

PENGARUH PENGGANTIAN LANTAI JEMBATAN RANGKA BAJA (*REDECKING*) DENGAN PANEL BAJA ORTOTROPIK TERHADAP PERUBAHAN BERAT LANTAI JEMBATAN

Erik Wahyu Pradana¹ dan Andreas Triwiyono²

¹ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

² Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

Email: erikwpradana@uii.ac.id

Abstrak: Jembatan biasa pada umumnya direncanakan dengan umur layan 50 tahun. Selama umur layan tersebut dimungkinkan terjadi kerusakan. Salah satu kerusakan jembatan rangka terjadi pada lantai jembatan. Perbaikan lantai jembatan yang terbuat dari beton bertulang biasanya memerlukan waktu lama dan sering mengganggu kelancaran lalu lintas. Penggantian lantai (*redecking*) dengan panel baja ortotropik (*orthotropic steel deck, OSD*) dapat dijadikan alternatif pengganti lantai eksisting karena instalasinya cepat dan mudah, lebih ringan dibanding lantai beton bertulang, dan kontrol mutu yang terjamin karena penggunaan material fabrikasi. *OSD* terbuat dari pelat baja yang diperkaku oleh rusuk (*ribs*) pada arah longitudinal dan transversal didukung oleh balok melintang (*floorbeam*). Dalam makalah ini dibahas *redecking* jembatan rangka baja kelas A standar Bina Marga bentang 60 m dengan *OSD*. Pemodelan struktur *OSD* dilakukan dengan bantuan *software* ABAQUS CAE, didisain berdasarkan pertimbangan kondisi layan, kuat batas ultimit, dan *fatigue* dengan variasi umur rencana *OSD* disesuaikan dengan umur sisa jembatan (10, 20, 30, 40, dan 50 tahun) dan lalu-lintas harian rata-rata, LHR (1000, 2000, dan 3000 truk/hari), sehingga akan didapatkan kebutuhan tebal pelat (*plate*), rusuk (*ribs*), dan balok melintang (*floorbeam*). Selanjutnya akan diteliti perubahan berat lantai jembatan akibat *redecking*. Dari hasil analisis disimpulkan bahwa kombinasi umur rencana *OSD* dan LHR yang semakin besar menghasilkan disain *OSD* yang lebih berat. Untuk kombinasi umur rencana *OSD* 10, 20, 30, 40, dan 50 tahun serta LHR 1000, 2000, dan 3000 truk/hari didapatkan pengurangan berat lantai jembatan antara 19,802%-42,186% dengan pengurangan berat total jembatan antara 9,660%-20,581%.

Kata kunci: *redecking*, panel baja ortotropik, umur rencana, LHR, *fatigue*

THE EFFECT OF REDECKING OF STEEL FRAME USING ORTOTROPHIC STEEL PANEL ON THE WEIGHT OF BRIDGE FLOOR

Abstract: Generally, ordinary bridges are planned for 50 years service life. Bridge deck damages may occurs during its service life. One kind of damages in truss bridges occurs in deck. Bridge deck repairment, particularly made from reinforced concrete slab takes a long time and often disrupting traffics. Bridge deck replacement (*redecking*) by using orthotropic steel deck panels (*OSD*) can be applied due to its quick and easy installation, its weight is lighter than reinforced concrete slab, and its quality control is assured by using fabrication material. *OSD* panel consist of a steel plate, stiffen by ribs in longitudinal direction and supported by floorbeam in transversal direction. This paper will discuss about *redecking* on A class Bina Marga steel truss bridge standard with 60 m spans by using *OSD*. Structural modeling is conducted by using ABAQUS CAE, designed by strength, service, and fatigue limit states with variation of *OSD* service life are adapted to residual life of bridge (10, 20, 30, 40, 50 years) and average daily traffic (1000, 2000, 3000 truck/day), therefore plate, ribs, and floorbeam thickness design will be obtained from this process. Then, the effect of *redecking* to bridge weight reduction will be examined. Based on the analysis result, it can be concluded that a greater combination between *OSD* service life and average daily traffic give a greater weight of *OSD* design. Combination between *OSD* service life 10, 20, 30, 40, 50 years and average daily traffic 1000, 2000, 3000 truck/day give a weight reduction of deck between 19.802%-42.186% with total weight reduction of bridge between 9.660%-20.581%.

Keyword: *redecking*, orthotropic steel panel, service life, average daily traffic, *fatigue*

