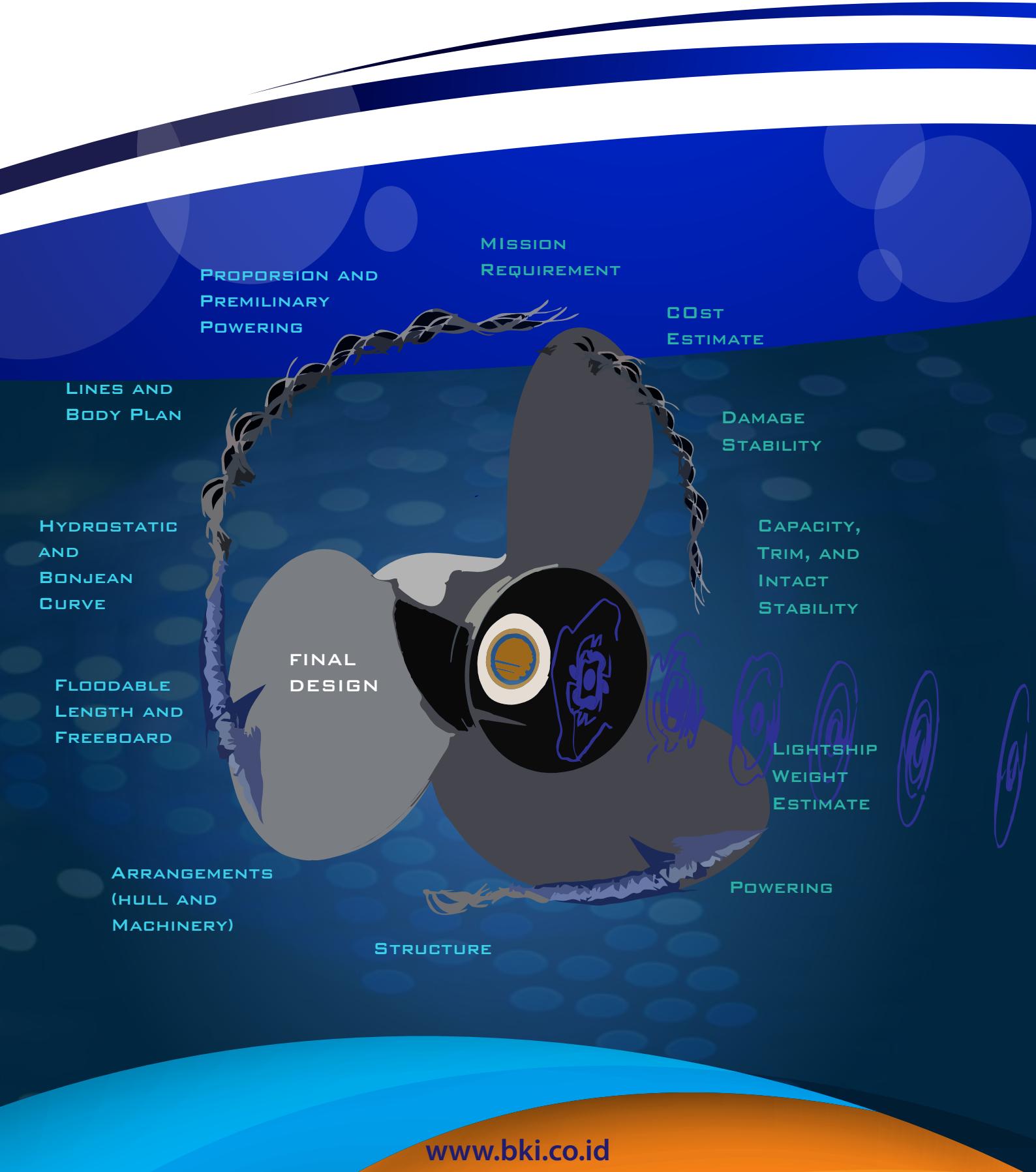


PROPULSI

Penggerak Informasi Teknik Jasa Klasifikasi Indonesia

Edisi 02 - Juni 2015



Redaksi Jurnal Teknik BKI PROPULSI mengucapkan :
SELAMAT
atas terpilihnya Bapak Rudiyanto, Direktur Utama BKI, sebagai

ACS Chairman - 2015

**Dalam pertemuan Annual Executive Committee ke-22
di Kobe, 11-12 November 2014**



Peserta pertemuan tahunan ACS EC 22. Bapak Rudiyanto (barisan terdepan, kedua dari kiri)

The Association of Asian Classification Societies (ACS) didirikan di Bali pada tanggal 1 Februari 2010 oleh 6 badan klasifikasi se-Asia yaitu Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), China Clasification Society (CCS), Indian Register of Shipping (IRS), Korean Register (KR), Nippon Kaiji Kyokai (NK) dan Vietnam Register (VR). Maksud dan tujuan ACS adalah meningkatkan keselamatan kapal dan perlindungan lingkungan laut bekerjasama dengan komunitas maritim dunia khususnya di Asia melalui pengetahuan dan keahlian yang dimiliki anggotanya. Informasi lebih lanjut: www.asiancs.org/Main/Main.aspx



Salam Redaksi,

Pada edisi kedua ini kami mengusung tema Desain Kapal. Tema tersebut diambil mengingat jantung utama dari keselamatan kapal adalah desain dari kapal itu sendiri. Secara umum desain kapal meliputi perencanaan kekuatan struktur, sistem permesinan kapal, stabilitas dan hidrodinamika. Apabila desain kapal dilakukan secara matang dan disesuaikan dengan aturan teknik yang ada diharapkan faktor resiko kecelakaan dapat diminimalisir. Dengan kata lain jaminan keselamatan laut dapat ditingkatkan.

Artikel-artikel yang dimuat pada jurnal kali ini membahas desain kapal tentang perencanaan struktur dan hidrodinamika. Perencanaan struktur meliputi kajian terkait pelat, analisa beban dan tegangan, analisa fatigue serta estimasi kekuatan lambung kapal. Artikel mengenai pembagian data gelombang di perairan domestik Indonesia disajikan sebagai faktor penting dalam desain hidrodinamika kapal terkait penentuan beban gelombang pada kapal, khususnya bagi kapal yang berlayar di perairan domestik Indonesia.

Besar harapan kami Jurnal Teknik BKI digunakan sebagai rujukan tidak hanya bagi internal BKI tetapi juga para stakeholder yang terlibat didalamnya. Semoga keberadaan Jurnal ini dapat menjadi media bagi BKI, institusi penelitian dan institusi pendidikan terkait untuk berkolaborasi dalam pengembangan desain kapal sesuai dengan konsep kekinian. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan edisi selanjutnya.



**Pengarah
Penanggung jawab
Pemimpin redaksi
Anggota**

: Direksi BKI
: Kepala Divisi Manajemen Strategis
: Senior Manager Riset dan Pengembangan Teknikal
: Mochammad Zaky
Sukron Makmun
Defri Sumarwan
Eko Maja Priyanto
Gde Sandhyana Pradhita

ALAMAT REDAKSI

Divisi Manajemen Strategis
Kantor Pusat Biro Klasifikasi Indonesia Lt. 2
Jl. Yos Sudarso No. 38 - 40, Tanjung Priok
Jakarta Utara - 14320
Telp. (+62)21 - 4301017, 4301703 ext. 2001
email : propulsi@bki.co.id

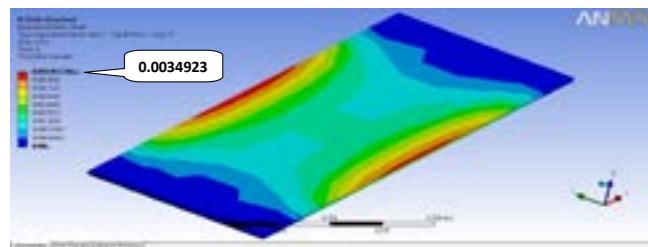
Jurnal teknik ini dapat diakses
melalui website BKI di www.bki.co.id

DAFTAR ISI

3 Salam Redaksi

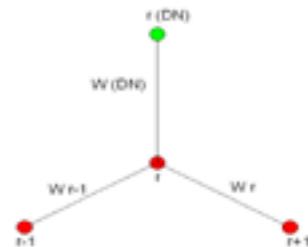
5 Pembagian Data Gelombang Perairan Domestik Indonesia

15 Kajian Tebal Pelat Akibat Beban Lateral Dalam "Rules For Hull"



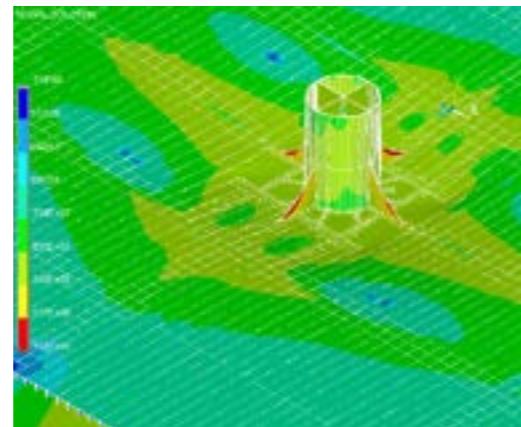
23 Analisis Ultimate Limit State (ULS) Dengan Menggunakan Idealized Structural Unit Method (ISUM) Pada Elemen Pelat Segi Empat

35 Analisis Tegangan Pada Penampang Melintang Terbuka Dinding Tipis (Thin-Wall) Menggunakan Metode Generalized Beam Theory

45 Estimasi Kekuatan Lambung Kapal Pasca Kerusakan
Estimation Of The Ship Hull Strength After Damaged

51 Estimasi Laju Korosi Pada Pelat Ruang Muat Kapal Tanker yang Berlayar Di Perairan Indonesia

57 Analisa Fatigue Life Pada Bentuk Bracket Lengkung (Radiused Bracket) Topside Module FSO/FPSO



67 Analisa Fatigue Pada Struktur Terapung Lepas Pantai (Floating Offshore Structure) Dengan Metode Simplified Fatigue Analysis

75 Studi Kasus Penilaian Resiko Mooring Line Pada Single Point Mooring Akibat Beban Kelelahan Berdasarkan Standar Biro Klasifikasi Indonesia

85 Daftar Alamat Kantor PT. Biro Klasifikasi Indonesia

88 Daftar Rules & Guidelines BKI

91 Pedoman Penulisan Jurnal Teknik BKI

PEMBAGIAN DATA GELOMBANG PERAIRAN DOMESTIK INDONESIA

Mohammad Arif Kurniawan, Fredhi Agung Prasetyo, Siti Komariyah

Abstract

Kurniawan (2012) has been initiated to divide Indonesian waterways by simplified definition 10 by 10 grids in order to recognize the wave characteristic. He concluded that the narrow area definition is required due to the geographical obstacle of some existing area. In this research, 257 areas are created by using two-by-two grid accuracy in general. By using comparable BMKG's and ECMWF's metocean data, it is found that the data of BMKG gives higher wave height fluctuation than that of ECMWF. ECMWF data are advised to be used as wave data source and the wave scatter diagram can be compiled by using this hind-cast data. The HW long-term probability distribution of new area could be assumed by using Weibull distribution.

Keywords : BMKG, ECMWF, Weibull distribution, Indonesian waterways.

1. Pendahuluan

Gelombang adalah fitur dominan yang menjadi pertimbangan utama dalam penentuan desain bangunan apung. Gelombang memiliki pengaruh gaya dan beban yang besar terhadap bangunan dinamis seperti kapal maupun pontoon dan bangunan statis seperti jacket, ataupun offshore platform lain yang bertipe fixed.

Untuk mendapatkan hasil desain yang memiliki tingkat kelayakan dengan performa yang optimum, maka gelombang menjadi faktor utama untuk menghindari terjadinya overdesign maupun underestimate.

Data metocean merupakan data hasil analisa yang diolah dalam kurun periode waktu tertentu. Data ini diolah berdasarkan sumber data seperti hasil observasi di kapal, atau menggunakan alat ukur. Alat ukur yang digunakan dapat merupakan alat ukur permukaan atau bawah air yang dipasang di stasiun pengukuran terapung (*bouy*) atau stasiun pengukuran darat. Kemudian, salah satu alat pengukuran adalah satelit altimeter. Data metocean tersebut dapat diperoleh dari badan pemerintah yang menangani bidang prakiraan cuaca atau badan riset lainnya.

Penggunaan data metocean sangat diperlukan dalam desain bangunan terapung, seperti kapal atau bangunan

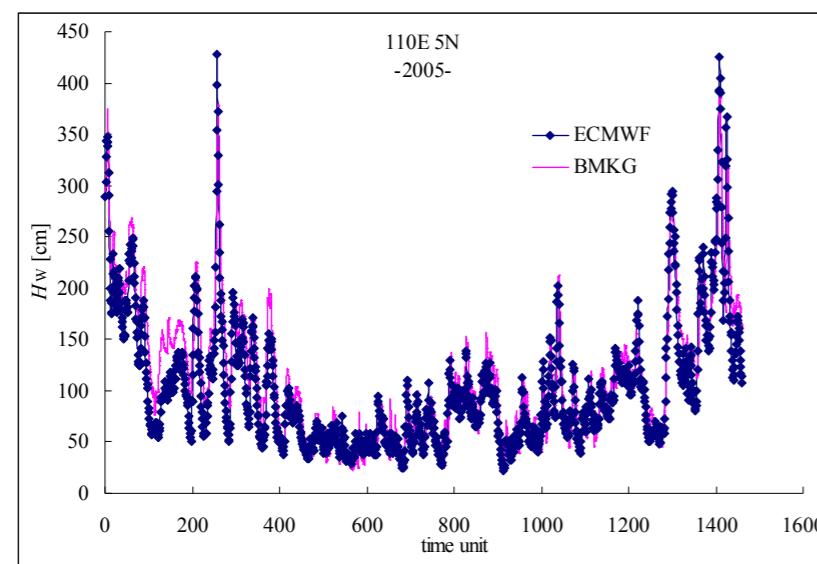
lepas pantai. Ketidaaan data metocean yang valid akan berakibat fatal bagi konstruksi tersebut, yaitu perkiraan yang berlebih atau perkiraan yang kurang dari seharusnya. Dengan perencanaan yang akurat dan matang maka performa bangunan apung yang kita desain dapat kita prediksi mendekati keadaan nyata dalam operasionalnya.

Kurangnya ketersediaan data metocean yang valid terutama di wilayah perairan Indonesia menjadi kendala dalam permasalahan desain diatas. Beberapa peneliti menggunakan pendekatan dengan data data yang tersedia untuk mengatasi hal ini, seperti Kurniawan (2013) dengan inisiasi pembagian daerah perairan Indonesia untuk mencari wave spectrum, dan spectrum yang tepat untuk kawasan ini. Kemudian, Brunner menggunakan pendekatan dengan rasio terhadap kondisi data lingkungan di laut Atlantic Utara. Berpijak pada kondisi data meta-ocean perairan Indonesia yang sangat minim, maka ditulisan ini akan dianalisa pembagian daerah wave scatter untuk perairan Indonesia dan kapabilitas daerah yang baru kemudian dianalisa dengan menggunakan dua data lingkungan yang berbeda.

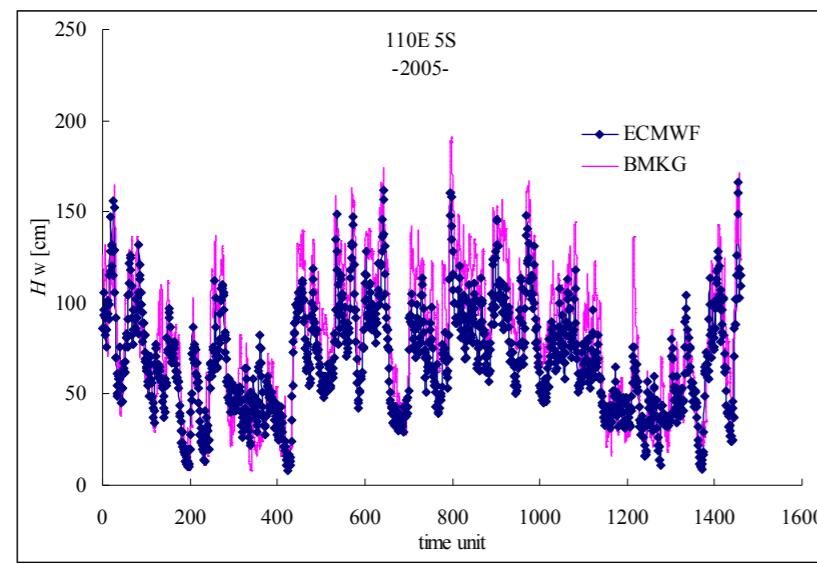
Indonesian waterways

Berikut ini disampaikan beberapa hasil analisis dengan menggunakan perbandingan data gelombang yang diperoleh dari Badan Metereologi dan Geofisika Indonesia (BMKG)¹⁾ dan European centre for medium-range weath-

er forecasts (ECMWF)¹⁾. Data gelombang BMKG diperoleh selama kurun waktu 2004 – 2011 pengukuran dengan spasial pengukuran data satu jam, sedangkan data ECMWF diperoleh pada periode 1979 – 2011 dengan spasial pengukuran data enam jam. Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3 menampilkan perbandingan data histori tinggi gelombang significant (H_w) pada beberapa poin sepanjang tahun 2005. Data yang diperoleh dari BMKG dan ECMWF ditampilkan dalam gambar-gambar tersebut. Gambar 1 menunjukkan data histori di *point* koordinat 110E 5N.

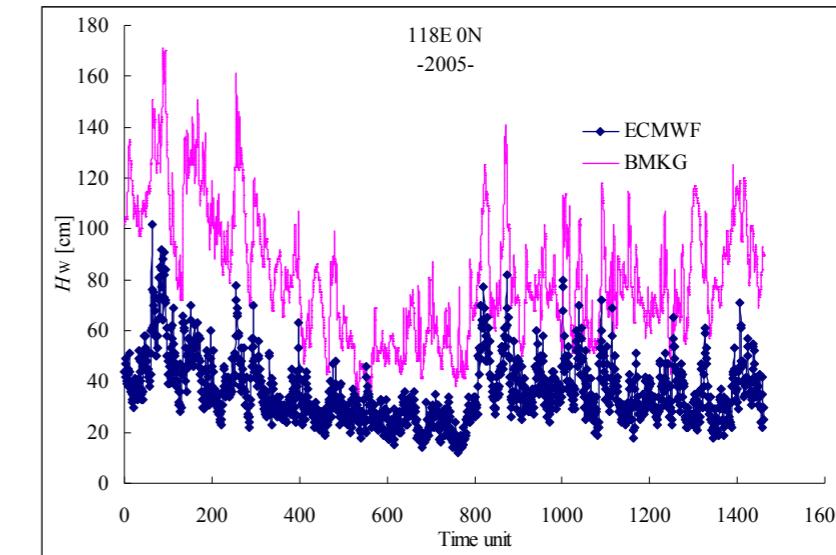


Gambar 1 : Comparison between ECMWF's and BMKG's H_w history at point 110E 5N on year 2005.

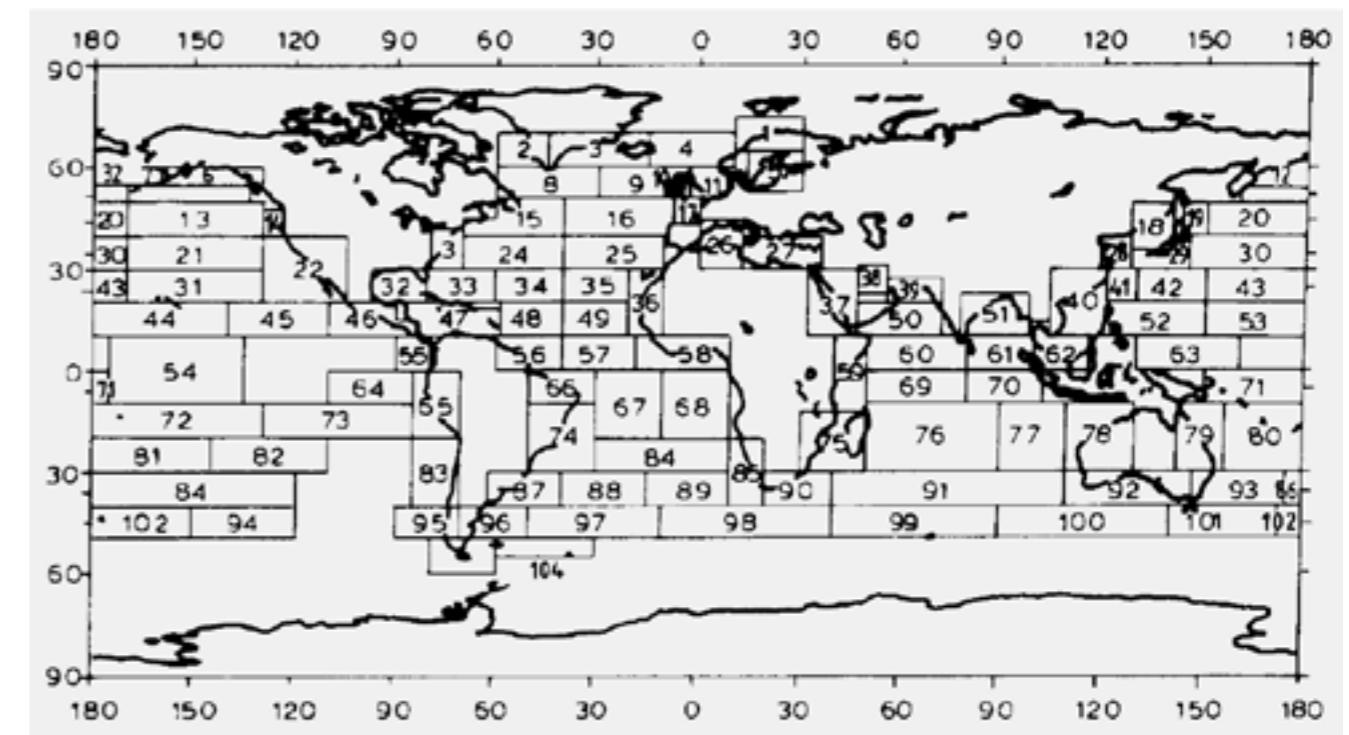


Gambar 2 : Comparison between ECMWF's and BMKG's H_w history at point 110E 5S on year 2005.

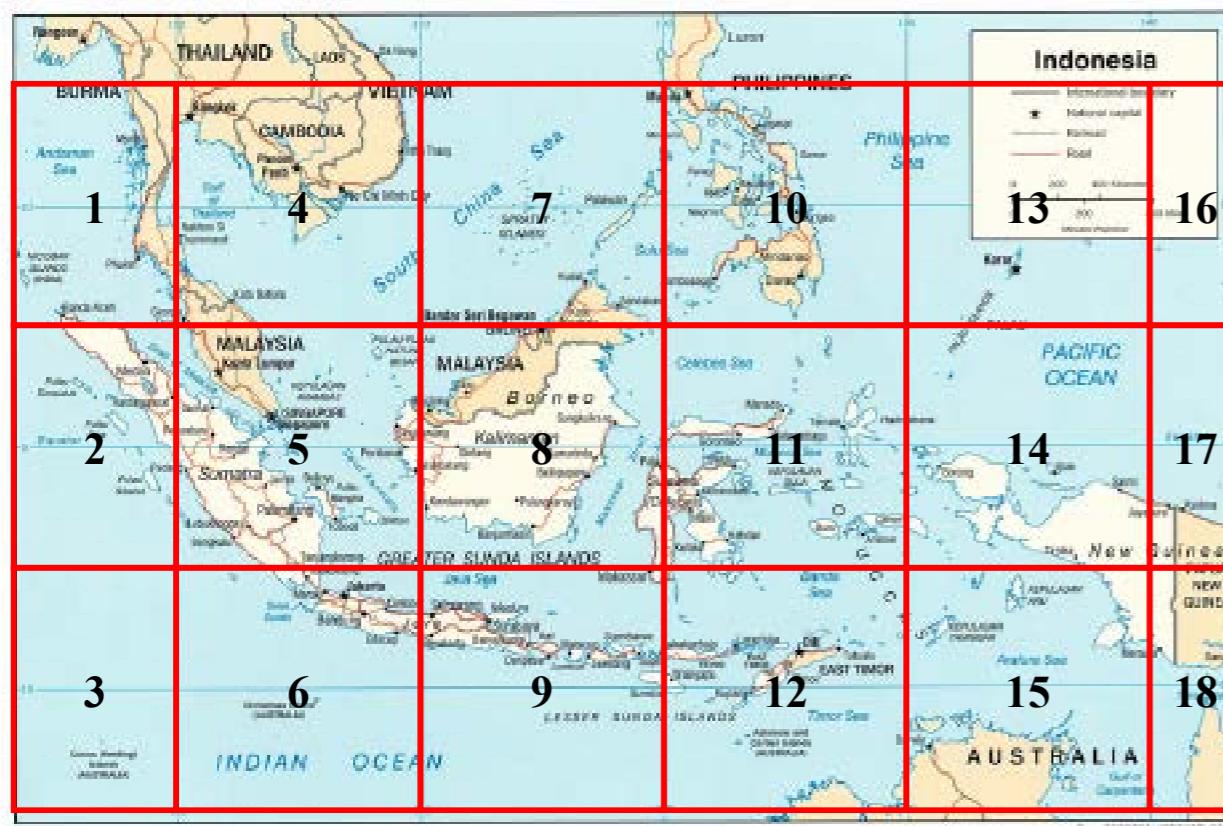
Gambar 2 untuk koordinat 110E 5S dan Gambar 3 untuk 118E 0N. Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa adanya kesesuaian yang hampir sempurna antara data yang diperoleh dari BMKG dan ECMWF, meskipun ditunjukkan juga pada beberapa periode H_w data BMKG sedikit lebih tinggi dibandingkan data ECMWF. Sedang untuk Gambar 3, data BMKG mencatat H_w yang lebih besar dibandingkan dengan ECMWF. Sehingga, dimungkinkan pemodelan dengan menggunakan data dari BMKG dapat menghasilkan hasil simulasi yang tidak sesuai dengan data aktual.



Gambar 3 : Comparison between ECMWF's and BMKG's H_w history at point 118E 0N on year 2005.



Gambar 4 : Global wave statistic area (Hogben, 1985).



Gambar 5 : Indonesian wave spectrum mapping (Kurniawan dkk, 2012).

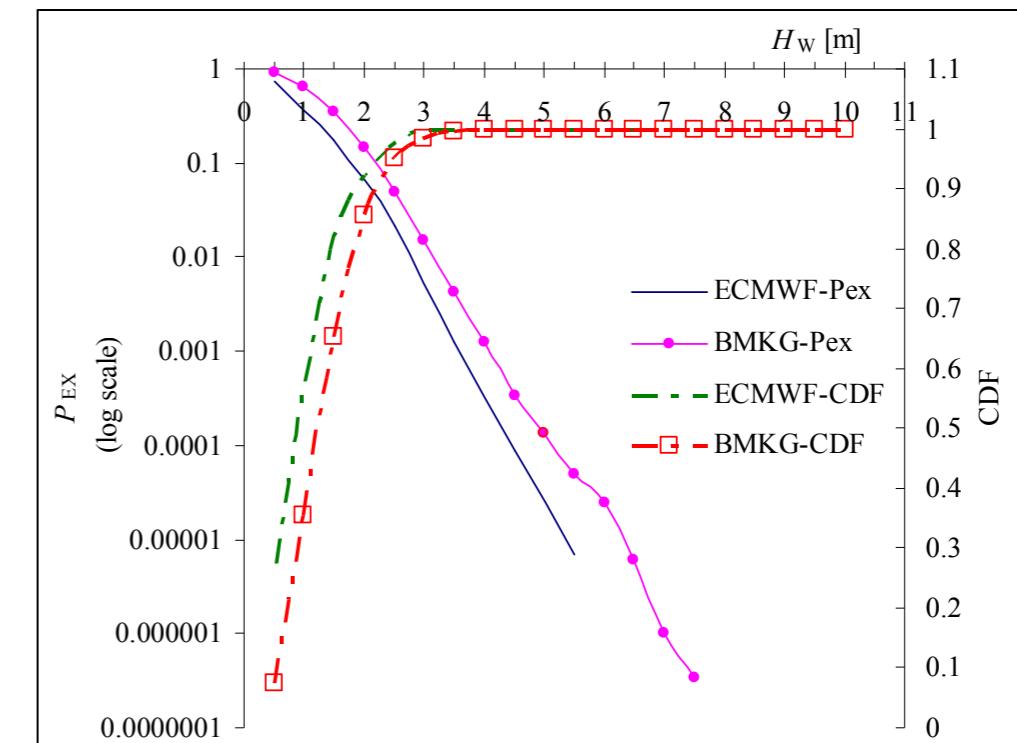
Kurniawan, 2012, mengajukan rancangan pembagian area untuk *wave spectrum* perairan Indonesia. Pembagian area tersebut didasarkan pada luasan yang hampir seimbang untuk setiap area, seperti ditunjukkan di Gambar 5. Pembagian area ini didasarkan suatu kebutuhan akan tidak tersedianya data *wave scatter* untuk perairan Indonesia seperti data dari global wave statistic (GWS) yang ditunjukkan di Gambar 4 dimana area dipedalaman kepulauan Indonesia merupakan *blank area*. Tetapi cakupan sebuah area yang terlalu luas ($10^\circ \times 10^\circ$), dapat menyebabkan menurunnya tingkat akurasi data yang dihasilkan. Sebagai contoh, area 2 pada Gambar 5 menunjukkan area yang mencakup beberapa wilayah yang sebenarnya sangat berbeda karakteristik tinggi gelombangnya, yaitu selat Malaka, pantai barat pulau Sumatra dan Samudera India. Sebagai akibatnya, maka tinggi gelombang area 2 untuk daerah perairan selat Malaka, akan sama dengan area 2 yang merupakan daerah Samudera Hindia sedangkan secara karakteristik kedua lokasi memiliki perbedaan yang cukup signifikan dari segi kedalaman perairan yang mempengaruhi *bathymetry*, kecepatan angin, panjang *fetch* yang dipengaruh oleh kondisi proyeksi medan angin permukaan, serta jejak lintas badi yang mampu mempengaruhi sea state dari masing

masing lokasi. Dimana dari semua data lingkungan diatas dapat diperkirakan berdasarkan statistic.

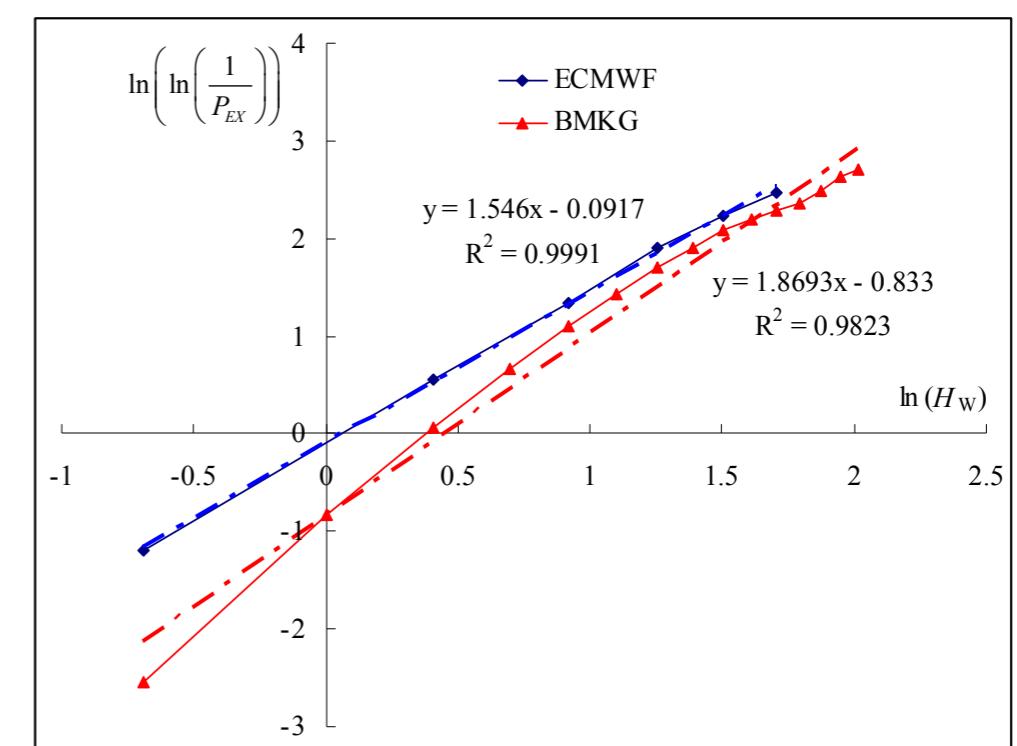
Perbandingan *cumulative probability density* dan *long term exceedance probability* dari H_w dari data BMKG dan ECMWF ditampilkan pada Gambar 6. Gambar 7 menampilkan Weibull plot dari *long-term distribution* H_w untuk data BMKG dan ECMWF. Kedua data dianalisa pada periode pengukuran selama 7 tahun (2004 ~ 2011). Dari gambar tersebut, kemungkinan terpilihnya H_w untuk BMKG lebih tinggi dari pada ECMWF, sehingga berakibat H_w simulasi akan lebih tinggi dan hasilnya adalah konservatif. *Linearity* Weibull plot pada Gambar 7 menunjukkan bahwa korelasi $\ln(H_w)$ dan $\ln(\ln(1/P_{EX}))$ dapat ditunjukkan dengan sebuah garis lurus hanya untuk ECMWF data, sedangkan keakurasi BMKG lebih rendah $\pm 10\%$.

Dari beberapa kesimpulan diatas, maka beberapa hal sebagai berikut diperlukan sehingga analisa data gelombang menjadi lebih akurat :

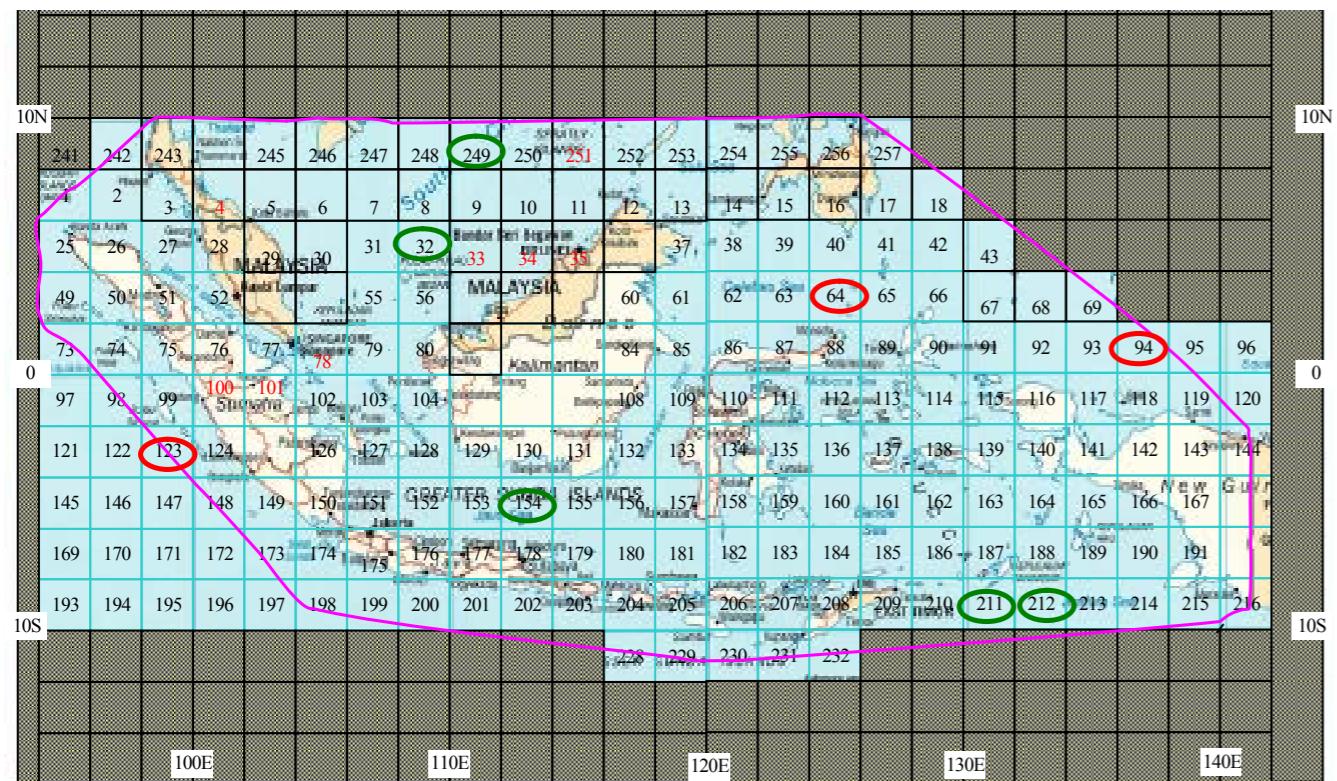
1. Data metocean yang reliabilitinya lebih baik.
2. Pembagian area yang lebih baik.



Gambar 6 : Comparison of cumulative probability density dan long term exceedance probability of H_w .



Gambar 7 : Weibull plot of average wave scatter data of ECMWF and BMKG along 2004 to 2011 period of measurement analyses.



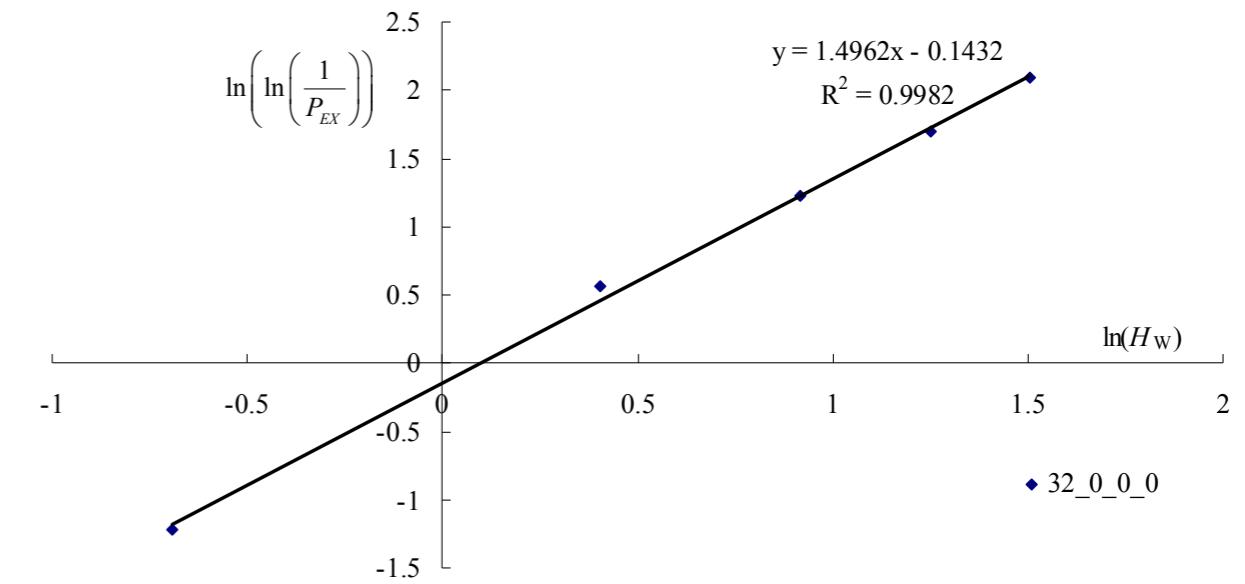
Gambar 8 : Modified map of Indonesia wave scatter area.

Berdasarkan penjelasan tersebut diatas, maka penulis mencoba untuk mengatur ulang peta daerah perairan Indonesia dan sekitarnya. Daerah perairan Indonesia adalah daerah pelayaran kawasan Indonesia seperti didefinisikan sesuai PM. 7 tahun 2013 pasal 2 ayat 4. Daerah perairan Indonesia merupakan daerah didalam garis merah jambu pada Gambar 8. Kemudian, pembagian perairan Indonesia baru yang diusulkan didasarkan pada luasan area sesuai prinsip pemetaan yang pertama dengan cakupan daerah yang diperkecil dan ditunjukkan pada Gambar 8. Secara umum, area diatur dengan grid akurasi sebesar $2^\circ \times 2^\circ$, dan beberapa area diatur khusus dengan memperhitungkan posisi, lokasi dan kontur daratan pada lokasi terpilih.

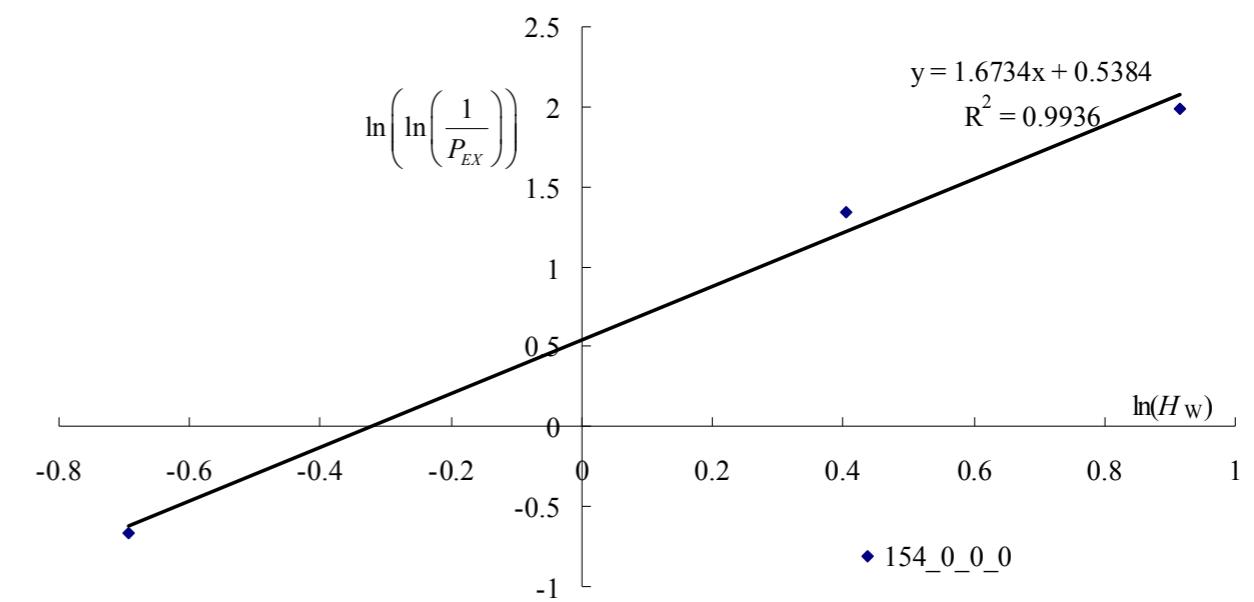
Beberapa lokasi area di peta pembagian perairan Indonesia dipilih untuk menunjukkan akurasi usulan wilayah pembagian dan data dari ECMWF. Lima daerah terpilih mewakili perairan Indonesia adalah :

- Area 32 yang terletak di $108^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$ dan $4^\circ\text{N} \sim 6^\circ\text{N}$ daerah Laut China Selatan disekitar kepulauan Natuna Besar.
- Area 154 yang terletak di $112^\circ\text{E} \sim 114^\circ\text{E}$ dan $4^\circ\text{S} \sim 6^\circ\text{S}$ di perairan Laut Jawa di sebelah selatan pulau Kalimantan.
- Area 211 dan 212 yang terletak di $130^\circ\text{E} \sim 132^\circ\text{E}$; $8^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{S}$ dan $132^\circ\text{E} \sim 134^\circ\text{E}$; $8^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{S}$ disekitar Laut Arafura disebelah selatan kepulauan Tanimbar.
- Area 249 yang terletak di $110^\circ\text{E} \sim 112^\circ\text{E}$ dan $8^\circ\text{N} \sim 10^\circ\text{N}$ daerah Laut China Selatan disekitar kepulauan Spratly.

