

Evaluasi Pembebanan Jembatan Box Girder Beton Prategang dengan Pendekatan Probabilitas Menggunakan Hasil Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak

AMATULHAY PRIBADI¹, INDRA DJATI SIDI²

1. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional, Jl. PKH. Mustopha No.23, Bandung 40124, Indonesia
2. Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132, Indonesia
Email: amatulhayp@gmail.com

ABSTRAK

Perancangan dari jembatan membutuhkan konsep dasar perancangan struktur yang mencakup keamanan dan utilitas. Oleh karena itu, perlu adanya evaluasi terhadap peraturan pembebanan yaitu SNI 1725:2016, berdasarkan pengukuran beban aktual kendaraan dalam kendaraan bergerak. Data beban kendaraan (WIM) yang diperoleh dari Puslitbang Jalan dan Jembatan diolah secara probabilistik dan statistik dengan bantuan software Microsoft Excel dan EasyFit 5.5 untuk memperoleh kombinasi beban maksimum pada struktur jembatan beton prategang box girder dengan total panjang 160 m dan lebar 9 m yang dimodelkan dengan software Midas Civil 2011. Dari hasil analisis struktur diperoleh bahwa gaya dalam momen lentur maksimum akibat beban nominal standar dalam SNI 1725:2016 sebesar 29.768,24 kNm, lebih tinggi dibanding momen lentur maksimum akibat kombinasi beban terukur WIM yaitu 24.443 kNm. Sebaran momen lentur akibat beban kendaraan hasil pengukuran WIM mengikuti distribusi lognormal. Kemungkinan momen lentur maksimum akibat beban SNI terlampaui adalah 0,00139%. Indeks reliabilitas dari struktur jembatan terhadap beban hasil pengukuran WIM yaitu 4,30 yang terjadi pada girder bagian lapangan serat bawah. Resiko kegagalan yang diperoleh yaitu $P_F = 8,577 \times 10^{-6}$. Hal ini menunjukkan bahwa struktur jembatan telah didesain secara konservatif karena memiliki resiko kegagalan yang lebih kecil dari target reliabilitas $\beta = 3,50$ atau 3,72.

Kata kunci: jembatan, beton prategang, standar pembebanan kendaraan, WIM, probabilitas

ABSTRACT

Bridge requires basic concept of structural design which includes security and utilities. To ensure those requirements, an evaluation of the load regulation standards, SNI 1725:2016, based on actual vehicular moving load is needed in order to know whether the quantity of the load is too conservative or not. The vehicular load data (WIM) which obtained from Puslitbang Jalan dan Jembatan is

processed probabilistic and statistically using Microsoft Excel and EasyFit 5.5 to obtain the maximum load combination on the structure of prestressed concrete box girder bridge with a total length of 160 m and a width of 9 m which was modeled using Midas Civil 2011. The analysis result showed that the maximum bending moment due to standard nominal load of SNI 1725:2016 is 29,768.24 kNm, higher than the maximum bending moment due to the combination of the measured load (WIM) which is 24,443 kNm. The distribution of bending moment due to measured vehicular load (WIM) is lognormal. The maximum bending moment due to standard nominal vehicular load (SNI) has probability of exceedance of 0.00139%. Reliability index of the bridge structure to the load measurement (WIM) is 4,3 which occurred in the bottom fiber of mid-span girder. The risk of failure obtained by $P_F = 8.577 \times 10^{-6}$. This indicates that bridge structure has been designed conservatively because the risk of failure is lower than the reliability target $\beta = 3.50$ or 3.72 .

Keywords: *bridge, prestressed concrete, vehicular load standard, WIM, probability*

1. PENDAHULUAN

Jembatan adalah suatu konstruksi yang sangat dibutuhkan dan perancangannya membutuhkan konsep dasar yang mencakup keamanan dan utilitas. Untuk menjamin hal tersebut, perlu adanya pendefinisian beban-beban yang bekerja pada jembatan sesuai dengan standar dan peraturan yang berlaku di Indonesia yaitu SNI 1725:2016. Beban yang ada pada jembatan yaitu beban dari kendaraan, beban gempa, serta beban akibat material dan metode konstruksi dari jembatan *box girder* ini. Beban kendaraan standar ini merupakan idealisasi terhadap kondisi beban kendaraan yang sesungguhnya dipikul jembatan sehingga nilainya cukup besar.