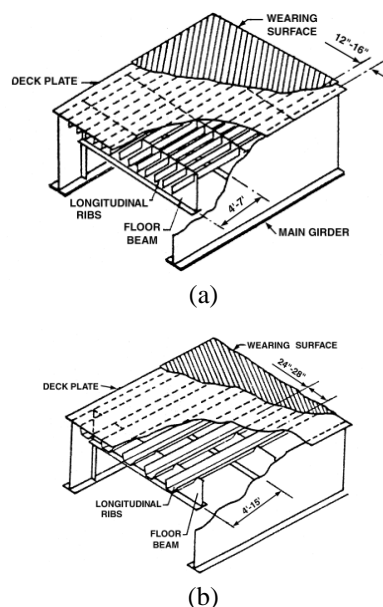
PENDAHULUAN

Transportasi darat menjadi salah satu unsur penting dalam roda perekonomian nasional. Infrastruktur transportasi darat termasuk di dalamnya terdapat 89.000 jembatan (1050 km), terdiri atas 54.000 jembatan (390 km) di ruas jalan kabupaten/kota dan 35.000 jembatan (660 km) di ruas jalan nasional dan provinsi, dan berdasarkan tipe bangunan atas berupa 32% rangka, 51% gelagar, 7% *culvert*, dan 10% tipe lainnya (Sukmana dan Vaza, 2008). Berdasarkan hasil kajian Dirjen Bina Marga pada akhir tahun 2009 pada 17.964 jembatan nasional, 42,81% dalam kondisi baik sekali; 24,20% dalam kondisi baik; 19,61% dalam kondisi rusak ringan; 8,51% dalam kondisi rusak berat; 3,01% dalam kondisi kritis; dan 1,86% dalam kondisi runtuh. Kegiatan perawatan (*maintenance*) harus terus dilakukan selama umur layan jembatan mengingat keberadaan jembatan yang sangat penting dalam jaringan transportasi dan roda perekonomian nasional. Pada umumnya jembatan rangka direncanakan dengan umur rencana 50 tahun (RSNI T-03-2005). Selama umur rencana tersebut dimungkinkan terjadi kerusakan pelat lantai jembatan. Perbaikan pelat lantai jembatan, khususnya yang terbuat dari beton bertulang memerlukan waktu yang lama untuk mencapai kekuatan beton sehingga mengganggu kelancaran lalu lintas. Penggantian pelat lantai jembatan (*redecking*) dengan panel baja ortotropik (*orthotropic steel deck, OSD*) dapat diterapkan karena alasan instalasinya cepat dan mudah, berat sendiri lebih ringan dibanding pelat beton bertulang serta kontrol mutu yang terjamin akibat penggunaan material fabrikasi. Panel lantai ini berupa segmental, terdiri atas pelat baja yang diperkaku oleh rusuk (*ribs*) pada arah longitudinal dan transversal didukung oleh balok melintang (*floorbeam*). Dalam paper ini dibahas *redecking* jembatan rangka baja standar Bina Marga bentang 60 m dengan *OSD*. Pemodelan struktur dilakukan dengan bantuan *software* ABAQUS CAE, dengan disain ditinjau terhadap kondisi kuat batas ultimit, batas layan, dan *fatigue*. Untuk variasi umur rencana *OSD* (10, 20, 30, 40, dan 50 tahun) dan lalu-lintas harian rata-rata (1000, 2000, dan 3000 truk/hari) akan

dicari kebutuhan tebal pelat (*plate*), rusuk (*ribs*), dan balok melintang (*floorbeam*).

ORTHOTROPIC STEEL DECK (OSD)

Sistem *orthotropic steel deck (OSD)* terdiri atas pelat baja yang didukung oleh rusuk (*ribs*) pada arah longitudinal dan balok melintang (*floorbeam*) pada arah transversal. Istilah *orthotropic* dipatenkan oleh insinyur Jerman pada tahun 1948. Istilah ini merupakan singkatan dari *orthogonal* dan *anisotropic* yang didasari oleh *ribs* dan *floorbeam* yang saling tegak lurus dan memiliki kekakuan yang berbeda pada arah longitudinal dan transversal (Troitsky, 1987). *OSD* secara umum dibedakan menjadi dua berdasarkan jenis *ribs* yang digunakan yaitu *open ribs* (rusuk terbuka) dan *closed ribs* (rusuk tertutup) (lihat Gambar 1). Sistem *open ribs* sangat populer pada masa teknologi komputasi belum maju seperti sekarang sehingga analisis struktur masih dilakukan secara manual. Saat ini sistem *closed ribs* lebih populer karena teknologi komputasi sudah berkembang dengan pesat sehingga analisis struktur dapat diselesaikan lebih mudah dan cepat dengan bantuan komputer. Kelebihan sistem *closed ribs* dibanding *open ribs* yaitu lebih ringan dan area yang perlu dilindungi terhadap korosi lebih sedikit.

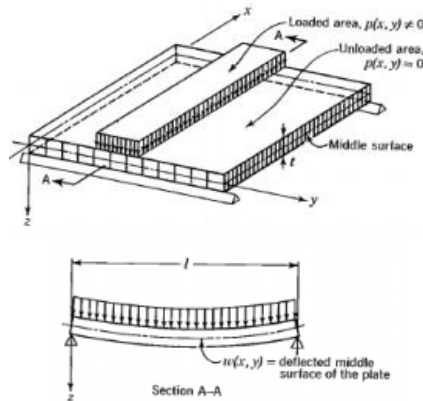


Gambar 1. (a) *Open ribs* (rusuk terbuka) dan (b) *closed ribs* (rusuk tertutup) (Bridge Engineering Handbook, 2000)

Pelat ortotropik dapat didefinisikan sebagai pelat yang memiliki kekakuan

berbeda pada sumbu x dan y (lihat Gambar 2). Karena ketebalan pelat tetap dan material pelat menerus, perbedaan kekakuan dalam sumbu x dan y ($E_x \neq E_y$) disebabkan oleh perbedaan modulus elastisitas dan perbedaan nilai *poisson ratio* ($\nu_x \neq \nu_y$) dari material yang digunakan. Sehingga dalam teori pelat ortotropik, pelat diasumsikan sebagai material anisotropik (Wolchuk, 1963).

