

PENENTUAN FAKTOR BEBAN DINAMIS PADA JEMBATAN BERDASARKAN PENGUKURAN *BRIDGE WEIGH-IN-MOTION* (*DETERMINING BRIDGE DYNAMIC AMPLIFICATION FACTOR BASED ON BRIDGE WEIGH-IN-MOTION MEASUREMENTS*)

Widi Nugraha^{1,*}, Indra Djati Sidi², Made Suarjana², dan Ediansjah Zulkifli²

¹) Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR. Bandung, Indonesia

²) Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

^{*}) e-mail: widi.nugraha@pu.go.id

Diterima: 23 November 2023 ; direvisi: 11 Desember 2023; disetujui: 18 Desember 2023.

ABSTRAK

Beban yang bekerja pada struktur jembatan tidak hanya bersifat statis, tetapi juga dinamis yang mengakibatkan pergerakan kendaraan dengan kecepatan tertentu. Efek dari beban dinamis ini, terutama dalam bentuk amplifikasi beban, memerlukan perhatian khusus dalam perancangan jembatan. Faktor Beban Dinamis (FBD) digunakan dalam perencanaan jembatan sebagai pengali beban hidup rencana yang memperhitungkan efek dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi nilai FBD pada dua lokasi pengukuran Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM) di Indonesia: Jembatan Pawiro Baru (ID-001) dengan bentang 18 m dan Jembatan Kaligawe (ID-004) dengan bentang 30 m. Metode analisis respons struktur jembatan digunakan untuk menghitung FBD berdasarkan data pengukuran regangan tarik akibat beban kendaraan yang melintas. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa FBD rata-rata untuk kendaraan ringan (GVW < 25 ton) pada ID-001 adalah 1,19 dan pada ID-004 adalah 1,19. Untuk kendaraan berat (GVW >= 25 ton), nilai FBD rata-rata adalah 1,10 untuk ID-001 dan 1,09 untuk ID-004. Hasil analisis mengungkapkan hubungan FBD dengan berat total kendaraan (GVW), di mana kendaraan berat memiliki FBD yang lebih rendah. Berdasarkan temuan ini, diajukan model FBD nominal berdasarkan GVW yang lebih efisien dan akurat untuk perencanaan jembatan. Model ini menunjukkan potensi untuk meningkatkan efisiensi perencanaan jembatan dengan menghasilkan nilai FBD yang lebih kecil dibandingkan dengan ketentuan SNI 1725:2016. Model FBD ini dapat dipertimbangkan untuk menyesuaikan ketentuan FBD dalam pengkinian SNI 1725:2016 sehingga standar perencanaan lebih mendekati perilaku dinamis jembatan dalam berbagai kondisi beban.

Kata Kunci: jembatan, faktor beban dinamis (FBD), Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM), perencanaan jembatan, berat total kendaraan (GVW)

ABSTRACT

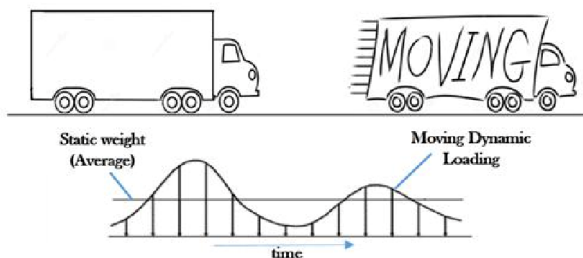
Vehicle loading on bridges involves dynamic loads, exhibiting distinct behavior from static loads. Dynamic loads can lead to the phenomenon of dynamic load amplification, potentially increasing the effects of the static weight of vehicles on the bridge. Addressing these effects is crucial during bridge design to ensure safety. The Dynamic Amplification Factor (DAF) is employed in bridge design as a multiplier for the live load standard to account for these effects. This study aims to assess the DAF on two Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM) systems in Indonesia: Pawiro Baru Bridge (ID-001) with an 18 m in span and Kaligawe Bridge (ID-004) with a 30 m in span. The methodology involves analyzing the bridge's structural response to passing vehicles using strain transducer sensors in the B-WIM system to calculate the DAF. Results indicate that the average DAF for light vehicles (GVW < 25 ton) is 1.19 for ID-001 and 1.19 for ID-004. For heavy vehicles (GVW >= 25 ton), it's 1.10 for ID-001 and 1.09 for ID-004. The analysis reveals a consistent correlation between DAF and GVW, with heavier vehicles yielding lower DAF values. This research suggests to a proposed DAF model as a function of GVW, which proved to be more efficient and accurate based on actual measurements. The model presents the potential to enhance the efficiency of bridge design. It generally yields lower DAF values compared to those stated in SNI 1725:2016, aiming to align design standards more closely with the actual dynamic behaviour of typical bridge types under varying vehicle loads.

Keywords: bridge, dynamic amplification factor (DAF), Bridge Weigh-in-Motion (B-WIM), bridge design, gross vehicle weight (GVW)

PENDAHULUAN

Infrastruktur jembatan memiliki peran krusial dalam menyokong kelancaran sistem transportasi, memungkinkan mobilitas efisien bagi kendaraan dan manusia. Dalam fungsinya tersebut, suatu jembatan harus mampu memikul beban yang bervariasi dari kendaraan yang melintasinya. Beban kendaraan yang bekerja pada struktur jembatan tidak hanya bersifat statis, seperti beban dari kendaraan pada saat berhenti. Sebaliknya, beban ini bersifat dinamis karena kendaraan melintas dengan kecepatan tertentu, menghasilkan efek beban yang fluktuatif pada elemen struktur jembatan (Wang, Kang, and Jiang 2016).

Efek dari beban dinamis pada struktur jembatan memiliki implikasi signifikan terhadap gaya dalam jembatan. Salah satu fenomena yang terjadi adalah amplifikasi beban dinamis (Ataei dan Miri 2018). Ketika kendaraan melintas, beban yang diberikan pada struktur jembatan dapat mengalami fluktuasi yang mengakibatkan besaran beban lebih besar (amplifikasi) atau bahkan lebih kecil dibandingkan beban statis dari kendaraan yang sama, seperti pada Gambar 1. Oleh karena itu, untuk memastikan bahwa elemen struktur jembatan mampu memikul beban aktual yang terjadi dengan aman, efek amplifikasi beban dinamis perlu diperhitungkan dalam tahapan perancangan jembatan.