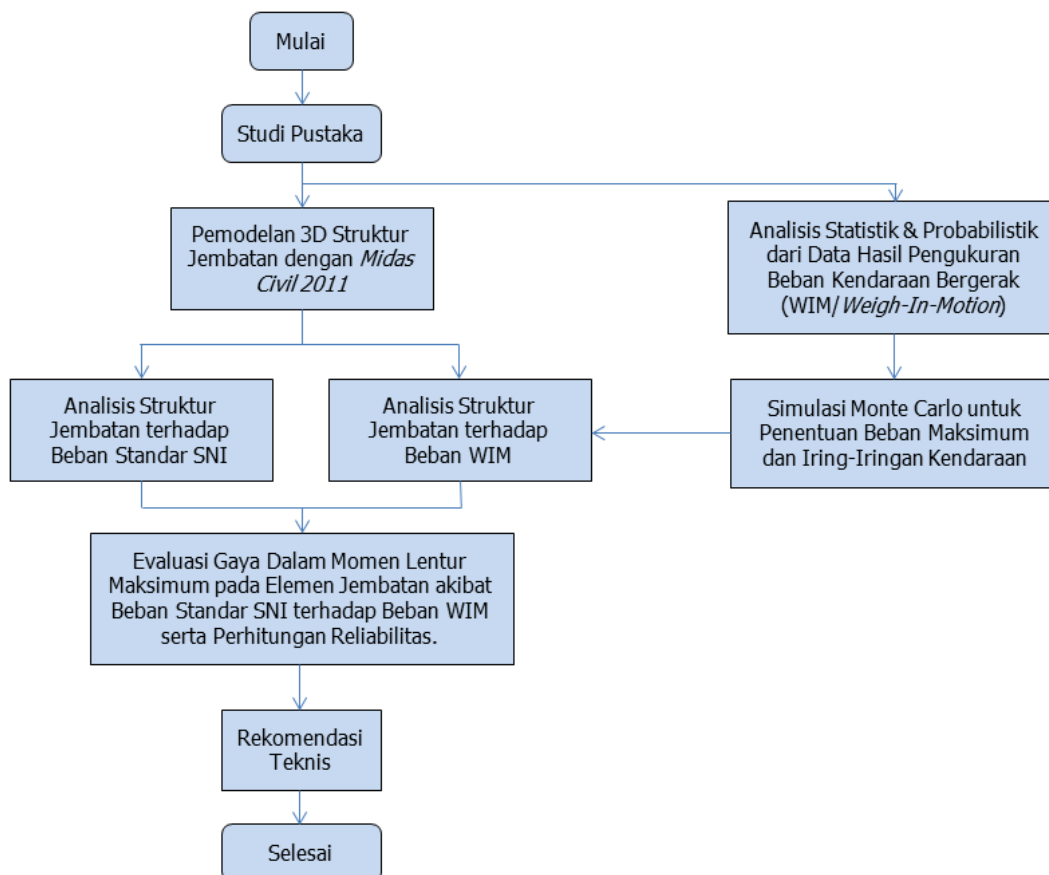
Evaluasi terhadap peraturan pembebanan SNI 1725:2016 berdasarkan pengukuran beban aktual kendaraan dalam keadaan bergerak perlu dilakukan untuk mengetahui apakah besaran beban tersebut terlalu konservatif atau tidak. Hasil dari pengukuran beban aktual lalu lintas kendaraan / WIM (*Weigh-In-Motion*) dapat diolah secara probabilistik untuk dijadikan dasar untuk mengevaluasi pembebanan jembatan yang ada di Indonesia. Sebelumnya evaluasi ini sudah pernah dilakukan untuk jembatan beton bertulang bentang 25 meter (Nugraha, 2015). Namun hasil tersebut masih sangat terbatas dan belum dapat ditarik secara umum untuk lingkup yang lebih luas. Perlu adanya penelitian-penelitian lain yang lebih luas baik dari data bebannya maupun data tahanan elemen struktur jembatan.

Oleh karena itu, untuk memperoleh keakuratan dari standar dan peraturan pembebanan jembatan SNI 1725:2016 yang sifatnya lebih luas, maka pada penelitian ini akan dilakukan kajian evaluasi pembebanan menggunakan hasil pengukuran beban kendaraan bergerak dengan data tahanan yang berbeda yaitu dengan menggunakan jembatan tipe *box girder* beton prategang bentang panjang.

2. METODOLOGI

Untuk mencapai tujuan, metode yang digunakan dibagi menjadi beberapa tahap yang dirangkum dalam **Gambar 1**.

- a. Pengumpulan data dari hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum. Data yang yang diperoleh yaitu pada jalur Pantai Utara Pulau Jawa, tepatnya di Cikampek, Pamanukan, Jawa Barat. Pembagian jenis kendaraan yang digunakan oleh alat pengukur Marksman 660 – WIM System mengacu pada EURO13 yang membagi menjadi 13 jenis kendaraan standar Eropa.



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

- b. Pengolahan data beban dilakukan secara probabilistik dan statistik dengan bantuan *software* Microsoft Excel dan EasyFit 5.5. Pada penelitian ini dicari kombinasi beban yang memiliki kemungkinan terbesar memberikan gaya dalam momen lentur maksimum pada elemen struktur jembatan. Pada pengolahan data ini akan dihitung besaran statistik dari tiap kelas kendaraan seperti nilai maksimum, minimum, rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi. Untuk penentuan besaran beban perlu ditentukan pula fungsi distribusi yang mewakili sebaran data.
- c. Pemodelan struktur jembatan 3 dimensi dengan bantuan *software* Midas Civil 2011. Struktur yang digunakan yaitu jembatan box girder dengan total bentang 160 m.
- d. Pemberian beban kombinasi kendaraan pada model jembatan dilakukan berdasarkan kombinasi maksimum yang diperoleh dari hasil analisis statistika dan probabilitas serta simulasi Monte Carlo. Jembatan dibebani penuh sepanjang bentang model jembatan yang menggambarkan kondisi macet. Dari 11 kelas kendaraan, ditentukan kombinasi

- yang mewakili per kelas berdasarkan hasil simulasi Monte Carlo dengan besaran beban kendaraan yang sudah didapat dari hasil analisis statistika dan probabilitas sebelumnya.
- e. Evaluasi dengan membandingkan besaran gaya dalam momen lentur maksimum pada elemen struktur jembatan *box girder* yang ditinjau antara pembebanan akibat kombinasi beban hasil pengukuran beban kendaraan bergerak (WIM) terhadap pembebanan akibat besaran beban standar pada SNI 1725:2016. Setelah itu dilakukan perhitungan indeks reliabilitas pada kasus ini.
 - f. Penyusunan rekomendasi teknis yang membahas besaran beban hasil pengukuran beban kendaraan bergerak (WIM) dalam penelitian ini terhadap besaran beban standar dalam peraturan pembebanan jembatan SNI 1725:2016 berdasarkan target reliabilitas.

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengolahan dan Analisis Data WIM

Berdasarkan pengolahan data awal pengukuran *Weigh-In-Motion* (WIM), dapat diperoleh hasil berupa nilai rata-rata, nilai maksimum, nilai minimum, standar deviasi, dan kovariansi dari berat sumbu dan total kendaraan, serta jumlah kendaraan dari masing-masing kelas kendaraan berat.

Analisis frekuensi dilakukan untuk data berat sumbu dari tiap kelas kendaraan. Langkah dari analisis pengolahan data yaitu dengan menggunakan *software* MS Excel dan Easyfit. Dari hasil pengolahan diperoleh data sifat statistik, PDF, atau histogram, dan *distribution fitting* dari data berat sumbu kendaraan per kelas. Hasil *distribution fitting* WIM per kelas kendaraan dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Dengan metode simulasi Monte Carlo, yaitu metode pengambilan sampel menggunakan parameter distribusi yang telah dipilih, akan diperoleh berat sumbu yang akan dikonversi menjadi beban roda yang akan dijadikan sebagai beban titik pada analisis struktur jembatan pada analisis selanjutnya. Untuk tetap menjaga korelasi antara sumbu 1 dan sumbu 2, nilai *pseudorandom* berupa *cumulative density* (CDF) yang dihasilkan dari simulasi Monte Carlo pada sumbu 1 akan digunakan untuk memperoleh besaran beban *pseudorandom* untuk sumbu 2 dan selanjutnya.

