

EVALUASI RELIABILITAS JEMBATAN STANDAR TIPE KOMPOSIT MENGUNAKAN DATA HASIL PENGUKURAN BEBAN KENDARAAN BERGERAK

RELIABILITY EVALUATION OF COMPOSITE STANDARD BRIDGE USING VEHICULAR WEIGH-IN-MOTION MEASUREMENT DATA

Widi Nugraha dan Setyo Hardono

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. A.H. Nasution No. 264 Kotak Pos 2 Ujung Berung Bandung 40294
Pos-el: widi.nugraha@pusjatan.pu.go.id

Abstract

The Bina Marga standard bridge has been implemented as bridge designing references in Indonesia. One of the standard bridge types is composite bridge. This composite bridge is designed based on RSNI T-02-2005, an Indonesian bridge loading standard. This standard is based on Load and Resistance Factored Design (LRFD) method. LRFD method is treating statistical data on loads and strengths as random variables that has to be evaluated periodically using reliability index as indicator. The purpose of this research is to evaluate the reliability of a 25 m simple span composite bridge structure due to statistical load data from weigh-in-motion (WIM) vehicular loads measurement in Pantura highway of Cikampek-Pamanukan, West Java in 2011 and RSNI T-02-2005 nominal vehicular load. The results of this research are maximum bending moment due to RSNI T-02-2005 nominal vehicular load is 526.55 kNm with probability of exceedance of 4.5×10^{-7} and the reliability index of this composite bridge is 7.16, which is larger than reliability target of AASHTO of 3.50.

Keywords: Reliability, LRFD, Composite bridge, Vehicular load, Weigh-in-motion

Abstrak

Jembatan standar Bina Marga telah banyak diterapkan sebagai acuan perencanaan jembatan jalan raya di Indonesia. Salah satu tipe jembatan standar ini adalah jembatan tipe komposit. Jembatan komposit ini direncanakan berdasarkan Standar pembebanan jembatan RSNI T-02-2005. Standar ini menerapkan metode *Load and Resistance Factored Design* (LRFD) sebagai prinsip desain. Metode LRFD ini menerapkan beban dan juga tahanan struktur sebagai variabel acak yang perlu dievaluasi secara berkala dengan indikator berupa indeks reliabilitas struktur terhadap beban. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengevaluasi reliabilitas struktur jembatan standar Bina Marga tipe komposit terhadap data beban berupa hasil pengukuran beban kendaraan bergerak / WIM (*Weigh-in-motion*) di Jalur Pantura, Cikampek–Pamanukan, Jawa Barat pada tahun 2011. Struktur jembatan standar Bina Marga tipe komposit dengan panjang bentang 25 m dievaluasi terhadap beban kendaraan WIM dan beban hidup nominal RSNI T-02-2005. Penelitian ini menghasilkan parameter momen lentur maksimum gelagar akibat beban lalu lintas nominal RSNI T-02-2005 bernilai 526,55 kNm dengan peluang terlampaui sebesar $4,5 \times 10^{-7}$ dan indeks reliabilitas struktur jembatan tipe komposit 7,16 yang lebih besar dari target reliabilitas AASHTO, yaitu 3,50.

Kata Kunci: Reliabilitas, LRFD, Jembatan komposit, Beban kendaraan, Beban bergerak

PENDAHULUAN

Perencanaan struktur jembatan dengan perletakan sederhana, pada dasarnya dapat direncanakan secara tipikal. Hal ini dikarenakan tipe perletakan sederhana dapat mengakomodasi pengaruh luar jembatan, sehingga struktur atas jembatan dengan tipe perletakan ini relatif tidak terpengaruh pada kondisi lokasi jembatan. Maka perencanaan dapat dilakukan dengan mengacu pembebanan dalam standar pembebanan jembatan di Indonesia, yaitu RSNI T-02-2005.¹ Direktorat Jenderal Bina Marga, mengeluarkan Pedoman gambar standar pekerjaan jalan dan jembatan,² yang berisi gambar teknik dari jembatan standar Bina Marga. Jembatan standar Bina Marga ini terdiri dari beberapa desain tipe jembatan tipikal dengan panjang bentang yang bervariasi.

Salah satu tipe jembatan yang banyak diterapkan di Indonesia adalah jembatan gelagar komposit. Selain berdasarkan standar pembebanan RSNI T-02-2005,¹ jembatan standar tipe komposit ini direncanakan dengan mengacu standar perencanaan struktur baja untuk jembatan RSNI T-03-2005.³ Kedua peraturan tersebut menerapkan metode *Load and Resistance Factored Design* (LRFD). Dalam konsep LRFD ini, beban maupun tahanan struktur diperlakukan sebagai variabel acak. Standar perencanaan struktur jembatan dengan konsep LRFD, termasuk standar pembebanan untuk jembatan, perlu dikaji secara berkala terhadap data statistik aktual dari beban maupun tahanan yang terjadi di lapangan dan memastikan reliabilitas struktur sudah memenuhi target reliabilitas yang ditetapkan.

