

# ANALISIS ELEMEN HINGGA KOMPONEN DIAFRAGMA PADA DEK BAJA TIPE ORTOTROPIK MELINTANG JEMBATAN (FINITE ELEMENT ANALYSIS OF DIAPHRAGM COMPONENT OF A TRANSVERSE ORTHOTROPIC STEEL BRIDGE DECK)

Anton Surviyanto

Puslitbang Jalan dan Jembatan

Jl. A.H. Nasution No.264, Bandung 40294

e-mail: anton.surviyanto@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 27 Desember 2012; disetujui: 01 April 2013

## ABSTRAK

Pelat baja ortotropik telah banyak digunakan pada struktur jembatan modern untuk mendistribusikan beban lalu-lintas dalam dek dan sebagai pengaku elemen pelat langsing dalam tekan. Oleh karena sifat dari sistem struktur ortotropik ini memiliki karakteristik kekakuan dalam arah longitudinal dan transversal yang unik, maka diperlukan analisis yang lebih mendalam dalam hal detailing komponen-komponen strukturnya yang sesuai dengan persyaratan kekuatan dan layannya. Desain dengan analisis tiga dimensi (3D) merupakan persyaratan dalam desain yang penting untuk mengetahui konsentrasi tegangan lokal pada komponen pada dek baja ortotropik. Dalam makalah ini, analisis statik elemen hingga 3D dilakukan untuk memodelkan dek baja ortotropik dengan diafragma menerus dan diafragma coak. Hasil kedua model dibandingkan dalam perilaku sistem struktur lokal dengan membandingkan respon dan kinerja struktur akibat beban truk standar BMS. Dari analisis elemen hingga dapat disimpulkan bahwa tegangan tarik dan tekan pada panel ortotropik yang terjadi untuk kombinasi beban ultimit (Ultimate Limit States/ULS) ditengah rusuk dan antar rusuk panel ortotropik memenuhi kriteria batasan tegangan izin  $0,9$  tegangan leleh ( $F_y$ ). Begitu juga untuk tegangan geser maksimum memenuhi kriteria batasan tegangan izin  $0,58F_y$ . Konsentrasi tegangan ekuivalen Von Mises lokal yang terjadi untuk diafragma menerus sebesar  $328$  MPa, sedangkan diafragma coak sebesar  $142$  MPa. Sehingga perbandingan tegangan Von Mises ini sebesar  $2,31$  dapat diturunkan nilainya dengan penggunaan tipe diafragma coak. Bentuk diafragma dengan tipe menerus akan menyebabkan konsentrasi tegangan. Sedangkan bentuk diafragma yang coak dengan kelengkungan tertentu akan mengurangi konsentrasi tegangan lokal pada diafragma.

**Kata kunci:** analisis elemen hingga, dek baja ortotropik melintang, komponen diafragma, tegangan Von Mises, konsentrasi tegangan

## ABSTRACT

Many of the world's most magnificent modern bridge structures utilize the orthotropic steel plate systems as one of the basic structural building blocks for distribution of traffic loads in decks and for the stiffening of slender plate elements in compression. Because of the properties of orthotropic structural system has unique characteristics of rigidity in the longitudinal and transversal directions, therefore it would require a more in-depth analysis in terms of detailing structural components in accordance with the requirements of strength and serviceability. Design with the three dimension (3D) analysis is an important requirement in the design to determine the local stress concentration at the components on orthotropic steel deck. In this paper, a 3D finite element static analysis performed to model orthotropic steel deck with direct diaphragm and the cut-out diaphragm. Results of both models are compared in the local structure of the system behavior by comparing the response and performance of the structure due to BMS standard truck load. From the finite element analysis, it can be concluded that the tensile and compression stress in the orthotropic panel that occurred for Ultimate Limit States (ULS) load combination of middle-ribs and adjacent-rib orthotropic panel below the criteria of  $0.9 F_y$ . While for the shear stress with the maximum shear stress limits below the criteria of  $0.58F_y$ . Von Mises equivalent local stress for continuous diaphragm is  $328$  MPa, while the diaphragm cut-out is  $142$  MPa. Thus, the Von Mises stress ratio of  $2.31$  can be lowered by the use of a diaphragm-type cut-out. The shape of diaphragm with continuous type will cause stress concentration. While the shape of the cut-out diaphragm with certain curvature will reduce the local stress concentration in the diaphragm.

**Keywords:** finite element analysis, transverse orthotropic steel deck, diaphragm component, Von Mises stress, stress concentration

## PENDAHULUAN

Pelat baja ortotropik telah banyak digunakan pada struktur jembatan modern untuk mendistribusikan beban lalu-lintas dalam dek dan sebagai pengaku elemen pelat langsing dalam tekan. Dek baja ortotropik merupakan salah satu sistem lantai jembatan yang menggunakan pelat baja pra-cetak dengan kekakuan yang tidak sama dalam dua arah yang saling tegak lurus. Kekakuan yang lebih tinggi umumnya direncanakan pada suatu arah tertentu dengan penempatan profil pengaku dalam arah tersebut. Salah satu keunggulan utama dari sistem lantai jembatan menggunakan pelat baja ortotropik ini, yaitu beratnya yang lebih ringan, sehingga panjang bentang jembatan dapat ditingkatkan.

Rangkuman proyek sukses dek baja ortotropik di dunia dapat ditemukan dalam referensi oleh Troitsky (1985), Huang *et. al.* (2008), Hoopah (2004), Korniyiv (2004), and Choi *et. al.* (2008). Meskipun terdapat perbedaan dalam desain dan *detailing* praktis, namun terdapat konsistensi sebagai sumber keilmuan yang telah dibagikan dalam berbagai cara.