Tabel 1. Hasil *Distribution Fitting* WIM per Kelas Kendaraan

Kelas	Sumbu	<i>Distribution Fitting</i>
2	1	Lognormal (3P)
	2	Lognormal (3P)
3	1	Lognormal (3P)
	2	Generalized Gamma (4P)
	3	Generalized Gamma (4P)
4	1	Normal
	2	Lognormal (3P)
	3	Generalized Gamma (4P)
	4	Generalized Gamma (4P)
5	1	Normal
	2	Generalized Gamma (4P)
	3	Generalized Gamma (4P)
	4	Generalized Gamma (4P)
6	1	Lognormal (3P)

Tabel 1. Hasil *Distribution Fitting* WIM per Kelas Kendaraan lanjutan

Kelas	Sumbu	<i>Distribution Fitting</i>
6	2	Gamma
	3	Lognormal (3P)
	4	Lognormal (3P)
	5	Gamma
8	1	Log-gamma
	2	Lognormal (3P)
	3	Lognormal (3P)
	4	Generalized Gamma (4P)
9	1	Generalized Gamma (4P)
	2	Generalized Gamma (4P)
	3	Generalized Gamma (4P)
	4	Generalized Gamma (4P)
	5	Generalized Gamma (4P)
10	1	Lognormal (3P)
	2	Lognormal (3P)
	3	Gamma
	4	Generalized Gamma (4P)
	5	Generalized Gamma (4P)
11	1	Normal
	2	Normal
	3	Generalized Gamma (4P)
	4	Normal
	5	Generalized Gamma (4P)
	6	Generalized Gamma (4P)
12	1	Lognormal (3P)
	2	Lognormal (3P)

Simulasi Monte Carlo dilakukan dengan menggunakan parameter distribusi diskrit yang telah dipilih yaitu distribusi logaritmik dengan parameter θ . Hasil simulasi tersebut yaitu sejumlah *random number* diskrit yang berkaitan dengan urutan kelas kendaraan yang melewati jembatan dari distribusi yang telah dipilih.

Pengambilan jumlah kendaraan sebagai iring-iringan kendaraan dilakukan dengan batasan panjang bentang jembatan yaitu 160 meter. Apabila telah melebihi batasan, maka iring-iringan dipotong dan kendaraan dilanjutkan ke iringan berikutnya. Dalam simulasi kasus ini diambil asumsi jarak as paling belakang kendaraan satu dengan as paling depan kendaraan berikutnya sebesar 2 meter.

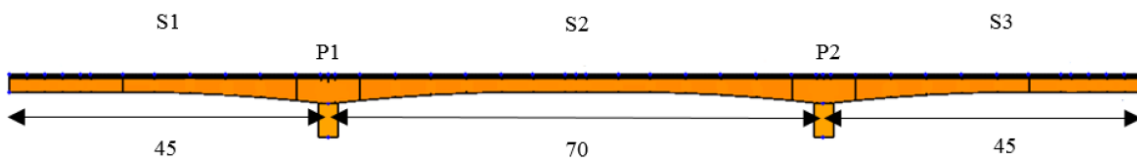
Pada penentuan iring-iringan ini digunakan sebanyak 500 sampel kendaraan yang terbagi menjadi 19 kombinasi iring-iringan. Sampel kelas kendaraan beserta frekuensi atau *density* dan *cumulative density* (CDF) dari masing-masing sampel beban akan diperoleh dengan memasukkan parameter dan jumlah sampel dalam fitur *Random Number* pada *software* Easyfit.

3.2 Pemodelan Struktur Jembatan Beton Prategang 160 m

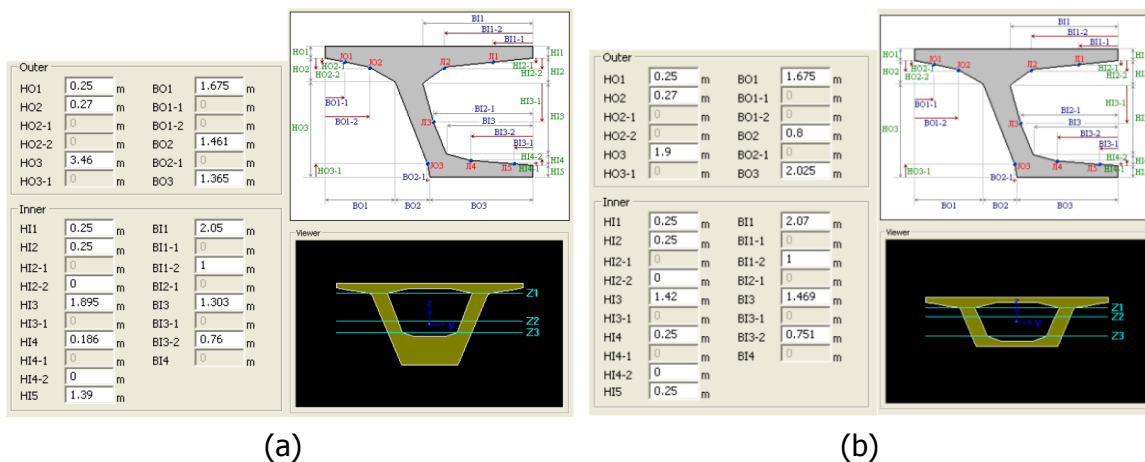
Pemodelan dari struktur jembatan pada proyek Jalan Layang Non-Tol Kuningan ini menggunakan *software* Midas Civil 2011. Perancangan struktur telah dilakukan sesuai pembebanan SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan dan SNI 2833:2016 Perancangan Jembatan terhadap Beban Gempa oleh Syavira Rahmadiani (2015) dalam buku Perancangan Jembatan Box Girder Beton Prategang dengan Metode *Full Shoring Cast-In-Situ*.