Reliabilitas sebuah struktur menunjukkan tingkat keandalan atau tingkat keamanan dari tahanan struktur terhadap beban yang berlaku. Reliabilitas adalah besaran yang juga dapat menggambarkan kebalikan dari peluang kegagalan. Semakin tinggi nilai indeks reliabilitas, maka struktur semakin aman dan peluang kegagalannya akan lebih rendah, dan berlaku juga sebaliknya. Jika target reliabilitas belum tercapai, maka

diperlukan kalibrasi dari ketentuan-ketentuan yang diatur dalam standar tersebut.⁴

Salah satu cara untuk mendapatkan variabel besaran beban kendaraan ialah dengan pengukuran. Pengukuran beban kendaraan selama ini banyak dilakukan dengan menggunakan jembatan timbang secara statik. Namun, masih banyak kekurangan dalam pengoperasian jembatan timbang, seperti kebutuhan waktu pengukuran yang cukup lama dan memerlukan pengawasan secara langsung. Dalam beberapa dasawarsa terakhir, suatu metode baru untuk pengukuran beban kendaraan sedang berkembang, yaitu pengukuran beban kendaraan bergerak / *Weigh-in-Motion* (WIM). Menurut Jacob, B., dkk.,⁵ metode WIM ini dikembangkan menjadi metode yang lebih efisien dalam mengukur beban kendaraan secara aktual, karena memungkinkan kendaraan yang diukur bebannya dapat tetap melaju sesuai kecepatan lalu lintas, tanpa adanya gangguan akibat pengoperasian WIM ini. Teknologi WIM ini pun mulai berkembang di Indonesia dalam beberapa tahun terakhir, diantaranya yang tengah dikembangkan oleh Pusat Penelitian Jalan dan Jembatan (Pusjatan), Badan Penelitian dan Pengembangan (Balitbang), Kementerian Pekerjaan Umum (PU). Beberapa ruas jalan nasional di Indonesia telah dilakukan survey pengukuran beban kendaraan dengan teknologi WIM ini. Salah satu ruas jalan yang telah disurvei dengan teknologi WIM ini adalah ruas jalan nasional Cikampek–Pamanukan pada tahun 2011.⁶ Dalam ruas jalan nasional tersebut, banyak terdapat infrastruktur jembatan yang diantaranya berupa implementasi jembatan standar Bina Marga tipe gelagar komposit, gelagar beton bertulang, dan gelagar prategang. Reliabilitas struktur jembatan-jembatan tersebut dapat dievaluasi dengan memanfaatkan data beban WIM yang telah didapatkan. Penelitian mengenai evaluasi reliabilitas jembatan standar Bina Marga kelas A tipe gelagar beton bertulang dengan panjang bentang 25 m dengan data beban WIM di ruas jalan nasional Cikampek–pamanukan pada tahun

2011 telah dilakukan dan menghasilkan indeks reliabilitas 5,01.⁷

Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi reliabilitas struktur jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit yang direncanakan dengan pembebanan lalu lintas berdasarkan standar pembebanan untuk jembatan RSNI T-02-2005¹ dan standar perencanaan struktur baja untuk jembatan RSNI T-03-2005³ terhadap beban aktual hasil pengukuran beban WIM di ruas jalan nasional Cikampek–Pamanukan tahun 2011.⁷ Evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan indeks reliabilitas struktur jembatan yang dihasilkan terhadap target reliabilitas 3,50 yang ditetapkan AASHTO,⁹ yang merupakan standar rujukan dari standar perencanaan jembatan di Indonesia, baik standar pembebanan RSNI T-02-2005¹ maupun standar perencanaan struktur baja untuk jembatan RSNI T-03-2005.³

METODE PENELITIAN

Pengolahan data beban WIM

Data beban kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil pengukuran beban kendaraan bergerak di Jalur Pantura, Cikampek–Pamanukan, Jawa Barat oleh Pusjatan Kementerian PU pada 29 Oktober sampai dengan 1 November tahun 2011 selama 3 x 24 jam pada kedua arah lalu lintas.⁶ Data beban diolah secara statistik, dimana besaran seperti nilai maksimum, nilai minimum, nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi dihitung, kemudian ditentukan pula jenis distribusi apa yang cocok dengan sebaran data tersebut dengan *goodness of fit* Kolmogorov-Smirnov.⁹ Data distribusi berat kendaraan per sumbu kelas kendaraan ini digunakan dalam penentuan besaran beban yang digunakan selanjutnya dalam simulasi Monte Carlo.¹⁰

Data statistik hasil pengukuran WIM dalam bentuk jumlah kendaraan per kelas kendaraan dapat dilihat pada Tabel 1. Klasifikasi jenis kendaraan yang digunakan adalah klasifikasi yang digunakan oleh *data*

logger Marksman 660 - WIM System yang digunakan, yaitu klasifikasi EURO13¹¹ yang membagi jenis kendaraan dalam 12 kelas, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Jumlah kendaraan per kelas kendaraan hasil pengukuran WIM

No	Klasifikasi Kendaraan	Jumlah Kendaraan	Peluang Kejadian
1	Kendaraan Ringan & Medium Truck/Bus Kecil	35.218	49,34%
2	Truk 2 Sumbu	19.846	27,81%
3	Truk 3 Sumbu	5.991	8,39%
4	Truk 4 Sumbu	115	0,16%
5	Truk Gandengan	1.173	1,64%
6	Truk 3 Sumbu + Gandengan 2 Sumbu	10	0,01%
7	Traktor 2 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	0	0%
8	Traktor 2 Sumbu + Trailer 2 Sumbu	10	0,01%
9	Traktor 2 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	228	0,32%
10	Traktor 3 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	332	0,47%
11	Traktor 3 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	363	0,51%
12	Bus Besar	8.089	11,33%
Total		71.375	100%