Dalam proses desain dek baja ortotropik diperlukan verifikasi desain, sebuah pendekatan baru, yang memberikan solusi untuk desain dek jembatan biasa. Aspek-aspek yang menjadi kontrol dalam desain panel dek ortotropik lebih banyak pada kebutuhan lokal dibandingkan global. Panel dengan desain dan *detailing* yang baik memiliki potensi untuk menjadi modul standar yang dapat diterapkan kedepannya. Apabila panel dek dapat dikembangkan dan diverifikasi, maka kebutuhan desain akan menjadi berkurang untuk tipe jembatan ini. Namun apabila jembatan memiliki karakteristik unik, maka membutuhkan analisis yang tepat untuk masing-masing karakteristik.

Oleh karena sifat dari sistem struktur ortotropik ini memiliki karakteristik kekakuan dalam arah longitudinal dan transversal yang unik, maka diperlukan analisis yang lebih mendalam dalam hal *detailing* komponen-komponen strukturnya yang sesuai dengan persyaratan kekuatan dan layannya. Terdapat level desain yang ditentukan tergantung pada penerapan dan ketersediaan data bagi desainer.

Level 3 desain dengan analisis tiga dimensi (3D) merupakan persyaratan dalam desain yang penting untuk mengetahui konsentrasi tegangan lokal pada komponen pada dek baja ortotropik. Dengan demikian, maka perlu dilakukan penelitian *detailing* komponen-komponen struktur dek ortotropik dengan analisis elemen hingga.

Dalam makalah ini, analisis statik 3D elemen hingga dilakukan untuk memodelkan dek baja ortotropik dengan diafragma menerus dan diafragma coak. Hasil kedua model dibandingkan dalam perilaku sistem struktur lokal dengan membandingkan respon dan kinerja struktur akibat beban truk standar.

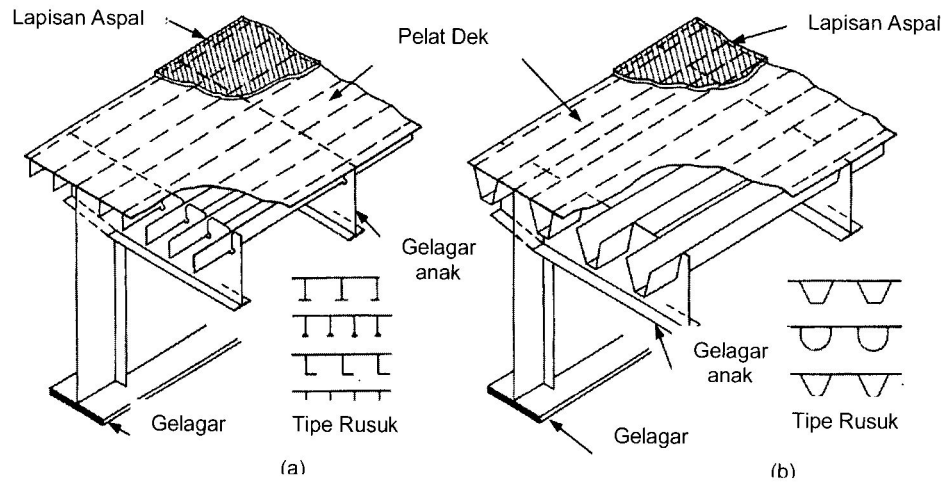
## KAJIAN PUSTAKA

Pelat baja ortotropik telah banyak digunakan pada struktur jembatan modern untuk mendistribusikan beban lalu-lintas dalam dek dan sebagai pengaku elemen pelat langsing dalam tekan.

Umumnya, dek baja ortotropik terdiri dari pelat tebal, diperkaku oleh seri rusuk longitudinal dengan spasi yang dekat dan ditahan oleh balok transversal ortogonal (Gambar 1). Dek memiliki karakteristik kekakuan dalam arah longitudinal dan transversal, oleh karena itu dek ditinjau sebagai struktur anisotropik. Menurut Troitsky (1987), oleh karena rusuk dan balok saling tegak lurus dalam kedua arah, sifat elastik berbeda atau anisotropik, maka sistem secara keseluruhan dikenal sebagai anisotropik-ortogonal atau disingkat ortotropik.

Dek ortotropik ini efisien karena integral dengan perletakan rangka struktur atas jembatan, seperti *flens* atas menumpu pada *stringer* transversal dan gelagar longitudinal. Hal ini dapat meningkatkan kekakuan dan mengurangi material dalam desain komponennya.

Beban-beban umumnya ditransfer oleh *stringer* secara transversal ke sistem utama penahan beban, seperti gelagar longitudinal. Karakteristik utama dek ortotropik yaitu mempunyai potensi pemeliharaan yang minimal untuk memperpanjang masa layan dan desain modul yang standar, bila dibandingkan dengan konstruksi jembatan konvensional.



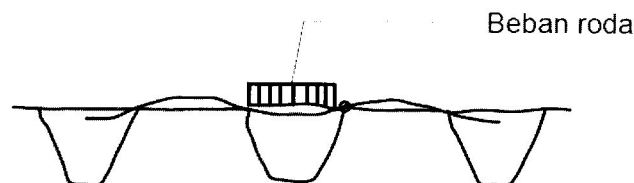
**Gambar 1.** Komponen dek baja ortotropik gelagar jembatan (a) Rusuk terbuka (b) Rusuk tertutup (AISC 1963)