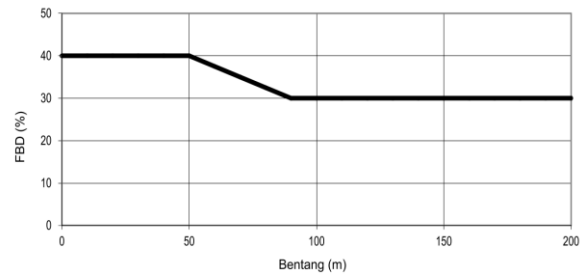


Sumber: Shandliya Dattakumar Vivek Ganeshan (2017)

Gambar 1. Ilustrasi beban statis dan dinamis

Dalam konteks perancangan jembatan, efek amplifikasi beban dinamis ini diakomodasi dalam SNI 1725:2016 Standar pembebanan jembatan dengan menggunakan faktor perbesaran dinamis (FBD) (Badan Standardisasi Nasional 2016). FBD ini merupakan faktor pengali dari beban hidup lalu lintas rencana yang harus diperhitungkan dalam

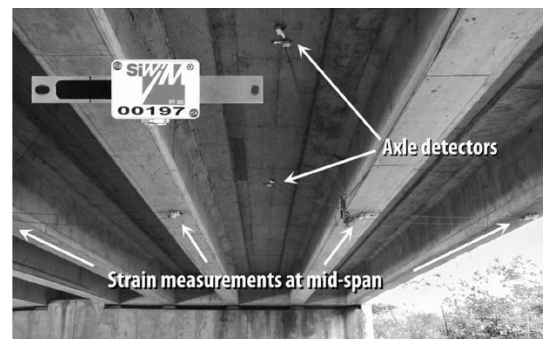
desain jembatan. SNI 1725:2016, menetapkan rentang nilai FBD sebesar 30-40% bergantung pada panjang bentang jembatan, seperti dapat dilihat pada Gambar 2. Namun, nilai FBD ini ditetapkan berdasarkan pada konsensus dan referensi standar perencanaan jembatan dari luar negeri, seperti *Canadian Standard for Highway Bridge Design* karena keterbatasan data dan penelitian khusus FBD terkait kondisi lokal di Indonesia (CSA 2012).



Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2016)

Gambar 2. Ilustrasi beban statis dan dinamis

Dengan kemajuan teknologi, terutama dalam pengukuran beban kendaraan bergerak, sebuah metode inovatif yang dikenal sebagai *Bridge Weigh-in-Motion* (B-WIM) telah digunakan di Indonesia sejak tahun 2017. Metode ini memanfaatkan struktur jembatan sebagai alat pengukuran dengan respons struktur jembatan berupa regangan tarik pada bagian bawah elemen struktur jembatan akibat beban kendaraan yang melintas diukur dengan sensor *strain transducer* (Nugraha dan Sukmara 2018). Sensor *strain transducer* ini dipasang pada bagian bawah dari elemen lentur jembatan, seperti gelagar dan pelat lantai jembatan. Instalasi sensor pada sistem B-WIM diilustrasikan pada Gambar 3.



Sumber: Žnidarič, Kalin, dan Kreslin (2018)

Gambar 3. Instalasi sensor *strain transducer* B-WIM

Dengan mengolah respons regangan ini menggunakan algoritma Moses (1979), dapat dihitung respons statis ekuivalen dari struktur jembatan tersebut, yang kemudian bisa digunakan untuk memperhitungkan beban kendaraan tersebut dengan tingkat akurasi yang dapat dipertanggungjawabkan sesuai dengan standar pengukuran dengan WIM (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées 2002). Secara teoretis, FBD sebagai rasio respons jembatan akibat beban dinamis dengan respons statis ekuivalen hasil perhitungan algoritma Moses dapat ditentukan untuk setiap jenis kendaraan yang melintas memanfaatkan hasil pengukuran B-WIM ini (Kalin, Znidarič, and Kreslin 2015).

Dalam rangka meningkatkan kualitas standar pembebanan jembatan, khususnya pasal terkait FBD, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai FBD yang lebih akurat sesuai dengan kondisi aktual. Fokus penelitian ini tertuju pada dua lokasi pengukuran B-WIM di Indonesia. Lokasi pertama adalah Jembatan Pawiro Baru di Ruas Jalan Nasional Pantai Utara Kendal-Batang, Jawa Tengah (ID-001), sementara lokasi kedua adalah Jembatan Kaligawe di Ruas Jalan Tol Semarang Kota, Jawa Tengah (ID-004). Kedua lokasi ini dipilih karena memiliki volume lalu lintas kendaraan yang signifikan dan variasi beban kendaraan yang mencakup berbagai kondisi (Nugraha dkk. 2023). Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengusulkan suatu model FBD yang lebih akurat berdasarkan data aktual hasil pengukuran di lokasi tersebut, dengan tujuan agar perancangan jembatan dapat dilakukan secara lebih efisien sesuai dengan kondisi aktual di Indonesia. Dengan pendekatan ini, diharapkan perancangan jembatan dapat menjadi lebih presisi dan andal, sesuai dengan beban kendaraan yang sebenarnya terjadi di lapangan.

FAKTOR BEBAN DINAMIS

FBD memainkan peranan penting dalam tahap perancangan jembatan untuk mengatasi potensi amplifikasi beban dinamis. Di Indonesia, SNI 1725:2016 mengatur besaran nilai FBD dalam kisaran 30%-40%, yang berfungsi sebagai pengali terhadap besaran beban desain lalu lintas yang digunakan dalam perencanaan struktur jembatan.

Besaran FBD ini ditetapkan berdasarkan pada konsensus dan referensi standar perencanaan jembatan dari luar negeri, khususnya *Canadian Standard for Highway Bridge Design* (CSA 2012).

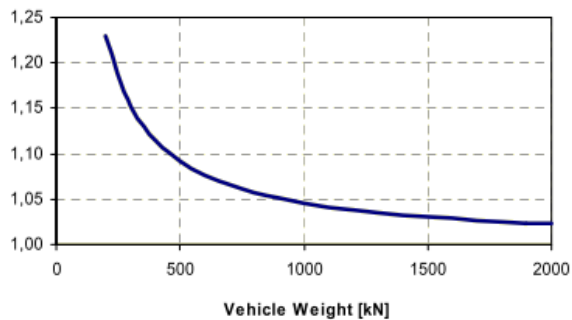
Nilai FBD dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain interaksi antara frekuensi kendaraan berat dan frekuensi jembatan, kekasaran permukaan lantai jembatan, terutama pada sambungan dilatasi yang kurang rata, dan juga panjang bentang jembatan. Sebagai contoh, interaksi frekuensi kendaraan berat dengan frekuensi jembatan dapat menyebabkan pseudo resonansi, sedangkan sambungan dilatasi yang tidak rata dan kekasaran permukaan jalan juga dapat meningkatkan nilai FBD.

Sebagai contoh, dalam suatu kasus tipikal, FBD dapat diperoleh dengan menjumlahkan dampak dari kekasaran permukaan jalan dan interaksi frekuensi kendaraan dengan frekuensi jembatan, yang bisa berkisar dari 25% hingga 35% dari beban statis. SNI 1725:2016 secara khusus mengatur besaran FBD dalam pasal 8.6, bergantung pada beban lalu lintas, baik rencana D maupun T, dengan mempertimbangkan panjang bentang jembatan. Detail lebih lanjut dapat ditemukan pada Gambar 2.