Sumber: Nugraha.⁷

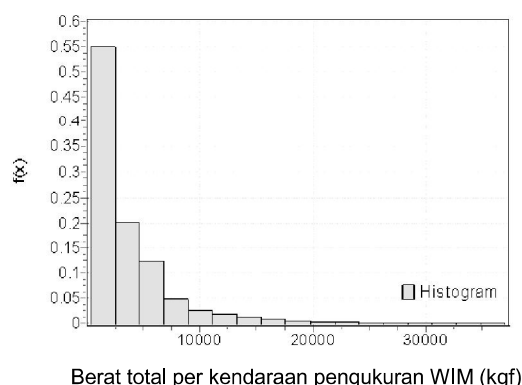
Tabel 2. Klasifikasi kendaraan EURO13

No	Klasifikasi Kendaraan	Konfigurasi Sumbu
1	Kendaraan Ringan & Medium Truck/Bus Kecil	MP 1.1 T 1.2 & B. 1.2
2	Truk 2 Sumbu	T 1.2
3	Truk 3 Sumbu	T 1.2.2
4	Truk 4 Sumbu	T 1.2. 2.2
5	Truk Gandengan	T 1.2 + 2.2
6	Truk 3 Sumbu + Gandengan 2 Sumbu	T 1.2.2 + 2.2
7	Traktor 2 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	T 1.2 - 2
8	Traktor 2 Sumbu + Trailer 2 Sumbu	T 1.2.2 - 2.2 T 1.2.2 - 2.2.2
9	Traktor 2 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	T 1.2.2-2
10	Traktor 3 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	T 1.2.2-2.2
11	Traktor 3 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	T 1.2.2-2.2.2
12	Bus Besar	B 1.2

Sumber: MetroCount.¹¹

Pada Tabel 1 di atas, terlihat bahwa kendaraan kelas 1 yang menurut EURO13¹¹ merupakan kendaraan kelas ringan dengan konfigurasi 2 sumbu, terukur sebagai kelas dengan jumlah tertinggi yaitu 35.218 kendaraan atau 48,68% dari total kendaraan. Data statistik beserta histogram dari data berat kendaraan hasil pengukuran WIM dapat dilihat pada Gambar 1. Sesuai dengan rekapitulasi jumlah kendaraan per kelas kendaraan, kendaraan ringan memiliki jumlah kendaraan yang paling tinggi, pada data statis-

tik dan histogram terlihat berat kendaraan ringan memiliki *probability density* yang paling tinggi.



Gambar 1. Histogram beban kendaraan hasil pengukuran WIM.7

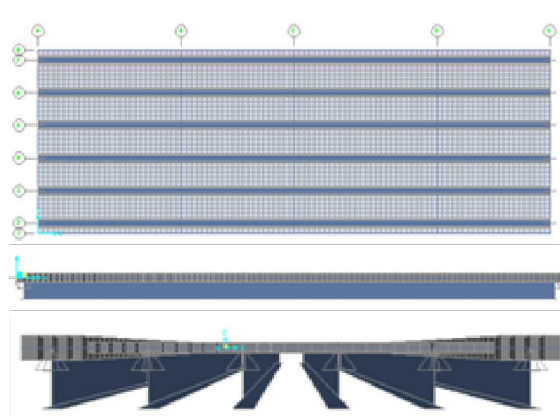
Berdasarkan data berat kendaraan hasil pengukuran WIM yang diklasifikasikan menjadi 12 jenis sesuai Tabel 2, besaran beban sumbu kendaraan diperlakukan sebagai variabel acak, sementara jarak antar sumbu diasumsikan diambil sebagai nilai minimum dari standar jarak antar sumbu dari masing-masing kelas kendaraan pada EURO1311 untuk memberikan dampak maksimum akibat beban pada struktur jembatan. Untuk mengetahui jenis distribusi apa yang paling cocok dengan sebaran data beban kendaraan terukur WIM, maka dilakukan pencocokan distribusi (distribution fitting) berdasarkan uji goodness of fit (GOF) Kolmogorov-Smirnov.⁹ Dalam uji GOF ini, dilakukan pencocokan distribusi untuk masing-masing data beban sumbu per kelas kendaraan.

Kemudian untuk memodelkan iring-iringan kendaraan yang mungkin terjadi, dapat dilakukan dengan simulasi Monte Carlo menggunakan distribusi jumlah kendaraan tiap kelas kendaraan digunakan. Distribusi data tersebut diperoleh setelah dilakukan goodness of fit Kolmogorov-Smirnov⁹ untuk jenis distribusi diskrit dari data jumlah kendaraan tiap kelas kendaraan. Urutan kejadian acak dari simulasi Monte Carlo kemudian disusun menjadi iring-iringan kendaraan pada jembatan dengan batasan panjang bentang jembatan, sehingga didapatkan kombi-

nasi pembebebanan yang diaplikasikan pada model struktur jembatan.