Kekakuan pelat ortotropik dapat didefinisikan dalam 3 koefisien kekakuan, yaitu: kekakuan lentur arah sumbu x (D_x), kekakuan lentur arah sumbu y (D_y), dan kekakuan torsi (H). Kekakuan D_x dan D_y menggambarkan tahanan lentur sebuah lajur pelat dengan lebar dan ketebalan tertentu (Persamaan 1 dan 2).



Gambar 2. Pelat ortotropik sebagai sistem anisotropik (Wolchuk, 1963)

Kekakuan torsi (H) menggambarkan kemampuan segmen pelat dalam menahan puntir yang diformulasikan dalam Persamaan 3.

$$D_x = \frac{e_x t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad (1)$$

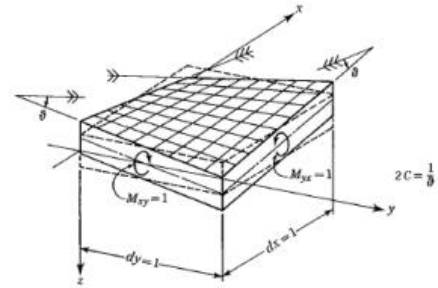
$$D_y = \frac{e_y t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad (2)$$

$$2H = 4C + \nu_y D_x + \nu_x D_y \quad (3)$$

dengan,

$2C$ =koefisien kekakuan torsi didefinisikan sebagai sudut puntir dari elemen pelat dengan $d_x = d_y = 1$ akibat momen puntir $M_{xy} = M_{yx} = 1$ seperti dalam Gambar 3 atau

$$2C = \frac{1}{\theta} \quad (4)$$



Gambar 3. Elemen pelat yang terpuntir (Wolchuk, 1963)

Pelat isotropik dapat dianggap sebagai kasus khusus dari pelat ortotropik dengan ($E_x = E_y$) dan ($\nu_x = \nu_y$). Sehingga persamaan (1) dan (2) menjadi:

$$D_x = D_y = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (5)$$

Koefisien kekakuan torsi untuk pelat isotropik adalah sebagai berikut:

$$2C = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (5) dan (6) ke persamaan (3), kekakuan torsi (H) diformulasikan sebagai berikut:

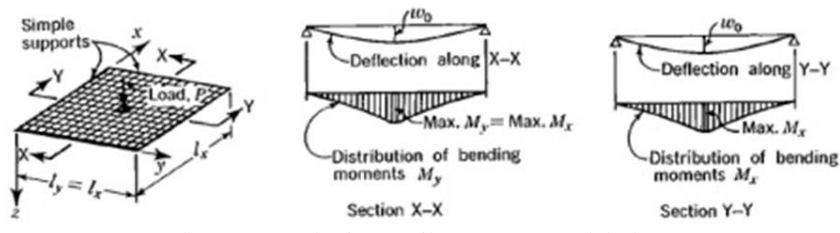
$$2H = \frac{Et^3}{6(1 - \nu^2)} = 2D \quad (7)$$

$$\text{Atau } H = D$$

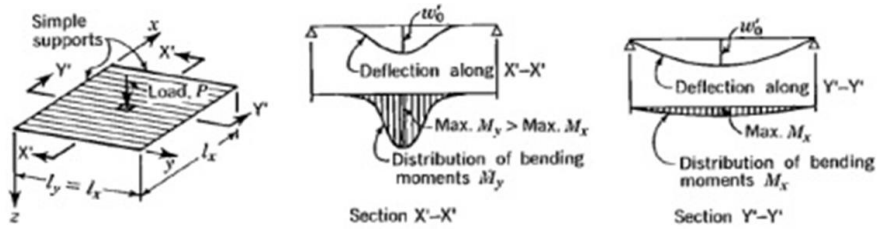
Dalam persamaan tersebut dapat dilihat bahwa untuk pelat isotropik kekakuan torsi dan kekakuan lentur memiliki nilai yang sama. Perbandingan perilaku struktur pelat isotropik seperti pelat baja atau beton dengan ketebalan tetap dengan pelat ortotropik dapat dilihat pada Gambar 4. Kedua pelat berbentuk persegi, didukung pada keempat sisi, dan dibebani beban P (beban area pada segmen kecil pelat di tengah bentang).

Pada Gambar 4(a), besar beban yang didukung pada kedua sumbu adalah sama dengan defleksi dan momen pada sumbu x dan y adalah sama.

Untuk pelat ortotropik pada Gambar 4(b), kekakuan lentur sumbu y (D_y) lebih besar dibanding sumbu x (D_x). Defleksi sepanjang garis potong $X'-X'$ dan $Y'-Y'$ tidak sama kecuali pada area dibawah beban. Beban utamanya didukung pada arah dengan kekakuan yang lebih besar (arah y) yang dapat dilihat terjadi momen lentur yang lebih besar (M_y) terjadi pada sumbu kaku dibanding M_x yang terjadi pada sumbu lemah dari pelat.



Gambar 4. (a) Pelat isotropik $D_x = D_y$ (Wolchuk, 1963)



Gambar 4. (b) pelat ortotropik $D_x < D_y$ (Wolchuk, 1963)

Hal ini juga dapat dilihat bahwa momen lentur maksimum (M_y) pada pelat ortotropik lebih besar dibandingkan dengan nilai momen lentur maksimum pelat isotropik.