### Mekanisme perilaku dek ortotropik

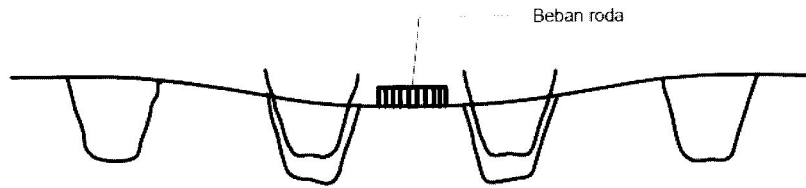
Metode konvensional analisis jembatan mengasumsikan bahwa sistem struktur secara keseluruhan digabungkan dengan beberapa sub-elemen independen mendasar seperti dek, *stringer*, *cross girder* dan struktur utama. Pendekatan ini berdasarkan asumsi setiap elemen beraksi secara relatif independen dan transfer beban dari elemen tersebut ke elemen berikutnya tanpa pertimbangan interaksi diantara sub-elemen pada kenyataannya. Untuk penerapannya, hal ini menunjukkan desain konservatif dan dapat diimplementasikan dengan metodologi desain yang sederhana. Pada jembatan dengan dek ortotropik, pelat lantai, rusuk, *stringer* dan gelagar utama, kesemuanya terintegrasi dalam satu unit struktur. Panel dek harus berkinerja beberapa fungsi secara simultan, meliputi distribusi beban roda dan beraksi pada *flens* atas *stringer* dan gelagar utama, dek ortotropik berkinerja seperti fungsi tersebut membuat penggunaan material menjadi sangat efisien namun interaksinya tidak dapat diabaikan.

### Deformasi pelat dek lokal

Distribusi beban bermula dari transfer beban roda lokal dari pelat dek ke perletakan dinding rusuk. Respon ini dipengaruhi oleh spazi dinding rusuk dan ketebalan relatif (kekakuan lentur), serta pelat dek dan rusuk (Gambar 2). Tegangan yang terjadi dari mekanisme ini bersifat lokal, maka tegangan ini sensitif terhadap ukuran permukaan beban roda dan dispersi beban yang dapat terjadi akibat lapisan aspal. Kebanyakan, sumbu depan truk desain dengan hanya satu ban yang dapat memaksimalkan respon dari mekanisme ini. Sistem ini penting dalam desain terutama untuk faktor fatik dan batas kekuatan.



**Gambar 2.** Aksi deformasi pelat dek lokal



Gambar 3. Deformasi panel

### Deformasi panel

Analisis untuk mengetahui deformasi ini membutuhkan pengertian perilaku distribusi beban dua arah dari panel ortotropik ketika dibebani di luar bidang, yang merupakan masalah kompleks (Gambar 3). Salah satu solusi menggunakan teori elastisitas pelat (pelat dibebani normal terhadap bidang pelat). Solusi ditemukan oleh persamaan *Huber*. (Robert Connor *et. al.* 2012)

### Pendekatan desain umum

Panel baja ortotropik diterapkan dengan bermacam cara. Satu bentuk adalah dengan sistem dek secara terpisah, desain hanya membutuhkan pengaruh lokal yang ditinjau, seperti bentang dek antar titik tengah tumpuan dari struktur atas global. Bentuk kedua adalah panel yang beraksi integral pada *flens* atau badan dari pelat baja. Hal ini membutuhkan pertimbangan pengaruh lokal dan kebutuhan global dari struktur atas. Bentuk ketiga adalah dek integral kaku terpasang pada tumpuan sistem struktur atas jembatan. Untuk kasus bentuk ketiga ini, kebutuhan panel akibat respon global dari struktur eksisting harus ditinjau secara hati-hati untuk mengakomodasi interaksi yang kompleks.

### Level desain

Terdapat level desain yang ditentukan tergantung pada penerapan dan ketersediaan data bagi desainer. Berikut adalah rangkuman masing-masing level desain:

Level desain 1 – Level desain ini berdasarkan pada analisis struktur yang sedikit atau tidak sama sekali, namun dengan melakukan pemilihan desain yang diverifikasi memiliki kecukupan tahanan berdasarkan uji eksperimental (baru atau sebelumnya). Semua detail harus konsisten dengan spesifikasi *AASHTO LRFD*. Level 1 desain ini dapat digunakan sebagai basis untuk desain proyek baru tanpa harus menguji lagi dan harus disetujui oleh pemilik.

Level desain 2 – level desain ini berdasarkan analisis detail panel tertentu yang

dapat dievaluasi dengan teknik analisis satu dimensi (1D) atau dua dimensi (2D) yang sederhana dengan kecukupan akurasi yang dibutuhkan. Perhitungan hanya mempertimbangkan tegangan nominal dan tidak memperhitungkan konsentrasi lokal. Teknik analisis ini meliputi model strip, metode *Pelikan/Esslinger*, model *Vierendeel*, atau metode lainnya telah terkalibrasi terhadap data uji eksperimental. Tidak semua detail panel ortotropik dapat didesain dengan level 2.

Level desain 3 – level desain ini berdasarkan analisis 3D dari panel untuk mengkuantifikasi tegangan yang lebih akurat untuk semua komponen dan sambungan. Perhitungan mempertimbangkan konsentrasi tegangan lokal pada kombinasi beban. Hal ini membutuhkan sub-model panel dalam model global sistem struktur atas jembatan.

### Prosedur desain berdasarkan *AASHTO LRFD*

Desain panel ortotropik meliputi kekuatan, layan, *fatigue*, dan konstruksi. Semua keadaan batas tersebut perlu ditinjau untuk desain lengkap, namun keadaan batas *fatigue* yang akan mengontrol mayoritas detail desain.

### Keadaan batas ultimit (*ULS*)

Keadaan batas kekuatan menahan beban-dukung ditentukan oleh geometri dan sifat material. Dengan demikian, kuat leleh dan/atau sifat geometris, seperti kehilangan stabilitas, harus ditinjau dalam desain panel ortotropik. Geometri global dan atau lokal dapat mengatur pertimbangan stabilitas.