Konsep penggunaan FBD dalam perancangan jembatan 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). Dalam Load Model 1 Eurocode, FBD ditetapkan nilai 10% hingga 30% untuk bentang yang lebih pendek (CEN 2011).

Selain variasi terhadap panjang bentang, yang pada umumnya bentang lebih pendek mengalami amplifikasi beban dinamis yang lebih tinggi, beberapa penelitian telah mengemukakan perspektif berbeda terkait faktor apa yang paling berpengaruh pada FBD. Sebagai contoh, beberapa negara, seperti Denmark, telah memutuskan untuk menghubungkan FBD dengan berat total kendaraan (GVW), yang menggambarkan hubungan antara beban dinamis dan karakteristik fisik kendaraan (Kalin dkk. 2021). Adapun model FBD yang digunakan oleh Denmark seperti yang

tertuang dalam (RBBD Code) ditampilkan pada Gambar 4.



Sumber: Danish Roads Directorate (2004)

Gambar 4. Model FBD terhadap berat kendaraan (RBBD Code)

Pada Gambar 4 terlihat bahwa kendaraan ringan dengan GVW yang rendah cenderung memiliki nilai FBD yang lebih tinggi. Hal ini menandakan bahwa kendaraan ringan memiliki faktor amplifikasi dinamis yang signifikan dan variasi yang cukup tinggi dalam memengaruhi struktur jembatan yang dilintasi. Untuk berat kendaraan yang meningkat dengan GVW semakin besar, faktor amplifikasi dinamis yang diberikan kepada struktur jembatan cenderung lebih rendah, dengan variasi FBD yang juga lebih rendah.

Dari perbandingan berbagai ketentuan FBD dari berbagai negara di atas, aturan FBD di Indonesia memperlihatkan besaran yang relatif lebih besar dan bersifat konservatif. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat peluang untuk memperbarui ketentuan FBD dalam revisi SNI 1725-2016, berdasarkan hasil studi pengukuran aktual FBD di Indonesia ini. Eksplorasi hubungan antara FBD dan GVW menjadi aspek menarik untuk diinvestigasi sehingga hasil pengukuran FBD melalui B-WIM dapat mengungkap pola hubungan yang terkait.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi pendukung usulan pengkinian ketentuan FBD yang lebih akurat dan efisien. Dengan tujuan mengonfirmasi dan menggambarkan fenomena hubungan antara FBD dengan GVW ini, penelitian ini akan menggunakan metode pengukuran dengan B-WIM agar memberikan pandangan yang lebih akurat dan kuantitatif terkait variabilitas FBD jembatan di Indonesia.

HIPOTESIS

FBD pada struktur jembatan adalah fungsi dari berat total kendaraan (GVW) yang melewati jembatan tersebut. Kendaraan GVW rendah memiliki nilai FBD yang lebih tinggi, dan kendaraan GVW tinggi memiliki nilai FBD yang lebih rendah. Dengan menguji hubungan tersebut melalui pengukuran FBD menggunakan metode B-WIM, pengaruh GVW terhadap FBD dapat diketahui, dan perancangan jembatan menjadi lebih akurat dan efisien.

METODOLOGI

Pada bagian metodologi ini akan diuraikan pendekatan yang akan diambil dalam pelaksanaan penelitian untuk memahami dan menggambarkan fenomena amplifikasi beban dinamis pada struktur jembatan, yang diwakili oleh besaran FBD. Bagian ini menguraikan langkah-langkah utama yang dilakukan dalam penelitian, termasuk pemilihan lokasi dan waktu penelitian, jenis penelitian yang digunakan, teknik pengumpulan data yang akan diterapkan, serta metode analisis data yang akan digunakan untuk mengungkap hubungan antara FBD dan berat total kendaraan (GVW).

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan difokuskan pada dua lokasi pengukuran B-WIM, yaitu Jembatan Pawiro Baru (ID-001) di ruas Jalan Nasional Pantai Utara Batang-Kendal, Provinsi Jawa Tengah dan Jembatan Kaligawe (ID-004) di ruas Jalan Tol Semarang Kota, Provinsi Jawa Tengah. Kedua jembatan merupakan jembatan dengan tipe bangunan atas Gelagar Pracetak Prategang I (GPI). Pemilihan kedua lokasi ini didasarkan pada signifikansi lalu lintas kendaraan dan variasi beban yang cukup tinggi. Jembatan yang digunakan B-WIM untuk lokasi ID-001 memiliki panjang bentang 12 m dan ID-004 memiliki panjang bentang 30 m yang keduanya termasuk kategori jembatan bentang pendek. Hubungan antara nilai FBD hasil pengukuran dengan panjang bentang jembatan akan diperiksa dengan membandingkan hasil dari kedua jembatan yang digunakan sebagai media pengukuran beban dengan sistem B-WIM tersebut. Sebagai gambaran, instalasi B-WIM di

Jembatan Kaligawe (ID-004) ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Instalasi B-WIM di Jembatan Kaligawe (ID-004)

Penelitian ini akan menggunakan hasil pengukuran B-WIM dalam periode satu minggu untuk setiap lokasi B-WIM dari tanggal 1 Agustus 2023 hingga 7 Agustus 2023, di mana kondisi lalu lintas akan teramati untuk mendapatkan data yang cukup representatif. Dalam durasi pengukuran tersebut diambil sampel kendaraan secara acak sebanyak 372 kendaraan untuk ID-001 dan 172 kendaraan untuk ID-004. Jumlah sampel kendaraan tersebut berbanding lurus dengan tingkat kepadatan lalu lintas setiap lokasi pengukuran B-WIM. Pengambilan sampel dilakukan secara acak, terdiri atas berbagai jenis kendaraan dengan variasi besaran berat total kendaraan dan variasi kecepatan kendaraan.

Sifat Penelitian

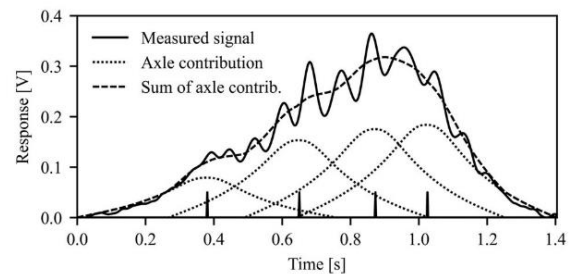
Penelitian ini memiliki sifat eksploratif dan deskriptif. Melalui pendekatan kuantitatif, penelitian ini akan menganalisis data empiris yang diperoleh dari pengukuran FBD menggunakan metode B-WIM. Penelitian ini akan berfokus pada pengamatan dan pemahaman lebih dalam mengenai hubungan antara FBD, berat total kendaraan (GVW), dan variasi respons dinamis pada jembatan.