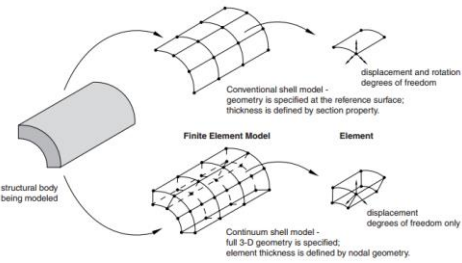
Persamaan diferensial yang menunjukkan hubungan antara defleksi dan beban pada pelat ortotropik mengacu pada Persamaan Huber berikut:

$$D_x \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = p(x,y) \quad (8)$$

dengan,
 ω = defleksi permukaan tengah pelat pada suatu titik (x,y)

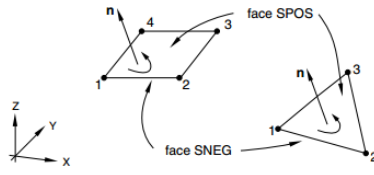
ELEMEN CANGKANG (SHELL) DALAM ABAQUS CAE

Elemen cangkang (*shell*) digunakan dalam pemodelan struktur dengan ketebalan struktur jauh lebih kecil dibanding dimensi lainnya. Pada Gambar 5 disajikan elemen cangkang konvensional dan kontinum dalam *software* ABAQUS CAE. Ketebalan struktur dalam elemen cangkang konvensional ditentukan dari input definisi penampang sedangkan dalam elemen cangkang kontinum ditentukan dari geometri nodal. Elemen cangkang konvensional memiliki derajat kebebasan berupa lendutan dan rotasi sedangkan elemen cangkang kontinum berupa lendutan. Secara umum elemen cangkang kontinum mirip dengan elemen *3D Solid* tetapi dengan persamaan kinematik dan konstitutif yang serupa dengan elemen cangkang konvensional.



Gambar 5. Elemen cangkang (*shell*) kontinum dan konvensional (Abaqus Analysis User's Manual)

Pemodelan struktur *OSD* dilakukan dengan bantuan *software* ABAQUS CAE menggunakan elemen cangkang konvensional. Penggunaan elemen ini harus memperhatikan permukaan atas dan bawah cangkang karena berhubungan dengan arah beban bekerja (lihat Gambar 6). Permukaan atas pada elemen cangkang konvensional adalah permukaan pada arah sumbu positif.



Gambar 6. Permukaan atas dan bawah elemen cangkang konvensional (Abaqus Analysis User's Manual)

KONDISI KUAT BATAS ULTIMIT, BATAS LAYAN, DAN FATIGUE

Kuat Batas Utimit

Kondisi kuat batas ultimit berupa kapasitas *OSD* dalam mendukung beban yang ditentukan oleh geometri dan sifat material. Dalam AASHTO LRFD 2012,

ada dua kondisi kuat batas yaitu kuat batas I dan II yang keduanya harus dipenuhi pada kondisi *buckling* dan *yielding*. Pada kuat batas I bekerja beban hidup HL-93 yang merepresentasikan lalu lintas secara acak, sedangkan pada kuat batas II bekerja beban hidup dengan besar sesuai permintaan *owner*. Untuk disain *OSD* dalam paper ini digunakan kuat batas I dengan beban hidup truk standar RSNI T-02-2005. Kondisi kuat batas ultimit menggunakan faktor beban mati 1,25 dan faktor beban mati tambahan 1,50. Sedangkan faktor beban hidup (truk) 1,75 dengan faktor beban dinamis 33%.

Batas Layan

Kondisi batas layan menggunakan faktor beban 1,0 untuk masing-masing komponen beban dengan faktor beban dinamis untuk beban hidup (truk) 33%. Dalam AASHTO LRFD 2012, kondisi tersebut termasuk dalam kondisi batas layan I. Untuk *OSD*, kondisi batas layan I harus dipenuhi untuk semua lendutan ijin pada pelat ($L/3000$) dan rusuk (*ribs*) ($L/1000$) dan defleksi relatif rusuk (*ribs*) yang berdekatan (2 mm).

Fatigue

Kondisi batas *fatigue* dalam AASHTO LRFD 2012 ada dua macam yaitu disain umur tak hingga (*fatigue I*) dan disain umur hingga (*fatigue II*). Untuk disain *OSD* pada paper ini digunakan *fatigue II*. Kondisi batas *fatigue* menggunakan faktor beban 1,0 untuk masing-masing komponen beban dengan faktor beban dinamis untuk beban hidup (truk) 15% dan harus memenuhi kondisi berikut ini:

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n \tag{9}$$

dengan,

γ = faktor beban untuk kombinasi beban *fatigue* (0,75 untuk *fatigue I* dan 1,50 untuk *fatigue II*)

(Δf) = tegangan ultimit akibat kombinasi beban *fatigue* (kN/m^2)

$(\Delta F)_n$ = tahanan *fatigue* nominal (kN/m^2)

Untuk *fatigue I*:

$$(\Delta F)_n = (\Delta F)_{TH} \tag{10}$$

Untuk *fatigue II*:

