

# PROPULSION

Technical Journal of Classification and Independent Assurance

Edisi 04 - Desember 2017

PROPORSION AND  
PREMILINARY  
POWERING

MISSION  
REQUIREMENT

COST  
ESTIMATE

LINES AND  
BODY PLAN

DAMAGE  
STABILITY

HYDROSTATIC  
AND  
BONJEAN  
CURVE

CAPACITY,  
TRIM, AND  
INTACT  
STABILITY

FLOODABLE  
LENGTH AND  
FREEBOARD

FINAL  
DESIGN

LIGHTSHIP  
WEIGHT  
ESTIMATE

ARRANGEMENTS  
(HULL AND  
MACHINERY)

POWERING

STRUCTURE





Tim Redaksi Jurnal Teknik BKI  
**PROPULSION**

Mengucapkan

*Selamat dan Sukses*

atas pelantikan

**Bapak Saifuddin Wijaya**

sebagai Direktur Pengembangan Sumber Daya

dan

**Bapak Moch. Cholil**

sebagai Direktur Operasi

PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero)



## Salam PROPULSION,

Jurnal Teknik BKI, PROPULSION yang merupakan *Technical Journal of Classification and Independent Assurance* hadir kembali untuk menambah wawasan anda di bidang marine. Pada edisi ke-4 ini, Jurnal PROPULSION menampilkan beberapa tulisan menarik dengan berbagai tema, mulai dari proses pengembangan perangkat lunak untuk menghitung hubungan arus singkat, analisa kebakaran kamar mesin hingga pemetaan perairan domestik Indonesia.

BKI saat ini sedang mengembangkan peraturan domestik untuk kapal yang berlayar di perairan Indonesia. Sinergi dengan berbagai lembaga riset termasuk universitas tentunya sangat diharapkan. Masukan dari stakeholder BKI juga dinantikan agar pengembangan peraturan tersebut sejalan dengan kebutuhan pemakai jasa.

Akhir kata, dengan terbitnya Jurnal PROPULSION edisi kali ini diharapkan dapat meningkatkan pengetahuan dan menumbuhkan motivasi yang tinggi dalam melakukan penelitian sehingga tercapai tingkat keamanan yang lebih tinggi dan terpenuhi sisi keekonomisannya, khususnya untuk kapal-kapal domestik. Kritik dan saran positif sangat diharapkan sehingga jurnal ini terus berkembang dengan tulisan-tulisan menarik lainnya.



Pengarah : Direksi BKI  
 Penanggung jawab : Kepala Divisi Riset dan Pengembangan  
 Pemimpin redaksi : Senior Manager Penelitian dan Aplikasi Teknik  
 Anggota : Dr. Muhdar Tasrief  
           Siti Komariyah, S.T., MSi.  
           Sukron Makmun, S.T., M.T.  
           Siswanto S.T., M.T.  
           Gde Sandhyana Pradhita, S. Kom., M.Ds.

### ALAMAT REDAKSI

Divisi Riset dan Pengembangan  
 Kantor Pusat Biro Klasifikasi Indonesia Lt. 2  
 Jl. Yos Sudarso No. 38-40, Tanjung Priok  
 Jakarta Utara - 14320  
 Telp. (+62)21 - 4301017, 4301703 ext. 2016  
 email : propulsi@bki.co.id

Jurnal teknik ini dapat diakses  
 melalui website BKI di [www.bki.co.id](http://www.bki.co.id)

## DAFTAR ISI

3 Salam Redaksi

5 Aplikasi Dewaruci - SoTON

11 Maritime Administration and Recognized Organization (RO)

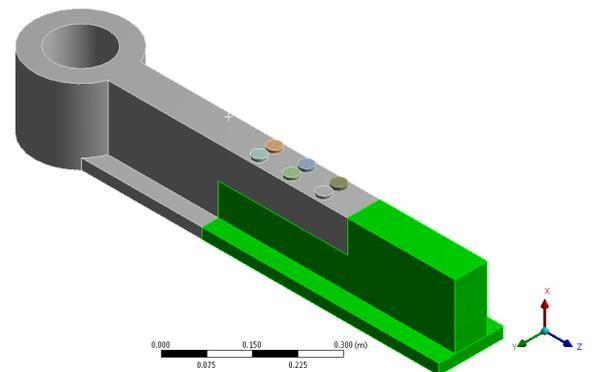
19 Kebakaran Kamar Mesin MT Nusa Bintang Saat Bongkar Muatan Di Jetty Terminal LPG Tanjung Sekong, Cilegon



27 Improvisasi Desain Untuk Meningkatkan Karakteristik Damage Stability Kapal Penumpang Feri Ro-Ro

37 *The Development of Rules-Regulations For Ship Intended Sail in Domestic Indonesian Water-ways : Ship's Service Area*

43 Studi Kasus: Analisa Numerik Novel Design Sepatu Kemudi



49 Studi Penilaian Kekuatan Buckling Pelat Pada Struktur Kapal Menggunakan Aturan BKI

60 Daftar Alamat Kantor  
PT. Biro Klasifikasi Indonesia

63 Daftar Rules & Guidelines BKI

# APLIKASI DEWARUCI - SoTON

Angjuang Adi Panji Pratama, Hardika Raditya Ardiyanto, Triyan Indrawan

## Abstrak

As part of increasing marine vessel and mobile offshore installation safety, The Safety of Life at Sea (SOLAS), an International Maritime Organization (IMO) publication required that electrical installations in ships shall be protected against short circuit. The short circuit calculation shall be performed properly to obtain the appropriate protection device. In enhancing the safety and to comply with the SOLAS regulation, BKI as a Classification Society requires the short circuit calculation for ship which has the total output of electrical power of 500 kVA and above. Since the methods of calculation used by designer are mostly varied, the amount of time needed by Classification Society for verification will increase if both of parties used different techniques. Furthermore, the manual calculation will take more time and risk of calculation error. Therefore, BKI develops an application tools called Dewaruci-SoTON which is robust and easy to use. This paper is aimed to represent the recent development and the features of Dewaruci-SoTON software. The software is intended to obtain the prospective sub-transient, transient, steady state short circuit current of a.c three phase based on IEC 61363 standard. The calculated short circuit current comprises of three components, a.c component ( $I_{ac}$ ), d.c component ( $I_{dc}$ ) and peak current ( $I_p$ ). The output of calculation can also be used as the way to determine the breaking and making capacity current in selection of protection device.

Keywords : Prospective short-circuit current; Breaking capacity, Making capacity, Protection device.

## 1. Pendahuluan

Untuk mencegah terjadinya arus hubung singkat pada kapal dan instalasi lepas pantai, sistem kelistrikan harus didesain sedemikian rupa sehingga meminimalkan kemungkinan terjadinya arus hubung singkat. Arus hubung singkat yang tidak segera dieliminasi dapat berakibat fatal baik kepada awak kapal, peralatan dan kapal itu sendiri. Gambar 1 menunjukkan efek dari arus hubung singkat pada kapal tanker minyak.



**Gambar 1** : Kapal MT. FM Express terbakar akibat arus hubung singkat yang terjadi di kamar mesin.

Langkah awal yang dilakukan untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya arus hubung singkat adalah dengan pemasangan pengaman arus hubung singkat yang tepat. Dengan demikian, diperlukan perhitungan arus hubung singkat seluruh sistem kelistrikan termasuk seluruh beban listrik yang ada

didalamnya untuk mendapatkan rating pengaman yang tepat. Hasil perhitungan tersebut merupakan acuan minimum untuk menentukan kapasitas pemutusan pengaman dan kemampuan pengaman untuk menahan efek arus hubung singkat. Pada prakteknya perlindungan terhadap arus hubung singkat dilakukan dengan menggunakan sikring (*fuse*) dan *circuit breaker*.

Sebagai badan klasifikasi, PT. Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) melakukan evaluasi terhadap keselamatan dan keamanan desain kapal baik dari segi konstruksi, stabilitas, instalasi permesinan dan kelistrikan. Pada instalasi kelistrikan, BKI melakukan verifikasi terhadap kapasitas komponen instalasi kelistrikan guna memastikan komponen tersebut mampu menahan arus hubung singkat yang dapat terjadi dengan aman tanpa mengganggu sistem lain dan meminimalkan tingkat kerusakan. Saat ini BKI sedang mengembangkan aplikasi perhitungan arus hubung singkat Dewaruci-SoTON. Aplikasi ini akan digunakan sebagai *tools* pelengkap untuk *Rules for Electrical Installations* (Pt.1, Vol.IV) yang mempersyaratkan bahwa sumber tenaga listrik kapal dengan total daya keluaran 500 kVA dan lebih harus dilengkapi dengan perhitungan arus hubung singkat. Aplikasi ini diharapkan dapat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk perhitungan dan juga mengurangi kesalahan perhitungan.

Output dari perhitungan akan digunakan untuk menentukan nilai *breaking capacity* dan *making capacity* yang selanjutnya digunakan sebagai referensi untuk pemilihan rating pengaman. Pada paper ini akan disajikan contoh perhitungan arus hubung singkat menggunakan aplikasi Dewaruci – SoTON.

## 2. Perhitungan Arus Hubung Singkat

Sistem tenaga listrik di industri perkapalan dan lepas pantai harus dirancang untuk melayani beban dengan cara yang aman dan handal. Salah satu pertimbangan utama dalam perencanaan sistem tenaga adalah kontrol yang baik terhadap arus hubung singkat. Arus hubung singkat yang tidak terkontrol dapat menyebabkan pemadaman layanan, yang pada gilirannya akan menyebabkan terhentinya proses produksi, terhentinya fasilitas penting atau layanan penting, atau kecelakaan fatal bagi personel dan kemungkinan resiko kebakaran.

Sistem tenaga listrik dirancang untuk bebas dari kemungkinan arus hubung singkat melalui desain dan pemilihan peralatan, instalasi yang baik dan perawatan yang memadai. Meskipun demikian, hubung singkat masih mungkin terjadi.

Beberapa penyebab terjadinya hubung singkat diantaranya hewan pengerat, kerusakan sambungan, lonjakan tegangan, menurunnya kualitas isolasi, akumulasi debu, kelembaban dan kontaminan lainnya, masuknya logam atau benda konduktif dan fenomena lain yang-tidak dapat ditentukan.

Hubung singkat terjadi ketika ada kontak antara konduktor fasa (*phase*) dengan pembumian (*ground*), konduktor fasa satu sama lain atau fasa konduktor dengan konduktor netral. Arus induksi oleh hubungan singkat memiliki magnitudo yang sangat tinggi. Perangkat pelindung harus mampu menahan arus dan memutus rangkaian dalam waktu yang ditentukan. Hal ini diperlukan untuk rating dan memilih pengaturan perangkat pelindung yang tepat. Perhitungan arus hubung singkat dimaksudkan untuk menentukan nilai arus hubung singkat yang terjadi pada sistem. Ada beberapa efek ketika korsleting terjadi dalam suatu sistem:

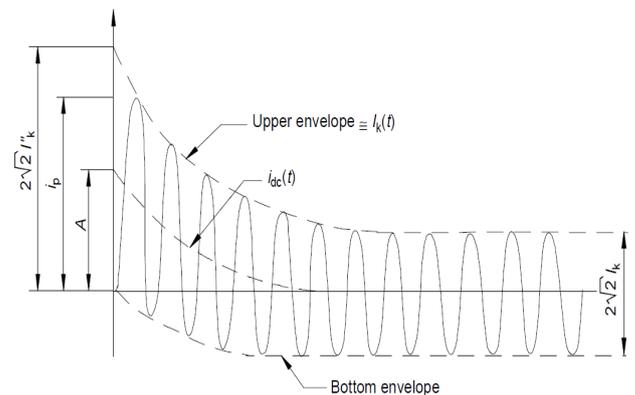
- Pada lokasi hubung singkat, api dan busur listrik dapat terjadi
- Rangkaian arus hubung singkat mengalir dari sumber ke lokasi terjadinya hubung singkat
- Semua komponen yang dilalui oleh arus hubung singkat akan mengalami stres mekanik dan stress termal. Stres bervariasi sebagai fungsi dari arus kuadrat ( $I^2$ ) dan durasi arus yang mengalir.
- Tegangan sistem akan menurun mengikuti proporsi arus hubung singkat. *Drop* tegangan maksimum terjadi di lokasi hubung singkat (nol), tetapi semua bagian dari sistem tenaga akan terpengaruh oleh penurunan tegangan tersebut

Arus hubung singkat harus segera dihilangkan dari sistem tenaga dengan menggunakan perangkat pemangam yang dalam hal ini adalah pemutus sirkuit (*circuit breaker*) dan sekering. Agar dapat bekerja dengan baik, sebuah perangkat pemangam yang tepat harus dipilih sebanding dengan arus hubung singkat maksimum yang mengalir ke lokasi hubung singkat. Nilai

maksimum dari arus hubung singkat yang sering disebut sebagai '*available short circuit current*'. Ketika Menentukan besarnya nilai arus hubung singkat, penting untuk mempertimbangkan semua sumber hubung singkat dan karakteristik impedansi. Berdasarkan ketentuan *Rules for Electrical Installations* (Pt.1, Vol. IV), harus dipertimbangkan semua kemungkinan terjadinya arus hubung singkat yang diperlukan untuk evaluasi sistem. Jenis hubung singkat berikut harus diinvestigasi untuk semua kasus:

- Generator *short circuit*
- *Short circuit* pada busbar utama
- *Short circuit* pada busbar *emergency switch board* dan *main distribution board*

Dalam menghitung arus hubung singkat, hanya nilai maksimum yang dipertimbangkan. Nilai tersebut adalah arus maksimum atau arus puncak ( $i_k$ ) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Nilai maksimum akan bervariasi sebagai fungsi waktu sepanjang kurva bagian atas dari fungsi waktu independen yang kompleks.