Jembatan yang akan digunakan untuk analisis ini merupakan jembatan beton prategang *box girder* dengan total panjang 160 m dan lebar 9 m yang berisi dua jalur untuk satu arah lalu lintas. Jembatan terdiri dari tiga bentang (*span*) dengan panjang 45 m pada bentang kiri kanan serta 70 m pada bentang tengahnya. Potongan memanjang serta dimensi profil struktur jembatan dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**. Jembatan dimodelkan sebagai balok menerus (*continuous beam*) di banyak tumpuan. Berikut merupakan jenis perletakan yang digunakan:

- Perletakan pada bentang luar S1 : rol.
- Perletakan pada pier 1 : sendi.
- Perletakan pada pier 2 : rol.



Gambar 2. Potongan memanjang model struktur jembatan beton prategang bentang 160 m



Gambar 3. Dimensi penampang pada: (a) tumpuan; dan (b) lapangan

Material struktur yang digunakan pada jembatan ini yaitu beton prategang untuk box girder dengan mutu f'_c 50 MPa dan modulus elastisitas (E) = 33.234 MPa, sedangkan beton biasa untuk pier digunakan mutu f'_c 30 MPa dan modulus elastisitas (E) = 25.743 MPa. Mutu yang digunakan untuk baja tulangan yaitu tegangan leleh (f_y) = 410 MPa dengan modulus elastisitas (E) = 200.000 MPa. Tendon yang digunakan pada jembatan ini yaitu strand baja berdiameter 15,24 mm sebanyak 22 buah untuk 1 tendon dengan mutu tegangan leleh (f_y) sebesar 1.676 MPa dan tegangan ultimit (f_u) 1.860 MPa. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan sumber (Rahmadiani, S., 2015), diperoleh jumlah tendon yang digunakan sebanyak 18 buah untuk bentang 1 dan 3 serta 34 buah untuk bentang 2.

3.3 Analisis Struktur

Untuk melakukan analisis struktur perlu dilakukan pendefinisian jenis, besaran, dan lokasi beban, serta menentukan kombinasi pembebanan. Setelah itu analisis dilakukan untuk memperoleh gaya dalam berupa momen lentur maksimum dan gaya aksial pada gelagar memanjang jembatan untuk setiap kombinasi.

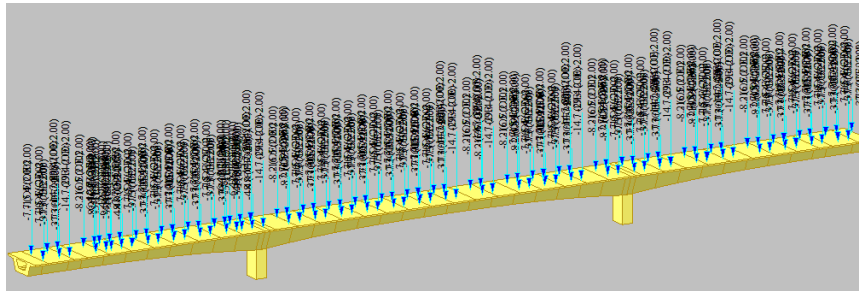
3.3.1 Pembebanan

Pembebanan yang berlaku pada model jembatan ini yaitu beban mati akibat berat sendiri struktur beton prategang dengan berat jenis nominal (γ) = 2.500 kg/m³ dan beban *superimposed dead load* (SIDL) akibat berat lapisan perkerasan setebal 100 mm dengan berat jenis nominal (γ) = 2.400 kg/m³. Selain itu terdapat beban hidup yang terdiri dari sampel beban kendaraan sesuai iring-iringan kendaraan yang telah ditentukan pada bab sebelumnya dengan variasi 1.000 sampel besaran beban yang berbeda untuk masing-masing kendaraan.

Tabel 2. Pembebanan Kombinasi Iring-Iringan ke-1

No.	Random Number	Kelas Kendaraan	Jarak Bersih As Depan As Belakang [m]	Posisi Sumbu 1 (arah x)	Kombinasi
1	1	2	3,00	0	
2	1	2	3,00	5,00	
3	1	2	3,00	10,00	
4	1	2	3,00	15,00	
5	2	12	5,00	20,00	
6	1	2	3,00	27,00	
7	2	12	5,00	32,00	
8	1	2	3,00	39,00	
9	1	2	3,00	44,00	
10	2	12	5,00	49,00	
11	1	2	3,00	56,00	
12	1	2	3,00	61,00	
13	2	12	5,00	66,00	
14	2	12	5,00	73,00	
15	1	2	3,00	80,00	1
16	1	2	3,00	85,00	
17	1	2	3,00	90,00	
18	1	2	3,00	95,00	
19	1	2	3,00	100,00	
20	1	2	3,00	105,00	
21	2	12	5,00	110,00	
22	3	3	3,00	117,00	
23	1	2	3,00	122,00	
24	1	2	3,00	127,00	
25	1	2	3,00	132,00	
26	1	2	3,00	137,00	
27	3	2	3,00	142,00	
28	2	3	3,00	147,00	
29	1	12	5,00	154,00	

Kombinasi iring-iringan yang terbentuk dari 500 sampel kendaraan yaitu sejumlah 19 kombinasi. **Tabel 2** merupakan pemisalan untuk kombinasi Iring-Iringan ke-1 yang terdiri dari kendaraan kelas 2, kelas 3, dan kelas 12 yang beriringan dalam satu bentang jembatan. Beban roda pada *box girder* diberikan sesuai lokasi masing-masing beban dengan asumsi jarak antar sumbu kendaraan yang berdekatan yaitu 2 meter. Dengan bantuan MCT Command Shell, dapat dimasukkan 1.000 sampel besaran beban untuk masing-masing sumbu pada kelas kendaraan yang ada pada posisi yang telah ditentukan tersebut. Tampak 3D dari pemberian pembebanan pada *software* Midas Civil dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Tampak 3D pembebanan kombinasi Iring-Iringan ke-1