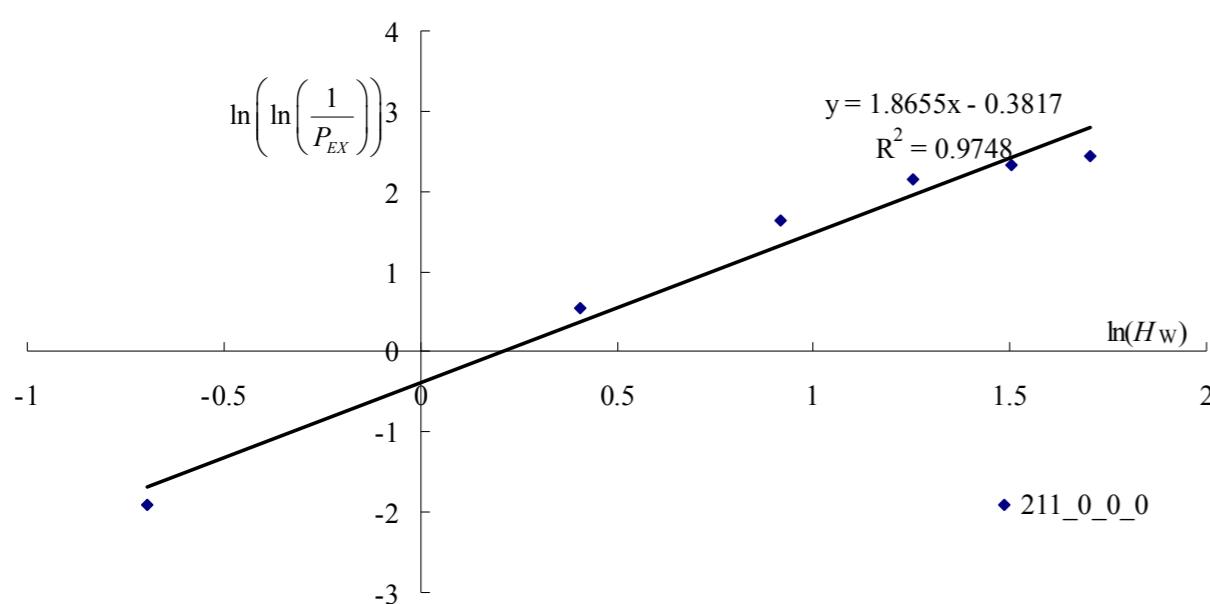
Wave scatter diagram untuk seluruh area yang diusulkan bagi perairan Indonesia disusun. Kemudian, *wave scatter diagram* untuk daerah/area yang terpilih dianalisa long-term distribution dari H_w -nya. Sebagaimana disebutkan di paragraph sebelumnya bahwa *long-term distribution* dari H_w dapat diasumsikan sesuai dengan distribusi Weibull. Kemudian, Weibull plot dari area 32, 154, 211, 212 dan 249 untuk seluruh tahun ditampilkan di Gambar 9 ~ Gambar 13. Gambar gambar tersebut menunjukkan bahwa korelasi antara $\ln(H_w)$ dan $\ln(\ln(1/P_{EX}))$ dapat digambarkan dengan sebuah garis lurus dengan akurasi yang sangat baik khususnya untuk area 32, 154 dan 249. Sedang untuk area 211 dan 212 akurasinya sebesar 97% ~ 98%. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa *long-term distribution* dari H_w dapat diasumsikan sesuai dengan distribusi Weibull.



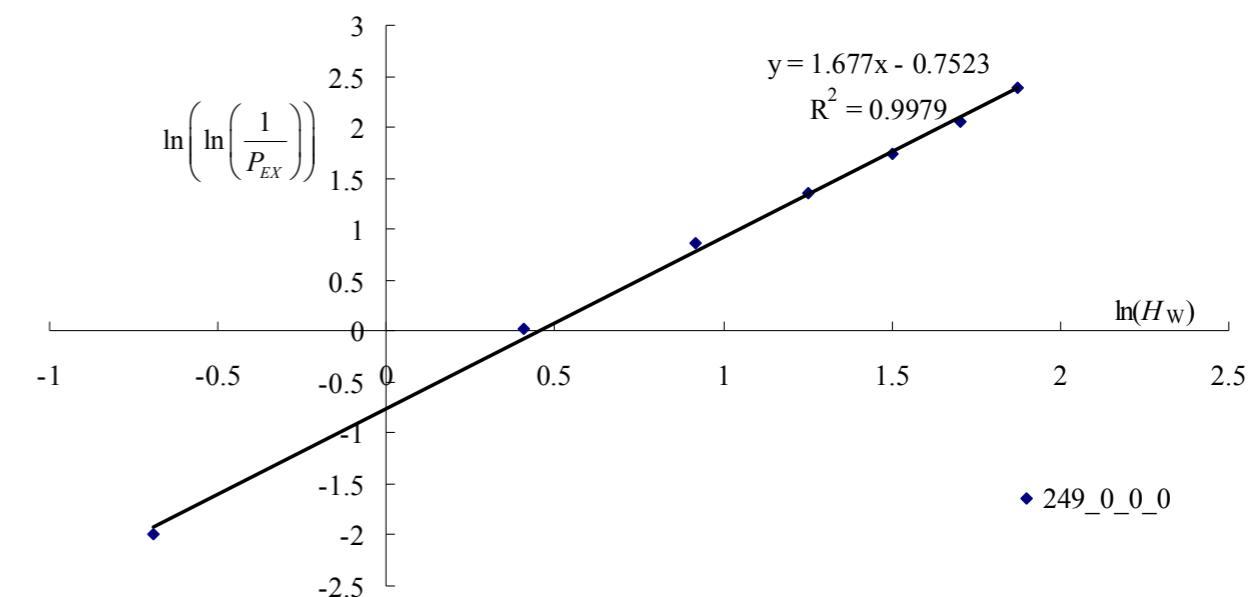
Gambar 9 : Weibull plot of area 32 (all years).



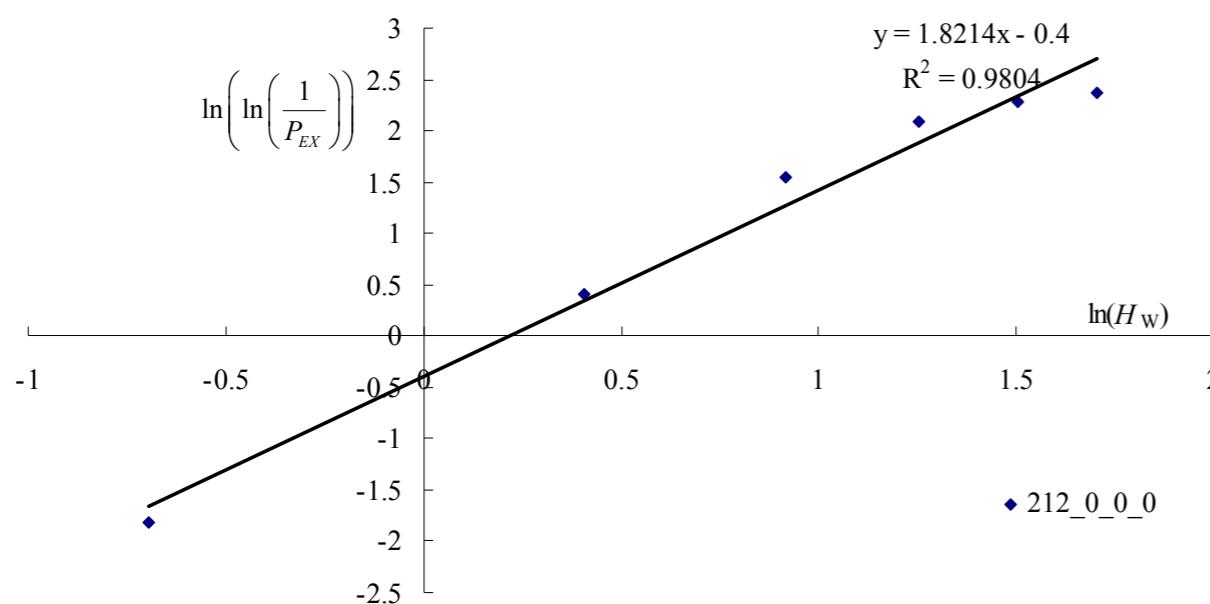
Gambar 10 : Weibull plot of area 154 (all years).



Gambar 11 : Weibull plot of area 211 (all years).



Gambar 13 : Weibull plot of area 249 (all years).



Gambar 12 : Weibull plot of area 212 (all years).

Dari hasil analisa diatas, maka data gelombang ECMWF, mempunyai kapabilitas, kapasitas dan realibilitas untuk digunakan sebagai acuan dalam analisa lebih lanjut untuk struktur kapal, maupun bangunan lepas pantai. Untuk analisa tersebut, masih memerlukan beberapa analisa tambahan, seperti analisa data spectrum, response karena histori gelombang terhadap struktur kapal maupun bangunan lepas pantai, dan lainnya.

2. Kesimpulan

Kurniawan (2012) telah melakukan inisiasi untuk menge-lompokkan wilayah perairan indonesia menjadi beberapa area yang dibagi secara sederhana dalam 10×10 derajat untuk mengetahui perbedaan karakter gelombang antar luasan area. Dalam hal hasil penelitiannya disimpulkan bahwa perlu dilakukan pembagian area yang lebih rapat dan mempertimbangkan karakter perairan disekitarnya area tersebut.

Dalam penelitian lanjutan yang dilakukan ini perairan yang sama akan dibagi kembali menjadi 257 area baru dengan kerapatan pengamatan sebesar 2 derajat. Dengan memanfaatkan data metocean BMKG dan ECMWF sebagai input analisa penulis menemukan bahwa data BMKG memiliki kecenderungan fluktuasi muka laut yang lebih besar dibandingkan dengan data ECMWF. *Long-term distribution* dari H_w data metocean ECMWF untuk area baru perairan

Indonesia dapat diasumsikan dengan mengikuti distribusi Weibull.

Sebagai kesinambungan dari analisa yang telah dilaksanakan, perlu dilaksanakan pelaksanaan penelitian dengan menggunakan data gelombang ECMWF untuk analisa spectrum gelombang, response karena data gelombang terhadap struktur kapal atau bangunan lepas pantai.

3. Ucapan Terima Kasih

Data metocean dari ECMWF dimiliki oleh European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) dan diakses serta diunduh dari http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_full_daily/.

Data oceanography dari BMKG dimiliki oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika dan diakses melalui Stasiun meteorologi Surabaya, dan Kantor pusat BMKG, Kemayoran Jakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- PM. No.7 2013, Kewajiban klasifikasi bagi kapal berbendera Indonesia pada badan klasifikasi.
- Kementerian Perhubungan, Standar kapal non-konvensi Berbendera Indonesia, 2009.

3. Mohammad Arif Kurniawan, Aries Sulistyono, Petrus Eko Panunggal, Spectrum parametric modification for analyzed long and short-term wave in Indonesian waterways by using fourier transformation, TEAM 2013, pp.141-148.
4. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF; www.ecmwf.int.
5. Hogben N, Dacunha N M, Olliver F, Global wave statistics, British Maritime Technology Ltd, 1985.
6. Brunnel E, Von Selle H, Kunzel J, Sabel A, Fatigue Analysis and Condition Assessment of FPSO Structures, TSCF Shipbuilders Meeting, 2007.

KAJIAN TEBAL PELAT AKIBAT BEBAN LATERAL DALAM “RULES FOR HULL”

Topan Firmandha

Abstract

BKI as a national classification has determined the minimum scantling of ship structure in accordance with the rules of the BKI Rules For Hull (Part 1, Vol.II). Minimum scantling requirement is expressed in the form of empirical formula in order to make easier to the determining the margin of safety of the ship construction and one of the formula is the minimum requirement of the plate thickness due to lateral loads. This empirical formula using the theory of elasto-plastic bending with failure criteria is above yield points(edge hinges), the consequences of plate thickness is decreases but still not including the margin of safety factor. This is showed by actual plate capacity is stronger than the actual plate (10 ~ 30% compared to the theory), as well as the effect of plastic membrane that is used as a margin of safety limits. Therefore, it can be proposed that the failure of criteria will be increasing up to the limit of collapse, so that the thickness of the plate due to lateral loads can be reduce.

Keywords: elasto-plastic bending, lateral load, plastic membrane, edge hinges

1. Pendahuluan

Dalam menentukan konstruksi kekuatan kapal setiap badan klasifikasi mengeluarkan rumus empiris mereka masing-masing dengan berbagai macam faktor dan tingkat keamanan tertentu. Tak terkecuali dengan BKI, BKI sebagai badan klasifikasi nasional dalam *Rules For Hull* (Part.I, Vol.II) juga mengeluarkan rumus empiris guna menentukan jaminan keamanan ukuran konstruksi kapal.

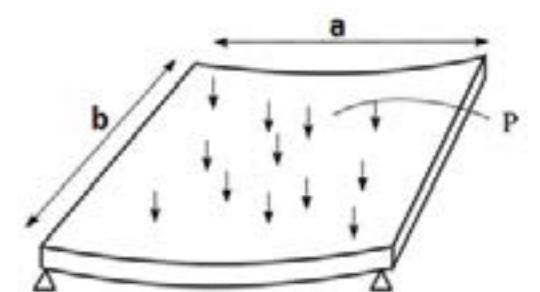
Secara umum perhitungan kekuatan struktur kapal dapat dipisah menjadi 2 skala besar, yakni kekuatan *local* dan kekuatan *global*. Kekuatan *local* yang dimaksud adalah kekuatan struktur kapal yang tidak terpengaruh pada ukuran, jenis dan geometri kapal, maupun pada daerah pelayarnya. Sedangkan kekuatan *global* adalah kebalikannya.

Pada kesempatan kali ini akan dibahas tentang kekuatan *local* struktur kapal, terkhusus pada rumus empiris tebal pelat akibat beban lateral, yakni tentang teori yang diusung, tingkat *factor* keamanan yang diambil, serta konsekuensi yang ditimbulkannya. Tak lupa kami juga akan membuat hipotesa dan juga membahas tentang adanya kemungkinan penurunan hasil tebal plat dari pembebangan lateral ini.

2. Tinjauan Pustaka

Dalam *Rules For Hull* Section 3, A.3 disebutkan, “The formulae for plate panels subjected to lateral pressure as given in the following Sections are based on the assumption of an uncurved plate panel having an aspect ratio $b/a \geq 2,24$ ”. Hal ini menjadikan masalah menjadi lebih sederhana, yakni dengan menggunakan teori pembebangan lateral pada pelat panjang (Lihat Gambar 1). Adapun beberapa asumsi yang lazim digunakan pada teori ini (Daley, 2012) adalah :

- Geometri pelat panjang (panjang $b \geq 3 \cdot$ lebar a)
- Beban merata
- Dijepit dikedua sisi



Gambar 1 : Ilustrasi pembebangan lateral pada plat panjang

- 1) - Data oceanography dari ECMWF dimiliki oleh European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) dan diakses serta diunduh dari http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_full_daily/.
- Data oceanography dari BMKG dimiliki oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika dan diakses melalui Stasiun meteorologi Surabaya, dan Kantor pusat BMKG, Kemayoran Jakarta.



Mohammad Arif Kurniawan, merupakan peneliti bidang environmental, Struktur dan Material untuk Kapal dan Bangunan Laut, tim pengembangan software DEWARUCI, dan Div. Manajemen Strategi PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2000 di Teknik Perkapalan ITS Surabaya, dan gelar M. Eng tahun 2010 dari Osaka University.

kasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2000 di Teknik Perkapalan ITS Surabaya, dan gelar M. Eng tahun 2010 dari Osaka University.



Siti Komariyah, merupakan peneliti bidang environmental, Struktur dan Material untuk Kapal dan Bangunan Laut, dan Div. Manajemen Strategi PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2003 di Teknik Perkapalan ITS Surabaya.



Fredhi Agung Prasetyo, merupakan peneliti bidang environmental, Struktur dan Material untuk Kapal dan Bangunan Laut, tim pengembangan software DEWARUCI, dan Div. Manajemen Strategi PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2000 di Teknik Perkapalan ITS Surabaya.

Adapun kriteria kegagalan yang akan digunakan selanjutnya adalah "von misses yield" atau sering disebut juga sebagai tegangan total. Von missed yield umumnya dibentuk dengan pola *engineering stresses* tiga dimensi, yakni dengan menjumlahkan semua tegangan (normal dan geser) pada keseluruhan muka penampang. Sedangkan pada kajian kali ini pokok bahasan adalah plat struktur utama kapal (yang disebut juga sebagai pelat tipis / *thin plate*), maka asumsi *plane stresses* dapat digunakan, yakni dengan menganggap pelat sebagai *surface* dua dimensi, dan menghilangkan keberadaan tegangan kearah tegak lurus bidang, namun tetap membiarkan adanya deformasi kearah tegak lurus bidang. Bentuk von *misses yield* dalam pola dua dimensi dapat dilihat dalam formulasi berikut :

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau^2 xy = \sigma_{yield}^2 \quad (1)$$

Akan tetapi von *misses yield* terkadang dapat juga dinyatakan juga dalam bentuk *principal stresses*, yakni dengan mencari nilai tegangan normal pada saat tegangan geser-nya bernilai nol, sehingga didapatkan nilai maximum dan minimum dari tegangan normal. Selanjutnya persamaan von *misses yield* diatas jika dirubah dalam bentuk "principal stress" akan menjadi :

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_y^2 \quad (2)$$

Von *missed yield* (σ_y) dalam rumus diatas (bentuk *principal stresses*) merupakan σ_{yield} dalam bentuk "*engineering stresses*". Digunkannya bentuk *principal stresses* adalah untuk memudahkan dan menyederhanakan persamaan, yakni tersisa hanya dua jenis tegangan normal, dengan hubungan antar ke-dua tengen normal tersebut adalah $\sigma_2 = v \sigma_1$, dimana v adalah posion ratio. Dan persamaan diatas menjadi :

$$\sigma_1^2 - \sigma_1(v \cdot \sigma_1) + v^2 \cdot \sigma_1^2 = \sigma_y^2 \quad (3)$$

Untuk pelat baja nilai *poisson ratio* v sebesar 0,3, sehingga nilai *principal stresses* (σ_1) terhadap *yield* adalah :

$$\sigma_1 = 1,125 \cdot \sigma_y \quad (4)$$

Persamaan akhir dari kriteria kegagalan *yield* dari plat diatas kemudian akan dimasukan dalam persamaan moment maximum dari *beam bending*. Dan persamaan dari *beam bending* dengan panjang 'a', yang dibebani dengan beban 'p' merata serta dijepit di kedua sisinya adalah :

$$M_{max} = \frac{p \cdot a^2}{12} \quad (5)$$

Tegangan maximum (σ_x) yang diakibatkan dari *moment bending* diatas sebesar :

$$\sigma_x = \frac{M_{max} \cdot c}{I} = \frac{M_{max} \cdot t/2}{t^3/12} = \frac{6 \cdot M_{max}}{t^2} \quad (6)$$

Dimana 'c' adalah titik berat pelat = $t/2$, dan I adalah moment Inertia penampang pelat. Subtitusi M_{max} pada posisi *yield* mengubah persamaan menjadi :

$$\sigma_x = \frac{6 \cdot M_{max}}{t^2} = \frac{6 \cdot p \cdot a^2}{t^2 \cdot 12} = \frac{p \cdot a^2}{2t^2} \quad (7)$$

Perlu diingat kembali bahwa tegangan maximum dari *beam bending* (σ_x) dalam persamaan diatas akan dimasukan dalam persamaan *principal stresses* (σ_1) dari pelat, sehingga nilainya menjadi *equivalent* dan membentuk persamaan baru :

$$\sigma_x = \sigma_1 \quad (8)$$

$$\frac{p \cdot a^2}{2t^2} = 1,125 \cdot \sigma_y \quad (9)$$

Dan bentuk akhir dari pembebanan merata untuk membuat pelat menjadi *yield* adalah :

$$p_y = 2,25 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2 \quad (10)$$

3. Metodologi

Metode penggeraan dalam kajian kali ini adalah dengan menurunkan persamaan dasar/standar respon plat terhadap pembebanan merata secara lateral dengan criteria kegagalan *yield*, kemudian merubah persamaan dasar tersebut kedalam bentuk empiris baik dengan merubah variabelnya, atau dengan menyesuaikan satuan-satuannya sesuai dengan pola umum dalam *Rules For Hull*. Jika hasil dari penurunan rumus empiris lebih besar dari rumus empiris BKI maka criteria kegagalan akan dinaikan ke tingkat *edge hinge* atau bahkan *collapse*, dan jika hasilnya lebih kecil maka criteria akan diturunkan dibawah *yield*. Kemudian akan dilakukan penurunan lagi hingga hasil ke-dua rumus empiris mendekati sama atau sama.

Jika criteria kegagalan telah diketemukan dengan cara analitis, maka metode selanjutnya yang digunakan adalah mengevaluasi rumus empiris BKI secara numeric meng-

gunakan bantuan *software ANSYS workbench*. Yakni dengan membalik rumus BKI dari data plat actual, sehingga didapatkan besarnya beban maksimum, yang kemudian akan di bebankan pada model *finite element*. Plat actual berbentuk panel, akan dimodelkan seperti beam dengan ukuran penampang $t \times t$ dan panjang beam adalah lebar panel. Kemudian memproses hasilnya dengan metode *large displacement*, dan mengevaluasi hasilnya dengan criteria *equivalent plastic strain*.

Jika hasil dari *equivalent plastic strain* sesuai dengan kriteria kegagalan secara analitis maka dapat disimpulkan pada tingkat mana batasan kriteria kegagalan yang digunakan untuk membentuk rumus empiris BKI. Selanjutnya adalah memberikan argumen terkait pengambilan kriteria kegagalan, dan membuat hipotesa kemungkinan penurunan hasil tebal yang dihasilkan dari rumus empiris BKI.

4. Hasil dan Pembahasan

Mengambil kembali dari tinjauan pustaka, bentuk akhir dari persamaan pembebanan merata untuk membuat plat menjadi *yield* (persamaan 10) adalah :

$$p_y = 2,25 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2$$

Dari persamaan dasar inilah setiap badan klasifikasi dunia mengembangkan persamaan formula empiris mereka masing-masing. Sedangkan BKI merubahnya dengan mengganti variable σ_y dalam variable baru yang disebut material faktor k . Nilai k sesuai definisi dari *Rules For Hull*, kemudian disesuaikan satuan-satuannya dan dijelaskan sebagai berikut :

$$k = \frac{235}{ReH \left[\frac{N}{mm^2} \right]} = \frac{235}{\sigma_y \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right]}; \sigma_y = \frac{235 \cdot 10^{-6}}{k} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (11)$$

Nilai material faktor k kemudian dimasukkan kembali dalam persamaan beban untuk menyebabkan plat *yield*, dan menjadi :

$$p_y \left[\frac{N}{m^2} \right] = 2,25 \cdot \frac{235 \cdot 10^{-6}}{k} \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot \left(\frac{t [m]}{a [m]} \right)^2 \quad (12)$$

Persamaan diatas dibalik dan satuan standarnya disesuaikan dengan satuan yang lazim digunakan dalam *Rules For Hull*, hingga akhirnya menjadi :

$$t [* 10^3 mm] = a [m] \cdot \sqrt{P_y [* 10^{-3} \frac{kN}{m^2}] \cdot \frac{k}{5,29 \cdot 10^{-4}} [* 10^6 \frac{mm^2}{N}]} \quad (13)$$

Dan persamaan akhir menjadi :

$$t = \frac{\sqrt{10^3}}{1000} \cdot 43,49 \cdot a \cdot \sqrt{P_y \cdot k} \quad (14)$$

$$t = 1,37521 \cdot a \cdot \sqrt{P_y \cdot k} \quad (15)$$

Setelah ditambah faktor korosi, persamaan menjadi :

$$t = 1,38 \cdot a \cdot \sqrt{P_y \cdot k + tk} \quad (16)$$

Dan persamaan diatas sudah memiliki format yang sama dengan rumus empiris untuk tebal plat alas *Rules For Hull* Section 6. B.1.2 :

$$t_{B2} = 1,21 \cdot a \cdot \sqrt{P_B \cdot k} + tk \quad (17)$$

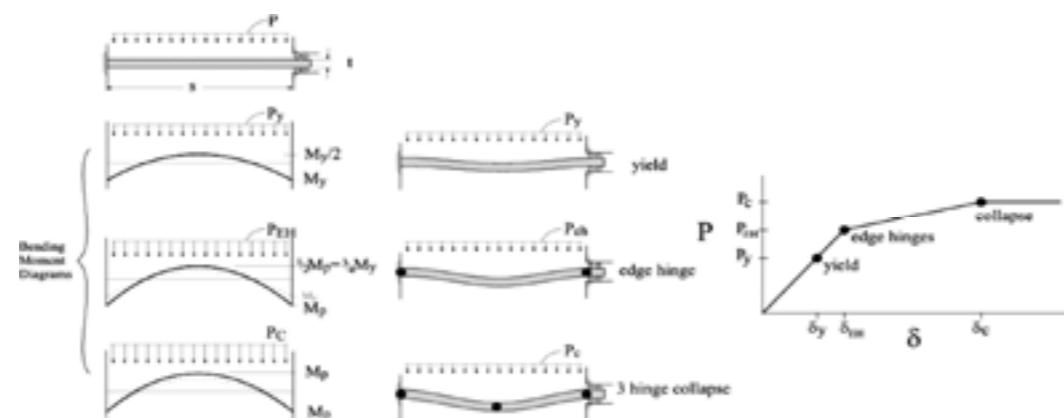
Perbedaan dua rumusan diatas menunjukkan pula perbedaan dalam mengambil design criteria kegagalan, rumus empiris BKI yang menghasilkan tebal plat yang lebih tipis memberikan hipotesa bahwa rumus empiris BKI mengambil criteria kegagalan diatas *yield*. Hal ini pun sebagaimana yang juga ditemukan pada rumus beban alas dari Rules DNV "Hull Structural Design, Ships with Length 100 metres and above", yang memiliki criteria kegagalan hingga *collapse*. Rumus standar yang digunakan pada plat elasto/plastis bending berikut diagramnya disajikan dalam Gambar 2 dan Tabel 1 (SSC, 2007).

Menindaklanjuti hipotesa diatas, maka selanjutnya criteria kegagalan akan dinaikan dari *yield* ke tingkat *edge hinge* (plastis pada kedua ujung jepit). Dengan cara penurunan yang sama dengan cara diatas, maka persamaan akhir menjadi :

$$t = 1,2039 \cdot a \cdot \sqrt{P_y \cdot k + tk} \quad (18)$$

Atau dibulatkan keatas menjadi :

$$t = 1,21 \cdot a \cdot \sqrt{P_y \cdot k + tk} \quad (19)$$



Gambar 2 : Diagram respon plate bending

Tabel 1 : Rumus respon plat bending standar

Kriteria Kegagalan	Beban	Defleksi
Yield	$p_y = 2,25 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2$	$\delta_y = \frac{1}{384} \cdot \frac{p_y \cdot a^4}{D}$
Edge hinge	$p_{EH} = 1,5 \cdot p_y = 3,375 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2$	$\delta_y = \frac{1}{384} \cdot \frac{p_{EH} \cdot a^4}{D}$
Collapse	$p_c = 2 \cdot p_y = 4,5 \cdot \sigma_y \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^2$	$\delta_y = \frac{2}{384} \cdot \frac{p_c \cdot a^4}{D}$

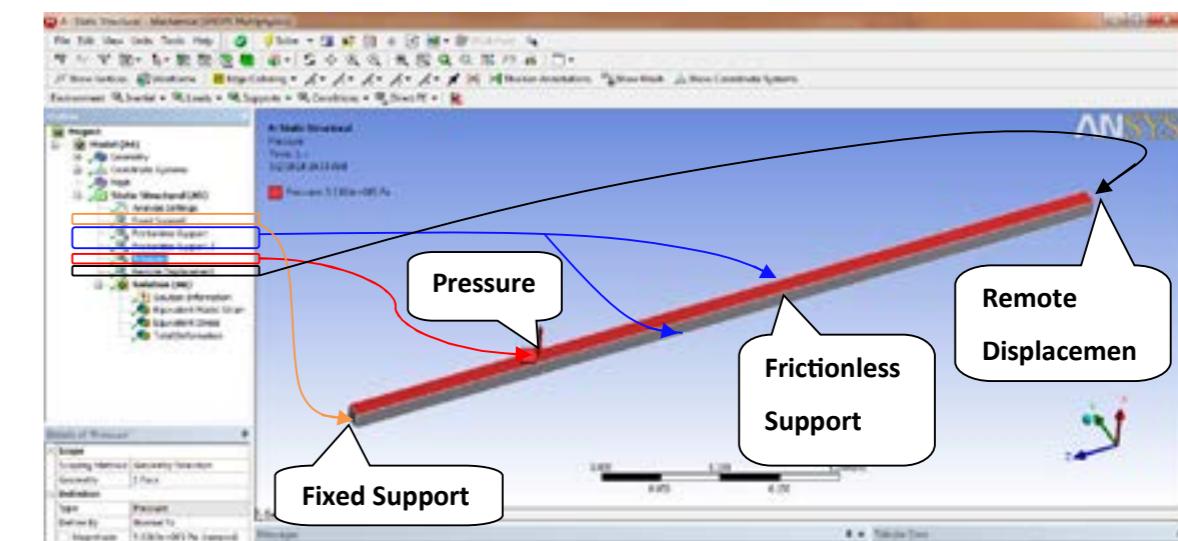
Hasil terakhir menunjukkan bahwa secara analitis, rumus empiris BKI dibangun pada kriteria plastis. Untuk memperjelas dan membuktikan pengambilan kriteria *edge hinge* pada rumus empiris BKI diatas, maka akan diadakan percobaan numerik dengan *software ANSYS workbench*, menggunakan analisa *non-linear* atau *large displacement*, kemudian menguji kapasitas plat aktual yang umum digunakan pada plat struktur utama kapal (contoh: plat alas) dengan kriteria *equivalent plastic strain*. Kriteria *equivalent plastic strain* adalah kriteria yang digunakan ANSYS workbench untuk memperhitungkan munculnya penambahan area plastis/area yang telah melampaui batas tegangan *yield* dalam suatu analisa struktur.

Pelat alas panel yang diuji dengan ukuran geometri 2100x700x15mm, dengan memasukan geometri pada rumus empiris tebal pelat alas BKI diatas, maka akan didapat besarnya beban merata sebesar 313628,6 Pa. Pemodelan diambil pada bagian tengah pelat secara melintang, dengan ukuran penampang model sebesar $t \times t$ (15x15mm), bentuk-bentuk tumpuan yang digunakan adalah *fixed support* yang mengunci semua pergerakan, *remote displacement* yang membatasi gerak translasi dan rotasi arah x dan y tapi membebaskan kearah z, dan *frictionless support* yang membuat area ini tidak memiliki gesekan atau dalam kata lain masih berhimpit dengan pelat di sebelahnya, hal ini dilakukan agar hasil analisa sesuai dengan kondisi teori yang dipergunakan. Bentuk model, tumpuan serta beban yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 3.

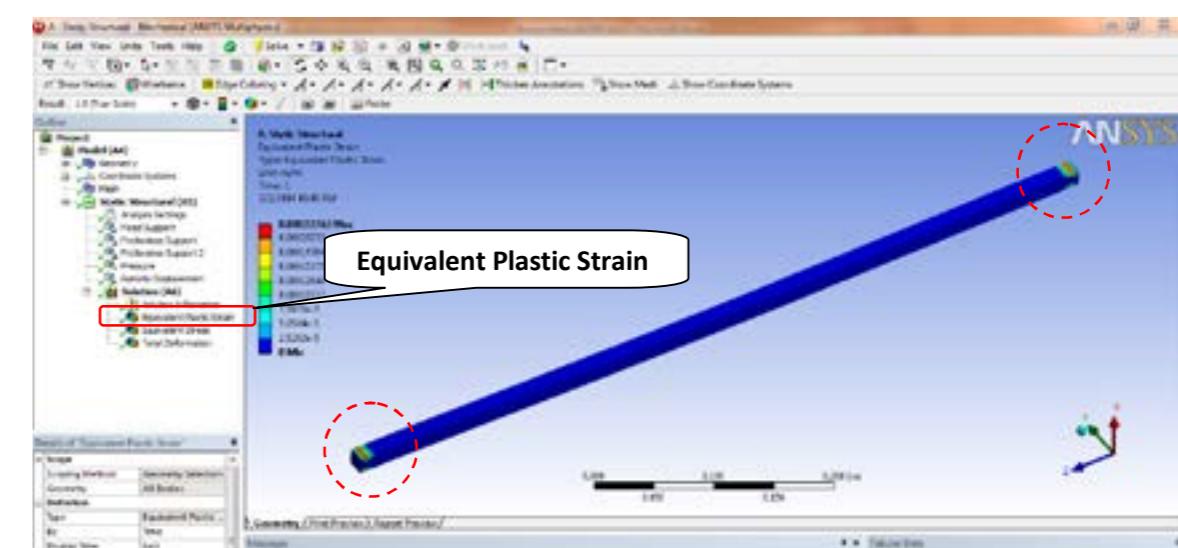
Setelah diproses untuk analisa *large displacement*, maka hasil untuk *Equivalent plastic strain* tercapai, sebagaimana yang nampak dalam Gambar 4. Hasil tersebut menjelaskan bahwa terdapat 2 lokasi yang telah mengalami plastis, sehingga membuat mekanisme tumpuan selanjutnya berubah yakni dari tumpuan jepit menjadi tumpuan ujung plastis, dan fenomena inilah yang dikenal dengan nama *edge hinges* sebagaimana sudah terlewati bahasannya pada teori elasto/plastic plat bending.

Dengan 2 metode yang telah dilaksanakan (analitik dan numerik) maka dapat disimpulkan bahwa design criteria

port yang mengunci semua pergerakan, *remote displacement* yang membatasi gerak translasi dan rotasi arah x dan y tapi membebaskan kearah z, dan *frictionless support* yang membuat area ini tidak memiliki gesekan atau dalam kata lain masih berhimpit dengan pelat di sebelahnya, hal ini dilakukan agar hasil analisa sesuai dengan kondisi teori yang dipergunakan. Bentuk model, tumpuan serta beban yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 : Bentuk model, beban, dan tumpuan



Gambar 4 : Kriteria eq. plastic strain

kegagalan yang diambil dalam pembentukan rumus empiris BKI adalah pada tingkat *edge hinges*, dengan konsekuensi hasil tebal pelat yang dibutuhkan menjadi lebih tipis. Hal ini membuat pertanyaan baru, kenapa BKI tidak menggunakan design pada tingkat *yield* atau dibawah *yield*, sehingga safety factor-nya $S_f \geq 1$? Untuk menjawabnya, maka beberapa alasan telah disebutkan pada penelitian rules DNV yang mengambil tingkat *collapse* (diatas *yield* dan *edge hinges*) sebagai kriteria kegagalannya, sebagai berikut :

- Pelat aktual memiliki aspek rasio yang tak hingga, sehingga akan lebih kuat dibanding asumsi teori pelat panjang yang dipergunakan (5-10%)

Kesimpulannya, dengan mengumpulkan berbagai alasan diatas maka kapasitas pelat aktual lebih tinggi 10~30% dari teori yang dipergunakan.

Kapasitas Plat

Melengkapi penjelasan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa jika rumus empiris BKI telah menggunakan batas diatas yield dalam teori elasto/plastic bending, maka salah satu cara untuk mempertahankan tebal pelat atau menurunkannya adalah dengan menguji kapasitas pelat. Kapasitas plat dalam teori plat bending telah disimulasikan dengan model beam (Gambar 3), dan selanjutnya secara incremental beban akan dinaikkan hingga batas *collapse*. Percobaan kedua adalah memodelkan secara utuh pelat panel, kemudian memberikan beban secara incremental dan membandingkannya dengan teori membrane plastis.

Untuk *elasto/plastic bending* akan digunakan beban sebesar 1,2 kali beban *collapse* (0.6MPa) dan untuk *membrane plastic* digunakan beban 2 kali *collapse* (0.97MPa), hasil dari *equivalent plastic strain* (Gambar 5) menunjukkan perbedaan strain yang besar dengan beban membrane yang jauh lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa teori membrane menjadikan plat tipis memiliki kapasitas pelat yang jauh lebih kuat dibandingkan dengan pelat bending.

Okumoto et.al. dalam bukunya "*Design of ship hull structures*" menjelaskan tentang perilaku membrane plastis ketika melakukan eksperimen plat panel yang diberi tekanan air dan dinaikkan secara incremental. Dia menyebutkan bahwa ada 3 tahap perubahan :

Pertama, ujung-ujung panel menjadi plastis, kemudian plastis mulai muncul pada tengah panel. Pada tahap ini tidak terjadi *collapse* ataupun peningkat defleksi yang signifikan meskipun telah terbentuk plastis di tiga titik (ujung-ujung dan tengah panel). Fenomena ini menjelaskan fakta bahwa meningkatnya tekanan air tidak meningkatkan tegangan bending tetapi malah meningkatkan tegangan membran.

Kemudian area yang telah mencapai *yield* mulai menjalar dan menjadikan seluruh permukaan panel menjadi membrane plastis. Dalam tahap ini terjadi peningkatan defleksi secara proporsional terhadap peningkatan tekanan air.

Ketika seluruh permukaan panel telah menjadi membrane plastis, kegagalan hanya terjadi jika plat telah memiliki

cacet baik ketika dalam pengelasan (*production*) ataupun dalam material (*metal forming*). Dan hal inilah yang kemudian menjadi alasan yang masuk akal bagi perancang menentukan kondisi plastic membrane sebagai batas criteria kegagalan.

5. Kesimpulan Dan Saran

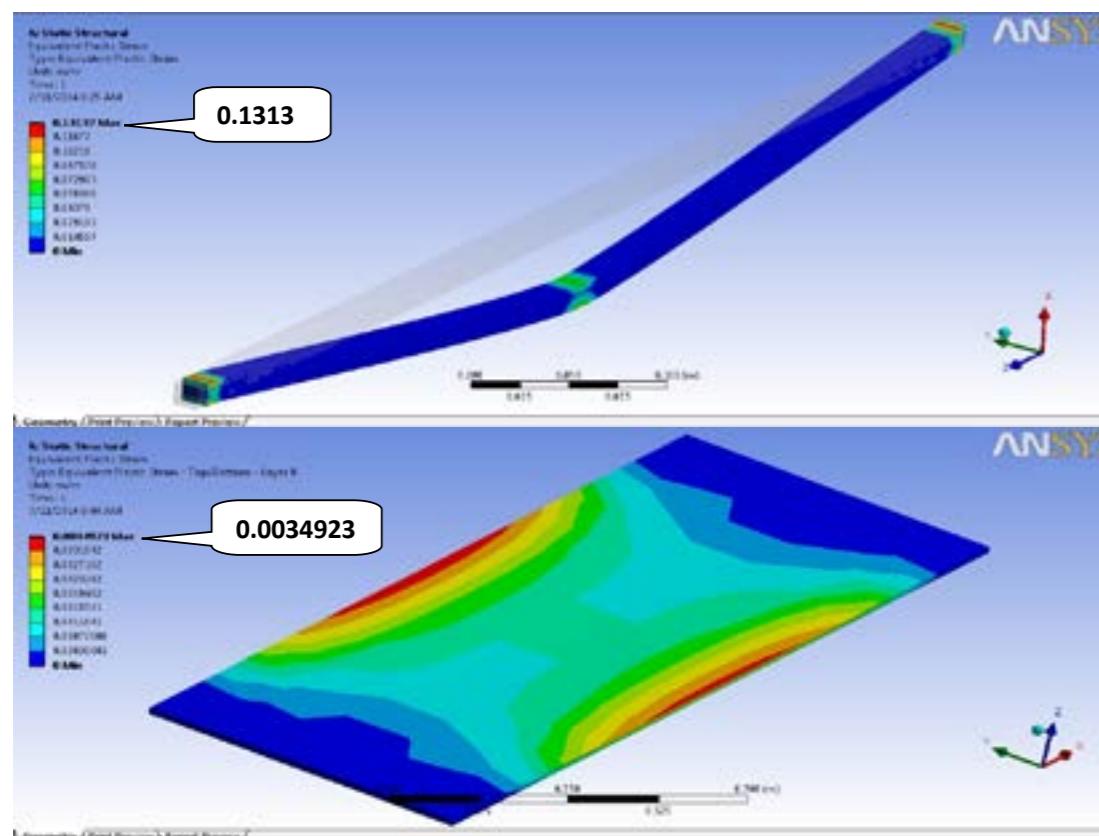
Setelah penurunan secara analitis, pembuktian numeric, serta pengenalan konsep membrane maka dapat disimpulkan :

1. Rumus empiris tebal plat akibat beban lateral dibangun diatas criteria kegagalan *yield* (plastis) /*edge hinges*, konsekuensinya tebal yang dihasilkan menjadi lebih tipis tapi tanpa memiliki *safety factor*.
2. Pengambilan criteria kegagalan *edge hinges* dapat diimbangi dengan jaminan kenaikan kapasitas (kekuatan) plat aktual sekitar 10~30%.
3. Menimbang kapasitas plat aktual berikut teori dan percobaan membrane plastis, maka secara teknis BKI bisa menurunkan tebal plat dengan menaikkan kriteria kegagalan hingga *collapse*.

