

EVALUASI UMUR FATIK ELEMEN BAJA JEMBATAN STANDAR TIPE KOMPOSIT MENGGUNAKAN DATA WIM (*FATIGUE LIFETIME EVALUATION OF COMPOSITE STANDARD BRIDGE STEEL ELEMENT USING WIM DATA*)

Widi Nugraha

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264 Bandung 40294
e-mail: widi.nugraha@pusjatan.pu.go.id
Diterima: 16 April 2017; direvisi: 31 Mei 2017; disetujui: 6 Juni 2017

ABSTRAK

Jembatan adalah infrastruktur yang mengalami beban yang bersifat dinamis dan berulang. Efek dari sifat beban ini pada elemen jembatan khususnya elemen baja pada Jembatan tipe komposit adalah terjadinya siklus tegangan kemudian relaksasi secara berulang seiring kendaraan melintas selama masa layan jembatan, yang dapat berakibat pada kegagalan fatik. Jembatan komposit yang direncanakan berdasarkan standar pembebanan jembatan SNI 1725:2016 dimana kondisi fatik ini dapat dievaluasi terhadap tahanan fatik nominal selama masa layan. Tujuan dari penulisan ini adalah mengevaluasi umur fatik struktur jembatan standar Bina Marga tipe komposit terhadap akumulasi kendaraan proyeksi hasil pengukuran beban kendaraan bergerak (WIM) di Ruas Jalan Pantura, Cikampek – Pamanukan, Jawa Barat pada tahun 2011 dan di Ruas Jalan Tol Jakarta-Tangerang, DKI Jakarta pada tahun 2016 yang menggambarkan kondisi beban dan lalu lintas terberat di ruas jalan nasional dan ruas jalan tol. Evaluasi ini dilakukan dengan analisis struktur terhadap beban kendaraan bergerak WIM dengan luaran rentang tegangan dan siklus kejadiannya, dan kemudian dibandingkan dengan kurva siklus rentang tegangan / stress range cycles- number curve (S-N curve) tahanan fatik nominalnya. Metode evaluasi fatik dengan metode S-N curve ini mengacu pada SNI dan AASHTO. Hasil evaluasi umur fatik menunjukkan bahwa dalam masa layan rencana 50 tahun, jembatan tipe komposit ini memiliki tahanan fatik nominal pada S-N curve yang belum terlampaui dan diproyeksikan akan tercapai umur fatik pada 63 tahun untuk ruas jalan Cikampek-Pamanukan dan pada 55 tahun untuk ruas jalan tol Jakarta-Tangerang.

Kata Kunci: fatik, jembatan komposit, beban kendaraan, beban bergerak, S-N curve

ABSTRACT

Bridge is an infrastructure that withstands dynamic and repetitive loading. The effect of this loading on the bridge element, especially steel girder on Composite Girder Bridge type, there is repetitive occurrence of stress and relaxation due to vehicle loading in service life that can make the bridge failed due to fatigue. This fatigue condition can be evaluated to nominal fatigue resistance in service life, based on SNI 1725:2016, an Indonesian bridge loading standard. The purpose of this research is to evaluate the fatigue lifetime of a 25 m simple span composite bridge structure due to projection of accumulated vehicle load from WIM vehicular loads measurement in Pantura highway of Cikampek-Pamanukan, West Java in 2011 and toll road of Jakarta-Tangerang, Jakarta in 2016 which has the most heavy traffic in National road links and toll roads. This evaluation was conducted by using stress range-number of cycles from structural analysis of accumulated WIM vehicular load, and compared to nominal fatigue resistances using stress range cycles-number curve (S-N curve). Evaluation method of fatigue with S-N curve method are specified in SNI and AASHTO. Evaluation results indicated that the fatigue limit of 50 year lifetime services on S-N curve which has not been surpassed and projected, the fatigue lifetime of the bridge would be on the 63rd year for Cikampek-Pamanukan road and 55th year for Jakarta-Tangerang toll road.

Keywords: fatigue, composite bridge, vehicular load, weigh in motion, S-N curve

PENDAHULUAN

Struktur jembatan untuk lalu lintas kendaraan adalah tipe struktur yang mengalami beban yang sifatnya dinamis dan berulang. Beban kendaraan yang melintasi jembatan memberikan efek beban pada elemen jembatan berupa tegangan kemudian relaksasi ketika kendaraan telah melintas dan kemudian timbul tegangan kembali saat ada kendaraan selanjutnya yang melintas dan relaksasi setelah kendaraan tersebut telah melintas, dan seterusnya selama masa layan jembatan. Masa layan jembatan ditentukan pada tahapan perencanaan struktur jembatan yang pada umumnya mengacu pada peraturan atau standar perencanaan yang berlaku. Di Indonesia, masa layan jembatan biasa direncanakan untuk 50 tahun, mengacu pada standar pembebanan jembatan di Indonesia, yaitu SNI 1725:2016 (BSN 2016). Jembatan biasa yang direncanakan secara tipikal di Indonesia adalah jembatan standar Bina Marga, yang mengacu Pedoman gambar standar pekerjaan jalan dan jembatan, (Indonesia 2005) terdiri dari beberapa desain tipe jembatan tipikal dengan panjang bentang yang bervariasi.

Dari beberapa tipe jembatan standar, salah satu tipe jembatan standar yang banyak diterapkan di Indonesia adalah tipe jembatan gelagar baja komposit. Dalam *database* jembatan nasional Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian PUPR tahun 2015, jumlah jembatan tipe gelagar baja komposit adalah 2.387 jembatan dari total 18.022 jembatan, atau 13,24 % dari seluruh tipe jembatan yang ada (DJBM 2015), sehingga tipe jembatan ini dipilih untuk dievaluasi dalam penelitian ini. Jembatan tipe komposit ini menggunakan elemen struktur baja berupa gelagar *I-Wide Flange (IWF)* yang dikombinasikan dengan pelat lantai beton sehingga berperilaku sebagai satu kesatuan penampang, yaitu aksi komposit antara penampang baja *IWF* dan pelat beton di atasnya.

Elemen struktur baja pada umumnya memiliki kerentanan terhadap beban dinamis dan berulang, yang dapat menyebabkan kegagalan fatik. Kegagalan tipe fatik dapat terjadi pada kondisi pembebanan berulang (*loading-unloading*), khususnya pada bagian yang mengalami tarik, walaupun tegangan penampang masih di bawah tegangan lelehnya (Salmon, Johnson, and Malh 2009). Tahanan

penampang terhadap kondisi fatik ditentukan oleh tiga variabel, yaitu (1) jumlah siklus pembebanan, (2) rentang tegangan akibat beban pada kondisi layan yang didefinisikan sebagai selisih antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum yang terjadi, (3) ukuran awal dari sebuah kerusakan, yang didefinisikan sebagai diskontinuitas pada elemen, seperti retak yang sangat kecil atau sambungan las antara dua elemen baja (Salmon, Johnson, and Malh 2009).

Untuk mendapatkan jumlah siklus pembebanan dan rentang tegangan akibat beban pada masa layan, dapat dengan melakukan survey lalu lintas dan pengukuran beban kendaraan. Salah satu metode terbaru untuk pengukuran beban kendaraan dan perhitungan jumlah kendaraan adalah metode pengukuran beban kendaraan bergerak / *Weigh-in-Motion (WIM)*. Metode *WIM* ini adalah metode mengukur beban kendaraan secara aktual yang lebih efisien, memungkinkan kendaraan dapat tetap melaju sesuai kecepatan lalu lintas tanpa adanya gangguan selama pengukuran dengan *WIM* dilakukan (Jacob and La Beaumelle 2010).