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{11}$$

$$N = (365)(75) n (ADTT)_{SL} \tag{12}$$

dengan,

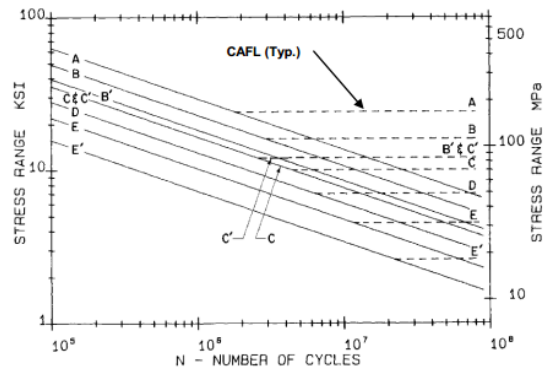
A = konstanta yang diperoleh dari Tabel 6.6.1.2.5-1 AASHTO LRFD 2012

N = jumlah siklus beban

$(ADTT)_{SL}$ = LHR truk untuk satu lajur lalu lintas (truk/hari)

$(\Delta F)_{TH}$ = *constant-amplitude fatigue threshold* dari Tabel 6.6.1.2.5-3 AASHTO LRFD 2012

Untuk disain umur *fatigue t* tahun selain 75 tahun maka *t* dapat dimasukkan ke dalam persamaan (12). Nilai $(\Delta F)_n$ dapat dicari menggunakan persamaan (11) dan kurva S-N (lihat Gambar 7.)



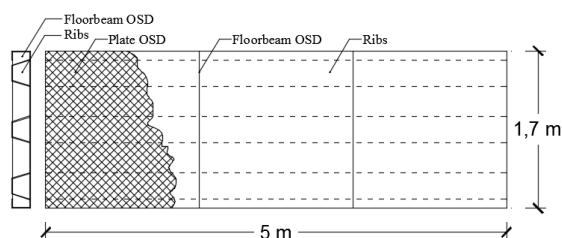
Gambar 7. Kurva S-N untuk setiap kategori detail (FHWA, 2012)

GEOMETRI DAN PEMBEBANAN PANEL OSD

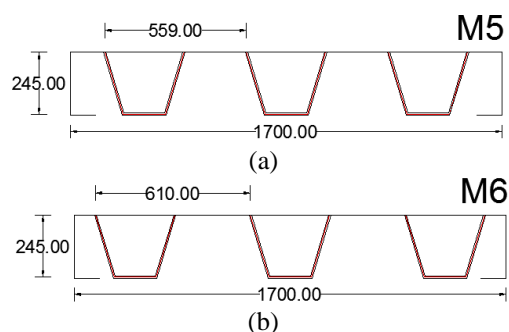
Geometri OSD

Panel *OSD* didisain dengan dimensi 1,70 x 5,00 m menyesuaikan jarak antar *stringer* dan *crossbeam* dari jembatan rangka baja standar Bina Marga bentang 60 m (lihat Gambar 8.). Dimensi dan jarak antar *ribs* mengikuti *Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridge* yang diterbitkan FHWA.

Tinggi profil *ribs* diambil 245 mm mendekati tebal pelat lantai beton eksisting 255 mm. Jarak antar *ribs* yang ditinjau ada 2 yaitu 559 mm dan 610 mm (lihat Gambar 9). Dari hasil analisis didapatkan jarak antar *ribs* optimum adalah 610 mm dan menghasilkan tegangan yang lebih kecil dibanding jarak antar *ribs* 559 mm untuk ketebalan pelat yang sama.



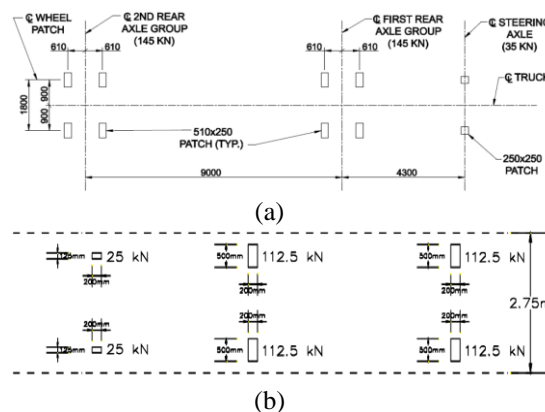
Gambar 8. Panel OSD 1,70 x 5,00 m



Gambar 9. Potongan melintang panel OSD (a) jarak *ribs* 559 mm (b) jarak *ribs* 610 mm

Pembebanan OSD

Di Indonesia belum diterbitkan peraturan mengenai OSD sehingga dalam paper ini digunakan AASHTO LRFD 2012 *Bridge Design Specifications* dan *Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridge* yang diterbitkan FHWA dalam proses disain namun dengan sedikit modifikasi berupa penggunaan beban truk standar sesuai dengan RSNI T-02-2005 Standar Pembebanan untuk Jembatan. Hal ini dilakukan untuk mengakomodasi beban truk standar yang berlaku di Indonesia dan beban truk standar RSNI T-02-2005 lebih besar dibandingkan dengan AASHTO LRFD 2012 sehingga didapatkan disain yang lebih konservatif (lihat Gambar 10). Pada Tabel 1. disajikan beban rencana untuk kondisi kuat batas ultimit, batas layan, dan *fatigue*.