**Gambar 2 :** Fungsi waktu arus hubung singkat pada terminal generator sinkron.

Arus yang didefinisikan oleh kurva pada Gambar 2 dihitung dari persamaan berikut:

$$i_k(t) = \sqrt{2} I_{ac}(t) + I_{dc}(t) \tag{1}$$

Untuk perhitungan arus hubung singkat ( $i_k$ ), umumnya dihitung dari tiga fungsi dari kurva tersebut, komponen arus a.c ( $I_{ac}$ ), komponen arus d.c. ( $I_{dc}$ ) dan nilai arus maksimum ( $I_p$ ) [1].

Fungsi waktu dari komponen a.c ( $I_{ac}$ ) dikarakteristikan dengan arus *sub-transient*, *transient* dan *steady-state* saat periode waktu *sub-transient* dan *transient* sesuai persamaan (2). Periode waktu ini didefinisikan dengan *direct-axis sub-transient time constant* ( $T''_d$ ) and *direct-axis transient time constants* ( $T'_d$ ). semua variable pada kondisi *sub-transient* di tunjukkan dengan tanda ( ) dan

transient ditunjukkan dengan tanda (") yang diletakkan diakhir variable.

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd})e^{-t/T''d} + (I'_{kd} - I_{kd})e^{-t/T'd} + I_{kd} \quad (2)$$

Nilai arus hubung singkat *sub-transient* ( $I''_{kd}$ ) dan *transient* ( $I'_{kd}$ ) dari arus tiga fasa dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan (3) dan (4).

$$I''_{kd} = E''_{q0} / Z''_d = E''_{q0} / (R_a^2 + X''_d)^{1/2} \quad (3)$$

$$I'_{kd} = E'_{q0} / Z'_d = E'_{q0} / (R_a^2 + X'_d)^{1/2} \quad (4)$$

$I_{kd}$  merupakan arus hubung singkat *steady-state* dimana dapat diperoleh dari manufaktur.  $R_a$  merupakan nilai tahanan kumparan stator,  $X_d$  adalah nilai reaktansi kumparan dan  $Z_d$  adalah nilai impedansi kumparan generator. Ketiga variable tersebut dalam satuan Ohm.

Tegangan aktif *sub transient* ( $E''_{q0}$ ) dan tegangan aktif *transient* ( $E'_{q0}$ ) ditentukan oleh arus *preload* dan dapat dievaluasi dengan menggunakan persamaan (5) and (6).

$$E''_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi + X''_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$E'_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi + X'_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Komponen arus d.c.  $i_{dc}$  dapat dievaluasi menggunakan persamaan (7).

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2} (I''_{kd} - I_0 \sin \phi_0) e^{-t/T_{dc}} \quad (7)$$

Nilai puncak dari arus hubung singkat terjadi antara waktu  $t = 0$  dan  $t = T/2$  dari kondisi hubung singkat. Kondisi tepatnya ditentukan oleh kondisi *preload*, impedansi generator dan konstanta waktu. Akan tetapi perhitungan arus hubung singkat puncak dapat diterima dengan waktu  $T/2$ , misalnya pada separuh siklus pertama dari kondisi hubung singkat dengan menggunakan persamaan (8).

$$i_p = \sqrt{2} I_{ac}(t) + I_{dc}(t) \quad (8)$$

### 3. Aplikasi Perhitungan Arus Hubung Singkat

Program aplikasi perhitungan ini dikembangkan dengan mengacu pada standart IEC 61363 (*Procedures for calculating short-circuit currents in three phase a.c.*) menggunakan program *visual basic* dan telah divalidasi menggunakan program perhitungan arus hubung singkat komersil dengan hasil tidak lebih dari 1%. Hasil validasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Aplikasi ini ditujukan untuk instalasi kelistrikan pada kapal dan bangunan lepas pantai dengan:

- tegangan diatas 380 V / 660 V arus bolak-balik tiga fasa.
- memiliki tegangan sistem yang ditentukan dalam IEC 60092-201 Tabel 2;
- memiliki satu atau lebih level tegangan berbeda;
- terdiri dari generator (G1, G2), motor baik sinkron dan tidak sinkron, (M1, Eq. M), *transformer*, reaktor, kumparan, kabel, dan *unit converter*;
- titik netral yang terhubung ke lambung kapal melalui impedansi (yang dirancang untuk membatasi arus yang mengalir ke lambung kapal saat terjadi hubung singkat;
- titik netral terisolasi dari lambung kapal.

Komponen listrik yang diakomodir oleh aplikasi ini terbagi menjadi dua jenis yaitu komponen aktif dan pasif. Komponen aktif yang terdiri dari generator listrik, Motor listrik (sinkron dan asinkron), *transformer* dan komponen pasif terdiri dari kabel dan *converter*.

Tabel 1 : Hasil perhitungan komponen arus hubung singkat menggunakan SoTON dan program perhitungan komersial

Component	Developed software			Commercial software		
	$I_k''$ (A)	$I_{ac}(0.5T)$ (A)	$I_p$ (A)	$I_k''$ (A)	$I_{ac}(0.5T)$ (A)	$I_p$ (A)
G1	3838.604	3431.365	9815.067	3838.603	3423.735	9805.22
G2	3838.604	3431.365	9815.067	3838.603	3423.735	9805.22
M1	2125.527	1360.254	3400.913	2125.527	1360.253	3400.912
Eq. M	1226.597	918.255	1653.07	1909.227	1221.905	3054.763

Tabel 2 : Hasil perhitungan arus hubung singkat pada titik *fault* menggunakan SoTON dan program perhitungan komersial

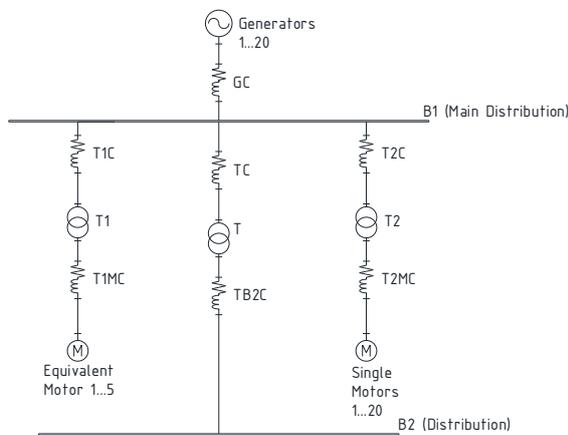
Fault Point	Developed software			Commercial software		
	$I_k''$ (A)	$I_{ac}(0.5T)$ (A)	$I_p$ (A)	$I_k''$ (A)	$I_{ac}(0.5T)$ (A)	$I_p$ (A)
Main bus	11029.331	9149.903	24694.149	11712	9430	26066
Breaker of G1	7190.728	5718.538	14879.082	7873	6006	16261
Breaker of G2	7190.728	5718.538	14879.082	7873	6006	16261
Breaker of M1	8903.804	7780.986	21283.865	9586	8069	22665

Motor listrik dengan daya diatas 100 kW masuk ke dalam kategori *large motor*, sedangkan motor listrik dengan daya 100 kW ke bawah masuk kedalam kategori *small motor* [1].

Beberapa motor berdaya kecil dapat dikombinasikan menjadi sebuah *equivalent motor*.

Dalam perhitungan digunakan sebuah *wiring diagram* acuan (*base diagram*) yang ditunjukkan pada Gambar 3. *Base diagram* tersebut ditujukan untuk mempermudah pengguna dalam melakukan perhitungan dan penyederhanaan sistem kelistrikan. Sistem instalasi tenaga listrik yang akan dihitung, disederhanakan sedemikian rupa hingga menjadi bentuk diagram dasar tersebut.

Meskipun sistem distribusi listrik di kapal sangat bervariasi, namun konfigurasi distribusi listrik sesuai Gambar 3 dapat diimplementasikan di semua desain.



Gambar 3 : Diagram skematik distribusi tenaga listrik (*base diagram*)

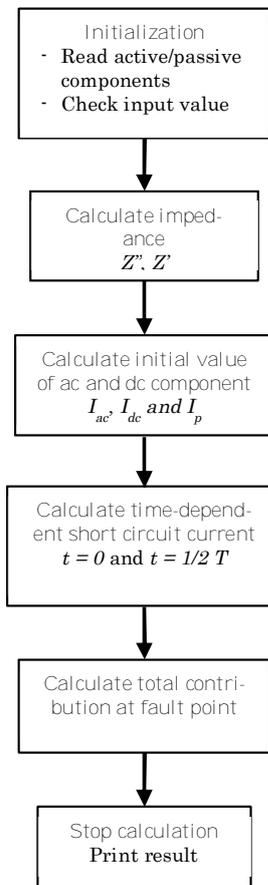
Output perhitungan dari aplikasi ini adalah nilai arus hubung singkat awal (*sub-transient short circuit*) dan arus hubung singkat puncak (*peak current*) pada saat  $t = 0$  dan  $t = T/2$ . Arus hubung singkat dihitung pada titik terjadinya *fault* dan pada titik lainnya seperti terminal motor, terminal generator dan pengaman.

Arus hubung singkat yang dihitung terdiri dari komponen arus bolak-balik ( $I_{ac}$ ) dan komponen arus searah ( $I_{dc}$ ) untuk setiap komponen pada sistem. Adapun kontributor arus hubung singkat yang dapat diakomodir oleh perhitungan adalah:

- Generator : maksimum 20 set
- Single motor : maksimum 20 set
- Equivalent motor : maksimum 5 set

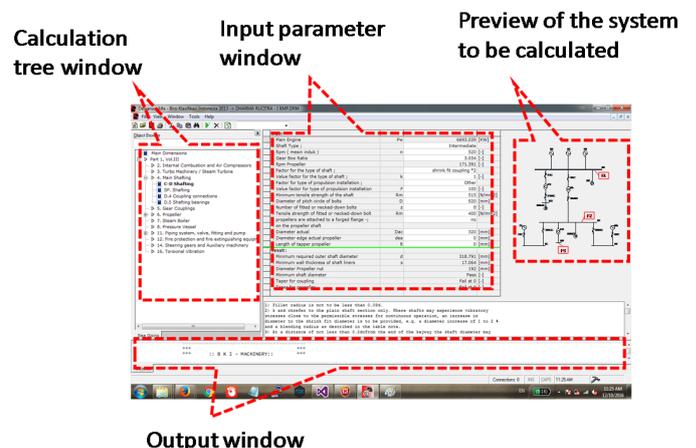
Alur perhitungan program ini dimulai dengan penentuan jenis komponen beserta nilai input. Apabila tidak terdapat error dalam pengisian data misalnya frekuensi ditulis 220 Hz atau tegangan kurang dari 220 V, maka tahap selanjutnya adalah perhitungan impedansi masing-masing komponen. Perhitungan dilanjutkan dengan penentuan nilai komponen arus hubung singkat  $I_{ac}$ ,  $I_{dc}$  dan  $I_{pk}$ . Hasil tersebut selanjutnya digunakan untuk mengetahui

magnitude arus hubung singkat di titik terjadinya hubung singkat (*fault*). Secara umum alur perhitungan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 : Alur perhitungan

Tampilan *interface* program dibagi menjadi tiga kolom utama. Kolom kiri berisi *tree* perhitungan (gabungan dari perhitungan lain), kolom tengah berisi input data dan kolom kanan memuat *base diagram* perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Pada bagian bawah *interface* terdapat kolom hasil perhitungan yang menampilkan hasil perhitungan.



Gambar 5 :Tampilan *interface* software

Berikut disajikan contoh perhitungan arus hubung singkat menggunakan aplikasi SoTON. Tabel 3 sampai dengan Tabel 6 adalah data input perhitungan, Tabel 7 dan Tabel 8 adalah data

hasil perhitungan untuk tiap-tiap komponen dan titik hubung singkat.