Pengujian telah menunjukkan bahwa panel dek baja ortotropik dapat memiliki kekuatan cadangan yang luar biasa untuk beban lateral di luar kuat leleh, karena membran kaku. Cadangan ini tergantung pada kondisi perletakan. Pendekatan untuk desain kekuatan konservatif harus membatasi tegangan terhadap kuat leleh minimum yang ditentukan atau tegangan tekuk kritis.

Desain kekuatan harus mempertimbangkan tuntutan berikut: lentur dan geser rusuk, lentur dan geser *stringer*, dan tekanan aksial. Rusuk, termasuk bagian efektif dari pelat dek, harus dievaluasi untuk kekuatan lentur dan geser untuk bentang antar *stringer*. *Stringer*, termasuk bagian efektif dari pelat dek, harus dievaluasi untuk kekuatan lentur dan geser untuk bentang antara *girder* utama atau badan. pengurangan penampang *stringer* karena pemotongan rusuk harus ditinjau dengan memeriksa lentur dan geser di bagian badan dihilangkan. Ketika panel adalah bagian dari *flange* gelagar utama, panel harus dievaluasi untuk kuat tekan dalam bidang (*in-plane*) berdasarkan pertimbangan stabilitas.

Pada kebanyakan kasus desain pelat ortotropik, keadaan batas kekuatan meliputi beban hidup dan beban mati sebagai beban utama dalam kombinasi beban. Dalam *AASHTO LRFD*, ini adalah keadaan batas Kekuatan I dan II dan harus memenuhi untuk tekuk dan leleh. Kombinasi beban Kekuatan I diterapkan dalam hubungannya dengan model beban hidup *HL-93* mewakili lalu-lintas acak, sedangkan kombinasi beban Kekuatan II diterapkan dengan beban ijin yang ditentukan pemilik (misalnya, model beban izin *Caltrans P-15*). Seringkali, spesifikasi desain jembatan akan mencakup keadaan batas Kekuatan untuk situasi khusus.

### **Keadaan batas layan (SLS)**

*Service Limit States (SLS)* ada untuk menyediakan pemeriksaan guna pemeliharaan selama masa layan jembatan. *SLS* juga harus ditinjau sebagai sarana untuk meminimalkan biaya pemeliharaan dan gangguan lalu-lintas untuk perbaikan. Selain itu, *SLS* ini dapat mencakup batas deformasi elastis dan plastis dan bentuk lain dari deteriorasi penurunan layan, seperti *debonding* atau retak pada permukaan yang mengenakan dek baja ortotropik.

Pada *SLS* berlaku faktor beban sama dengan 1,0 untuk setiap komponen beban signifikan. Dalam *AASHTO LRFD*, ini adalah *SLS I*. Untuk dek baja ortotropik, *SLS I* harus memenuhi semua batas lendutan: pelat lantai (bentang/300) dan rusuk (bentang/1000) dan lendutan relatif rusuk yang berdekatan (2 mm). Batas-batas lendutan dimaksudkan untuk mencegah kerusakan dini dari permukaan yang digunakan.

*SLS II* berlaku untuk desain sambungan baut terhadap gelincir pada kondisi beban berlebih. Hal ini harus ditinjau untuk desain rusuk dan sambungan *stringer*. *SLS III* dan *IV* adalah untuk tegangan tarik pada penampang beton prategang di bawah beban hidup kendaraan, dan tegangan tarik pada bangunan atas beton prategang di bawah beban angin. Dengan demikian, tak satu pun dari *SLS* ini berlaku untuk dek baja ortotropik.

### **Fatigue**

Dua jenis desain yang mungkin dalam konteks Spesifikasi *AASHTO LRFD* untuk kelelahan: desain *Fatigue I* untuk *infinite-life* dan *Fatigue II* untuk *finite-life*. Dek baja ortotropik diatur oleh beban roda, mereka mengalami jutaan siklus berulang dari beban roda sehingga dibutuhkan desain *Fatigue I*. Sebagai perbandingan, kode lain mengakui konsep prediksi masa *fatigue* lain selain konsep *infinite-life* dalam *AASHTO LRFD*. Misalnya, Eurocode (*ECS 1992*) menentukan kurva resistensi kelelahan dengan kemiringan hanya menurun di bawah beberapa nilai ambang batas jangkauan tegangan, bukan ambang batas horisontal *AASHTO* (batas amplitudo konstan kelelahan) untuk variabel pembebanan amplitudo. Spesifikasi lainnya menggunakan konsep *infinite-life* untuk amplitudo kelelahan konstan, sementara mengandalkan kurva *fatigue life* bi-linear untuk kurva amplitudo variabel untuk estimasi masa tertentu. *Fatigue II finite-life* dapat lebih hemat biaya proporsi ketika volume lalu-lintas tidak terlalu tinggi.

### **Konstruksi**

Kekuatan dan stabilitas panel ortotropik dan integritas permukaan yang digunakan harus dipertahankan selama semua tahap konstruksi, termasuk penanganan, penyimpanan, pengiriman, dan ereksi. Seringnya, panel ortotropik dikirimkan oleh kapal laut, yang dapat mempengaruhi skenario pembebanan pada panel. Ada laporan dari kegagalan penggunaan permukaan akibat tegangan yang terjadi selama ereksi pra-panel berlapis.

## HIPOTESIS

Komponen diafragma pada dek baja ortotropik dengan bentuk *coak* (*cut-out*) akan memberikan tegangan yang lebih kecil dan tidak terkonsentrasi secara lokal dibandingkan dengan diafragma menerus pada dek baja ortotropik jembatan.