Teknologi *WIM* di Indonesia salah satunya tengah dikembangkan oleh Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dalam beberapa tahun terakhir. Teknologi *WIM* ini telah dimanfaatkan untuk mengukur beban kendaraan pada beberapa ruas jalan nasional di Indonesia, salah satunya ruas jalan nasional Cikampek – Pamanukan pada tahun 2011 (Pusjatan 2011). Selain itu, teknologi *WIM* ini juga telah digunakan dalam kebutuhan pengumpulan data untuk operasional dan pemeliharaan infrastruktur jalan dan jembatan di jalan tol, salah satunya di ruas jalan Tol Jakarta Tangerang pada tahun 2016 (Pusjatan 2016).

Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan evaluasi reliabilitas jembatan standar Bina Marga kelas A dengan panjang bentang 25 m tipe gelagar beton bertulang dan tipe gelagar komposit terhadap data beban *WIM* di ruas jalan nasional Cikampek – Pamanukan pada tahun 2011 telah dilakukan dan menghasilkan indeks reliabilitas secara berturut-turut adalah 5,01 (Nugraha dan Sidi 2016) dan 7.16 (Nugraha dan Hardono 2015). Selain reliabilitas struktur secara umum, evaluasi jembatan terhadap kegagalan fatik akibat beban berulang perlu dilakukan pada jembatan standar khususnya tipe

gelagar komposit yang memiliki elemen gelagar baja.

Tujuan penulisan makalah ini adalah untuk mengevaluasi umur fatik struktur jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit yang direncanakan dengan pembebanan lalu lintas berdasarkan standar pembebanan untuk jembatan SNI 1725: 2016 (BSN 2016) dan standar perencanaan struktur baja untuk jembatan RSNI T-03-2005 (Indonesia 2005) terhadap beban aktual hasil pengukuran beban *WIM* di ruas jalan nasional Cikampek – Pamanukan tahun 2011 (Pusjatan 2011) dan ruas jalan Tol Jakarta-Tangerang tahun 2016 (Pusjatan 2016).

Data beban aktual hasil pengukuran *WIM* pada dua lokasi tersebut digunakan dengan pertimbangan sebagai kondisi lalu lintas terbesar dan beban terberat, dimana kedua lokasi tersebut adalah jalur utama logistik barang di Pulau Jawa, yang merupakan pulau terpadat di Indonesia. Pada lokasi lain yang memiliki kondisi lalu lintas yang lebih rendah tentunya kondisi efek beban akan lebih kecil daripada hasil evaluasi yang dihasilkan dari penelitian ini. Evaluasi dilakukan dengan cara analisis rentang tegangan dan jumlah siklus pembebanan lalu lintas akibat beban kendaraan hasil pengukuran *WIM* terhadap umur rencana jembatan standar yaitu 50 tahun yang ditetapkan dalam standar pembebanan jembatan SNI 1725 : 2016 (BSN 2016) yang mengacu pada AASHTO (2012).

KAJIAN PUSTAKA

Pengolahan data beban *WIM*

Data beban kendaraan yang digunakan dalam evaluasi ini adalah hasil pengukuran beban kendaraan *WIM* di ruas jalan Cikampek – Pamanukan, dengan durasi pengukuran selama 3 x 24 jam pada kedua arah lalu lintas (Pusjatan 2011) dan ruas jalan Tol Jakarta-Tangerang, dengan durasi pengukuran selama 2 x 24 jam pada kedua arah lalu lintas (Pusjatan 2016). Pemilihan data beban di lokasi ini dilakukan karena ruas jalan Cikampek – Pamanukan juga ruas Jalan Tol Jakarta-Tangerang merupakan ruas jalan utama di Pulau Jawa yang memiliki lalu lintas kendaraan yang cukup padat dengan intensitas kendaraan berat yang melintas cukup banyak. Data beban dan lalu lintas kendaraan dari pengukuran *WIM* di kedua lokasi ini dianggap sebagai salah satu lokasi dengan lalu

lintas dan intensitas beban terberat untuk evaluasi jembatan standar Bina Marga yang telah diaplikasikan secara luas di berbagai ruas jalan nasional di Indonesia.

Data statistik hasil pengukuran *WIM* tersebut 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*, yaitu klasifikasi EURO13. Klasifikasi tersebut membagi jenis kendaraan dalam 12 kelas kendaraan yang berbeda (Metro Count 2009).

Tabel 1. Frekuensi kendaraan per kelas kendaraan hasil pengukuran *WIM*

Kelas	Ruas Cikampek Pamanukan (non-Tol) 3 x 24jam		Ruas Jakarta Tangerang (Tol) 2 x 24jam	
	Jumlah	frekuensi	Jumlah	frekuensi
	1	35218	48,67%	7380
2	19846	27,43%	11162	35,52%
3	5991	8,28%	5868	18,67%
4	115	0,16%	99	0,32%
5	1173	1,62%	377	1,20%
6	10	0,01%	23	0,07%
7	0	0,00%	55	0,18%
8	10	0,01%	1891	6,02%
9	228	0,32%	698	2,22%
10	332	0,46%	258	0,82%
11	363	0,50%	820	2,61%
12	9074	12,54%	2792	8,89%
Total	72360	100%	31423	100%

Sumber: (Nugraha dan Hardono 2015) dan (Pusjatan 2016)

Pada Tabel 1 di atas, terlihat bahwa kendaraan kelas 1 dan kelas 2 yang menurut EURO13 merupakan kendaraan kelas ringan dan truk kecil dengan konfigurasi 2 sumbu, terukur sebagai kelas dengan jumlah tertinggi untuk kedua lokasi pengukuran *WIM* yaitu 55.064 kendaraan atau 76,09 % dari total kendaraan di Ruas Cikampek-Pamanukan dan 18.542 kendaraan atau 59,01 % di Ruas Jakarta-Tangerang. Sedangkan jenis kendaraan truk yang memberikan dampak beban yang lebih besar pada struktur jembatan, dari kelas 3 sampai kelas 11 secara total hanya berjumlah 17.296 kendaraan atau 23,90 % dari jumlah total kendaraan yang melintas di Ruas Cikampek-Pamanukan dan 12.281 kendaraan atau 40,99 % dari jumlah total kendaraan yang melintas di Ruas Tol Jakarta-Tangerang.

Jumlah total kendaraan yang melintas ruas Cikampek-Pamanukan pada saat pengukuran 3x24 jam adalah 72.360 kendaraan. Sedangkan jumlah total kendaraan yang melintas ruas Jalan Tol Jakarta-Tangerang pada saat pengukuran 2x24 jam adalah 31.423 kendaraan. Sehingga jika dirata-ratakan, maka lalu lintas kendaraan harian rata-rata (LHR) dari hasil pengukuran *WIM* di Ruas Cikampek-Pamanukan dan Ruas Tol Jakarta-Tangerang ini secara berturut-turut adalah sebesar 24.120 kendaraan dan 15.712 kendaraan.