Tabel 3 : Data generator utama

Generators	$P_r$ (kW)	$P_f$	$S_r$ (kVA)	$U_r$ (V)	$f_r$ (Hz)	$X_d''$ (%)	$X_d'$ (%)	$X_d$ (%)	$R_a$ (%)	$T_d''$ (ms)	$T_d'$ (ms)	$T_{dc}$ (ms)
G1	3500	0.8	4375	4200	60	17.5	29	275	0.5	26	420	93
G2	3500	0.8	4375	4200	60	17.5	29	275	0.5	26	420	93

Tabel 4 : Data Single motor

Motors	$P_r$ (kW)	$pf$	$\sin \phi$	$\mu_r$	$S_r$ (kVA)	$U_r$ (V)	$f_r$ (Hz)
M1	2000	0.88	0.475	0.92	2470	4200	60

Tabel 5 : Data equivalent motor

Equivalent Motor	$P_r$ (kW)	$pf$	$\mu_r$	$S_r$ (kVA)	$U_r$ (V)	$f_r$ (Hz)	Cable type	$L$ (m)	$n$	$R$ ( $\Omega$ /km)	$X$ ( $\Omega$ /km)
Eq. M 1	2000	0.8	0.9	2777	600	60	3x1c 350MCM	20	1	0.11	0.095

Tabel 6 : Data transformator

Transformer	$S_r$ (kW)	$U_{rk}$ (%)	$U_{rr}$ (%)	$U_{rx}$ (%)	$U_{rHV}$ (V)	$U_{rLV}$ (V)	$f_r$ (Hz)	Cable type	$L$ (m)	$n$	$R$ ( $\Omega$ /km)	$X$ ( $\Omega$ /km)
T1	2000	6.5	1.15	6.4	4200	600	60	3x1c 300MCM	10	1	1.25	0.98

Tabel 7 : Kontribusi tiap-tiap komponen

Component	Developed software		
	$I_k''$ (A)	$I_{ac}$ (0.5T) (A)	$I_p$ (A)
G1	3838.604	3431.365	9815.067
G2	3838.604	3431.365	9815.067
M1	2125.527	1360.254	3400.913
Eq. M	1226.597	918.255	1653.070

Tabel 8 : Titik hubung singkat

Fault Point	Developed software		
	$I_k''$ (A)	$I_{ac}$ (0.5T) (A)	$I_p$ (A)
Main bus	11029.331	9149.903	24694.149
Breaker of G1	7190.728	5718.538	14879.082
Breaker of G2	7190.728	5718.538	14879.082
Breaker of M1	8903.804	7780.986	21283.865

Pada contoh perhitungan pada Tabel 3 sampai 8, sumber tenaga listrik dihasilkan oleh dua buah generator sinkron yang beroperasi secara paralel. Data input generator diperoleh dari *technical specification document* generator dan dari nilai empiris begitu juga untuk motor, transformator dan kabel. Program menghitung kontribusi dari tiap-tiap komponen pada kondisi *sub-transient*, *transient* dan *steady state*. Selanjutnya

diasumsikan terjadi hubung singkat pada beberapa titik utama yaitu pada terminal generator 1, generator 2, terminal motor 1 dan terminal *equivalent* motor 1. Selanjutnya nilai arus hubung singkat diperoleh dengan mengurangi jumlah total kontribusi komponen dengan nilai kontribusi komponen pada titik terjadinya hubung singkat.

#### 4. Kesimpulan

Aplikasi perhitungan arus hubung singkat Dewaruci-Soton dikembangkan guna mendukung Rules for Electrical Installations (Pt. 1, Vol. IV) sekaligus untuk menghitung arus hubung singkat simetris a.c. tiga fasa pada instalasi kelistrikan pada kapal dan bangunan lepas pantai dengan mengacu standar IEC 61363. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi tersebut berhasil dikembangkan. Hal ini terlihat dari hasil validasi menggunakan program perhitungan komersial dengan deviasi tidak melebihi 1%. Hasil perhitungan juga sudah diaplikasikan pada perhitungan arus hubung singkat sistem instalasi tenaga listrik sederhana. Terbukti dengan aplikasi yang digunakan pemeriksaan perhitungan tersebut dapat dilakukan lebih cepat dan mengurangi tingkat kesalahan perhitungan. Selain itu data hasil perhitungan secara otomatis tersimpan dalam database yang sudah terintegrasi dengan Dewaruci sehingga lebih mudah dan cepat dalam proses akses data.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Darrell G Broussard, P.E, Understanding Short Circuit Motor Contribution, GE Industrial Solution, 2013
- [2] Dennis T. Hall, Practical Marine Electrical Knowledge – 3rd edition, Witherby-Seamanship International, 2014
- [3] General Electrical Company, Application information – Short Circuit Calculations for Industrial and Commercial Power Systems, GET-3550F 0489
- [4] Germanischer Lloyd, Short Circuit Calculation Program version GL ES 1 98, Information, 1998
- [5] International Electrotechnical Commission, IEC Report for Draft of Revised Publication 363, Short-Circuit Current Evaluation with Special Regard to Installations in Ships and Offshore Drilling Units – Appendix, 1990
- [6] International Electrotechnical Commission, Publication 60909-0 Short-circuit Current in Three Phase A.C Systems, Part 0: Calculation of Systems, 2016
- [7] International Electrotechnical Commission, Publication 61363-1 Electrical Installations of Ship and Mobile and Fixed Offshore Units, Part 1: Procedure for Calculating Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C, 1998
- [8] Jim McKeown, Programming in Visual Basic 2010 The Very Beginner’s Guide, Dakota State University, Cambridge University Press, Cambridge, 2010
- [9] Research and Development Division, Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), Rules for Electrical Installations Part 1- Seagoing Ships - Volume IV, Jakarta, 2016
- [10] Safety of Life at Sea (SOLAS) Consolidated Edition 2014, International Maritime Organization, London, 2014



**Angjuang Adi Panji Pratama**, adalah lulusan Teknik Sistem Perkapalan ITS Surabaya pada tahun 2008. Bergabung di PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero) sebagai staf peneliti pada Divisi Riset dan Pengembangan dan fokus pada penelitian dan pengembangan peraturan teknik bidang kelistrikan dan otomasi kapal. Dapat dihubungi melalui email [angjuang@bki.co.id](mailto:angjuang@bki.co.id).



**Hardika Ratditya Ardyanto**, adalah staf peneliti di Divisi Riset dan Pengembangan PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik pada tahun 2008 di Jurusan Teknik Per-

kapalan, FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dan menyelesaikan pendidikan Master of Marine Engineering pada tahun 2015 di Southampton University-Inggris spesialisasi Marine Robotics. Dapat dihubungi melalui email [hardika.ra@bki.co.id](mailto:hardika.ra@bki.co.id).



**Triyan Indrawan**, Merupakan staf peneliti Machinery, tim pengembangan software DEWARUCI, dan tim ship machinery incident investigation di Divisi Riset dan Pengembangan PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) tahun 2010 di Teknik Sistem Perkapalan ITS Surabaya. Dapat dihubungi melalui email [triyang@bki.co.id](mailto:triyang@bki.co.id).

# MARITIME ADMINISTRATION AND RECOGNIZED ORGANIZATION (RO)

Syafiuddin

## Abstract

*Flag States versus Recognized Organization; a different entities which have its own roles and responsibilities. The relationship between them was evolved when flag State as the Administrator needs an assistance from another entities (mostly Classification Societies) in effectively and efficiently controll their registered vessels. A lot of queries pertaining the monitoring aspect of such organization while performing the delegated task on behalf the flag State were raised. Since, at the same time, Classification Society as the ROs potential to perform dual functions; which is private function and public function. To facilitate this issue, IMO adopted Resolution MSC.349(92) which is known as RO Code. Under this Code, the mandatory requirements shall be fulfilled by the organization prior to be recognized as the RO, as well as the requirements for flag State shall be adhered to when authorizing an RO. Besides that, the monitoring aspect of RO also indicated in this Code.*

**Keywords:** flag State, RO, recognized organization, classification society.

## 1. Introduction

There are many actors that are playing an important role in the development of the international shipping. They are International Maritime Organization (IMO), Governments, Recognized Organization (RO), Shipowners/shipping companies and Seafarers. Each actor has its roles and responsibilities, for instance, IMO as one of the United Nation specialized body responsible for developing international standards concerning safety as well as pollution prevention related to the ships and the shipping activities.

On the other hand, Governments have responsibilities to implement and enforce these international standards and regulations. Apart from them, Governments (Administrations) mostly, involving RO when they have delegated their tasks to the RO (Barchue, 2009).

All of those actors should mutually support each other and cooperate to achieve the common goals which are safer shipping and cleaner ocean. This article discusses the relationship between Maritime Administration and RO with respect to the enforcement and implementation of international conventions and standards. The idea behind the monitoring scheme requirement for ROs also determined. To complement the discussion, relevant examples from the specific Administration as well as RO concerned (Indonesia and BKI) are presented.

## 2. Maritime Administration vs. RO

IMO Resolution A.1070(28) specifically describes the obligations and responsibilities of the Administration. With

respect to the maritime safety, security and protection of the marine environment, the roles of the Maritime Administrations are divided based on their capacity as the flag States, port States and coastal States.

With regard to the flag States functions, UNCLOS (1982) describes the duties of the Administration which are mentioned under Article 94 and 217. By geography, some states could have a greater role as the flag States function than as the port States and coastal States functions and vice versa. For instance, according to United Nations Conference on Trade and Development, UNCTAD (2015, p. 37), in Indonesia, the number of nationally flagged vessel is much higher compared to the foreign fleet. Therefore, their roles and functions as a flag States will be more significance (see Table 1).

When most of ships operate globally, it may become obstacles for the Administrations in exercising and enforcing their duties over their registered ships. They might face difficulties to control their ships effectively and efficiently. In some cases, also, the capacity and capability of their resources (surveyors) to perform all the requirements of the applicable conventions are limited.

Furthermore, the development of the *open registry* system had also raised an enormous burden on the Administration in the implementation and enforcement of their duties. UNCTAD (2015, p. 41) reported that more than seventy percent of the total world tonnage is registered under open registries (see Table 1). As the consequences, those states might not be able to administer and regulate their fleets effectively.

Table 1: Ownership of the fleet (propelled ships > 100GT), as of 1 January 2015

Rank (dwt)	Country/territory of ownership	Number of vessels			Dead-weight tonnage				
		National flag	Foreign flag	Total	National flag	Foreign flag	Total	Foreign flag as a % of total	Total as a % of world
1	Greece	796	3 221	4 017	70 425 265	209 004 526	279 429 790	74.80%	16.11%
2	Japan	769	3 217	3 986	19 497 605	211 177 574	230 675 179	91.55%	13.30%
3	China	2 970	1 996	4 966	73 810 769	83 746 441	157 557 210	53.15%	9.08%
4	Germany	283	3 249	3 532	12 543 258	109 492 374	122 035 632	89.72%	7.04%
5	Singapore	1 336	1 020	2 356	48 983 688	35 038 564	84 022 252	41.70%	4.84%
6	Republic of Korea	775	843	1 618	16 032 807	64 148 678	80 181 485	80.00%	4.62%
7	Hong Kong, China	727	531	1 258	56 122 972	19 198 299	75 321 271	25.49%	4.34%
8	United States	789	1 183	1 972	8 731 781	51 531 743	60 263 524	85.51%	3.47%
9	United Kingdom	477	750	1 227	12 477 513	35 904 386	48 381 899	74.21%	2.79%
10	Norway	848	1 009	1 857	17 066 669	29 303 873	46 370 542	63.20%	2.67%
11	Taiwan Province of China	117	752	869	4 681 240	40 833 077	45 514 317	89.71%	2.62%
12	Bermuda	5	317	322	289 818	41 932 611	42 222 429	99.31%	2.43%
13	Denmark	392	538	930	15 286 153	20 893 511	36 179 664	57.75%	2.09%
14	Turkey	576	954	1 530	8 321 506	19 366 264	27 687 770	69.95%	1.60%
15	Monaco		260	260		23 929 323	23 929 323	100.00%	1.38%
16	Italy	596	207	803	15 961 983	6 040 199	22 002 182	27.45%	1.27%
17	India	697	147	844	14 546 706	7 268 449	21 815 155	33.32%	1.26%
18	Brazil	228	163	391	3 150 493	17 308 798	20 459 291	84.60%	1.18%
19	Belgium	87	156	243	7 302 545	12 787 196	20 089 741	63.65%	1.16%
20	Russian Federation	1 291	448	1 739	5 920 435	12 403 644	18 324 079	67.69%	1.06%
21	Islamic Republic of Iran	157	70	227	3 986 804	14 093 340	18 080 144	77.95%	1.04%
22	Switzerland	47	291	338	1 403 668	16 492 768	17 896 436	92.16%	1.03%
23	Indonesia	1 504	153	1 657	12 908 577	4 120 935	17 029 512	24.20%	0.98%
24	Netherlands	775	445	1 220	6 589 901	10 415 708	17 005 609	61.25%	0.98%
25	Malaysia	466	142	608	8 430 359	7 707 526	16 137 885	47.76%	0.93%
26	United Arab Emirates	95	684	779	472 967	14 845 550	15 318 518	96.91%	0.88%
27	Saudi Arabia	86	155	241	2 004 631	11 358 349	13 362 980	85.00%	0.77%
28	France	180	277	457	3 517 344	7 636 312	11 153 656	68.46%	0.64%
29	Cyprus	141	179	320	3 811 947	6 858 661	10 670 608	64.28%	0.62%
30	Viet Nam	786	92	878	6 527 639	1 510 645	8 038 284	18.79%	0.46%
31	Kuwait	42	27	69	5 293 213	2 462 656	7 755 869	31.75%	0.45%
32	Canada	209	139	348	2 743 006	5 004 054	7 747 060	64.59%	0.45%
33	Oman	6	31	37	5 842	7 008 489	7 014 331	99.92%	0.40%
34	Sweden	101	234	335	1 248 460	5 194 955	6 443 415	80.62%	0.37%
35	Qatar	56	70	126	888 093	5 471 554	6 359 647	86.04%	0.37%
Total top 35 ship-owning countries		18 410	23 950	42 360	470 985 656	1 171 491 033	1 642 476 689	71.32%	94.69%
All others		2 962	2 486	5 448	35 004 138	51 845 622	86 849 760	59.70%	5.01%
Unknown country of ownership				717			5 234 918		0.30%
WORLD TOTAL				48 525			1 734 561 367		100.00%

Source: UNCTAD Secretariat

In addition, scarce availability of resources and lack of technical competencies, ineffective method of controlling, wide geographical coverage and increasing the span of control are considerably as the contributing factors that limit maritime administrations in exercising their control function. Indeed, the limited number of surveyors is a serious problem for most maritime administrations nowadays, especially in developing countries (Fikri, 2007, p. 21).