## METODOLOGI

Kasus jembatan adalah struktur jembatan standar *Calender Hamilton* dengan tipe struktur dengan dua perletakan sederhana tanpa *skew*. Jembatan terdiri dari dua bentang dengan  $2 \times 50$  m dengan perletakan sederhana. Sistem lantai menggunakan pelat baja ortotropik arah melintang. Lebar jembatan adalah  $2 \times 0,7$  m (pejalan kaki) + 7,6 m (lebar lalu-lintas). Lapisan permukaan adalah aspal dengan ketebalan 50 mm.

### Struktur dek ortotropik

Lantai ortotropik jembatan memiliki konfigurasi melintang dengan dimensi model ortotropik 2,4 m x 2,4 m. Hubungan antar ortotropik menggunakan sambungan las. Dua kasus *detailing* yang diteliti dapat dilihat pada Gambar 4 untuk diafragma menerus dan Gambar 5 untuk diafragma *coak*.

## Kriteria dan beban desain

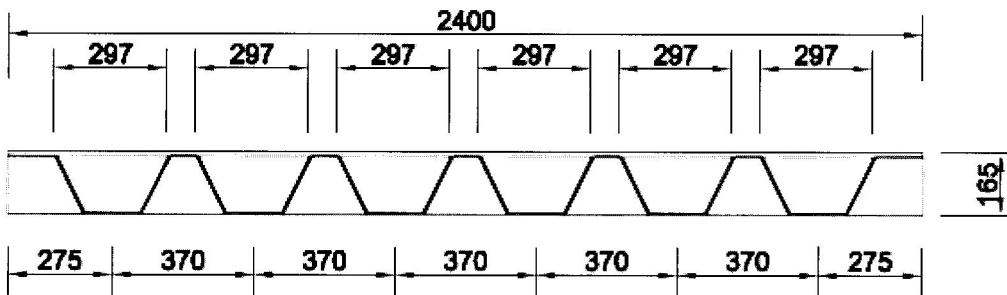
### Kriteria desain

Faktor tahanan berdasarkan peraturan Departemen PU: BMS (1992) dan *AISC LRFD* (2005) dan dibandingkan dengan hasil analisis elemen hingga, disajikan di sini. Faktor tahanan diberikan dalam kode untuk *member* yang mengalami lentur dan tarik didasarkan pada tegangan leleh  $0,95 (0,95F_y)$ . Untuk elemen yang mengalami tekan, tegangan terbatas pada  $0,90F_y$  ketika tekuk tidak ditinjau. Lendutan akibat beban hidup untuk *SLS* dibatasi hingga  $1/300$  bentang.

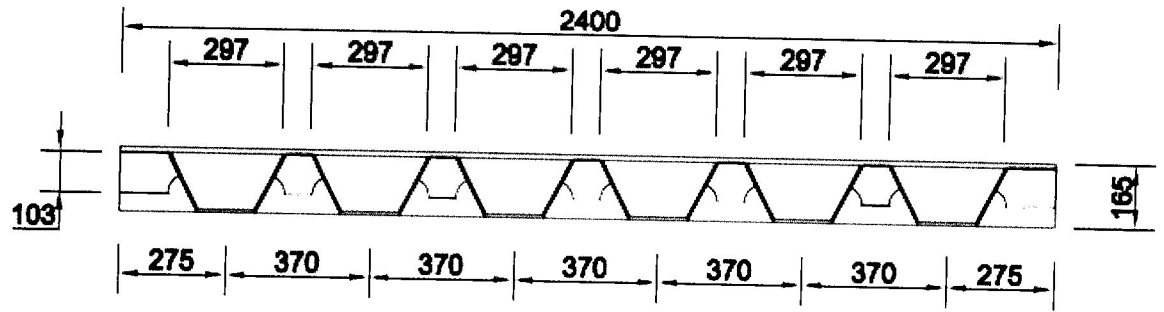
### Model elemen hingga

Model elemen hingga untuk struktur dek ortotropik jembatan, yang mencakup dua panel ortotropik yang menumpu pada *stringer* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6 untuk kasus beban A dan B, menyajikan kondisi batas, pilihan analisis dan pertimbangan beban untuk menentukan respon struktural dek ortotropik jembatan. Dimensi cetak ban, orientasi, jarak, dan beban untuk dua truk desain yang diterapkan pada model elemen hingga dirangkum dalam Tabel 1.

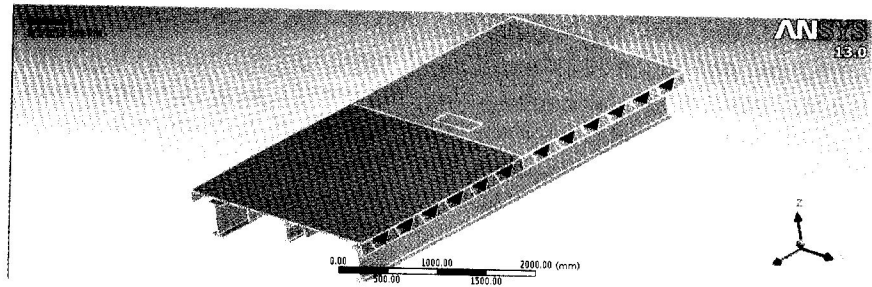
Gambar 7 merupakan *meshing* hingga ukuran halus dalam pemodelan metode elemen hingga. Selain itu, diasumsikan pula *stringer* ini terjepit pada ujung-ujung profil *stringer* serta jepit pada sambungan antar panel ortotropik.