Untuk keperluan evaluasi, maka diberikan pula pembebanan lalu lintas berdasarkan SNI 1725:2016 berupa beban lajur *D* dan beban truk *T*. Untuk jembatan bentang 160 m ini, sesuai SNI maka beban *T* sebesar beban truk standar dengan berat total 500 kN. Sedangkan untuk beban *D* yang terdiri dari beban tersebar merata (BTR) "*q*" yang digabung dengan beban garis (BGT) "*P*" dapat dihitung sebagai berikut:

a. Beban Garis Terpusat (BGT)

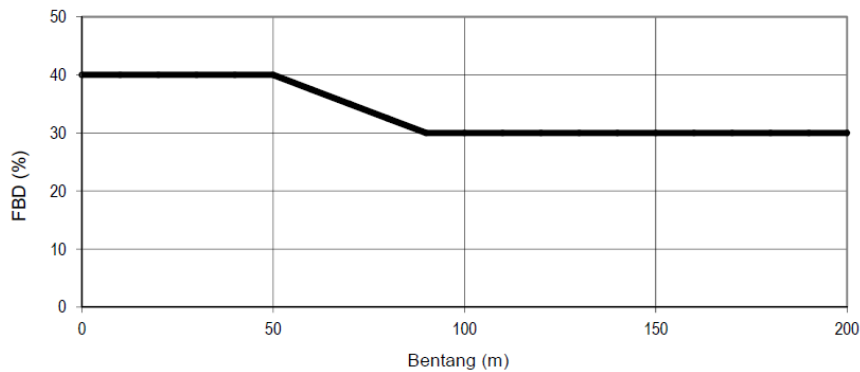
Berdasarkan SNI 1725:2016, besar BGT yaitu 49 kN/m yang harus dikalikan dengan faktor beban dinamis yang besarnya bergantung pada panjang pembebanan. Dari **Persamaan 1** dapat ditentukan panjang bentang ekuivalen untuk mencari faktor beban dinamis.

$$L_E = \sqrt{L_{max} \cdot L_{ave}} \quad \dots (1)$$

dengan:

L_{max} = panjang bentang terpanjang [m],

L_{ave} = panjang rata-rata ketiga bentang jembatan [m].



Gambar 5. Faktor beban dinamis untuk pembebanan lajur "D" (Sumber: SNI 1725:2016)

Faktor beban dinamis dapat dicari dengan menggunakan kurva yang ada pada **Gambar 5**. Setelah itu BGT dapat dihitung dengan **Persamaan 2** berikut.

$$BGT = 49 \text{ kN/m} \times FBD \times \text{lebar pembebanan} \quad \dots (2)$$

Hasil perhitungan BGT pada **Tabel 3** akan ditempatkan pada beberapa posisi berbeda dalam serangkaian kombinasi pembebanan untuk memperoleh gaya dalam terbesar dari struktur.

Tabel 3. Perhitungan BGT

BGT	
L_{max}	75 m
L_{ave}	53,33 m
L_E	63,25 m
FBD	0,36
Lebar	8 m
q	49 kN/m
q	531,4925 kN

b. Beban Terdistribusi Merata (BTR)

BTR memiliki intensitas yang dipengaruhi panjang total yang dibebani sesuai **Persamaan 3** dan **Persamaan 4** dengan L merupakan panjang total jembatan yang dibebani (meter).

- $L \leq 30 \text{ m}$:
 $q = 9 \text{ kPa} \quad \dots (3)$
- $L > 30 \text{ m}$:
 $q = 9 \times \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kPa} \quad \dots (4)$

Hasil perhitungan beban BTR dan rangkuman kombinasi pembebanan "D" dapat dilihat pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**. Pada **Gambar 6** dan **Gambar 7** ditampilkan pembebanan "D" dan "T" pada *software* Midas Civil.

Tabel 4. Perhitungan BTR

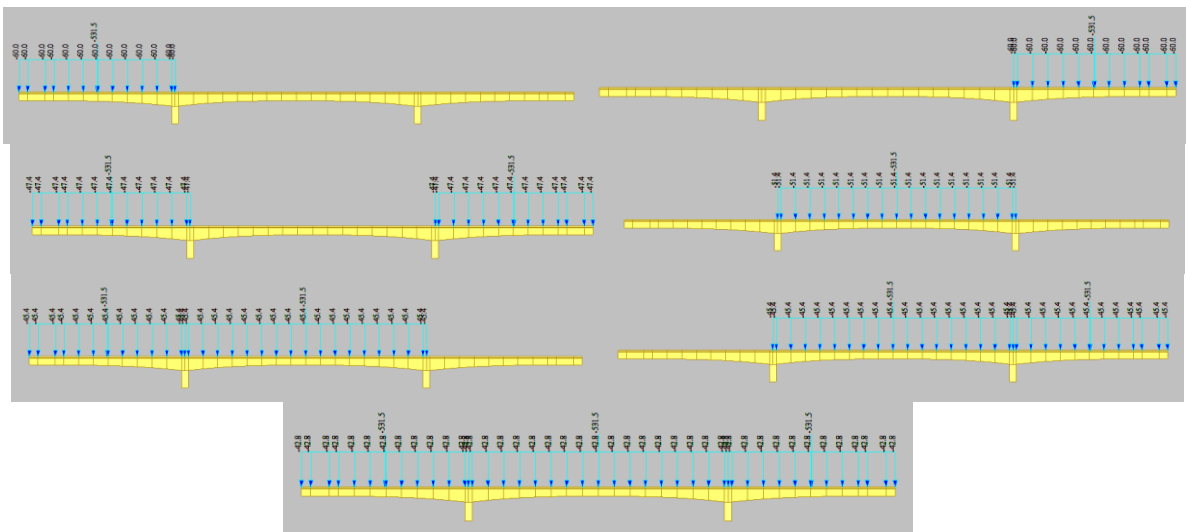
BTR	S1	S2	S1 dan S2	S1 dan S3	S1, S2, S3
$L \text{ [m]}$	45	70	115	95	160
$q \text{ [kPa]}$	7,5	6,429	5,674	5,921	5,344
$q \text{ [kN/m]}$	60	51,429	45,391	47,368	42,750

