pada Gambar 9, teramati tidak terlihat korelasi yang jelas antara FBD dengan kecepatan kendaraan yang melintas. Dimana untuk kecepatan dominan kendaraan di lokasi yaitu pada kisaran 40 km/jam, FBD yang terukur sangat bervariasi.

Untuk beban desain untuk perencanaan jembatan, dengan beban D maupun T yang ekuivalen dengan beban kendaraan berat, maka FBD yang saat ini digunakan berdasarkan SNI 1725-2016 Standar Pembebanan Jembatan (Badan Standardisasi Nasional, 2016) sudah cukup konservatif. Karena FBD untuk beban kendaraan total yang besar seperti dapat diamati pada Gambar 8, nilainya relatif berada di antara 1-1,25.

Untuk kasus jembatan Pawiro Baru dengan tipe jembatan gelagar baja komposit bentang pendek ini, dari sebaran data hasil pengukuran FBD pada Gambar 8 dan referensi model FBD yang dipublikasikan dalam RBBA *Code* Direktorat Jalan Denmark (Danish Roads Directorate, 2004), dapat dibentuk model FBD usulan terhadap berat total kendaraan berupa garis merah pada Gambar 10 di bawah ini. Model garis bilinear diusulkan dengan memperhatikan adanya variasi FBD yang cukup besar untuk kendaraan dengan GVW lebih kecil dari 20 ton, dengan nilai rata-rata FBD 1,19 yang melebihi nilai rata-rata keseluruhan, dengan variansi 4%. Sedangkan untuk beban kendaraan total GVW lebih dari 20 ton, variasi FBD kecil (1,72%) dengan nilai rata-rata FBD di rentang ini adalah sebesar 1,13. Adapun persamaan

model FBD bilinear yang diusulkan tersebut adalah sebagai berikut.

Untuk $GVW < 20 \text{ ton}$,

$$FBD = 1,40 - \frac{GVW}{80}$$

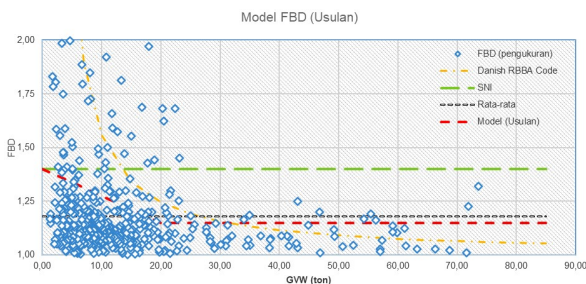
Untuk $GVW \geq 20 \text{ ton}$,

$$FBD = 1,15$$

dengan

$FBD = \text{Faktor beban dinamis}$

$GVW = \text{Gross Weight Vehicle (ton)}$



Gambar 10. Model Persamaan FBD terhadap Berat total kendaraan GVW

6. Kesimpulan

1. Untuk beban desain untuk perencanaan jembatan, dengan beban D maupun T yang ekuivalen dengan beban kendaraan berat, maka FBD yang saat ini digunakan berdasarkan SNI 1725-2016 Standar Pembebanan Jembatan (Badan Standardisasi Nasional, 2016) sudah cukup konservatif. Karena FBD untuk beban kendaraan total yang besar seperti dapat diamati pada Gambar 8, nilainya relatif berada di antara 1-1,25.
2. Untuk kasus jembatan Pawiro Baru dengan tipe jembatan gelagar baja komposit bentang pendek ini, dari sebaran data hasil pengukuran FBD pada Gambar 8 dan referensi model FBD yang dipublikasikan dalam RBBA Code Direktorat Jalan Denmark (Danish Roads Directorate, 2004), dapat diusulkan persamaan model kurva FBD terhadap berat total kendaraan sebagai berikut.

Untuk $GVW < 20 \text{ ton}$,

$$FBD = 1,40 - \frac{GVW}{80}$$

Untuk $GVW \geq 20 \text{ ton}$,

$$FBD = 1,15$$

dengan

$FBD = \text{Faktor beban dinamis}$

$GVW = \text{Gross Weight Vehicle (ton)}$

Model FBD usulan ini tentunya hanya berlaku untuk bentang pendek, setipe dengan Jembatan Pawiro Baru,

yang bertipe gelagar baja komposit bentang 18 m dengan karakteristik beban lalu lintas Pantura Jawa Tengah. Penelitian lebih lanjut untuk tipe struktur jembatan lainnya dan variasi panjang bentang jembatan perlu dilakukan agar model FBD usulan ini dapat disempurnakan dan menjadi salah satu kajian rujukan dalam pembahasan kaji ulang SNI 1725-2016 Standar Pembebanan Jembatan selanjutnya.

Daftar Pustaka

AASHTO (1928) *Standard specifications for highway bridges and incidental structures*. American Association of State Highway Officials. Tersedia pada: <http://hdl.handle.net/2027/coo.31924004013755>.

AASHTO (1989) *Guide Specifications for Strength Evaluation of Existing Steel and Concrete Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Tersedia pada: <https://books.google.co.id/books?id=pM9QAAAAYAAJ>.

Badan Standardisasi Nasional (2016) *SNI 1725-2016 Pembebanan untuk Jembatan*, Badan Standardisasi Nasional. Jakarta: Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.

Bushman, R. dan Pratt, A. J. (1998) "Weigh in Motion Technology - Economics and Performance," *Natmec*, hal. 7.

CEN (2011) *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. CEN.

Danish Roads Directorate (2004) *Reliability-Based Classification of the Load Carrying Capacity of Existing Bridges*. Copenhagen: Danish Roads Directorate.

González, A. *et al.* (2008) "Determination of bridge lifetime dynamic amplification factor using finite element analysis of critical loading scenarios," *Engineering Structures*, 30(9), hal. 2330-2337. doi: 10.1016/j.engstruct.2008.01.017.

Kalin, J. *et al.* (2021) "Measurements of bridge dynamic amplification factor using bridge weigh-in-motion data," *Structure and Infrastructure Engineering*, (February). doi: 10.1080/15732479.2021.1887291.

Kulicki, J. M. (2017) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th ed, Bridge Engineering Handbook: Fundamentals, Second Edition*.

Moses, F. (1979) "Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges," *Transportation Engineering Journal*, 105, hal. 233-249. Tersedia pada: <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?5014566>.

- Nugraha, W. dan Sukmara, G. (2016) *WIM Bridge: Ujicoba Model Fisik Teknologi Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak menggunakan Jembatan Terinstrumentasi*. Bandung: Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Riyono, W. A. dan Sukmara, G. (2014) "Evaluasi Kapasitas Jembatan Sementara Tipe Modular (Capacity Evaluation of a Temporary Modular Steel Bridge," *Jurnal Jalan-Jembatan*, 31(2), hal. 111–123.
- Yang, J. *et al.* (2013) "Dynamic amplification factor measuring of T-girder bridges," *Key Engineering Materials*, 540, hal. 29–36. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.540.29.
- Žnidarič, A., Lavrič, I. dan Kalin, J. (2013) "Measurements of bridge dynamics with a bridge weigh-in-motion system," *International Conference on Heavy Vehicles HVParis 2008*, hal. 485–498. doi: 10.1002/9781118623305.ch39.