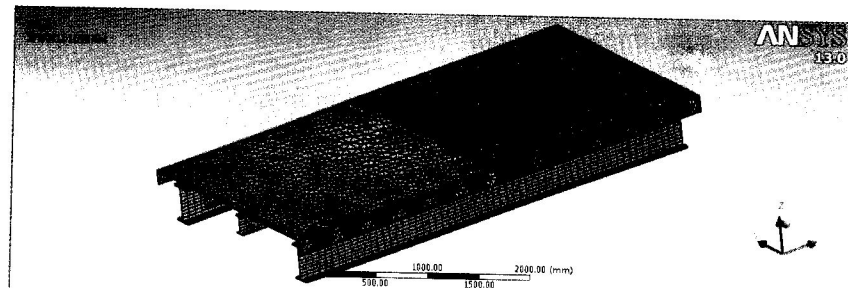
Gambar 4. Penampang pelat ortotropik dengan diafragma menerus



Gambar 5. Penampang pelat ortotropik dengan diafragma coak



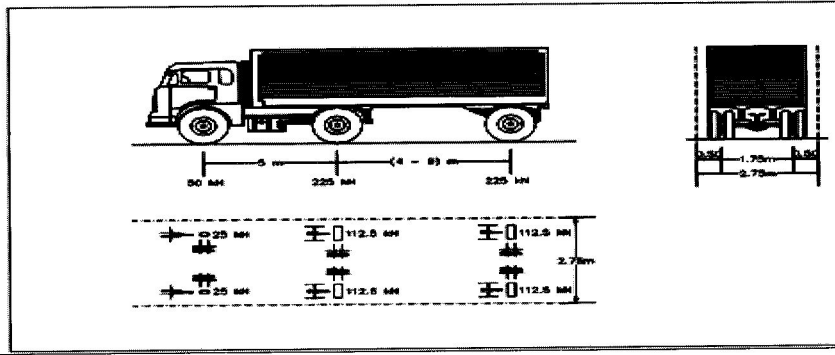
Gambar 6. Pemodelan metode elemen hingga



Gambar 7. Meshing model metode elemen hingga

Tabel 1. Deskripsi model struktur dek ortotropik jembatan

Beban	Material dan <i>properties</i> model
Spesifikasi beban truk T	Baja (Solid Element – SOLID45)
- Beban sumbu 112,5 kN	- <i>Linier isotropik properties</i>
- Faktor beban hidup = 1,8	- $E = 200.000 \text{ MPa}$ ; $\nu = 0.3$ ; $\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Faktor kejut, $IF = 0.3$	- $F_y = 460 \text{ MPa}$ ; $F_u = 550 \text{ MPa}$ (SM-490)



Gambar 8. Pembebanan truk "T" (500 kN)

### Beban desain untuk struktur dek ortotropik

Beban hidup desain digunakan untuk evaluasi struktur dek jembatan ortotropik berdasarkan beban truk T yang ditentukan dalam BMS.

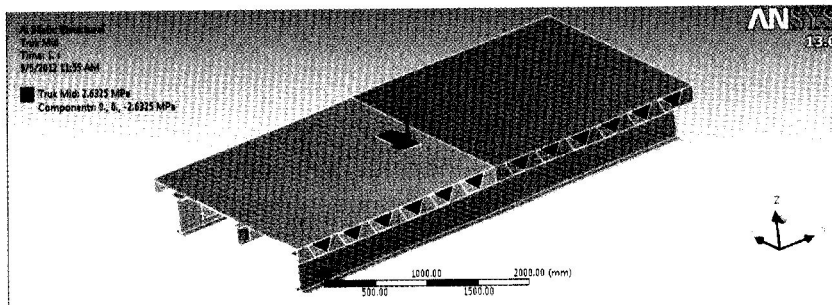
Gambar 8 mengilustrasikan beban roda, beban gandar, jarak roda, jarak sumbu roda dan ukuran cetak ban untuk truk "T" 500 kN. Faktor beban hidup dan beban dinamis yang diizinkan, diterapkan pada beban hidup

tertentu untuk mengevaluasi respon struktur dari dek jembatan ortotropik pada keadaan batas ultimit, layan, dan *fatigue* sesuai dengan peraturan BMS. Faktor beban dan beban dinamis yang diizinkan diberikan dalam Peraturan BMS. Faktor beban dirangkum dalam Tabel 2 kenaikan beban dinamis yang diizinkan untuk struktur dek adalah 0,30 untuk keadaan batas ultimit dan servis serta untuk keadaan batas *fatigue*.

Tabel 2. Faktor beban BMS

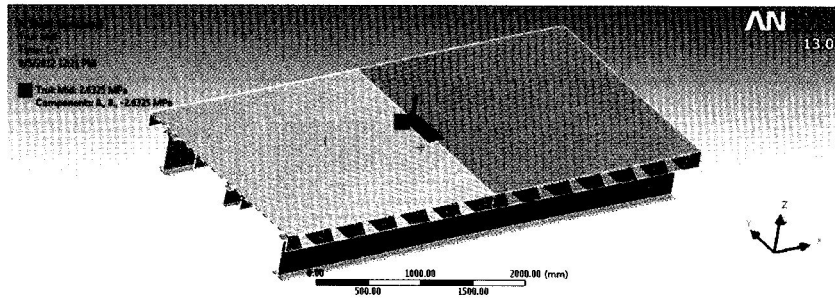
Faktor Beban	Kondisi batas Ultimit	Kondisi batas Layan	Kondisi batas <i>Fatigue</i>
Beban Mati	1.3*	1	N/A
Beban Hidup	1.8	1	1

Catatan : (\*) faktor beban mati = 1,10 untuk komponen baja, 2,00 untuk lapis permukaan, dan 1,20 untuk kayu dan komponen non-struktural.