For instance, in Indonesia, according to the transportation statistics issued by Ministry of Transportation, there are 14,156 national fleets served by 682 ports and most of ships are employed in coastal and inter-island shipping. The number of ship's call is 265,209 which is served by only 392 marine surveyors (DGST, 2014, p. 45-67).<sup>1</sup> As the consequences, it is shown that the ratio between the number of marine surveyors compares to the number of ships, number ship's call and coverage area are considerably insufficient. Hence, all of these issues became a basic argument of the delegation authority to the RO.

## 2.1. RO Code

IMO Resolution MSC.349(92)<sup>2</sup> provides definition of RO, which is:

*“Recognized organization (RO) means an organization that has been assessed by a flag State, and found to comply with this part of the RO Code.”*

Under this Code, several requirements shall be fulfilled before the organization to be recognized as an RO. Although there is not an implicit statement which mentioned that RO should be a classification societies, Mansell (2009, p. 139) stated that the organizations that likely satisfy and comply with those requirements are, in most cases, *Classification Societies*.

In fact, many flag States used the provisions of regulation I/6 of SOLAS 74, Article 13 of Load Lines 66, regulation 4 of Annex I and regulation 10 of Annex II of MARPOL 73/78 and Article 6 of Tonnage 60 as the legal basis to authorized their duties to the RO to act on their behalf. In practice, it is accepted among states that delegation of authority is not only widely applied but also legally legitimate.

To facilitate this relationship IMO provides flag States with guidelines which contain minimum criteria against which organizations are assessed towards recognition and

authorization and also guidelines for the oversight program. Indeed, this code is called RO Code which consists of three parts:

- i. the mandatory requirements that the organization shall fulfill to be recognized by flag States (part 1),
- ii. the mandatory requirements that the RO shall fulfill when performing statutory certification and services on behalf of flag States and the mandatory requirements that flag States shall adhere to when authorizing an RO (part 2),
- iii. guidelines for flag States oversight of ROs (part 3).

## 2.2. Good relationship between Maritime Administration and RO

Following to the above, relationship between flag States and RO in term of a delegation of authority will become a **“good relationship”** if both of them manage an effort to fulfill their mandatory requirement under RO Code and also based on the agreement had been made. For instance, on the flag States side, prior giving authorization to the RO, they shall confirm that such RO has capability and capacity to exercise the delegated task in compliance with the international and national legislation. Also, flag States shall not authorize functions beyond RO's capabilities.

Besides that, with regard to the delegation authority, the most important aspect is flag States shall establish the legal basis of the authorization is administered. For instance, by providing formal written agreement with RO that contains the detailed scope of authorization.

With regard to the element to be included in the agreement, flag States may refer to Appendix 3 of RO Code and MSC/Circ.710-MEPC/Circ.307.<sup>3</sup>

Regarding the communication of information, under MSC/Circ.1010-MEPC/Circ.382,<sup>4</sup> flag States are requested to submit a report on the specific responsibilities and conditions of authorities delegated to RO. To facilitate this issue IMO established the mechanism to provide a direct reporting system as stipulated under resolution A.1029(26).<sup>5</sup> Such system namely GISIS and list information of authorized RO is available there. For instance, information is given in GISIS, particularly in Indonesia shown that there

<sup>3</sup> MSC/Circ.710-MEPC/Circ.307 Model agreement for the authorization of Recognized Organizations acting on behalf of the Administration

<sup>4</sup> MSC/Circ.1010-MEPC/Circ.382 Communication of information on the authorization of Recognized Organizations (ROs).

<sup>5</sup> Resolution A.1029(26) Global Integrated Shipping Information System (GISIS).

<sup>1</sup> DGST (Directorate General of Sea Transportation)

<sup>2</sup> Resolution MSC.349(92) Code for Recognized Organization (RO Code)

are six ROs had been authorized, which are ABS, BV, DnV, LR, NKK and BKI.<sup>6</sup>

However, information provided in GISIS were considered out of dated, since not all of flag States are updated their detail information in GISIS system (Mansell, 2009, p. 113).

On the RO side, they shall perform the delegated task based on the agreement has been made and in accordance with the international standards. For instance, according to RO Code part 2 section 2, they shall develop and implement a Quality Management System (QMS) that complies with the requirement of RO Code and should be based on minimum the ISO 9000 series. They also shall carry out audits (*internal audit* and *vertical contract audit* (VCA)) in order to continuously improve the effectiveness of their QMS.

Besides that, their QMS shall be periodically assessed and certified by the qualified body that is a member of International Accreditation Forum (IAF) or by the Accredited Certification Bodies (ACB) approved by IACS.<sup>7</sup> For instance, based on IAF Committee Members (2016), the accreditation body for Indonesia is Komite Akreditasi Nasional (KAN).<sup>8</sup>

### 3. The idea behind the requirement of a monitoring scheme for RO

Following to the above discussion, the key factor concerning delegating authority is the monitoring aspect. Monitoring activities are needed to confirm that RO is performing the delegated task in accordance with the agreement has been made and also in compliance with the international standards. Besides that, monitoring scheme is one of the obligations of the flag States raised when they have delegated their authority to the RO. Monitoring scheme under this code is called "*oversight programme*".

Provision regarding monitoring scheme over RO is provided in part 3 of RO Code section 5.1 which stated that:

*"The flag State should establish or participate in an oversight programme with adequate resources for monitoring of, and communication with, its RO(s) in order to..."*

Moreover, there are at least two ideas behind the requirement of oversight programme over RO, which are:

1. Classification Society as the ROs can perform dual functions: private and public functions

The issue of authorization and delegated power always creates pros and cons and became an endless discussion for a long time. Once the RO obtain the authorization from the Administration, it can be assumed that such RO become the extension-hand of such Administration (as the marine inspector). Meanwhile, at the same time, RO also perform their task as the Class surveyor. As the consequence of this legitimate power, Class Society may perform an ambiguous and dualism functions which are the private function and the public function (Mansell, 2009, p. 128; Lagoni, as cited in Takei, 2013, p. 122 and Lagoni, as cited in Bruyne, 2014, p. 182).

Responding to the above argument, people from class society believe that this dual function brings advantage for simplicity and efficiency reason. Moreover, they said that it is a compromise solution since all parties will be mutually beneficial. Administrations with their limited resources still can perform their duties, whilst shipowners will be easily accessing the required surveyors with a worldwide network, and Class Society receive substantial revenue for their performances (Fikri, 2007, p. 10).

On the other side, the oppositions argued that there is a potential of unhealthy relationship among those parties. Its impartialities and independencies were questionable. Issue on the conflict of interest was also raised. Since, Class Society might perform simultaneously as a public and private entity (Mansell, 2009, p. 128). In addition, Barchue (2009) said that some ROs also have other business interests with ships registered in the flag States that has authorized such RO.

This condition leads to the intensification of commercial pressures on the ROs concerned, which sometimes creates a conflict between the role of an authorized flag State's surveyor and their commercial interest as the class society's surveyor.

Besides that, recalling the provision of SOLAS regulation I/6(d) which stated that:

*"in every case, the Administration shall fully guarantee the completeness and efficiency of the inspection and survey, and shall undertake to ensure the necessary arrangements to satisfy this obligations."*

It means that even though flag States have delegated their task to the RO, the responsibility for such delegation remains belong and attached to the flag States. Hence, it is a necessity for the flag States to perform monitoring scheme

<sup>6</sup> <https://gisis.imo.org/Public/RO/Default.aspx>

<sup>7</sup> The details of audit scheme are given in IACS Procedure, Vol. 3, IACS-QSCS. For the list of ACB, see <http://www.iacs.org.uk/document/public/explained/List%20of%20ACBs.pdf>

<sup>8</sup> [http://www.iaf.nu/articles/IAF\\_MEM\\_Indonesia/78](http://www.iaf.nu/articles/IAF_MEM_Indonesia/78)

to confirm that such RO performs their delegated task in accordance with the assigned authority based on the agreement had been made and also in compliance with the international standards.

## 2. Monitoring scheme of RO as tools to improve flag State's performance

There are many factors that can be considered in assessing flag States performance, for instance, ICS (2015)<sup>9</sup> considered several factors to determine flag States performance which are:

- (i) record of PSC inspection of ships, for example, Tokyo MoU
- (ii) ratification of major international maritime treaties:
  - SOLAS 74 including 1988 Protocol,
  - STCW 78,
  - MARPOL 73/78 including its annexes,
  - ICLL 66,
  - MLC 2006 and
  - CLC/Fund 92.
- (iii) use of RO complying with resolution A.739(18)
- (iv) age of the fleet
- (v) reporting requirements
- (vi) attendance or participation at IMO meetings

ICS released a report of flag States performance in tabular form and performance levels were symbolized by a green and red squares. Green squares indicates a positive performance indicators, vice-versa, negative performance indicates by the red squares. As seen in Table 2, particularly related to PSC and RO factors, there are many States (still) indicates a negative performance.

In addition, in its annual report, Tokyo MoU (2014) has tabulated performance of RO, which is derived from the number of RO related deficiencies. In those data, there is a note of 'RO responsible' which simply means that RO has a contribution to that deficiencies. The data showed that there is still a different performance levels of RO when exercising their delegated task. For instance, BKI as one of RO authorized by Indonesia showed a medium performance, whilst the others showed a high performance (see Table 3). Hence, it can be said that the performance of RO could affect and influence the flag States performance.

The above condition also perceived by the European Commission together with the other 27 European Countries when they were submitted a proposal regarding the development of a Code for RO. In their proposal, they used the evidence taken from a different port State control activities which indicated that significant number of ships

were detained or found with a considerable number of deficiencies soon after being surveyed by ROs (IMO, 2008). Those facts clearly shows that the monitoring scheme over RO is needed to continuously improve the performance of RO. As a result, flag States performance will also be improved.

## 4. Means of monitoring scheme over Ros

Provisions regarding monitoring RO is provided in part 3 of RO Code. Under this Code, flag States can perform monitoring activities over ROs through the oversight program that the purpose of which is to ensure that RO is performing their delegated task in accordance with the agreement or contract had been made, the international standards and also according to the national legislations.

Means of monitoring could be implemented in several ways, for instance, in the form of audits, inspections and audit observations (IMO, 2013a). For instance, in Indonesia, DGST as the Administration that has given authorization to BKI, performed monitoring scheme reflected in several activities, for instance:

### ✓ Monitoring activities in term of audit

On October 2015, DGST (Directorate General of Sea Transportation) as the Administration had audited BKI, which is one of National Classification Society to be an RO. Audits carried out to the head office in Jakarta and several branch offices such as Sorong, Balikpapan, Batam and Singapore office (BKI, 2015). Following completion of the audits, information regarding authorization of RO for Indonesia in GISIS<sup>10</sup> had been updated.

### ✓ Monitoring activities in term of data verification

DGST only gives 'partial authorization' to BKI, which means that BKI only authorized to issued the interim or provisional certificates. Full-term certificates will be issued by DGST after the final report submitted by BKI to DGST. Also, if necessary, additional verification might be performed by DGST at any time (DGST, 1996).

### ✓ Monitoring activities in term of specific inspections

On several occasions, DGST sent their auditors to carry out joint survey and audit together with BKI's auditors. For instance, when BKI as RO performs ISM renewal audit either for company verification (DOC) or onboard verification (SMC), there will be representatives from DGST. In this case, they were acted as an observer.