Pemodelan dan analisis struktur jembatan

Pemodelan struktur dari jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit dengan panjang bentang 25 meter dengan perletakan sederhana, lebar jembatan sembilan meter, ini menggunakan software SAP2000 versi 14.2.2 secara tiga dimensi, dapat dilihat pada Gambar 2. Besaran nominal dari karakteristik material struktur yang digunakan adalah beton dengan mutu $f_c' 20$ MPa dengan spesifikasi berat unit (γ) = 2.400 kg/m³, dan baja gelagar dengan mutu tegangan leleh $f_y 300$ MPa, modulus elastisitas (E) = 200.000 MPa.



Gambar 2. Pemodelan struktur jembatan.

Kemudian, analisis struktur jembatan dilakukan dengan mengaplikasikan kombinasi iring-iringan kendaraan dengan data beban masing-masing kelas kendaraan hasil pengukuran WIM dan beban standar yang digunakan dalam peraturan pembebanan jembatan Indonesia, yaitu RSNI T-02-2005 Standar Pembebanan untuk Jembatan.¹ Perbandingan dan evaluasi pertama yang dapat dilakukan adalah dengan membandingkan hasil analisis struktur, yaitu gaya dalam momen lentur maksimum gelagar jembatan akibat beban standar pada distribusi momen lentur maksimum gelagar jembatan akibat kombinasi beban hasil pengukuran WIM. Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan peluang terlampauinya (probability of exceedance) dari dampak beban standar RSNI T-02-2005¹ pada jembatan pada distribusi

dampak beban akibat kombinasi beban hasil pengukuran WIM.

Indeks reliabilitas struktur

Perhitungan reliabilitas struktur jembatan standar dilakukan untuk mengetahui keandalan struktur jembatan tersebut. Dalam melakukan perhitungan indeks reliabilitas struktur jembatan ini, diperlukan variabel kapasitas (R/resistance), beban mati (D/dead load), dan beban hidup (L/live load), semuanya dalam besaran momen lentur. Dalam menghitung indeks reliabilitas (β) dengan fungsi performa $R-D-L > 0$ setelah diketahui terdapat distribusi non-normal dari ketiga variabel R, D, dan L harus menggunakan metode *equivalent normal distribution*.⁹ dengan melakukan transformasi Rossenblatt, yaitu transformasi dari distribusi nonnormal menjadi distribusi normal yang ekuivalen. Diketahui L memiliki distribusi lognormal dari hasil tes GOF, sedangkan variabel R adalah lognormal⁹ dan D adalah normal.⁹ Persamaan yang digunakan untuk menghitung indeks reliabilitas (β) tersebut adalah sebagai berikut.

$$\beta = \frac{\mu_R^N - \mu_D - \mu_L^N}{\sqrt{(\sigma_R^N)^2 + (\sigma_D)^2 + (\sigma_L^N)^2}} \quad (1)$$

Dengan

μ_R^N adalah nilai rata-rata normal ekuivalen variabel R

μ_D adalah nilai rata-rata variabel D

μ_L^N adalah nilai rata-rata normal ekuivalen variabel L

σ_R^N standar variasi normal ekuivalen variabel R

σ_D standar variasi variabel D

σ_L^N standar variasi normal ekuivalen variabel L

Transformasi Rossenblatt dilakukan dengan menghitung parameter distribusi lognormal dari variabel L dan R. Kemudian, dengan menggunakan dua persamaan berikut (dicontohkan untuk variabel L), dapat dihitung nilai rata-rata normal ekuivalen variabel dari L dan R juga standar variasi normal ekuivalen variabel dari L dan R.

$$\begin{aligned} \sigma_L^N &= l^* \xi_L \\ \mu_L^N &= l^*(1 - \ln(l^*)) + \lambda_L \end{aligned} \quad \begin{matrix} (2) \\ (3) \end{matrix}$$

Dari nilai indeks reliabilitas, evaluasi reliabilitas struktur jembatan standar Bina Marga tipe komposit ini dilakukan dengan membandingkan nilai tersebut terhadap target reliabilitas yang ditetapkan peraturan yang berlaku. Menurut AASHTO LRFD Bridge Design Code,⁸ target reliabilitas untuk struktur jembatan adalah 3,50 untuk komponen struktur beton dan struktur baja. Peraturan RSNI T-02-2005 yang mengacu AASHTO LRFD Bridge Design Code⁸ juga perlu memenuhi target reliabilitas yang sama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data beban WIM

Sebagai gambaran, pada Tabel 3 ditampilkan kurva probability density function (PDF) yang paling cocok untuk masing-masing beban sumbu pertama saja dari tiap kelas kendaraan terukur WIM. Data PDF masing-masing sumbu per kelas kendaraan tersebut kemudian digunakan untuk penarikan sampel beban sumbu kendaraan pada simulasi Monte Carlo yang dijadikan input beban dalam model jembatan yang dianalisis.

Dalam menentukan iring-iringan kendaraan yang mungkin terjadi, digunakan data frekuensi dari masing-masing kelas kendaraan yang diurutkan dari kelas dengan frekuensi terbesar ke kelas kendaraan dengan frekuensi terkecil dari Tabel 1. Kemudian dilakukan distribution fitting secara diskrit terhadap data frekuensi tersebut, sehingga didapat distribusi diskrit dari frekuensi kendaraan per kelas kendaraan pada Gambar 3. Kemudian untuk memodelkan iring-iringan kendaraan yang mungkin terjadi, dapat dilakukan dengan simulasi Monte Carlo¹⁰ menggunakan distribusi jumlah kendaraan tiap kelas kendaraan digunakan. Distribusi data tersebut diperoleh setelah dilakukan goodness of fit Kolmogorov-Smirnov⁹ untuk jenis distribusi diskrit dari data jumlah kendaraan tiap kelas kendaraan.



Gambar 3. PDF urutan kelas kendaraan hasil pengukuran WIM.7

Pemodelan dan analisis struktur

Pembebanan yang diberlakukan pada model jembatan ini antara lain adalah beban mati akibat berat sendiri struktur beton dengan nilai nominal dari berat jenis (γ) = 2.400 kg/m³, beban superimposed dead load (SIDL) akibat berat lapisan perkerasan setebal 100 mm dengan berat jenis nominal (γ) = 2.400 kg/m³, beban parapet atau pagar beton, kemudian ada beban hidup yang terdiri dari sampel beban kendaraan sesuai iring-iringan kendaraan yang telah ditentukan, menggunakan variasi seribu sampel besaran beban yang berbeda untuk masing-masing kendaraan dari simulasi Monte Carlo menggunakan PDF beban sumbu kendaraan masing-masing kelas yang telah ditentukan.

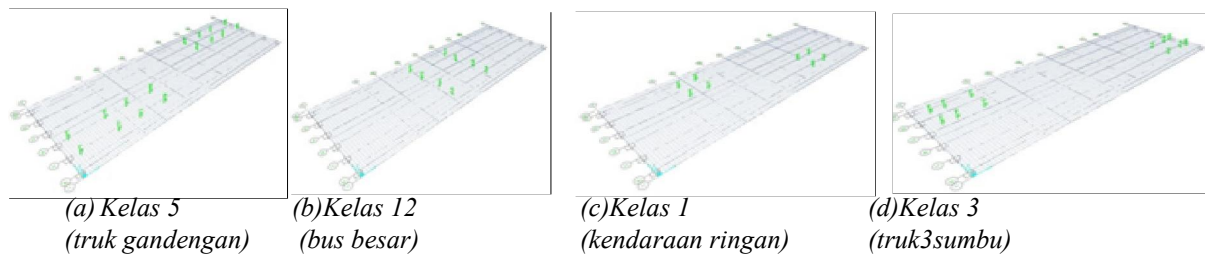
Sebagai ilustrasi pembebanan akibat beban WIM, salah satu kombinasi iring-iringan kendaraan yang mungkin terjadi, yaitu kombinasi ke-13 yang terdiri dari iring-iringan dari kendaraan kelas 5 (truk gandengan), kelas 12 (bus besar), kelas 1 (kendaraan ringan), dan kelas 3 (truk tiga sumbu) masing-masing diaplikasikan pada model jembatan sesuai posisi titik kontak roda pada pelat jembatan untuk kedua arah lalu lintas, dapat dilihat pada Gambar 4. Setelah beban kelas kendaraan yang sudah diaplikasikan pada model, lalu disuperposisi dalam kombinasi pembebanan menjadi satu kombinasi iring-iringan beban kendaraan. Kemudian data seribu sampel beban untuk masing-masing beban sumbu kendaraan dimasukan sebagai input beban untuk masing-masing lokasi pembebanan.

Selain pembebanan dari beban kendaraan terukur WIM, untuk keperluan evaluasi, maka beban lalu lintas dalam RSNI T-02-2005 berupa beban lajur D dan beban truk T juga diaplikasikan pada model struktur jembatan. Untuk jembatan bentang 25 meter ini, sesuai RSNI T-02-2005, maka beban yang diberikan adalah beban D : Beban terbagi rata (BTR) 9 kN/m², beban garis terpusat (BGT) 49 kN/m, beban T : beban truk standar dengan berat total 500 kN.

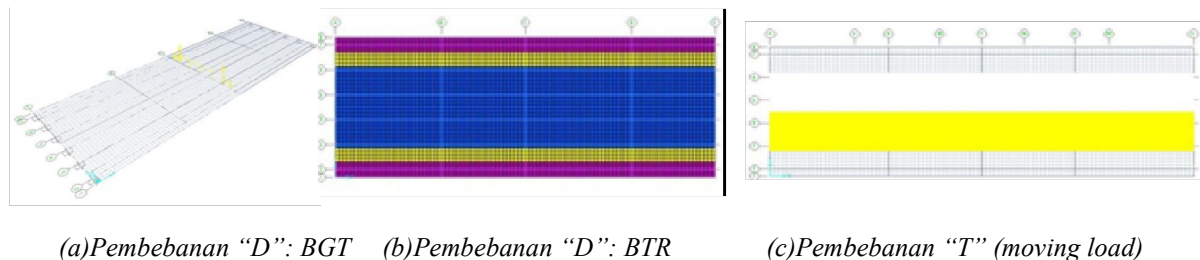
Dari respon struktur hasil analisis struktur terhadap sampel beban hidup berdasarkan hasil pengukuran WIM ini, diambil satu nilai

Tabel 3. PDF beban sumbu pertama tiap kelas kendaraan hasil pengukuran WIM7

No	Klasifikasi Kendaraan	PDF Sumbu ke-1 masing-masing kelas			
		Distribusi	Parameter		
1	Kendaraan Ringan & Medium Truck/Bus Kecil	Gamma (3P)	$\alpha = 1,52$	$\beta = 134,13$	$\gamma = 204,63$
2	Truk 2 Sumbu	Lognormal (3P)	$\sigma = 0,46$	$\mu = 6,81$	$\gamma = 158,1$
3	Truk 3 Sumbu	Lognormal (3P)	$\sigma = 0,163$	$\mu = 8,28$	$\gamma = -2.054,9$
4	Truk 4 Sumbu	Normal	$\sigma = 776,88$	$\mu = 2.131,4$	
5	Truk Gandengan	Normal	$\sigma = 478,73$	$\mu = 1.787,8$	
6	Truk 3 Sumbu + Gandengan 2 Sumbu	Lognormal (3P)	$\sigma = 0,286$	$\mu = 7,81$	$\gamma = -849,55$
7	Traktor 2 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	(tidak ada yang terukur WIM)			
8	Traktor 2 Sumbu + Trailer 2 Sumbu	Log-Gamma	$\alpha = 600,89$	$\beta = 0,01231$	
9	Traktor 2 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	Gen. Gamma (4P)	$K = 13,008$	$\alpha = 5,1737$	$\beta = 10.000$ $\gamma = 9.509$
10	Traktor 3 Sumbu + Trailer 1 Sumbu	Lognormal (3P)	$\sigma = 0,3177$	$\mu = 7,676$	$\gamma = -241,1$
11	Traktor 3 Sumbu + Trailer 3 Sumbu	Normal	$\sigma = 603$	$\mu = 2126,7$	
12	Bus Besar	Lognormal (3P)	$\sigma = 0,0694$	$\mu = 8,758$	$\gamma = -4.453$



Gambar 4. PDF momen lentur maksimum gelagar akibat beban kendaraan hasil pengukuran WIM: distribusi lognormal.

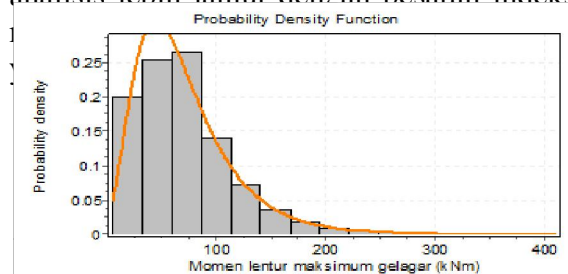


Gambar 5. Pembebanan "D" dan "T" RSNI T-02-2005.

momen lentur maksimum yang terjadi untuk satu nilai sampel beban (satu kombinasi) dari seluruh gelagar memanjang pada jembatan ini. Dengan seluruh jenis kombinasi iring-iringan kendaraan dan seluruh jumlah sampel yang dihasilkan dari simulasi Monte Carlo,¹⁰ maka dihasilkan sebaran data momen maksimum gelagar yang ditampilkan pada Gambar 6 dan karakteristik data statistik pada Tabel 4. Sedangkan respon struktur berupa momen maksimum gelagar akibat beban nominal standar RSNI T-02-2005 ditampilkan pada Gambar 7.

Dari respon momen lentur maksimum untuk pembebanan jembatan tipe komposit bentang 25 meter ini akibat beban lalu lintas berdasarkan RSNI T-02-2005, seperti yang terlihat pada Tabel 5, didapatkan beban D yang paling menentukan dengan besar momen lentur 526,56 kNm. Jika mengacu pada sebaran data momen lentur maksimum akibat beban lalu lintas berdasarkan hasil pengukuran WIM di Jalur Pantura Cikampek-Pamanukan, Jawa Barat,⁶ besaran momen lentur akibat beban hidup tersebut berada di atas nilai maksimum yang terjadi dari kombinasi WIM, yaitu 411,1 kNm.

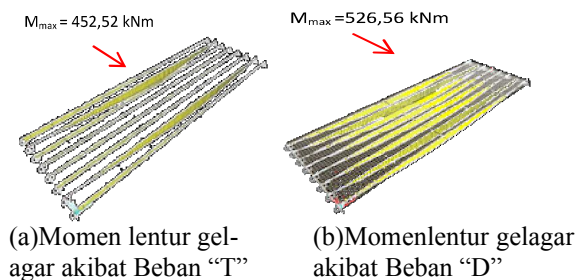
Selanjutnya, jika dihitung peluang momen lentur maksimum akibat beban lalu lintas berdasarkan RSNI T-02-2005 terlampaui berdasarkan distribusi momen lentur maksimum akibat beban lalu lintas berdasarkan hasil pengukuran WIM, didapat nilai $4,66 \times 10^{-7}$. Hal ini dapat menunjukkan indikasi besaran beban lalu lintas berdasarkan RSNI T-02-2005 secara khusus dalam lingkup penelitian ini sifatnya adalah konservatif, karena umumnya beban hidup nominal diambil sebagai nilai 5% uppertile dari kurva PDF yang digunakan. Namun, untuk menyatakan peraturan pembebanan ini bersifat konservatif atau tidak, diperlukan analisis lebih lanjut dengan besaran indeks



Gambar 6. PDF momen lentur maksimum gelagar akibat beban kendaraan hasil pengukuran WIM

Tabel 4. Data statistik momen lentur maksimum gelagar akibat beban kendaraan WIM

Statistik	Nilai	Persentil	Nilai (kNm)
Jumlah Sampel	19.000	Min	5,39
Rentang	405,71	5%	13,67
Rata-rata	70,47	25% (Q1)	38,49
Variansi	1.968,20	50% (Median)	63,75
Std. Deviasi	44,36	75% (Q3)	91,34
Koefisien Variasi	0,63	95%	154,78
		Maks	411,10



Gambar 7. Momen lentur gelagar akibat beban nominal lalu lintas RSNI T-02-2005.

Tabel 5. Peluang momen lentur maksimum gelagar akibat RSNI T-02-2005 terlampaui oleh beban kendaraan WIM

Beban	M (kNm)	Cummulative Density (F(x))	Probability of exceedance (1-F(x))
T	452,52	0,9999948	$5,19 \times 10^{-6}$
D	526,56	0,9999995	$4,66 \times 10^{-7}$

Indeks reliabilitas struktur

Variabel L atau beban hidup diketahui dari distribusi beban lognormal hasil distribution fitting dari data hasil pengukuran beban WIM. Dari pengolahan data tersebut diketahui variabel L memiliki nilai rata-rata (μL) 70,74 kNm, standar deviasi (σL) 44,36 kNm, dan koefisien variansi / c.o.v (ΩL) sebesar 0,63. Untuk variabel D, dari analisis struktur, nilai nominal momen lentur maksimum gelagar akibat beban mati dan SIDL, (D_n) adalah 598,94 kNm. Dengan faktor bias untuk beban mati 1,05 dan c.o.v (ΩD) 0,10,9 maka nilai rata-rata momen lentur maksimum gelagar akibat beban mati dan SIDL, (μD) adalah 628,89

kNm dan standar deviasi (σD) bernilai 62,89 kNm. Untuk data variabel R atau kapasitas momen lentur penampang gelagar didapat dari perhitungan menggunakan persamaan momen lentur penampang komposit dengan memperhitungkan ketidakpastian akibat variabel yang bersifat acak natural, seperti mutu baja f_y dan mutu beton f_c' juga luas penampang baja yang dapat bersifat acak dengan koefisien variansi kecil. Koefisien variansi c.o.v. dari luasan penampang bernilai 3% dan bersifat tidak bias, rasio nominal terhadap rata-rata, v diasumsikan sama dengan 1. Parameter mutu baja memiliki distribusi normal dengan c.o.v 6% dan faktor bias 0,92,6 sedangkan parameter mutu beton juga memiliki distribusi normal dengan c.o.v 15% dengan faktor bias 0,91. Dari hasil perhitungan kapasitas didapat nilai rata-rata (μR) 5.513,03 kNm, standar deviasi (σR) 969,34 kNm, dan koefisien variansi/c.o.v (ΩR) sebesar 0,18.

Dalam menentukan indeks reliabilitas, karena terdapat variabel dengan distribusi nonnormal, yaitu variabel R dan L yang berupa lognormal, maka diperlukan proses iterasi. Meskipun fungsi yang digunakan adalah linear performance, nilai rata-rata dan standar deviasi yang dibutuhkan tidak diketahui, karena fungsi yang digunakan merupakan fungsi dari masing-masing nilai titik kegagalan (failure point values). Sehingga solusi berupa nilai indeks reliabilitas dapat dihitung secara iteratif sebagai berikut (dalam satuan momen lentur yaitu kNm). Diasumsikan untuk iterasi pertama, titik kegagalan adalah sama dengan nilai rata-rata dari L dan R. Perhitungan dilakukan dengan proses iterasi dilakukan sampai nilai indeks reliabilitas konvergen, seperti terlihat pada Tabel 6.

Berdasarkan iterasi tersebut, indeks reliabilitas β adalah 7,16 dengan peluang kegagalan $p_F = 1 - \Phi(\beta) = 4,11 \times 10^{-13}$.

Standar atau pedoman perencanaan dan pembebanan untuk jembatan memiliki suatu nilai indeks reliabilitas target yang harus dipenuhi, dan mengikat faktor-faktor seperti faktor beban dan faktor reduksi yang

Tabel 6. Tahapan iterasi perhitungan indeks reliabilitas β

Iterasi ke	Titik Gagal		σ_i^N		μ_i^N		β
	I^*	r^*	σ_L^N	σ_R^N	μ_L^N	μ_R^N	
1	70,47	5.513,03	40,72	961,97	58,71	5.429,10	4,91
2	78,92	716,19	45,60	124,97	56,81	2.166,97	10,07
3	199,05	1.098,53	115,01	191,68	-40,85	2.853,88	9,76
4	514,91	1.309,99	297,50	228,58	-595,07	3.172,63	8,25
5	1.324,66	2.039,34	765,36	355,85	-2.782,61	4.036,39	7,31
6	2.279,14	2.942,21	1.316,84	513,39	-6.024,36	4.744,99	7,17
7	2.760,78	3.409,71	1.595,12	594,96	-7.826,72	4.996,12	7,16
8	2.863,40	3.508,91	1.654,41	612,27	-8.222,14	5.040,85	7,16
9	2.875,91	3.520,83	1.661,64	614,35	-8.270,59	5.046,03	7,16
10	2.877,28	3.522,14	1.662,43	614,58	-8.275,92	5.046,60	7,16