Gambar 9. Kasus beban truk ditengah rusuk





Gambar 10. Kasus beban truk antar rusuk

Untuk menentukan respon struktur pelat dek ortotropik jembatan, satu buah truk yang telah didesain diposisikan untuk menghasilkan efek beban maksimum. Gambar 9 dan Gambar 10 mengilustrasikan dua kasus beban dengan mempertimbangkan ukuran cetak ban, lokasi dan orientasi. Dalam kasus beban A, truk “T” dua sumbu diposisikan menerus pada posisi ditengah rusuk pada dek. Dalam kasus beban B, truk “T” dua sumbu diposisikan menerus pada posisi diantara rusuk pada dek diletakkan didek jembatan untuk menghasilkan momen global maksimum. Adapun evaluasi dek ortotropik meliputi beberapa kasus:

1. Analisis struktur desain dek ortotropik dengan diafragma menerus.
2. Analisis struktur desain dek ortotropik dengan diafragma coak.

## HASIL DAN ANALISIS

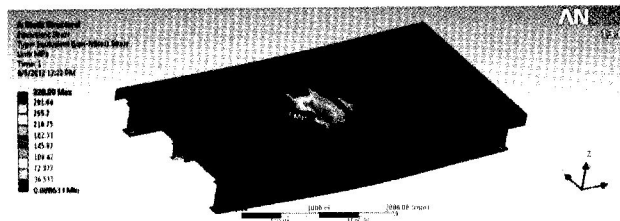
Hasil analisis elemen hingga diberikan pada Tabel 3 dan Tabel 4 berupa ringkasan lendutan dan tegangan pada pelat lantai jembatan untuk *SLS* dan *ULS* untuk masing-masing kasus analisis. Perlu dicatat bahwa tegangan dalam Tabel 3 dan Tabel 4 adalah tegangan puncak maksimum dari model elemen hingga dan belum merata di atas permukaan elemen. Lendutan dan tegangan untuk kasus beban 1 dan 2 ditentukan berdasarkan pada model elemen hingga yang diberikan pada Gambar 6 dari struktur lantai jembatan termasuk dua dan tiga buah *stringer* dengan truk diposisikan untuk menghasilkan momen global maksimum.

Tabel 3. Rangkuman lendutan dan tegangan pada dek ortotropik kasus 1

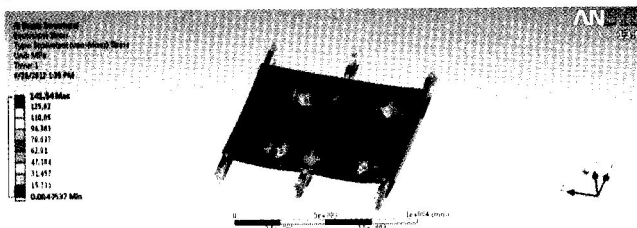
Parameter	Kasus beban		Kriteria desain	
	Tengah rusuk	Antar rusuk		
<b>Lendutan, mm</b>				
Deformasi total	1.6	1.6	L/300	16.67
Deformasi direksional	-0.18	-0.12	L/300	16.67
<b>Tegangan maksimum, MPa</b>				
Tegangan ekuivalen	325	328	0.9F <sub>y</sub>	414.0
Tegangan utama maksimum	309	326	0.9F <sub>y</sub>	414.0
Tegangan utama tengah	-131	-174	0.9F <sub>y</sub>	414.0
Tegangan utama minimum	-281	-381	0.9F <sub>y</sub>	414.0
Intensitas tegangan	342	376	0.9F <sub>y</sub>	414.0
Tegangan normal	309	380	0.9F <sub>y</sub>	414.0
<b>Tegangan Geser, MPa</b>				
Tegangan geser maksimum	171	188	0.58F <sub>v</sub>	266.8
Tegangan geser	55	76	0.58F <sub>v</sub>	266.8

**Tabel 4.** Rangkuman lendutan dan tegangan pada dek ortotropik kasus 2

Parameter	Kasus beban		Kriteria desain	
	Tengah rusuk	Antar rusuk		
<b>Lendutan, mm</b>				
Deformasi total	1.4	1.3	L/300	16.67
Deformasi direksional	-1.4	-1.3	L/300	16.67
<b>Tegangan maksimum, MPa</b>				
Tegangan ekuivalen	142	147	$0.9F_y$	414.0
Tegangan utama maksimum	130	104	$0.9F_y$	414.0
Tegangan utama tengah	-84	-79	$0.9F_y$	414.0
Tegangan utama minimum	-144	-134	$0.9F_y$	414.0
Intensitas tegangan	163	169	$0.9F_y$	414.0
Tegangan normal	127	-112	$0.9F_y$	414.0
<b>Tegangan Geser, MPa</b>				
Tegangan geser maksimum	81	85	$0.58F_y$	266.8
Tegangan geser	64	-63	$0.58F_y$	266.8