Karena pengukuran *WIM* hanya dilakukan selama 3x24 jam di Ruas Cikampek-Pamanukan dan 2x24 jam di Ruas Tol Jakarta-Tangerang, maka jumlah kendaraan yang melintas diproyeksikan selama umur rencana jembatan yaitu 50 tahun dengan asumsi pertumbuhan volume lalu lintas harian per tahun adalah 7,5 % dan didapat total akumulasi kendaraan yang melintas selama 50 tahun adalah 4.566.044.149 kendaraan di Ruas Cikampek-Pamanukan dan 2.974.270.425 kendaraan di Ruas Tol Jakarta-Tangerang. Diasumsikan bahwa komposisi masing-masing kelas kendaraan akan tetap selama 50 tahun tersebut dan dihitung dengan metode eksponensial (Supranto 2000).

Jembatan standar Bina Marga tipe komposit

Jembatan standar yang direncanakan secara tipikal terhadap peraturan pembebanan di Indonesia adalah jembatan standar Bina Marga, yang mengacu Pedoman gambar standar pekerjaan jalan dan jembatan (Indonesia 2005). Jembatan standar ini terdiri dari beberapa desain tipe jembatan tipikal dengan panjang bentang yang bervariasi. Dari beberapa tipe jembatan standar, salah satu tipe jembatan standar yang banyak diterapkan di Indonesia adalah tipe jembatan gelagar komposit.

Jembatan tipe ini menggunakan elemen struktur baja berupa gelagar *IWF* yang dikombinasikan dengan pelat lantai beton sehingga berperilaku sebagai satu kesatuan penampang, yaitu aksi komposit antara penampang baja *IWF* dan pelat beton di atasnya. Elemen struktur baja pada umumnya memiliki kerentanan terhadap beban dinamis dan berulang, yang dapat menyebabkan kegagalan fatik. Kegagalan fatik ini bisa sangat berbahaya

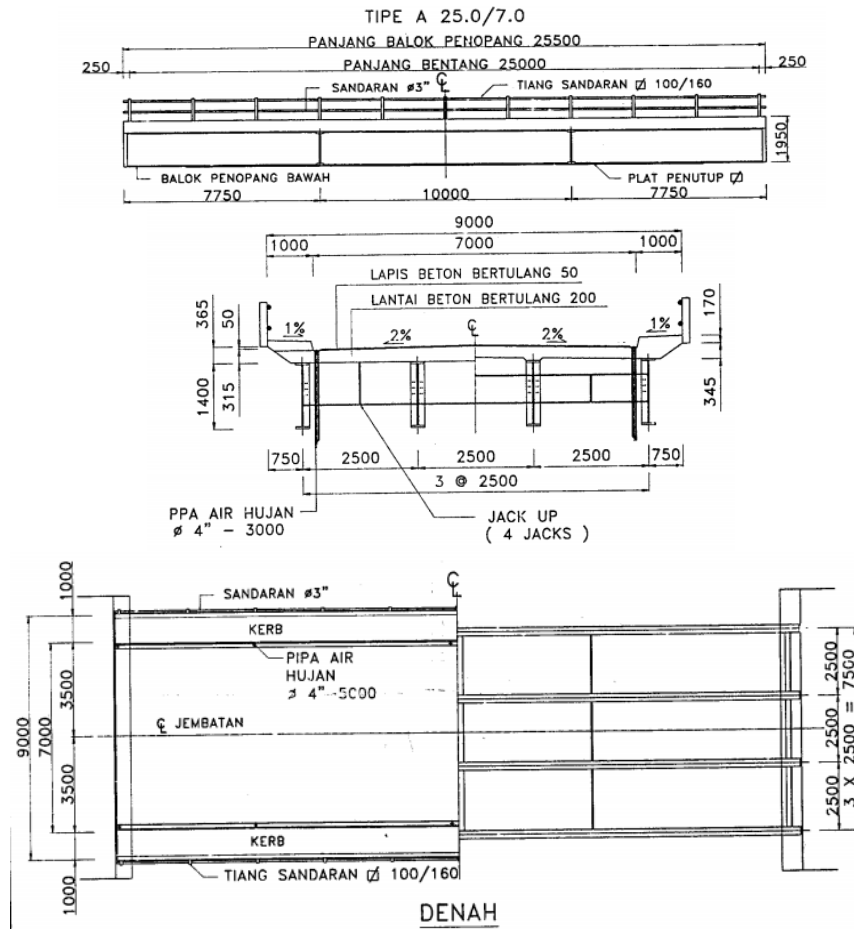
karena sifatnya yang membuat retak pada elemen baja dan dapat membuat terjadinya keruntuhan struktur secara tiba-tiba.

Dasar pemilihan tipe jembatan yang dievaluasi pada penelitian ini dilakukan karena jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit dengan panjang bentang 25 m perletakan sederhana, lebar jembatan 9 m, banyak diaplikasikan secara luas di berbagai ruas jalan nasional maupun jalan tol di Indonesia. Pada ruas jalan nasional saja, untuk tipe gelagar baja komposit yang berjumlah 2.387 jembatan, tipe jembatan ini yang diaplikasikan dengan panjang bentang 25 m dan lebar 9 m berjumlah 706 jembatan atau sekitar 29,58 % dari total jembatan tipe gelagar baja komposit. Sehingga dapat dikatakan untuk jembatan di lokasi lain dengan desain standar yang sama, akan memiliki perilaku tahanan struktur yang sama dengan hasil evaluasi fatik dalam penelitian ini.

Evaluasi siklus tegangan fatik

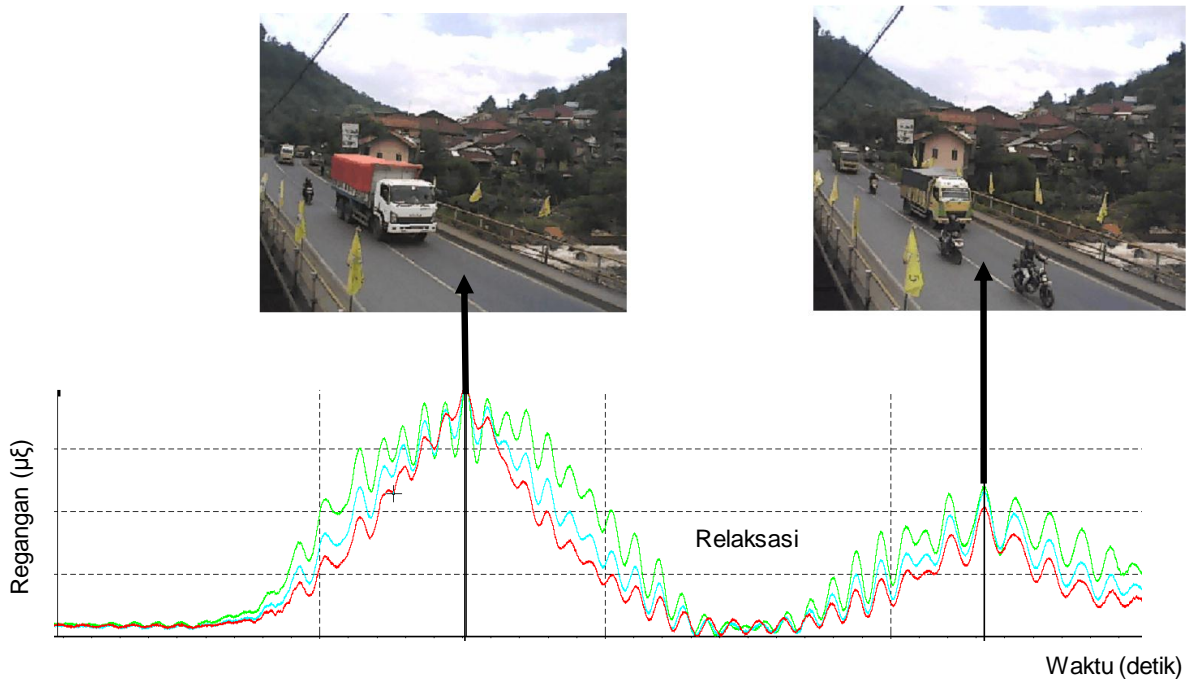
Evaluasi siklus tegangan fatik dapat dilakukan dengan mengacu pada metode evaluasi fatik dalam *AASHTO Load and Resistance Factored Design (LRFD) Bridge Design Specifications 2012* yang juga diacu kedua standar SNI. Dalam *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2012*, metode yang digunakan untuk mengevaluasi fatik adalah dengan menggunakan *S-N curve* yang dibuat sesuai tipe elemen struktur jembatan untuk mengetahui apakah siklus tegangan akibat beban terukur *WIM* telah melampaui kurva fatik *S-N Curve* atau masih berada di bawah kurva tersebut.