Gambar 10. (a) Beban truk standar HL-93 (AASHTO LRFD, 2012) dan (b) beban truk standar (RSNI T-02-2005)

Tabel 1. Beban rencana OSD

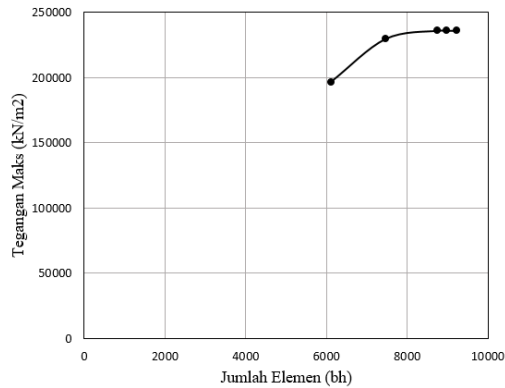
Kondisi Batas	Beban Rencana		
	Berat Sendiri (kN/m ²)	Beban Mati Tambahan (kN/m ²)	Beban Truk (kN/m ²)
Kuat Batas Ultimit	Berat sendiri OSD dihitung otomatis oleh software ABAQUS CAE	4,036	2618,438
Batas Layan		2,691	1496,250
<i>Fatigue</i>		2,691	1293,750

PEMODELAN STRUKTUR

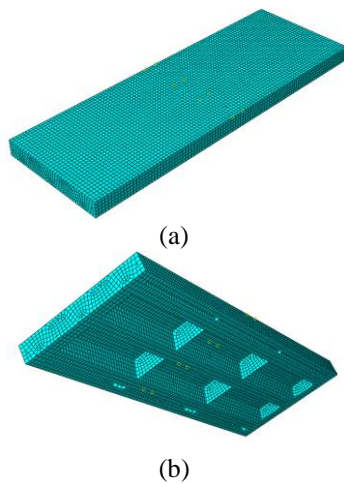
Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dilakukan dengan bantuan *software* ABAQUS CAE menggunakan elemen *shell*. Dalam *Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridge* disebutkan analisis struktur OSD menggunakan metode elemen hingga cukup menggunakan analisis linier tanpa memperhitungkan sifat non-linier geometri dan material. Dalam paper ini diteliti struktur OSD dengan mutu baja BJ-37 dengan $f_y = 240$ MPa dan $f_u = 370$ MPa. Penentuan ukuran *mesh* yang digunakan dalam model numeris berdasarkan pada hasil uji konvergensi *mesh* (lihat Gambar 11). Model struktur OSD dalam paper ini menggunakan ukuran *mesh* 0,05 x 0,05 m (lihat Gambar 12). Beban mati tambahan diinput sebagai beban merata pada pelat OSD dan beban truk diinput sebagai beban roda di tengah pelat OSD (lihat Gambar 13). Hasil dari pemodelan struktur menggunakan *software* ABAQUS CAE

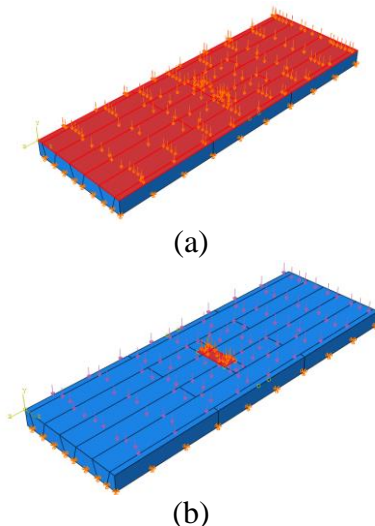
berupa kontur tegangan dan lendutan dapat dilihat pada Gambar 14.



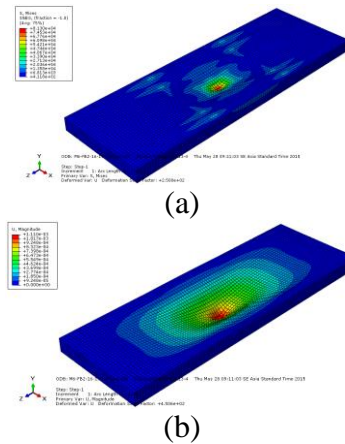
Gambar 11. Grafik hubungan jumlah elemen dan tegangan maksimum (uji konvergensi *mesh*)



Gambar 12. Ukuran *mesh* OSD (a) tampak atas OSD (b) tampak bawah OSD



Gambar 13. Input beban (a) beban mati tambahan (b) beban truk



Gambar 14. (a) Kontur tegangan OSD (b) Lendutan OSD

HASIL DISAIN DAN PEMBAHASAN

Kondisi batas yang paling menentukan dalam disain *OSD* adalah *fatigue*. Hal ini dapat dilihat dalam Tabel 2 s/d 4 dengan nilai tegangan pada batas *fatigue* mendekati nilai tegangan izin *fatigue* namun nilai tegangan pada kuat batas ultimit masih jauh di bawah tegangan leleh baja yang digunakan. Kebutuhan tebal *ribs*, *floorbeam*, dan *plate* untuk variasi umur rencana (10, 20, 30, 40, dan 50 tahun) dan LHR (1000, 2000, dan 3000 truk/hari) disajikan dalam Tabel 2 s/d 4. Kebutuhan tebal *ribs*, *floorbeam*, dan *plate* untuk masing-masing variasi umur rencana dan LHR telah memenuhi kuat batas layan (tegangan yang terjadi kurang dari f_y), batas layan (lendutan yang terjadi kurang dari lendutan ijin), dan *fatigue* (tegangan yang terjadi kurang dari tegangan izin *fatigue*).