Tabel 5. Kombinasi Pembebanan "D"

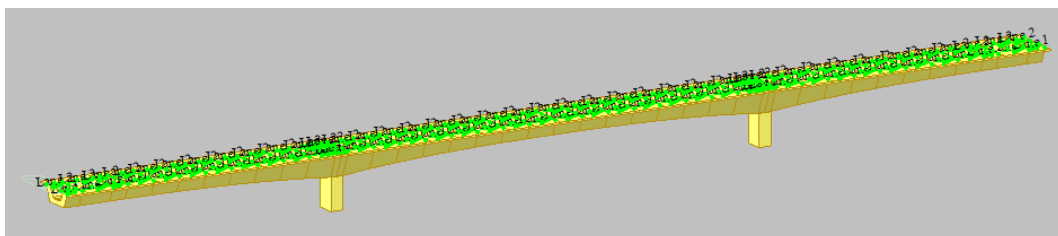
	<i>Span 1</i>	<i>Span 2</i>	<i>Span 3</i>
Combo 1	BGT	531,5	
	BTR	60	
Combo 2	BGT		531,5
	BTR		60
Combo 3	BGT	531,5	531,5
	BTR	47,4	47,4
Combo 4	BGT	531,5	

Tabel 5. Kombinasi Pembebanan "D" lanjutan

		<i>Span 1</i>	<i>Span 2</i>	<i>Span 3</i>
Combo 5	BTR		51,4	
	BGT	531,5	531,5	
	BTR	45,4	45,4	
Combo 6	BGT		531,5	531,5
	BTR		45,4	45,4
Combo 7	BGT	531,5	531,5	531,5
	BTR	42,75	42,75	42,75



Gambar 6. Kombinasi beban "D" Iring-Iringan ke-1 hingga Iring-Iringan ke-7



Gambar 7. Pembebanan "T" SNI 1725:2016

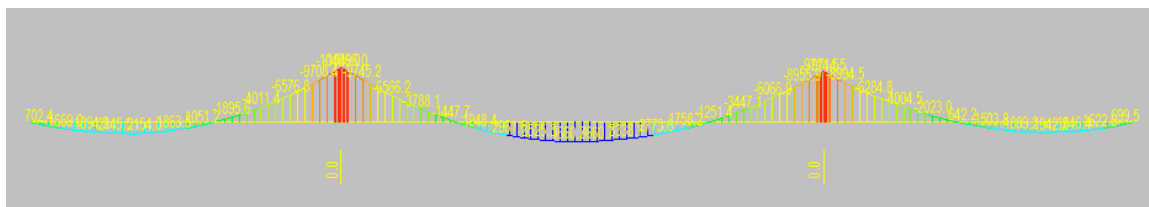
3.3.2 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan yang digunakan untuk beban dari SNI 1725:2016 yaitu mengacu pada pasal kombinasi pembebanan dalam SNI tersebut yaitu terdiri dari BGT dan BTR, beban "T", beban mati, dan beban *superimposed dead load* (SIDL) yang dianalisis masing-masing. Untuk beban lalu lintas yang digunakan yaitu beban yang memberikan gaya dalam momen lentur paling besar atau dapat dikombinasikan secara *envelope*.

Sedangkan kombinasi pembebanan yang digunakan untuk iring-iringan kendaraan berdasarkan sampel beban kendaraan bergerak (WIM) yaitu kombinasi superposisi untuk satu jenis beban untuk iring-iringan kendaraan tersebut. Oleh karena itu dalam satu kali analisis iring-iringan kendaraan ini terdapat 1.000 buah kombinasi yang menunjukkan jumlah sampel besaran beban.

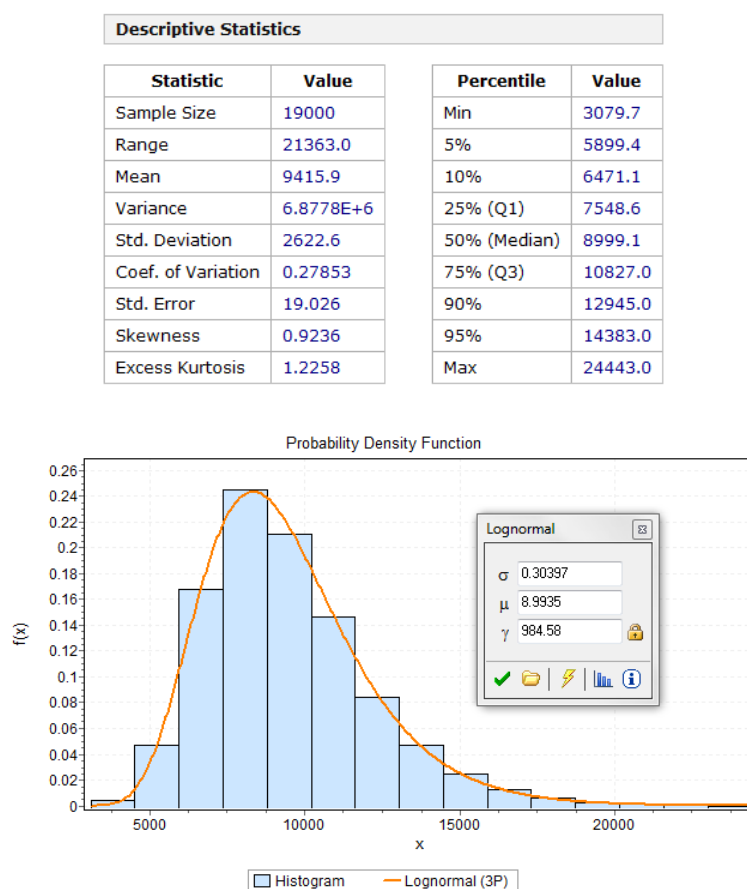
3.3.3 Respon Struktur

Berdasarkan analisis struktur yang telah dilakukan, akan diperoleh respon struktur berupa momen lentur pada gelagar beton memanjang. Untuk sampel beban hidup berdasarkan hasil pengukuran beban kendaraan bergerak (WIM), akan diambil satu nilai sampel beban (satu kombinasi) dari seluruh gelagar memanjang. Salah satu contoh output diagram momen secara visual untuk beban lalu lintas terukur WIM untuk kombinasi Iring-Iringan ke-1 dapat dilihat pada **Gambar 8** berikut.