4. Kajian ini disarankan agar dilanjutkan hingga tahap eksperimen/pengujian, dengan menguji satu panel plat penuh atau satu kompartemen penuh.
5. Disarankan agar kajian ini dilanjutkan hingga ke tahap pembebanan kombinasi lateral dan kompresi, mulai dari penurunan analitis, numeric, komparasi, hingga eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- BKI (2013), Rules For Hull
 DNV (2013), Hull Structural Design Ship with Length 100 meters and above
 Okumoto,Y, Takeda, Y, Mano, M, Okada, T, (2008), Design of Ship Hull Structures, Springer
 Daley,C, Kendrick,A, Pavic,M, (2007), New Direction in Ship Structural Regulation,10th International Symposium on Practical Design of Ship and Other Floating Structures, Houston, Texas
 SSC-446 (2007), Comparative Study of Ship Structures Design Standards, March 2007, 22-24
 Daley, C (2012), Ship Structures I & II, Memorial University



Gambar 5 : Elasto/Plastic bending vs Membrane plastic



Topan Firmandha, merupakan staf peniliti bidang kekuatan dan konstruksi kapal, tim pengembangan software DEWARUCI, dan tim ship structural incident investigation di Div. Manajemen Strategi PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2008 di Teknik Perkapalan ITS Surabaya, dan gelar Magister Teknik (MT) tahun 2013 di Jurusan yang sama.



Mencegah Resiko dan Menjaga Produktivitas Aset Anda



JASA TEKNIK BIDANG MARITIM, INDUSTRI, dan REKAYASA TEKNIK

Inspeksi dan sertifikasi teknik bidang maritim, Konsultansi dan supervisi struktur lepas pantai dan industri Migas, Inspeksi dan sertifikasi struktur terapung lepas pantai, Pendidikan dan pelatihan teknik bidang maritim, Laboratorium pengujian dan sertifikasi material dan komponen, DT dan NDT, Konsultansi ISM dan ISPS Code, Inspeksi dan sertifikasi alat angkat, angkut, unkit, dan bejana tekan, Inspeksi dan Sertifikasi peti kemas.

Kantor Pusat

Jl. Yos Sudarso No. 38 - 40, Tanjung Priok
Jakarta Utara - 14320, INDONESIA
Phone : (021) 4301703, 4300993
Facsimile : (021) 43936175, 43901973
e-mail : ho@bki.co.id

ANALISIS ULTIMATE LIMIT STATE (ULS) DENGAN MENGGUNAKAN IDEALIZED STRUCTURAL UNIT METHOD (ISUM) PADA ELEMEN PELAT SEGI EMPAT

Sukron Makmun, Achmad Zubaidy, P. Eko Panunggal

Abstract

Emphasis on the design of the structure has moved from the allowable stress design to limit state design, because the limit state approach has more advantages. FEM although very powerful in solving problems of non-linear structure, but the FEM also has weaknesses in analyzing non-linear structures that are large (difficulty of modelling and time consuming). This raises ISUM elements for modeling the structure as an array of different types of the unit structural elements. By using ISUM numerical calculations of elements in non-linear structure will be more effective and efficient. The numerical program carried out using MATLAB software. The resulted of the comparison between the program ISUM using MATLAB software with analytical calculations showed that for structural analysis in the elastic regime produces almost the same value (percentage error (0-8.224)%). Influence of imperfect fabrication in the analysis ULS resulted buckling structure does not happen naturally. So that in the modeling structure is modeled using a flat plate with initial deflection (imperfection fabrication) was calculated using the theory of non-uniform membrane stress.

Keywords : ultimate limit state (ULS), finite element method (FEM), Idealized Structural Unit Method (ISUM), rectangular plate, buckling and imperfection fabrication

1. Pendahuluan

Finite Element Method (FEM) merupakan sebuah program yang powerful untuk menyelesaikan permasalahan struktur non-linier. FEM non-linier telah terbukti berhasil diaplikasikan pada struktur yang bersifat kompleks. Keberhasilan itu diantaranya dilakukan dalam menyelesaikan collision and grounding (Wu [7], ship structures for ice loads (Wang dan Wiernichi, [6]) ultimate strength of panels (Paik [4], hull girder ultimate strength (Yao et al., [8]), dll. Meskipun banyak permasalahan yang sebelumnya sulit mampu diselesaikan, tetapi FEM mempunyai kelemahan dalam menganalisis struktur yang berukuran besar. Kesulitan yang terjadi adalah dalam pemodelan struktur yang kompleks dan perlu waktu yang banyak dalam perhitungan numeriknya. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan cara mengurangi jumlah derajat kebebasan (*degree of freedom/DOF*) dari FEM sehingga mengurangi jumlah yang tidak diketahui dari matrik kekuannya.

Salah satu metode yang dikembangkan untuk memecahkan permasalahan itu adalah dengan ISUM (Paik, et al., [2], Paik, et al., [3]). ISUM merupakan metode untuk memodelkan suatu struktur sebagai susunan dari beberapa jenis unit

struktur yang besar dan diformulasikan baik secara analitis, numerik serta eksperimental atau kombinasinya. Hasil dari pemodelan tersebut adalah sebuah elemen ISUM.

Berbagai kondisi yang telah diuraikan memunculkan ide penelitian, yaitu bagaimana pengembangan perangkat lunak untuk menganalisis suatu struktur berukuran besar dengan metode ISUM pada elemen pelat segi empat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji perilaku elemen struktur dengan menggunakan metode ISUM. Kemudian mengaplikasikannya ke dalam sebuah program perhitungan pada elemen pelat segi empat yang berbasis pada MATLAB software.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Teori Large of Displacement

Perilaku *post buckling* atau *large deflection* pelat dapat dianalisa dengan menyelesaikan dua persamaan diferensial non-linier dari *large deflection plate theory*. Persamaan tersebut disebut sebagai persamaan kesetimbangan 1a dan persamaan compatibility 1b (Marguerre, [1]):

$$D \left(\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) - t \left[\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 (\omega + \omega_0)}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 (\omega + \omega_0)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 (\omega + \omega_0)}{\partial y^2} + \frac{P}{t} \right] = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} - E \left[\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \omega_0}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 \omega_0}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \omega_0}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (1b)$$

Dimana : $D = Et^3/[12(1-\nu^2)]$, ω, ω_0 = added dan initial deflection, F = fungsi tegangan Airy

2.2 ISUM

ISUM adalah penyederhanaan dari FEM non-linier. Perbedaan dengan FEM konvensional adalah ISUM mengidealisasikan komponen struktur menjadi sebuah elemen dengan nodal point yang lebih sedikit. Untuk membuat model struktur secara lengkap pada analisis struktur non-linier diperlukan berbagai jenis ISUM elemen. Perilaku setiap jenis unit struktur diselidiki berdasarkan teori-teori fundamental maupun analisis teori olahan, seperti analisis

elemen hingga dan penelitian eksperimental. Kemudian diidealisasikan dan berbagai kondisi diformulasikan untuk semua kemungkinan kegagalan yang akan terjadi dalam satu unit struktur. Hal ini berlaku seperti *buckling* pada beberapa unit komponen.

2.3 Hubungan Regangan dan Displasemen

Persamaan 2 digunakan untuk mengukur hubungan regangan dan displasemen pada ISUM.

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Selain itu juga diperhitungkan pengaruh *out-of-plane large deformation* karena elemen pelat yang dianalisa berukuran besar. Sehingga pendekatan perhitungannya digunakan persamaan incremental (3):

$$\Delta \varepsilon_x = \frac{\partial \Delta u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \Delta v}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \Delta w}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta v}{\partial x} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Delta w}{\partial x} \right)^2 \quad (3a)$$

$$\Delta \varepsilon_y = \frac{\partial \Delta v}{\partial y} - z \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \Delta v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \Delta w}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta v}{\partial y} \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Delta w}{\partial y} \right)^2 \quad (3b)$$

$$\Delta \gamma_{xy} = \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial y} + \frac{\partial \Delta v}{\partial x} \right) - 2z \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \times \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \Delta v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \Delta v}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \Delta w}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \Delta w}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial \Delta v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \Delta u}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial \Delta w}{\partial x} \right) \quad (3c)$$

Nilai prefiks, Δ , menyatakan kenaikan yang sangat kecil dan terus menerus setiap variabel. Agar $\{U\}$ lebih sederhana, maka dipisah menjadi dua bagian, yaitu $\{S\}$ adalah

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B_p] \{\Delta S\} - z[B_p] \{\Delta W\} + [C_p] [G_p] \{\Delta S\} + [C_b] [G_b] \{\Delta W\} + \frac{1}{2} [C_p] [G_p] \{\Delta S\} + \frac{1}{2} [C_b] [G_b] \{\Delta W\} = [B] \{\Delta U\} \quad (4)$$

Dimana :

$$\{\Delta \varepsilon\} = \{\Delta \varepsilon_x, \Delta \varepsilon_y, \Delta \gamma_{xy}\}^T = \text{increment of strain vector}$$

$$\{U\} = \{S \ W\}^T = \text{nodal displacement vector}$$

$$\{S\} = \{u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_4 \ v_4\}^T = \text{in-plane displacement vector}$$

$$\{W\} = \{w_1 \ \theta_{x1} \ \theta_{x1} \ w_2 \ \theta_{x1} \ \theta_{x1} \ w_3 \ \theta_{x1} \ \theta_{x1} \ w_4 \ \theta_{x1} \ \theta_{x1}\}^T = \text{the out of plane displacement vector}$$

$$[B] = \text{strain-displacement matrix}$$

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right\}^T &= [B_p] \{S\} \\ \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} \right\}^T &= [G_p] \{S\}, \quad [G_p] = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \text{ dan } [C_b] = \begin{bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial w}{\partial y} \end{bmatrix} \\ \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right\}^T &= [B_b] \{W\} \\ \left\{ \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right\}^T &= [G_b] \{W\} \end{aligned}$$

2.4 Matrik Kekakuan Elastis

Persamaan matrik kekakuan diturunkan dengan menggunakan teori Total lagrangian dan updated lagrangian.

untuk komponen *in-plane*, $\{W\}$ untuk komponen *out-of-plane*, komponen untuk rotasi terhadap sumbu z. Sehingga dihasilkan persamaan 4:

Persamaan total Lagrangian adalah sebagai berikut : $[K]^E = [K_p] + [K_b] + [K_g] + [K_\square]$

$$[K_p] = \begin{bmatrix} [K_1] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, [K_b] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [K_2] \end{bmatrix}, [K_g] = \begin{bmatrix} [K_3] & [K_4] \\ [K_4] & [K_5] \end{bmatrix}, [K_\sigma] = \begin{bmatrix} [K_6] & 0 \\ 0 & [K_7] \end{bmatrix}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} [K_1] &= \int_V [B_p]^T [D]^E [B_p] dVol, [K_2] = \int_V [B_p]^T [D]^e [B_b] z^2 dVol, \\ [K_3] &= \int_V [G_p]^T [C_p]^T [D]^E [B_p] dVol + \int_V [B_p]^T [D]^E [C_p] [G_p] dVol + \int_V [G_p]^T [C_p]^T [D]^e [C_p] [G_p] dVol \\ [K_4] &= \int_V [B_p]^T [D]^E [C_b] [G_b] dVol + \int_V [G_p]^T [C_p]^T [D]^E [C_b] [G_b] dVol, \\ [K_5] &= \int_V [G_b]^T [C_b]^T [D]^E [C_b] [G_b] dVol, [K_6] = \int_V [G_p]^T [\sigma_p] [G_p] dVol, \\ [K_7] &= \int_V [G_b]^T [\sigma_b] [G_b] dVol \\ [\sigma_p] &= \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & \tau_{xy} & 0 \\ 0 & \sigma_x & 0 & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & \tau_{xy} & 0 & \sigma_y \end{bmatrix}, [\sigma_b] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Persamaan Updated Lagrangian

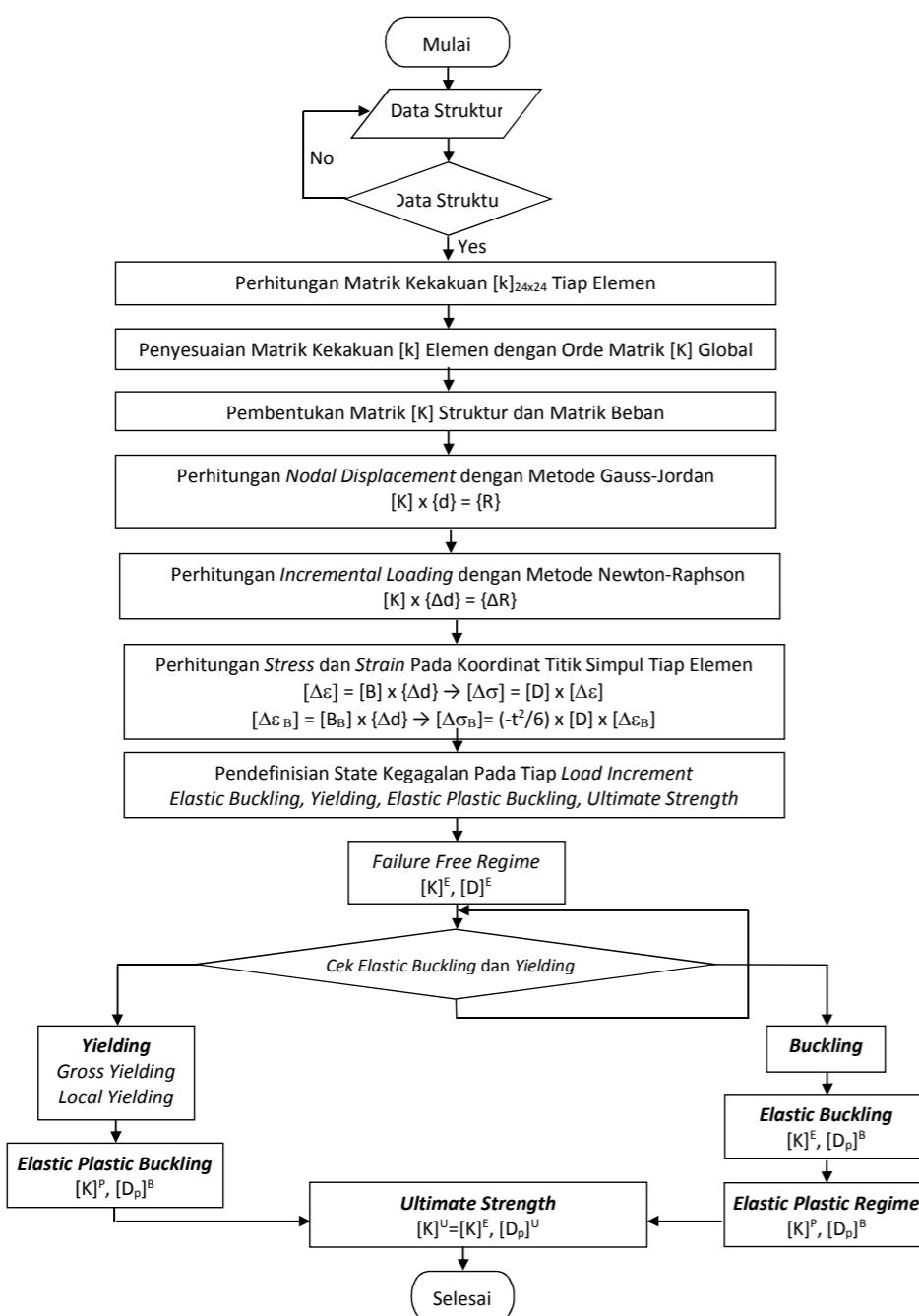
Penamaan *Updated Lagrangian* adalah karena perlu dilakukannya *update* terhadap sistem koordinat lokal pada setiap proses penambahan beban, sehingga transformasi matrik dari sistem koordinat lokal ke sistem koordinat global harus diperbarui pada setiap waktu. Keuntungan dari *updated Lagrangian* adalah *initial deformation*, $[K_g]$ dapat dihilangkan karena pada setiap permulaan proses penambahan beban dapat diset menjadi nol. Sehingga

$[K]^E$ dapat disederhanakan menjadi persamaan (5) :

$$[K]^E = [K_p] + [K_b] + [K\sigma] \quad .(5)$$

3. Metodologi

Penelitian yang dilakukan bersifat analitis dan numerik dalam hal perumusan matrik kekakuan elemen. Tahap penelitian selengkapnya tersaji pada Gambar 1.



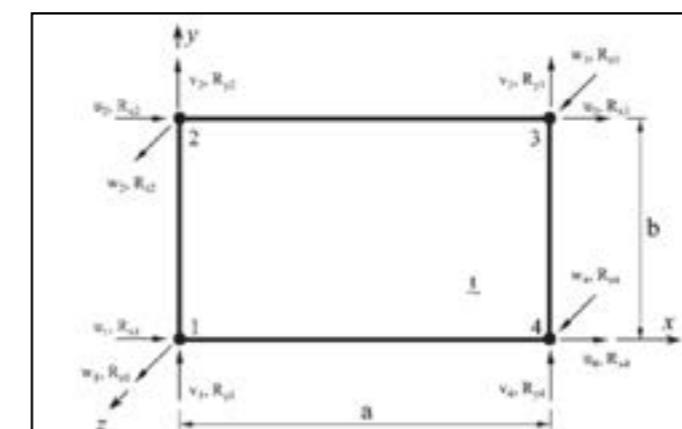
Gambar 1 : Alur Pemograman Analisis ULS dengan Elemen ISUM

Asumsi Data Struktur :

Data input yang diperoleh kemudian diidentifikasi ke dalam bentuk matriks-matriks data sebagai berikut :

1. Material bersifat isotropik dengan data material yang berisi modulus elastisitas (E) dan poisson's ratio (ν).
2. Data nodal beserta koordinatnya. Tiap-tiap titik nodal mempunyai enam derajat kebebasan.
3. Elemen pelat mempunyai empat titik nodal pada tiap-tiap pojoknya. Data elemen berisi informasi terkait nodal i, j, k, l serta data material tiap elemen.
4. Data kondisi batas (*boundary condition*) adalah *simply supported* yang digunakan untuk memberikan batasan pada matrik struktur. Data tersebut berisi indeks nodal dan batasan pada tiap DOFnya.
5. Data beban, pembebanan yang dilakukan bersifat kombinasi di antara beban *axial transverse/longitudinal compressive*, *axial transverse/longitudinal bending* atau *tensile*, *edge shear load*, *initial imperfection* dan *lateral pressure*.

Unit elemen pada ISUM untuk pelat segi empat disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2 : Penentuan Unit Elemen dan Nodal Point (●) Pada ISUM untuk Pelat Segi Empat (Ueda, et al., [5])

$$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + \frac{b_4}{2}(b^2 - y^2) \quad (7)$$

$$v = b_1 + b_2x + b_3y + b_4xy + \frac{a_4}{2}(a^2 - x^2) \quad (8)$$

$$w = c_1 + c_2x + c_3y + c_4x^2 + c_5xy + c_6y^2 + c_7x^3 + c_8x^2y + c_9xy^2 + c_{10}y^3 + c_{11}x^3y + c_{12}xy^3 \quad (9)$$

$$\theta_x = -\frac{d_w}{dy} = -c_3 - c_5x - 2c_6y - c_8x^2 - 2c_9xy - 3c_{10}y^2 - c_{11}x^3 - 3c_{12}xy^2 \quad (10)$$

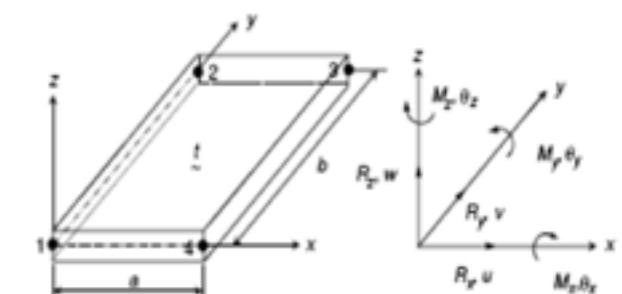
4. Hasil Dan Pembahasan

4.1 Formulasi Elemen

Formulasi elemen ISUM merupakan serangkaian tahapan yang dimulai dari tahap pendefinisian elemen, penentuan *displacement function*, pendefinisian *stress displacement* dan *stress strain* sehingga dihasilkan suatu persamaan matrik kekakuan. Elemen yang digunakan untuk formulasi adalah pelat berbentuk segi empat. Bentuk ini dipilih karena banyak diaplikasikan pada bidang konstruksi kapal. Selain itu bentuk geometri tersebut sesuai dengan kondisi *buckling*.

Langkah-langkah penurunan matrik kekakuan secara lengkap adalah sebagai berikut :

- Penentuan *displacement function* dan *shape function* (N)



Gambar 3 : Koordinat Lokal Elemen ISUM

Gambar 3 menunjukkan R adalah translasi nodal force arah sumbu x , y dan z , M_x & M_y *out-of-plane* momen bending arah sumbu x dan y , M_z merupakan momen torsi arah sumbu z . Sedangkan u , v dan w adalah translasi *displacement node* arah sumbu x , y & z dan $\theta_x = -\partial w/\partial y$, $\theta_y = -\partial w/\partial x$ dan θ_z adalah rotasi searah sumbu x , y dan z .

Persamaan displasemen beserta rotasinya ditampilkan pada Persamaan (7) - (12).

$$\theta_y = \frac{d_w}{dx} = c_2 + 2c_4x + c_5y + 3c_7x^2 + 2c_8xy + c_9y^2 + 3c_{11}x^2y + c_{12}y^3 \quad (11)$$

$$\theta_z = \frac{d_w}{dy} + \frac{d_w}{dx} = a_3 + b_2 \quad (12)$$

Matrik persamaan displasemen secara umum dijelaskan pada Persamaan (13)-(14).

$$\{\Psi_1\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy & 0 & 0 & 0 & 0.5(b^2 - y^2) \\ 0 & 0 & 0 & 0.5(a^2 - x^2) & 1 & x & y & xy \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

dalam bentuk ringkas, $\{\psi_1\} = [P_1]\{ab\}$

$$\{\Psi_2\} = \begin{Bmatrix} w \\ \theta_x \\ \theta_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & x^2y & xy^2 & y^3 & x^3y & xy^3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -x & -2y & 0 & -x^2 & -2xy & -3y^2 & -x^3 & -3xy^2 \\ 0 & 1 & 0 & 2x & y & 0 & 3x^2 & 2xy & y^2 & 0 & 3x^2y & y^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \\ c_9 \\ c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

dalam bentuk ringkas, $\{\psi_2\} = [P_2]\{c\}$

Untuk mendapatkan nilai a_1-a_4 , b_1-b_4 , c_1-c_{12} dari Persamaan (7), (8) dan (9), maka dimasukkanlah koordinat titik simpul ke dalam persamaan tersebut. Hasil yang didapatkan di-

tunjukkan pada Persamaan (15) dan (16). Dimana koordinat nodalnya adalah :

nodal 1: (x_1, y_1) , nodal 2: $(x_1, (y_1+b))$, nodal 3: $((x_1+a), (y_1+b))$, dan nodal 4: $((x_1+a), y_1)$,

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & 0 & 0 & 0 & 1/2(b^2 - y_1^2) \\ 0 & 0 & 0 & 1/2(a^2 - x_1^2) & 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_1 & (y_1+b) & x_1(y_1+b) & 0 & 0 & 0 & 1/2(b^2 - (y_1+b)^2) \\ 0 & 0 & 0 & 1/2(a^2 - x_1^2) & 1 & x_1 & (y_1+b) & x_1(y_1+b) \\ 1 & (x_1+a) & (y_1+b) & (x_1+a)(y_1+b) & 0 & 0 & 0 & 1/2(b^2 - (y_1+b)^2) \\ 0 & 0 & 0 & 1/2(a^2 - (x_1+a)^2) & 1 & (x_1+a) & (y_1+b) & (x_1+a)(y_1+b) \\ 1 & (x_1+a) & y_1 & (x_1+a)y_1 & 0 & 0 & 0 & 1/2(b^2 - y_1^2) \\ 0 & 0 & 0 & 1/2(a^2 - (x_1+a)^2) & 1 & (x_1+a) & y_1 & (x_1+a)y_1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ w_2 \\ \theta_{x2} \\ \theta_{y2} \\ w_3 \\ \theta_{x3} \\ \theta_{y3} \\ w_4 \\ \theta_{x4} \\ \theta_{y4} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & -2y_1 & 0 & 3x_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2x_1 & y_1 & 0 & x_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_1 & (y_1+b) & x_1^2(y_1+b) & (y_1+b)^2 & 0 & x_1^2(y_1+b) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -x_1 & -2(y_1+b) & 0 & -x_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2x_1 & (y_1+b) & 0 & 3x_1^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & (x_1+a) & (y_1+b) & (x_1+a)^2(y_1+b) & (x_1+a)(y_1+b) & 0 & 2(x_1+a)^2(y_1+b) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(x_1+a) & (y_1+b) & 0 & 3(x_1+a)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & (x_1+a) & y_1 & (x_1+a)y_1 & (x_1+a)^2 & 0 & (x_1+a)^2(y_1+b) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2(a^2 - (x_1+a)^2) & 1 & (x_1+a) & y_1 & -2y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ c_8 \\ c_9 \\ c_{10} \\ c_{11} \\ c_{12} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Persamaan (15) dan Persamaan (16), dapat ditulis dalam bentuk ringkas menjadi :

$$\{d_1\} = [C_1]\{ab\} \text{ dan } \{d_2\} = [C_2]\{c\}$$

dimana ukuran matrik $[P_1]$ adalah 8×8 dan ukuran $[P_2]$ adalah 12×12 , sehingga konstanta $\{ab\}$ dan $\{c\}$ dan dapat diselesaikan dengan :

$$\{ab\} = [C_1]^{-1}\{d_1\} \quad \text{dan} \quad \{c\} = [C_2]^{-1}\{d_2\}$$

Kemudian Persamaan (13) dan Persamaan (14) ditulis menjadi :

$$\{\psi_1\} = [P_1][C_1]^{-1}\{d_1\}$$

$$\{\psi_1\} = [N_1]\{d_1\}$$

$$\{\psi_2\} = [P_2][C_2]^{-1}\{d_2\}$$

$$\{\psi_2\} = [N_2]\{d_2\}$$

Dimana :

$$[N_1] = [P_1][C_1]^{-1}, : \text{persamaan shape function 1}$$

$$[N_2] = [P_2][C_2]^{-1} : \text{persamaan shape function 2}$$

Jadi, persamaan *shape function* secara umum dapat ditulis sebagai berikut :

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & N_2 \end{bmatrix} \{ab\}$$

- Pendefinisian hubungan *strain-displacement* dan *stress-strain*

Pendefinisian elemen strain dan stress dinyatakan dengan tidak diketahuinya variabel *nodal displacements* (elemen matrik *ab* dan *c*).

- Hubungan *strain-displacement* dinyatakan dalam Persamaan (2), dan dinyatakan dalam bentuk inkrement dalam Persamaan (3), kemudian dimasukkan nilai *shape function* ke dalam persamaan tersebut dan setelah itu didapatkan nilai matrik $[B]$, yang dinyatakan Persamaan (4).
- Setelah itu didapatkan nilai tegangan dari hubungan *stress-strain* yang dinyatakan dalam Persamaan 17.

$$\{\Delta\sigma\} = [D]^E \{\Delta\varepsilon\} \quad (17)$$

- Penurunan matrik kekakuan

Persamaan matrik kekakuan elastis sudah didefinisikan dalam Persamaan (5), dengan memasukkan nilai-nilai komponen yang telah didapatkan dari langkah sebelumnya.

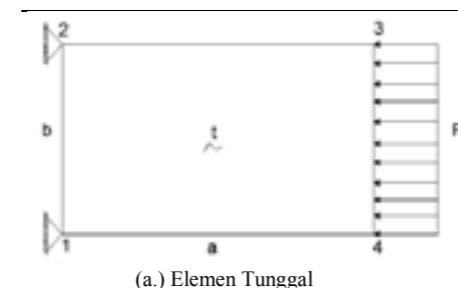
4.2 Pembuatan Program Numerik

Hasil dari matrik kekakuan dalam tahap formulasi elemen kemudian dimasukkan ke dalam program numerik. Dimana matrik kekakuan yang dihasilkan mempunyai sifat-sifat dari elemen ISUM, yaitu mampu menghitung struktur dengan elemen yang lebih besar dan mempunyai hasil yang sama dengan FEM biasa maupun dengan pembuktian perhitungan analitis. Dalam hal ini pemrograman numerik dituliskan kedalam MATLAB code dan dengan langkah-langkah yang sesuai dengan formulasi elemen yang telah dijabarkan sebelumnya.

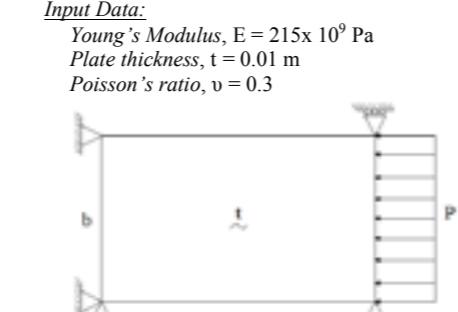
4.3 Running Program

4.3.1 Analisis Program Elemen ISUM

Uji perbandingan hasil output dengan cara manual perlu dilakukan untuk mengetahui kebenaran dan ketelitian program bantu MATLAB dalam melakukan proses perhitungan. Pada tahap ini diambil empat buah kasus struktur elastis sederhana, yaitu pada elemen tunggal, empat, sembilan dan enam belas elemen dengan pembebanan yang sama tetapi dengan kondisi batas yang berbeda. Model struktur tersebut dijabarkan pada Gambar 4, sedangkan distribusi tegangannya disajikan pada Gambar 5.



(a.) Elemen Tunggal

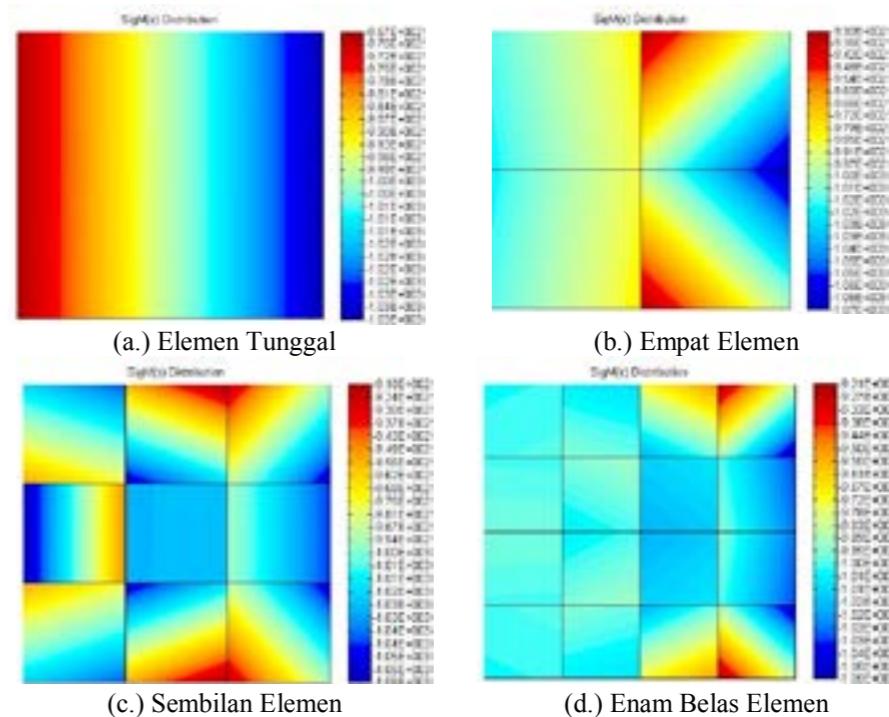


(b.) Empat, Sembilan dan Enam Belas Elemen

Input Data:
Young's Modulus, $E = 215 \times 10^9$ Pa
Plate thickness, $t = 0.01$ m
Poisson's ratio, $\nu = 0.3$

Length of the plate, $a = 1.5$ m
Breadth of the plate, $b = 1$ m
Load, $P=1000$ N/m²

Gambar 4 : Model Struktur Beserta Beban dan Tumpuannya



Gambar 5 : Distribusi Tegangan terhadap Sumbu X Pada Pelat

Hasil perbandingan distribusi tegangan untuk elemen tunggal disajikan pada Gambar 5 dengan persentase kesalahan ($\pm 3.33\%$). Sedangkan pada elemen empat persentase kesalahan ($<= 7.034\%$), sembilan elemen ($<= 8.224\%$), dan enam belas elemen ($<= 7.852\%$). Gambar 5 menunjukkan bahwa distribusi tegangan tidak merata. Hal ini seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa penyebabnya karena pemberian kondisi batas pada pemodelan strukturnya.

strukturnya.

Sedangkan terjadi trend kesalahan reaksi tegangan terhadap hasil empat elemen sampai enam belas elemen. Kesalahan yang terbesar terjadi di simpul pada bagian sisi panjang pelat dan dekat dengan pembebangan. Lebih jelasnya hal itu ditampilkan pada Gambar 6.

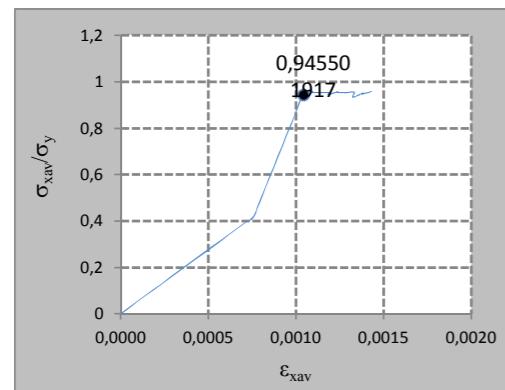


Gambar 6 : Contoh Trend Kesalahan Terbesar yang Terjadi Pada Empat Elemen Sampai Enam Belas Elemen

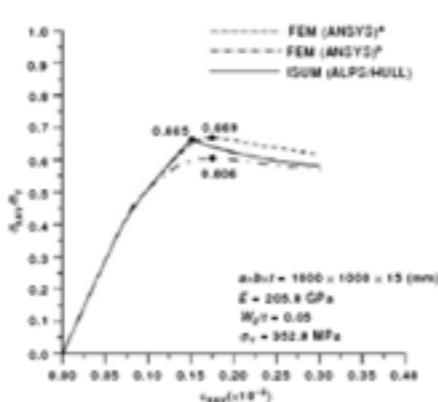
4.3.2 Studi Perilaku Kegagalan dalam Mengakses ULS

Hipotesis awal dari perilaku struktur menunjukkan bahwa *elastis buckling* akan terjadi terlebih dahulu sebelum *yielding*. Hal ini berlaku ketika struktur mempunyai kete-

balan yang tipis. Akan tetapi akan berlaku sebaliknya jika pelatnya tebal. Perilaku kegagalan akan diamati baik dengan adanya pengaruh *imperfect fabrication* maupun pada kondisi *perfect plate*.



(a.) Program MATLAB



(b.) Paik, et al., [2]

Gambar 7 : Validasi Perilaku Kegagalan dengan Penelitian sejenis (Program MATLAB dan Paik dkk (2006))

Gambar 7a dan 7b memberikan suatu gambaran bahwa perilaku kegagalan pada region 1 trend yang terjadi berbeda meskipun keduanya sama-sama bersifat linier. Hal ini dikarenakan Gambar 7b merupakan analisis ULS pada *imperfect plate*. Trend Gambar 7 akan sama jika perbandingan dimulai dari region 2 samapi terjadinya ULS. Pada *imperfect plate* struktur pelat yang mengalami defleksi awal dimodelkan dengan pelat datar, dimana defleksi awal tersebut akan dihitung dengan menggunakan teori *non-uniform membran stress*. Dan hal ini berlaku di region 2 dari hasil perhitungan program MATLAB (Gambar 7a).

5. Kesimpulan

Hasil penelitian yang didapatkan dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil perbandingan antara program ISUM yang diformulasikan dengan menggunakan MATLAB software dan perhitungan analitis, menunjukkan bahwa untuk analisis struktur dalam elastic regime menghasilkan nilai yang hampir sama. Hal ini dapat diketahui dengan prosentase kesalahan hasil perbandingan distribusi tegangan untuk elemen tunggal sebesar (+/-) 3.33%, empat elemen $\leq 7.034\%$, sembilan elemen ($\leq 8.224\%$), dan enam belas elemen $\leq 7.852\%$.
2. Prosentase kesalahan yang besar ($7.034 - 8.224\%$) pada empat elemen sampai enambelas elemen mempunyai pola posisi simpul yang mirip. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi batas pada elemen-elemen tersebut.
3. Perilaku kegagalan struktur pelat ditunjukkan dengan grafik hubungan tegangan dengan displacement. Perilaku tersebut dapat dilihat dari pembagian

region 1-3. Region 1 adalah kondisi dimana pelat bersifat elastis sehingga hubungan antara tegangan dan *displacement* bersifat linier. Pada region 2 pelat sudah mengalami *elastis buckling* karena terjadi sebelum *yielding*. Kondisi tersebut ditunjukkan dengan hubungan antara tegangan dan *displacement* yang bersifat non-linier. Matrik hubungan *stress* dan *strain* didekati dengan hubungan tangensial antara tegangan membran maksimum ($\Delta\sigma_{max}$) dan tegangan rata-rata ($\Delta\sigma_{av}$). Hal tersebut juga berlaku pada grafik hubungan tegangan dengan regangan.

4. Perilaku kegagalan untuk *imperfect fabrication* memperlihatkan bahwa tidak mengalami *buckling* secara alami karena struktur pelat mengalami deformasi sejak awal. Sehingga dalam pemodelan struktur dimodelkan dengan pelat datar, dimana defleksi awal tersebut akan dihitung dengan menggunakan teori *non-uniform membran stress*.

Daftar Pustaka

- Marguerre, K. (1938), **Zur Thorie der Gekrumpter Platten Grosser Formaenderung**. Proceedings of the 5th International Congress for Applied Mechanics, Cambridge.
- Paik, J.K., Seo, J.K. dan Kim, D.M., (2006), **Idealized Structural Unit Method and Its Application to Progressive Hull Girder Collapse Analysis of Ship**, SAOS, Vol. 1 No. 3 pp. 235-247.
- Paik, J.K., Thayamballi, A.K., dan Kim, B.J. (2001), **Advanced Ultimate Strength Formulations for Ship Plating Under Combined Biaxial Compression/Tension, Edge Shear, and Lateral Pressure Loads**, Marine Technology, Vol. 38, No. 1, pp. 9-25.
- Paik, J.K., Wang, G., Thayamballi, A.K., dan Lee, J.M., (2003),

- Time-Variant Risk Assessment of Aging Ships Accounting for General/Pit Corrosion, Fatigue Cracking and Local Dent Damage**, World Maritime Technology Conference dan SNAME Annual Meeting, 17-20 October 2003, San Francisco, CA.
Ueda, Y., Rashed, S.M.H. dan Abdel-Nasser, Y., (1993), **An Improved ISUM Rectangular Plate Element Taking Account of Post-Ultimate Strength Behavior**, Marine Structures, Vol. 6, 139-172.
Wang, G. dan Wiernicki, C.J. (2004), **Using Nonlinear Finite Element Method to Design Ship Structures for Ice Loads**, SNAME Annual Meeting, Washington D.C., 29 September-1 Oktober.

- Wu, F., Spong, R., dan Wang G., (2004), **Using Numerical Simulation To Analyze Ship Collision**. The 3rd International Conference on Collision and Grounding of Ships (ICCGS), 25-27 October 2004, Tokyo, Japan.
Yao, T., Fujikubo M., Yanagihara, D., Fujii, I., Mtsui, R., dan Kuwamura, Y., (2002), **Progressive Collapse Analysis of A Ship's Hull Girder Under Longitudinal Bending Considering Local Pressure Loads**, Journal of Society of Naval Architects of Japan, vol. 191, 265-274.



Sukron Makmun, bergabung dengan Biro Klasifikasi Indonesia sejak tahun 2007 setelah lulus dari S1 Jurusan Perkapalan, ITS. Pada awal diterima menduduki posisi staf di Divisi Lambung dan Material. Tahun 2009-2012 mendapatkan kesempatan melanjutkan S2 di ITS dengan jurusan yang sama. Pada tahun 2012 sampai sekarang menjadi staf Pengkaji IV pada Divisi Manajemen Strategis. Konsentrasi bidang penelitian yang digeluti saat ini adalah *Ship and Offshore Structure*.



Prof. Ir. Achmad Zubaydi, MEng, PhD, merupakan staf pengajar pada Jurusan Teknik Perkapalan (JTP), ITS. Riwayat pendidikan yang ditempuh adalah S1 di JTP-ITS, dilanjutkan dengan program S2 di Hiroshima University (Jepang) dan pendidikan S3 di Memorial University of Newfoundland (Canada). e-mail : zubaydi@na.its.ac.id



Ir. Petrus Eko Panunggal, PhD (Alm), lahir di Blitar, 28 Oktober 1944. Beliau menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Perkapalan (dulu Teknik Bangunan Kapal), ITS pada tahun 1962 dan sudah mendapat gelar sarjana muda tiga tahun kemudian. Setelahnya beliau dipercaya sebagai Asisten Dosen dilanjutkan Dosen pada Jurusan tersebut. Gelar Insinyur Perkapalan beliau terima pada 22 Juli 1976. Tanpa melalui tahapan S2 pada tahun 1988 beliau dipercaya mendapatkan beasiswa dari University of Newcastle upon Tyne, Inggris untuk melanjutkan studi Program Doctor. Gelar Doctor of Philosophy beliau raih pada 10 Juli 1993. Pengabdian beliau di ITS hampir setengah abad, tepatnya sejak tahun 1965 sampai 11 September 2014 karena tutup usia. Peran dan jasa beliau di bidang perkapalan bersumbangsih besar dalam perkembangan dunia Perkapalan dan Kemaritiman Indonesia.

SOFTWARE DEWARUCI

Software Perhitungan untuk Tingkatkan Efisiensi Proses Persetujuan Gambar & Dokumen Klasifikasi dan Statutoria

PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero) sejak didirikan pada tanggal 1 Juli 1964, telah banyak mengelaskan kapal-kapal niaga berbendera Indonesia maupun bendera asing. BKI sejak awal tahun 90-an telah menggunakan software dari berbagai pihak baik pengembangan software aplikasi sederhana secara mandiri ataupun software aplikasi bekerjasama dengan pihak luar.

Pada tanggal 12 Maret 2015 software "DEWARUCI" tahap Palapa I secara resmi diluncurkan yang dihadiri oleh Direktur Utama, Direktur Klasifikasi, pengguna dari Divisi Survey&Teknik dan tim pengembang software "DEWARUCI" dari Bagian Riset & Pengembangan Teknikal. Ini merupakan sejarah baru BKI dalam rangka meningkatkan kemandirian dalam penggunaan software perhitungan aplikasi teknik.



Gambar 1 : Foto bersama peluncuran software "DEWARUCI" Tahap Palapa I

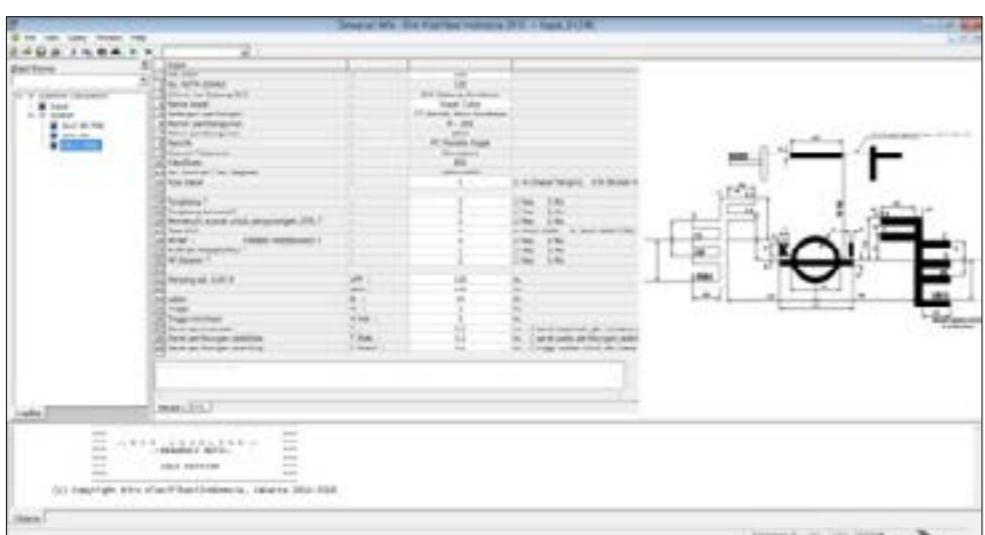
Software "DEWARUCI" adalah software perhitungan yang lebih mutakhir karena dikembangkan dalam suatu sistem jaringan secara terpusat dengan menggunakan Dewaruci Control Center (DCC). Sehingga proses dan hasil analisa (engineering review) baik dari struktur lambung kapal, per-



Gambar 2 : Matriks Aplikasi "Dewaruci"

mesinan kapal, dan Loadline akan disimpan dalam sebuah server database. Oleh karena itu dengan adanya software "DEWARUCI" akan meningkatkan kemampuan serta kejelasan dalam proses pengarsiran (terpusat dalam satu server database), verifikasi data teknis kapal yang sedang dalam proses approval dan transparansi dalam proses approval. Adapun pengembangan software "DEWARUCI" terdiri dari tiga tahap besar yang dinamakan "Palapa Project" dan masing-masing target pencapaian setiap tahap adalah :

- Palapa I** : Menciptakan sistem jaringan terpusat terkait proses dan analisa struktur Lambung, Perme-sinan, Statutoria, dan Loadlines
- Palapa II** : Menciptakan aplikasi perhitungan struktur kapal secara analitis dengan mengacu pada teori balok prismatic (Hull Girder Response Analysis). Estimasi penyelesaian tahun 2017.
- Palapa III** : Menciptakan aplikasi perhitungan menggunakan finite element method (FEM) dengan menggunakan MSC Nastran sebagai engine solver. Estimasi penyelesaian tahun 2018.



Gambar 3 : Contoh Tampilan Software "DEWARUCI" Tahap Palapa I

ANALISIS TEGANGAN PADA PENAMPANG MELINTANG TERBUKA DINDING TIPIS (THIN-WALL) MENGGUNAKAN METODE GENERALIZED BEAM THEORY

Siswanto, Achmad Zubaydi, Petrus Eko Panunggal

Abstract

The most of ship structures are thin-walled and still regarded as a rigid-body structure that suffered structural response to loading. Calculation of stresses and deflection of ship structure is still based approach Euler-Bernoulli beam theory which only provides axial, two-axis bending, and torsion as rigid-body mode deformation that do not involve changes in shape of the cross-section. The Generalized beam theory of method is an extension of conventional beam theory for thin-wall prismatic analysis, this method in addition to providing rigid-body behavior of the cross-section distortion. Studies stress analysis on thin-wall cross-section open using the generalized beam theory for structures represent single hull ships. The generalized beam theory provides is simple solution to provide a pattern of distortion that occurs at the cross-section due to the load, in addition to the four basic modes of deformation of the beam are axial, bending, and torsion. The model is open to the center girder cross section, obtained results quite similar with method finite element calculations, a mean difference are 2.75% stresses and the maximum difference that occur 7.4% stresses and had the same deformation pattern

Keywords : Thin-walled, Generalized beam theory, stress, mode deformation.

1. Pendahuluan

Struktur kapal sebagian besar berdinding tipis dan masih dianggap sebagai struktur benda kaku yang mengalami respon struktur terhadap pembebaran. Perhitungan tegangan dan lendutan struktur kapal masih menggunakan pendekatan teori balok Bernoulli-Euler. Perangkat analisis struktur berbasis metode elemen hingga menghasilkan respon struktur terhadap pembebaran, sedangkan metode Generalized beam theory memberikan pemahaman perilaku struktur dinding tipis terhadap deformasi aksial, bending dua sumbu, dan distorsi.

Generalized beam theory (GBT) dalam bahasa Jerman yaitu *Verallgemeinerte Technische Biegetheorie* (VTB) adalah teori dikhususkan untuk analisis prismatic berdinding tipis. Perkembangan teori ini dirintis oleh Prof. R. Scardt dan rekan kerjanya di universitas Darmstadt Jerman [1], pengembangan teori ini lebih dari 20 tahun dan selama periode tersebut sedikit sekali ditulis dalam bahasa Inggris. Teori ini dapat dianggap sebagai gabungan dari teori Vlasov untuk dinding tipis (Vlasov, 1961) dan teori pelat tekuk (Girkman, 1959). GBT merupakan salah satu pilihan dari teori klasik metode elemen hingga (FEM) dan finite

strip method (FSM) untuk analisis prismatic berdinding tipis. Untuk analisis struktur prismatic dinding tipis. Perilaku analisis tersebut memiliki empat dasar mode deformasi yaitu aksial, bending pada dua sumbu utama, dan torsi yang disatukan dalam rumus dan notasi tetap. Keempat mode deformasi adalah "rigid-body" karena tidak melibatkan perubahan bentuk pada penampang. Kemudian Notasi tersebut diperluas mencakup mode deformasi yang lebih tinggi yang melibatkan perubahan bentuk penampang yaitu distorsi, sehingga teori ini memungkinkan untuk dapat menyelesaikan masalah dinding tipis. Dalam beberapa dekade terakhir, pemahaman perilaku struktur dinding tipis dan aplikasinya menggunakan GBT dikembangkan oleh J Michael Davies dan Philip Leach [2,3,4,5] terhadap penampang terbuka, kemudian diaplikasikan pada material orthotropik oleh Silvestre dan Camotin [6].

Metode elemen hingga (FEM) merupakan program yang powerful untuk permasalahan struktur. Banyak permasalahan sebelumnya sulit mampu diselesaikan, tetapi akurasi analisis FEM dalam menganalisis struktur tergantung dari jumlah elemen, semakin banyak elemen semakin tinggi akurasinya dan jumlah derajat kebebasan (*degree of freedom/DOF*) menjadi sangat banyak pula, sehingga

dibutuhkan kapasitas komputer yang besar. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan cara mengurangi jumlah derajat kebebasan dan asumsi-asumsi pendekatan yang ada.

Salah satu metode yang dikembangkan untuk memecahkan permasalahan tersebut yaitu *Generalised beam theory* (GBT) yang merupakan pengembangan teori klasik balok untuk analisis struktur pristik dinding tipis. Perilaku analisis tersebut memiliki empat dasar mode deformasi yaitu aksial, bending pada dua sumbu utama, dan torsi yang disatukan dalam rumus dan notasi tetap. Keempat mode deformasi adalah "rigid-body" karena tidak melibatkan perubahan bentuk pada penampang. Kemudian Notasi tersebut diperluas mencakup mode deformasi yang lebih tinggi yang melibatkan perubahan bentuk penampang yaitu distorsi, sehingga teori ini memungkinkan untuk dapat menyelesaikan masalah dinding tipis.

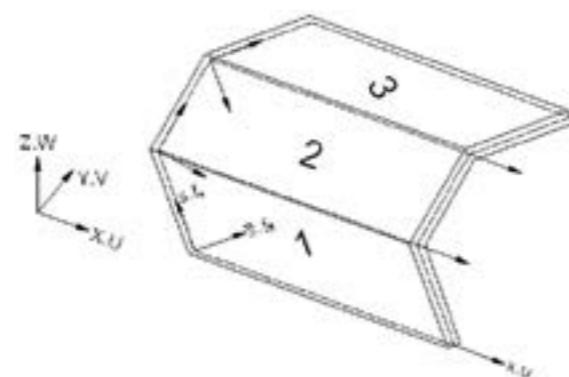
Dari uraian diatas memunculkan ide penelitian yaitu bagaimana mengembangkan metode tersebut untuk digunakan dalam struktur kapal dengan bentuk penampang terbuka berpenegar untuk mendapatkan tegangan dan perilaku struktur deformasi terhadap pembebahan walaupun dimulai dengan bentuk yang sederhana.

2. Dasar Teori

Konsep dasar GBT untuk mendapatkan tegangan dan deformasi pada penampang terbuka berpenegar, untuk membantu pemahaman GBT agar terlebih dahulu membaca jurnal [1,2,3]. Sebagian besar berisi penjelasan prosedur perhitungan global dan deformasi penampang terbuka tidak bercabang.

2.1 Asumsi Utama Generalised Beam Theory

Struktur dinding tipis dipertimbangkan sebagai susunan pelat dan pelat diasumsikan menurut teori Kirchhoff plate yaitu perubahan bentuk pelat yang semula tegak lurus bidang pelat, tetapi berupa garis lurus dan tetap tegak lurus bidang (perubahan bentuk akibat gaya geser transversal diabaikan) $\varepsilon_{xz} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$. Serta menggunakan asumsi Vlasov yaitu $\varepsilon_s^M = 0$ dan $\gamma_{xs}^M = 0$. Pada penampang terbuka sembarang dinding tipis ditunjukkan dalam gambar 1 mendefinisikan global koordinat sistem X-Y-Z dan lokal koordinat x-s- \bar{s} serta koordinat perpindahan (displacement) $u-f_s-f_s'$.



Gambar 1 : Lokal dan Global koordinat sistem

2.2 Hubungan Regangan dan Perpindahan

Dari asumsi diatas didapat hubungan regangan dan perpindahan yaitu :

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^M \\ \varepsilon_{ss}^M \\ \gamma_{xs}^M \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^B \\ \varepsilon_{ss}^B \\ \gamma_{xs}^B \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} u' & sf'' \\ sf & sf' \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Sehingga hubungan antara tegangan dan regangan :

$$\begin{aligned} \sigma_x^M &= \frac{E\varepsilon_x^M}{\mu^2} = \frac{E}{\mu^2} \varepsilon_x^B + \mu\varepsilon_s^B = \frac{E}{\mu^2} s(f'' - \mu f) \\ \sigma_s^B &= \frac{E}{\mu^2} \varepsilon_s^B = \mu\varepsilon_x^B = -\frac{E}{1-\mu^2} \bar{s}(\ddot{f} + \mu f'') \\ \tau_{sx}^B &= G\gamma_{sx}^B = Gsf' \end{aligned} \quad (2,a,b,c)$$

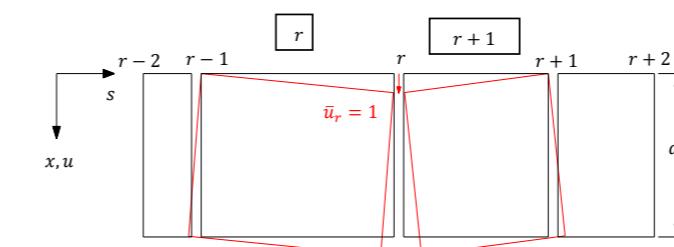
Dimana :

$$, \quad \frac{d}{dx} \quad \frac{d}{ds}$$

Displasemen penampang dipertimbangkan sebagai kombinasi linier r orthogonal mode deformasi. Jumlah r tergantung pada tipe penampang, jumlah garis tekuk antar node. Sehingga displasmen dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned} u(s,x) &= \sum_{k=1}^{r+1} u_k(s) V'_k(x) \\ f_s(s,x) &= \sum_{k=1}^{r+1} f_{sk}(s) V_k(x) \\ f(s,x) &= \sum_{k=1}^{r+1} f_k(s) V_k(x) \end{aligned} \quad (3,a,b,c)$$

Dimana $u_k(s)$, $f_{sk}(s)$, dan $f_k(s)$ adalah komponen perpindahan penampang mode k , dan $V_k(x)$ adalah fungsi amplitudo perpindahan didefinisikan sepanjang struktur dinding tipis x . Perpindahan penampang $f_{sk}(s)$ dan $f_k(s)$ dapat dihitung berdasarkan perpindahan warping $u_k(s)$ yang merupakan fungsi linier pada penampang. Dengan menentukan elementary unit warping $\bar{u}_r(s)$ pada simpul r berharga 1 dan pada simpul lain berharga nol, lihat gambar 2 yang mengilustrasikan unit warping.



Gambar 2 : Mekanisme elementary unit warping

Dari asumsi vlasov didapatkan persamaan perpindahan melintang (*transvers displacement*)

$$\begin{aligned} \gamma^M &= \frac{\partial f_s}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial s} = 0 \rightarrow \frac{\partial u_r}{\partial s} = \frac{u_{r+1}-u_r}{b_r} \\ \frac{\partial f_{s,r}}{\partial x} &= f'_{s,r} = -\frac{u_{r+1}-u_r}{b_r} \end{aligned} \quad (4)$$

Dan perpindahan bidang normal (*flexural*)

$$\begin{aligned} f_{e,r-1} &= \frac{f_{s,r}}{\sin\Delta\alpha_r} - \frac{f_{s,r-1}}{\tan\Delta\alpha_r} & f_{b,r} &= \frac{f_{s,r}}{\tan\Delta\alpha_r} - \frac{f_{s,r-1}}{\sin\Delta\alpha_r} \\ f_{s,r} &= \frac{f_{e,r} + f_{b,r}}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 Persamaan Keseimbangan

Berdasarkan prinsip kerja virtual yaitu total potensial energi adalah nol.

$$\delta V = \delta W_i + \delta W_e = 0 \quad (6)$$

V adalah total potensial energi, W_i adalah *strain energy* dan W_e adalah kerja virtual pada beban luar. Dengan persamaan diatas, maka variasi *strain energy* dapat dituliskan :

$$dW_i = \int_0^l \int_A (\sigma_x^M \delta \varepsilon_x^M + \sigma_x^B \delta \varepsilon_x^B + \sigma_s^B \delta \varepsilon_s^B + \tau_{sx}^B \delta \gamma_{sx}^B) dA dx \quad (7)$$

Dimana l dan A adalah panjang struktur berdinding tipis dan luas penampang.

Komponen *strain energy* dapat diturunkan dengan mensubtitusikan persamaan (1) dan persamaan (2). Kerja virtual membujur membran dalam mode i dan k dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\int_0^l \int_A \sigma_x^M \delta \varepsilon_x^M dA dx = \int_0^l \int_A E u' \delta u' dA dx$$

Kerja virtual melintang bending moment dalam mode i dan k dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\int_0^l \int_A \sigma_s^B \delta \varepsilon_s^B dA dx = \frac{E}{1-\mu^2} \int_0^l \int_A \sum_{i=1}^{n+1} \bar{s}(\ddot{f}_i V_i + \mu f_i V_i'') \cdot \delta \sum_{k=1}^{n+1} \bar{s}(f_k V_k) dA dx$$

Persamaan regangan dan tegangan melintang untuk bending momen :

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^l \int_s K(f_i \ddot{f}_k V_i + \mu f_i \ddot{f}_k) \cdot \delta V_k ds dx = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^l (B_{ik} V_i + \mu E D^2_{ki} V_i'') \delta V_k dx \\ B_{ik} &= \int_s K \ddot{f}_i \ddot{f}_k ds \quad \ddot{f}_k = -\frac{m_{s,k}}{K} \end{aligned}$$

Persamaan regangan dan tegangan membujur untuk membran :

$$\begin{aligned} E \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^l \int_A u_i u_k V_i'' \delta V_k'' dA dx &= E \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^l C_{ik}^M V_i'' \delta V_k'' dx \\ C_{ik}^M &= \int u_i u_k dA \end{aligned} \quad (8)$$

Kerja virtual membujur bending momen dalam mode i dan k dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\int_0^l \int_A \sigma_x^B \delta \varepsilon_x^B dA dx = \frac{E}{1-\mu^2} \int_0^l \int_A \sum_{i=1}^{n+1} \bar{s}(f_i V_i'' + \mu \ddot{f}_i V) \delta \sum_{k=1}^{n+1} \bar{s}(f_k V_k) dA dx$$

Persamaan regangan dan tegangan membujur bending momen, persamaan 1 dan 2 disubtitusikan dalam persamaan diatas dan di integrasi dengan ketebalan t dengan kondisi batas $-t/2$ sampai $t/2$.

$$= \frac{E}{1-\mu^2} \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^l \int_s \int_{-t/2}^{t/2} \bar{s}^2 d\bar{s} (f_i f_k V''_i + \mu \ddot{f}_i f_k V_i) \delta V''_k ds dx = E \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^l (C_{ik}^B V''_i + \mu D_{ik} V_i) \delta V''_k ds dx$$

$$C_{ik}^B = \frac{1}{E} \int_s K f_i f_k ds \quad D_{ik} = \frac{1}{E} \int_s K \ddot{f}_i f_k ds \quad K = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (9)$$

$$B_{ik} = \int_s \frac{1}{K} m_{s,k} m_{s,i} ds \quad (10)$$

Kerja virtual untuk regangan geser dalam mode i dan k dapat ditulis sebagai berikut :

$$\int_0^l \int_A \tau_{sx}^B \delta \gamma_{sx}^B dA dx = 4G \int_0^l \int_A \sum_{i=1}^{n+1} \bar{s} \dot{f}_i V'_i \delta \sum_{k=1}^{n+1} \bar{s} (\dot{f}_k V'_k) dA dx$$

Persamaan regangan dan tegangan geser, persamaan 1 dan 2 disubtitusikan dalam persamaan diatas

$$= 4G \int_0^l \int_s \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \dot{f}_i \dot{f}_k V'_i \delta V'_k \int_{-t/2}^{t/2} \bar{s}^2 d\bar{s} ds dx = G \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^l D_{1ik} V'_i \delta V'_k dx \\ D_{1ik} = \frac{1}{3} \int_s t^3 \dot{f}_i \dot{f}_k ds \quad (11)$$

Sehingga persamaan *generalized beam theory* secara lengkap dapat ditulis sebagai berikut :

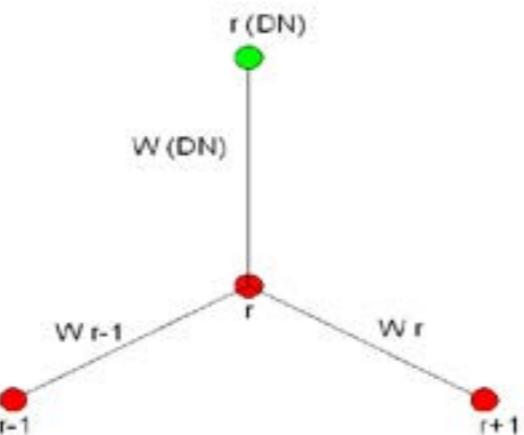
$$EC_{ik} V'''_i - GD_{ik} V''_i + B_{ik} V_i = q_k \quad (12)$$

Sehingga matrik kekakuan adalah

$$C_{ik} = C_{ik}^M + C_{ik}^B = \int_A u_i u_k dA + \frac{1}{E} \int_s K f_i f_k ds$$

$$D_{ik} = D_{1ik} - \frac{\mu E}{G} (D_{2ik} + D_{2ki}) = \frac{1}{3} \int_s t^3 \dot{f}_i \dot{f}_k ds - \frac{\mu E}{G} \left(\frac{1}{E} \int_s K \ddot{f}_i f_k + \frac{1}{E} \int_s K \ddot{f}_k f_i \right) ds$$

$$B_{ik} = \int_s K \ddot{f}_i \ddot{f}_k ds \quad (13,a,b,c)$$



Gambar 3 : Dependent Node (Hijau)

3. Analisis dan Pembahasan

Untuk penampang melintang terbuka penegar, kehadiran node cabang menjadi perpindahan (displacement) $u_k(s)$, $f_{s,k}(s)$ dan $\ddot{f}_k(s)$ lebih kompleks, karena diperlukan kesesuaian perpindahan melintang pada node. Saat node membagi dua dinding, tidak dapat sebagai *elementary unit warping* $\bar{u}_r(s)$ yang bernilai 1, node ini tergantung pada node sebelumnya (*dependent node*) dan nilai warpingnya harus dihitung. Asumsi *vlasov* yaitu regangan geser membrane bernilai nol sepanjang penampang melintang $\gamma_{xs}^M = 0$.

Perpindahan melintang (*transverse displacement*) yang terjadi :

$$f_{s(DN)} = -\frac{\bar{u}_{(DN)} - \bar{u}_r}{b_{(DN)}} \quad (14)$$

Saat *elementary unit warping* $\bar{u}_r = 1$, didapat nilai warping dependent node

$$\bar{u}_{(DN)} = 1 - f_{s(DN)} \cdot b_{(DN)} \quad (15)$$

Analisis penampang terbuka berpenegar ukuran sebagai berikut :

Dimensi secara detail dapat dilihat pada gambar 5. dibawah ini.

Panjang	$L = 100 \text{ cm}$
Lebar	$B = 16 \text{ cm}$
Tinggi	$H = 8 \text{ cm}$
Modulus Young	$E = 21000 \text{ kN/cm}^2$
Tebal	$t = 0.1 \text{ cm}$
stiffener	$h = 1.5 \text{ cm}$
Modulus Geser	$G = 8077 \text{ kN/cm}^2$

Asumsi-asumsi yang dipakai dalam struktur berdinding tipis adalah sebagai berikut :

- Kondisi batas adalah *simply supported*.
- Material bersifat *linier elastis* dan *isotropik*.



Gambar 4 : Penampang Terbuka berpenegar

Tabel 1 : Warping Function

WARPING FUNCTION (\bar{U})								
Node	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-1	-4.00	4.89	-77.13	0.047	1	-1	-1
2	-1	-8.00	4.89	-26.26	-0.041	-0.752	0.460	0.048
3	-1	-8.00	-3.11	37.74	0.041	0.531	-0.121	0.320
4	-1	0.00	-3.11	0.00	0.041	-0.398	0.015	-0.243
5	-1	0.00	-1.61	0.00	1	-0.363	0.326	-0.199
6	-1	8.00	-3.11	-37.74	0.041	-0.531	-0.121	-0.320
7	-1	8.00	4.89	26.26	-0.041	0.7518	0.460	-0.048
8	-1	4.00	4.89	77.13	0.047	-1	-1	1

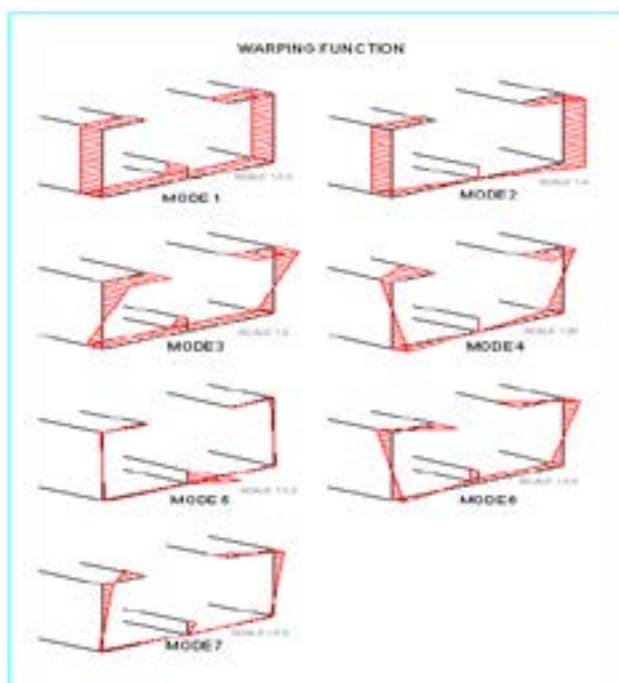
Tabel 2 : Displasemen Horisontal

Displasemen Horisontal						
Node	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	-12.72	0.022	0.438
2	0	1	0	-12.72	0.022	0.438
3	0	1	0	-4.72	0.000	-0.116
4	0	1	0	-4.72	0.000	-0.116
5	0	1	0	-6.22	0.000	-0.116
6	0	1	0	-4.72	0.000	-0.116
7	0	1	0	-12.72	-0.022	0.438
8	0	1	0	-12.72	-0.022	0.438

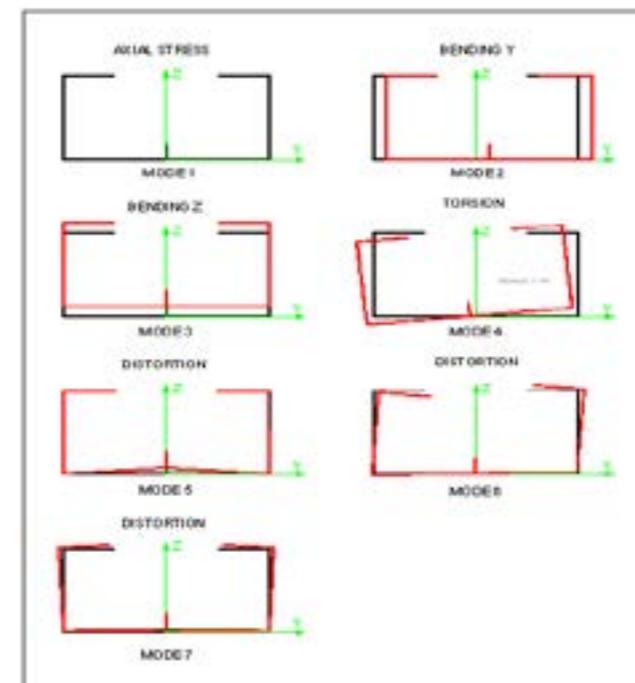
Tabel 3 : Displasemen Vertikal

Node	Displasemen Vertikal						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	1	-4	-0.027	-0.576	0.308
2	0	0	1	-8	-0.010	-0.160	0.073
3	0	0	1	-8	-0.010	-0.160	0.073
4	0	0	1	0	0.639	0.023	0.207
5	0	0	1	0	0.639	0.023	0.207
6	0	0	1	8	-0.010	0.160	0.073
7	0	0	1	8	-0.010	0.160	0.073
8	0	0	1	4	-0.027	0.576	0.308

Pada gambar 6 menunjukkan warping dan displasmen yang terjadi pada masing-masing mode



(a)



(b)

Gambar 5 : (a). Warping Function dan (b). Displasmen**Tabel 4 : Section Properties**

Properties	1	2	3	4	5	6	7
C	4.2	166.4	45.3	3669.2	0.1	0.7	0.3
B	-	-	-	-	0.0181	0.0149	0.0007
D	-	-	-	0.0233	0.0001	0.0001	0

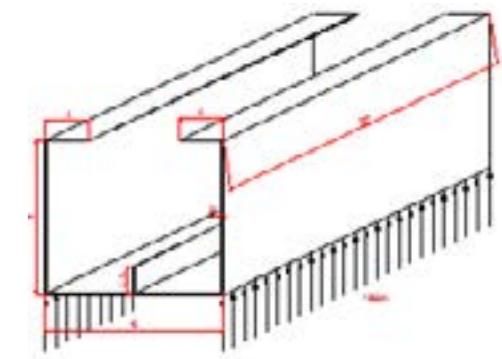
Secara mekanika struktur, *section properties* pada setiap mode :

1. Area (A) $C_1 = 4.2$
2. Momen Inersia sb. Z (I_Z) $C_2 = 166.4$
3. Momen Inersia sb. Y (I_Y) $C_3 = 45.3$
4. *Warping constant* (Γ) $C_4 = 3669.2$
5. *St. Venant torsional constant* (J) $D_4 = 0.0233$
6. *Distortion*

$$C_5 = 0.0001 \times 10^3 \quad B_5 = 0.0181 \quad D_5 = 0.0001$$

$$C_6 = 0.0007 \times 10^3 \quad B_6 = 0.0149 \quad D_6 = 0.0001$$

$$C_7 = 0.0003 \times 10^3 \quad B_7 = 0.0007 \quad D_7 = 0$$

**Gambar 6 : Penampang terbuka berpenegar beban merata pada node 3 dan 6**

Penampang terbuka berpenegar dibebani merata pada node 3 dan 6 sebesar 1 kN/cm dan kedua ujung ditumpu

Tabel 5 : Longitudinal stress

Node	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_3	269.79	269.79	-171.71	-171.71	-88.93	-171.71	269.79	269.79
σ_5	-0.902	0.78657	-0.790	-0.790	-19.04	-0.790	0.7865	-0.90275
σ_7	-541.195	249.058	-65.32	8.0096	176.26	-65.32	249.058	-541.195
$\sum\sigma$	-272.31	519.632	-237.826	-164.494	68.290	-237.826	519.632	-272.31

Tabel 6 : Horisontal Displasmen ($v_k = V_k v_{n,k}$)

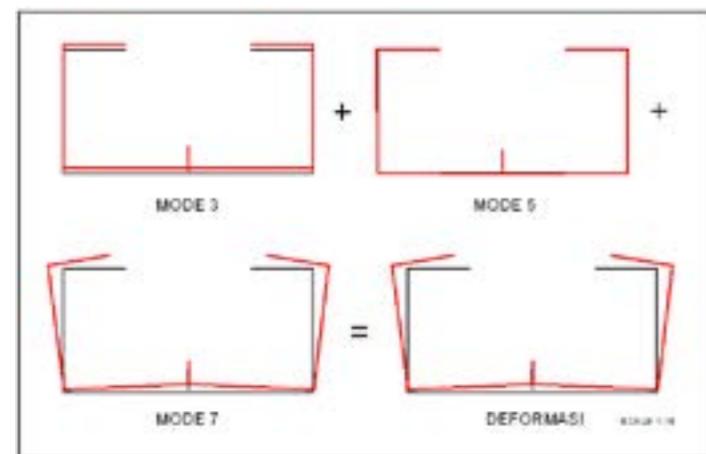
Node	1	2	3	4	5	6	7	8
v_3	0	0	0	0	0	0	0	0
v_5	-0.021	-0.021	0	0	0	0	0.021	0.021
v_7	-9.831	-9.831	0.456	0.456	0.456	0.456	9.831	9.831
$\sum V$	-9.851	-9.851	0.456	0.456	0.456	0.456	9.851	9.851

Tabel 7 : Vertikal Displasemen ($w_k = W_k w_{r,k}$)

Node	1	2	3	4	5	6	7	8
w_3	2.737	2.737	2.737	2.737	2.737	2.737	2.737	2.737
w_5	0.015	0.010	0.010	-0.592	-0.592	0.010	0.010	0.015
w_7	8.305	1.955	1.955	5.582	5.582	1.955	1.955	8.305
$\sum w$	11.057	4.703	4.703	7.727	7.727	4.703	4.703	11.057

Dari tabel 6 dan 7 dapat digambarkan deformasi akibat pembebanan. Deformasi total pada penampang merupakan

kan superposisi dari mode 3 (aksial sumbu z), 5 (bending), dan 7 (distorsi) yang ditampilkan pada gambar 8.

**Gambar 7 : Deformasi karena pembebanan**

4. Validasi

Untuk validasi, hasil *linier elastis* dibandingkan dengan hasil *Finite element method* dengan Ansys dengan mengam-

bil *shell element* untuk mendiskritisasi member dan ditutup sederhana. Berikut hasil perhitungan GBT dibanding dengan perhitungan FEM.

Tabel 8 : Validasi Longitudinal stress

Node	1	2	3	4	5	6	7	8
GBT	-272.31	519.632	-237.826	-164.494	68.290	-237.826	519.632	-272.31
FEA	-243.45	561.395	-244.523	-217.453	69.012	-244.523	561.395	-243.45
%	-11.9	7.4	2.7	24.4	1.0	2.7	7.4	-11.9

Tabel 9 : Validasi Horisontal Displasemen

Node	1	2	3	4	5	6	7	8
GBT	-9.85	-9.85	0.46	0.46	0.46	0.46	9.85	9.85
FEA	-7.31	-7.31	-0.02	0.00	0.00	0.02	7.31	7.31
(A1-A2)/br	-0.63	-0.32	0.06	0.06	0.30	0.05	0.32	0.63

Tabel 10 : Validasi Vertikal Displasemen

Node	1	2	3	4	5	6	7	8
GBT	11.06	4.70	4.70	7.73	7.73	4.70	4.70	11.06
FEA	8.06	4.04	4.06	6.86	6.86	4.06	4.04	8.06
ssss(A1-A2)/br	0.75	0.08	0.08	0.11	0.58	0.08	0.08	0.75

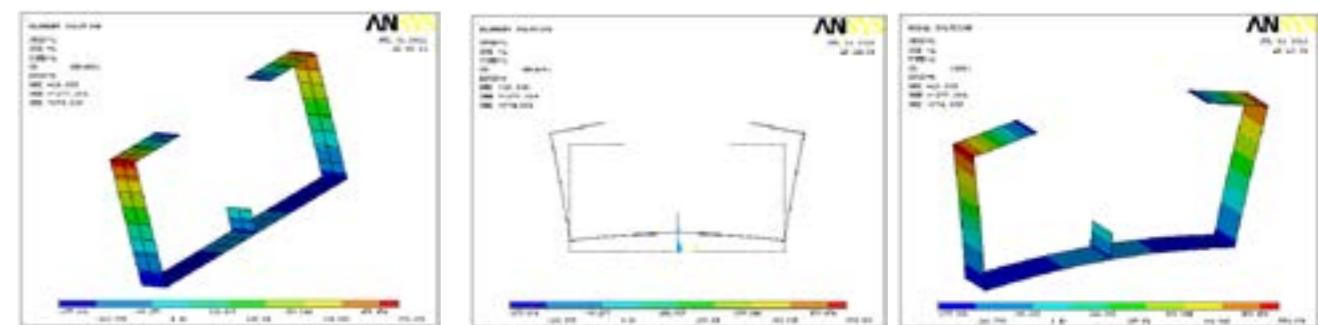
Dari hasil perhitungan GBT dimana tegangan terbesar terjadi pada node 2 dan node 7 sebesar 519.6 kN/cm^2 demikian juga yang terjadi pada perhitungan menggunakan FEM dimana tegangan terbesar 561.4 kN/cm^2 dengan selisih perhitungan 7.4%. Tegangan terkecil dari perhitungan GBT dan FEM sebesar 68.3 kN/cm^2 dan 69.012 kN/cm^2 dengan selisih 1%. Bentuk deformasi GBT pada gambar 8 memiliki bentuk deformasi yang sama dengan FEM pada gambar 9, perbedaan nilai displasmen terjadi karena GBT menggunakan asumsi teori pelat *Kirchhoff-love* dengan lendutan kecil dan menggunakan asumsi Vlasov dimana membrane

transverse strain penampang sama dengan nol, sehingga tidak terjadi regangan searah lebar pelat.

5. Kesimpulan

Generalized Beam Theory pada model penampang terbuka berpenegar dapat disimpulkan :

- Hasil yang diperoleh *Generalized Beam Theory* dan software Ansys cukup mirip dengan perbedaan nilai tegangan rata-rata 2.76%, tegangan maksimum memiliki perbedaan 7.4% dan tegangan minimum

**Gambar 8 : Tegangan dan deformasi FEM**

memiliki perbedaan 1%.

- Pergeseran/perpindahan node baik horizontal \tilde{v}_r dan vertical \tilde{w}_r , memiliki perbedaan rata-rata 0.06 dan 0.31 terhadap lebar dinding yang ditinjau, hasil deformasi memiliki pola deformasi yang sangat mirip dengan metode elemen hingga.
- Metode *Generalized Beam Theory* memudahkan pemahaman perilaku struktur terhadap pembebangan dari kombinasi mode (lihat gambar 8).
- Metode *Generalized Beam Theory* merupakan penyatuan teori klasik balok dan merupakan metode alternatif dari *finite element method* (FEM) dan *finite strip method* (FSM).

Daftar Pustaka

- Schardt, R. (1989). **Verallgemeinerte Technische Biegetheorie [Generalised Beam Theory]**. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Davies, J.M., & Leach, P. (1992). **Some Applications of Generalized Beam Theory**, Eleventh International Specialty Conference on Cold-Form Steel Structure, St. Louis, Missouri, USA.
- Davies, J.M. & Leach, P. (1994). **First-Order Generalized Beam Theory**, University of Salford, Salford, ELSEVIER.
- Davies, J.M. & Leach, P. (1994). **Second-Order Generalized Beam Theory**, University of Salford, Salford, ELSEVIER.

- [5] Lech, P. (1993). **The Calculation of Modal Cross-section Properties for use in The Generalized Beam Theory**, University of Salford, Salford, ELSEVIER
- [6] Silvestre, N. & Camotin, D. (2002). **First-order generalized beam theory for arbitrary orthotropic materials**, Technical University of Lisbon, ELSEVIER, Portugal
- [7] Hetenyi, M. (1946)., **Beams on Elastic Foundations**. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.

ESTIMASI KEKUATAN LAMBUNG KAPAL PASCA KERUSAKAN

ESTIMATION OF THE SHIP HULL STRENGTH AFTER DAMAGED

Muhammad Zubair Muis Alie

Abstract

The ultimate strength of ship hull is the most important to ensure the safety of ship not only in intact but also in damage condition. The International Maritime Organization (IMO) required in Goal Based Standard (GBS) to assess the ultimate strength of ship hull girder particularly in damage condition. The ultimate strength of ship's hull for damaged cross section is performed applying simplified approach. The explicit expression of the neutral axis is given. The procedures of the ultimate strength analysis of the cross section under biaxial bending are presented for several loading and constraining conditions. As a fundamental case, the estimation of the ultimate strength is taken only for sagging condition. The simplified approach is used to estimate the ultimate strength due to the rotation of the neutral axis are proposed using the elastic cross-sectional properties and critical member strength. The effectiveness of the simplified approach is examined through a comparison with the progressive collapse analysis.

Keywords : Ship's hull, simplified approach, ultimate strength

1. Introduction

A Ship may experience accidental damages caused by collision, grounding, etc., which may influence the safety of ship and surrounding environment. In order to ensure the safety of ships and reduce the associated risks, the International Maritime Organization required in the Goal Based Standard (GBS) for bulk carriers and tankers the assessment of the ultimate strength in the specified damaged condition (IMO, 2009). The ultimate strength of ship hull girder is the most fundamental strength to ensure the safety of ship not only in the intact condition but also in the damaged condition. Many research have been performed on the assessment on the ultimate strength of ship's hull for damaged ships. Paik, et al., 1998, developed a procedure to identify the possibility of the hull girder failure after collision and grounding damages based on the closed-form formulae of the ultimate hull girder strength and section modulus after damages. Notaro, et al., 2010, carried out full nonlinear FE assessment of the hull girder capacity in intact and damage conditions. They found that the effect of damage extent in vertical and transversal direction is more critical than its longitudinal direction, and that the damage varies the location of the neutral axis including higher stresses in proximity in the damage areas.

Another approach widely employed for the prediction of the ultimate strength is the Smith's method (Smith, 1977) known as the incremental-iterative approach in the IACS Common Structural Rules (IACS, 2010).

The aim of the present study is to assess the estimation on the ultimate strength for intact and damaged condition taking the influence of the rotation of the neutral axis into account of asymmetrically damaged ships under predominantly vertical bending. An explicit expression of the position of the neutral axis is given. The procedures of the progressive collapse analysis of the cross section under biaxial bending are presented for several loading and constraining conditions. Applying the developed system, a series of progressive collapse analysis of bulk carriers and double-hull oil tankers having collision damages at the side structures is performed, and the reduction of the ultimate strength due to the rotation of the neutral axis is investigated. For a sagging condition, a simple formula to estimate the ultimate strength and its reduction rate due to the rotation of the neutral axis is proposed using the elastic cross-sectional properties and the critical member strength.



Siswanto, ST, bergabung dengan Biro Klasifikasi Indonesia sejak 2008, dengan pendidikan D3 Politeknik Perkapalan ITS Program Studi Desain Konstruksi Kapal dan S1 ITS dengan Jurusan Teknik Perkapalan dengan Konsentrasi studi Hydrodinamika dan pengetahuan di galangan kapal 3 tahun sebagai Pengawas Produksi Repair dan Bangunan Baru. Awal bergabung di Biro Klasifikasi Indonesia ditempatkan di staf Devisi Lambung dan Material. Tahun 2010 – 2013 mendapatkan kesempatan dari BKI untuk melanjutkan S2 ITS dengan Jurusan Teknik Produksi dan Material Kelautan, dengan konsentrasi studi Konstruksi Kapal. Pada tahun 2013 sampai sekarang menjadi staf pengkaji IV pada Devisi Manajemen strategis. Konsentrasi bidang penelitian yang digeluti saat ini adalah konstruksi kapal.



Prof. Ir. Achmad Zubaydi, MEng, PhD, merupakan staf pengajar pada Jurusan Teknik Perkapalan (JTP), ITS. Riwayat pendidikan yang ditempuh adalah S1 di JTP-ITS, dilanjutkan dengan program

S2 di Hiroshima University (Jepang) dan pendidikan S3 di Memorial University of Newfoundland (Canada). e-mail : zubaydi@na.its.ac.id



Ir. Petrus Eko Panunggal, PhD (Alm), lahir di Blitar, 28 Oktober 1944. Beliau menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Perkapalan (dulu Teknik Bangunan Kapal), ITS pada tahun 1962 dan sudah mendapat gelar sarjana muda tiga tahun kemudian. Setelahnya beliau dipercaya sebagai Asisten Dosen dilanjutkan Dosen pada Jurusan tersebut. Gelar Insinyur Perkapalan beliau terima pada 22 Juli 1976. Tanpa melalui tahapan S2 pada tahun 1988 beliau dipercaya mendapatkan beasiswa dari University of Newcastle upon Tyne, Inggris untuk melanjutkan studi Program Doctor. Gelar Doctor of Philosophy beliau raih pada 10 Juli 1993. Pengabdian beliau di ITS hampir setengah abad, tepatnya sejak tahun 1965 sampai 11 September 2014 karena tutup usia. Peran dan jasa beliau di bidang perkapalan bersumbangsih besar dalam perkembangan dunia Perkapalan dan Kemaritiman Indonesia.

2. Estimate Of Residual Hull Girder Strength In Sagging Condition

In the Smith's method, a hull girder is divided into longitudinal elements composed of a stiffener and attached plating, which are assumed to act independently. Assuming that the cross section remains plane and considering the nonlinear load end-shortening behaviors of each element, the bending moment-curvature relationship of the cross section is obtained. The translation of the neutral axis of the cross section due to the progressive failure of structural elements is considered. The ultimate bending capacity is defined as the peak value of the bending moment-curvature relationship of the cross section.

When the cross section is geometrically and mechanically symmetric with respect to the centerline and subjected to vertical bending moment, the neutral axis is always horizontal and moves only vertically during the collapse process. When the cross section is asymmetrically damaged, however, the neutral axis rotates and the problem needs to be treated as a biaxial bending problem. The external loads in the heeled condition after suffering damages require the biaxial bending calculation also. Smith and Pegg, 2003, gave more explicit representation of the bending moment-curvature relationship, including the centroidal position of neutral axis. However, they expressed the biaxial bending moment-curvature relationship in term of secant moduli, and thus the post-ultimate strength behavior could not be obtained in the case of prescribed biaxial moment loading, resulting in the difficulty in determining the ultimate capacity.

Based on the observation of the progressive collapse behavior of the bulk carriers and tankers with the top-side damage, an attempt is made to estimate the ultimate strength in the sagging condition using the elastic cross-sectional properties and the critical member strength.

For the elastic cross section, the bending stress at the i -th element, σ_i , and the bending moment-curvature relationship are respectively expressed as

$$\sigma_i = E \{ (y_i - y_G) \phi_H + (z_i - z_G) \phi_V \} \quad (1)$$

and

$$\begin{cases} M_H \\ M_V \end{cases} = \begin{bmatrix} EI_{HH} & EI_{HV} \\ EI_{VH} & EI_{VV} \end{bmatrix} \begin{cases} \phi_H \\ \phi_V \end{cases} \quad (2)$$

where E is Young's modulus, D_i is the stiffness of element, ϕ_H and ϕ_V are horizontal and vertical curvatures. y_G and z_G are the coordinates of the point G in Fig. 1 and $\Delta\epsilon_G$ is the axial strain increment at the point G . When y_G and z_G are given by Eqs. (3) and (4),

$$y_G = \left(\sum_{i=1}^N y_i D_i A_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N D_i A_i \right) \quad (3)$$

$$z_G = \left(\sum_{i=1}^N z_i D_i A_i \right) / \left(\sum_{i=1}^N D_i A_i \right) \quad (4)$$

and I_{HH} , I_{VV} , I_{HV} and I_{VH} are the moment of inertia of the cross section given by

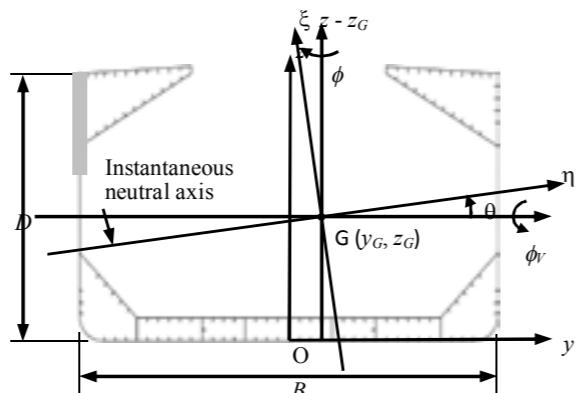


Fig. 1 : Instantaneous neutral axes for the analysis of incremental relationship of bending moments and curvatures.

$$\begin{aligned} I_{HH} &= \sum_{i=1}^N (y_i - y_G)^2 A_i, \quad I_{VV} = \sum_{i=1}^N (z_i - z_G)^2 A_i \\ I_{HV} &= I_{VH} = \sum_{i=1}^N (y_i - y_G)(z_i - z_G) A_i \end{aligned} \quad (5)$$

Under the pure vertical bending moment of Case 1 ($M_H = 0$), the horizontal and vertical curvatures are given by

$$\begin{cases} \phi_H \\ \phi_V \end{cases} = \frac{1}{E(I_{HH}I_{VV} - I_{HV}^2)} \begin{cases} -I_{HV}M_V \\ I_{HH}M_V \end{cases} \quad (6)$$

Substituting Eq. (6) to Eq. (1), the bending stress σ_i is given by

$$\sigma_i = \frac{-(y_i - y_G)I_{HV} + (z_i - z_G)I_{HH}M_V}{I_{HH}I_{VV} - I_{HV}^2} \quad (7)$$

The terms including the cross moment of inertia, I_{HV} , rep-

resent the effect of the rotation of the neutral axis.

Here, it is assumed that the residual hull girder strength in the sagging condition M^u is attained when a critical member at the location of (y_c, z_c) reached its ultimate strength, M_v^u , namely

$$M_v^u = \frac{I_{HH}I_{VV} - I_{HV}^2}{-(y_c - y_G)I_{HV} + (z_c - z_G)I_{HH}} \sigma_c^u \quad (8)$$

On the other hand, when the rotation of neutral axis is fixed (Case 2), the ultimate strength corresponding to Eq. (8) is given by

$$M_v^u|_{\text{Case2}} = \frac{I_{VV}}{z_c - z_G} \sigma_c^u \quad (9)$$

The reduction rate of the ultimate strength due to the rotation of the neutral axis in the framework of the proposed approximate approach is given by the ratio of Eq. (8) to Eq. (9) as

$$\frac{M_v^u}{M_v^u|_{\text{CASE2}}} = \frac{I_{HH}I_{VV} - I_{HV}^2}{-(y_c - y_G)I_{HV} + (z_c - z_G)I_{HH}} \frac{z_c - z_G}{I_{VV}} \quad (10)$$

when the location of the critical member is assumed to be the same in Case 1 and Case 2.

3. Analyses Cases

Case 1 : Pure Vertical Bending

The vertical bending moment is applied to the cross section with no constraint on the horizontal curvature. In this case, the horizontal curvature as well as the vertical curvature is induced under the condition of $M_H = 0$. The incremental equation to be solved is

$$\begin{cases} 0 \\ \Delta M_V \end{cases} = \begin{bmatrix} D_{HH} & D_{HV} \\ D_{VH} & D_{VV} \end{bmatrix} \begin{cases} \Delta\phi_H \\ \Delta\phi_V^0 \end{cases} \quad (11)$$

where the superscript '0' indicates a prescribed value. The solutions are

$$\Delta\phi_H = -\frac{D_{HV}}{D_{HH}} \Delta\phi_V^0,$$

$$\Delta M_V = \left(D_{VV} - \frac{D_{VH}D_{HV}}{D_{HH}} \right) \Delta\phi_V^0 \quad (12)$$

The ultimate strength is calculated from the peak value of the $M_v - \phi_V$ curve.

Case 2 : Constrained Vertical Bending

The vertical bending moment is applied to the cross section with the horizontal curvature constrained. Only vertical curvature is increased, and thus no rotation of the neutral axis takes place. This loading condition can be simulated by increasing the vertical curvature ϕ_V under the condition of $\phi_H = 0$, that is,

$$\begin{cases} \Delta M_H \\ \Delta M_V \end{cases} = \begin{bmatrix} D_{HH} & D_{HV} \\ D_{VH} & D_{VV} \end{bmatrix} \begin{cases} 0 \\ \Delta\phi_V^0 \end{cases} \quad (13)$$

The solutions are

$$\Delta M_H = D_{HV} \Delta\phi_V^0, \quad \Delta M_V = D_{VV} \Delta\phi_V^0 \quad (14)$$

ΔM_H is the horizontal bending moment necessary for constraining the horizontal curvature. The ultimate strength strength is calculated from the peak value of the $M_v - \phi_V$ curve. Comparing Case 1 and Case 2, the influence of the rotation of the neutral axis on the residual vertical bending strength can be examined.

The analysis procedures common for all cases are summarized as,

1. Subdivide the cross-section into elements composed of stiffener and attached plating.
2. Derive the average stress-average strain relationship of individual elements, considering the influences of buckling and yielding.
3. Calculate the tangential stiffness of individual elements, from the average stress-average strain curve at the present strain.
4. Calculate the centroidal position of the instantaneous neutral axis y_G and z_G .
5. Evaluate the flexural stiffness of the cross section with respect to the instantaneous neutral axis.
6. Calculate the unknown increments of curvature and/or bending moment under specified condition.
7. Calculate the strain increment in individual elements from the curvature increment and then the stress increment using the slope of average stress-average strain curve.
8. Add the obtained increments of curvature, bending moment as well as strains and stresses of the ele-

ments to their cumulative values.

9. Calculate the position of the neutral axis with respect to the cumulative values of stress and strain.

10. Proceed to the next incremental step.

4. Result And Discussion

Fig. 4 shows a comparison of the ultimate strength obtained by Eq. (8) and the result of the progressive collapse analysis. Two locations of the critical deck elements are considered as shown in Figs. 2 and 3.

B1, B2 : L_1 at the center line, and L_2 at the hatch coaming on the damaged side

T2 : L_1 at the center line, and L_2 at the distance of $B/4$ from the damaged side shell

For the location L_1 of bulk carriers, the ultimate strength of the critical element is evaluated by using that of the element at L_2 .

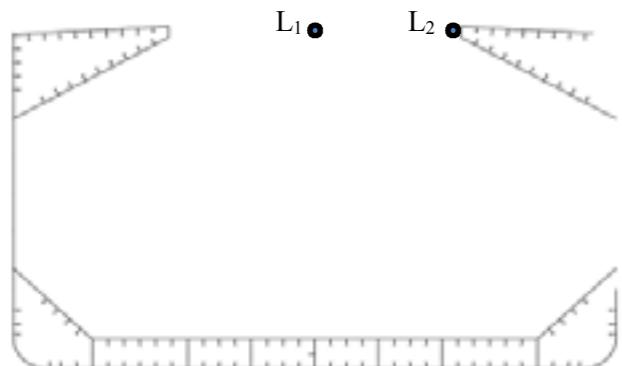


Fig. 2 : Damage case and critical element location for bulk carrier

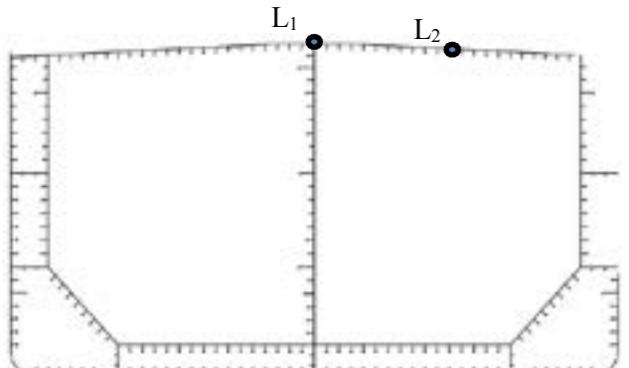


Fig. 3 : Damage case and critical element location for oil tanker

The ultimate strengths of B1, B2 and T2 obtained for the four different damage extents are summarized in Fig. 4. It is found that Eq. (8) gives an estimate of the ultimate strength which is in good agreement with the result of the progressive collapse analysis. For bulk carriers, the critical element at the location L_2 gives a better estimate of the ultimate strength. This is consistent with the observed collapse behavior in which the ultimate strength is attained when the topside tank region of the damaged side almost fully failed. The location L_1 cannot well take account of the effect of the horizontal curvature induced by MV, resulting in a slight overestimate of the strength. In the case of tankers, the location L_1 gives a better estimate of the residual strength than L_2 . This is also consistent with the failure behavior of T2 in which the ultimate strength is attained when the deck part almost fully failed. Fig. 5 compares the reduction rates of the ultimate strength due to the rotation of the neutral axis, obtained by Eq. (10) and the progressive collapse analysis.

The influence of the rotation of the neutral axis is larger for a larger damage extent in general. For the case of subject ships and damages under consideration, the influence is larger in bulk carriers than in tankers. Eq. (10) gives a relatively good estimate of the reduction rate. It can be a good basis of a rational expression of the influence of the rotation of the neutral axis on the reserved hull girder strength, as required in ship structural rule (IACS, 2012). More systematic analyses are definitely needed to develop the formula having larger applicability in ship types and damaged cases.

5. Conclusions

The ultimate strength of asymmetrically damaged ships has been analyzed by the simplified approach presented incremental procedures under sagging condition. The influence of the rotation of the neutral axis due to asymmetric damages on the ultimate strength has been discussed. A simplified approach to estimate the ultimate strength of damaged ships under the sagging condition has been proposed. The following conclusions can be drawn :

1. The rotation of the neutral axis has a significant influence on the ultimate strength of asymmetrically damaged ships.
2. For the subject ships with the specified top-side damages, the effect of the rotation of the neutral axis on the ultimate strength is about 8% at max-

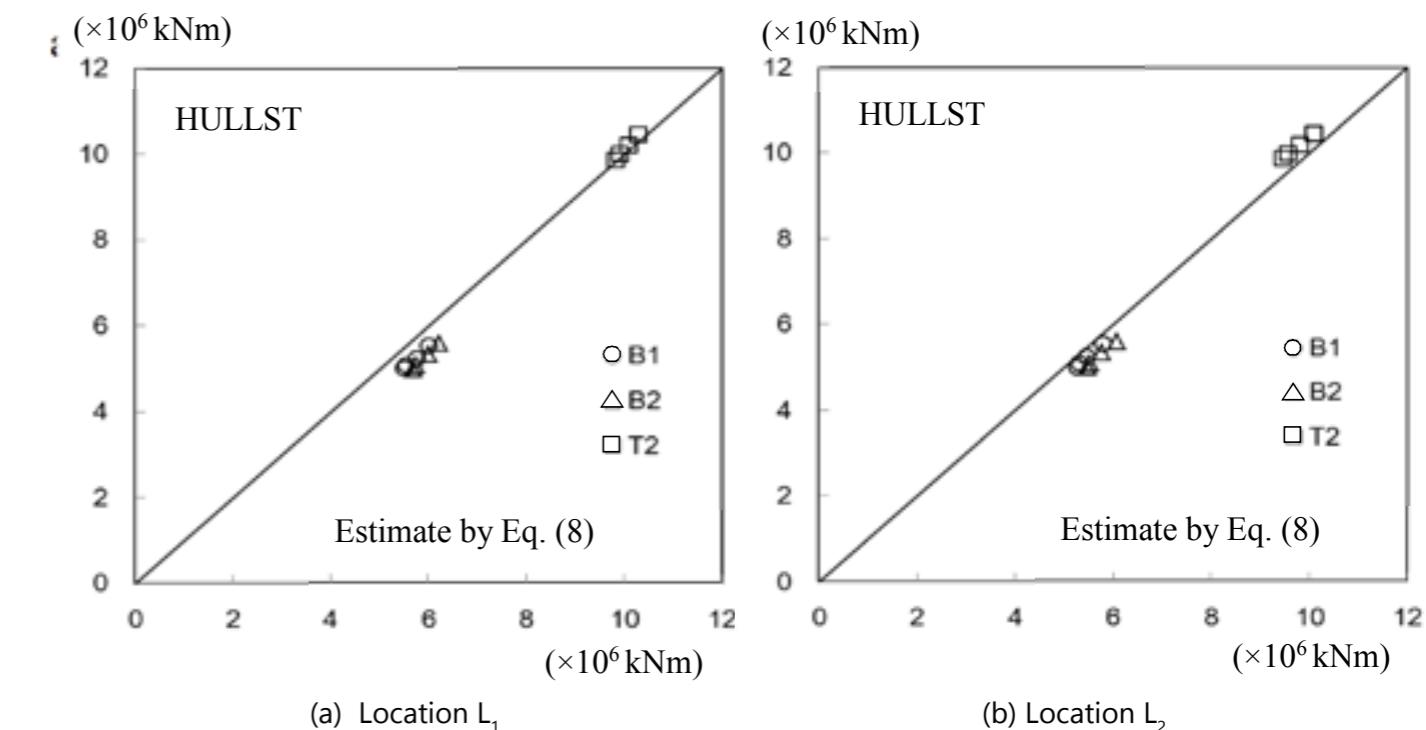


Fig. 4 : Comparison of the ultimate strength MV between the simplified method and the progressive collapse analysis

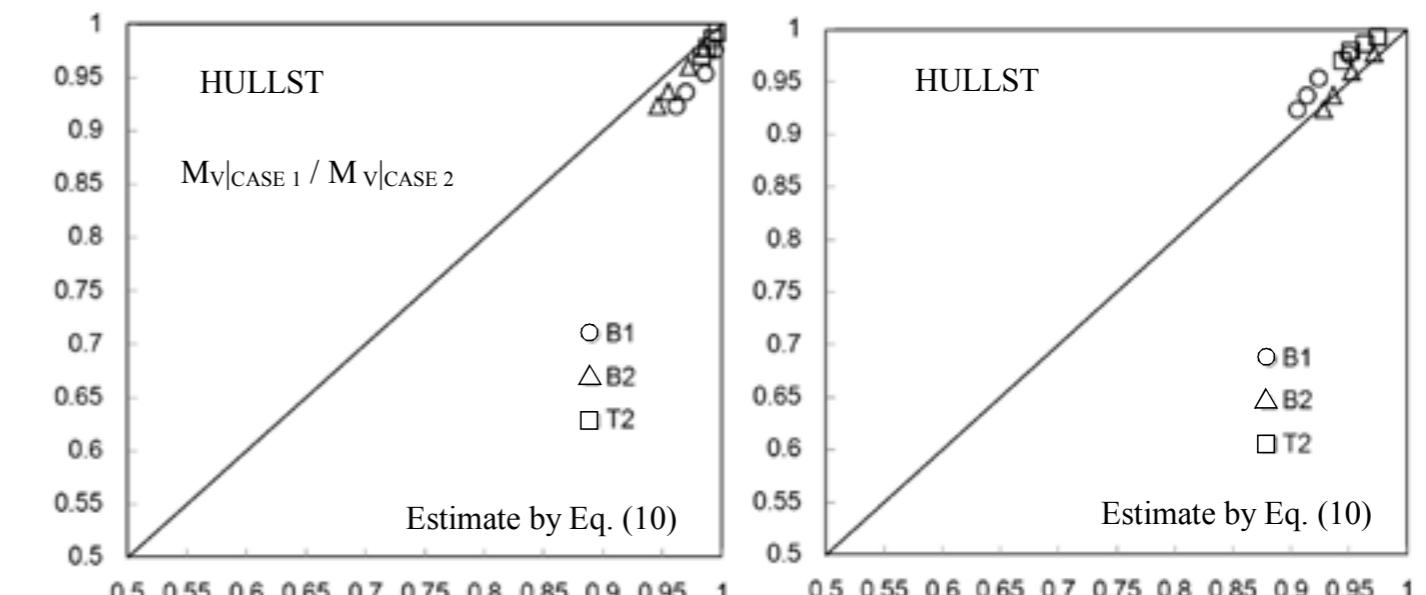


Fig. 5 : Comparison of reduction ratio of the ultimate strength due to the rotation of neutral axis between the simplified method and the progressive collapse analysis (Case 1/Case 2)

imum and smaller for smaller damage extent. The reduction rate depends on the damage extent and location.

- The ultimate strength of asymmetrically damaged ships under the sagging bending moment can be predicted using the elastic cross-sectional properties and the critical member strength with a reasonable accuracy.

References

International Maritime Organization, Goal-Based New Ship Construction Standards, MSC 86/5, 2009.
Paik, J.K., Thayamballi, A.K., and Yang, S.H., Residual Strength

- Assessment of Ships after Collision and Grounding, Marine Technology, Vol. 35, pp. 38-54, 1998.
Notaro, G., Kippenes, J., Amlashi, H., Russo, M., and Steen, E. Residual Hull Girder Strength of Ships with Collision or Grounding Damages, Proc. 11th Int. Sym. on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS2010, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 941-951, 2010.
Smith, C.S., Influence of Local Compression Failure on Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull, Proc. Int. Sym on Practical Design of Shipbuilding, PRADS, Tokyo, Japan, pp. 73-79, 1977.
Smith, M.J., and Pegg, N.G., Automated Assessment of Ultimate Hull Girder Strength, J Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 125, pp. 211-218, 2003.
International Association of Classification Societies, Draft Harmonized CSR, 2012.

ESTIMASI LAJU KOROSI PADA PELAT RUANG MUAT KAPAL TANKER YANG BERLAYAR DI PERAIRAN INDONESIA

Siti Komariyah, Fredhi Agung Prasetyo, Mohammad Arif Kurniawan

Abstract

The initial study to estimate corrosion rate of ship structures in which operate in Indonesian waterways has been started. The thickness deduction of structural elements data of crude oil tanker which is operate in this area have been collected from thickness measurement reports in which collected during her periodic surveys from more than 4500 points. Common statistical analysis is used to review the variation of plate thickness reduction in each part of ship structural members. In advanced, this analysis is valuable data for ship structure design process, ship inspection and maintenance planning in correlation with corrosion allowance.

Keywords : corrosion allowance, corrosion rate, thickness measurement

1. Pendahuluan

Pengurangan kekuatan struktur kapal yang telah beroperasi beberapa tahun sebagian besar disebabkan karena masalah korosi dan kelelahan. Pengurangan ini berbanding lurus dengan bertambahnya usia kapal. Karena umur struktur lambung sangat dipengaruhi kedua hal tersebut maka penentuan *corrosion allowance* pada tahap desain serta penentuan jadwal perawatan sesuai dengan kondisi kapal memegang peranan penting agar kapal tersebut mencapai umur desainnya serta tingkat keekonomisannya masih terjaga.

Banyak peneliti telah melakukan penelitian mengenai laju korosi pada struktur kapal yang beroperasi pada seluruh jalur pelayaran dunia (*worldwide*). Beberapa peneliti tersebut sebagian besar terafiliasi dengan badan klasifikasi Internasional, seperti ABS[6][7], KR[8] dan lain lain. Selain itu, mereka juga tergabung pada aliansi tertentu seperti TSCF. Menunjuk pada hasil yang telah didapatkan, maka secara spesifik laju korosi untuk kapal kapal khususnya klas BKI dan juga beroperasi di perairan Indonesia tidak/belum pernah diteliti. Hal ini berakibat ketiadaan acuan umum batas pengurangan tebal pelat konstruksi kapal klas BKI dan juga yang beroperasi di perairan Indonesia, tidak seperti halnya badan klasifikasi Internasional yang lain yang telah menggunakan acuan umum batas pengurangan ketebalan pelat konstruksi kapal, contohnya ; ABS dengan

menggunakan prosentase untuk bagian konstruksi kapal.

Pada tulisan ini dipaparkan kajian mengenai pengurangan tebal pelat pada ruang muat kapal tanker klas BKI yang beroperasi di perairan Indonesia dengan menggunakan metode statistik. Data tersebut kemudian dibandingkan dengan *corrosion rate* hasil penelitian sebelumnya. Beberapa prosedur terhadap proses klasifikasi yang berhubungan dengan data corrosion rate pelat konstruksi kapal juga diusulkan untuk dapat dilaksanakan bagi kapal klas BKI.

2. Tinjauan Pustaka

Korosi Pada Kapal Tanker

Ada empat tipe korosi yang sering terjadi pada *structural member* geladak dan ruang muat kapal tanker [1] yaitu *general corrosion*, *grooving corrosion*, *pitting corrosion* dan *edge corrosion*. *General corrosion* terjadi secara merata pada permukaan yang tidak dilindungi. Secara tampak mata, pengurangan tebal karena proses korosi jenis ini sulit diprediksi karena tertutupi oleh kerak karat. Akumulasi dari *general corrosion* ini dapat menyebabkan perlunya penggantian pelat.

grooving corrosion biasanya disebut '*inline pitting attack*', sering ditemui pada las-lasan terutama pada daerah HAZ. Korosi ini disebabkan karena arus galvanis yang terjadi



Muhammad Zubair Muis Alie, Staf Pengajar Jurusan Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, *bair_offshore@yahoo.co.id*

karena perbedaan struktur metalografi antara daerah HAZ dan logam dasar. *Grooving corrosion* dapat menyebabkan konsentrasi tegangan dan selanjutnya mempercepat proses korosi. *Grooving corrosion* dapat ditemukan dalam logam dasar di mana lapisan telah tergores atau logam itu sendiri telah rusak secara mekanis.

Pitting corrosion merupakan korosi lokal yang biasanya disebabkan karena kerusakan coating pada lokal area. Pada permukaan yang dicat, penyebarannya bisa ke dalam pelat dan memiliki diameter yang kecil sedangkan untuk permukaan yang tidak dicat, korosi ini akan membentuk sumuran dengan diameter yang lebar tetapi tidak dalam dan akan tampak sama dengan korosi *general*. *Pitting corrosion* sering ditemui pada pelat alas dalam (inner bottom), pelat alas dan permukaan-pelat horizontal.

Edge corrosion adalah korosi yang terjadi secara lokal pada ujung pelat, stiffener, girder, web maupun disekitar bukaan. Pada penelitian ini korosi yang akan dibahas adalah korosi general yaitu pengurangan tebal karena korosi terjadi secara merata.

Mekanisme terjadinya korosi pada kapal tanker sangat kompleks, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor ini akan berbeda tergantung dari kegunaan tangki. Misalnya pada tangki muat, metode dan frekuensi pembersihan tanki serta kadar sulfur sangat berpengaruh pada korosi.

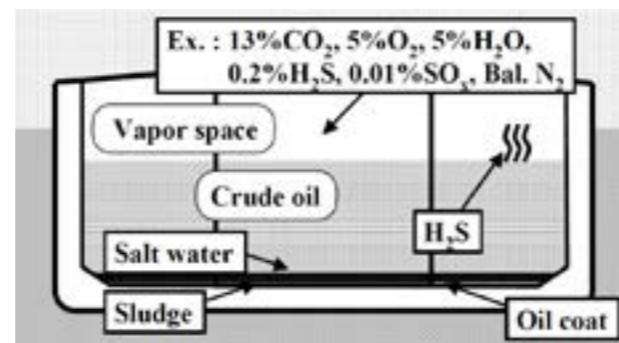
Mekanisme Korosi Pada Pelat Alas Ruang Muat

Mekanisme terjadinya korosi pada pelat alas ruang muat kapal tanker berbeda dengan pada pelat geladak. Pada pelat alas korosi yang terjadi adalah *pitting corrosion* sedangkan pada pelat geladak adalah korosi merata.

Mekanisme Korosi Pada Pelat Geladak Teratas Ruang Muat

Ruang muat kapal tanker pada *vapor space* merupakan lingkungan yang korosif karena pada daerah tersebut mengandung gas inert yang merupakan campuran berbagai macam gas yang dapat mempertahankan kadar oksigen dalam prosentase rendah untuk mencegah terjadinya ledakan dan hidrogen sulfida (H_2S) yang merupakan gas hasil penguapan minyak mentah. Komposisi kimia gas inert pada vapor space secara umum adalah $13\%CO_2$ - $5\%O_2$ - $5\%H_2O$ - $0.2\%H_2S$ - $0.01\%SOx-N_2$ bal (Gambar 1). Atmosfer yang korosif tersebut serta paparan siklis kondisi basah dan kering akibat perubahan temperatur pada waktu siang ($35-60^\circ C$) dan malam hari ($5-25^\circ C$) akan menyebabkan pelat geladak mengalami korosi.

Mekanisme terjadinya korosi pada bagian bawah pelat geladak sama dengan reaksi korosi atmosfer, bedanya hanya



Gambar 1 : Penampang melintang crude oil tanker [2]

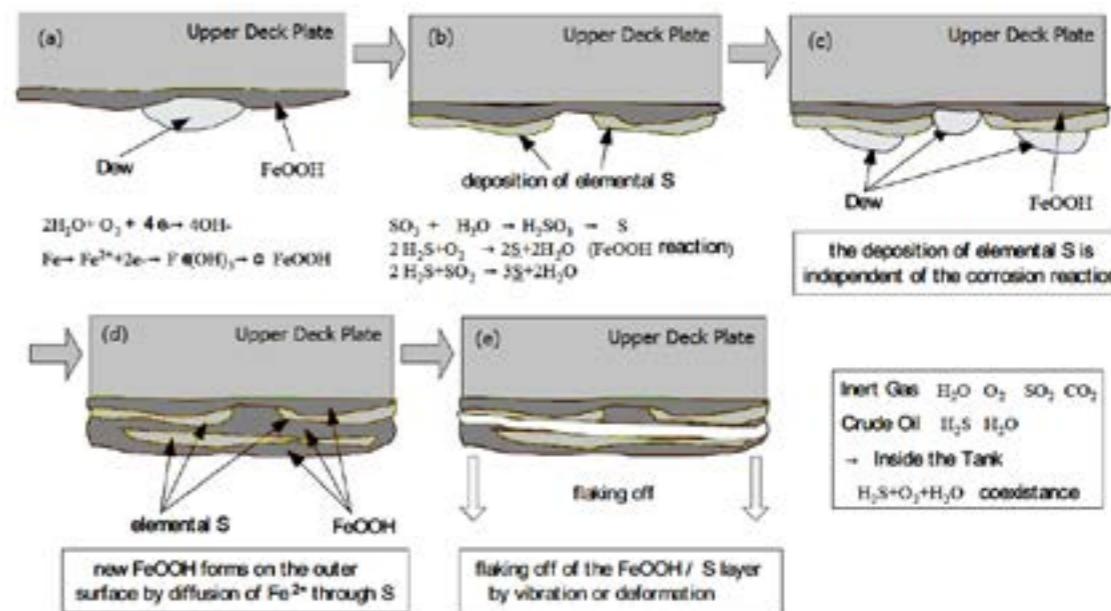
dipercepat oleh sulfur dioksida (SO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S). Unsur sulfur akan mengendap pada pelat ketika terbentuk $FeOOH$ pada lingkungan yang mengandung H_2S dan H_2O . Hasil dari proses korosi ini yaitu endapan S akan mudah dikelupas karena terdistribusi secara berlapis. Karena lapisan karat ini tidak berfungsi sebagai pelindung, laju korosi tidak terhambat oleh lapisan karat sehingga proses korosi akan terus berlangsung [2][3].

Mekanisme Korosi Pada Pelat Geladak Ruang Muat Kapal Tanker

Mekanisme terjadinya korosi pada pelat alas ruang muat kapal tanker berbeda dengan pada pelat geladak. Pada pelat alas korosi yang terjadi adalah *pitting corrosion* sedangkan pada pelat geladak adalah korosi merata.

Pelat alas ditutupi oleh 'oil coat' yang bisa berfungsi sebagai perlindungan terhadap korosi. Tumpukan endapan, *Crude Oil Washing* dan lain-lain dapat menyebabkan kerusakan pada 'oil coat' yang dapat mengakibatkan terjadinya korosi pitting. Pada air laut, akan terbentuk micro-cell dimana daerah dengan perlindungan yang rendah akan menjadi anoda sedangkan 'oil coat' dan endapan akan menjadi katoda, dan *pitting corrosion* akan berlangsung [4]. Untuk permukaan *inner bottom plate* yang dilindungi oleh cat zinc-primer, jumlah *pitting corrosion* berkurang jauh dibandingkan dengan yang tidak dicat [5].

Pengurangan tebal pada pelat alas ruang muat kapal tanker biasanya disebabkan karena *pitting corrosion*, yang terjadi karena beberapa hal, misalnya air laut yang terkonsentrasi pada satu tempat, cacat pada 'oil coat', adanya oxidizer misalnya iron oxide, iron sulfide dll [4].



Gambar 2 : Mekanisme korosi pada pelat geladak ruang muat kapal tanker [3]

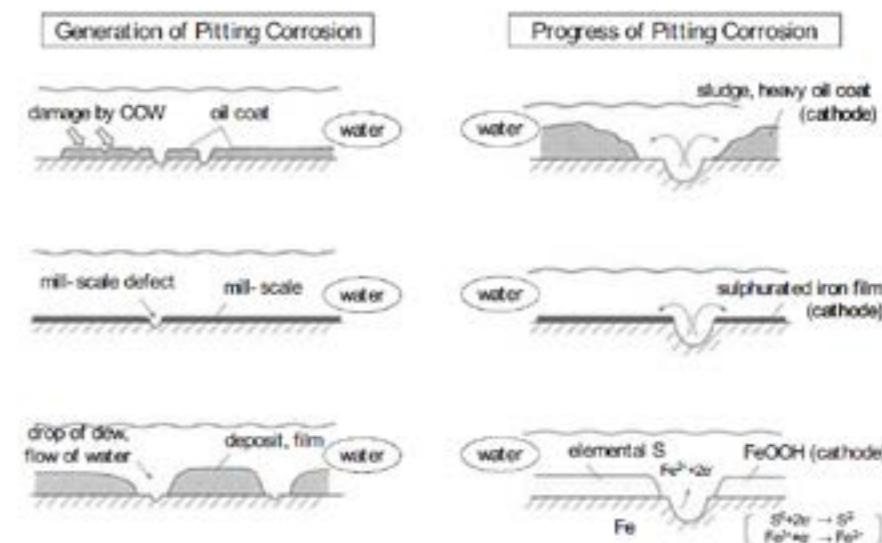
Model Laju Korosi

Gambar 3 menunjukkan model perkembangan korosi yang digunakan untuk menilai suatu kondisi struktur[6]. Perkembangan korosi dibagi menjadi dua. Tahap pertama adalah ketika coating masih berfungsi dengan baik sebagai penghambat korosi, sehingga pada tahap ini korosi belum terjadi. Tahap kedua, pada tahap kondisi coating sudah menurun sehingga fungsi sebagai perlindungan korosi berkurang. Pada tahap ini ada tiga tipe model perkembangan korosi.

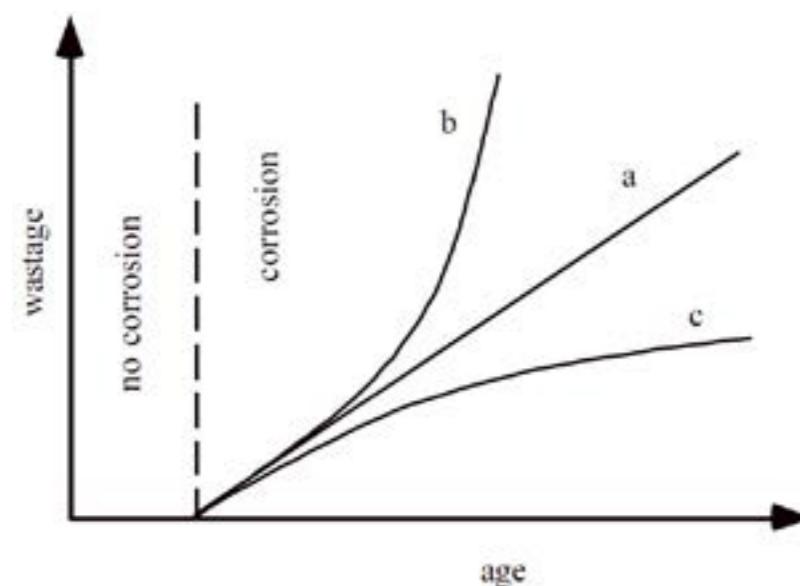
Model pertama pengurangan tebal yang disebabkan

karena korosi terjadi secara linier terhadap waktu (a). Asumsi ini umum dan sering digunakan dalam analisa kekuatan struktur. Model kedua seperti pada (b) dimana pengurangan tebal karena korosi meningkat dan melonjak secara drastis terhadap waktu. Model terakhir adalah pengurangan tebal meningkat terhadap waktu dan akan menurun ketika struktur tertutupi oleh produk korosi misalnya kerak karat, *scale* dan *rust*.

Dalam menentukan laju korosi, *traditional engineering and analysis* menggunakan metode *simplified deterministic approach* untuk menghitung proses tersebut yang menghasilkan nilai nominal sebagian *corrosion*



Gambar 3 : Mekanisme pitting corrosion pada pelat alas ruang muat kapal tanker [3]



Gambar 4 : Perkembangan korosi

addition. Pendekatan lebih rasional adalah dengan memodelkan probabilitas ketidakpastian menggunakan *reliability-based format*. Awalnya *structural reliability approach* digunakan untuk menentukan *safety factor*. Metode ini terus dikembangkan dan terbaru adalah *time variant reliability approach* yang menggambarkan secara eksplisit ketidakpastian dalam *structural deterioration* [7]. Metode ini cocok digunakan untuk menilai struktur kapal baik bangunan baru maupun kapal yang telah beroperasi serta rencana perbaikan atau inspeksi dan pengembangan design baru.

Ada beberapa studi mengenai laju korosi yang telah dilakukan, salah satunya adalah Wang et al [6], berdasarkan database pengukuran ketebalan pelat, yang kemudian dianalisa dan laju korosi dapat diasumsikan menggunakan metode Weibull distribution. Dimana, laju korosi untuk struktur bangunan laut yang dihitung dengan asumsi tersebut lebih besar dari hasil yang dipublikasikan oleh TSCF.

Penelitian Paik et al [8] pada tanki ballast kapal tanker dan kapal bulk carrier menunjukkan bahwa laju korosi per tahun adalah 0.0466-0.0823 mm, dan laju korosi dipengaruhi oleh kondisi coating pada tangki yang bersangkutan. Kemudian, Paik et al. juga mengusulkan suatu persamaan untuk menentukan corrosion margin untuk struktur tanki ballast.

3. Analisa Data

Data-data tebal pelat diambil dari kapal *single hull crude*

Oil Tanker kelas BKI yang dibangun menggunakan baja normal strength grade A dengan komposisi karbon maksimum 0,21, Mn min 2,5xC , Si maksimum 0,50, P max 0,035, S max 0,035. Kapal tersebut hampir 97% sepanjang tahunnya beroperasi di daerah perairan Indonesia.

Tabel 1 : Komposisi kimia pelat baja normal

C _{max}	Mn _{min}	Si _{max}	P _{max}	S _{max}
0,21	2,5 x C	0,50	0,035	0,035

Ketebalan pelat konstruksi kapal diperoleh dari hasil pengukuran ketebalan pelat kapal yang dilaksanakan oleh perusahaan yang telah diakui dan mendapat pengakuan (*approved*) dari BKI pada saat kapal melaksanakan survey periodik seperti *special survey*, *intermediate survey* atau *docking survey*. Data dikumpulkan dari ±5000 titik pada kapal dengan panjang bervariasi antara 200 sampai 250 meter, dengan umur antara 20-30 tahun ketika pengukuran ketebalan dilakukan. Sejumlah data pengukuran (±500 titik) diabaikan dan dikeluarkan dari sampel data, karena ketidak validan data, seperti hasil pengukuran tebal pelat terdahulu lebih kecil dibandingkan setelahnya, meskipun pelat konstruksi tidak diganti.

Pengurangan tebal pelat dihitung dari selisih tebal pelat yang diukur ketika kapal docking dengan pengukuran tebal pelat pada periode docking sebelumnya, dengan asumsi bahwa korosi yang terjadi pada pelat adalah korosi merata. Untuk pelat yang sudah diganti, data pengukuran tebal tidak dimasukkan dalam perhitungan ini. Sesuai

kondisi di kapal, coating dalam keadaan poor sehingga pengaruhnya terhadap laju korosi diabaikan.

Pengukuran terhadap pengurangan ketebalan pelat dilakukan pada pelat geladak, pelat sisi dan pelat alas pada ruang muat kapal crude oil. Dari data pengukuran ketebalan pelat maka diperoleh sejumlah informasi statistik seperti yang terdapat pada Tabel 2. Pada pelat geladak, rata rata laju pengurangan tebal pelat per tahun lebih cepat dibandingkan dengan pelat sisi dan juga pelat alas. Sedangkan pelat alas memiliki laju pengurangan tebal pelat paling lambat diantara tiga lokasi tersebut.

Standard deviasi pada ketiga lokasi konstruksi kapal yang terpilih memiliki nilai yang hampir sama. Ketiga lokasi tersebut memiliki laju rata rata pengurangan tebal pelat pertahun lebih cepat dibandingkan hasil dari Wang[6], kecuali pada bagian pelat alas.

4. Hasil Dan Pembahasan

Hasil estimasi laju korosi rata-rata, standar deviasi, nilai minimum dan maksimum untuk pelat geladak, pelat sisi dan pelat alas pada ruang muat kapal tanker single hull seperti yang terdapat pada Tabel 2.

Dari Tabel 2 terlihat bahwa penurunan tebal korosi berbeda-beda tergantung dari posisi pelat tersebut. Laju rata-rata pengurangan tebal pelat tertinggi pada pelat geladak dibandingkan dengan pelat sisi dan pelat alas, disebabkan karena pada permukaan bawah pelat geladak berada pada lingkungan yang korosif karena pengaruh muatan dan gas inert pada ruang muat yang bisa mempercepat proses korosi, juga pada bagian atas pelat geladak terekspose dengan atmosfer yang korosif. Perlu diingat bahwa data tebal pelat diambil dari pengukuran tebal pelat pada kapal-kapal yang berumur 20-30 tahun.

Kondisi pelat geladak bagian atas tentu tidak sama dengan ketika kapal masih baru, dimana telah terjadi degradasi coating. Aktifitas diatas geladak, kotoran, oli dan tumpahan minyak yang tidak dibersihkan akan dapat merusak lapisan cat dasar pelat geladak yang dapat menyebabkan penurunan ketebalan pelat.

Berbeda dengan *pitting corrosion* pada pelat alas ruang muat yang terjadi secara lokal, *pitting corrosion* pada pelat geladak dimana coating sudah dalam kondisi poor bisa menyebabkan terbentuknya sumuran yang lebar dan dangkal, dan akan sangat berpengaruh terhadap penurunan ketebalan pelat geladak. Secara umum jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Wang et al[6][7], estimasi laju korosi yang didapat relatif lebih besar. Hal ini disebabkan karena perbedaan jumlah data pengukuran ketebalan pelat pada penelitian tersebut lebih banyak jumlah titik sehingga jumlah data yang valid menjadi lebih baik. Dimana, Wang [6][7] menggunakan hasil pengukuran tebal pelat dari 140 single hull *oil tanker* dengan ±110.000 titik pengukuran, yang dilaksanakan terhadap kapal oil tanker dengan panjang antara 168-401 meter dan berumur antara 12-26 tahun dan 32 tahun.

Dari hal hal tersebut diatas dapat disimpulkan bahwa daerah pelat geladak memiliki laju pengurangan ketebalan pelat per tahun yang tertinggi, sedangkan daerah pelat alas memiliki laju pengurangan ketebalan pelat pertahun yang terendah. Ketiga daerah tersebut, laju pengurangan ketebalan pelat lebih tinggi dibandingkan hasil dari Wang[6][7], kecuali daerah pelat alas.

5. Kesimpulan

Laju korosi pada tangki muat kapal tanker single hull dialanalisa. Analisa ini berdasarkan data-data pengukuran ketebalan pelat.

Tabel 2 : pengurangan tebal pada beberapa lokasi struktur pada tangki muat [mpy]

Struktur	Nilai rata-rata	Deviasi	Min	Max	Wang et al [6][7]
Pelat geladak	0.12	0.05	0.04	0.19	0.066
Pelat sisi	0.08	0.06	0.02	0.18	0.044
Pelat alas	0.06	0.05	0.02	0.14	0.085

Komparasi dilakukan terhadap penelitian Wang et al [6] [7] dan rata-rata pengurangan ketebalan yang didapatkan lebih besar dari penelitian tersebut.

Estimasi laju korosi dapat digunakan untuk menentukan acuan awal *corrosion allowance* pada beberapa struktur kapal klas BKI yang berlayar diperairan Indonesia, serta untuk membuat jadwal pemeriksaan dan perawatan kapal menjadi terjadwal dengan baik.

6. Rekomendasi

Untuk dapat melaksanakan dan menjaga kesinambungan proses penelitian mengenai laju korosi bagi kapal klas BKI dan beroperasi di perairan Indonesia maka beberapa hal berikut ini direkomendasikan untuk dapat diperhatikan:

1. Data diperoleh dari hasil pengukuran ketebalan pelat yang dilaksanakan secara profesional oleh perusahaan yang telah diakui oleh BKI dan mendapat persetujuan (approved) dari BKI.
2. Pelaksanaan pengukuran dilaksanakan dengan diawasi sepenuhnya oleh surveiork BKI, sehingga lokasi maupun data yang tidak valid dapat dihindari. Hal ini dapat dilaksanakan juga dengan pelaksanaan preliminary meeting antara surveyor-galangan/pemilik kapal-perusahaan pengukuran ketebalan pelat.
3. Penggunaan laporan pengukuran ketebalan pelat yang sama dan digunakan oleh seluruh perusahaan pengukuran ketebalan pelat kapal telah diakui dan disetujui oleh BKI. Program laporan ini harus disiapkan oleh BKI.



Surabaya.

Siti Komariyah, merupakan peneliti bidang environmental, Struktur dan Material untuk Kapal dan Bangunan Laut, dan Div. Manajemen Strategi PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2000 di Teknik Perkapalan ITS Surabaya, dan gelar M. Eng tahun 2010 dari Osaka University.



Fredhi Agung Prasetyo, merupakan peneliti bidang environmental, Struktur dan Material untuk Kapal dan Bangunan Laut, tim pengembangan software DEWARUCI, dan Div. Manajemen Strategi PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2007 di Teknik Perkapalan ITS Surabaya, dan gelar Magister Teknik (MT) tahun 2013 di Jurusan yang sama.

4. Pelaksanaan tata kelola serta penyimpanan laporan pengukuran ketebalan pelat kapal bagi seluruh kapal klas BKI.

Daftar Pustaka

- [1] IACS Rec. 96 Double Hull Oil Tanker – Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of Hull Structures, April 2007
- [2] IGI, Satoshi, Inohara, Yasuto, Hirai, Tatsushi, High Performance Steel Plates for Shipbuilding- Life Cycle Cost Reduction Technology of JFE Steel, JFE Technical Report No. 5, March 2005
- [3] Committee V.6 Condition Assesment of Aging Ships, 16th International ship and Offshore Structure Congress, 20-25 August 2006, Southampton, UK.
- [4] Inohara, Y., Komori, T., Kyono, K., Ueda, K., Suzuki, S., Shiomi, H., Development of Corrosion Resistant Steel For Bottom Plate of COT, Shipbuilding Technology ISST 2007, Osaka (2007).
- [5] Inohara, Y., Komori, T., Kyono, K., Shiomi, H., Kashigawa, T., Prevention of the COT Bottom Pitting Corrosion by Zunc-Primer, Shipbuilding Technology ISST 2007, Osaka (2007).
- [6] Wang, G., Spencer, J., Elsayed, T., Estimation of Corrosion rates of Structural Members in Oil Tanker, 22th International Conference on Offshore Mechanics and Artics Engineering, Cancun, Mexico 8-13 June 2003.
- [7] Wang, G., Spencer, J., Sun, H., Assessment of Corrosion Risks to Aging Ships Using an Experience Database, 22th International Conference on Offshore Mechanics and Artics Engineering, Cancun, Mexico 8-13 June 2003
- [8] Paik, J. K. Thayamballi, A.K., Park, Y.I., Hwang, J.S., A time-dependent Corrosion Wastage Model for Seawater Ballast Tank Structures of Ships, Corrosion Science 46 (2004) 471-486.

ANALISA FATIGUE LIFE PADA BENTUK BRACKET LENGKUNG (RADIUSED BRACKET) TOPSIDE MODULE FSO/FPSO

Septia Hardy Sujiantanti, Wasis D. Aryawan, Achmad Zubaydi

Abstract

During the operation, FSO (Floating Storage and Offloading) and FPSO (Floating Production Storage and Offloading) always receive a significant wave loads that occur continuously. It gives influence to the structural of FSO/FPSO and the components of existing on the FSO/FPSO's deck or called topside module. The damage structure on topside module occur in the structural interface on FSO/FPSO between the hull structure and the topsides module. Therefore, the structure interface must be able to support the loads in operating condition. Fatigue life is one of the structural strength parameters for topside module interface. It is influenced by the wave loads as a cyclic load. This research will be analyzed the fatigue life of the radiused bracket connection with soft toe on the topside modules using finite element analysis. As the case study object, the fatigue analysis conducted on topside module crane pedestal of FSO Lentera Bangsa. Analysis begin by calculating the wave load effect using ANSYS AQWA. Nominal stress on the interface between FSO hull with topside modules are calculated with finite element structural analysis for all waves occurrence. The result shows that the fatigue life interface is 27.3 years.

Keywords : FSO/FPSO, fatigue life, bracket, topside module, finite element analysis

1. Pendahuluan

D ewasa ini floating offshore structure yang banyak berkembang adalah FSO atau FPSO. Dengan bentuk konstruksi lambung yang sama dengan kapal tanker, hal ini sangat menguntungkan pengguna FSO/FPSO karena kebutuhan dasarnya sebagai penyimpan atau storage. Namun demikian, terdapat beberapa perbedaan diantara FSO/FPSO dengan kapal tanker, yaitu adanya tambahan fasilitas penunjang operasional di atas geladak FSO atau biasa disebut sebagai topside module seperti menara suar (flare tower), riser, menara bor (drill tower), sistem perpipaan, helicopter deck, crane dan topside module yang lain. Selain itu, terdapat perbedaan dalam hal desain beban lingkungan dan beban pada saat operasional (Krekel, 2002).

Salah satu topside module yang ada pada FSO adalah crane. Konstruksi crane, terutama pada bagian pondasi crane (crane seating) haruslah kuat, karena selain harus menampung struktur di atasnya, pondasi crane juga harus kuat menerima beban operasional dan beban-beban lain akibat gerakan FSO (Sujiantanti, 2010).

Selama masa beroperasinya FSO/FPSO selalu menerima

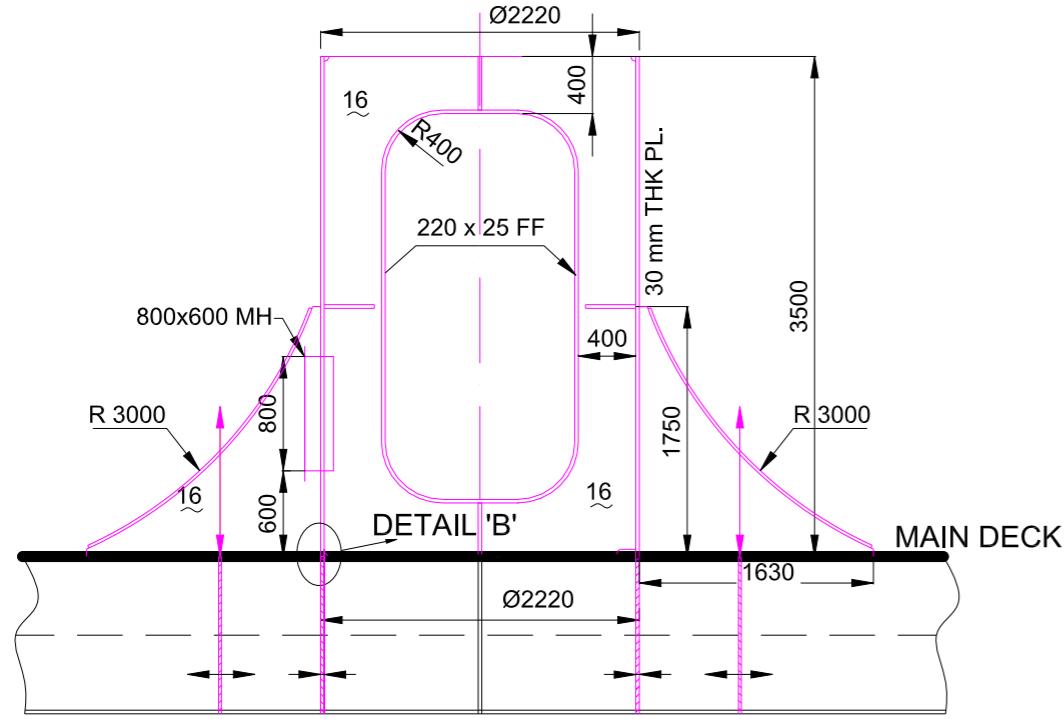
beban gelombang secara terus-menerus. Gaya gelombang tersebut dapat menyebabkan struktur FSO dan struktur interface topside module FSO mengalami kelelahan karena beban gelombang yang sifatnya siklis. Oleh karena itu struktur interface harus mampu menahan beban pada kondisi beroperasi. Salah satu parameter kekuatan struktur interface topside module adalah umur kelelahan (*fatigue life*) struktur interface. Dalam penelitian ini struktur interface topside module adalah bracket penguat konstruksi antara topside module dengan geladak FSO.

2. Desain Bracket Topside Module FSO

Pondasi crane merupakan bagian struktur crane yang menjadi tumpuan struktur diatasnya sekaligus menjadi bagian yang tersambung dengan hull FSO, dalam hal ini pada bagian geladak utama (*main deck*). Salah satu pertimbangan penting untuk mendapatkan kekuatan pondasi crane yang maksimum adalah kekuatan interface antara topside module dengan FSO hull. Selanjutnya struktur interface topside module yang dimaksud adalah bracket penguat konstruksi antara topside module dengan geladak FSO.

Dalam perkembangannya, dikenal beberapa desain bentuk bracket. Dalam penelitian ini dilakukan analisa pada

bentuk bracket yang didesain dengan permukaan yang melengkung. Gambar 2.1 menunjukkan bentuk desain bracket penguat topside module.



Gambar 1 : Bentuk desain bracket dengan permukaan melengkung

3. Pemodelan Elemen Hingga

Pemodelan elemen hingga (*finite element modeling*) dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai tegangan pada struktur interface *topside module* dan struktur kapal yang dimodelkan. Pemodelan elemen hingga dilakukan dengan menggunakan software analisa elemen hingga (*finite element analysis*, FEA) ANSYS 12.0 tahun 2010.

Untuk analisa elemen hingga pada topside module pondasi crane FSO model yang dibuat meliputi pondasi crane, berupa tabung silinder yang terpasang tepat di atas geladak FSO dan bracket yang terpasang pada empat sisi, geladak kapal, side shell, pelat alas, web transverse dan sekat memanjang. Untuk memodelkan bagian pelat digunakan tipe elemen shell. Sedangkan untuk memodelkan bagian penegar digunakan tipe elemen beam. Model elemen hingga secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 2.

4. Pembebaan

Sebagai salah satu bangunan apung, penentuan kemampuan kerja struktur pada FSO/FPSO salah satunya dipengaruhi oleh beban yang bekerja pada struktur tersebut. Semua beban yang dianggap akan bekerja pada struktur tersebut harus ditentukan terlebih dahulu. Beban-beban yang harus dipertimbangkan dalam perancangan bangunan apung adalah sebagai berikut :

- 1) Beban mati (*dead load*). Beban mati atau dead load adalah beban dari semua komponen kering serta peralatan, perlengkapan dan permesinan yang tidak berubah dari mode operasi pada suatu struktur. Pada perhitungan analisa pondasi crane ini yang termasuk beban mati adalah berat crane itu sendiri.

2) Beban hidup (*live load*).

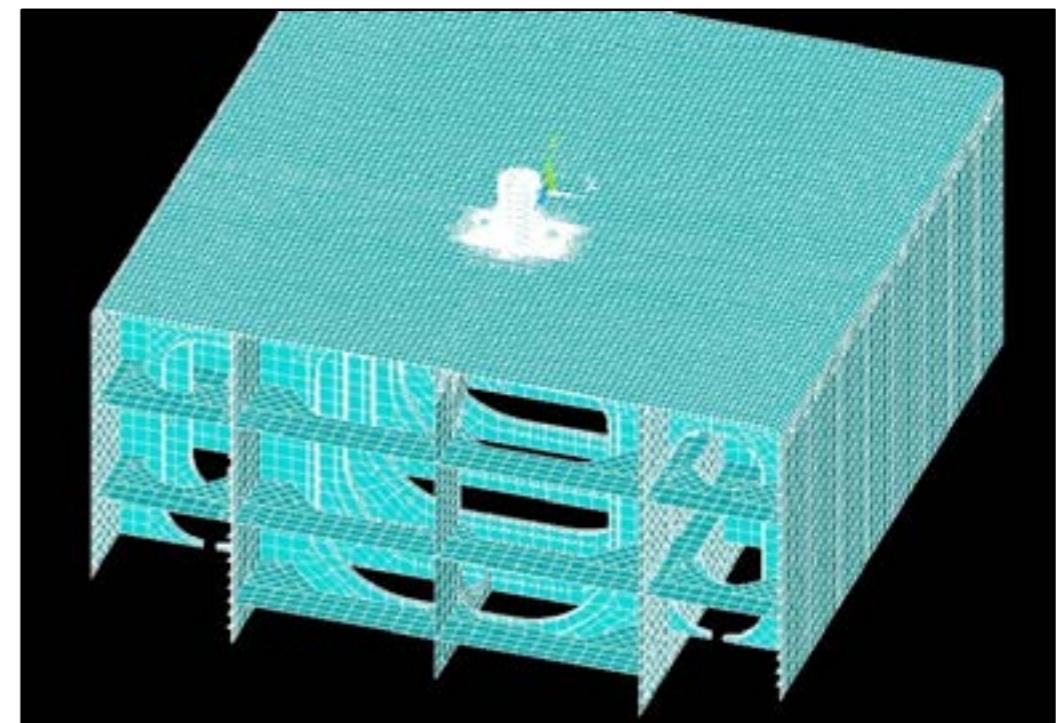
Beban hidup atau live load adalah beban yang terjadi pada struktur selama dipakai dan berubah dari mode operasi satu ke mode operasi yang lain. Pada perhitungan analisa pondasi crane ini yang termasuk beban hidup adalah berat crane itu sendiri, berat kapasitas crane (SWL) dan berat konstruksi pondasi crane dan konstruksi kapal yang dimodelkan.

3) Beban akibat kecelakaan (*accidental load*).

Beban kecelakaan merupakan beban yang tidak dapat diduga sebelumnya yang terjadi pada struktur, misalnya tabrakan dengan kapal pemandu operasi, putusnya tali tambat (mooring) dan kebakaran. Pada struktur pondasi crane beban kecelakaan yang mungkin terjadi adalah akibat putusnya tali pada crane atau beban muatan yang diangkat crane terlepas secara tiba-tiba.

4) Beban lingkungan (*environmental load*).

Beban lingkungan adalah beban yang terjadi karena dipengaruhi oleh lingkungan dimana suatu struktur bangunan apung dioperasikan atau bekerja. Beban lingkungan yang digunakan dalam perancangan bangunan apung adalah beban angin dan gelombang.



Gambar 2 : Model elemen hingga secara keseluruhan

4.1 Beban Angin

Perhitungan beban angin yang digunakan sesuai dengan LR rules and regulations, 'Code for Lifting Appliance in a Marine Environment', Chapter 3, Section 2 "Shipboard Cranes", dengan persamaan :

$$F_w = A \cdot p \cdot C_f \quad [N]$$

Dimana :

F_w	= beban angin [N]
A	= luas efektif permukaan yang terkena beban angin [m^2]
p	= tekanan angin [N/m^2]
V	= $0.613 V^2$ = kecepatan angin [m/s]
C_f	= 20 m/s untuk kondisi operasional = 63 m/s untuk kondisi diam = koefisien bentuk, seperti ditunjukkan pada Tabel 1

4.2 Beban gelombang

Data sebaran gelombang (*wave scatter diagram*) yang terjadi di wilayah perairan tempat FSO beroperasi diberikan dalam delapan arah gelombang. Data sebaran gelombang untuk arah gelombang dari utara ditunjukkan dalam Ta-

Type	Description	Aerodynamic slenderness					
		5	10	20	30	40	50
individual members	Rolled sections, rectangles, hollow sections, flat plates, box sections with b or d less than 0,5 m	1.30	1.35	1.60	1.65	1.70	1.80
	Circular sections, where DVs < $6 \text{ m}^2/\text{s}$	0.75	0.80	0.90	0.95	1.00	1.10
	DVs $\geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	0.60	0.65	0.70	0.70	0.75	0.80
	Box sections with b or d greater than 0,5 m	b/d					
		≥ 2.00	1.55	1.75	1.95	2.10	2.20
		1.00	1.40	1.55	1.75	1.85	1.90
		0.50	1.00	1.20	1.30	1.35	1.40
		0.25	0.80	0.90	0.90	1.00	1.00
	Single lattice frames	Flat sided sections					
		DVs < $6 \text{ m}^2/\text{s}$					
Machinery houses, etc.	DVs $\geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$	1.20					
	Rectangular clad structures on ground or solid base (air flow beneath structure prevented)	0.80					
		1.10					

Tabel 1 : Koefisien bentuk

bel 2. Jumlah gelombang yang terjadi dalam delapan arah sudut gelombang dengan variasi tinggi gelombang ditunjukkan dalam Tabel 3.

5. Konsep Perhitungan Fatigue

Analisa fatigue dengan metode S-N curve sambungan struktur dilakukan berdasarkan hukum kegagalan Palmgren-miner atau disebut Miner's Rule. Miner's rule merupakan hipotesis kumulatif kerusakan berdasarkan

konsep strain energy. Konsep strain energy menyatakan bahwa kerusakan terjadi ketika total strain energy pada saat siklus n dari variabel amplitudo pembebangan adalah sama dengan total energy dari siklus N dari konstan amplitudo pembebangan. Dapat dituliskan dalam persamaan matematik sebagai berikut :

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_m}{N_m}$$

Significant Wave Height (Hs, m)	Peak Period (Tp, s)															Total		
	<1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14	14 - 15	> 15		
Range	Mean	<1	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	> 15	Total
> 3.0	> 3.0																	
2.8 - 3.0	2.9																	
2.6 - 2.8	2.7																	
2.4 - 2.6	2.5																	
2.2 - 2.4	2.3																	
2.0 - 2.2	2.1																	
1.8 - 2.0	1.9																	
1.6 - 1.8	1.7																	
1.4 - 1.6	1.5																	
1.2 - 1.4	1.3																	
1.0 - 1.2	1.1																	
0.8 - 1.0	0.9																	
0.6 - 0.8	0.7																	
0.4 - 0.6	0.5																	
0.2 - 0.4	0.3																	
0.0 - 0.2	0.1																	
Total		2	75	99	98	61	41	45	28	10							459	

Tabel 2 : Data sebaran gelombang dari arah utara

Significant Wave Height (Hs, m)	Wave Direction								Total
	North	North East	East	South East	South	South West	West	North West	
> 3.0	> 3.0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.8 - 3.0	2.9	0	0	0	0	0	0	0	0
2.6 - 2.8	2.7	0	0	0	0	0	0	0	0
2.4 - 2.6	2.5	0	0	1	0	0	0	0	1
2.2 - 2.4	2.3	0	0	5	0	0	0	0	6
2.0 - 2.2	2.1	0	0	13	0	0	0	1	18
1.8 - 2.0	1.9	0	0	33	0	0	0	4	45
1.6 - 1.8	1.7	5	0	96	1	0	4	9	140
1.4 - 1.6	1.5	10	0	255	3	0	12	19	348
1.2 - 1.4	1.3	15	1	527	25	0	29	43	745
1.0 - 1.2	1.1	33	5	997	72	1	75	188	1446
0.8 - 1.0	0.9	51	4	976	95	8	165	142	1707
0.6 - 0.8	0.7	66	15	831	124	39	224	186	1774
0.4 - 0.6	0.5	141	47	816	213	122	293	256	2190
0.2 - 0.4	0.3	109	151	422	159	108	126	86	1280
0.0 - 0.2	0.1	29	59	91	51	20	19	12	292
Total		459	282	5063	743	298	947	833	1367
									9992

Tabel 3 : Jumlah kejadian gelombang pada semua arah

Dimana :

- D = Kerusakan fatigue kumulatif (cumulative fatigue damage)
- ni = Jumlah siklus rentang tegangan (Si) akibat pembebangan gelombang yang sebenarnya terjadi.
- Ni = Jumlah siklus rentang tegangan (Si) yang mengakibatkan kegagalan pada sambungan, diambil dari diagram S-N.

- N = Nilai prediksi dari cycles untuk gagal pada rentang tegangan S
- m = Slope inverse negative dari kurva S-N
- log K = Intersep dari log N-axis pada kurva S-N = log a - 2std

dimana a dan std adalah konstan berhubungan dengan rataan kurva S-N dan standart deviasi dari log N. Dari persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi persamaan dasar Kurva S-N yaitu :

$$S^m N = K_2$$

Dimana :

- K2 = Konstanta yg bergantung pada jenis material dan pengelasan, jenis pembebangan, konfigurasi geometris dan kondisi lingkungan (udara atau air laut).

Nilai K2 dan m dapat dilihat pada Tabel 4.

Klasifikasi kurva S-N bergantung pada geometri detil sambungan las, arah dari fluktuasi tegangan yang bersifat relatif bergantung pada detil, dan metode fabrikasi dan inspeksi dari detil sambungan tersebut. Tiap sambungan konstruksi, dimana berpotensi terjadi fatigue crack, harus disesuaikan pada klas sambungan yang tepat berdasarkan. Basic design dari kurva S-N dinyatakan sebagai berikut (Bai, 2003) :

$$\log N = \log K - m \log S$$

Dimana :

- S = Rentang tegangan [N/mm²]

Percepatan gerak (*acceleration motion*) FSO akibat gelombang dihitung berdasarkan respon gerak FSO (RAO) dan perhitungan spektrum gelombang. Respon gerak FSO telah diperoleh dari *motion analysis* menggunakan AQWA. Spektrum gelombang dihitung menggunakan teori spektrum gelombang JONSWAP dengan mengambil nilai γ (gamma) yaitu 2.5. Spektrum gelombang dihitung pada semua

Class	m	Standar deviation		K ₂	K ₂		S ₀ N/mm ²
		log ₁₀	log _e		log ₁₀	log _e	
B	4.0	0.1821	0.4194	1.01E+15	15.0043	34.5487	100
C	3.5	0.2041	0.4700	4.23E+13	13.6263	31.3758	78
D	3.0	0.2095	0.4824	1.52E+12	12.1818	28.0497	53
E	3.0	0.2509	0.5777	1.04E+12	12.0170	27.6702	47
F	3.0	0.2183	0.5027	6.30E+11	11.7993	27.1690	40
F2	3.0	0.2279	0.5248	4.30E+11	11.6335	26.7871	35
G	3.0	0.1793	0.4129	2.50E+11	11.3979	26.2447	29
W	3.0	0.1846	0.4251	1.60E+11	11.2041	25.7984	25
T	3.0	0.2484	0.5720	1.46E+12	12.1644	28.0095	53

Tabel 4 : Karakteristik sambungan

perhitungan RAO. Tabel 5 menunjukkan contoh hasil perhitungan spektrum gelombang dan *acceleration motion*

dengan arah gelombang dari utara.

No.	Wave Frequency [rad/sec]	σ	a	Spectral Density [m ² .sec]	Response (Surge) $S_{\eta\eta} \times RAO^2$	Acceleration (longitudinal) $S_{\eta\eta} \times RAO^2 \times \omega^4$	Response (Sway) $S_{\eta\eta} \times RAO^2$	Acceleration (transversal) $S_{\eta\eta} \times RAO^2 \times \omega^4$	Response (Heave) $S_{\eta\eta} \times RAO^2$	Acceleration (vertical) $S_{\eta\eta} \times RAO^2 \times \omega^4$
1	0.209	0.07	5.52E-30	0.0000	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.309	0.07	7.00E-24	0.0000	9.36E-91	8.53E-93	4.03E-90	3.67E-92	1.97E-90	1.80E-92
3	0.409	0.07	1.72E-18	0.0000	1.04E-29	2.90E-31	5.55E-29	1.55E-30	7.99E-29	2.23E-30
4	0.509	0.07	8.17E-14	0.0000	1.97E-13	1.32E-14	2.31E-12	1.55E-13	5.83E-12	3.92E-13
5	0.609	0.07	7.52E-10	0.0000	1.37E-08	1.88E-09	5.51E-07	7.58E-08	6.25E-07	8.59E-08
6	0.709	0.07	1.34E-06	0.0021	4.69E-06	1.19E-06	4.60E-06	1.16E-06	2.50E-06	6.31E-07
7	0.809	0.07	4.62E-04	0.0253	1.30E-05	5.56E-06	7.85E-05	3.36E-05	2.85E-05	1.22E-05
8	0.909	0.07	3.08E-02	0.0783	4.48E-05	3.06E-05	2.71E-04	1.85E-04	7.28E-05	4.97E-05
9	1.009	0.07	3.98E-01	0.1712	9.67E-05	1.00E-04	1.78E-04	1.84E-04	1.52E-05	1.58E-05
10	1.109	0.07	9.97E-01	0.3326	5.90E-05	8.93E-05	6.08E-05	9.19E-05	6.78E-06	1.03E-05
11	1.209	0.09	6.44E-01	0.2271	1.30E-05	2.78E-05	5.01E-05	1.07E-04	7.25E-06	1.55E-05
12	1.309	0.09	1.54E-01	0.1247	5.38E-06	1.58E-05	1.71E-05	5.01E-05	4.35E-07	1.28E-06
13	1.409	0.09	1.36E-02	0.0898	2.37E-06	9.33E-06	5.10E-06	2.01E-05	1.21E-07	4.78E-07
14	1.509	0.09	4.46E-04	0.0708	8.04E-07	4.17E-06	2.84E-06	1.47E-05	1.92E-07	9.93E-07
15	1.609	0.09	5.42E-06	0.0559	5.22E-07	3.50E-06	1.13E-06	7.56E-06	8.86E-09	5.94E-08
16	1.709	0.09	2.43E-08	0.0440	2.15E-07	1.83E-06	5.90E-07	5.03E-06	3.84E-08	3.28E-07
17	1.809	0.09	4.05E-11	0.0347	1.09E-07	1.16E-06	2.10E-07	2.25E-06	4.28E-09	4.58E-08
18	1.909	0.09	2.50E-14	0.0274	5.15E-08	6.84E-07	1.19E-07	1.58E-06	4.57E-09	6.07E-08
19	2.050	0.09	1.38E-19	0.0199	1.76E-08	3.11E-07	3.81E-08	6.73E-07	1.34E-09	2.36E-08
					1.00E-04		1.85E-04		4.97E-05	

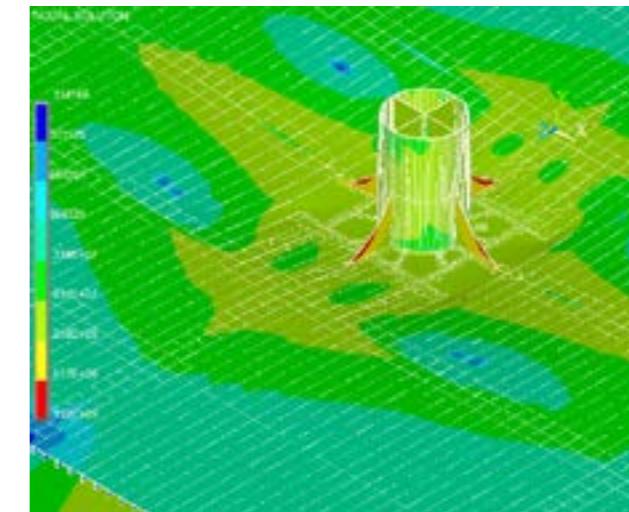
Tabel 5 : Hasil perhitungan percepatan gerak, gelombang dari arah utara

7. Analisa Rentang Tegangan

Rentang tegangan untuk setiap kejadian gelombang diperoleh melalui analisa elemen hingga menggunakan software ANSYS Multiphysic versi 12.0. Gambar 3 menampilkan tegangan maksimum yang terjadi pada interface *topdise module* dengan geladak FSO. Rentang tegangan yang diperoleh dari analisa elemen hingga adalah rentang tegangan nominal. Rentang tegangan nominal tersebut harus dikalikan dengan faktor konsentrasi tegangan untuk mendapatkan nilai rentang tegangan hotspot yang digunakan dalam perhitungan *fatigue*.

Hasil perhitungan rentang tegangan nominal pada semua variasi kejadian gelombang untuk arah gelombang dari utara ditunjukkan dalam Tabel 6.

Setelah diperoleh nilai rentang tegangan nominal maka rentang tegangan hotspot dapat dihitung dengan cara mengalikan rentang tegangan nominal dengan faktor konsentrasi tegangan. Hasil perhitungan rentang tegangan hotspot pada semua variasi kejadian gelombang untuk arah gelombang dari utara disajikan dalam Tabel 7.

**Gambar 3 :** Tegangan nominal pada interface topside module dengan geladak FSO

Significant Wave Height (Hs, m)	Peak Period (Tp, s)														
	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15
>3.0	>3.0														
2.8 - 3.0	2.9														
2.6 - 2.8	2.7														
2.4 - 2.6	2.5														
2.2 - 2.4	2.3														
2.0 - 2.2	2.1														
1.8 - 2.0	1.9														
1.6 - 1.8	1.7														
1.4 - 1.6	1.5														
1.2 - 1.4	1.3														
1.0 - 1.2	1.1														
0.8 - 1.0	0.9														
0.6 - 0.8	0.7														
0.4 - 0.6	0.5														
0.2 - 0.4	0.3														
0.0 - 0.2	0.1														

Tabel 6 : Hasil perhitungan rentang tegangan nominal untuk gelombang dari arah utara
Significant Wave Height (Hs, m)	Peak Period (Tp, s)														
<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	>15

<

8. Rasio Kerusakan Kumulatif

Nilai rasio kerusakan kumulatif (D) dapat dicari dengan menggunakan hukum Palmgren-Miner. Nilai ini diambil dari jumlah kejadian gelombang tiap H_s dan T_z . Nilai N_i (*cycle to failure*) dihitung berdasarkan nilai K_2 dan m disesuaikan dengan jenis sambungan yang ditinjau. Dalam

penelitian ini nilai $K_2 = 4.3E+11$ dan nilai $m = 3.0$. Nilai S adalah rentang tegangan hotspot yang telah dihitung sebelumnya. Hasil perhitungan N_i kemudian digunakan untuk menghitung nilai rasio kerusakan kumulatif (D). Tabel 8 menunjukkan hasil perhitungan rasio kerusakan kumulatif untuk kondisi pembebatan arah gelombang dari utara. Rasio kerusakan kumulatif pada arah ini disebut D_1 .

Significant Wave Height (H_s , m)	Mean	Peak Period (T_p , s)														Total	
		<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	
>3.0	>3.0																
2.8 - 3.0	2.9																
2.6 - 2.8	2.7																
2.4 - 2.6	2.5																
2.2 - 2.4	2.3																
2.0 - 2.2	2.1																
1.8 - 2.0	1.9																
1.6 - 1.8	1.7																
1.4 - 1.6	1.5																
1.2 - 1.4	1.3																
1.0 - 1.2	1.1																
0.8 - 1.0	0.9																
0.6 - 0.8	0.7																
0.4 - 0.6	0.5																
0.2 - 0.4	0.3																
0.0 - 0.2	0.1																
Total		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0001	

Tabel 8 : Damage scatter diagram untuk pembebatan gelombang dari arah utara

Setelah diperoleh nilai rasio kerusakan kumulatif (D) untuk semua arah gelombang sebanyak delapan arah, maka semua nilai tersebut dijumlahkan untuk mendapatkan nilai total damage (D_{total}) baik untuk desain bracket pertama

maupun desain bracket yang kedua. Nilai D_{total} adalah :

$$\Sigma D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6 + D_7 + D_8$$

Total damage pada semua arah gelombang ditunjukkan pada Tabel 9.

No.	Load Case	Damage								Total
		N (D_1)	NE (D_2)	E (D_3)	SE (D_4)	S (D_5)	SW (D_6)	W (D_7)	NW (D_8)	
1	Full Load, crane 0°	1.298E-04	3.881E-05	1.266E-01	1.700E-04	6.879E-05	2.201E-03	2.034E-04	3.445E-02	0.1037
2	Full Ballast, crane 0°	1.743E-04	6.076E-05	1.866E-01	2.333E-04	9.085E-05	4.017E-03	2.660E-04	4.616E-02	0.1774
3	Full Load, crane 45°	1.544E-04	4.643E-05	1.474E-01	1.958E-04	7.928E-05	2.539E-03	2.358E-04	4.007E-02	0.1305
4	Full Ballast, crane 45°	2.304E-04	7.948E-05	2.458E-01	3.070E-04	1.195E-04	5.313E-03	3.501E-04	6.076E-02	0.2038
5	Full Load, crane 90°	1.376E-04	4.190E-05	1.367E-01	1.795E-04	7.281E-05	2.331E-03	2.189E-04	3.736E-02	0.1168
6	Full Ballast, crane 90°	2.110E-04	7.280E-05	2.232E-01	2.769E-04	1.078E-04	4.888E-03	3.162E-04	5.492E-02	0.1836
Total Damage										0.9158

Tabel 9 : Total damage

Umur kelelahan pada sambungan antara *topside module* dengan geladak FSO merupakan pembagian dari desain umur dengan rasio kerusakan kumulatif. Jika desain umur lelah bracket *topside module* FSO 25 tahun, maka umur kelelahan bracket *topside module* FSO adalah sebagai berikut :

$$\text{Fatigue life (years)} = 25 / 0.9158 \\ = 27.3 \text{ tahun}$$

9. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan *fatigue life* pada desain bracket tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa dengan nilai tegangan yang terjadi pada desain bracket lengkung, diperoleh nilai umur lelah bracket *topside module* adalah 27,3 tahun. Nilai ini masih diatas nilai umur lelah yang direncanakan untuk sambungan bracket *topside module* FSO/FPSO yaitu 25 tahun.

10. Daftar Pustaka

- Bai, Yong, (2003): "Marine Structural Design" Elsevier, Oxford
- Krekel, M. H. and Kaminski, M. L. (2002): FPSOs: Design considerations for the structural interface hull and topsides, Offshore Technology Conference, OTC 13996, Houston.
- LR (2008): Rules and Regulations for the Classification of a
- Floating Offshore Installation at Fixed Location (FOI-FL), Part 4, Chapter 6.
- LR (2008): Rules and Regulations of Code for Lifting Appliance in a Marine Environment (CLAME), Chapter 3.
- Sujitanti, S.H. (2010): A Comparative Study Of Two Different Crane Seating Designs, Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Kelautan, Surabaya.

Septia Hardy Sujitanti, merupakan staf pengajar pada Jurusan Teknik Perkapalan (JTP), ITS. Riwayat pendidikan yang ditempuh secara berurutan adalah S1 di JTP-ITS, Tahun 2009-2012 melanjutkan S2 di ITS dengan jurusan yang sama. e-mail : septi@na.its.ac.id



wasis@na.its.ac.id

Prof. Ir. Achmad Zubaydi, MEng, PhD, merupakan staf pengajar pada Jurusan Teknik Perkapalan (JTP), ITS. Riwayat pendidikan yang ditempuh secara berurutan adalah S1 di JTP-ITS, dilanjutkan dengan program S2 di Hiroshima University (Jepang) dan pendidikan S3 di Memorial University of Newfoundland (Canada). e-mail : zubaydi@na.its.ac.id



Aktivitas Riset

Divisi Manajemen Strategis Tahun 2015

Struktur Kapal dan Bangunan Laut

Fully Random Fatigue Load of Ship Structural Member Along Indonesian Waterways Area

Fredhi Agung Prasetyo (fredhiagung@bki.co.id), Mohammad Arif Kurniawan, Siti Komariyah.

Advanced Corrosion Rate of BKI's Vessel

Siti Komariyah (siti.komariyah@bki.co.id), Fredhi Agung Prasetyo, Mohammad Arif Kurniawan.

Define The Characteristic of Ocean Environmental Condition Along Indonesian Waterways for Use in Design and Operational of Ship and Offshore Floating

Mohammad Arif Kurniawan (arif.kurniawan@bki.co.id), Fredhi Agung Prasetyo, Siti Komariyah.

Fatigue Assessment of Floating Offshore Structure Based on FPI Guidelines

Ahmad Zakky (ahmad.zakky@bki.co.id), M. Irfan, Defri Sumarwan.

Fatigue Mooring Line Analysis

Muhammad Irfan (muhammad.irfan@bki.co.id), Mohammad Arif Kurniawan, Ahmad Zakky, Fredhi Agung Prasetyo.

Simplified Ultimate Strength Assessment of Hull Girder Ship Structures Based on BKI Rules for Hull

Sukron Makmun (sukron@bki.co.id), Topan Firmandha, Siswanto.

Analisa Tegangan pada simetric and unsymetric profile terhadap beban merata

Siswanto (siswanto@bki.co.id), Iwan Karunia Siringo-ringo.

Numerical Evaluation on Normal Stress Distribution of Ship Cross Section

Topan Firmandha (topan@bki.co.id), Sukron Makmun., Siswanto.

Numerical Evaluation on Shear Stress Distribution of Ship Cross Section

Siswanto (siswanto@bki.co.id), Topan Firmandha., Sukron Makmun.

Thickness requirement Based on BKI-Rules of Ship Cross Section

Topan Firmandha (topan@bki.co.id), Siswanto, Sukron Makmun.

Computational Tools for Hull Girder Assessment of Ship Cross Section

Sukron Makmun (sukron@bki.co.id), Triyan Indrawan, Topan Firmandha, Siswanto.

Mesin

On the Use of the Lifting Line Theory to Optimize Propeller Performance of Ship

Muhdar Tasrief (muhdar@bki.co.id), Faisal Mahmuddin.

Design Compressed Natural Gas (CNG) Floating Station

Munir Radetya (munir.m@bki.co.id), Muhdar Tasrief, Siswanto.

Sistem Propulsi (Propeller) yang Optimal Terkait Penghematan Bahan Bakar (Fuel Saving)

Muhdar Tasrief (muhdar@bki.co.id).

Pengaruh Perubahan Bentuk Lambung Terhadap Gerak dan Juga Tahanan Kapal

Muhdar Tasrief (muhdar@bki.co.id).

Stabilitas dan Hidrodinamika

Penentuan kriteria stabilitas dan load lines di perairan domestik

Wasito Abdul Mukit (wasito@bki.co.id), Rosihan Syarif, Mohammad Arif Kurniawan, Muhdar Tasrief, Andi Dian Eka.



ANALISA FATIGUE PADA STRUKTUR TERAPUNG LEPAS PANTAI (FLOATING OFFSHORE STRUCTURE) DENGAN METODE SIMPLIFIED FATIGUE ANALYSIS

Ahmad Zakky

Abstract

Floating offshore structure is a structure exposed to cyclic loads due to wave and environment loads. The cyclic loads may occur up to billion times until fatigue failure of structure. Fatigue assessment is mandatory for floating offshore in design stage to guarantee the structures are safe during the operational period since the floating offshore structures are designed without period of drydocking survey as required by prescriptive rules. In this study, various method of fatigue analysis for floating offshore structure will be introduced especially for simplified fatigue method. Furthermore a simple fatigue analysis for FSO will be conducted as sample of fatigue assessment using simplified fatigue analysis method based on Palmgren-miners rule.

Keywords : Analisa Fatigue, Floating Offshore Structure, Fatigue Assessment, Simplified Fatigue Method.

1. Pendahuluan

Kegagalan lelah (Fatigue failure) adalah kegagalan yang terjadi pada suatu struktur konstruksi akibat beban yang berulang-ulang. Pada struktur terapung lepas pantai (Floating offshore structure), beban berulang-ulang terjadi akibat beban yang ditimbulkan oleh gelombang air laut maupun akibat kondisi lingkungan laut lainnya seperti angin, arus, dsb. Kegagalan fatigue pada struktur terapung (Floating offshore structure) dapat terjadi pada sambungan konstruksi yang memiliki konsentrasi tegangan yang tinggi (*baseplate dan weldments*) seperti pada sambungan-sambungan antara pembujur dan penegar. Untuk menjamin suatu struktur terapung lepas pantai seperti FSO, FPSO, FLNG atau FSRU tidak mengalami kegagalan lelah selama masa beroperasinya dimana struktur tersebut dirancang untuk tidak melakukan survey pengeoktan, maka analisa lelah (*fatigue analysis*) untuk struktur tersebut disarankan dalam tahap desain.

Secara umum kegagalan lelah dapat ditentukan dengan dua metode yaitu Metode S-N Curve dan metode Fracture Mechanics (FM). Metode S-N Curve merupakan metode yang paling tepat digunakan dalam tahap desain konstruksi. Analisa lelah pada metode ini dilakukan melalui pendekatan perbandingan antara jumlah siklus beban yang terjadi pada struktur konstruksi (n) dengan kapasitas jum-

lah siklis maksimal beban pada material (N) berdasarkan *fatigue test material (S-N Curve)*. Metode S-N dapat dibagi menjadi tiga metode berdasarkan pendekatan penentuan beban fatigue-nya yaitu, *deterministic fatigue method*, *simplified fatigue method* dan *spectral fatigue method*. Sedangkan metode *fracture mechanics (FM)* digunakan untuk menentukan fatigue berdasarkan perambatan retak (*fatigue crack growth*) dan ukuran retak yang dapat diterima (*flaw size*) pada suatu sambungan struktur. Metode *fracture mechanics* biasanya digunakan untuk menyusun rencana dan strategi pemeliharaan struktur konstruksi (Bai 2003).

Pada penelitian ini metode kegagalan fatigue dengan *S-N Curves Method* dijabarkan lebih rinci berikut dengan tiga metode yang dapat dilakukan untuk menentukan pendekatan beban fatigue terutama metode dengan pendekatan *simplified fatigue*. Lebih lanjut suatu contoh sederhana dalam menghitung dan menganalisa fatigue dengan menggunakan metode *simplified fatigue* pada struktur FSO akan dilampirkan pada paper ini sebagai contoh.

2. Tinjauan Pustaka

Analisa lelah dengan menggunakan metode S-N Curves dihitung berdasarkan *Palmgren-Miner damage cumulative*

yang merupakan hipotesis kerusakan lelah kumulatif berdasarkan konsep *strain energy*. Konsep *strain energy* menyatakan bahwa kerusakan akan terjadi ketika total *strain energy* pada saat n siklus dari variabel amplitudo pembebanan adalah sama dengan total energi dari N siklus dari konstan amplitudo pembebanan (Ayyub dkk, 1998). Dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut :

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_m}{N_m} \quad (1)$$

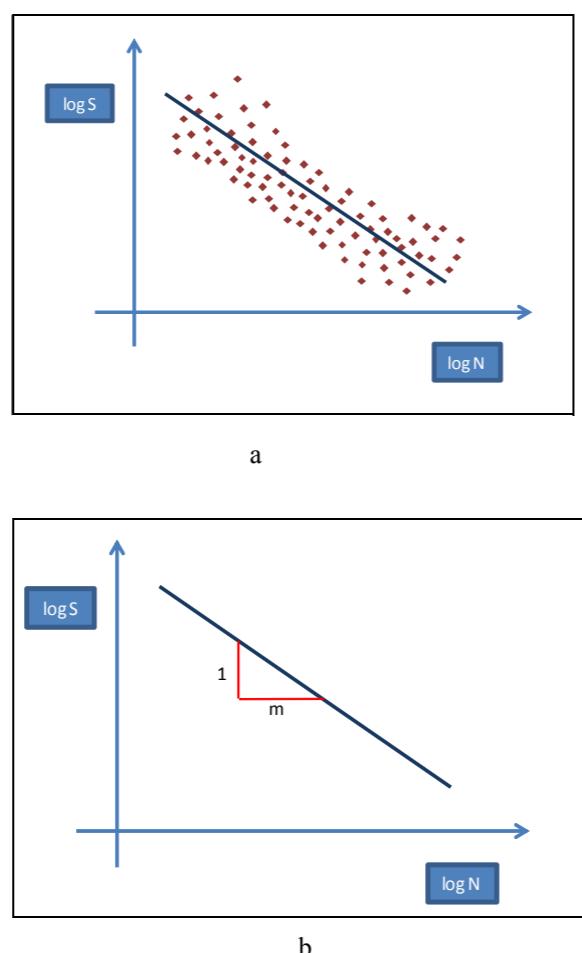
Dimana :

n_i = Jumlah siklis rentang tegangan (S_i) yang terjadi pada struktur akibat beban siklis (*Fatigue demand*)

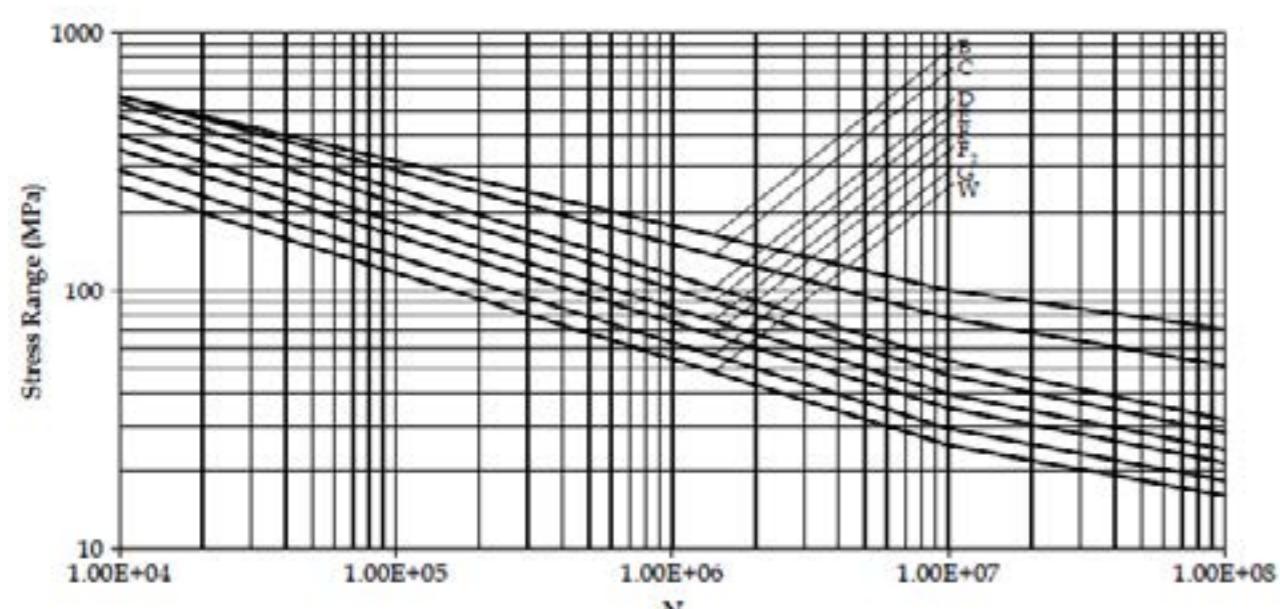
S_i = rentang tegangan (*Stress range*), N/mm²

N_i = Jumlah siklis rentang tegangan (S_i) yang menyebabkan kegagalan pada sambungan (*Fatigue strength*)

Nilai (N_i) ditentukan berdasarkan penyebaran data eksperimen dari material yang diuji dengan beban siklis tertentu (*Stress range*) sebanyak N kali percobaan hingga terjadinya kegagalan lelah (*fatigue failure*), kemudian hasil eksperimen diregresi sehingga membentuk suatu kurva (*S-N Curve*) seperti disajikan pada Gambar 1a.



Gambar 1 : (a) Ilustrasi Regresi S-N Curves (b) Pendekatan kurva linear S-N Curves



Gambar 2 : Contoh S-N Curve (DEn S-N Curves, IACS 2010)

Berdasarkan pendekatan kurva linear seperti yang dibambarkan pada Gambar 1(b), rumus dasar S-N Curves dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\log N = \log A - m \cdot \log S \quad (2)$$

$$\log A = \log N + m \cdot \log S \quad (3)$$

$$S^m N = A \quad (4)$$

$$N = \frac{A}{S^m} \quad (5)$$

Dimana :

S = rentang tegangan (*Stress range*)

N = jumlah siklis rentang tegangan hingga kegagalan lelah

m = gradien / *negative slope*

$\log A$ = intersepsi axis log N pada kurva

Sedangkan untuk menentukan nilai siklis beban lingkungan yang terjadi pada struktur (n_i) dapat dilakukan dengan tiga metode berdasarkan penentuan beban *fatigue*-nya yaitu, *deterministic fatigue method*, *simplified fatigue method* dan *spectral fatigue method*. Pada Table.1 digambarkan perbandingan masing-masing metode analisa kelelahan yang dipakai untuk menganalisa kelelahan struktur kapal dan banguan lepas pantai terapung (Bai, 2003).

Metode Simplified Fatigue Analysis

Secara teoritis metode *simplified* mengasumsikan bahwa histogram rentang tegangan akibat beban gelombang adalah distribusi Weibull dua parameter (Bai. 2003).

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = \int_0^\infty \frac{N_0 f(S)}{N(S)} \quad (6)$$

Dimana :

N_0 = Jumlah siklis pada *long term period* yang diperhitungkan

$f(S)$ = *Probability density function* untuk rentang tegangan, untuk distribusi Weibull dua parameter adalah :

$$f(S) = \frac{\xi}{A} \left(\frac{S}{A} \right)^{\xi-1} \exp \left(-\frac{S}{A} \right)^\xi \quad (7)$$

A dan ξ adalah parameter Weibull dimana A = Parameter skala dan ξ = Parameter bentuk.

Berdasarkan persamaan (5) dimana N merupakan parameter material dari S-N Curve dan *probability density function* untuk distribusi Weibull 2 parameter, maka persamaan (6) dapat disederhanakan menjadi :

$$D = \frac{N_0}{K} \left[\frac{S_0^\xi}{\ln N_0} \right]^{m/\xi} \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right) \quad (8)$$

3. Studi Kasus

Studi kasus dilakukan pada FSO dengan spesifikasi dan data ukuran utama dapat dilihat pada Table.2. Pembebanan lingkungan berupa data gelombang terdiri dari 7 variasi tinggi gelombang dan 8 variasi arah gelombang (40°, 85°, 130°, 175°, 220°, 265°, 310°, 355°), sehingga jumlah variasi beban gelombang adalah 56 variasi. Setiap variasi pembebanan dilengkapi dengan data jumlah kejadian dalam kurun waktu 25 tahun (Tabel 3). Sedangkan variasi beban muatan terdiri dari tiga yaitu *Full Load*, *full ballast* dan *partial Load* dengan probabilitas kejadian dapat diketahui dari Table 4 (Oh dkk, 2003). Sehingga total semua variasi pembebanan adalah 168 beban gelombang.

3.1 Target Sambungan

Target sambungan yang akan dianalisa ditentukan dengan metode seleksi berdasarkan tegangan maksimal (*strength stress*) yang terjadi pada setiap sambungan struktur. Secara umum lokasi sambungan kritis terdapat pada sambungan antara penegar memanjang dengan sekat melintang, termasuk juga *wash bulkhead* dan *web frame* yang berada dalam tank (IACS 2010). Lokasi sambungan yang akan dianalisa pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.

3.2 Rentang Tegangan

Rentang tegangan (S_i) untuk masing-masing variasi pembebanan diperoleh melalui analisa elemen hingga menggunakan software Poseidon ND 11.0. Pemodelan elemen hingga (*meshing* dan kondisi batas) dilakukan berdasarkan CSR oil tanker (IACS 2010). Rentang tegangan mempu-

CRITERIA	METHOD		
	S-N APPROACH		FRACTURE MECHANICS
	DETERMINISTIC	SIMPLIFIED	SPECTRAL
Purpose	<p>S-N Approach are recommended for fatigue assessment and design purpose</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evaluating crack growth - Developing and refining inspection programs. 		
Palmgren-Miner cumulative damage law	$n_i = \frac{T_R \cdot P_i}{T_i}$ $T_R = \text{Reference time}$ $P_i = \text{relative frequency}$ $T_i = \text{wave period}$ (n_i)	$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1$ $n_i = N_0 f(S) dS$ $N_0 = \text{Total number of cycles in the long-term period}$ $f(S) = \text{Probability density function for the stress range (Represented by 2 parameters Weibull distribution).}$ $v_{0i} = \text{zero up crossing frequency}$	$n(S)dS = n(S)dS = v_{0i} T_{life} p(S)dS$ $n(S)dS = \text{the number of stress range between } S \text{ and } S+dS$ $T_{life} = \text{stationary response process of duration}$ $v_{0i} = \text{zero up crossing frequency}$ <p>The fracture mechanics model for fatigue strength is based on crack growth data.</p> <p>Three regions in crack growth process:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Regions I, low crack growth rate, threshold - Regions II, Paris law - Regions III, Fracture, high crack growth rate.
Final Equation	$D = \sum_{i=1}^m \frac{T_R \cdot P_i}{T_i \cdot N_i}$ $D = \frac{\infty}{0} N_0 f(S) dS$ $D = \frac{N_0}{K} \int_0^\infty S^m f(S) dS$	$D = v_{0i} T_{life} \int_0^\infty \frac{p(S)}{N(S)} dS$ $D = v_{0i} T_{life} \int_0^\infty \frac{p(S)}{N_0} dS$	<p>Paris-Law Equation:</p> $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ $\Delta K = Y(a)S\sqrt{\pi a}$ <p>Dimana, $f(S)$ adalah Weibull 2 parameter:</p> $f(S) = \frac{\xi}{A} \left(\frac{S}{A} \right)^{\xi-1} \exp \left(-\frac{S}{A} \right)^\xi$ $D = \frac{N_0}{K} \left[\frac{S_0^\xi}{\ln N_0} \right]^{m/\xi} \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right)$ <p>Dimana $p(S)$ adalah Rayleigh PDF:</p> $p(S) = \frac{S}{4\sigma_i^2} \exp \left(-\frac{S^2}{8\sigma_i^2} \right)$ $D = \frac{v_{0i} T_{life}}{K} \int_0^\infty S^{m+1} \exp \left(-\frac{S^2}{8\sigma_i^2} \right) dS$ <p>C, m = Paris parameters</p>

Tabel 1 : Perbandingan Metode Analisa Kelelahan Pada Struktur Bangunan Apung Lepas Pantai**Tabel 2 :** Data ukuran utama FSO

Item	L (m)	B (m)	T (m)	H (m)	Sistem Tambat
Ukuran	248,32	39,6	23,1	17,32	Spread dengan 5 lajur

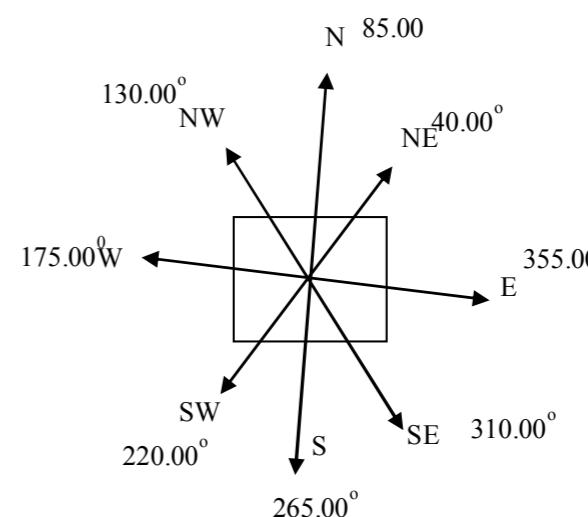
Tabel 3 : Data gelombang

Wave Height (feet)	NE (40°)	N (85°)	NW (130°)	W (175°)	SW (220°)	S (265°)	SE (310°)	E (355°)	TOTAL	
Original	Mid	10.522.750	20.022.500	16.252.750	10.011.750	8.321.000	8.451.750	29.253.750	27.693.750	130.530.000
0,0 ~ 1,9	1,0	2.322.800	4.646.600	3.770.900	2.322.800	1.931.100	1.960.500	6.788.800	6.426.500	30.170.000
2,0 ~ 3,9	3,0	513.500	1.027.000	833.600	513.500	426.800	433.500	1.500.400	1.420.500	6.668.800
4,0 ~ 5,9	5,0	110.500	227.000	184.220	113.500	94.340	95.820	331.700	313.920	1.471.000
6,0 ~ 7,9	7,0	35.080	50.160	40.730	25.080	20.850	21.170	73.300	69.390	335.760
8,0 ~ 9,9	9,0	6.753	13.506	10.954	6.970	5.621	5.716	19.729	18.675	87.924
10,0 ~ 13,9	11,3	367	734	596	150	289	294	1.071	1.015	4.516
14,0 ~ 25,9	20,0	10.522.750	20.022.500	16.252.750	10.011.750	8.321.000	8.451.750	29.253.750	27.693.750	130.530.000

Tabel 4 : Probabilitas pembebatan muatan

No.	Loading Pattern	Probability (%)
1	Full Load	25
2	Full Ballast	25
3	Intermediate Load (50%)	50

(Sumber: Oh et. al 2003)

**Gambar 3 :** Variasi arah gelombang (Sumber: Glenn Report, 1988)

nyai nilai yang bervariasi sesuai dengan variasi pembebanannya. Tabel 4 menampilkan rentang tegangan pada sambungan 1 (S1) yang memperlihatkan variasi tegangan terhadap pembebanannya. Hal ini akan diperjelas lagi dari penyebaran rentang tegangan terhadap probabilitas setiap variasi pembebanan yang diperlihatkan pada gambar 3.

Rentang tegangan yang diperoleh dari analisa elemen hingga adalah rentang tegangan nominal. Untuk dapat dimasukan ke persamaan (8), maka rentang tegangan nominal dikalikan dengan faktor konsentrasi tegangan. Dari tabel 6 dapat diketahui bahwa pengaruh konsetrasi tegangan sangat signifikan. Hal ini mengindikasikan bentuk dan jenis sambungan sangat berpengaruh terhadap nilai D .

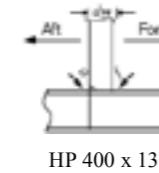
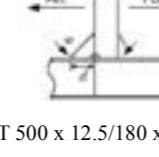
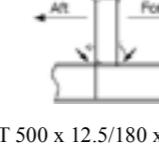
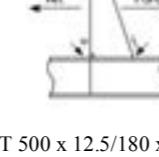
3.3 Kerusakan Lelah Kumulatif (D)

Berdasarkan persamaan (8), D merupakan fungsi dari rentang tegangan, parameter Weibull, jumlah siklus kejadian setiap pembebanan yang telah ditentukan pada data

gelombang dan parameter material. Seperti yang telah diketahui bahwa D diselesaikan dengan menggunakan distribusi *Weibull* dengan parameter ξ dan *incomplete gamma function*. Parameter material m dan k dapat ditentukan dari kurva S-N melalui persamaan (5). Harga m dan k memiliki nilai yang berbeda-beda sesuai dengan jenis dan bentuk sambungan (Lihat tabel 5). Hasil akhir berupa nilai D beserta estimasi umur lelah sambungan terhadap masa operasional 25 tahun dapat diketahui pada Tabel 7.

Dari tabel 7 dapat diketahui bahwa sambungan 1 (S1) mengalami kegagalan dalam kurun waktu kurang dari 25 tahun karena nilai $D > 1$. Seperti yang telah kita ketahui sebelumnya faktor konsentrasi tegangan sangat signifikan berpengaruh dalam menentukan harga D . Semakin kecil harga *SCF* maka harga D semakin kecil sehingga umur sambungan akan semakin lama. Berdasarkan hal tersebut jika sambungan 1 (S1) dimodifikasi dengan sambungan yang memiliki nilai *SCF* maka hasilnya dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 5 : Target sambungan struktur FSO untuk analisa lelah beserta jenisnya

No.	Tipe Sambungan	Typical Sambungan	Karakter sambungan terhadap S-N Curves			
			Class	A	m	S _q
S1	Antara pembujur sisi & Sekat melintang antara 0.3 - 1.1 max draft		F2	4,3E+11	3	35
S3	Antara pembujur Bottom & Sekat melintang		F2	4,3E+11	3	35
S4	Antara pembujur Bottom & web transverse		F2	4,3E+11	3	35
S5	Antara pembujur deck & Sekat Melintang		F2	4,3E+11	3	35

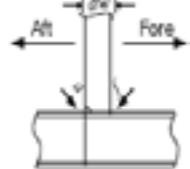
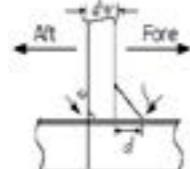
Tabel 6 : Rentang tegangan pada sambungan 1

Indeks Kondisi Pembebanan	H (m)	Ti (s)	Jumlah Siklus	Probabilitas				D
				S _e (N/mm ²)	Arah	H	Muatan	
LC1N1	0,304801	2	20022500	1,880	20	38	0,1535	0,7705
LC1N3	0,914403	3,1	4646600	1,880	39	73	0,1535	0,1788
LC1N5	1,524005	3,6	1027000	1,880	50	94	0,1535	0,0395
LC1N7	2,133607	4	227000	1,880	59	111	0,1535	0,0087
LC1N9	2,743209	4,3	50160	1,880	62	117	0,1535	0,0019
LC1N11	3,352811	4,75	13506	1,880	62	117	0,1535	0,0005
LC1N20	6,09602	5,95	734	1,880	63	118	0,1535	0,0000

Tabel 7 : Kegagalan Lelah Kumulatif (D)

No.	Jenis Sambungan	ΣD	Estimasi umur 25 tahun	
			25/ ΣD	(tahun)
1	Sambungan 1	1.5272	16.37	
2	Sambungan 2	0.3843	65.06	
3	Sambungan 3	0.4901	51.01	
4	Sambungan 4	0.5394	46.34	

Tabel 8 : Modifikasi sambungan (S1)

Sambungan	Jenis dan bentuk Sambungan	Analisa Fatigue	Jenis dan bentuk Sambungan	Analisa Fatigue
	Sambungan Lama		Sambungan Baru	
S1	 $T\ 500*12.5*180*25.0$	$K = 1.880$ $\Sigma D = 1.527$ $FL = 16.370$	 $T\ 500*12.5*180*25.0$	$K = 1.461$ $\Sigma D = 0.872$ $FL = 28.668$

Pada sambungan S1 dengan bentuk sambungan tanpa braket di lokasi (f) faktor konsetrasi tegangan (SCF) total adalah $K = 1.880$ dan $D = 1.527$ sehingga umur sambungan kurang dari 25 tahun yaitu 16.37 tahun. Jika sambungan S1 pada bagian (f) dimodifikasi dengan menambahkan braket konstrasi tegangan (SCF) turun hingga $K = 1.461$. Jika K baru dikalikan dengan rentang tegangan nominal maka harga D mengalami penurunan drastic hingga menjadi $D = 0.872$ atau umur konstruksi menjadi lebih dari 25 tahun yaitu, 28.668 tahun. Sehingga pada penelitian ini sambungan 1 direkomendasikan untuk dimodifikasi dengan menambahkan braket pada lokasi (f).

5. Kesimpulan dan Saran

Sesuai dengan hasil analisa fatigue dan prediksi umur konstruksi FSO dapat disimpulkan bahwa :

1. Analisa kelelahan pada struktur FSO dengan metode *simplified fatigue analysis* telah dilakukan.
2. Konstruksi sambungan S1 memiliki harga $D > 1$ sehingga sambungan tersebut mengalami kerusakan lelah sebelum berumur 25 tahun. Untuk meningkatkan kekuatan lelah maka sambungan S1 dapat dimodifikasi dengan menambahkan braket sehingga $D < 1$ dan umur konstruksi menjadi 28.668 tahun.



Ahmad Zakky, bergabung dengan PT BKI (Persero) sejak tahun 2008 setelah lulus dari S1 Jurusan Perkapalan, ITS. Pada awal diterima menduduki posisi staf di Satuan Penelitian dan Pengembangan. Tahun 2009-2012 mendapatkan kesempatan melanjutkan S2 di ITS dengan jurusan yang sama. Pada tahun 2012 sampai sekarang menjadi staf Pengkaji IV pada Divisi Manajemen Strategis. Konsentrasi bidang penelitian yang digeluti saat ini adalah Ship and Offshore Structure. e-mail : ahmad.zakky@bki.co.id

STUDI KASUS PENILAIAN RISIKO MOORING LINE PADA SINGLE POINT MOORING AKIBAT BEBAN KELELAHAN BERDASARKAN STANDAR BIRO KLASIFIKASI INDONESIA

Muhammad Irfan, Eko B. Djatmiko, Daniel M. Rosyid

Abstract

Most of Single Point Mooring which is operating in Indonesia has exceeded its operating. Fatigue is one of the important aspect in floating offshore re-assessment. This paper present a risk assessment of fatigue mooring line of Catenary Anchor Leg Mooring (CALM) buoy system and Floating Storage and Offloading (FSO). This analysis is held using risk matrix with semi quantitative approach. Frequency assessment was performed using reliability analysis, while in determining the consequences of failure, conducted a qualitative approach with two perspectives i.e surveyors BKI and OGP report 2010 related to the failure of mooring worldwide. The purpose of this study was to obtain the level of risk in determining the residual fatigue life of mooring line on the SPM. This study found that the risk level of mooring line SPM # 1043 due to the fatigue load that has been operating about 30 years get in on the level of a safe risk, or enter into a acceptable zone. At the end of this paper are discussions about the initial proposal acceptance criteria of mooring line failure due to fatigue load.

Key words : Single Point Mooring, risk, fatigue, reliability, mooring line, BKI.

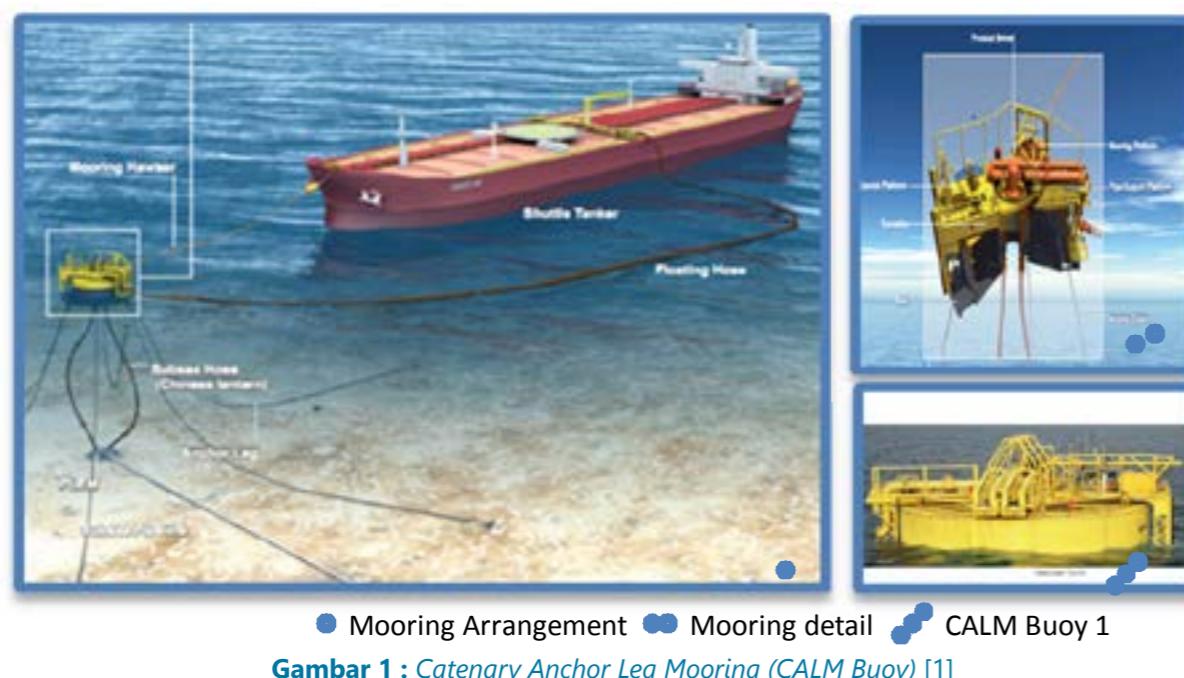
1. Pendahuluan

Single Point Mooring merupakan salah satu bangunan apung yang banyak beroperasi di Indonesia. Bangunan ini merupakan teknologi sistem tambat dan transfer cargo yang sudah sejak lama digunakan di dunia migas. Umumnya SPM dibangun di bawah pengawasan dan standar klas seperti ABS, LR, DNV, dll. Namun kebanyakan owner/operator SPM yang beroperasi di Indonesia selama ini tidak melakukan perawatan klas (seperti, tidak melakukan *periodic survey*, *special survey*, dll) dan kebanyakan SPM tersebut sudah beroperasi lebih dari 20 tahun. Berdasarkan sumber dari BP Migas pada tahun 2010, terdapat sekitar 215 buah SPM yang beroperasi di perairan Indonesia. Ratusan SPM tersebut tanpa pengawasan lansung dari pihak badan klasifikasi nasional.

Kegagalan mooring line merupakan perhatian utama dalam operasi sistem struktur bangunan apung. Kegagalan mooring line dapat terjadi selama kondisi pembebahan dinamis beban ekstrim atau karena kerusakan kelelahan disebabkan oleh spektrum beban dinamis berulang selama operasi jangka panjang. Hal ini membuat analisis kelelahan menjadi penting untuk dilakukan agar operasi yang aman bagi *system* dapat dicapai. Banyaknya ketidakpas-

tian dalam analisis kelelahan, seperti ketidakpastian dalam perhitungan *tension mooring line*, perhitungan kerusakan kelelahan (*fatigue damage*) dan sebagainya, menjadikan analisis keandalan penting untuk dilakukan. Penilaian resiko dilakukan untuk melihat level resiko yang diterima sistem struktur akibat beban kelelahan pada mooring line. Dengan adanya penilaian resiko, dapat dijadikan dasar dalam memberikan *engineering judgement* terhadap permasalahan yang timbul dalam analisis yang dilakukan secara teoritis dibandingkan dengan kondisi dilapangan, seperti dalam kasus mengenai kekuatan *mooring line*.

Makalah ini menyajikan hasil penilaian resiko dari penelitian studi kasus penilaian ulang sistem mooring line pada SPM yang telah beroperasi selama lebih dari 30 tahun di Indonesia. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan level resiko dalam menentukan umur sisa kelelahan mooring line pada SPM. Penelitian ini dilakukan meliputi analisis kekuatan, analisis kelelahan, analisis keandalan dan resiko berdasarkan aturan BKI. Dalam penelitian ini SPM yang dievaluasi yaitu SPM # 1043 berjenis CALM buoy. SPM #1043 menambat sebuah FSO secara permanen yang berfungsi sebagai offloading dan storage di ladang minyak Cinta perairan tenggara laut jawa (*South East Java Sea*) pada ke dalam laut 35.54 meter. *Mooring*



Gambar 1 : Catenary Anchor Leg Mooring (CALM Buoy) [1]

system ini menambat FSO 149 kDWT secara permanent. SPM ini sudah dioperasikan sejak tahun 1972 dan terakhir dilakukan pengedokan pada tahun 2001. Berdasarkan laporan survei yang dilakukan BKI tahun 2012 [2], *mooring line* dalam kondisi *heavy marine growth*. Selama ini, tidak pernah terjadi kegagalan sistem akibat kegagalan *mooring line* atau putus.

2. Tinjauan Pustaka

Secara umum, penilaian resiko terdiri dari empat tahapan yaitu [3] :

- Identifikasi bahaya (*Hazard Identification*)
- Penilaian peluang gagal (*Frequency Assessment*)
- Penilaian konsekuensi (*Consequence Assessment*)
- Evaluasi Resiko (*Risk Evaluation*)

Bahaya adalah sumber peristiwa yang dapat menimbulkan konsekuensi yang tidak diinginkan, sehingga analisis untuk memahami potensi resiko harus dimulai dengan memahami bahaya (*Hazards*). Meskipun identifikasi bahaya jarang memberikan informasi secara langsung yang dibutuhkan untuk mengambil keputusan, namun ini adalah langkah penting yang harus dilakukan. Kadang-kadang identifikasi bahaya dilakukan secara eksplisit menggunakan teknik terstruktur. Diwaktu yang lain (umumnya ketika bahaya tujuan telah diketahui dengan baik), identifikasi bahaya adalah lebih dari sebuah langkah implisit yang tidak secara sistematis. Secara keseluruhan, fokus identifikasi ba-

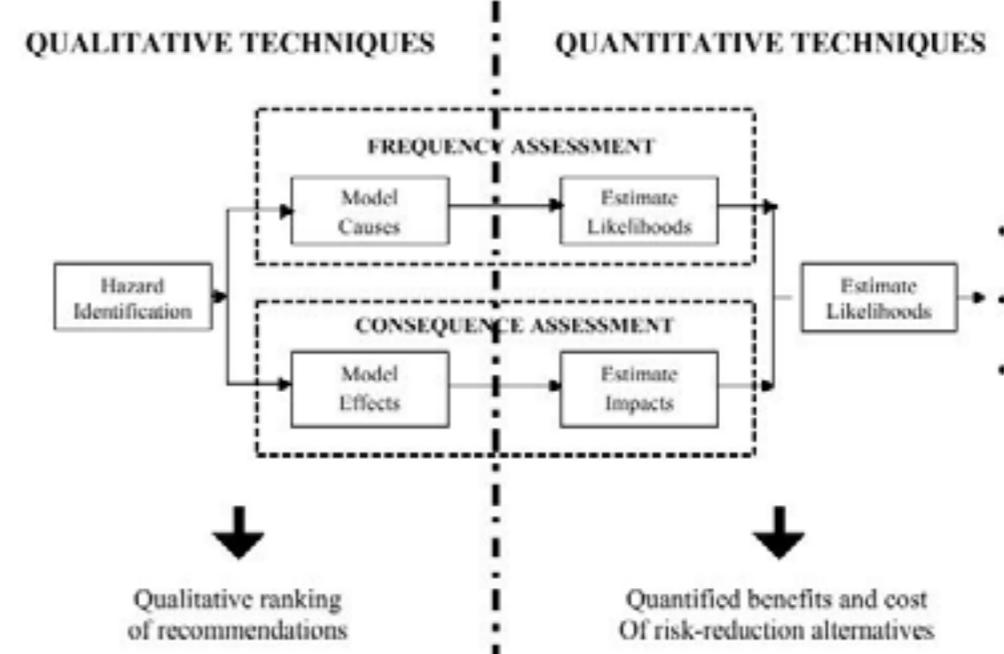
haya analisis resiko adalah pada bahaya tujuan utama (*key hazards of interest*) dan jenis kecelakaan yang dapat ditimbulkan oleh bahaya tersebut. Ada beberapa teknik dalam identifikasi bahaya yang dipaparkan pada aturan BKI Part.4 Vol. 1, dan pada penelitian ini dilakukan dengan metoda HAZID.

Penilaian peluang gagal (frekuensi) dilakukan setelah mengetahui potensi bahaya yang ada pada sistem. Ada beberapa teknik yang dapat dilakukan untuk menilai frekuensi seperti *analysis of historical data*, *event tree analysis*, *fault tree analysis*, *common case failure analysis*, *reliability analysis*. Teknik yang dipilih dapat disesuaikan dengan potensi bahaya yang telah diidentifikasi. Pada studi ini, peluang gagal (frekuensi) dinilai menggunakan teknik *reliability analysis*.

Penilaian konsekuensi menjadi bagian inti dari proses penilaian resiko. Penilaian konsekuensi biasanya dilakukan dengan melibatkan pemodelan analitis untuk memprediksi efek dari pristiwa tertentu yang menjadi perhatian. Pemodelan bisa bersifat kuantitatif maupun kualitatif. Dalam skenario kualitatif misalnya, maka dibutuhkan parameter kriteria penerimaan yang harus ditetapkan untuk mengukur dampak konsekuensi yang terjadi. Dampak-dampak yang biasanya dipertimbangkan seperti dampak keselamatan, dampak kesehatan, lingkungan atau ekonomi pada target yang dituju.

Umumnya evaluasi resiko dilakukan dengan menggunakan matriks resiko. Pada penelitian ini, matriks yang digunakan mengacu pada aturan BKI Part. 4 Vol. 1 dalam matriks 4 x 4. Proses penilaian resiko berupa penilaian peluang gagal (frequency) dan penilaian konsekuensi pada dasarnya dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu

secara kualitatif maupun kuantitatif (lihat Gambar 2). Namun bisa juga dilakukan dengan mengombinasikannya yaitu semi kuantitatif. Seperti yang dilakukan dalam studi ini, dimana penilaian peluang gagal dilakukan dengan pendekatan kuantitatif sedangkan penilaian konsekuensi dengan pendekatan kualitatif.



Gambar 2 : Proses Penilaian Resiko (BKI, Part. 4, Vol. 1)

3. Metodologi

Dalam studi ini, metodologi analisis resiko yang digunakan yaitu pendekatan analisis resiko semi kuantitatif. Dalam penelitian ini peluang kegagalan ditentukan melalui pendekatan kuantitatif dengan menghitung keandalan mooring line akibat beban kelelahan. Keandalan mooring line dihitung menggunakan simulasi Montecarlo yang telah dipaparkan pada makalah sebelumnya [4][5]. Sedangkan dalam menentukan konsekuensi kegagalan, dilakukan pendekatan secara kualitatif dengan dua sudut pandang, pertama yaitu surveyor BKI dan kedua yaitu berdasarkan laporan oil and gas produces OGP 2010 terkait kegagalan mooring sedunia. Berikut adalah diagram alir studi penilaian ulang mooring line SPM secara keseluruhan.

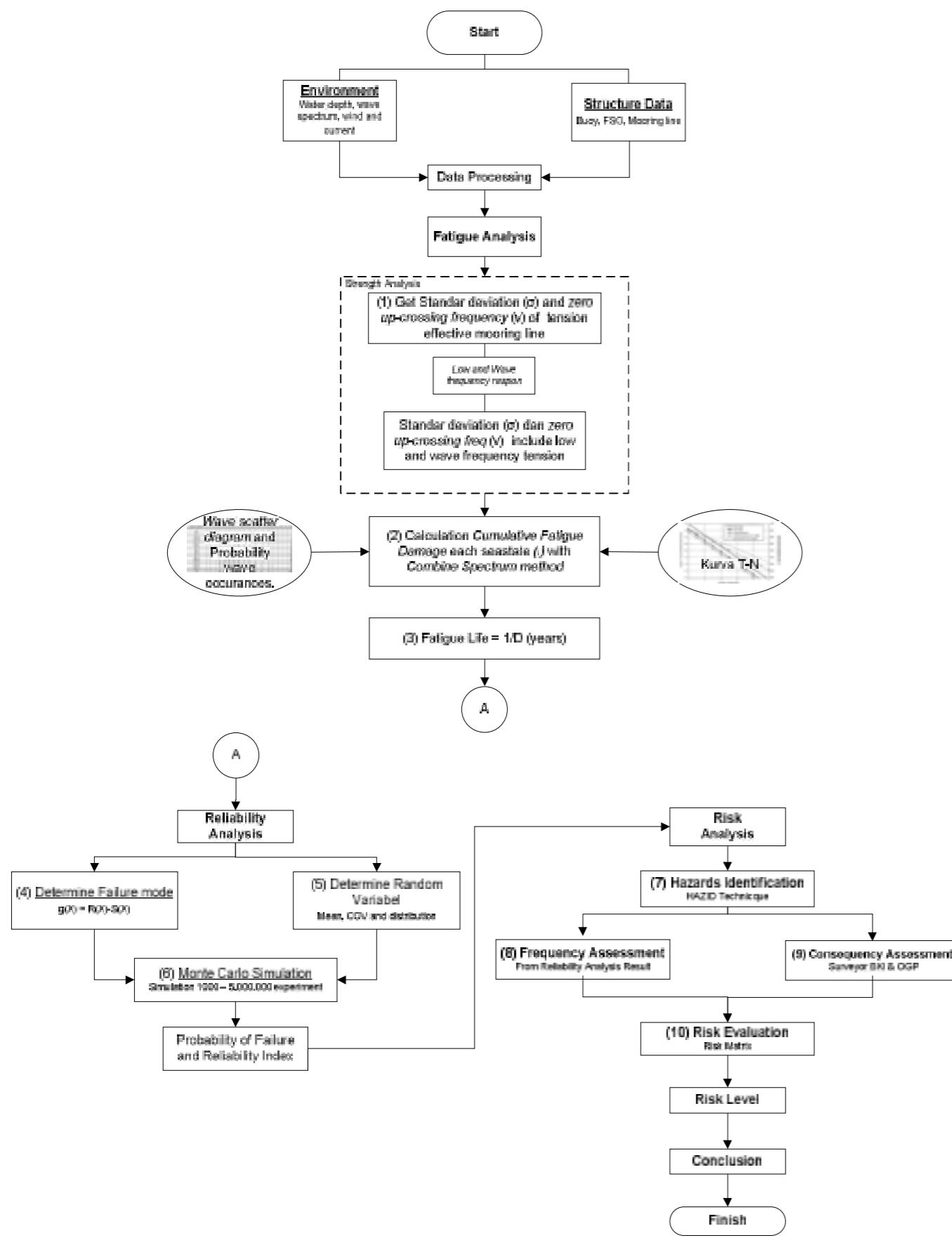
Diagram alir pada gambar 3 di bawah memaparkan secara keseluruhan alur penelitian yang telah dilakukan, meliputi analisis kekuatan mooring line, analisis kelelahan, dilanjutkan dengan analisis keandalan dan resiko. Hasil studi ini dipaparkan dalam 3 publikasi ilmiah, pertama menge-

nai analisis kekuatan mooring line dengan tujuan untuk mendapatkan *loadcase* maksimum [4]. Kedua mengenai analisis kelelahan dan keandalan [5] dan yang terakhir yaitu makalah ini memaparkan mengenai analisis resikonya.

4. Diskusi Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan diagram alir (pada Gambar 3) diatas, dapat dilihat bahwa pekerjaan pertama yang dilakukan adalah analisis kekuatan mooring line untuk menentukan *loadcase* yang menghasilkan line tension maksimum. *Loadcase* tersebut kemudian dipilih untuk dijadikan kasus pembahasan pada analisis kelelahan. Dalam menghitung tension *mooring line*, dilakukan dengan pendekatan *time domain* menggunakan software OrcaFlex 9.2. Untuk lebih detail silahkan merujuk pada makalah Irfan, et.al (2014) [4].

Tahap selanjutnya yaitu analisis kelelahan dengan menghitung *fatigue damage* menggunakan metoda *combine spectrum API RP 2SK (2005)* dalam menggabungkan *low* dan *wave frequency respon*. Perhitungan dilakukan dengan



menggunakan beban kombinasi kelelahan meliputi gelombang, angin, dan arus *per seastate*. Kurva T-N API RP 2 SK digunakan dalam perhitungan ini dengan jenis material studlink. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan *spread sheet*.

Hasil diperoleh berupa umur kelelahan mooring line sebesar 9 tahun dengan faktor keamanan 10. Kemudian dilanjutkan dengan analisis keandalan menggunakan simulasi Montecarlo. Menentukan moda kegagalan dan varibel random beserta distribusinya dilakukan sebelum simulasi dilaksanakan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan program Scilab dimulai dari 1000 s/d 5.000.000 eksperimen. Hasil yang diperoleh berupa peluang kegagalan 10^{-5} per tahun dengan indeks keandalan $\beta \geq 3.5$ [5].

4.1 Identifikasi Bahaya (Hazard Identification)

Langkah selanjutnya yaitu analisis resiko yang dimulai dengan mengidentifikasi bahaya. Identifikasi bahaya pada

studi ini dilakukan secara implisit, karena bahaya tujuan yang akan menjadi perhatian sudah dikenal sejak awal. Pada studi ini bahaya yang ditinjau ialah bahaya akibat kelelahan. Bahaya akibat kelelahan ini disebabkan beban siklis beban gelombang, angin dan arus yang mengenai sistem *mooring line*. Akibat bahaya ini bisa menimbulkan kegagalan sistem dimulai dari putusnya satu rantai hingga multi rantai yang menyebabkan kerusakan fatal pada sistem struktur.