Siklus tegangan yang dimaksud dalam evaluasi ini adalah perubahan tegangan elemen struktur baja yang diakibatkan oleh satu kendaraan melintas akibat berat totalnya, bukan perubahan akibat beban sumbu kendaraan. Hal ini diperkuat dengan hasil uji coba model fisik *WIM Bridge* (Nugraha dan Sukmara 2016), bahwa respons tegangan pada gelagar baja sangat terpengaruh beban total kendaraan yang melintas, sehingga dua kendaraan yang berbeda dan beriringan akan menghasilkan respons tegangan yang berbeda diiringi relaksasi terlebih dahulu seperti dapat dilihat pada Gambar 2.



Keterangan: ukuran dalam mm

Gambar 1. Gambar jembatan girder komposit standar Bina Marga (Indonesia 2005)



Keterangan: Hijau: sensor pada gelagar 1 Biru: gelagar 2, Merah: gelagar 3

Gambar 2. Respon regangan dua kendaraan beriringan (Nugraha dan Sukmara 2016)

Maka, dalam penelitian ini besaran beban yang dianalisis untuk menghasilkan siklus tegangan dalam evaluasi ini adalah beban total kendaraan, bukan beban sumbu kendaraan. Hal ini dilakukan agar didapat rentang tegangan yang merupakan selisih antara puncak tegangan dengan titik relaksasi, yang dapat digunakan dalam evaluasi siklus fatik dengan metode *S-N curve* yang juga menggunakan parameter rentang tegangan terhadap jumlah atau frekuensi kejadian rentang tegangan itu sendiri.

Penentuan *S-N curve* dapat dilakukan dengan beberapa metode, diantaranya dengan menggunakan tahanan nominal dalam peraturan seperti dalam AASHTO, atau dengan cara eksperimental (Saberi et al. 2016). Salah satu cara eksperimental yang dapat digunakan adalah dengan melakukan pengamatan dan pengukuran perilaku struktur di masa layan (Pasquier et al. 2014). Dalam penelitian ini akan digunakan metode *S-N curve* yang dibuat dari tahanan nominal dalam peraturan AASHTO (2012). Dalam AASHTO *LRFD Bridge Design Specifications 2012* bagian 6.6.1.2.2 (AASHTO 2012), untuk kondisi fatik akibat beban ditetapkan harus memenuhi kriteria dalam Persamaan 1.

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n \dots \dots \dots (1)$$

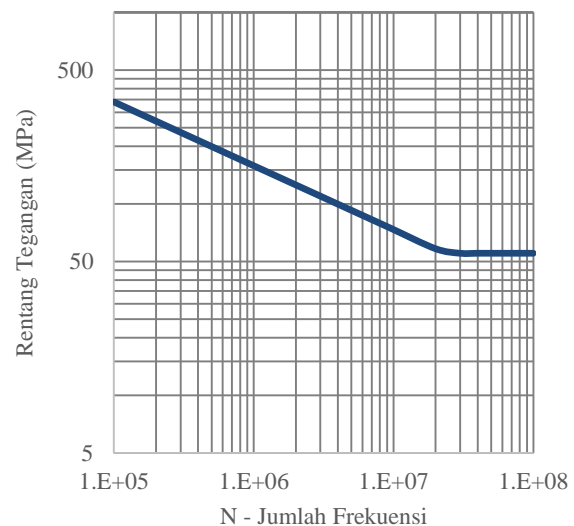
Keterangan:

- γ = Faktor beban untuk kombinasi beban fatik = 1.5
- (Δf) = Efek pembebanan yaitu rentang tegangan fatik
- $(\Delta F)_n$ = Tahanan fatik nominal

Parameter (Δf) didapat dari luaran analisis struktur, sedangkan parameter $(\Delta F)_n$ yang merupakan tahanan fatik nominal ditentukan berdasarkan AASHTO pasal 6.6.1.2.5 (AASHTO 2012). Pada pasal tersebut, tahanan nominal fatik dibagi menjadi dua bagian, yaitu pada kondisi umur fatik tak terhingga dan kondisi umur fatik terhingga. Jika digambarkan dalam kurva rentang tegangan terhadap jumlah siklus *S-N curve*, kurva batasan tahanan fatik nominal ini akan membentuk kurva miring pada bagian umur fatik terhingga dan menurun hingga masuk bagian umur fatik tak terhingga pada suatu batasan nilai rentang tegangan tertentu dengan umur fatik tak terhingga. Batasan nilai ini ditentukan

berdasarkan kategori *detailing* struktur baja yang dievaluasi.

Kategori struktur jembatan ini dianggap sebagai kategori *detailing* B, yang artinya kondisi fatik pada kategori ini diakibatkan oleh rentang tegangan yang berasal dari aksi lentur elemen gelagar utama, bukan berasal dari rentang tegangan pada level *detailing* yang lebih tinggi, misalnya sambungan las pada koneksi antar elemen yang dapat memicu terjadinya konsentrasi tegangan. Dalam penelitian ini, lingkup *detailing* yang digunakan sampai level B tersebut, karena rentang tegangan yang diambil dari model struktur adalah akibat momen lentur pada gelagar memanjang jembatan komposit. Nilai batasan umur fatik tak terhingga untuk kategori B adalah 63.05 MPa. Dengan demikian, *S-N curve* untuk kategori B dapat digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *S-N curve* AASHTO Kategori B

HIPOTESIS

Jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit dengan panjang bentang 25 m yang banyak diaplikasikan secara luas di berbagai ruas jalan nasional maupun jalan tol di Indonesia memiliki tahanan yang cukup terhadap siklus fatik akibat beban lalu lintas hasil pengukuran *WIM* selama masa layan-nya, yaitu 50 tahun.