<sup>9</sup> ICS (The International Chamber of Shipping)

<sup>10</sup> <http://www.gisis.imo.org/Public/RO/BrowseCountry.asp?Country=IDN>

Table 2: Flag States performance, as of 1 December 2015

	PORT STATE CONTROL						RATIFICATION OF CONVENTIONS						A739 RECOGNIZED ORGANIZATIONS	AGE AGE OF FLEET	REPORTS		IMO IMO MEETINGS ATTENDANCE
	PARIS MOU WHITE LIST	NOT ON PARIS MOU BLACK LIST	TOKYO MOU WHITE LIST	NOT ON TOKYO MOU BLACK LIST	USCG QUALS HIP 21	NOT ON USCG TARGET LIST (SAFETY)	SOLAS 74 (AND 88 PROTO COL)	MAR POL INC (INCLUDING ANNEXES I - II)	MAR POL ANNEXES III - VI	LL 66 (AND 88 PROTO COL)	STCW 78	ILO MLC			CIC/RJND 92	STCW 95 'WHITE LIST'	
ALBANIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	N/S	■	■	■	
ALGERIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
ANTIGUA & BARBUDA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
ARGENTINA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	N/S	■	■	■	
AUSTRALIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BAHAMAS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BAHRAIN	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	N/S	■	■	■	
BANGLADESH	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BARBADOS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BELGIUM	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BELIZE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BERMUDA	■	■	■	■	■	■	UK	UK	UK	UK	UK	UK	■	■	■	■	
BOLIVIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BRAZIL	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
BRITISH VIRGIN ISLANDS	■	■	■	■	■	■	UK	UK	UK	UK	UK	UK	■	■	■	■	
BULGARIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
CAMBODIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
CANADA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
CAYMAN ISLANDS	■	■	■	■	■	■	UK	UK	UK	UK	UK	UK	■	■	■	■	
CHILE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
CHINA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
COLOMBIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
COMOROS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
COOK ISLANDS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
COSTA RICA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
COTE D'IVOIRE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	N/S	■	■	■	
CROATIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
CUBA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
CURACAO	■	■	■	■	■	■	NL	NL	NL	NL	NL	NL	■	NL	NL	NL	
CYPRUS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
DEM. PEOPLE'S REP. KOREA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
DEM. REP. OF THE CONGO	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	N/S	■	■	■	
DENMARK	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
DOMINICA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
EGYPT	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
ESTONIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
FAROE ISLANDS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
FINLAND	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
FRANCE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
GEORGIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
GERMANY	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
GHANA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	N/S	■	■	■	
GIBRALTAR	■	■	■	■	■	■	UK	UK	UK	UK	UK	UK	■	■	■	■	
GREECE	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
HONDURAS	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
HONG KONG (CHINA)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
ICELAND	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
INDIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
INDONESIA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Source: The International Chamber of Shipping (ICS)

Table 3: Performance of ROs according to Tokyo MoU

Recognized organization (RO)	No. of overall inspections 2012-2014	No. of RO responsible detentions 2012-2014	Low/medium Limit	Medium/high Limit	Excess factor	Performance level
SingClass International Pte Ltd	171	4	7	0	0.58	Medium
Polski Rejestr Statkow	82	1	4	0	0.38	
Croatian Register of Shipping	103	1	5	0	0.31	
Sing-Lloyd	292	4	10	1	0.29	
Korea Classification Society (former Joson Classification Society)	688	11	20	7	0.29	
Universal Maritime Bureau	872	14	25	10	0.26	
International Naval Surveys Bureau	122	1	5	0	0.26	
Universal Shipping Bureau	156	1	6	0	0.19	
International Ship Classification	905	13	26	11	0.16	
Union Bureau of Shipping	2,864	48	70	44	0.14	
Biro Klasifikasi Indonesia	283	2	10	1	0.08	
Panama Shipping Registrar Inc.	332	2	11	2	0.01	
International Register of Shipping	863	10	25	10	0	
Global Marine Bureau	1,131	14	31	14	-0.04	
Overseas Marine Certification Services	1,037	8	29	13	-0.59	
Intermaritime Certification Services, S.A.	1,320	11	35	18	-0.61	
Isthmus Bureau of Shipping	1,477	12	39	20	-0.67	
Indian Register of Shipping	283	0	10	1	-0.75	
Panama Maritime Documentation Services	1,336	6	36	18	-1.12	
DNV GL AS	994	3	28	12	-1.27	
Vietnam Register	2,404	7	60	36	-1.53	
CR Classification Society	930	1	26	11	-1.65	
Russian Maritime Register of Shipping	1,338	2	36	18	-1.66	
Germanischer Lloyd	9,419	18	211	166	-1.76	
Bureau Veritas	9,967	17	223	176	-1.79	
American Bureau of Shipping	9,630	15	216	170	-1.81	
Nippon Kaiji Kyokai	29,280	38	626	546	-1.85	
Det Norske Veritas	10,849	9	241	192	-1.90	
Lloyd's Register	11,992	10	266	214	-1.90	
Korean Register of Shipping	8,582	3	193	150	-1.95	

Source: Annual report on Tokyo MoU (2014)

## 5. Conclusion and Recommendation

Maritime Administrations have the main responsibility to enforce and implement international conventions and standards that have been created and developed by IMO. When discussing the effectiveness of implementation of such conventions and Administration aware of their restrictions, they begin to find an option to delegate and authorize some of their duties to another entity, which is RO.

IMO elaborated this issue by establishing several guidances to ensure that such authorization is effectively monitored. For instance, IMO developed resolution A.739(18), resolution A.789(19), and MSC/Circ.710-MEPC/Circ.307 as

guidelines for flag States in performing their delegation of authorities.

However, many issues regarding monitoring aspect raised over time, since professionalism of ROs in exercising their delegated task is still questionable. Since they may perform dual functions on one occasion. In addition, the performance of flag States reflected in several PSC activities such as Tokyo MoU remains highlighted different levels of performance. Hence, it can be concluded that, other than as obligations, it is a necessity for the flag States to perform a monitoring scheme to confirm that RO performs their delegated task in accordance with the assigned authority

based on the agreement had been made and also in compliance with the international standards.

To encounter this issue IMO provides flag States with the guidelines for monitoring scheme over RO that accommodated in part 3 of RO Code. Under this code, monitoring scheme over RO could be implemented in the forms of audits and analysis of the report. Beside that flag States can also verify the performance of RO from the result of their quality management system's (QMS) audit. Even though this guideline is not mandatory, IMO recommend flag States to use the recommendatory provision contained in it as a basis for a relevant standard in their countries.

Finally, to achieve an effective and efficient monitoring scheme, it is recommended that Administrations establish the monitoring systems, which includes the following aspects:

- Communication procedure between flag States and RO
- Reporting procedure by RO to the flag States
- Flag States additional ship's inspection
- Consultations between ROs related to the technical and safety
- Acceptance or evaluation of the certification of the RO's quality management system
- Verification and monitoring of statutory certification and services.

## 6. References

- [1] Barchue, L. D. 2009. The voluntary IMO member state audit scheme: An accountability regime for states on maritime affairs. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 8(1), 61-70.
- [2] *BKI to be recognized organization of government*. 2015.
- [3] Bruyne, J. D. 2014. Liability of classification societies: Cases, challenges and future perspectives. *Journal of Maritime Law & Commerce*, 45(2), 181-232.
- [4] DGST. 1996. *Keputusan direktur jenderal perhubungan laut No. PY-67/1/7-96*. Jakarta.
- [5] DGST. 2014. *Statistik perhubungan 2014*. Jakarta.
- [6] Fikri, I. 2007. *Flag state control: an overview and its relationship with port state control*. World Maritime University, Malmö.
- [7] IAF. 2016. *IAF MLA committee members*.
- [8] ICS. 2015. *Shipping industry flag state performance table 2015/2016*. London.
- [9] IMO. (2008). *Work programme: Development of a code for recognized organizations (RO code) (MSC 84/22/13)*. London.
- [10] IMO. 2013a. *Code for recognized organization (RO code) (Resolution MSC.349(92))*. London.
- [11] Mansell, J. K. 2009. *Flag state responsibility: Historical development and contemporary issues*. Berlin: Springer.
- [12] Takei, Y. 2013. Assessing flag state performance in legal terms: Clarification of the margin of discretion. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 28, 97-133.
- [13] Tokyo MOU. 2014. *Annual report on port state control in the asia-pacific region 2014*. Tokyo.
- [14] UNCLOS. 1982. United nations convention on the law of the sea (UNCLOS).
- [15] UNCTAD. 2015. *Review of maritime transport 2015*. New York and Geneva.



**Syafiuddin**, Technical Staff at Research and Development Division, PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero).  
e-mail : syafiuddin@bki.co.id

# KEBAKARAN KAMAR MESIN *MT. NUSA BINTANG* SAAT BONGKAR MUATAN DI JETTY TERMINAL LPG TANJUNG SEKONG, CILEGON

(Teguh Sastrodiwongso\*), (Lamberth Manupassa\*\*), (Aleik Nurwahyudy\*\*\*)

## Abstrak

*MT. Nusa Bintang, an Indonesian flag LPG carrier was on fire at the time she unloading her cargo. The accident occurred alongside LPG Jetty Terminal Tanjung Sekong, Cilegon in November 2015. The fire was able to be extinguished within two hours and fortunately the cargo tanks and the LPG in the tanks were unharmed. The Engine Room (E/R) and part of the Superstructure above E/R were heavily burnt and 2 ship crews were injured as victim of the fire in E/R. The National Transportation Safety Committee (NTSC) has carried out the investigation of the accident. It was concluded that the fire originated by the accident of no.2 Auxiliary Engine (A/E no.2) as one of three unit Electric Generators in the ship and then spread over E/R. The out of order A/E no.2 was due to the broken connecting bolts of piston rod (cylinder no.3) to the crank shaft of engine. The released connecting rod, the piston and its crown might collide the inside of crank case, ignited fire and explosion happened. The broken bolts were examined in the metallurgy laboratory to visual observation for finding the cause and sequence of the accident instead of technical condition of the bolts. The analysis result concluded that the way to tighten the bolts was unproper.*

*Keywords: LPG Carrier, fire, auxiliary engine, top overhaul, broken bolts.*

## 1. Pendahuluan

Kapal berbendera Indonesia *MT. Nusa Bintang* ex Cornwall, berbobot mati 9199 DWT pengangkut *liquefied petroleum gas* (LPG) mengalami kebakaran di Kamar Mesin pada bulan Nopember 2015. Pada saat kejadian kapal sedang sandar untuk melakukan bongkar muatan 8000 metric ton LPG di Jetty Terminal LPG Tanjung Sekong, Cilegon. Kapal yang dimaksud diklaskan dengan *dual class* Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan *Lloyds Register of Shipping* (LR).

Seperti diketahui, kapal pengangkut LPG seperti halnya kapal tanker lain, rawan mengalami ledakan dan kebakaran. Pada peristiwa kebakaran tersebut, menjalarnya api berhasil dilokalisir di kamar mesin dan *superstructure* di atasnya sehingga tangki-tangki beserta muatannya dapat diselamatkan. Akibat kebakaran tersebut Kamar Mesin dan bangunan di atasnya mengalami kerusakan cukup berat. Selain itu juga menyebabkan 2 orang ABK Mesin mengalami luka bakar tingkat tiga. Meskipun demikian kebakaran kapal ini berhasil dipadamkan dalam waktu relatif singkat.

Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) sesuai dengan tugas dan kewenangannya telah melakukan investigasi kasus terbakarnya kapal tersebut untuk mencari sebab terjadinya kebakaran dan telah menyampaikan *draft final report* hasil

investigasi kepada pihak-pihak terkait, yang antara lain *owner* kapal, operator kapal dan regulator untuk mendapatkan tanggapan mereka. *Report* KNKT tersebut berisikan informasi faktual terkait langsung maupun tidak langsung dengan terjadinya peristiwa, analisis untuk menghasilkan kesimpulan penyebab kebakaran dengan faktor-faktor yang berkontribusi dan butir-butir rekomendasi yang terkait dengan temuan-temuan selama proses investigasi. Metodologi investigasi kebakaran yang digunakan adalah mengacu pada penentuan penyebab komponen segitiga kebakaran yang mencakup oksigen, benda mudah terbakar dan pemicunya [Kirk and Dehaann, 2011]. Identifikasi terhadap barang bukti di lapangan selanjutnya diteliti lebih lanjut dengan menggunakan kaidah keilmuan terkait sehingga didapatkan gambaran jelas tentang proses terjadinya kecelakaan.

Tulisan ini disiapkan dengan mengacu pada bagian dari report tersebut antara lain: informasi faktual kapal, kronologi terjadinya peristiwa kebakaran dan analisis untuk mencari sebab terjadinya kebakaran. Diharapkan tulisan ini dapat dijadikan bahan referensi bagi para Perwira Mesin kapal dan *Class Surveyor* dalam menjalankan tugas masing-masing terkait dengan kerusakan komponen mesin kapal yang menjadi faktor terjadinya peristiwa sekaligus menjadi *feedback* kepada KNKT.

## 2. Informasi Faktual Kapal

MT. Nusa Bintang ex Cornwall (IMO No. 9005508) adalah kapal pengangkut *liquefied petroleum gas* (LPG) berbendera Indonesia. Kapal konstruksi baja ini dibangun pada tahun 1992 di galangan kapal Cantieri Navali SpA, Italia. Kapal diklaskan dengan *dual-class*, yaitu pada BKI dan LR. Saat terjadinya musibah kebakaran status “Klas kapal” masih dipertahankan. Selanjutnya gambaran Kapal MT. Nusa Bintang secara umum dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 : MT. Nusa Bintang pada saat sandar

### 2.1 Ukuran Utama Kapal

Ukuran utama dari MT. Nusa Bintang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 - Data ukuran utama MT. Nusa Bintang

Principle Dimension of MT. Nusa Bintang	
Length over all (Loa)	145.03 m
Length between perpendiculars (Lpp)	109.40 m
Breadth (B)	20.00 m
Height (H)	10.00 m
Draught max. (Tmax)	6.03 m
Freeboard	1673 mm
Deadweight (Dwt)	9199ton
Light weight (Lwt)	6903ton
Gross Tonnage (GT)	11361
Net Tonnage (NT)	4774

### 2.2 Permesinan Kapal

#### Mesin Induk

Propulsi kapal *single screw* dan *single rudder* ini dengan menggunakan 1 (satu) unit mesin induk, motor diesel 4 langkah merk *Sulzer* tipe 5RTA52 dengan daya 9600 HP menggerakkan satu *fixed pitch propeller*. Pada putaran mesin maksimum (MCR) kecepatan kapal dapat mencapai 17 knot.

#### Mesin Bantu Pembangkit Listrik

Daya listrik kapal dihasilkan dari 3 unit mesin bantu pembangkit listrik atau mesin generator listrik (*Auxiliary Engine =A/E*), mesin A/E no.1, mesin A/E no.2 dan mesin A/E no.3. Ketiga mesin penggerak generator listriknya masing-masing adalah motor Diesel merk MAN B&W model: 6 L 23/30 pembuatan tahun 1990 dengan daya 790 kW pada putaran maksimum mesin [MAN, 2009]. Untuk proses bongkar muat, dioperasikan 2 unit mesin A/E sedangkan 1 unit lain untuk *standby*.

#### Tangki Muat dan Peralatan Muat

MT. Nusa Bintang didesain untuk dapat mengangkut beberapa jenis muatan komponen dari LNG seperti butan, butadiene, propane, propylene, ammonia dan VCM (*Vinyl Chloride Monomer*). Kapal memiliki 6 (enam) tangki muat jenis tangki kompresi berbentuk silinder tipe C dengan kapasitas total sebesar 16 664 m<sup>3</sup>. Tangki-tangki muat bentuk silindris tersebut ditempatkan pada sisi kiri dan kanan bagian depan kapal yang lokasinya di depan kamar mesin dimana ada bangunan atas kapal (*superstructure*) di atasnya.

Untuk pemuatan, kapal dilengkapi dengan:

- 6 (enam) unit *deepwell pump* dengan kapasitas @ 250 m<sup>3</sup>/jam
- 2 (dua) unit *cargo booster centrifugal pump* dengan kapasitas @ 250 m<sup>3</sup>/jam
- 3 (tiga) unit *Cargo Compressor 2 stage* dengan kapasitas @ 1063 m<sup>3</sup>/jam

### 2.3 Muatan Kapal

MT. Nusa Bintang membawa 8000 KL muatan LPG. LPG merupakan substansi yang biasanya terdiri dari dua unsur utama, yaitu propane dan butane. Kedua substansi ini dapat dikemas secara terpisah atau dicampur sekaligus dalam pengapalannya.

Secara umum, gas yang dicairkan merupakan *hydrocarbon* dan tingkatan titik bakarnya yang membuat gas ini menjadi sumber energi dunia. Namun titik bakar itu juga yang membuat gas ini menjadi sangat berbahaya. Dikarenakan pengiriman gas ini dalam jumlah yang sangat besar harus dipertimbangkan secara seksama tentang keselamatannya terutama potensi kebocoran dan pembatasan terhadap seluruh resiko sumber kebakaran.

LPG merupakan gas yang sangat mudah terbakar. Jika terjadi kebocoran yang berupa cairan atau gas, prioritas utama dalam kondisi darurat yang harus diperhatikan oleh Tim Penanganan Darurat harus berfokus pada:

- Menghentikan aliran gas
- Mencegah terjadinya percikan api atau potensi kebakaran lain
- Menghilangkan awan gas yang timbul

## 2.4 Kondisi Mesin Bantu No. 2

Kapal MT. Nusa Bintang menjalankan sistem perawatan PMS (*Planned Maintenance System*). Seperti telah diuraikan sebelumnya, motor penggerak generator listrik A/E no.2 adalah motor Diesel merk MAN B&W tahun pembuatan 1990. Dengan demikian pada saat kejadian, mesin utama telah berumur sekitar 25 tahun.

Dari data kinerja mesin pada pemeriksaan terakhir pada 19 Nopember 2015, menunjukkan bahwa *running hour* A/E no. 2 telah mencapai 74.478 jam. Berdasarkan keterangan ABK Mesin diketahui bahwa mesin A/E no. 2 telah beberapa kali mengalami perbaikan baik yang bersifat perbaikan ringan maupun perbaikan keseluruhan (*overhaul*). Seminggu sebelum peristiwa kebakaran di kapal ini, perbaikan *top overhaul* juga telah dilakukan pada mesin A/E No. 2 silinder no. 1 dan no. 6.

Pada tanggal 19 Nopember 2016 saat pemuatan LPG dilaksanakan di terminal LPG Teluk Semangka, ABK Mesin melakukan *top overhaul* mesin A/E no.2 termasuk penggantian baru *packing seal cylinder head* pada silinder no. 3. Pekerjaan *top overhaul* mesin A/E no. 2 selesai dilakukan pada hari itu juga dan Masinis-II telah melakukan uji-coba (*running test*) dengan menyalakan mesin dan hasil tes dinyatakan baik.

Dalam pelaksanaan PMS, semua pekerjaan perbaikan mesin dan hasil tes tersebut seharusnya dicatat dan akan di-audit oleh pihak Klas BKI dan/atau LR. Bila kapal juga mengikuti sistem CMS (*Continuous Machinery Survey*) yang diberikan Klas, maka kehadiran *Class Surveyor* untuk pemeriksaan perbaikan mesin dan tes-nya dapat diwakilkan kepada KKM dan Perwira Mesin lain yang diakui dan telah ditunjuk pihak Klas tersebut.

## 2.5 Kerusakan stang piston silinder no.3 mesin bantu no.2

\*. Pengikatan pena batang

Baut pengikat atau pena batang ini dipasang untuk mengunci pengikatan *stang piston (piston rod)* pada poros engkolnya (*crank shaft*). Pada saat pemasangannya perlu diperhatikan ukuran besarnya torsi pada masing-masing pena batang. Gaya puntir yang dihasilkan pada masing-masing pena batang harus sama dan dilakukan pengukuran secara berkala pada saat perbaikan. Pengikatan yang melebihi batas bisa menyebabkan timbulnya tegangan mula yang dapat mempercepat putus baut pena engkol. Pergantian terhadap komponen perlu diperhatikan pada saat kinerja mesin mencapai 25000 sampai dengan 30000 jam [Arends, 2010].

Berdasarkan keterangan Perwira Mesin, *overhaul* besar mesin A/E no. 2 dilakukan pada tahun 2014 yang dilakukan oleh pekerja darat. Catatan ABK Mesin kapal menyatakan bahwa

pada saat itu dilakukan pembongkaran dan pemasangan ulang seluruh komponen mesin A/E no. 2 termasuk bongkar/pasang komponen-komponen mesin terkait dengan perbaikan pada silinder no. 3. Pada periode berikutnya perawatan mesin A/E no. 2 yang dilakukan merupakan perawatan rutin seperti halnya pekerjaan *top overhaul* yang dilakukan sebelum kejadian.

Karena kapal melaksanakan PMS, maka waktu jatuh tempo penggantian baru masing-masing komponen mesin termasuk pena-pena batang mesin A/E no.2 sudah ada jadwalnya. Perlu dijadikan perhatian, bahwa sampai dengan hari terjadinya peristiwa, Klas kapal masih dipertahankan. Bila segala aturan dilaksanakan sebagaimana mestinya, maka instalasi mesin kapal masih memenuhi persyaratan, termasuk mutu komponen mesin pena-pena batang, cara-cara pemasangan baut pena engkol dan pengikatan serta *final check*-nya.

Sejauh investigasi yang dilakukan, KNKT belum memperoleh record kapan ada penggantian baru komponen-komponen mesin A/E no. 2, sehingga belum ada data umur komponen mesin pena batang yang putus. Investigasi KNKT tidak menemukan adanya catatan di kapal tentang adanya besaran kuncian torsi pada baut pena engkol di mesin A/E no. 2 khususnya pada silinder no. 3.

Seperti diketahui, ada beberapa hal yang dapat menyebabkan timbulnya perbedaan torsi atau kekuatan ikat pena engkol, a.l :

- Pada waktu pemasangan pena engkol batang penghubung di silinder no. 3 dimungkinkan terjadi perbedaan kekuatan penguncian.
- Bahan logam yang cacat dan pengerjaannya yang buruk dapat menyebabkan baut pengikat bantalan pena engkol patah.

## 3. Kronologi Peristiwa Kebakaran dan Upaya Pemadamannya

Tanggal 19 Nopember 2015, MT. Nusa Bintang melakukan pemuatan 8000 metric Ton LPG di terminal LPG Teluk Semangka. Sementara pemuatan dilaksanakan, ABK Mesin melakukan *top overhaul* Mesin Bantu Pembangkit Listrik (Auxiliary Engine =A/E) no.2 termasuk penggantian baru *packing seal cylinder head* pada silinder no.3. Pekerjaan *top overhaul* mesin A/E no. 2 selesai dilakukan pada hari itu juga dan Masinis-II telah melakukan uji-coba (*running test*) dengan menyalakan mesin dan hasil tes dinyatakan baik. Pada *running test* baik dari *Class Surveyor* BKI ataupun LR tidak dihadirkan. Pukul 14.42 WIB, kegiatan *loading* muatan LPG selesai dan kira-kira dua setengah jam kemudian kapal bertolak dari terminal LPG Teluk Semangka menuju Tanjung Sekong untuk unloading 8000 metric Ton LPG.

Tanggal 20 Nopember 2015, pukul 08.24 WIB, kapal tiba di Tanjung Sekong dan kira-kira 15 menit kemudian kapal telah

bersandar di Jetty Terminal LPG Tanjung Sekong. KKM memerintahkan Masinis-III menjalankan mesin A/E No.1 dan mesin A/E No.3 untuk mensuplai daya listrik ke pompa muatan. Pukul 09.18 WIB, tim darat yang terdiri dari keagenan kapal dan *Loading Master* bersama-sama tim kapal melakukan *discharging briefing* tentang keselamatan proses bongkar muat. *Briefing* keselamatan tersebut juga mencakup *checklist* yang berisi hal-hal yang perlu diperhatikan pada saat bongkar muat, termasuk pembagian kewenangan terhadap kondisi tanggap darurat yang dapat terjadi.

Pukul 10.42 WIB, *Marine Loading Arm* (MLA) disambungkan dengan *cargo manifold* di kapal dan kira-kira 6 menit kemudian dilakukan pengujian kebocoran dan dinyatakan *loading system* dalam kondisi baik dan siap untuk dilaksanakan pembongkaran. Pukul 11.42 WIB, proses bongkar muat mulai dilakukan, Mualim-I memeriksa kondisi *manifold* pemuatan secara reguler.

Pukul 12.00 WIB pada saat istirahat makan siang, KKM memberi perintah Masinis-III (Masinis Jaga) supaya menjalankan juga mesin A/E no.2 untuk berjaga-jaga (*standby*) membantu suplai daya listrik ke pompa bongkar muatan LPG. Pukul 13.30 WIB, Masinis-II dan *Electrician* datang di Kamar Mesin untuk melakukan perawatan satu unit pembangkit air tawar (*freshwater generator*).

Pukul 14.45 WIB, Masinis-III menuju ke *engine control room* (ECR) untuk menyalakan mesin A/E no.2. dengan posisi *standby* suplai daya listrik. Pada saat itu proses pembongkaran muatan telah mentransfer muatan LPG ke darat sekitar 800 KL dari rencana 8000 KL. Beberapa saat mesin A/E no.2 setelah mulai berjalan, terdengar bunyi dan getaran abnormal, Masinis Jaga bergegas kembali ke ECR untuk mematikan mesin tersebut. Sebelum mesin berhasil dimatikan terjadi suara ledakan dan diikuti dengan keluarnya asap tebal dan nyala api dari daerah mesin A/E no.2 berada. Nyala api selanjutnya menyambar ke bagian lain kamar mesin di sekitar mesin A/E no. 2 dan asap hitam pekat muncul memenuhi Kamar Mesin.

Api yang keluar dari ruang bakar melalui dinding mesin A/E no.2 yang jebol segera menyebar dan menyambar 2 orang ABK Mesin yang sedang bekerja tidak jauh dari lokasi mesin tersebut. Masinis-II yang juga terkena sambaran api masih mampu menyelamatkan diri melewati tangga akses naik ke *main deck* untuk keluar dari ruang akomodasi dan dapat selamat sampai di *weather deck* dalam kondisi mengalami luka bakar. Sedangkan *electrician* selain terkena kebakaran juga terkena pengaruh kuat ledakan sehingga masih tetap berada di kamar mesin dalam kondisi tidak sadarkan diri. Nakhoda memerintahkan ABK untuk melakukan evakuasi terhadap *electrician* dari kamar mesin.

Beberapa saat kemudian, Masinis-II dan *Electrician* dievakuasi diturunkan dari kapal dan dibawa ke ambulans yang sudah disiagakan dan selanjutnya dibawa ke Rumah Sakit Krakatau Medika Cilegon untuk penanganan medis lebih lanjut. Sekitar pukul 15.00 WIB, Nakhoda ke anjungan mengaktifkan *emergency shut down* untuk *cargo pump* dengan menekan tombol stop dan menekan tombol mengaktifkan *emergency fire pump* dari anjungan, kemudian disusul membunyikan *signal general alarm*. Tim pemadam kebakaran kapal segera bertindak dalam upaya memadamkan kebakaran di kamar mesin dengan mengenakan *breathing apparatus* karena asap sudah terlalu tebal.

Sementara itu manajemen Terminal LPG Tanjung Sekong menerima berita terjadinya kebakaran di MT. Nusa Bintang dan segera tim tanggap darurat terminal LPG dikerahkan untuk membantu menangani upaya pemadaman kebakaran kapal yang masih di Jetty. Nakhoda minta stasiun *loading arm* di darat untuk segera mengaktifkan *emergency shutdown valve* dan melepaskan MLA.

Namun petugas darat stasiun *loading arm* menyatakan bahwa *emergency shutdown device* tidak dapat segera diaktifkan karena masih adanya tekanan dalam MLA. Hal demikian jika dilakukan dapat menyebabkan kerusakan pada unit MLA. Pada saat tekanan jalur pengisian sudah turun, MLA segera dilepas dari *cargo manifold* di kapal dan ABK mulai mempersiapkan kapal lepas tambat dari Jetty. Kira-kira pukul 15.12 WIB, bantuan 2 unit kapal tunda datang untuk menarik MT. Nusa Bintang menjauhi Jetty stasiun LPG Tanjung Sekong.