Teknik Pengumpulan Data

Metode utama pengumpulan data adalah menggunakan sistem B-WIM yang telah terpasang. Dalam sistem B-WIM digunakan sensor *strain transducer* pada elemen lentur jembatan untuk mengukur respons dinamik jembatan terhadap beban lalu lintas. Perhitungan

berat kemudian dilakukan dengan menggunakan algoritma Moses (1979) yang meminimalisasi perbedaan antara sinyal dinamik terukur dan sinyal statik hasil perhitungan. Dengan memanfaatkan proses perhitungan tersebut, komponen statik dalam mencari nilai FBD bisa didapatkan.

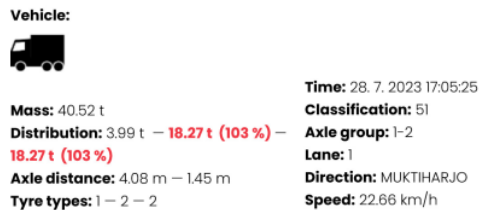
Respons dinamis akibat beban lalu lintas didapatkan dari setiap kendaraan yang melintas B-WIM. Kemudian, respons statis bisa didapatkan dengan algoritma B-WIM yang melakukan perhitungan sinyal statis ekuivalen yang bertujuan untuk mendapatkan berat kendaraan statis dari kendaraan yang melintas (Kalin dkk. 2021). Sebagai contoh, perhatikan hasil respons pengukuran beban sebuah kendaraan truk 4 sumbu pada Gambar 6 sebagai berikut.



Sumber: (Kalin dkk. 2021)

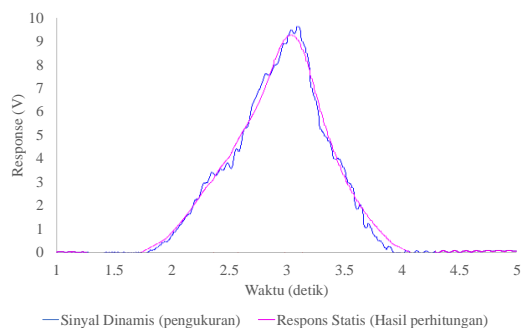
Gambar 6. Hasil respons pengukuran beban truk 4 sumbu dengan B-WIM

Gambar 6 di atas merupakan hasil pengukuran beban kendaraan dari sebuah truk 4 sumbu, dengan hasil berat 40.5 ton yang melintasi jembatan slab beton integral dengan bentang 10.5 m pada kecepatan 50 km/jam. 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 ekuivalen/terhitung jembatan akibat kendaraan truk tersebut. Dengan demikian, FBD dapat dihitung sebagai rasio terbesar antara respons dinamik terukur akibat beban truk dengan nilai respons statik ekuivalen/terhitung berdasarkan algoritma B-WIM.



Gambar 7. Hasil pengukuran beban truk 3 sumbu dengan B-WIM

Dari kurva hasil pengukuran beban masing-masing kendaraan dilakukan perhitungan rasio antara respons dinamik akibat kendaraan dengan respons statik ekuivalen/terhitung berdasarkan hasil algoritma B-WIM. Sebagai contoh, salah satu data hasil pengukuran kendaraan dengan B-WIM di ID-004 sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 7 adalah kendaraan truk 3 sumbu yang melaju 22,66 km/jam pada tanggal 28 Juli 2023 pukul 17:05:25 dengan berat total 40,52 ton dengan konfigurasi sumbu 1-2. Selain data hasil pengukuran berupa data beban dan dimensi, B-WIM juga dapat mengeluarkan grafik respons dinamis (hasil pengukuran) dengan respons statis (hasil perhitungan algoritma B-WIM) untuk sebuah kendaraan, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 8. Respons regangan dinamis dan statis B-WIM

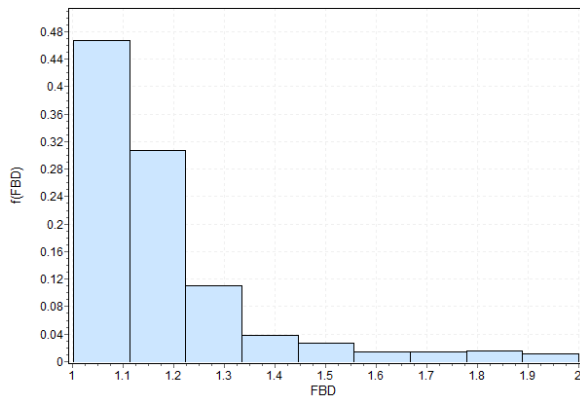
Pada Gambar 8 terdapat kurva biru yang menggambarkan hasil pengukuran respons dari *strain transducer* akibat beban kendaraan yang melintasi jembatan yang digunakan sebagai B-WIM dan kurva ungu yang menggambarkan respons ekuivalen hasil perhitungan algoritma B-WIM yang akan digunakan untuk menghitung 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 B-WIM.

Dalam penelitian ini respons statik struktur jembatan didapat dari hasil perhitungan algoritma B-WIM, dari data kedua kurva setiap kendaraan sehingga nilai FBD untuk setiap kendaraan yang diukur beratnya dengan B-WIM dapat diperhitungkan. Karena nilai nya yang bervariasi terhadap waktu, rasio FBD ditentukan sebagai nilai rata-rata rasio respons dinamik dengan respons statik, untuk kasus kendaraan dengan kurva respons pengukuran pada Gambar 7 di atas, nilai FBD-nya adalah 1,10.

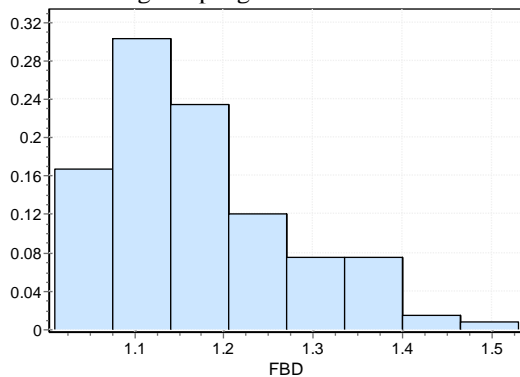
HASIL DAN ANALISIS

Hasil analisis sebaran nilai FBD yang dihasilkan oleh setiap kendaraan yang melintasi kedua jembatan bentang pendek ini dapat diperinci. Distribusi nilai FBD yang dihasilkan oleh setiap jenis kendaraan yang melintasi jembatan dapat dibuat rekapitulasinya. Hasil analisis ini juga membantu menggambarkan sebaran data FBD untuk seluruh kendaraan yang melewati kedua jembatan selama rentang waktu pengukuran B-WIM selama 7 hari. Visualisasi sebaran data FBD tersebut dapat direpresentasikan dalam bentuk histogram pada Gambar 9 Jembatan Pawiro Baru (ID-001) dan Gambar 10 untuk Jembatan Kaligawe (ID-004). Dalam histogram tersebut dapat diamati distribusi frekuensi nilai-nilai FBD yang berbeda berdasarkan rentang nilainya. Selanjutnya, untuk memberikan pandangan yang lebih komprehensif tentang sifat statistik dari data FBD pada kedua jembatan, informasi tersebut ditampilkan secara rinci dalam Tabel 1. Tabel ini menyajikan rata-rata, median,

standar deviasi, dan nilai maksimum serta minimum dari data FBD.