**Gambar 11.** Tegangan ekuivalen pada pemodelan struktur kasus 1 kombinasi 2 *ULS* sebesar 328 MPa



**Gambar 12.** Tegangan ekuivalen pada pemodelan struktur kasus 2 kombinasi 2 *ULS* sebesar 142 MPa



**Gambar 13.** Konsentrasi tegangan *Von Mises* pada rusuk dan diafragma akibat truk kasus

## PEMBAHASAN

Lendutan vertikal, tegangan normal utama, tegangan *Von Mises* dan tegangan antarmuka geser diplot pada Gambar 11 dan Gambar 12 untuk kasus beban 1 dan 2, dimana nilai-nilai maksimum dan lokasinya diketahui. Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan tegangan *Von Mises* dari analisis elemen hingga pada pelat dek atas dan rusuk ortotropik prefabrikasi maksimum memanjang dan melintang jembatan. Untuk ban diposisikan berdekatan dengan badan dari sudut memanjang dan melintang, tegangan normal dan *Von Mises* cenderung sangat terpusat pada pelat diatas badan dan menghilang dengan cepat. Untuk semua kasus beban tegangan memenuhi kriteria tahanan faktor dan tidak melebihi  $0,9F_y$ . Kecuali untuk kasus 1, terjadi konsentrasi tegangan pada bagian antarmuka rusuk dan diafragma seperti Gambar 13. Geser antarmuka maksimum antara dek ortotropik baja dalam arah longitudinal dan transversal diilustrasikan dalam Gambar 11 dan Gambar 12 untuk masing-masing kasus beban 1 dan 2. Kriteria tahanan faktor mensyaratkan tegangan geser harus kurang dari  $0,58F_y$ . Gambar 11 dan Gambar 12 menggambarkan tegangan normal dalam arah longitudinal untuk kedua bagian atas dan bawah *flens* dari balok utama pendukung. Tegangan tarik dan tekan rata-rata di seluruh lebar *flens* bawah dalam arah longitudinal panel ortotropik untuk kasus 1 dan kombinasi *ULS* memenuhi kriteria tahanan terfaktor.

Tegangan tarik dan tekan pada panel ortotropik yang terjadi untuk kombinasi beban *ULS* ditengah rusuk dan antar rusuk, terlihat bahwa tegangan tegangan ekuivalen, tegangan utama maksimum, intensitas tegangan dan tegangan normal karena konsentrasi tegangan pada antarmuka rusuk dan diafragma panel ortotropik memenuhi kriteria batasan tegangan izin  $0,9F_y$ . Begitu juga untuk tegangan geser maksimum memenuhi kriteria batasan tegangan izin  $0,58F_y$ . Tegangan ekuivalen *Von Mises* yang terjadi untuk diafragma menerus sebesar 328 MPa, sedangkan diafragma coak sebesar 142 MPa. Sehingga perbandingan tegangan *Von Mises* ini sebesar 2,31 dapat diturunkan nilainya dengan penggunaan tipe diafragma coak.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktur lantai baja ortotropik dengan metode elemen hingga, dapat disimpulkan bahwa:

1. Lendutan ortotropik desain memenuhi kriteria batas layan dimana lendutan yang terjadi lebih kecil dari kriteria  $L/300$ .
2. Tegangan tarik dan tekan pada panel ortotropik yang terjadi untuk kombinasi beban ultimit/*ULS* ditengah rusuk dan antar rusuk, terlihat bahwa tegangan tegangan ekuivalen, tegangan utama maksimum, intensitas tegangan dan tegangan normal karena konsentrasi tegangan pada antarmuka rusuk dan diafragma panel ortotropik memenuhi kriteria batasan tegangan izin  $0,9F_y$ . Begitu juga untuk tegangan geser maksimum memenuhi kriteria batasan tegangan izin  $0,58F_y$ . Tegangan ekuivalen *Von Mises* yang terjadi untuk diafragma menerus sebesar 328 MPa, sedangkan diafragma coak sebesar 142 MPa. Sehingga perbandingan tegangan *Von Mises* ini sebesar 2,31 dapat diturunkan nilainya dengan penggunaan tipe diafragma coak.
3. Bentuk diafragma dengan tipe menerus akan menyebabkan konsentrasi tegangan. Sedangkan bentuk diafragma bentuk coak dengan kelengkungan tertentu akan mengurangi konsentrasi tegangan lokal pada diafragma.

### Saran

1. *Detailing* konfigurasi komponen rusuk pengaku harus lebih diperhatikan untuk mencegah terjadinya konsentrasi tegangan lokal, seperti menggunakan diafragma dengan tipe coak, dengan mutu yang sesuai dibutuhkan.
2. Perlu studi lanjutan tentang pengaruh *fatigue* pada dek ortotropik dan studi tentang komponen sambungan las maupun baut yang digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. 2010. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 5th Ed. Washington D.C.: *AASHTO*.
- American Institute of Steel Construction. 1963. *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges*. Chicago: AISC.
- American Institute of Steel Construction. 2005. *Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction*. Chicago: AISC.
- California Department of Transportation. 2004. *Bridge Design Specification*. Sacramento: Caltrans.
- Choi, D. 2008. "Orthotropic steel deck bridge in Korea". *Proceedings of 2008 orthotropic bridge Conference*. Korea: ASCE
- Connor, R. *et al.* 2012. *Manual for Design, Construction, and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridges*. FHWA-LF-12-027. Washington, D.C.: US Department Of Transportation Federal Highway Administration
- Departemen Pekerjaan Umum. Direktorat Jenderal Bina Marga. 1992. *Bridge Design Code (BMS)*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- European Committee for Standardization. 1992. Eurocode 3 "*Design of Steel Structures*". Brussel: ECS
- Hoopah, W. 2004. "Orthotropic Decks for Small and Medium Span Bridges in France – Evolution and Recent Trends." *Proc. of 2004 Orthotropic Bridge Conference*. Sacramento: ASCE, 25-27.
- Huang, C., Mangus, A. 2008. "Redecking Existing Bridges with Orthotropic Steel Deck Panels." *Proc. of 2008 Orthotropic Bridge Conference..* Sacramento: ASCE, 25-27.
- Huang, C., Mangus, A., Murphy, J., Socha, M.J. 2008. "Twenty Four Icons of Orthotropic Steel Deck Bridge Engineering." *ICONS Project – An International Discussion: Professional Engineers in California Government*. California: Professional Engineers.
- Korniyiv, M. 2004. "Orthotropic Deck Bridges in Ukraine". *Proc. of 2004 Orthotropic Bridge Conference*. Sacramento: ASCE, 25-27.
- Troitsky, M.S. 1987. *Orthotropic Bridges Theory and Design*. 2nd Ed. Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation.