

# ANALISIS TEKUK PELAT GELADAK KAPAL FERRY RO-RO

## *Buckling Analysis Deck Plate of Ferry Ro-Ro*

Amalia Ika Wulandari<sup>1</sup>, Nurmawati<sup>1</sup> dan Anggoronadhi Dianiswara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan

Email: amaliaikaw@itk.ac.id

Diterima: 20 Maret 2019; Direvisi: 2 Mei 2019; Disetujui: 24 Mei 2019

### Abstrak

Para perancang struktur kapal dapat menentukan jarak gading yang optimal dengan batasan risiko tekuk pada pelat. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui beban batas lateral pada masing-masing jarak gading sehingga risiko tekuk yang terjadi pada pelat dapat diketahui. Tekuk adalah suatu ragam kegagalan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan suatu elemen struktur yang dipengaruhi oleh aksi beban. Kegagalan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan dapat terjadi pada berbagai material. Pada saat tekuk terjadi, taraf gaya internal dapat menjadi sangat rendah. Fenomena tekuk berkaitan dengan kekakuan elemen struktur. Kekuatan tekuk pada setiap bagian struktur dapat dievaluasi dengan menggunakan konsep tegangan tekuk kritis. Besarnya tegangan tekuk kritis berhubungan dengan persamaan klasik tekuk Euler dan bergantung pada apakah tekuk ini terjadi pada kondisi elastis atau tidak elastis. NLFEA (Non Linear Finite Element Analysis Method) digunakan untuk melakukan pemodelan geladak kendaraan Kapal Ferry Ro-Ro dengan ukuran tiga dimensi. Pemodelan ini hanya dihitung pada geladak kendaraan kapal dan tidak untuk semua bagian kapal. Hasil dari penelitian ini menunjukkan penurunan beban berbanding terbalik dengan kenaikan jarak gading, semakin jauh jarak gading maka semakin kecil beban yang dibutuhkan agar pelat mengalami tekuk. Beban batas maksimal dengan jarak gading 600 mm yaitu  $3,7 \text{ N/mm}^2$  dan tegangan maksimum sebesar  $371 \text{ N/mm}^2$ .

**Kata kunci:** tekuk, beban, ferry, ro-ro

### Abstract

*The designers of ship structures may determine the optimum frame space with the limitation of buckling on plate. The objective of the present study is to know the ultimate loading on each frame space so that the buckling that occurs on the plate can be known. Buckling is a variety of failures caused by the instability of a structural element that is influenced by the action of the load. The failures caused by instability can occur in various materials. When buckling occurs, the internal force level can be very low. The buckling phenomenon is related to the stiffness of the structural elements. The bending strength in each part of the structure can be evaluated using the concept of critical buckling stress. The magnitude of the critical buckling stress is related to the classical Euler buckling equation and depends on whether this buckling occurs in conditions of elastic or inelasticity. The three-dimensional Ferry Ro-Ro vessel deck modelling is done using NLFEA (Non Linear Finite Element Analysis Method). This modeling is only calculated on the deck of ship vehicles and not for all parts of the ship. The results of*

*this study shows that the load decreases inversely proportional to the increase of frame space. The longer the frame space the smaller the loading required for the plate to be buckled. Maximum limit load with frame space of 600 mm is 3.7 N/mm<sup>2</sup> and maximum stress is 371 N/mm<sup>2</sup>.*

**Keywords:** buckling, load, ferry, ro-ro

## PENDAHULUAN

Masalah utama dalam konstruksi kapal ialah pembuatan suatu konstruksi yang kokoh dan kuat dengan berat konstruksi yang seringan mungkin. Konstruksi yang menguntungkan adalah konstruksi yang kuat dan ringan dengan daya muat yang besar. Dengan berkembangnya teknologi di bidang konstruksi kapal, pemilihan desain dan material merupakan suatu hal yang sangat dipertimbangkan oleh perusahaan galangan kapal dalam perancangan dan pembuatan kapal baru. Konstruksi kuat dan kokoh merupakan suatu konstruksi yang tidak mudah patah dan tidak berubah bentuk saat menerima beban. Dalam analisis data terdapat beberapa tahap yang dilakukan. Tahap awal adalah pengumpulan data awal berupa ukuran utama kapal. Dilanjutkan dengan tahap pemodelan geladak kendaraan Kapal Ferry Ro-Ro dengan ukuran tiga dimensi. Tahap terakhir adalah variasi jarak gading dengan menggunakan NLFEA (*Non Linear Finite Element Method*).

Pada semua konstruksi teknik, semua komponen bangunan atau struktur harus diberi dimensi penampang dan sifat mekanik material tertentu. Bagian-bagian tersebut harus ditetapkan ukurannya dengan tepat untuk dapat menahan gaya-gaya yang bekerja atau yang mungkin akan dibebankan. Demikian pula, bagian-bagian suatu struktur komposit harus cukup tegar hingga tidak akan melentur atau melengkung melampaui batas yang ditentukan jika bekerja di bawah beban yang diberikan. Kekuatan kapal merupakan faktor yang harus diperhitungkan dalam pembangunan suatu kapal. Faktor yang mempengaruhi kekuatan kapal adalah jarak gading, panjang tak ditumpu, tebal pelat dan lain-lain. Perkembangan peraturan klasifikasi, dalam hal ini Biro Klasifikasi Indonesia (BKI 2017), menyebutkan bahwa konstruksi kapal tidak lagi mengatur jarak gading, sehingga para perancang kapal merencanakan jarak gading yang optimal dengan batasan risiko tekuk pada pelat.

Penelitian yang telah dilakukan terkait dengan tekuk dan Kapal Ferry Ro-Ro adalah penelitian dari Alie, dkk. (2016) tentang Analisis kekuatan batas

longitudinal pada Kapal Ferry Ro-Ro dengan menggunakan metode Smith yang diimplementasikan pada BEAM-HULLST. Ditemukan bahwa rotasi sumbu netral pada momen lentur vertikal pada *hull girder* tidak signifikan. Camotim, dkk. (2008) meneliti tentang analisis tekuk bagian pelat tipis kondisi tumpuan tidak standar dengan pendekatan teori balok (GBT). Ditemukan bahwa analisis tekuk berbasis teori balok tersebut menghasilkan tegangan kritis yang berkesesuaian dengan yang dihasilkan oleh program ANSYS dengan menggunakan *element shell*.

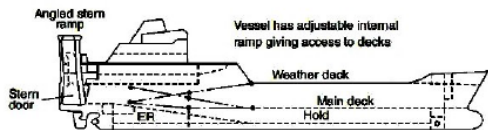
Kapal Ferry Ro-Ro merupakan kapal yang memiliki geladak kendaraan dengan ciri-ciri rasio H/B (rasio tinggi terhadap lebar kapal) relatif kecil agar kendaraan mudah *roll on* dan *roll off*. Di lain sisi H/B yang kecil menyebabkan momen inersia penampang *midship* relatif kecil sehingga tegangan pada pelat geladak cenderung besar pada kondisi *sagging* dan *hogging*. *Sagging* merupakan kondisi badan kapal membentuk lembah gunung. *Hogging* merupakan suatu kondisi badan kapal membentuk puncak gunung. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh beban lateral terhadap tekuk pada pelat.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Kapal Ferry Ro-Ro

Kapal Ferry Ro-Ro yang ditunjukkan pada Gambar 1 adalah kapal yang dapat memuat kendaraan yang berjalan masuk dan keluar kapal dengan penggerak sendiri sehingga disebut sebagai kapal *roll on-roll off* atau disingkat *ro-ro*. Oleh karena itu, kapal ini dilengkapi dengan pintu rampa yang dihubungkan dengan *moveable bridge* atau dermaga apung ke dermaga. Kapal Ferry Ro-Ro selain digunakan untuk angkutan truk juga digunakan untuk mengangkut mobil penumpang, sepeda motor serta penumpang. Kemudian pelayaran *ferry ro-ro* dapat menyesuaikan diri sebagai *feeder line* yang memuat berbagai jenis muatan seperti kombinasi muatan general *break bulk cargo*, *containers*, *trailers* dan muatan *ferry ro-ro*.

*Ro-ro* adalah kapal yang menangani muatannya dengan cara *rolling it on and off* di atas *single ramp*



Gambar 1. Kapal *Ferry Ro-Ro* (Shama, 2013)

atau *series ramps*. *Ramps* atau rampa dapat bekerja baik saat di kapal atau di dermaga. Untuk menyempurnakan bongkar dan muat dari geladak yang berbeda pada geladak dibutuhkan rampa internal. Hal ini juga membutuhkan spasi dari ruang muat (Lamb, 2003).

Keunikan dari Kapal Ferry *Ro-Ro* antara lain:

- a. Memiliki akses rampa pada *bow*, *term* atau sisinya tetapi tidak harus semua rampa terdapat pada *ro-ro*;
- b. Memiliki geladak kendaraan dengan lajur yang yang panjang;
- c. Memiliki banyak ventilator pada atas *deck* sebagai tempat pembuangan asap kendaraan saat bongkar dan muat.

Konsep *ro-ro* tidak akan mungkin dibuat tanpa ketersediaan peralatan khusus seperti rama dan elevator yang memungkinkan untuk bongkar dan muat dari dan/atau ke kapal. *Ramp* digunakan pada pintu masuk kapal dan juga digunakan di dalam kapal sebagai akses dari *deck*. Rampa internal dapat bersifat tetap atau berengsel (Lamb, 2003). Pengaturan perancangan *ro-ro* sangat ditentukan oleh ketentuan arus muatan *ro-ro* yang efisien. Kecuali *ro-ro* yang beroperasi pada rute dengan jalur berbasis *port* bertingkat harus memiliki rampa internal dengan engsel tetap atau tidak berengsel tetap sehingga muatan bisa dipindahkan ke dan dari semua *deck*. Kebanyakan *ro-ro* menggunakan *tank top* untuk menyimpan kargo *ro-ro* yang meliputi pengaturan naik ke tingkat atas tangki karena bentuk lambungnya yang relatif halus, ruang penyimpanan di *tank top* adalah hanya sebagian kecil dari total. Hal ini mengakibatkan perancang sengaja tidak menggunakan *tank top* untuk muatan *ro-ro* dan malah memiliki tangki dan ruang hampa hanya di bawah tingkat *deck* masuk. Hal Ini memiliki sejumlah keunggulan di bidang stabilitas dan biaya kerusakan. Pertama mungkin nampaknya biaya akan lebih besar karena kapal harus lebih besar untuk menyediakan jalur jalur yang sama. Sementara kapal mungkin lebih besar adalah mudah dan hasil akhirnya dapat menjadi desain dengan biaya yang lebih murah. (Lamb, 2003).

### Tekuk pada Struktur Kapal *Ferry Ro-Ro*

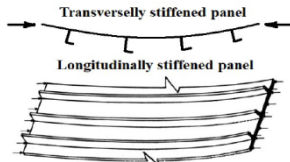
Tekuk adalah suatu ragam kegagalan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan suatu elemen struktur yang dipengaruhi oleh aksi beban. Kegagalan yang diakibatkan oleh ketidakstabilan dapat terjadi pada berbagai material. Pada saat tekuk terjadi, taraf gaya internal dapat menjadi sangat rendah. Fenomena tekuk berkaitan dengan kekakuan elemen struktur. Suatu elemen yang mempunyai kekakuan kecil lebih mudah mengalami tekuk dibandingkan dengan yang mempunyai kekakuan besar. Semakin panjang suatu elemen struktur maka semakin kecil kekakuannya. (Schodek, 1998). Pada material *isotropic*, tegangan *axial* yang dikenakan pada arah utama membuat deformasi besar terjadi pada arah penerapan beban itu bekerja. Deformasi lateral yang lebih kecil terjadi pada petunjuk utama lainnya juga tegangan geser hanya menyebabkan deformasi geser. Deformasi tergantung pada konstanta elastis E. Banyak bahan konstruksi seperti baja, aluminium dan titanium termasuk dalam kategori ini. Pada material *orthotropic* yang ditekan pada salah satu arah utama, deformasi lateral pada arah utama lainnya bisa lebih kecil atau lebih besar dari deformasi ke arah tegangan yang bekerja bergantung pada sifat material. Selain itu besarnya deformasi geser tidak bergantung pada konstanta elastis. Pada pelat *anisotropic* atau pelat ortogonal yang ditekan selain dari pada sumbu utama, tegangan yang diberikan dalam arah tertentu menyebabkan tidak hanya perpanjangan/tarik dalam arah yang sama dan deformasi di dua arah lainnya tetapi juga deformasi geser. Demikian pula penyebab tegangan geser tidak hanya deformasi geser tetapi juga deformasi *axial*. Tegangan pada pelat *anisotropic* sangat rumit dan tidak dibahas pada bagian dalam buku ini. (Jawad, 1994). Bentuk/model tekuk deformasi pelat berpenegar secara transversal di bawah pengaruh beban ortogonal bidang terhadap arah penegar adalah:

- a. Tekuk pada panel pelat antara penegar;
- b. Tekuk dari penegar;
- c. Tekuk lentur dari kombinasi pelat berpenegar (tekuk global pada bidang berpenegar).

Model deformasi ketika penegar memiliki kekakuan puntir (*torsional rigidity*) lebih besar dari kekakuan lentur (*flexural rigidity*). Tekuk lentur global dari pelat berpenegar dalam pengaruh tegangan tekan dapat dilihat pada Gambar 2 (Shama, 2013).

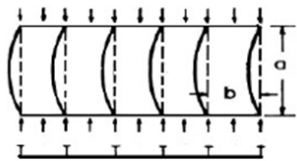
Berbagai model tekuk deformasi dari penegar yang diberi beban pada bidang pada arah yang sama dari penegar adalah:

- Tekuk lentur dari penegar;
- Tekuk puntir dari penegar;
- Tekuk lateral dari penegar;
- Tekuk global pada penegar dengan pelat ikutan;
- Tekuk lokal pada *web plate* dari penegar;
- Tekuk lokal pada *face plate* dari penegar.



Gambar 2. Tekuk lentur global *flexural* dari pelat berpenegar di bawah tegangan ortogonal pada arah penegar (Shama, 2013)

Yang mana pada kasus ini sifat penegar sama dengan balok kolom. Ketika penumpu elemen-elemen pada kedua ujung penegar memiliki tekuk puntir yang besar maka bentuk deformasi dari dari balok kolom ditunjukkan pada Gambar 3 (Shama, 2013).



Gambar 3. Bentuk tekuk/deformasi dari pelat berpenegar dalam pengaruh tegangan tekan (kegagalan balok kolom) (Shama, 2013)

Persamaan umum tekuk Euler dari bidang pelat diberikan sebagai berikut:

$$\sigma_e = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t^2}{b} \quad (1)$$

dimana:

- $\sigma_e$  = tegangan tekuk Euler ( $N/mm^2$ )
- $b$  = lebar terkecil dari pelat (mm)
- $E$  = modulus elastisitas ( $N/mm^2$ )
- $t$  = ketebalan pelat (mm)
- $\nu$  = rasio Poisson
- $k$  = faktor yang bergantung pada parameter utama sebagai berikut: bentuk dan ukuran pelat, kondisi syarat batas pelat dan jenis distribusi beban pelat

Kekuatan tekuk pada setiap bagian struktur dapat dievaluasi dengan menggunakan konsep tegangan tekuk kritis. Besarnya tegangan tekuk kritis berhubungan dengan persamaan klasik tekuk Euler dan

bergantung pada apakah tekuk ini terjadi pada kondisi elastis atau tidak elastis (Shama, 2013).

Tekuk elastis terjadi ketika:

$$\sigma_e \leq \sigma_y \quad (2)$$

Dimana  $\sigma_e$  adalah tegangan tekuk Euler  $\sigma_y$  adalah tegangan luluh material (Shama, 2013).

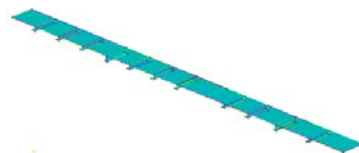
Tekuk tidak elastis terjadi jika

$$\sigma_e \geq \sigma_y \quad (3)$$

Dengan menggunakan persamaan Euler, dapat diprediksi bahwa apabila suatu kolom menjadi sangat panjang, beban yang dapat menimbulkan tekuk pada kolom menjadi semakin kecil menuju nol. Sebaliknya apabila panjang kolom semakin kecil, maka beban yang diperlukan untuk menyebabkan kolom itu menekuk semakin besar. Apa yang sebenarnya terjadi, tentu saja apabila kolom semakin pendek, ragam kegagalan yang akan terjadi bukanlah tekuk, melainkan luluhnya material. Dengan demikian persamaan Euler tidak berlaku lagi untuk kolom pendek. Pada kolom pendek ini yang lebih menentukan adalah tegangan luluh material bukan persamaan Euler (Schodek, 2008).

## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini termasuk penelitian kuantitatif yaitu dengan mengambil Kapal *Ferry Ro-Ro*. Kemudian dilakukan investigasi untuk mengetahui bentuk geladak kendaraan. Kapal yang dijadikan sampel pada penelitian ini memiliki panjang 99,20 meter. Setelah mengetahui ukuran utama kapal maka dilakukan pemodelan geladak kendaraan pada kapal *ferry* untuk mengetahui beban maksimum yang bekerja pada geladak yang diakibatkan oleh adanya beban lateral yang berasal dari roda kendaraan. Pemodelan geladak kendaraan dilakukan dengan memvariasikan jarak gading.



Gambar 4. Model penampang geladak

Dilakukan pemodelan seperti pada Gambar 4 dengan mengambil ukuran pada geladak kendaraan Kapal *Ferry Ro-Ro* kemudian memvariasikan jarak gading untuk mengetahui beban batas dan tegangan pada setiap jarak gading. Hasil dari NLFEA berupa nilai *displacement* setiap kenaikan beban pada pelat

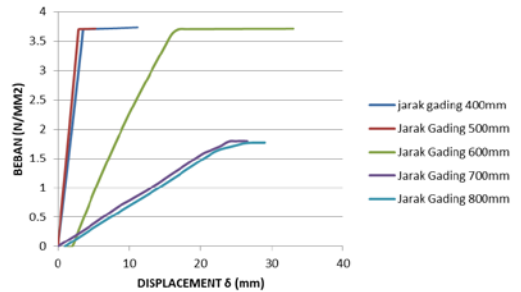
geladak kapal yang akan membentuk grafik hubungan beban batas (P) dan *displacement*.

**PEMBAHASAN**

Dengan menggunakan persamaan Euler maka diperoleh hasil untuk jarak gading 400 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $51,92 \text{ N/mm}^2$ , untuk jarak gading 500 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $51,92 \text{ N/mm}^2$ , 600 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $34,62 \text{ N/mm}^2$ , jarak gading 700 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $29,67 \text{ N/mm}^2$  jarak gading 800 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $25,96 \text{ N/mm}^2$ . Hasil yang diperoleh dari NLFEA tegangan luluh pelat (*yield stress*)  $235 \text{ N/mm}^2$  setelah diberikan beban batas yang sebelumnya telah dihitung menggunakan NLFEA maka diperoleh tegangan luluh untuk jarak gading 400 mm tegangan maksimum  $275 \text{ N/mm}^2$ , untuk jarak gading 500 mm  $295 \text{ N/mm}^2$ , untuk jarak gading 600 mm tegangan maksimum  $315 \text{ N/mm}^2$ , jarak gading 700 mm tegangan maksimum  $410 \text{ N/mm}^2$  dan jarak gading 800 mm tegangan maksimum  $480 \text{ N/mm}^2$ . Hasil dari NLFEA berupa nilai *displacement* setiap kenaikan beban pada pelat geladak kapal yang akan membentuk grafik hubungan beban batas (P) dan *displacement*.

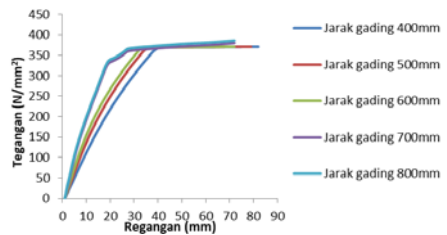
Grafik hubungan beban dan *displacement* yang ditunjukkan pada Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin jauh jarak gading menyebabkan semakin kecilnya beban yang dibutuhkan agar material mengalami tekuk. Jarak gading 400, 500 dan 600 mm besarnya beban batas yang bekerja untuk  $3,7 \text{ N/mm}^2$  menunjukkan adanya kondisi linear elastis yaitu merupakan kondisi ketika material atau pelat geladak menerima beban maka material itu masih bisa kembali ke posisi semula. Jarak gading 700 mm beban batas yang bekerja sebesar  $1,79 \text{ N/mm}^2$  menunjukkan kondisi tidak linear elastis artinya jika material atau pelat geladak tersebut mendapat beban maka pelat tersebut tidak dapat kembali pada kondisi semula. Jarak gading 800 mm beban batas yang dapat bekerja sebesar  $1,76 \text{ N/mm}^2$  menunjukkan kondisi tidak linear elastis. Jarak gading 900 mm beban batas yang dapat bekerja sebesar  $0,36 \text{ N/mm}^2$  menunjukkan kondisi tidak linear elastis. Jarak gading 1000 mm beban batas yang dapat bekerja  $0,37 \text{ N/mm}^2$  menunjukkan kondisi tidak linear elastis. Jarak gading 1100 mm beban batas yang dapat bekerja  $0,37 \text{ N/mm}^2$  menunjukkan kondisi tidak linear elastis dan jarak gading 1200 mm beban batas  $0,37 \text{ N/mm}^2$  menunjukkan kondisi tidak linear

elastis. Beban batas yang diperoleh dari hasil NLFEA merupakan beban per satuan luas sehingga beban yang dimaksud merupakan beban yang dapat diterima oleh geladak setiap luasan pada pelat geladak.