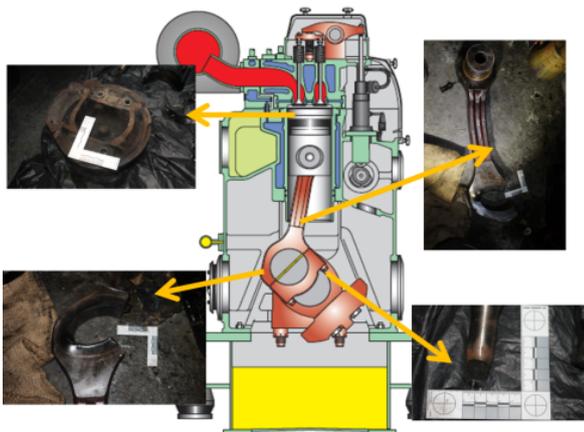
Pukul 15.40 WIB, setelah dipastikan tidak ada lagi ABK berada di kamar mesin, Nakhoda memberi perintah menjalankan sistem CO2 kepada KKM untuk memadamkan api di kamar mesin. Sekitar pukul 16.00 WIB kapal labuh jangkar di perairan area labuh jangkar di depan dermaga Tanjung Sekong. Pukul 16.45 WIB, sekitar 2 jam setelah mulai terjadinya kebakaran, api berhasil dipadamkan dan tim pemadam kebakaran kapal berhasil mengisolir lokasi kebakaran untuk tidak menjalar ke bagian depan kamar mesin, menyelamatkan ruang muatan LPG bersama isinya sehingga dapat menghindarkan terjadinya ledakan fatal di kapal.

Namun demikian, sebagai akibat kebakaran di kamar mesin, bangunan kapal di atasnya dan sistem kelistrikan kapal mengalami kerusakan cukup berat. Adapun 2 ABK korban kebakaran, Masinis-II mengalami luka bakar yang lebih ringan dari *Electrician* dan keduanya dinyatakan mengalami luka bakar tingkat 3 pada bagian wajah dan badan di daerah sekitar leher dan bagian telapak tangan.

#### 4. Kebakaran Mesin Bantu No. 2

Kejadian kebakaran diawali dengan terdengarnya suara tidak normal pada mesin A/E no.2. Selanjutnya terjadi ledakan disertai panas, kilatan api dan asap hitam yang dengan cepat memenuhi kamar mesin. Ketika mesin A/E no 2 dinyalakan, sesaat setelah mesin hidup terdengar suara yang tidak normal dan diikuti getaran mesin yang cukup kuat. Tidak lama setelah itu terdengar suara dentuman keras diikuti dengan timbulnya asap dan api dari mesin tersebut. Selama mesin masih hidup maka bahan bakar akan terus keluar dari *nozzle piston* no 3 yang menimbulkan api dan asap tebal.

Pemeriksaan *on the spot* di kapal pasca kebakaran, tim investigasi KNKT menemukan sisa-sisa kebakaran dan arah penjalaran dari kebakaran. Urutan arah penjalaran kebakaran menunjukkan titik awal kebakaran berfokus di area sekitar mesin A/E no. 2. Pada lokasi di sekitar mesin A/E no. 2 tersebut, ditemukan pecahan mesin berupa *piston crown*, serpihan dinding piston, potongan pena engkol, stang piston (*connecting rod*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.

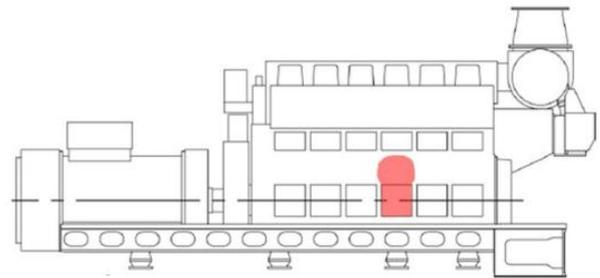


Gambar 2 : Rekonstruksi kerusakan bagian dalam mesin AE#2

Dari Gambar 2 diketahui bahwa kinerja mesin A/E no. 2 silinder no. 3 tidak baik. Hal ini ditunjukkan dengan adanya guratan/goresan pada permukaan *cylinder liner*. Goresan tersebut besar kemungkinan terjadi akibat kurang baiknya sistem pelumasan antara piston ring dengan *cylinder liner*. Bila mesin mengalami *overspeed running*, maka gaya inersia dari piston akan meningkat tajam yang dapat menyebabkan bahan baut pengikat stang piston ke poros engkol mencapai/melewati batas kekuatannya.

Pada pemeriksaan mesin A/E no. 2, didapatkan kerusakan berupa pecah/jebol-nya deksel dinding mesin di lokasi silinder no. 3. Posisi kerusakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3. Diduga kuat kerusakan terjadi akibat benturan piston crown

yang terlepas dari silindernya. Pemeriksaan lebih lanjut pada bagian ruang bakar di silinder no. 3 juga ditemukan ada kerusakan pada permukaannya.



Gambar 3 : Rekonstruksi posisi kerusakan *deckshell* pada AE#2

#### 5. Analisis kerusakan pada Mesin Bantu No. 2

Untuk memperoleh bahan guna mempermudah analisis terjadinya kerusakan mesin A/E no. 2, KNKT melakukan pengamatan terhadap alat bukti komponen-komponen mesin tersebut yang mengalami kerusakan dengan menggunakan fasilitas Laboratorium Metalurgi Institut Teknologi Bandung (ITB) untuk memperoleh foto-foto secara makro. Namun, dalam kasus ini tidak dilakukan uji material untuk mengetahui *chemical composition* dan *mechanical properties* dari baut pengikat stang piston ke poros engkol mesin yang putus ataupun uji kelelahan terhadap komponen mesin tersebut. Karena yang berkepentingan untuk hal itu adalah pihak pabrik pembuat mesin dan pihak Klas apakah ditemukan *material defect* dan atau *material failure* komponen mesin tersebut.

Dengan mempelajari foto-foto makro patahan baut di laboratorium metalurgi, tim investigasi KNKT dapat menganalisis bagaimana proses putusnya baut pengikat stang piston dan terlepasnya komponen mesin lain sampai terjadi jebolnya crank case mesin A/E no. 2. Untuk kepentingan pabrik pembuat mesin dan *Klas*, penelitian lebih lanjut untuk mengetahui dengan seksama sebab putusnya baut pengikat tersebut antara lain dapat dilakukan dengan cara melakukan *destructive test* di laboratorium material untuk baut yang patah, baut lain yang sudah terpapar tetapi masih terpasang di mesin (sama waktu pemasangannya) dan bila tersedia dengan baut yang sama.



Gambar 4 : Profil penampang

Dengan melakukan pengamatan terhadap patahan baut pengikat stang piston ke poros engkol, dapat diketahui ciri-ciri patahan dan proses urutan patahnya dari keduanya sebagai berikut:

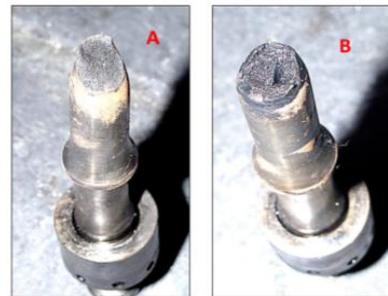
- Pada Gambar 4 dan 6, terlihat Baut B memiliki permukaan yang relatif lebih datar dan pada daerah yang ditandai oleh panah biru pada Gambar 7 menunjukkan adanya inisiasi patah lelah (*fatigue*) yang dimulai dari samping baut atau pada bagian bawah ulir. Selanjutnya patah lelah tersebut berlanjut dengan patah lelah dengan periode yang lebih singkat atau dikenal dengan istilah “*Low Cycle Fatigue (LCF)*”. LCF merupakan fenomena kegagalan metalurgi yang ditunjukkan dengan peningkatan tegangan plastis pada material yang terjadi secara cepat pada frekuensi yang rendah [Balda, 2009].
- Pada Gambar 4 dan 6, terlihat adanya pengerucutan atau pengecilan pada baut A, serta ditunjukkan oleh Gambar 5 bahwa baut A memiliki penampang melintang dari diameternya mengalami pengecilan. Hal ini menandakan bahwa baut tersebut mengalami gaya statik yang lebih besar dari batas *ultimate* yang dimiliki. Selanjutnya baut patah akibat besarnya gaya yang bekerja telah melebihi *ultimate strength*. Ciri-ciri patahan tersebut menandakan bahwa baut tersebut patah statis atau pada saat kejadian dan ini juga menunjukkan bahwa material baut cukup ulet atau *ductile*.
- Melihat tanda-tanda patahan tersebut dapat ditarik urutan kejadian patahnya, yaitu baut B mengalami patah terlebih dahulu dan selanjutnya baut A menerima beban gaya di atas batas *ultimate*-nya sehingga mengalami pemuluran dan disusul mengalami patah saat itu juga.



**Gambar 5 :** Patahan dg reduksi penampang yg besar (atas)  
Patahan dg reduksi penampang yg kecil (bawah)

Setelah putusnya baut B, pengikat stang piston ke poros engkol (*crankshaft*), bagian tersebut masih ikut berputar bersama dengan *crankshaft* dengan diikat oleh baut A saja. Akibat dari keadaan ini bantalan lucurnya terlepas dan *crankshaft* bersentuhan langsung dengan stang piston. Setelah terjadi perputaran beberapa saat kemudian baut A patah dan berakibat stang piston terlepas dari kedudukannya dan terlempar menabrak dinding mesin. Akibat benturan dengan dinding mesin

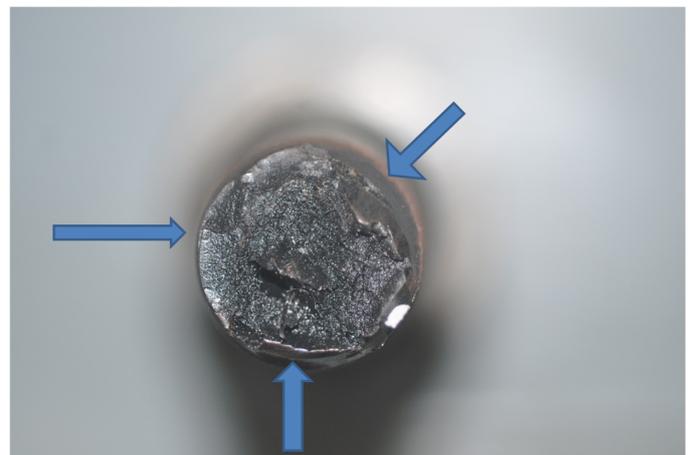
tersebut stang piston menjadi bengkok, yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sementara pada bagian atas yang terikat dengan piston menjadi terlepas dan pistonnya pecah [KNKT, 2017].



**Gambar 6 :** Baut pengencang stang piston (*Conecting Road*) ke poros engkol (*crankshaft*) tampak atas

Pemeriksaan terhadap kondisi ruang bakar menunjukkan adanya goresan-goresan. ujung pipa titik mati bawah menunjukkan adanya kerusakan berat dan patah. Pada *crankshaft* terlihat adanya bekas luka goresan dan luka bekas benturan yang cukup dalam dan lebar [KNKT, 2017].

Dari hasil pengamatan baut pengikat stang piston ke poros engkol diketahui bahwa baut B mengalami patah akibat adanya *fatigue* atau kelelahan, maka baut pengikatnya tinggal sisi sebelah, yaitu baut A dengan kondisi mesin yang tetap masih hidup. Keadaan demikian ini menjadikan mesin mengalami getaran yang cukup hebat. Sesaat setelahnya, baut pengikat A putus akibat gaya yang bekerja pada baut melebihi *ultimate strength*-nya.



**Gambar 7 :** Tepi permukaan patahan baut B yang mengalami retak *fatigue*

Dari Gambar 7 dapat diketahui bahwa bagian bawah stang piston yang terikat dengan poros engkol, maka bagian ini stang piston bersama poros engkol mengalami gerak rotasi ke arah berlawanan jarum jam. Sedangkan stang piston bagian atas bersama pistonnya akan mengalami gerak translasi (ke atas dan ke bawah). Maka dengan data yang ada bahwa stang piston dan piston keluar ke arah kiri dari mesin (Dilihat dari belakang ke depan) serta *cylinder head*-nya tidak mengalami benturan, bahwa hal ini menunjukkan saat putusnya baut A gerak translasi stang piston bagian atas dan piston dalam langkah turun. Sedangkan stang piston bagian bawah berputar berlawanan arah jarum jam. Gabungan gerak translasi ke bawah (langkah usaha atau hisap) dan rotasi crank shaft menyebabkan stang piston yang baut pengikatnya telah terlepas disertai pistonnya terlempar ke bawah samping sisi kiri, membentur bagian dalam sisi kiri *crank case* mesin dan menjebol bagian bawah di lokasi *cylinder liner* silinder no. 3.

Analisis hasil investigasi *on the spot* di kapal paska kebakaran dan hasil pengamatan laboratorium metalurgi terhadap alat bukti komponen-komponen mesin yang mengalami kerusakan, menyimpulkan bahwa kebakaran diawali kejadian putusnya *cap bolt* (pena batang) pada *connecting rod* silinder no 3. Akibat putusnya pena batang ini, *connecting rod* terlepas dari *crankshaft* dan menarik piston-nya sehingga jatuh ke luar ruang pembakaran. Selanjutnya piston ini terlepas akibat mendapat pukulan dari *connecting rod* (karena saat itu mesin masih berjalan) dan mengenai blok mesin sisi kiri yang menyebabkan deksel dinding mesin (*crank case*) jebol/pecah.