METODOLOGI

Penelitian ini secara garis besar menggunakan metode penelitian evaluasi dengan pendekatan kuantitatif. Tahap pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengumpulan data beban *WIM* dan data struktur jembatan yang akan digunakan dalam penelitian ini. Kemudian data *WIM* berupa besaran beban total kendaraan direkapitulasi untuk melihat distribusi beban total kendaraan yang melintas dan dibuat proyeksi untuk umur layan jembatan 50 tahun. Data struktur jembatan digunakan sebagai dasar untuk membuat model struktur untuk tahapan analisis struktur. Setelah model struktur dibuat, dilakukan pembebanan terhadap struktur menggunakan masing-masing beban total kendaraan dari data hasil pengukuran *WIM*. Luaran dari proses pemodelan dan analisis struktur ini adalah rentang tegangan akibat masing-masing beban total kendaraan. Rekapitulasi rentang tegangan dan frekuensi dari hasil analisis struktur ini digunakan dalam evaluasi terhadap tahanan nominal fatik dengan menggabungkannya pada *S-N curve*, sehingga diketahui untuk umur layan. Secara lebih detail, metodologi yang digunakan dalam penelitian ini diuraikan secara berurutan sebagai berikut.

Pengolahan data beban *WIM*

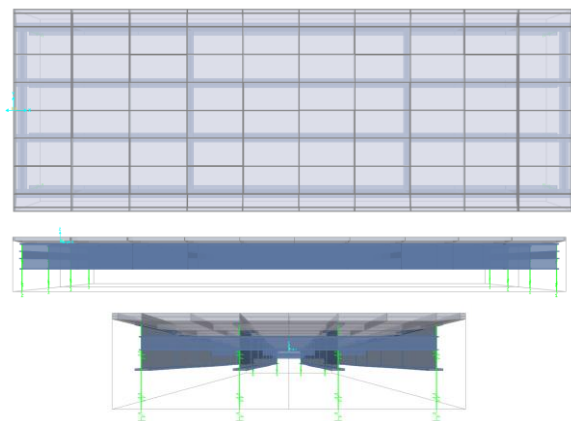
Data beban total kendaraan beserta frekuensi kejadiannya dari hasil pengukuran *WIM* yang telah diuraikan sebelumnya, kemudian langsung digunakan dalam pembebanan pada model struktur. Masing-masing beban total kendaraan diaplikasikan sebagai beban kendaraan bergerak (*moving load*) pada model struktur. Tujuannya adalah untuk menghitung siklus dan rentang tegangan yang terjadi akibat beban total kendaraan pada elemen gelagar baja jembatan standar komposit yang dievaluasi dalam penelitian ini.

Pemodelan dan analisis struktur jembatan

Model struktur dari jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit dengan panjang bentang 25 m dengan peletakan sederhana, lebar jembatan 9 m, ini dibuat menggunakan *software* CSI Bridge secara 3 dimensi, dapat dilihat pada Gambar 4. Besaran nominal dari karakteristik material struktur yang digunakan adalah beton dengan mutu kuat tekan f_c' 20 MPa dengan spesifikasi berat isi (γ) = 2.400 kg/m³, dan baja

gelagar dengan mutu tegangan leleh f_y 300 MPa, modulus elastisitas (E) = 200.000 MPa.

Kemudian, analisis struktur jembatan dilakukan dengan mengaplikasikan beban kendaraan untuk menghasilkan respons tegangan akibat beban tersebut. Untuk mendapatkan respons struktur berupa tegangan terbesar pada gelagar baja, dimana lokasi tegangan terbesar akibat beban lalu lintas adalah pada bagian bawah pelat sayap gelagar pada tengah bentang elemen gelagar baja jembatan, dapat dilakukan dengan menggunakan model struktur yang telah dibuat.



Gambar 4. Pemodelan struktur jembatan

Model struktur tersebut kemudian diberikan beban bergerak dengan beban truk standar sesuai SNI 1725:2016 (BSN 2016). Keluaran dari analisis struktur ini adalah berupa tegangan terbesar elemen gelagar baja jembatan. Selanjutnya, besaran beban total masing-masing kendaraan dari hasil pengukuran *WIM* akan menjadi input beban selanjutnya dalam proses analisis struktur yang sama untuk mendapatkan tegangan elemen gelagar yang proporsional seperti tegangan elemen gelagar yang dihasilkan beban truk standar. Masing-masing beban total kendaraan diaplikasikan sebagai beban kendaraan bergerak (*moving load*) pada model struktur. Hasil yang didapatkan adalah distribusi besaran beban dan siklus beban dari masing-masing beban *WIM* ini.

Evaluasi siklus tegangan fatik akibat beban *WIM*

Evaluasi siklus tegangan fatik ini dilakukan dengan mengacu metode evaluasi fatik dalam AASHTO *LRFD Bridge Design Specifications* 2012. Dalam AASHTO *LRFD Bridge Design Specifications* 2012, metode yang

digunakan untuk mengevaluasi fatik adalah dengan menggunakan *S-N curve* yang dibuat sesuai tipe elemen struktur jembatan untuk mengetahui apakah siklus tegangan akibat beban terukur *WIM* telah melampaui kurva fatik *S-N curve* atau masih berada di bawah kurva tersebut. Untuk efek beban hasil pengukuran *WIM* di kedua lokasi, masing-masing dihitung secara terpisah. Hal ini dilakukan untuk mengetahui efek beban dari data beban masing-masing lokasi pengukuran *WIM* terhadap tahanan fatik jembatan standar yang dievaluasi dalam bentuk *S-N curve*.

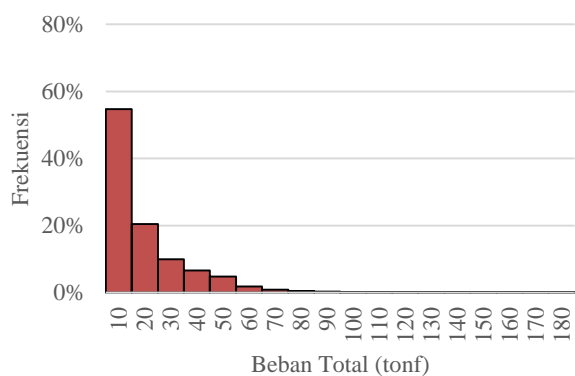
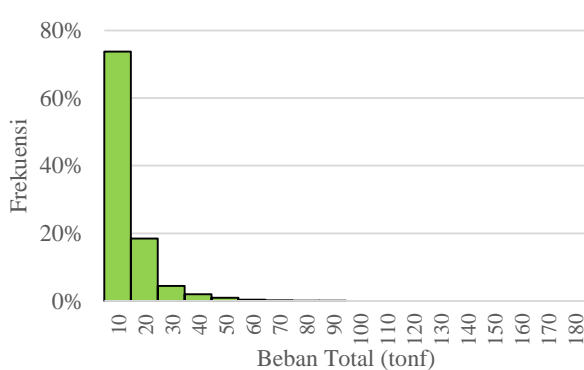
HASIL DAN ANALISIS

Pengolahan data beban *WIM*

Berdasarkan metode yang digunakan dalam penelitian ini, data beban total kendaraan beserta frekuensi kejadiannya dari hasil pengukuran *WIM* langsung digunakan dalam pembebanan pada model struktur. Masing-masing beban total kendaraan diaplikasikan sebagai beban kendaraan bergerak (*moving load*) pada model struktur. Tujuannya adalah untuk menghitung frekuensi kejadian dan rentang tegangan yang terjadi akibat beban total kendaraan pada elemen gelagar baja jembatan standar komposit yang dievaluasi dalam penelitian ini.

Tabel 2. Frekuensi Beban Total kendaraan

No	Beban Total (tonf)	Ruas Cikampek Pamanukan (non-Tol) 3x24 jam		Ruas Jakarta Tangerang (Tol) 2x24 jam	
		n	f (%)	n	f (%)
		1	<10	53.375	73,76
2	10-20	13.350	18,45	6.416	20,42
3	20-30	3.183	4,40	3.104	9,88
4	30-40	1.421	1,96	2.058	6,55
5	40-50	651	0,90	1.485	4,73
6	50-60	247	0,34	569	1,81
7	60-70	104	0,14	255	0,81
8	70-80	26	0,04	158	0,50
9	80-90	3	0,00	87	0,28
10	90-100	-	-	33	0,11
11	100-110	-	-	18	0,06
12	110-120	-	-	14	0,04
13	120-130	-	-	11	0,04
14	130-140	-	-	2	0,01
15	140-150	-	-	3	0,01
16	150-160	-	-	4	0,01
17	160-170	-	-	5	0,02
18	170-180	-	-	3	0,01
Total		72.360	100	31.423	100



Gambar 5. Histogram beban total kendaraan hasil pengukuran *WIM* Ruas Cikampek – Pamanukan (kiri) dan Ruas Tol Jakarta – Tangerang (kanan)

Data dalam Tabel 1 dituangkan menjadi frekuensi kendaraan berdasarkan kelas kendaraan. Kemudian, dengan diketahuinya berat total masing-masing kendaraan berdasarkan data *WIM* terlepas dari kelas

kendaraannya, dapat diketahui distribusi beban total kendaraan dan frekuensinya, yang dituangkan pada Tabel 2. Rentang beban yang digunakan adalah 10 tonf. Rekapitulasi ini dilakukan untuk menentukan bobot berupa

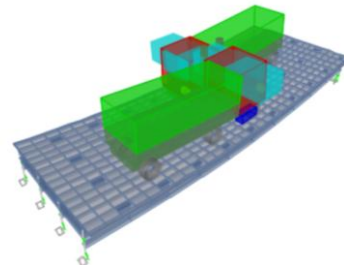
frekuensi kejadian dari masing-masing rentang beban total kendaraan, yang akan digunakan dalam pembuatan histogram dan tahapan perhitungan rentang tegangan dengan lalu lintas proyeksi pada masa layan jembatan 50 tahun.

Sedangkan histogram dari frekuensi kejadian untuk berat total kendaraan hasil pengukuran *WIM* dapat dilihat pada Gambar 5. Secara sederhana, histogram data beban ini akan sebanding dengan histogram data siklus rentang tegangan atau tegangan yang akan dievaluasi dengan *S-N curve*. Pada Tabel 2 dan histogram di atas, sebagian besar kendaraan adalah kendaraan ringan yang memiliki beban total di bawah 5 ton dengan frekuensi kejadian 51,40 %. Hal ini sesuai dengan rekapitulasi jumlah kendaraan per kelas kendaraan dalam Tabel 1. Sedangkan untuk kendaraan lebih berat dari beban truk standar SNI 1725:2016 yaitu 50 tonf berjumlah 627 kendaraan atau 0,87 % dari total jumlah kendaraan.

Pemodelan dan analisis struktur

Dalam penelitian ini, sesuai uraian sebelumnya, pembebanan yang diberikan pada model jembatan hanya berupa beban hidup bergerak yang berasal dari data beban total hasil pengukuran *WIM*. Sebagai data acuan, model diberikan beban bergerak dengan beban truk standar 50 tonf sesuai SNI 1725:2016 (BSN 2016) dengan hasil tegangan terbesar pada elemen gelagar baja adalah 48,45 MPa yang terjadi pada serat bawah gelagar baja interior. Beban truk standar 50 tonf (AASHTO 2012) diberikan sebagai beban bergerak seperti dapat

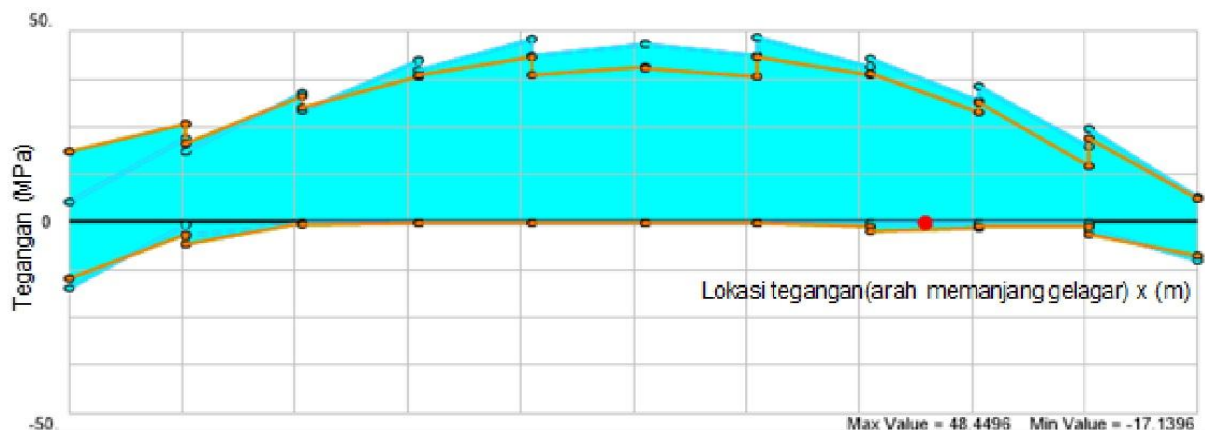
dilihat pada Gambar 6 sebagai berikut. Sedangkan respons pada model struktur jembatan akibat pembebanan tersebut dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Beban kendaraan sebagai beban bergerak dalam model

Dengan metode yang sama, dilakukan analisis struktur untuk beban total untuk masing-masing kendaraan dari hasil pengukuran *WIM* yang diberikan sebagai beban kendaraan bergerak seperti Gambar 6 dalam model struktur. Kemudian, tegangan terbesar pada serat bawah flens elemen gelagar baja direkapitulasi untuk seluruh besaran beban kendaraan hasil pengukuran *WIM*, sehingga didapat data frekuensi dari kejadian masing-masing rentang tegangan yang dituangkan pada

Tabel 3, untuk dievaluasi terhadap *S-N curve* yang digambarkan pada Gambar 3. Hasil evaluasi dari siklus rentang tegangan akibat beban kendaraan kemudian digambarkan pada Gambar 8.