Gambar 5. Grafik beban dan *displacement*

Dengan menggunakan persamaan Euler maka diperoleh hasil untuk jarak gading 400 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $51,92 \text{ N/mm}^2$ , untuk jarak gading 500 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $51,92 \text{ N/mm}^2$ , 600 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $34,62 \text{ N/mm}^2$ , jarak gading 700 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $29,67 \text{ N/mm}^2$  jarak gading 800 mm diperoleh tegangan tekuk Euler sebesar  $25,96 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan luluh pelat (*yield stress*) geladak kapal yang telah diketahui sebesar  $315 \text{ N/mm}^2$ . Maka setelah menghitung beban maka diperoleh hasil seperti pada Gambar 6.

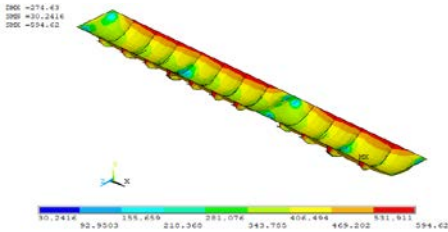


Gambar 6. Grafik tegangan dan regangan

Gambar 6 menjelaskan bahwa tegangan yang diperoleh dari hasil NLFEA untuk masing-masing jarak gading secara berurutan 400, 500, 600, 700 dan 800 mm yaitu sebesar  $370 \text{ N/mm}^2$ ,  $371 \text{ N/mm}^2$ ,  $371 \text{ N/mm}^2$ ,  $380 \text{ N/mm}^2$  dan  $384 \text{ N/mm}^2$ . Maka dengan menggunakan persamaan (2) diketahui bahwa tegangan untuk setiap jarak gading lebih besar dari tegangan tekuk Euler yang telah dihitung. Maka dapat dituliskan bahwa pelat geladak kapal masih dapat dikatakan sebagai tekuk elastis di mana nilai tegangan yang diperoleh dari NLFEA lebih besar dari tegangan tekuk Euler.

Apabila suatu material menjadi sangat panjang, beban yang dibutuhkan agar dapat menimbulkan tekuk

pada material menjadi semakin kecil. Sebaliknya apabila panjang kolom semakin kecil, maka beban yang diperlukan untuk menyebabkan kolom itu menekuk semakin besar. Terjadinya hanya saja apabila kolom semakin pendek, ragam kegagalan yang akan terjadi bukanlah tekuk, melainkan hancurnya material. Dari teori di atas dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak gading maka peluang tekuk itu semakin cepat terjadi.



Gambar 7. Bentuk deformasi pelat geladak kendaraan Kapal Ferry Ro-ro

Gambar 7 merupakan bentuk deformasi pelat setelah diberikan beban batas sesuai yang diperhitungkan sebelumnya.

## KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan di atas maka diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Beban lateral muatan yang diletakkan pada seluruh permukaan pelat geladak kendaraan diperoleh pada jarak gading 600 mm terdeteksi kondisi tekuk elastis dengan beban maksimum sebesar

3,7 N/mm<sup>2</sup>. Pada jarak gading 700 mm hingga 800 mm maksimum 1,79 N/mm<sup>2</sup>.

2. Semakin jauh jarak gading peluang terjadinya tekuk menjadi semakin besar seperti pada jarak gading 800 pelat geladak mengalami tekuk saat tegangan mencapai 349 N/mm<sup>2</sup>, hal ini lebih cepat terjadi di dibandingkan jarak gading yang lain.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alie, M. Z. M., Sitepu, G., Juswan, Wahyuddin dan Nugraha, A. M. (2016). The Influence of Superstructure on the Longitudinal Ultimate Strength of a Ro-Ro Ship. *Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- BKI. (2017). *Seagoing Ships Volume II Part 5*. Biro Klasifikasi Indonesia, Jakarta.
- Camotim, D., Silvestre, N., Basaglia, C. dan Bebiano, R. (2008). GBT-Based Buckling Analysis of Thin-Walled Members with Non-Standard Support Conditions. *Thin-Walled Structures*, Vol. 46(7): 800-815.
- Jawad, M. H. (1994). *Theory and Design of Plate and Shell Structures*. London: Chapman and Hall.
- Lamb, Thomas. (2003). *Ship Design and Construction*. New Jersey: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).
- Schodek, D. L. (1998). *Struktur*. Bandung: P.T. Refika Aditama.
- Shama, M. (2013). *Buckling of Ship Structures*. New York: Springer.