Gambar 9. Histogram pengukuran FBD ID-001



Gambar 10. Histogram pengukuran FBD ID-004

Tabel 1. Deskripsi statistik data FBD

Data	ID-001	ID-004
Panjang bentang (m)	12,0	30,0
Tipe jembatan	GPI	GPI
Jumlah Sampel	372	132
Rentang	0,99722	0,52
Rata-rata	1,1763	1,1695
Varians	0,03205	0,01055
Std. Deviasi	0,17902	0,10274
Koefisien Variasi	0,15218	0,08785
Percentile		
Min	1,0028	1,01
5%	1,0181	1,0465
10%	1,0343	1,06
25% (Q1)	1,0685	1,0825
50% (Median)	1,1213	1,15
75% (Q3)	1,2072	1,23
90%	1,3959	1,341
95%	1,5853	1,3835
Maks	2,0	1,53
Nominal (Rata-rata + 1,5*Std. Deviasi)	1,44	1,32

Dalam histogram pengukuran FBD untuk Jembatan Pawiro Baru (ID-001) pada Gambar 9, sebagian besar nilai FBD berkonsentrasi pada rentang 1 hingga 1,10, serta 1,10 hingga 1,20. Jumlah data dalam kedua kategori tersebut mencapai 72% dari seluruh populasi data yang diukur. Fenomena serupa juga terlihat pada Jembatan Kaligawe (ID-004) dalam histogram pengukuran FBD pada Gambar 10 dengan nilai FBD didominasi oleh kategori 1,10 hingga 1,20, dan kumulasi data mencapai 69% dari populasi.

Pada hasil analisis statistik deskriptif pada Tabel 1, perbandingan statistik FBD antara kedua lokasi pengukuran juga mengungkap bahwa panjang bentang jembatan tidak tampak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai rata-rata FBD. Jika kita memperhatikan variasi dan standar deviasi, nilai pengukuran FBD pada Jembatan Pawiro Baru (ID-001) memang

lebih tinggi daripada Jembatan Kaligawe (ID-004). Jika mempertimbangkan nilai FBD nominal ditetapkan dari nilai rata-rata ditambah 150% dari nilai standar deviasi, nilai tersebut menjadi 1,44 untuk Jembatan Pawiro Baru dan 1,32 untuk Jembatan Kaligawe. Besaran FBD nominal tersebut memiliki peluang tak terlampaui yang cukup tinggi (92% atau 91%) pada kedua lokasi tersebut.

Analisis terhadap data hasil pengukuran FBD ini juga mengungkapkan pola hubungan antara panjang bentang dan FBD. Secara konsisten, semakin panjang bentang jembatan, semakin rendah nilai FBD nominal yang tercatat. Namun, generalisasi FBD sebagai fungsi panjang bentang masih memiliki keterbatasan dalam penelitian ini karena hanya terdapat dua jembatan yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu dengan panjang bentang 18 m dan 30 m. Sementara itu, pasal terkait FBD dalam SNI 1725-2016 maupun RBBD Code memiliki rentang variasi panjang bentang jembatan sampai 200 m. Untuk mendapatkan kesimpulan yang lebih umum, diperlukan variasi panjang bentang yang lebih banyak dalam penelitian berikutnya.

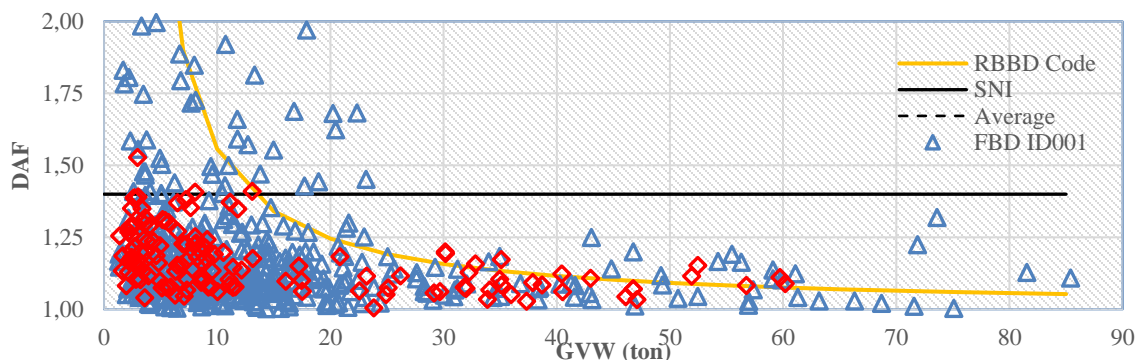
Hasil analisis sebaran data FBD terhadap berat total kendaraan (GVW) ditunjukkan pada Gambar 11. Baik pada hasil pengukuran ID-001 (segitiga biru) maupun ID-004 (kotak merah), terlihat bahwa kendaraan dengan berat total kendaraan yang lebih besar cenderung menghasilkan nilai FBD yang lebih tinggi. Sebaliknya, kendaraan dengan berat total kendaraan yang lebih kecil secara umum menghasilkan nilai FBD yang lebih rendah, mendekati nilai nominal sekitar 1. Pola ini sejalan

dengan model FBD yang diterapkan dalam RBBA Code Direktorat Jalan Denmark (Danish Roads Directorate 2004) yang semakin besar berat total kendaraan, semakin kecil nilai FBD yang tercatat.

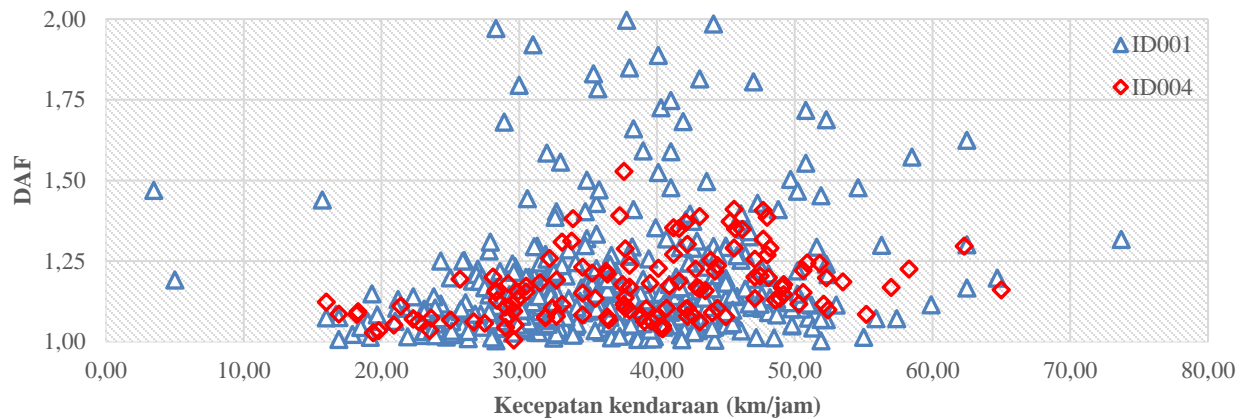
Pengamatan terhadap kendaraan dengan GVW di bawah 25 ton, menghasilkan bahwa nilai FBD terukur ada yang melebihi nilai nominal yang ditetapkan dalam SNI, yaitu 1,4. Hal ini dapat diakibatkan oleh efek resonansi dengan frekuensi getaran kendaraan ringan mendekati frekuensi natural jembatan, yang berdampak pada peningkatan efek dinamis struktur jembatan.