Gambar 7. Respons tegangan serat bawah gelagar model terhadap beban bergerak

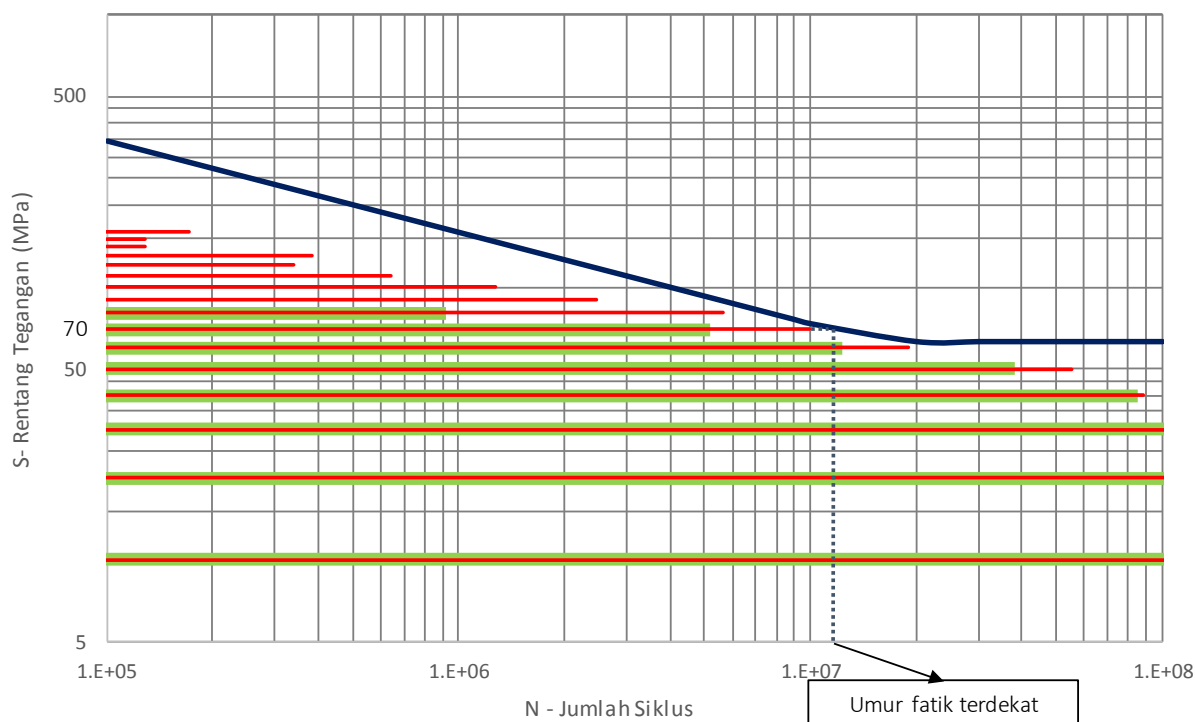
Evaluasi siklus tegangan fatik akibat beban WIM

Dari respons struktur hasil analisis struktur terhadap seluruh beban total kendaraan berdasarkan hasil pengukuran WIM, dihasilkan sebaran data tegangan maksimum gelagar yang diubah menjadi data frekuensi terjadinya besaran rentang tegangan yang ditampilkan pada Tabel 3 sebagai berikut. Karena pengukuran WIM hanya dilakukan selama 3x24 jam di Ruas Cikampek-Pamanukan dan 2x24 jam di Ruas Tol Jakarta-Tangerang, maka jumlah siklus masing-masing kendaraan yang merupakan bobot dari total jumlah akumulasi proyeksi kendaraan selama umur rencana jembatan yaitu 50 tahun.

Selanjutnya, data frekuensi rentang beban kendaraan 50 tahun pada Tabel 3 dimasukkan ke dalam grafik rentang tegangan terhadap frekuensinya dan dibandingkan dengan *S-N curve* untuk material baja dan tingkat *detailling* elemen gelagar baja jembatan komposit. Kemudian dapat dievaluasi apakah siklus tegangan akibat beban kendaraan hasil pengukuran WIM dengan proyeksi pada umur rencana 50 tahun telah melampaui kurva fatik tersebut atau belum, yang digambarkan pada Gambar 8.

Tabel 3. Frekuensi rentang tegangan beban kendaraan 50 tahun

No	Rentang Tegangan (MPa)	Ruas Cikampek Pamanukan (non-Tol)		Ruas Jakarta Tangerang (Tol)	
		Jumlah Kendaraan Akumulasi 50 tahun	Frekuensi Kejadian (%)	Jumlah Kendaraan Akumulasi 50 tahun	Frekuensi Kejadian (%)
1	<10	3.455.263.674	75,67	1.676.203.894	56,36
2	10-20	784.291.912	17,18	598.394.094	20,12
3	20-30	190.693.552	4,18	290.394.350	9,76
4	30-40	81.338.183	1,78	196.214.957	6,60
5	40-50	36.725.231	0,80	123.332.411	4,15
6	50-60	11.863.133	0,26	42.309.737	1,42
7	60-70	4.985.040	0,11	22.054.069	0,74
8	70-80	883.425	0,02	12.588.803	0,42
9	80-90	-	-	5.489.854	0,18
10	90-100	-	-	2.839.580	0,10
11	100-110	-	-	1.419.790	0,05
12	110-120	-	-	757.221	0,03
13	120-130	-	-	851.874	0,03
14	130-140	-	-	283.958	0,01
15	140-150	-	-	283.958	0,01
16	150-160	-	-	378.611	0,01
Total		4.566.044.149	100	2.973.797.162	100



Gambar 8. Evaluasi Siklus Fatik dengan *S-N curve* proyeksi lalu lintas masa layan 50 tahun (Merah: Ruas Jakarta-Tangerang, Hijau: Ruas Cikampek-Pamanukan, Garis putus-putus: proyeksi umur fatik terdekat)

PEMBAHASAN

Distribusi beban total kendaraan hasil pengukuran *WIM*, seperti dapat dilihat pada Tabel 2 dan histogram pada Gambar 5, menunjukkan bahwa kendaraan ringan memiliki frekuensi yang besar. Begitu pula efek rentang tegangan akibat beban total kendaraan, secara akumulasi jumlah, kendaraan dengan beban ringan memiliki frekuensi yang dominan. Namun, dengan batasan tahanan nominal fatik seperti yang dituangkan pada Gambar 8, kurva rentang tegangan memiliki nilai siklus fatik tak terbatas pada efek tegangan < 60 MPa. Pada rentang tegangan tersebut, kurva fatik tidak akan terlampaui. Sedangkan pada efek tegangan > 60 MPa kurva berbentuk miring, dimana batasan jumlah siklus semakin mengecil untuk efek rentang tegangan semakin besar, yang merepresentasikan beban kendaraan yang lebih berat. Dalam hal ini, akumulasi efek rentang tegangan akibat kendaraan dengan beban berat, dengan besaran rentang tegangan > 60 MPa, berpotensi untuk dapat melampaui batasan tahanan fatik nominal *S-N curve* pada Gambar 8.

Dari grafik perbandingan pada Gambar 8 yang menuangkan siklus akumulasi rentang efek

tegangan akibat beban kendaraan dari Tabel 3 dan digabungkan dengan tahanan nominal fatik dari Gambar 3, didapat hasil evaluasi metode *S-N curve* bahwa siklus tegangan akibat pembebanan akumulasi kendaraan hasil pengukuran *WIM* selama 50 tahun masih belum melampaui *S-N curve*, sehingga umur fatik belum terlampaui untuk kedua efek beban hasil pengukuran *WIM*. Dengan demikian kriteria batasan fatik $\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n$ yang ditetapkan AASHTO seperti yang digambarkan pada Gambar 38 masih terpenuhi.

Adapun proyeksi kejadian fatik terdekat, dengan metode yang sama, terjadi saat masa layan 63 tahun untuk ruas jalan Cikampek-Pamanukan dan pada masa layan 55 tahun untuk ruas jalan tol Jakarta-Tangerang. Kejadian ini terjadi pada akumulasi rentang tegangan efek beban kendaraan dengan rentang tegangan 60 - 70 MPa seperti terlihat pada Gambar 8, dimana masa layan 50 tahun saja sudah hampir menyentuh tahanan fatik nominal. Pada efek rentang tegangan 60-70 MPa jika diproyeksikan menggunakan garis putus-putus sehingga siklus efek rentang regangan tersebut menyentuh dan melampaui kurva tahanan fatik nominal pada Gambar 8, dapat diketahui jumlah siklus yang

dicapai, yaitu 11.466.856. Nilai siklus tersebut dapat dicapai dengan proyeksi dari data lalu lintas masing-masing ruas, yaitu pada masa layan 63 tahun untuk ruas jalan Cikampek-Pamanukan dan pada masa layan 55 tahun untuk ruas jalan tol Jakarta-Tangerang.