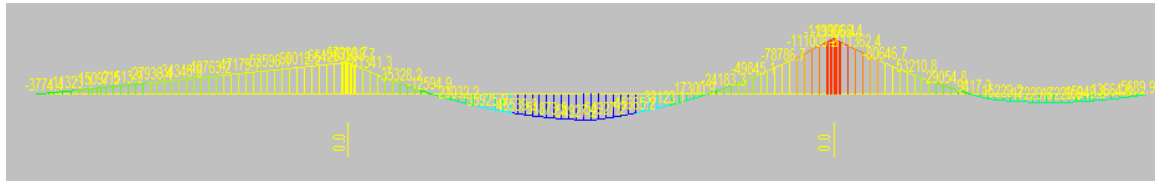
Gambar 8. Respon struktur akibat beban lalu lintas terukur WIM untuk kombinasi Iring-Iringan ke-1: momen lentur gelagar

Jumlah keluaran momen lentur maksimum gelagar yang akan diperoleh yaitu 1.000 data. Sebaran data ini akan digabung dengan 18 jenis iring-iringan lain sehingga akhirnya akan diperoleh 19.000 data momen lentur maksimum yang akan digunakan untuk analisis selanjutnya. Hasil sebaran data keluaran momen lentur maksimum *box girder* beton prategang untuk jembatan 160 meter akibat beban lalu lintas terukur WIM dapat dilihat pada **Gambar 9** berikut.

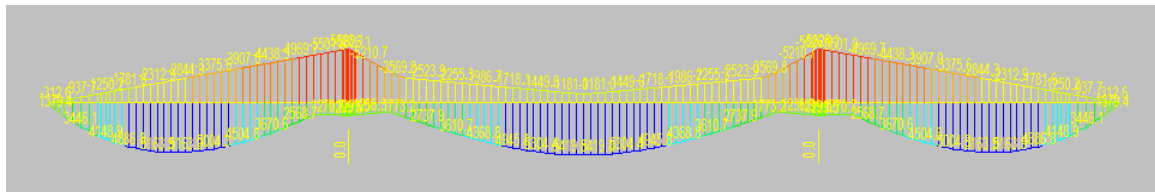


Gambar 9. Data statistik, histogram, dan *distribution fitting* terhadap data momen lentur gelagar akibat beban lalu lintas terukur WIM: lognormal

Untuk pembebanan lalu lintas berdasarkan SNI 1725:2016, hasil respon momen lentur serta rangkuman gaya momen lentur maksimum terhadap beban "D" dan beban "T" dapat dilihat pada **Gambar 10** dan **Tabel 6** berikut.



(a)



(b)

Gambar 10. Diagram momen lentur pada gelagar akibat: (a) Beban "D"; dan (b) Beban "T"

Tabel 6. Momen Lentur Gelagar akibat Beban Lalu Lintas dan Pejalan Kaki Sesuai SNI 1725:2016

Beban	M_y [kNm]
D	29.768,24
T	5.626,92
Maks SNI	29.768,24

3.4 Evaluasi Pembebanan Jembatan

Respon momen lentur maksimum untuk pembebanan jembatan bentang 160 meter ini akibat beban lalu lintas berdasarkan SNI 1725:2016 sebesar 29.768,24 kNm dengan nilai *cumulative density* (CDF) sebesar 0,999986 dan nilai peluang terlampaui (1-F(x)) sebesar 0,00139%, yang diperoleh akibat beban D yaitu kombinasi pembebanan ke-5 dan ke-6 seperti tertera pada **Tabel 7** di bawah. Apabila mengacu pada sebaran data momen lentur maksimum akibat beban lalu lintas berdasarkan hasil pengukuran beban kendaraan bergerak (WIM), besaran momen lentur akibat beban hidup tersebut berada di atas nilai maksimum yang terjadi akibat salah satu variasi dalam Iring-Iringan ke-5 yaitu 24.443 kNm.

Tabel 7. Perhitungan Peluang Momen Lentur Maksimum Terlampaui

Beban	M_y [kNm]	CDF (F(x))	1-F(x)
D	29.768,24		
T	5.626,92		
Maks SNI	29.768,24	0,999986	0,00139%

Apabila dihitung peluang momen lentur maksimum akibat beban lalu lintas berdasarkan SNI 1725:2016 terlampaui berdasarkan distribusi momen lentur maksimum akibat beban lalu

lintas berdasarkan hasil pengukuran WIM, diperoleh hasil $1,39 \times 10^{-5}$ atau dapat dinyatakan momen nominal lentur akibat beban lalu lintas berdasarkan SNI 1725:2016 adalah 0,001% *upper tile*. Hasil ini menunjukkan bahwa SNI 1725:2016 secara umum sudah bersifat konservatif karena biasanya beban hidup nominal diambil sebagai 5% *upper tile* dari sebaran datanya. Apabila kombinasi beban terbesar yaitu saat jembatan dipenuhi oleh kelas kendaraan 9 saja yang diperhitungkan, hasil yang diperoleh akan berbeda. Begitu juga apabila beban kendaraan hanya berada di bentang 1 dan 2 (tidak penuh seluruh bentang), hasil gaya dalam momen lentur menjadi lebih tinggi namun masih lebih kecil dibandingkan gaya dalam akibat beban standar.