Hubungan antara variabel kecepatan kendaraan terhadap FBD (Gambar 12), baik pada hasil pengukuran ID-001 (segitiga biru) maupun ID-004 (kotak merah), menunjukkan tidak ada korelasi yang jelas antara FBD dan kecepatan kendaraan. Meskipun kecepatan dominan kendaraan di lokasi berkisar 40 km/jam, nilai FBD yang terukur sangat bervariasi.

Dalam konteks perencanaan jembatan, baik dengan beban D maupun T yang ekuivalen dengan beban kendaran berat, nilai FBD yang ditetapkan dalam SNI 1725-2016 Standar Pembebanan Jembatan sudah cukup konservatif. Hal ini diperkuat oleh observasi bahwa FBD untuk beban kendaraan total yang besar, seperti terlihat pada Gambar 11, cenderung berada dalam kisaran 1 hingga 1,25. Untuk mengatasi ketidakpastian tinggi terkait FBD akibat kendaraan ringan, pendekatan model FBD sebagai fungsi dari GVW diusulkan dalam penelitian ini. Model ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih akurat dan efisien terhadap variasi FBD dalam kaitannya dengan berat total kendaraan, sesuai dengan kondisi aktual di Indonesia.



Gambar 11. Hasil pengukuran FBD berdasarkan B-WIM vs GVW



Gambar 12. Hasil pengukuran FBD berdasarkan B-WIM vs Kecepatan kendaraan

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah diuraikan sebelumnya, ditemukan adanya hubungan antara FBD dan berat total kendaraan (GVW). Variasi panjang bentang antara kedua jembatan yang menjadi subjek penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata FBD tidak terlalu berbeda secara signifikan meskipun untuk Jembatan Pawiro Baru ID-001 memiliki nilai standar deviasi yang lebih tinggi. Dari hasil perhitungan, dengan nilai rata-rata yang serupa tersebut, Jembatan Pawiro Baru ID-001 dengan panjang bentang 18 m memberikan nilai FBD nominal yang lebih tinggi karena memiliki nilai standar deviasi yang lebih tinggi, yakni 1,44, dibandingkan dengan Jembatan Kaligawe ID-004 dengan panjang bentang jembatan 30 m memberikan hasil nilai FBD nominal sebesar 1,32 karena standar deviasi dari distribusinya yang lebih rendah.

Dengan variasi FBD yang lebih tinggi pada berat total kendaraan (GVW) yang rendah, dalam pembahasan ini, akan diajukan suatu model FBD bilinear. Model ini akan mengadopsi pendekatan persamaan garis ganda dengan batasan rentang nilai GVW tertentu. Pada pola distribusi FBD vs GVW yang diperlihatkan pada Gambar 11, tampak secara visual terjadi transisi dari variansi FBD yang tinggi menjadi variansi yang lebih rendah pada GVW sekitar 25 ton.

Oleh karena itu, untuk memahami lebih dalam pengaruh GVW terhadap FBD, analisis dibagi menjadi dua kategori kendaraan: pertama,

kendaraan ringan dengan GVW kurang dari 25 ton, dan kedua, kendaraan berat dengan GVW setara atau lebih dari 25 ton. Model FBD nominal yang diusulkan oleh penelitian ini akan mengambil kategori-kategori tersebut sebagai dasar untuk menyusun pendekatan yang lebih tepat guna memberikan gambaran yang lebih akurat terhadap fenomena hubungan FBD dengan GVW.

Hasil analisis distribusi FBD pada kedua kategori kendaraan di Jembatan Pawiro Baru (ID001) mengungkapkan temuan yang signifikan. Untuk kategori kendaraan ringan dengan berat total kendaraan (GVW) kurang dari 25 ton, diperoleh nilai rata-rata FBD sebesar 1,19 dengan standar deviasi sekitar 0,20091. Sementara itu, pada kategori kendaraan berat dengan GVW setara atau lebih dari 25 ton, nilai rata-rata FBD mencapai 1,10 dengan standar deviasi sekitar 0,06558. Melalui pendekatan nilai nominal yang diambil dari nilai rata-rata ditambah 150% standar deviasi setiap kategori, diperoleh nilai nominal FBD untuk kendaraan ringan ($GVW < 25$ ton) sebesar 1,49, dan untuk kendaraan berat ($GVW \geq 25$ ton) sebesar 1,19.

Analisis distribusi FBD juga dilakukan pada kedua kategori berat kendaraan di Jembatan Kaligawe (ID004). Untuk kategori kendaraan ringan dengan berat total kendaraan (GVW) kurang dari 25 ton, nilai rata-rata FBD sebesar 1,19 dengan standar deviasi sekitar 0,10454. Di sisi lain, pada kategori kendaraan berat dengan GVW setara atau lebih dari 25 ton, diperoleh nilai

rata-rata FBD sekitar 1,09 dengan standar deviasi sekitar 0,04478.

Meskipun nilai rata-rata yang dihasilkan oleh kedua kategori kendaraan pada ID004 mirip dengan hasil ID001, perbedaan yang mencolok terletak pada nilai standar deviasi ID004 yang lebih rendah. Fenomena ini memberikan implikasi pada nilai nominal yang lebih rendah pula. Melalui pendekatan nilai nominal yang diambil dari rata-rata ditambah 150% standar deviasi setiap kategori, ditemukan nilai nominal FBD untuk kendaraan ringan ($GVW < 25$ ton) sebesar 1,35, dan untuk kendaraan berat ($GVW \geq 25$ ton) sebesar 1,16.

Penetapan nilai nominal untuk kedua kategori beban pada dua jembatan ini memiliki peluang untuk tidak terlampaui sekitar 90%-95%, menunjukkan tingkat keandalan yang cukup tinggi untuk digunakan sebagai nilai acuan dalam perencanaan jembatan. Berdasarkan hasil tersebut, persamaan FBD bilinear dapat dihasilkan sebagai fungsi dari berat total kendaraan (GVW), mengambil dasar dari nilai nominal yang telah ditemukan. Persamaan model FBD bilinear yang diusulkan berdasarkan Jembatan Pawiro Baru ID001 dengan panjang bentang 18 m dituangkan dalam Persamaan (1) dan (2).

Untuk $GVW < 25$ ton,

$$FBD = 1,80 - \frac{GVW}{41,00} \dots\dots\dots(1)$$

Untuk $GVW \geq 25$ ton,

$$FBD = 1,19 \dots\dots\dots(2)$$

Sementara itu, model FBD bilinear yang diusulkan berdasarkan Jembatan Kaligawe ID004 dengan panjang bentang 30 m dituangkan dalam Persamaan (3) dan (4).

Untuk $GVW < 25$ ton,

$$FBD = 1,40 - \frac{GVW}{104,00} \dots\dots\dots(3)$$

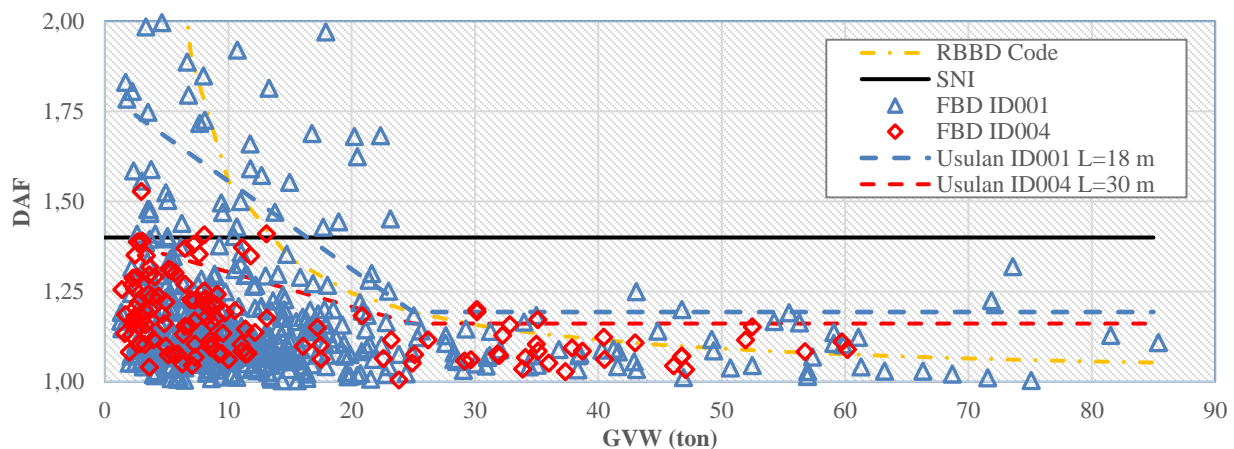
Untuk $GVW \geq 25$ ton,

$$FBD = 1,16 \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- FBD : Faktor beban dinamis
- GVW : *Gross vehicle weight* (ton)

Model FBD yang diusulkan dalam persamaan (1), (2), (3), dan (4) tersebut dapat diilustrasikan melalui grafik distribusi hasil pengukuran FBD terhadap berat total kendaraan (GVW) pada Gambar 13 secara jelas. Pada gambar tersebut, perbandingan antara model FBD usulan dan sebaran data FBD yang dihasilkan dari pengukuran menggunakan metode B-WIM serta FBD yang diberikan oleh ketentuan SNI dan RBBD Code dapat divisualisasikan secara efektif.



Gambar 13. Plot model FBD usulan terhadap GVW

Model FBD yang diusulkan, berdasarkan hasil pengukuran FBD pada Jembatan Pawiro Baru (ID001) dengan bentang jembatan 18 m, yang diwakili oleh persamaan (1) dan (2), divisualisasikan sebagai garis putus-putus berwarna biru pada grafik. Sementara itu, usulan model FBD yang berdasarkan hasil pengukuran pada Jembatan Kaligawe (ID004) dengan bentang jembatan 30 m, yang diwakili oleh persamaan (3) dan (4), divisualisasikan sebagai garis putus-putus berwarna merah.

Melalui perbandingan visual tersebut, dapat diamati bahwa model FBD yang diusulkan memiliki kecenderungan memberikan nilai FBD yang lebih efisien, tetapi tetap akurat berdasarkan hasil pengukuran aktual. Dalam konteks perancangan jembatan, nilai FBD yang dihasilkan dari model usulan ini relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan ketentuan SNI, yang memiliki nilai batas 1,4. Pada prinsipnya, usulan model FBD ini memberikan nilai FBD yang lebih rendah dari ketentuan SNI untuk perancangan jembatan dengan beban desain setara kategori kendaraan berat. Fenomena ini memberikan pandangan yang menarik terkait potensi pengoptimalan perancangan jembatan dengan mempertimbangkan nilai FBD yang lebih akurat, realistis, dan lebih efisien sesuai dengan kondisi aktual di Indonesia.

Sebagaimana terlihat pada persamaan garis usulan FBD ID001, kendaraan ringan dengan berat total kendaraan (GVW) kurang dari 15 ton menghasilkan nilai FBD yang melebihi 1,4. Hasil ini memiliki implikasi positif dalam aspek keamanan perencanaan, yang diharapkan dapat bermanfaat untuk mengantisipasi perilaku amplifikasi dinamis yang mungkin terjadi pada kendaraan ringan terhadap struktur jembatan. Usulan model FBD ini tidak hanya menawarkan potensi efisiensi perencanaan, tetapi juga menawarkan tingkat keamanan dan akurasi dalam merancang jembatan yang lebih responsif terhadap karakteristik kendaraan di Indonesia.

Dengan demikian, usulan model FBD ini memiliki potensi untuk memberikan kontribusi positif dalam pembaruan standar perencanaan jembatan di masa depan. Selain itu, grafik hasil pengukuran FBD vs GVW pada Gambar 13 juga menggambarkan perbedaan yang signifikan antara

usulan model FBD dan ketentuan SNI, yang menunjukkan kemungkinan untuk penyempurnaan lebih lanjut terhadap ketentuan FBD dalam SNI 1725:2016 Standar Perencanaan Jembatan di Indonesia.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan pemahaman mengenai FBD pada jembatan melalui analisis pengukuran menggunakan B-WIM. Hasil analisis distribusi FBD pada dua lokasi pengukuran, yaitu Jembatan Pawiro Baru (ID001) dengan bentang 18 m dan Jembatan Kaligawe (ID004) dengan bentang 30 m, mengungkap fakta yang menarik. Model FBD yang diusulkan berdasarkan hasil pengukuran mampu memberikan nilai FBD yang lebih akurat dan efisien dalam perancangan jembatan. Meskipun secara umum nilai FBD yang diusulkan lebih rendah daripada ketentuan SNI, terdapat perbedaan signifikan pada nilai FBD untuk kendaraan ringan dengan berat total kendaraan (GVW) di bawah 25 ton. Model FBD ini memberikan kontribusi dalam upaya pembaruan standar perencanaan jembatan, dengan potensi untuk mengoptimalkan keamanan, efisiensi, dan akurasi perancangan berdasarkan karakteristik kendaraan dan lingkungan di Indonesia.

Hasil analisis juga mengungkapkan bahwa panjang bentang jembatan memiliki pengaruh yang relatif terbatas terhadap nilai FBD. Variasi yang diamati dalam rata-rata FBD antara dua bentang jembatan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa faktor lain seperti jenis kendaraan dan berat total kendaraan memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap perubahan FBD. Usulan model FBD berbasis berat total kendaraan (GVW) mengungkap fakta baru terkait hubungan antara FBD dan karakteristik kendaraan yang melintasi jembatan. Dalam kaitannya dengan efisiensi perencanaan, model ini memberikan peluang untuk optimalisasi perancangan jembatan yang lebih akurat sesuai dengan beban aktual yang terjadi di lapangan.

Penelitian ini tidak hanya memberikan wawasan tentang faktor beban dinamis pada jembatan melalui analisis B-WIM, tetapi juga

mengusulkan model FBD yang lebih akurat dan efisien dalam konteks perancangan jembatan di Indonesia. Adapun usulan model FBD yang dimaksud dituangkan dalam Persamaan (1) dan (2) yang didasarkan pada pengukuran FBD pada jembatan bentang 18 m, dan Persamaan (3) dan (4) yang didasarkan pada pengukuran FBD pada jembatan bentang 30 m.

Dengan nilai FBD yang diusulkan berdasarkan berat total kendaraan, diharapkan bahwa perencanaan jembatan dapat menjadi lebih presisi, responsif, dan dapat menghadapi variasi karakteristik kendaraan serta lingkungan dengan lebih baik. Pengembangan lebih lanjut dari model ini dan integrasinya dalam standar perencanaan jembatan di masa depan memiliki potensi besar dalam meningkatkan kualitas dan keamanan infrastruktur jembatan di Indonesia.

Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, direkomendasikan agar ketentuan FBD dalam SNI 1725:2016 disesuaikan berdasarkan model FBD yang diusulkan. Penggunaan model FBD yang lebih akurat dan efisien, terutama dengan pendekatan berdasarkan berat total kendaraan (GVW) dapat meningkatkan presisi perencanaan jembatan yang lebih sesuai dengan karakteristik kendaraan di Indonesia.

Untuk studi lanjutan, penelitian ini menyarankan variasi panjang bentang jembatan yang lebih luas sehingga dapat menghasilkan pandangan yang lebih komprehensif terhadap pengaruh panjang bentang terhadap nilai FBD. Studi lanjutan terkait faktor-faktor yang memengaruhi FBD, termasuk pengaruh kekasaran permukaan jalan, analisis resonansi struktural, pengaruh kondisi lokal, dan pengembangan model FBD yang lebih komprehensif. Hal ini akan sangat mendukung perencanaan jembatan yang lebih efisien dan aman di masa depan. Studi lanjutan tersebut akan memberikan informasi lebih mendalam yang dapat mendukung perbaikan lebih lanjut pada model FBD dan berpotensi menghasilkan penyesuaian lebih akurat dan lengkap dalam perencanaan jembatan di masa depan secara nasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada Kementerian PUPR, LPDP, dan PT Jasamarga (Persero) atas dukungan dan kesempatan yang telah diberikan dalam rangka menjalankan penelitian ini. Peran LPDP dalam membiayai studi ini, PT Jasamarga (Persero) yang telah memberikan akses data pengukuran B-WIM di lokasi penelitian, dan Kementerian PUPR, yang memiliki peran vital dalam pengembangan infrastruktur jembatan. Kolaborasi ini mendasari kajian faktor beban dinamis pada struktur jembatan dengan lebih mendalam dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 1928. *Standard specifications for highway bridges and incidental structures*. American Association of State Highway Officials.
<http://hdl.handle.net/2027/coo.31924004013755>.
- . 1989. *Guide Specifications for Strength Evaluation of Existing Steel and Concrete Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
<https://books.google.co.id/books?id=pM9QAAAAYAAJ>.
- Ataei, Shervan, dan Amin Miri. 2018. “Investigating dynamic amplification factor of railway masonry arch bridges through dynamic load tests.” *Construction and Building Materials* 183: 693–705.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.151>.
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *SNI 1725-2016 Pembebanan untuk Jembatan*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta: Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.

- CEN. 2011. *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*. Vol. 1. CEN.
- CSA. 2012. *CSA S6 Canadian Highway Bridge Design Code*. Vancouver: CSA.
- Danish Roads Directorate. 2004. *Reliability-Based Classification of the Load Carrying Capacity of Existing Bridges*. Copenhagen: Danish Roads Directorate.
- Kalin, Jan, Aleš Žnidarič, Andrej Anžlin, dan Maja Kreslin. 2021. "Measurements of bridge dynamic amplification factor using bridge weigh-in-motion data." *Structure and Infrastructure Engineering*, no. February. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1887291>.
- Kalin, Jan, Aleš Znidarič, dan Maja Kreslin. 2015. "Using weigh-in-motion data to determine bridge dynamic amplification factor." *MATEC Web of Conferences* 24. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152402003>.
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 2002. "COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report (1993-1998)." Paris.
- Moses, F. 1979. "Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges." *Transportation Engineering Journal of ASCE* 105 (3): 233–49.
- Nugraha, Widi, Indra Djati Sidi, Made Suarjana, dan Ediansjah Zulkifli. 2023. "Development of Indonesia's Probabilistic based Bridge Loading Code." Dalam *IABSE Symposium Istanbul 2023: Long Span Bridges*, 798–810. www.iabse.org.
- Nugraha, Widi, dan Gatot Sukmara. 2018. "Uji Coba Model Fisik Sistem Bridge Weigh in Motion Sederhana Pada Jembatan Gelagar Baja Komposit (Trial Model Of A Simple Bridge Weigh in Motion" *Jurnal Jalan-Jembatan* 35 (1): 1–15.
- Shandliya Dattakumar Vivek Ganeshan, Sushanth. 2017. "Converting dynamic impact events to equivalent static loads in vehicle chassis." Gothenburg: Chalmers University Technology.
- Wang, Lingbo, Xin Kang, dan Peiwen Jiang. 2016. "Vibration analysis of a multi-span continuous bridge subject to complex traffic loading and vehicle dynamic interaction." *KSCCE Journal of Civil Engineering* 20 (1): 323–32. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0358-4>.
- Žnidarič, Aleš, Jan Kalin, dan Maja Kreslin. 2018. "Improved accuracy and robustness of bridge weigh-in-motion systems." *Structure and Infrastructure Engineering* 14 (4): 412–24. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1406958>.