Hasil evaluasi ini berlaku dengan lalu lintas hasil pengukuran *WIM* dalam lingkup penelitian ini, dan dengan batasan yang ditetapkan AASHTO untuk asumsi rentang tegangan yang terjadi adalah akibat aksi lentur di tengah bentang. Saat umur fatik tercapai, kegagalan berupa retak akibat fatik akan terjadi pada elemen gelagar jembatan, yang dimulai dari flens bawah di tengah bentang yang menerima aksi lentur terbesar. Retak ini berpotensi menjalar hingga bagian pelat badan dan merambat hingga bagian atas gelagar sehingga dapat memutus gelagar sebelum terjadi keruntuhan.

Hasil penelitian ini berlaku hanya untuk desain jembatan Bina Marga tipe komposit bentang 25 m lebar 9 m dengan kondisi beban lalu lintas di salah satu ruas jalan nasional Pantura Jawa maupun jalan tol Jakarta-Tangerang yang cukup berat, sehingga hasil penelitian ini dapat cukup menggambarkan tahanan fatik jembatan standar di lokasi lain di Indonesia jika mengalami beban lalu lintas sebesar di salah satu ruas jalan nasional Pantura Jawa dan jalan tol utama penghubung Jakarta dan Pelabuhan Merak ini.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Evaluasi fatik metode *S-N curve* pada gelagar jembatan standar Bina Marga kelas A tipe komposit 25 m yang diakibatkan oleh beban kendaraan hasil pengukuran *WIM* di Ruas Jalan Pantura Cikampek-Pamanukan maupun di Ruas Jalan Tol Jakarta-Tangerang didapat bahwa siklus tegangan akibat pembebanan akumulasi kendaraan hasil pengukuran *WIM* selama 50 tahun masih belum melampaui *S-N curve*, sehingga umur fatik belum terlampaui. Dengan demikian, jembatan standar Bina Marga tipe komposit yang banyak diaplikasikan di berbagai ruas jalan nasional di Indonesia ini masih memenuhi kriteria batasan fatik $\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n$ yang ditetapkan dalam standar perencanaan SNI 1725:2016 (BSN 2016) dan AASHTO *LRFD Bridge Design Code*,

berdasarkan kondisi di salah satu ruas jalan nasional dan jalan tol dengan beban maupun lalu lintas terberat dan terpadat di Indonesia, yaitu di Cikampek-Pamanukan, Pantura Jawa Barat dan Jalan Tol Jakarta-Tangerang yang merupakan jalan tol utama penghubung Jakarta dan Pelabuhan Merak sebagai jalur utama logistik. Adapun proyeksi kejadian fatik terdekat, terjadi saat masa layan 63 tahun untuk ruas jalan Cikampek-Pamanukan dan pada masa layan 55 tahun untuk ruas jalan tol Jakarta-Tangerang.

Saran

Untuk mengevaluasi usia jembatan ditinjau dari aspek fatik, dapat dilakukan evaluasi menggunakan data *WIM*, dengan memperhatikan kondisi jembatan yang ada. Sebaiknya data *WIM* yang digunakan adalah data pengukuran selama 7 hari, mengacu pada fluktuasi mingguan lalu lintas yang memiliki pola mingguan, sehingga data lalu lintas 7 hari dapat mewakili untuk evaluasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Untung Cahyadi, ST., MT. dan Bapak Redrik Irawan ST., MT., sebagai peneliti di Puslitbang atas bantuannya untuk mendapatkan data-data hasil pengukuran beban kendaraan bergerak juga data gambar struktur jembatan standar yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR. Terima kasih juga disampaikan kepada PT. Jasa Marga atas bantuan berupa data pengukuran beban kendaraan bergerak di ruas Jalan Tol Jakarta-Tangerang.

DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO). 2012. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 6th Edition, Section 6*. Washington: AASHTO.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). 2005. *Standar Perencanaan Baja untuk Jembatan*. RSNI T-03-2005. Jakarta: BSN.
- , 2016. *Standar Pembebanan untuk Jembatan*. SNI 1725 : 2016. Jakarta: BSN.
- Direktorat Jenderal Bina Marga (DJBMM). 2015. *Sistem Pengelolaan Database Ditjen Bina*

- Marga, Kementerian PUPR. <http://psek.web.id/>. (diakses 20 Mei 2017)
- Indonesia. Departemen Pekerjaan Umum (PU). 2005. *Pedoman No:04/BM/2005. Gambar Standar Pekerjaan Jalan dan Jembatan, Volume Dua*. Jakarta: Departemen PU.
- Jacob, Bernard, dan Véronique Feypell-de La Beaumelle. 2010. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research* 34 (1): 9–15. doi:10.1016/j.iatssr.2010.06.003.
- MetroCount. 2009. *Euro13 MTE User Manual – Classification Schemes*. Diakses Januari 7, 2015. <http://mtehelp.tech-metrocount.com/article.aspx?id=DB974BB681.pdf>.
- Nugraha, Widi, dan Setyo Hardono. 2015. Evaluasi Reliabilitas Jembatan Standar Tipe Komposit Menggunakan Data Hasil Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak. *Widyariset* 1 (1): 11–20.
- Nugraha, Widi, dan Indra Djati Sidi. 2016. Probability Based Evaluation of Vehicular Bridge Load using Weigh-in-Motion Data. *Journal of Engineering and Technological Sciences* 48 (1): 66–85.
- Nugraha, Widi, dan Gatot Sukmara. 2016. *WIM Bridge: Ujicoba Model Fisik Teknologi Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak menggunakan Jembatan Terinstrumentasi*. Bandung: Pusjatan.
- Pasquier, Romain, James-A Goulet, Claire Acevedo, dan Ian F C Smith. 2014. Improving Fatigue Evaluations of Structures Using In-Service Behavior Measurement Data. *Journal of Bridge Engineering* 19 (11): 4014045.
- Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan). 2011. *Laporan Teknis Survey Pengukuran Beban Kendaraan Bergerak (WIM) Jalan Nasional Cikampek Pamanukan Tahun 2011*. Laporan Internal. Bandung: [s.n].
- , 2016. *Laporan Penelitian Kondisi Jembatan Ruas Jalan Tol Jakarta Tangerang 2016*. Laporan Advis Teknis, Bandung: Pusjatan
- Saberi, Mohammad Reza, Ali Reza Rahai, Masoud Sanayei, and Richard M. Vogel. 2016. “Bridge Fatigue Service-Life Estimation Using Operational Strain Measurements.” *Journal of Bridge Engineering*, no. January: 4016005. doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000860.
- Salmon, Charles G., John E. Johnson, dan Faris A. Malh. 2009. *Steel Structures: Design and Behaviour: Emphasizing Load and Resistance Factor Design*. Diedit oleh Marcia J. Horton. 5th ed. Upper Saddle River, New Jersey 07458: Pearson Education, Inc.
- Supranto, J. 2000. *Statistik Teori dan Aplikasi Jilid I*. Jakarta: Erlangga.