3.5 Perhitungan Indeks Reliabilitas

Dalam perhitungan indeks reliabilitas *box girder*, variabel f'_c serta beban mati diasumsikan berdistribusi normal, sedangkan variabel prategang dan beban hidup berdistribusi lognormal. Selain itu kehilangan tegangan pada prategang divariasikan menjadi 10, 15, 20, dan 25%. Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan indeks reliabilitas berdasarkan Ang, A., & Tang, W. (1984) untuk bagian tumpuan serat bawah dengan kehilangan tegangan 20% sesuai **Persamaan 5.a**. Persamaan *performance function* untuk gelagar dibagi menjadi dua yaitu untuk serat atas dan serat bawah dengan **Persamaan 5.b hingga Persamaan 5.e** berikut.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_D - \mu_L}{\sqrt{(\sigma_R)^2 + (\sigma_D)^2 + (\sigma_L)^2}} \quad \dots (5.a)$$

dengan:

μ_R, σ_R = nilai rata-rata dan standar variasi variabel tahanan (R),

μ_D, σ_D = nilai rata-rata dan standar variasi variabel beban mati (D),

μ_L, σ_L = nilai rata-rata dan standar variasi variabel beban hidup (L).

$$\sigma_{izin} - \sigma_{top/bottom} \geq 0 \quad \dots (5.b)$$

$$\sigma_{izin} = -0,6f'_c \text{ untuk tekan} \quad \dots (5.c)$$

$$\sigma_{izin} = 0,5\sqrt{f'_c} \text{ untuk tarik} \quad \dots (5.d)$$

$$\sigma_{top/bottom} = -\frac{P_{PS} \times (1 - \% \text{ Loss})}{A} \pm \frac{P_{PS} \times (1 - \% \text{ Loss}) \cdot e \cdot z}{I} \pm \frac{M_{DL} \cdot z}{I} \pm \frac{M_{LL} \cdot z}{I} \pm \frac{P_{DL}}{A} \pm \frac{P_{LL}}{A} \quad \dots (5.e)$$

dengan:

A = luas penampang [mm^2],

I = momen inersia penampang [mm^4],

e = eksentrisitas penampang [mm],

z_{top} = letak titik berat dari atas penampang [mm],

z_{bottom} = letak titik berat dari bawah penampang [mm],

f'_c = mutu beton [MPa],

M_{DL} = momen lentur akibat beban *dead load* [Nmm],

P_{DL} = gaya aksial akibat beban *dead load* [N],

P_{PS} = gaya aksial akibat beban *prestress* [N],

M_{LL} = momen lentur akibat beban *live load* [Nmm],

P_{LL} = gaya aksial akibat beban *live load* [N].

Tabel 8. Resume Perhitungan Indeks Reliabilitas β

% Loss of Prestress	β			
	Tumpuan		Lapangan	
	Serat Atas	Serat Bawah	Serat Atas	Serat Bawah
10	5,84	5,44	8,72	5,58
15	5,44	5,40	8,57	5,22
20	5,00	5,36	8,43	4,80
25	4,49	5,32	8,28	4,30

Dari **Tabel 8** hasil perhitungan target reliabilitas β , diperoleh nilai β paling rendah yaitu 4,30. Berdasarkan nilai β tersebut, peluang kegagalan dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 6** berikut.

$$P_F = 1 - \phi(\beta) = 8,933 \times 10^{-6} \quad \dots (6)$$

Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh bahwa hasil indeks reliabilitas β melebihi target reliabilitas β untuk AASHTO yang juga diacu SNI 1725:2016 yaitu 3.5 sedangkan β yang diajukan Nowak, A. S., (2007) yaitu 3.72. Hal ini dapat menunjukkan bahwa kondisi jembatan memiliki resiko kegagalan yang lebih kecil dari target dan dapat disimpulkan untuk lingkup penelitian ini bahwa peraturan SNI 1725:2016 bersifat cukup aman dan beban nominal yang diberikan terlalu besar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- Gaya dalam berupa momen lentur maksimum pada *box girder* bentang 160 m yang diakibatkan oleh beban nominal standar dalam peraturan SNI 1725:2016 adalah 29.768,24 kNm yang nilainya lebih tinggi dari nilai maksimum dari sebaran momen lentur maksimum akibat kombinasi beban terukur WIM di Jalur Pantura Cikampek Pamanukan yaitu 24.443 kNm. Distribusi dari momen lentur maksimum akibat kombinasi beban terukur WIM diperoleh mengikuti distribusi lognormal. Kemungkinan momen lentur maksimum akibat beban nominal standar SNI 1725:2016 terlampaui adalah $1,39 \times 10^{-5}$. Rasio momen lentur nominal terhadap momen lentur rata-rata akibat beban terukur WIM pada kombinasi ini adalah 3,162. Sedangkan rasio momen lentur nominal terhadap momen lentur rata-rata akibat beban kelas kendaraan 9 adalah 1,464.
- Indeks reliabilitas β dari struktur jembatan *box girder* 160 m ini terhadap beban hasil pengukuran WIM adalah 4,30 yang terjadi pada girder bagian lapangan serat atas. Resiko kegagalan yang diperoleh yaitu $P_F = 8,577 \times 10^{-6}$. Nilai yang diperoleh ini lebih tinggi dari target reliabilitas peraturan AASHTO LRFD Bridge Design Code yaitu = 3,50 maupun rekomendasi target reliabilitas = 3,72 atau setara dengan resiko kegagalan sekitar $P_F = 10^{-4}$ dari Nowak, A. S., (2007). Berdasarkan hasil ini dapat disimpulkan bahwa struktur jembatan telah didesain secara konservatif dan dapat dikatakan boros karena memiliki resiko kegagalan yang lebih kecil dibandingkan target.

DAFTAR RUJUKAN

Ang, A., & Tang, W. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design Volume II – Decision, Risk, and Reliability*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Evaluasi Pembebanan Jembatan Box Girder Beton Prategang dengan Pendekatan Probabilitas
Menggunakan Hasil Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak

- Nowak, A. (2007). *Calibration of LRFD Bridge Design Guide*. Washington D.C.: Transportation Research Board.
- Nugraha, W. (2015). *Tesis: Evaluasi Pembebanan Jembatan dengan Pendekatan Probabilitas menggunakan Hasil Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak / WIM (Weigh-In-Motion)*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Rahmadiani, S. (2015). *Skripsi: Perancangan Jembatan Box Girder Beton Prategang dengan Metode Full Shoring Cast-In-Situ*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Standar Nasional Indonesia. (2016). *Pembebanan untuk Jembatan (SNI 1725:2016)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.