4.2 Penilaian Peluang Gagal (Frequency Assessment)

Penilaian peluang gagal (frekuensi) dilakukan dengan menggunakan analisis keandalan (*reliability analysis*). Analisis keandalan dilakukan dengan simulasi montecarlo sebagaimana yang sudah dijelaskan sebelumnya. Penjelasan penyelesaian lebih detail bisa merujuk pada paper Irfan et.al (2014) [5]. Dari hasil simulasi didapat peluang kegagalan dan keandalan mooring line SPM #1043 (lihat Table 1).

Tabel 1 : Hasil Analisis Kelelahan dan Keandalan

Total Damage	Fatigue life (year)	Target Fatigue life (year)		Annual Probability of Failure (PoF)	Reliability	Reliability Index (β)
		SF = 10	SF = 3			
0.010796	93	9	31	10^{-5}	0.9999	3.5

Mengacu pada kriteria frekuensi US Coast Guard (USCG) di aturan BKI Part.4 Vol.A, maka kriteria frekuensi pada pene-

litian ini ditetapkan seperti pada Tabel 2 di bawah.

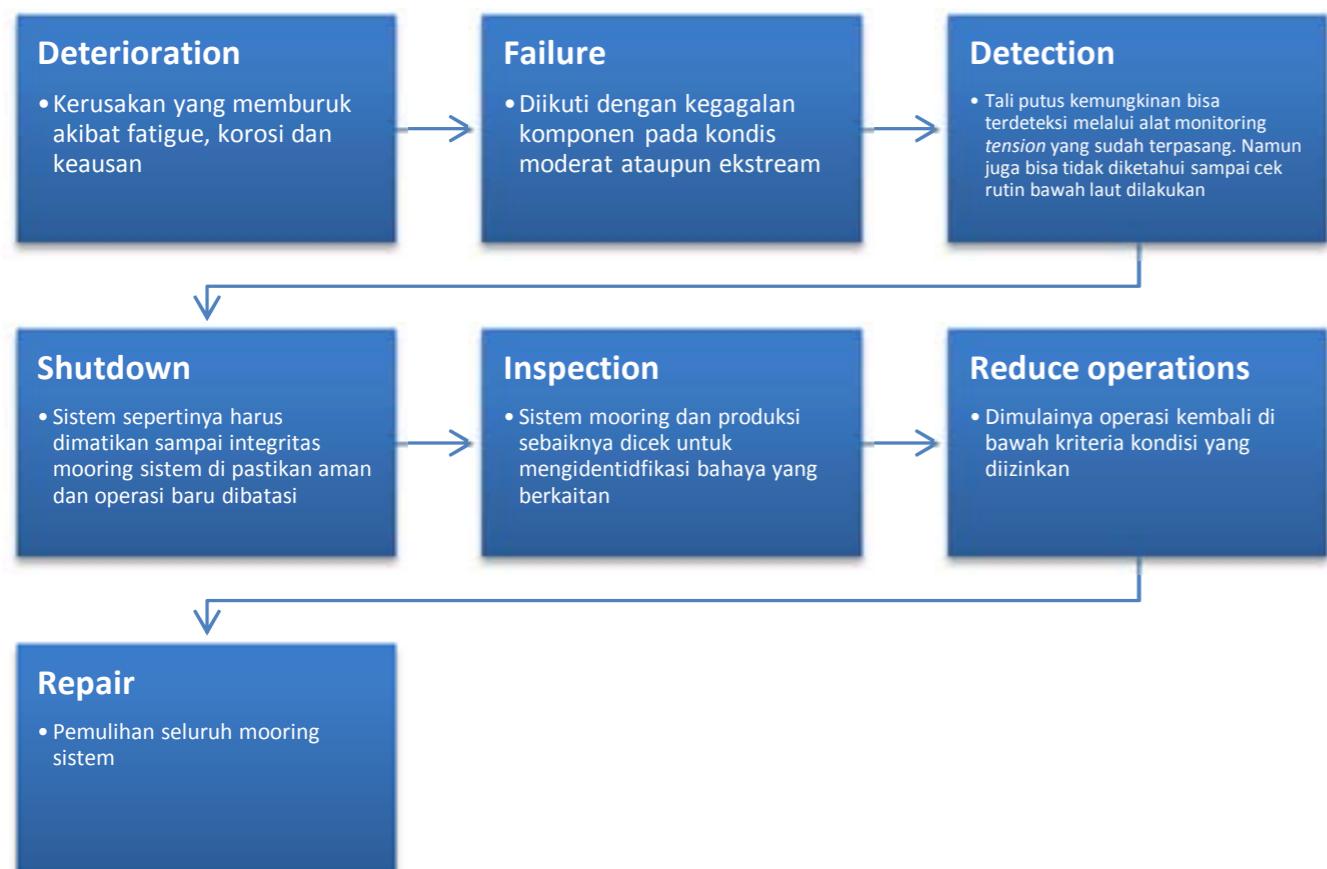
Tabel 2 : Kriteria Frekuensi

Likelihood	Frekuensi	Diskripsi
Probable	$> 10^{-2}$	0.01 kejadian atau lebih atau > 0.01 kejadian per <i>mooring line</i> per tahun
Improbable	$10^{-3} - 10^{-2}$	0.001 – 0.01 kejadian atau 1 kejadian per 100 – 1000 <i>mooring line</i> per tahun
Rare	$10^{-4} - 10^{-3}$	0.0001 – 0.001 kejadian atau 1 kejadian per 1000 – 10000 <i>mooring line</i> per tahun
Remote	$10^{-5} - 10^{-4}$	0.00001 – 0.0001 kejadian atau 1 kejadian per 10000 – 100000 <i>mooring line</i> per tahun
Incredible	$< 10^{-5}$	Kurang dari 0.00001 kejadian atau < 1 kejadian per 100000 <i>mooring line</i> per tahun

Dari kriteria frekuensi diatas dapat ditentukan bahwa peluang gagal mooring line SPM #1043 masuk pada kriteria Remote .

4.3 Penilaian Konsekuensi (Consequency Assessment)

Pada studi ini, penilaian konsekuensi dilakukan secara kualitatif dengan mengacu pada sekenario kegagalan satu *mooring line* (lihat Gambar 4). Sedangkan untuk kriteria konsekuensi, mengikuti kriteria yang digunakan Stiff et al, (2003) [6] dalam menganalisis resiko pada *mooring line* FPSO. Kriteria konsekuensi yang dipertimbangkan meliputi *Health and Safety, Environmental, Financial/Business* (lihat pada Gambar 5). Berikut ini adalah analisis konsekuensi apabila terjadinya kegagalan akibat beban kelelahan pada



Gambar 4 : Skenario Kegagalan Satu Mooring line

Berdasarkan sekenario kegagalan putusnya satu *mooring line*, terjadinya kejadian kegagalan dapat terditeksi atau-pun tidak terdeteksi.

Apabila terjadi kegagalan pada dua atau lebih *mooring line*, maka hal ini akan meningkatkan pergerakan kapal. Akibanya, SPM akan tertarik oleh gaya seret kapal dan bisa

mooring line SPM #1043.

a) Berdasarkan pengamatan surveyor BKI

SPM #1043 yang menambat FSO CNOOC 114 bersifat *unman*. Artinya tidak ada orang yang tinggal selama 24 jam di atas SPM. FSO CNOOC 114 yang tertambat secara permanent juga bersifat *unman*. Menurut laporan surveyor, biasanya pekerja melakukan pengecekan sistem produksi ke SPM sebanyak dua hingga tiga kali sepekan. Berarti potensi keamaan atas kehilangan jiwa sangat kecil. Jika kegagalan *mooring line* terjadi saat pekerja melakukan inspeksi, kemungkinan ekstrim konsekuensi yang diterima adalah luka ringan hingga berat yang tidak mengancam hilangnya jiwa seseorang.

segera dihentikan sementara (*shutdown*) untuk dilakukan pengecekan dan perbaikan hingga sistem bisa dipastikan aman.

Sehingga jika ditinjau dari dampak lingkungan, ketika terjadi kegagalan satu *mooring line* putus, maka termasuk pada tingkat minor-sedang. Jikapun terjadi tumpahan minyak, tidak akan berdampak secara signifikan karena tumpahan tersebut akan segera distop melalui sistem kat-up yang ada. Analisa ini dipakai apabila kegagalan tidak sampai menibulkan tenggelamnya kapal atau FSO yang ditambat, karena kemungkinan terjadi konsekuensi tenggelam kapal akibat gagal *mooring line* sangat kecil.

Dari aspek finansial dan bisnis, kegagalan satu *mooring line* dapat menyebabkan target produksi berkurang akibat konsekuensi penghentian produksi / *shutdown* ketika kegagalan terdeteksi. Setelah operasi dihentikan akan ditindaklanjuti dengan inspeksi untuk mengecek sistem mooring dan produksi agar dapat mengidentifikasi potensi baha-ya yang ada. Minimal pengecekan dan perbaikan awal membutuhkan waktu sekitar 1-7 hari kerja. Setelah dipastikan aman, maka sistem akan dihidupkan lagi namun beroperasi di bawah kriteria kondisi yang diizinkan sampai sistem benar-benar dipastikan aman untuk dijalankan secara normal. Selama beroperasi di bawah kriteria terbatas, perbaikan *mooring line* dilakukan, namun jika perbaikan membutuhkan keamanan yang tinggi, maka sewaktu-waktu sistem bisa dimatikan kembali. Dari analisis kualitatif subjektif ini, dapat disimpulkan bahwa konsekuensi kegagalan akibat beban kelelahan pada *mooring line* SPM #1043 masuk pada kataqori minor - moderat.

b) Berdasarkan laporan Oil and Gas Produce (OGP) (2010) terkait kegagalan mooring line sedunia

Asosiasi internasional *Oil and Gas Producer* (OGP), telah melakukan penyusunan serta penyaringan berkaitan dengan kegagalan struktur bangun laut. Asosiasi profesi yang bergerak di bidang minyak dan gas ini memiliki banyak

akses pengetahuan teknis dan pengalaman dengan anggota yang beroperasi di seluruh dunia dalam berbagai medan yang berbeda. Salah satu laporan yang dikeluaran OGPA pada tahun (2010) yaitu mengenai direktori data penilaian resiko struktur pada bangunan lepas pantai. Dalam laporan tersebut terdapat data frekuensi kegagalan mooring line sedunia. Data yang digunakan tersebut ialah data yang dikumpulkan sejak 1980-2002 dari *Worldwide Offshore Accident Data Bank* (WOAD).

Menurut OGP (2010) frekuensi kegagalan *mooring line* untuk semi submersible sebesar 5.78×10^{-3} per tahun. Kedua ini menyebabkan kerusakan yang meliputi kategori, *insignificant, minor, significant, severe, dan total loss*. Definisi masing-masing kategori tersebut berdasarkan OGP adalah sebagai berikut :

- Total Loss** : Total hilangnya unit termasuk kerugian konstruktif dari sudut pandang asuransi, namun unit dapat diperbaiki dan dioperasikan kembali.

Severe Damage : Kerusakan berat/parah pada salah satu modul unit; besar atau pun sedang pada struktur pemikul beban; kerusakan besar pada peralatan penting.

Sinigficant Damage : Kerusakan serius pada modul dan daerah unit; kerusakan kecil pada struktur pemikul beban, kerusakan yang sinifikan pada peralatan penting tunggal; kerusakan pada peralatan yang lebih penting

Minor Damage : Kerusakan kecil untuk peralatan penting tunggal; kerusakan pada peralatan yang non-esensial; kerusakan struktur non-pemikul beban.

Insignifcant Damage : kerusakan tidak signifikan atau tidak ada kerusakan; kerusakan pada bagian dari peralatan penting; kerusakan pada kabel penyeret, pendorong, generator dan driver

Level kerusakan akibat kegagalan *mooring line* sedunia tersebut juga dilaporkan dalam bentuk peluang yang disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3 : Peluang Kegagalan Mooring line Sedunia (OGP, 2010)

<i>Damage Level</i>	<i>Insignificant</i>	<i>Minor</i>	<i>Significant</i>	<i>Severe</i>	<i>Total Loss</i>
	0.29	0.44	0.27	0	0
<i>Single/multiple line failure</i>	<i>Single</i>	<i>Multiple</i>			
	0.7	0.3			

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa, level kerusakan atau konsekuensi akibat kegagalan *mooring line* paling sering terjadi adalah dilevel minor, dan kegagalan atas satu *mooring line* putus memiliki peluang lebih besar sekitar 70% dari pada kegagalan multiple line sebesar 30%. Data ini menunjukkan bahwa, konsekuensi akibat kegagalan *mooring line* cukup kecil/minor. Dan kegagalan umumnya disebabkan akibat putusnya satu *mooring line*. Hal ini selaras dengan skenario kegagalan yang dijelaskan di atas. Kegagalan *multiple line* sangat jarang terjadi karena ketika satu *mooring line* gagal biasanya sudah terdeteksi dan segera dilakukan penanganan agar tidak menyebabkan gagal *mooring line* lainnya. Dan secara desain pesimisnya, sistem *mooring* bangunan apung masih mampu bertahan dalam kondisi satu *mooring line* putus, namun kondisi ini tidak layak operasi dan harus segera ditangani sehingga tidak menyebabkan kegagalan *mooring line* lainnya. Data

ini bisa dijadikan bahan pertimbangan untuk menetapkan konsekuensi karena perilaku skenario gagal dan perilaku *mooring line* pada umumnya sama.

Dari pembahasan dua sudut pandang yang berbeda di atas, dapat disimpulkan bahwa konsekuensi kegagalan *mooring line* pada SPM #1043 pada kategori **minor** baik dari segi kesehatan dan keamanan/keselamatan, lingkungan maupun aspek bisnis dan finansial.

4.4 Evaluasi Resiko (Risk Evaluation)

Matriks yang digunakan dalam evaluasi resiko dapat dilihat pada Gambar 5. Resiko adalah perkalian antara frekuensi (dalam hal ini peluang gagal) dan konsekuensi. Tabel 4 berikut ini adalah data penilaian resiko berupa peluang gagal dan konsekuensi yang telah di bahas diatas.

Tabel 4 : Data Penilaian Resiko

Mooring line	Annual Probability of Failure (PoF)	Frequency Level	Consequence Level
SPM #1043	10^{-5}	Remote	Minor

Dengan memasukan data penilaian resiko pada Table 4 ke matrik resiko pada Gambar 5, maka diperoleh level resiko *mooring line* SPM #1043 yaitu pada level resiko aman karena dalam zona yang masih bisa diterima (*acceptable zone*).

4.5 Diskusi

Dari hasil yang telah didapatkan dan dibahas di atas, dapat diobservasi bahwa umur kelelahan SPM #1043 yang telah beroperasi hampir 30 tahun, memiliki sisa umur kelelahan yang masih cukup panjang sekitar 93 tahun. Ketika sisa umur kelelahan tersebut dibagi dengan faktor keamanan yang ditetapkan BKI sebagai standar keamanan dalam analisis kelelahan untuk menunjukkan sisa target umur operasi memperlihatkan bahwa sisa umur operasi SPM #1043 tidak lebih dari 10 tahun lagi. Hal ini didapat dengan menggunakan faktor keamanan 10 yang dipersyarikatan BKI ketika area kritis dan area *mooring line* tidak diinspeksi. Namun ketika menerapkan faktor keamanan 3, sisa umur operasi menjadi lebih besar hingga sekitar 3.5 kali lipat dari yang sebelumnya. Namun faktor keamanan 3 hanya dipersyaratkan untuk area yang diinspeksi. Penyebab perbedaan dalam menetapkan faktor keamanan tentunya terletak pada adanya ketidakpastian. Ketidakpastian pada struktur yang dilakukan inspeksi tentunya lebih kecil

jika dibandingkan dengan struktur yang tidak diinspeksi. Data inspeksi yang akurat seperti laju korosi dan ketebalan marine growth dapat menghasilkan perhitungan kondisi aktual *mooring line* lebih tepat yang mendekati kondisi sebenarnya. Sehingga faktor keamanan 3 dinilai laik untuk dipergunakan.

BKI sebagai salah satu klas yang memiliki aturan terkait *mooring line* khususnya mengenai SPM ini, belum menetapkan kriteria penerimaan kegagalan *mooring line* akibat beban kelelahan. Berdasarkan studi kasus yang diangkat dalam penelitian ini serta dengan studi literatur terkait kriteria penerimaan, maka usulan tahap awal diajukan untuk kriteria penerimaan dalam analisis kelelahan akibat beban lingkungan pada *mooring line* SPM sebesar 10^{-5} per tahun. Nilai ini mengandung arti bahwa maksimum peluang kegagalan akibat beban kelelahan pada *mooring line* sebesar 10^{-5} pertahun dengan level konsekuensi minor seperti yang telah dibahas di atas. Pertimbangan dan asumsi yang digunakan dalam menetapkan usulan ini ialah :

- Peluang kegagalan *mooring line* sedunia umumnya berkisar 10^{-3} per tahun berdasarkan laporan yang dipaparkan Oil and Gas Produce (OGP, 2010). Sehingga nilai 10^{-5} masih mengakomodasi peluang kegagalan statistik sedunia berdasarkan data kegagalan

Likelihood	Consequences			
	A	B	C	D
Improbable F > 10^{-3}				
Rare $10^{-4} < F < 10^{-3}$				
Remote $10^{-5} < F < 10^{-4}$	SPM #1043			
Incredible F < 10^{-5}				
	Minor	Moderate	Significant	Catastrophic
	<i>Minor injury requiring first aid</i>	<i>Injury requiring medical treatment</i>	<i>Severe injury possible</i>	<i>Potential for multiple fatalities</i>
	<i>Minor spill/little or no response</i>	<i>Moderate spill/limited response of short duration</i>	<i>Serious spill/significant resource commitment</i>	<i>Major spill/significant clean-up/full scale response</i>
	<i>Equiv. of 1 week lost production and associated repairs</i>	<i>Equiv. of 1 month lost production and associated repairs</i>	<i>Equiv. of 1 month lost production and associated repairs</i>	<i>Equiv. of 6 months lost production and associated repairs</i>

Gambar 5 : Matriks Penilaian Resiko

- yang terjadi selama 22 tahun.
- Hasil penilaian resiko dalam studi ini menunjukkan bahwa, level resiko yang diterima sistem *mooring line* SPM terhadap beban kelelahan masih masuk dalam zona aman. Artinya nilai peluang kegagalan 10^{-5} masih masuk pada level resiko aman dan jika hasil yang didapat lebih besar dari 10^{-5} menunjukkan level resiko akan meningkat.
 - Peluang kegagalan 10^{-5} rasional dan memungkinkan untuk digunakan karena perairan Indonesia yang cenderung moderat dan aman. Hal ini bisa dilihat dari data lingkungan yang digunakan jika dibandingkan dengan data lingkungan Laut Utara atau Teluk Meksiko yang umumnya digunakan sebagai data lingkungan dalam aturan klas seperti DnV dan ABS. Selain itu bisa dilihat juga dari hasil perhitungan total kerusakan kelelahan (*total fatigue damage*) yang relative kecil.
 - Dengan adanya suatu nilai kriteria penerimaan peluang kegagalan *mooring line* akibat beban kelelahan ini dapat dijadikan dasar penilaian ulang SPM yang sudah beroperasi lama melebihi masa perencanaan pada umumnya dan bisa menjadi dasar dalam justifikasi engineering apabila terdapat perbedaan yang didapat antara analisis yang dilakukan secara teoris/numeris dengan kondisi dilapangan sebenarnya, seperti dalam kasus mengenai kekuatan *mooring line*. Dengan adanya analisis kelelahan keandalan dan kriteria penerimaan ini dapat memberikan justifikasi apakah *mooring line* masih bisa dipertahankan

atau harus diganti. karena itu inspeksi menjadi penting karena bisa menurunkan faktor-faktor ketidakpastian yang terjadi disamping ketidakpastian lainnya yang ada dalam analisis kelelahan ini.

5. Kesimpulan dan Saran

Dari studi ini dapat disimpulkan bahwa level resiko yang diterima mooring line SPM #1043 akibat beban kelelahan yang telah beroperasi sekitar 30 tahun masuk pada level resiko aman atau masuk dalam zona yang masih bisa diterima (*acceptable zone*). Berdasarkan penilaian keandalan dan resiko pada penelitian ini, maka diusulkan kriteria penerimaan untuk analisis kegagalan *mooring line* akibat beban kelelahan sebesar 10^{-5} pertahun.

Kriteria penerimaan 10^{-5} masih cukup besar, sehingga usulan ini masih tahap awal yang butuh studi yang lebih mendalam dan selanjutnya akan dilakukan penelitian lebih dalam dengan melibatkan contoh kasus *mooring line* lainnya yang beroperasi di Indonesia. Saran bagi penelitian selanjutnya, dilakukan penilaian konsekuensi secara kuantitaif dengan membuat model analitis lebih terukur.

6. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Global Maritime yang telah bersedia bekerjama sama dalam menyelesaikan studi ini, khususnya dalam menggunakan software Oracaflex 9.2.



Muhammad Irfan, staf Pengkaji IV di Divisi Manajemen Strategis PT BKI (Persero), dengan bidang keahlian struktur bangunan laut (offshore structure). Lahir di Tanjungpinang, 30 Agustus 1989, menyelesaikan pendidikan sarjananya pada tahun 2011

di Teknik Kelautan - FTK ITS kemudian melanjutkan studi master di fakultas yang sama dengan bidang keahlian Teknik Perancangan Bangun Laut dan lulus MT pada tahun 2014. Sebagai peneliti, penulis tertarik pada topik penelitian mengenai kelelahan pada bangunan lepas pantai (baik yang terapung maupun fixed) dan mooring system. Saat ini penulis sedang konsentrasi dalam penelitian yang berkaitan dengan fatigue mooring line on offshore structure. e-mail : muhammad.irfan@bki.co.id



Eko Budi Djatmiko, adalah guru besar bidang Hidrodinamika Bangunan Laut yang bertugas sebagai dosen di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS sejak tahun 1994. Lahir di Magelang, 26 De-

Studi ini didukung penuh oleh manajemen PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero) sebagai badan klasifikasi nasional yang terjadi disamping ketidakpastian lainnya yang ada dalam analisis kelelahan ini.

Daftar Pustaka

- [1] Irfan, Muhammad., (2014) Analisis Mooring Sistem Pada Single Point Mooring Berdasarkan Standard Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) : Studi Kasus Penentuan Sisa Umur Kelelahan Mooring Line, Intitut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- [2] BKI,(2012) Survey Report of SBM #1043, Jakarta, Indonesia.
- [3] BKI., (2012) Guidance For Risk Evaluation For The Clasification Of Marine Related Facilities. Jakarta, Indonesia: Biro Klasifikasi Indonesia, Jakarta.
- [4] Irfan, Muhammad., Djatmiko, E.B and Prosodjo, B.S (2014) Analisis Mooring System Pada Single Point Mooring Berdasarkan Standard Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), Studi Kasus : Analisis Kekuatan Mooring Line, Procedings Seminar Nasional Pascasarjana XIV-ITS, Surabaya, Indonesia, Agust.
- [5] Irfan, Muhammad., Djatmiko, E.B and Prosodjo, B.S (2014) Mooring System Analysis of Single Point Mooring (SPM) Based on Standard Rules of Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) : Case Study of Determination Residual Fatigue Life of Mooring Line," 9th International Conference on Marine Technology (MARTEC), Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, October.
- [6] J. Stiff, A. B. S. Consulting, J. Ferrari, A. Ku, and R. Spong, (2003) Comparative Risk Analysis of Two FPSO Mooring Configurations," Offshore Technology Conference (OTC 15377),Houston, Texas, USA, May.

september 1958, menyelesaikan pendidikan sarjananya pada tahun 1983 di Jurusan Teknik Perkapalan-ITS, dan mulai tahun 1986 melanjutkan studinya di University of Glasgow, Scotland, lulus MSc pada tahun 1988 serta berikutnya lulus PhD pada tahun 1992. e-mail : ebdjatmiko@oe.its.ac.id

Daniel M. Rosyid, adalah guru besar bidang Riset Operasi dan Optimasi pada Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Lahir di Klaten, 2 Juli 1961, menyelesaikan pendidikan sarjananya pada tahun 1986 di FT. Perkapalan-ITS dua tahun kemudian melanjutkan program M.Phil leading to Ph.D di Dept. of Marine Technology, the University of Newcastle upon Tyne, Inggris. Pada tahun 2010 beliau dinobatkan menjadi Profesor bidang Riset dan Optimasi. e-mail : dmrosyid@gmail.com

Jaringan Pelayanan	Klasifikasi dan Statutoria	Komersil
Belawan	Jl. Veteran No. 218 Belawan Medan - 20411 Phone : (62-61) 6941025 Fax : (62-61) 6941276 e-mail : bn@bki.co.id	Jl. Veteran No. 218 Belawan Medan - 20411 Phone : (62-61) 6941157, 6940370 Fax : (62-61) 6941276 e-mail : bnc@bki.co.id
Batam	Graha BKI, Jl. Yos Sudarso Kav. 5 Batam - 29421 Phone : (62-778) 433388, 429023, 429024, 451288 Fax : (62-778) 429020 e-mail : bm@bki.co.id	Graha BKI, Jl. Yos Sudarso Kav. 5 Batam - 29421 Phone : (62-778) 428284, 428438 Fax : (62-778) 429021 e-mail : bmc@bki.co.id
Pekanbaru	Jl. Arifin Achmad No. 40 Pekanbaru - 28282 Phone : (62-761) 8417295, 8417296 Fax : (62-761) 8417294 e-mail : pr@bki.co.id	Jl. Arifin Achmad No. 40 Pekanbaru - 28282 Phone : (62-761) 8417291, 8417292, 7662170 Fax : (62-761) 8417293, 7662180 e-mail : prc@bki.co.id
Jambi	Jl. Raden Bahrun No. E11 RT. 11 / RW. 04 Kel. Sungai Putri, Kec. Telanaipura, Jambi Phone : (62-741) 671107 Fax : (62-741) 671108 e-mail : pb@bki.co.id	Jl. Raden Bahrun No. E11 RT. 11 / RW. 04 Kel. Sungai Putri, Kec. Telanaipura, Jambi Phone : (62-741) 671107 Fax : (62-741) 671108 e-mail : jbc@bki.co.id
Palembang	Jl. Perintis Kemerdekaan No. 226, 5 Ilir Palembang - 30115 Phone : (62-711) 713172, 713680, Fax : (62-711) 713173 e-mail : pb@bki.co.id	Jl. Perintis Kemerdekaan No. 22, 5 Ilir Palembang - 30115 Phone : (62-711) 713171, 713172, 713680, 717151 Fax : (62-711) 713173 e-mail : pbc@bki.co.id
Cilegon	Jl. Raya Bojonegara KM. 2 Ds. Karang Tengah, Kec. Cibeber Cilegon, Banten - 42422 Phone : (62-254) 5751683, 8488692 Fax : (62-254) 5751682 e-mail : cg@bki.co.id	Jl. Sultan Ageng Tirtayasa Komplek Istana Cilegon Blok D No. 22 Cilegon, Banten Phone : (62-254) 382347 Fax : (62-254) 382357 e-mail : cgc@bki.co.id
Tanjung Priok	Jl. Yos Sudarso 38-40 Tanjung Priok Jakarta Utara - 14320 Phone : (62-21) 4301017, 4301703, 4300993, 4353291 Fax : (62-21) 4301702 e-mail : tp@bki.co.id	
Cirebon	Jl. Tuparev KM. 3 Cirebon - 45153 Phone : (62-231) 201816 Fax : (62-231) 205266 e-mail : cn@bki.co.id	Jl. Tuparev KM. 3 Cirebon - 45153 Phone : (62-231) 201816 Fax : (62-231) 205266 e-mail : cnc@bki.co.id

Jaringan Pelayanan	Klasifikasi dan Statutoria	Komersil	Jaringan Pelayanan	Klasifikasi dan Statutoria	Komersil
Semarang	Jl. Pamularsih No. 12 Semarang - 50148 Phone : (62-24) 7610399 Facs : (62-24) 7610422 e-mail : sm@bki.co.id	Jl. Pamularsih No. 12 Semarang - 50148 Phone : (62-24) 7610744 Facs : (62-24) 7610422 e-mail : smc@bki.co.id	Bitung	Jl. Babe Palar No. 53, Madidir Unet Bitung - 95516 Phone : (62-438) 38720, 38721 Facs : (62-438) 21828 e-mail : bt@bki.co.id	Jl. Babe Palar No. 53, Madidir Unet Bitung - 95516 Phone : (62-438) 34273 Facs : (62-438) 21828 e-mail : btc@bki.co.id
Cepu		Perumahan Cepu Indah Regency Blok D No.10 RW.17, Kec. Cepu, Kab. Blora, Cepu Phone : (62-296) 4260165 Facs : (62-296) 4260165 e-mail : cuc@bki.co.id	Ambon	Jl. Laksdy Leo Wattimena, Passo Ambon - 97232 Phone : (62-911) 362805, 362806 Facs : (62-911) 361105 e-mail : ab@bki.co.id	Jl. Laksdy Leo Wattimena, Passo Ambon - 97232 Phone : (62-911) 362805, 362806 Facs : (62-911) 361105 e-mail : abc@bki.co.id
Cilacap		Perum. Yaktapena Blok E No. 1 Donan Cilacap Phone : (62-282) 537777 Facs : (62-282) 537777 e-mail : cpc@bki.co.id	Sorong	Jl. Jend. Sudirman No. 140 Sorong - 98414 Phone : (62-951) 322600 Facs : (62-951) 323870 e-mail : sr@bki.co.id	Jl. Jend. Sudirman No. 140 Sorong - 98414 Phone : (62-951) 322600 Facs : (62-951) 323870 e-mail : src@bki.co.id
Surabaya	Jl. Kalianget No. 14 Surabaya - 60165 Phone : (62-31) 3295448, 3295449, 3295450, 3295451, 3295456 Facs : (62-31) 3294520, 3205451 e-mail : sb@bki.co.id	Jl. Kalianget No. 14 Surabaya - 60165 Phone : (62-31) 3295448, 3295449, 3295450, 3295451, 3295456 Facs : (62-31) 3294520, 3205451 e-mail : sbc@bki.co.id	Singapura	7500A Beach Road #11-301, The Plaza Singapore - 199597 Phone : 65-68830651, 68830634, 68830643 Facs : 65-63393631 e-mail : sg@bki.co.id , class@bki.com.sg	
Pontianak	Jl. Gusti Hamzah No. 211 Pontianak - 78116 Phone : (62-561) 739579 Facs : (62-561) 743107 e-mail : pk@bki.co.id	Jl. Gusti Hamzah No. 211 Pontianak - 78116 Phone : (62-561) 739579 Facs : (62-561) 743107 e-mail : pkc@bki.co.id	Strategic Business Unit (SBU) Marine		Jl. Yos Sudarso No. 38-40 Tanjung Priok Jakarta Utara - 14320 Phone : (62-21) 4300139, 4300932 Facs : (62-21) 43937409 e-mail : mns@bki.co.id
Banjarmasin	Jl. Skip Lama No. 19 Banjarmasin - 70117 Phone : (62-511) 3358311, 3350983 Fax : (62-511) 3350175 e-mail : bj@bki.co.id	Jl. Skip Lama No. 19 Banjarmasin - 70117 Phone : (62-511) 3367361 Fax : (62-511) 3350175 e-mail : bjc@bki.co.id	Strategic Business Unit (SBU) Infrastructure and General Service		Jl. Yos Sudarso No. 38-40 Tanjung Priok Jakarta Utara - 14320 Phone : (62-21) 43912070 Facs : (62-21) 43937415 e-mail : ifs@bki.co.id
Balikpapan		Jl. M. T. Haryono No. 8 Ring Road Balikpapan - 76111 Phone : (62-542) 876637, 876641 Facs : (62-542) 876639 e-mail : bpc@bki.co.id	Strategic Business Unit (SBU) Industry		Jl. Yos Sudarso No. 38-40 Tanjung Priok Jakarta Utara - 14320 Phone : (62-21) 4300762, 43938304, 43912806, 43910822 Facs : (62-21) 43900972 e-mail : ids@bki.co.id
Samarinda	Jl. Cipto Mangunkusumo Ruko Rapak Indah No. 10 Samarinda Seberang, Samarinda - 75132 Phone : (62-541) 261423 Facs : (62-541) 261425 e-mail : sd@bki.co.id				
Makassar	Jl. Sungai Cerekang No. 28 Makassar - 90115 Phone : (62-411) 3611993 Facs : (62-411) 36515460 e-mail : ms@bki.co.id	Jl. Sungai Cerekang No. 28 Makassar - 90115 Phone : (62-411) 3611993 Facs : (62-411) 36515460 e-mail : msc@bki.co.id			

Daftar Rules & Guidelines BKI

Rules, guidelines dan guidance dibawah ini dapat diunduh melalui <http://www.bki.co.id/ajax/Login.php> dengan terlebih dahulu membuat akun unduh rules dan guidelines.

Part/Vol.	Rules/Guidelines/Guidance	Edition
Part 0 - General		
Guidance		
A	Petunjuk Masuk Ruang Tertutup	2014
Part 1- Seagoing Ships (Rules/Guidelines/Guidance for The Classification and Construction)		
RULES		
I	Rules for Classification and Surveys	2015
II	Rules for Hull	2014
III	Rules for Machinery Installations	2015
IV	Rules for Electrical Installations	2014
V	Rules for Materials	2014
VI	Rules for Welding	2015
VII	Rules for Automation	2014
VIII	Rules for Refrigeration	2014
IX	Rules for Ships Carrying Liquefied Gasses in Bulk	2013
X	Rules for Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk	2013
XI	Rules for Approval of Manufacturers and Service Suppliers	2014
XII	Rules for Fishing Vessel	2003
XIII	Regulation (Rules) for The Redundant Propulsion and Steering Systems	2002
XIV	Rules for Non Metalic Material	2014
XV	IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers	2014
XVI	IACS Common Structural Rules for Oil Tankers	2014
Guidelines		
1	Guidelines for the Use of Gas as Fuel for Ship	2013
2	Guidelines for Ocean Towage	2001
3	Guidelines for Machinery Conditioning Monitoring	2011
4	Guidelines for the Explosion Protection of Electrical Equipment	2001
5	Guidelines for the Carriage of Refrigerated Containers on Board Ships	2004
6	Guidelines for Analysis Techniques Strength	2005
8	Guidelines for Determination of the Energy Efficiency Design Index	2014
Guidance		
A	Regulation (Guidance) for Ventilation System on Board Seagoing Ships	2004
B	Guidance for Sea Trials of Motor Vessels	2002
C	Buku Petunjuk Pemakaian UT Measurement Report	2006
D	Regulations (Guidance) for the Inspection of Anchor Chain Cables	2002
E	Regulation (Guidance) For The Construction And Testing Towing Gears	2000

F	Regulation (Guidance) for the Performance of Type Tests	2002
G	Regulation (Guidance) for the Corrosion Protection and Coating Systems	2004
H	Regulations (Guidance) for Assessment and Repair of Defects on Propellers	2000
Part 2-Inland Waterway		
RULES		
I	Rules for Inland Waterway Vessels-Hull Construction	1996
II	Rules for Inland Waterway Vessels-Machinery Installation	1996
III	Rules for Inland Waterway Vessels-Electrical Installation	1996
Part 3-Special Ships		
RULES		
I	Rules for Oil Recovery Vessel	2005
II	Rules for Floating Dock	2002
III	Rules for High Speed Craft	2000
IV	Rules for High Speed Vessels	1996
V	Rules for Fibreglass Reinforced Plastics Ships	1996
VI	Peraturan Kapal Kayu	1996
VII	Rules for Small Vessel Up to 24 M	2013
Part 4-Special Equipment And Systems		
Rules		
I	Rules for Stowage and Lashing of Containers	2011
II	Rules for Dynamics Positioning Systems	2011
III	Regulation (Rules) for the Bridge Design on Seagoing Ships One Man Console	2004
Guidance		
A	Guide (Guidance) for Risk Evaluation for the Classification of Marine Related Facilities	2012
B	Regulation (Guidance) for the Classification and Construction of Fiber Reinforced Plastics Workboat	2003
Reference		
	Reference Notes on Risk Assessment for the Marine and Offshore Oil and Gas Industries	2012
Part 5-Offshore Technology		
Rules		
I	Rules for Classification and Construction of Offshore Installations	2011
	Rules for Classification and Surveys	
II	Rules for Classification and Construction of Offshore Installations	2011
	Rules for Structures	
III	Rules for Classification and Construction of Offshore Installations Rules for Specific Type of Units and Equipment	2002
IV	Rules for Classification and Construction of Offshore Installations Rules for Machinery Installations	2011
V	Rules for Classification and Construction of Offshore Installations Rules for Electrical Installations	2011
VI	Rules for Mobile Offshore Unit	2011

VII	Rules for Fixed Offshore Installation	2011
VIII	Rules for Offshore Mooring Chains	2000
IX	Rules for Single Point Mooring	2013
XII	Rules for Facilities on Offshore Installation	2013
Guidelines		
1	Guidelines for the Construction and Classification and Classification/Certification of Floating Production Storage and Offloading Unit	2011
2	Guidelines for Floating Offshore Liquefied Gas Terminals	2013
3	Guidelines for Floating Production Installations	2013
Guidance		
A	Guidance for Survey Using Risk Based Inspection for the Offshore Industry	2012
B	Guidance for Fatigue Assessment of Offshore Structures	2015
C	Guidance for Buckling and Ultimate Strength Assessment of Offshore Structures	2015
Part 6-Statutory (Rules/Guidelines/Guidance for Statutory Implementation)		
Regulation		
I	Regulation for the Audit and Registration of Safety Management Systems	2012
II	(Regulation) Rules for the Verification and Registration of Ship Security Management System	2004
Guidelines		
1	Guidelines for The Preparation Damage Stability Calculations and Damage Control Documentation on Board	2005
3	Guidelines on Intact Stability	2014
Guidance		
A	Guidance for the Audit and Registration of Safety Management Systems	2012
B	Guidance for the Verification and Registration of Ship Security Management Systems	2004
C	Petunjuk Pengujian Kemiringan dan Periode Oleng Kapal	2003
G	Guidance on Intact Stability	2014
Part 7-Class Notation		
Guidelines		
1	Guidelines for Certification of Lifting Appliances	2013
2	Guidelines for Dynamic Loading Approach	2013
3	Guidelines for Spectral-Based Fatigue Analysis	2013
Guidance		
A	Guidance for the Class Notation Helicopter Deck and Facilities (HELIL & HELIL(SRF))	2013
B	Guidance for Crew Habitability on Ship	2014
C	Guidance for Crew Habitability on Offshore Installation	2014
D	Guidance for Hull Inspection and Maintenance Program	2013
E	Guidance for Planned Maintenance Program	2013
F	Guidance for the Environmental Service Systems for Ships and Offshore Units, Floating Installations and Liftboats	2013
G	Guidance for Coating Performance Standards	2013
H	Guidance for the Class Notation Emergency Response Service (ERS)	2013
I	Guidance for Survey Based on Reliability Centered-maintenance	2012

Pedoman Penulisan Jurnal Teknik BKI

1. **Naskah tulisan**, dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris.
2. **Format penulisan**, maksimal 10 halaman dalam 1 kolom ukuran kertas A4 dengan font Times New Roman ukuran 12, spasi 1,5. Batas atas dan bawah 2,5 cm, tepi kiri 3 cm dan tepi kanan 2,5 cm.
3. **Judul**, menggunakan huruf capital tebal (bold) ukuran font 14 posisi di tengah
4. **Nama penulis**, nama lengkap dibawah judul disertai nama instansi dan alamat email dengan huruf miring (italic), ukuran font 10 pt.
5. **Foto penulis**, dilampirkan foto penulis utama dalam soft copy format jpg atau pdf ukuran minimal 3 x 4.
6. **Abstrak**, diutamakan dalam bahasa Inggris, ditulis dengan huruf miring (italic) dengan font 10. jarak spasi 1, memuat ringkasan lengkap isi tulisan, maksimum 5% tulisan atau 250 kata.
7. **Kata kunci**, 2-5 kata, diutamakan bahasa inggris sesuai abstrak.
8. **Kerangka tulisan**, berisi isi dengan bobot prosentase:
 - Pendahuluan 5%
 - Tinjauan Pustaka 15%
 - Metodologi 20%
 - Diskusi Hasil & Pembahasan 55%
 - Kesimpulan dan saran 5%
 - Ucapan terimakasih (bila ada untuk sponsor, pembimbing, asisten, dsb)
 - Daftar pustaka
 - Biodata singkat penulis (Nama, kualifikasi dan pengalaman kerja)
9. **Kutipan referensi**,
 - Bila seorang (Joko, 2014)
 - Bila 2 orang (Joko & Slamet, 2(14)
 - Bila 3 orang (Joko, et al., 2014)
10. **Daftar pustaka**, disusun berdasarkan alphabet, dengan ketentuan sbb:
 - a. Buku: Penulis (Tahun). Judul Buku. Penerbit.
 - b. Jurnal: Penulis (Tahun). Judul Tulisan. Nama Jurnal (cetak miring). Volume (Nomor). Halaman.
 - c. Paper dalam prosiding: Penulis (tahun). Judul Tulisan. Nama Seminar (cetak miring). Tanggal Seminar. Halaman.
 - d. Tesis/TA: Penulis (Tahun). Judul. Tesis/TA. Universitas.
 - e. Engineering Standard: Penulis (Tahun). Judul Buku. Penerbit.
 - f. Dokumen Pemerintah: Organisasi (Tahun). Nama Dokumen. Tempat.
 - g. Manual Laboratorium: Judul Manual (Tahun). Nama Buku Manual. Penerbit.
11. **Tabel dan Gambar**, bisa dideit dan harus diberi nomor secara berurutan sesuai dengan urutan pemunculannya. Setiap gambar dan tabel perlu judul singkat yang diletakkan di atas untuk tabel dan di bawah untuk gambar. Khusus gambar disertakan juga dalam file terpisah yang beresolusi tinggi (min. 350kB).
12. Naskah tulisan dikirim dalam bentuk soft copy ke alamat email propulsi@bki.co.id.



PT. BIRO KLASIFIKASI INDONESIA (Persero)

Jl. Yos Sudarso No. 38-40, Tanjung Priok, Jakarta Utara - 14320
Phone : (62-21) 4301017, 4301703, 4300993 Facsimile : (62-21) 43936175, 43901973
email : ho@bki.co.id