Penggunaan *OSD* untuk *redecking* jembatan rangka baja standar Bina Marga bentang 60 m dapat mengurangi berat lantai jembatan 19,802%-42,186% dengan pengurangan berat total jembatan 9,660%-20,581% untuk variasi umur rencana (10, 20, 30, 40, dan 50 tahun) dan variasi LHR (1000, 2000, dan 3000 truk/hari) dengan berat lantai beton eksisting = $(0,255 \times 6,80 \times 60) \times 24 \text{ kN/m}^3/10 = 249,696 \text{ ton}$.

Hubungan antara umur rencana *OSD* dan tegangan izin *fatigue* untuk variasi umur rencana (10, 20, 30, 40, dan 50 tahun) dan variasi LHR (1000, 2000, dan 3000 truk/hari) disajikan dalam Gambar 15(a). Sedangkan hubungan antara umur rencana *OSD* dengan pengurangan berat sendiri jembatan untuk masing-masing variasi LHR disajikan dalam Gambar 15(b).

Tabel 2. Berat sendiri dan kebutuhan tebal pelat, *floorbeam*, dan *ribs OSD* pada LHR 3000 truk/hari

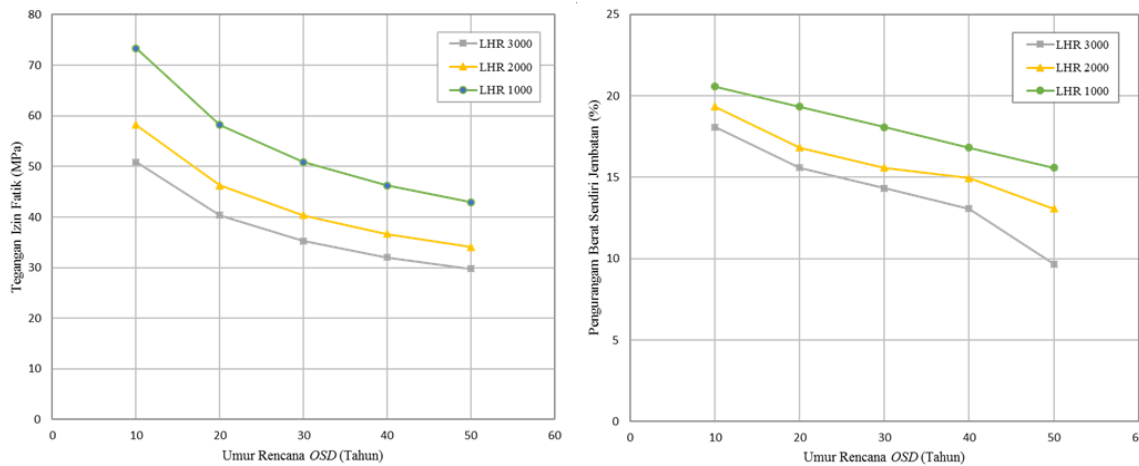
No.	Umur Rencana OSD (tahun)	LHR (truk/hari)	N	Tegangan Izin Fatik (MPa)	Tegangan Leleh, <i>f_y</i> (MPa)	Lendutan Izin 2 Ribs yang Berdekatan (mm)	Tegangan pada Kondisi Batas Fatik (MPa)	Tegangan pada Kuat Batas Ultimit (MPa)	Perbedaan Lendutan 2 Ribs yang Berdekatan (mm)	Kebutuhan Tebal Baja			Berat Sendiri Tiap Panel (1,7 x 5 m)		Pengurangan Berat Jembatan Setelah Redecking (%)
										Ribs (mm)	Floorbeam (mm)	Plate (mm)	Berat Panel OSD (ton)	Berat Lantai Jembatan Setelah Redecking (%)	
1	10	3000	1,10E+07	50,878	240	2,00	49,002	132,087	1,061	16	16	20	3,274	37,055	18,078
2	20	3000	2,19E+07	40,382	240	2,00	38,249	103,070	0,916	16	16	24	3,541	31,924	15,575
3	30	3000	3,29E+07	35,277	240	2,00	34,548	93,082	0,863	16	16	26	3,675	29,359	14,323
4	40	3000	4,38E+07	32,051	240	2,00	31,599	85,004	0,816	16	16	28	3,808	26,794	13,072
5	50	3000	5,48E+07	29,754	240	2,00	29,472	79,406	0,699	19	19	28	4,172	19,802	9,660

Tabel 3. Berat sendiri dan kebutuhan tebal pelat, *floorbeam*, dan *ribs OSD* pada LHR 2000 truk/hari