digunakan dalam perencanaan. AASHTO menetapkan nilai target indeks reliabilitas β sebesar 3,50 atau peluang kegagalan, $pf = 2,32 \times 10^{-4}$. Dari hasil perhitungan indeks reliabilitas β , didapat nilai yang melebihi target reliabilitas β untuk AASHTO yang juga diacu RSNI T-02-2005, yaitu 3,50. Hal ini dapat menunjukkan bahwa kondisi jembatan memiliki resiko kegagalan yang lebih kecil dari target, atau dapat disebut cukup konservatif. Kemudian jika dibandingkan penelitian yang dilakukan Nugraha,⁷ indeks reliabilitas jembatan standar Bina Marga tipe gelagar beton bertulang dengan kelas A bentang 25 m terhadap beban terukur WIM yang sama dengan penelitian ini, adalah 5,01, yang lebih kecil dari indeks reliabilitas jembatan tipe komposit pada penelitian ini. Hal ini menunjukkan bahwa jembatan standar Bina Marga tipe komposit bentang 25 m Kelas A ini lebih reliable dibanding jembatan standar gelagar beton bertulang. Sehingga dapat disimpulkan untuk lingkup penelitian ini bahwa jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit bentang 25 m yang telah banyak diaplikasikan dan dijadikan rujukan dalam perencanaan jembatan di Indonesia, bersifat sangat konservatif.

KESIMPULAN

Gaya dalam berupa momen lentur maksimum pada gelagar jembatan standar Bina Marga2 kelas A tipe komposit 25 m yang diakibatkan oleh beban nominal standar dalam peraturan RSNI T-02-2005: pembebanan untuk jembatan,1 lebih tinggi dari momen lentur maksimum akibat kombinasi beban terukur WIM di Jalur Pantura Cikampek Pamanukan, dengan peluang terlampaui (probability of exceedance) adalah $4,56 \times 10^{-7}$.

Indeks reliabilitas β dari struktur jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit 25 m ini2 terhadap beban hasil pengukuran WIM dalam lingkup penelitian ini adalah 7,16 dengan resiko kegagalan $pF = 4,11 \times 10^{-13}$. Nilai ini lebih tinggi dari target reliabilitas peraturan AASHTO LRFD Bridge Design Code7 yaitu $\beta = 3,50$. Hal ini menunjukan struktur jembatan cukup reliable dan telah didesain secara konservatif, sehingga memungkinkan untuk dilakukan optimasi, karena memiliki resiko kegagalan yang lebih kecil dibanding yang ditargetkan.

Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan evaluasi reliabilitas terhadap tipe jembatan standar yang lain, seperti jembatan

standar tipe rangka baja maupun tipe gelagar prategang. Selain itu, penelitian terhadap variasi panjang bentang jembatan juga perlu dilakukan, karena panjang bentang jembatan berpengaruh terhadap besaran beban yang diterima oleh suatu struktur jembatan tersebut. Kemudian, penambahan data pengukuran beban kendaraan perlu dilakukan untuk penelitian selanjutnya, agar dapat ditarik sebuah kesimpulan yang mewakili lingkup yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak IGW Samsi Gunarta sebagai Kepala Balai Teknik Lalu-lintas dan Lingkungan Jalan, Bapak Untung Cahyadi, ST., MT. dan Bapak Redrik Irawan ST., MT., yang telah memberikan data dan informasi yang dimanfaatkan sebagai data untuk penelitian ini. Selanjutnya, penulis ingin mengucapkan terima kasih untuk Prof. Dr. Ir. Subyakto, M.Sc., atas bimbingan yang diberikan dalam penulisan naskah karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- 1Badan Standardisasi Nasional, 2005. RSNI T-02-2005 Standar pembebanan untuk jembatan. Jakarta: BSN. 75 hlm.
- 2Departemen Pekerjaan Umum, 2005. Pedoman No:04/BM/2005. Gambar standar pekerjaan jalan dan jembatan, volume dua. Jakarta: Departemen PU. 128 hlm.
- 3Badan Standardisasi Nasional, 2005. RSNI T-03-2005 standar perencanaan struktur baja untuk jembatan. Jakarta: BSN. 126 hlm.
- 4Nowak, A.S. dan Rakoczy, P., 2013. WIM-based live load for bridges. *KSCE Journal of Civil Engineering* 17(3): 568–574.
- 5Jacob, B. & Feypell-de La Beaumelle, V., 2010. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research* 34(1): 9–15.
- 6Cahyadi, U., 2011. Survey beban kendaraan metode WIM ruas Cikampek-Pamanukan. Laporan Penelitian, Puslitbang Jalan dan Jembatan. Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum.
- 7Nugraha, W., 2015. Evaluasi pembebanan jembatan jalan raya dengan pendekatan probabilitas menggunakan hasil pengukuran beban kendaraan bergerak / WIM (Weigh-In-Motion). Tesis, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- 8American Association of State Highway Transportation Officials, 2012. AASHTO LRFD bridge design specifications 6th edition, section 3. Washington DC: AASHTO.
- 9Ang, A.H-S. dan Tang, W.H., 1984. Probability concepts in engineering planning and design volume II - Decision, risk, and reliability. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- 10Harrison, Robert L. 2010. Introduction to Monte Carlo simulation. AIP conference proceedings 1204: 17–21.
- 11MetroCount., 2009. Euro13 MTE user manual – Classification schemes 3.21. (<http://mtehelp.tech-metrocount.com/article.aspx?id=DB974BB681.pdf>, diakses 7 Januari 2015).