No.	Umur Rencana OSD (tahun)	LHR (truk/hari)	N	Tegangan Izin Fatik (MPa)	Tegangan Leleh, <i>f_y</i> (MPa)	Lendutan Izin 2 Ribs yang Berdekatan (mm)	Tegangan pada Kondisi Batas Fatik (MPa)	Tegangan pada Kuat Batas Ultimit (MPa)	Perbedaan Lendutan 2 Ribs yang Berdekatan (mm)	Kebutuhan Tebal Baja			Berat Sendiri Tiap Panel (1,7 x 5 m)		Pengurangan Berat Jembatan Setelah Redecking (%)
										Ribs (mm)	Floorbeam (mm)	Plate (mm)	Berat Panel OSD (ton)	Berat Lantai Jembatan Setelah Redecking (%)	
1	10	2000	7,30E+06	58,241	240	2,00	57,117	153,983	1,166	16	16	18	3,141	39,620	19,329
2	20	2000	1,46E+07	46,226	240	2,00	42,929	115,700	0,981	16	16	22	3,408	34,490	16,826
3	30	2000	2,19E+07	40,382	240	2,00	38,249	103,070	0,916	16	16	24	3,541	31,924	15,575
4	40	2000	2,92E+07	36,690	240	2,00	36,296	97,798	0,888	16	16	25	3,608	30,642	14,949
5	50	2000	3,65E+07	34,060	240	2,00	31,599	85,004	0,816	16	16	28	3,808	26,794	13,072

Tabel 4. Berat sendiri dan kebutuhan tebal pelat, *floorbeam*, dan *ribs OSD* pada LHR 1000 truk/hari

No.	Umur Rencana OSD (tahun)	LHR (truk/hari)	N	Tegangan Izin Fatik (MPa)	Tegangan Leleh, <i>f_y</i> (MPa)	Lendutan Izin 2 Ribs yang Berdekatan (mm)	Tegangan pada Kondisi Batas Fatik (MPa)	Tegangan pada Kuat Batas Ultimit (MPa)	Perbedaan Lendutan 2 Ribs yang Berdekatan (mm)	Kebutuhan Tebal Baja			Berat Sendiri Tiap Panel (1,7 x 5 m)		Pengurangan Berat Jembatan Setelah Redecking (%)
										Ribs (mm)	Floorbeam (mm)	Plate (mm)	Berat Panel OSD (ton)	Berat Lantai Jembatan Setelah Redecking (%)	
1	10	1000	3,65E+06	73,379	240	2,00	68,349	184,287	1,310	16	16	16	3,007	42,186	20,581
2	20	1000	7,30E+06	58,241	240	2,00	57,117	153,983	1,166	16	16	18	3,141	39,620	19,329
3	30	1000	1,10E+07	50,878	240	2,00	49,002	132,087	1,061	16	16	20	3,274	37,055	18,078
4	40	1000	1,46E+07	46,226	240	2,00	42,929	115,700	0,981	16	16	22	3,408	34,490	16,826
5	50	1000	1,83E+07	42,912	240	2,00	38,249	103,070	0,916	16	16	24	3,541	31,924	15,575



Gambar 15. (a) Grafik hubungan umur rencana OSD dengan tegangan izin *fatigue*, (b) Grafik hubungan umur rencana OSD dengan pengurangan berat sendiri jembatan

SIMPULAN DAN SARAN

Penggunaan *OSD* untuk *redecking* jembatan rangka baja standar Bina Marga bentang 60 m dapat mengurangi berat lantai jembatan 19,802%-42,186% dengan pengurangan berat total jembatan antara 9,660%-20,581% untuk variasi umur rencana (10, 20, 30, 40, dan 50 tahun) dan variasi LHR (1000, 2000, dan 3000 truk/hari) dengan berat lantai beton eksisting = $(0,255 \times 6,80 \times 60) \times 24 \text{ kN/m}^3 / 10 = 249,696 \text{ ton}$.

Penelitian yang disajikan dalam paper ini masih dibatasi oleh beberapa batasan penelitian. Oleh karena itu, berikut ini disampaikan beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya. Untuk hasil analisis *fatigue* yang lebih akurat, perlu dilakukan survey lalu lintas pada jembatan yang ditinjau sehingga disain *OSD* sesuai dengan kondisi arus lalu lintas di lapangan dan memungkinkan untuk didapatkan disain yang lebih hemat pada arus lalu lintas yang rendah. Pengurangan berat sendiri lantai jembatan mengakibatkan penurunan gaya-gaya dalam yang bekerja pada rangka jembatan. Namun demikian, perlu dilakukan pengecekan frekuensi natural jembatan agar getaran yang terjadi akibat beban angin atau kendaraan yang melintasi jembatan, masih dalam taraf aman sehingga tidak terjadi resonansi.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. 2012. *AASHTO LRFD 2012 Bridge Design Specification*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- Badan Standardisasi Nasional. 2005. *RSNI T-02-2005 Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan*. BSN, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2005. *RSNI T-03-2005 Standar Pembebanan untuk Jembatan*. BSN, Jakarta.
- Direktorat Jendral Bina Marga. 2010. "Rencana Strategis 2010-2014 Direktorat Jendral Bina Marga". Direktorat Jendral Bina Marga. Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.
- FHWA. 2012. *Manual for Design, Construction, and Maintenance of*

Orthotropic Steel Deck Bridge. US Department of Transportation Federal Highway Administration, Washington D.C.

- Mangus, A.R. and Sun, S. 2000. *Orthotropic Deck Bridge*. Chapter 14th Bridge Engineering Handbook. CRC Press, New York.
- Sukmana, F. dan Vaza, H. 2008. "Jembatan Indonesia: Sekarang dan Mendatang". Konferensi Regional Teknik Jalan Ke-10, Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia, 11-12 November 2008, Surabaya.
- Troitsky, M.S. 1987. *Orthotropic Bridge Theory and Design*. 2nd Ed. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland OH.
- Wolchuk, R. 1963. *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridge*. American Institute of Steel Construction, Chicago