Saat itulah terdengar suara ledakan. Ketika *piston crown* membentur dan menjebol *crank case*, mesin A/E no. 2 masih terus berjalan meski silinder no. 3 sudah mengalami kerusakan. Pada kondisi tersebut, *injector* bahan bakar masih tetap mensuplai bahan bakar. Akumulasi bahan bakar ini disertai *vapour*-nya menjadi sumber bahan mudah terbakar dan adanya oksigen yang telah masuk dalam *crank case*, maka pada suhu panas setempat berakibat terjadinya kebakaran. Api selanjutnya keluar dari lokasi kerusakan dan kemudian menjalar ke bagian lain di kamar mesin.

Dengan demikian, berdasarkan data faktual dan hasil analisis terhadap mesin bantu pembangkit listrik A/E no. 2, investigasi KNKT menyimpulkan bahwa urutan terjadinya kebakaran di MT Nusa Bintang, adalah seperti berikut:

- Kejadian kebakaran diawali putusnya baut pengikat stang piston (*connecting rod*) silinder no.3, disusul stang piston tersebut beserta pistonnya terlepas dan terlempar ke arah bagian dalam dinding mesin (*crank case*) sehingga menyebabkan dinding mesin tersebut jebol/pecah; diduga kuat putusnya baut tersebut disebabkan kondisi torsi pena engkol kurang dilakukan dengan efektif;

- dalam kondisi mesin masih terus berjalan, *injector* bahan bakar silinder no.3 masih tetap mengeluarkan bahan bakar ke dalam ruang dalam *cylinder liner* yang piston-nya telah terlepas;
- bahan bakar yang mengucur tersebut terakumulasi dan disertai *vapour*-nya menjadi sumber bahan mudah terbakar;
- adanya oksigen yang telah masuk dalam *crank case*, maka pada suhu panas setempat berakibat terjadinya kebakaran. Api selanjutnya keluar dari lokasi kerusakan dan kemudian menjalar ke bagian lain di kamar mesin.

Dari pembahasan yang telah disampaikan dapat diambil pelajaran sebagai berikut :

- i. Bagi para Perwira Mesin kapal tentang pentingnya pelaksanaan PMS dengan benar dan mengikuti dengan seksama manual pabrik pembuat mesin (bila masih ada) atau referensi lain baik dalam melakukan perawatan dan perbaikan mesin. Sebagai contoh dalam kasus ini, petunjuk cara pengikatan stang piston dan lain sebagainya.
- ii. Bagi para *Class Surveyor* di lapangan tentang pentingnya melakukan pemeriksaan ataupun me-audit apa yang telah dikerjakan ABK-Mesin pada mesin pasca perbaikan berdasarkan peraturan *Klas* yang berlaku.
- iii. Perlu disusun suatu prosedur praktis untuk mengetahui adanya faktor kelelahan pada material pengunci baut engkol sehingga dapat dilakukan tindakan pencegahan putusnya baut engkol. Selain itu, pemeriksaan secara menyeluruh

## 6. Kesimpulan

Disimpulkan bahwa penyebab kebakaran di kamar mesin berawal adalah akibat terjadinya kerusakan dan terbakarnya mesin bantu pembangkit listrik A/E no. 2. Kebakaran mesin A/E no. 3 diakibatkan patahnya baut pengikat stang piston ke poros engkol yang menyebabkan terlepasnya stang piston dan piston dengan piston *crown*-nya, kemudian membentur dan menjebol dinding *crank case* di lokasi silinder no. 3. Api selanjutnya keluar dari lokasi kerusakan dan kemudian menjalar ke bagian lain di kamar mesin.

Faktor yang berkontribusi terjadinya kebakaran diduga kuat akibat torsi pengikatan pena engkol kurang dilakukan dengan baik sehingga kondisi efektivitas pengikatannya diragukan yang berakibat kedua baut pengikat stang piston dengan poros engkol di silinder no. 3 putus.

Sebagai penutup, diharapkan tulisan ini dapat menjadi bagian dari sosialisasi misi KNKT di bidang keselamatan transportasi laut dan akhirnya disampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu memberi data dan informasi terkait

dengan kasus terjadinya peristiwa terbakarnya *MT. Nusa Bintang* di Jetty Terminal LPG Tanjung Sekong, Cilegon.

## Daftar Pustaka

- [1] Arends, BPM (2010), Kerusakan Mesin Kapal dan Pencegahannya, IMarE, Jakarta
- [2] Balda, M (2009) Identification of Low Cycle Fatigue Parameters, Applied and Computational Mechanics, 3<sup>rd</sup> ed (pg 259-266): Univ of west Bohemia
- [3] Kirk, P. L., & DeHaan, J. D. (2011). Kirk's Fire Investigation. 7<sup>th</sup> Edition, New York: Wiley.
- [4] Komite Nasional Keselamatan Transportasi (2016), LAPORAN FINAL KNKT-15-11-07-03, Kebakaran di Kamar Mesin *MT. Nusa Bintang*, 20 November 2015 di Jetty Terminal LPG Tanjung Sekong, Cilegon.
- [5] MAN (2009), Man Diesel & Turbo, L23/30H, Project Guide – Marine Four-stroke GenSet, compliant with IMO Tier II,

---

**Ir. Teguh Sastrodiwongso**, Tenaga Ahli Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) - Indonesia.  
e-mail: marine.knkt@dephub.go.id

**Ir. Lamberth Manupassa**, Tenaga Ahli Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) - Indonesia.  
e-mail: marine.knkt@dephub.go.id

**Aleik Nurwahyudy, Dipl TSI, ST, M.Sc**, Investigator Keselamatan Pelayaran Komite Nasional Keselamatan Transportasi (NTSC) - Indonesia.  
e-mail: marine.knkt@dephub.go.id

# IMPROVISASI DESAIN UNTUK MENINGKATKAN KARAKTERISTIK DAMAGE STABILITY KAPAL PENUMPANG FERI RO-RO

Mochammad Zaky

## Abstract

*This paper reviews some effective ways which have been proposed to improve the damage stability characteristics with several modifications in the hull and the lay out of the compartment of ro-ro passenger vessels. The improvement of damage stability performance were performed in various ways such as attaching a bilge keel on ship hull, installing the longitudinal or transversal bulkhead on car deck, inserting the dwarf longitudinal bulkhead be sandwiched above a car watertight deck and below a perforated car deck, increasing B/T ratios and freeboard and creating a buoyancy in the wings as well as the presence of buoyant material to retard the water intrush after damage. The damage stability performances were calculated by using a deterministic and a probabilistic method based on the SOLAS requirements. Both of a lost buoyancy and added weight method were used to calculate in intermediate flooding conditions. The results indicated that the modified ro-ro vessels have a good survivability after damage compared to the previous design. Although some other design aspects (i.e., hull resistance, ship light weight, ship efficiency, etc) should be considered. A brief history of the development of ro-ro passenger damage stability regulations and some studies to support those solutions as mentioned above are discussed.*

*Keywords : ro-ro vessels; IMO; damage stability.*

## 1. Pendahuluan

Kapal penumpang feri ro-ro secara komersil telah terbukti menunjukkan perkembangan yang sangat pesat, karena moda transportasi ini cukup efisien dan efektif. Dari sisi desain kapal feri ro-ro telah terbukti sukses dengan kemampuannya mengangkut manusia, kendaraan dan muatan secara bersamaan. Akan tetapi kapal jenis ini masih banyak memiliki kekurangan khususnya dari sisi stabilitas ketika mengalami kebocoran. Ketika terjadi kebocoran dan tidak adanya daya apung cadangan yang cukup, maka air akan masuk dan memenuhi semua bagian geladak kendaraan, sehingga mengakibatkan kapal tenggelam. Contoh kasus adalah tenggelamnya kapal feri ro-ro *Herald of Enterprise* [Pucill, 1990] dan *Estonia* [EJAIC, 1994].

Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki populasi kapal feri ro-ro cukup signifikan yaitu sekitar 5% dari jumlah total 8192 unit kapal yang teregister di Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) sampai dengan tahun 2012 [BKI, 2012]. Dengan banyaknya populasi kapal tersebut, maka peluang terjadinya kecelakaan juga semakin tinggi. Data yang diperoleh dari Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) menunjukkan bahwa selama periode 2003-2016 telah terjadi 43 kecelakaan kapal di perairan Indonesia yang diakibatkan oleh tenggelam/terbalik 37%, kebakaran/meledak 35%, dan tubrukan 28% [KNKT, 2016a]. Dari total kecelakaan tersebut, jumlah

kecelakaan kapal feri ro-ro sebesar 36% (16 unit) dan hampir sebagian besar diakibatkan oleh kegagalan stabilitas. Kasus paling aktual adalah tenggelamnya kapal feri ro-ro KMP. Rafelia 2 yang salah satunya disebabkan oleh nilai stabilitas (GM) kecil dan pergeseran muatan [KNKT, 2016b]. Hal ini berakibat kapal tidak memiliki stabilitas yang baik dan tidak mampu kembali ke posisi semula [Rawson, 2001].

Secara umum tipikal kapal penumpang feri ro-ro memiliki geladak kendaraan tanpa penambahan sekat, baik secara memanjang maupun melintang. Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan dan mempercepat proses bongkar muat kendaraan. Akibatnya ketika lambung kapal mengalami kebocoran atau pintu rampa terbuka maka air akan secara langsung memenuhi ruangan geladak kendaraan, seperti halnya kasus tenggelamnya kapal feri ro-ro *Herald of Enterprise*, selanjutnya volume apung cadangan untuk kompartemen geladak kendaraan yang terisi air menjadi hilang. Sehingga berakibat lengan stabilitas menjadi negatif dan kapal terbalik, hal ini telah dibuktikan melalui pengujian model oleh Pucill dan Velschou [Pucill, 1990].

Kajian stabilitas untuk kapal penumpang feri ro-ro berbendera Indonesia juga telah dilakukan, salah satunya adalah investigasi yang telah dilakukan oleh Zaky (2012) terhadap tiga variasi ukuran panjang kapal penumpang feri ro-ro yaitu; kecil ( $L = 37$  m), sedang ( $L = 66,5$  m), dan besar ( $L = 123$  m) berdasarkan

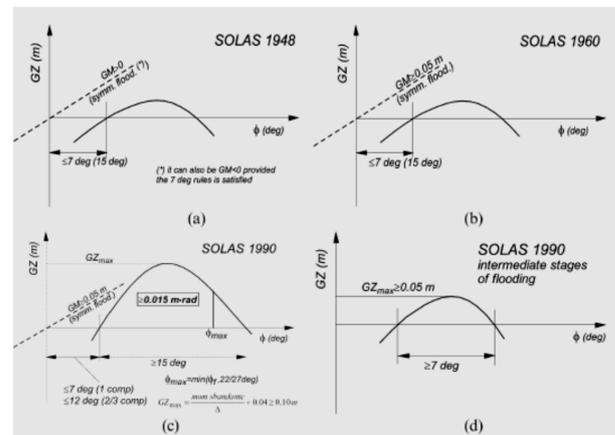
aturan probabilitas stabilitas bocor bab II-1 SOLAS edisi 2009 [IMO, 2009], hasil investigasi menunjukkan bahwa sesuai perbandingan indek dicapai (A) dan indek dipersyaratkan (R), kapal feri ro-ro kecil dengan karakteristik geladak kendaraan terbuka memiliki nilai indek A lebih kecil daripada nilai indek R, hal ini disebabkan volume apung cadangan hanya diperoleh dari sisa volume apung setinggi lambung timbul, untuk kapal feri ro-ro sedang nilai indek A masih berada dibawah indek R, walaupun geladak kendaraan dalam kondisi kedap air dan penambahan sekat melintang yang memberikan tambahan pada nilai indek A, berikutnya untuk kapal feri ro-ro besar dengan geladak kendaraan kedap air dan konfigurasi penambahan sekat melintang/memanjang pada geladak kendaraan, hasilnya persyaratan *damage stability* terpenuhi, hal ini menunjukkan *damage stability* banyak dipengaruhi oleh besarnya volume kedap kapal. Zaky dan Purwono (2012) juga telah melakukan kajian optimasi desain pada sebuah FPSO dalam tinjauan stabilitas bocor menggunakan metode deterministik dan probabilistik, hasilnya kenaikan rasio L/B tidak berdampak signifikan terhadap nilai indek A, sedangkan semakin besar rasio B/T yang berarti semakin lebar badan FPSO, maka semakin besar pula nilai indek A yang dihasilkan.

**Perkembangan aturan *damage stability***

Latar belakang pengembangan awal aturan stabilitas bocor dimulai pada abad kedua puluh yang dipicu oleh kecelakaan kapal penumpang *Titanic* pada tahun 1912 [Wikipedia]. Hal tersebut mendorong komunitas maritim internasional untuk mengadakan konvensi internasional terkait keselamatan laut atau dikenal dengan *Safety of Life at Sea* (SOLAS) pada tahun 1914, sedangkan aturan terkait stabilitas dan penyekatan diperkenalkan pertama kali setelah berakhirnya perang dunia kedua, yang kemudian dinamakan SOLAS 1948 dengan ketentuan bahwa setelah terjadi kebocoran, maka GM harus positif dan maksimum sudut oleng sebesar 7°. Kriteria spesifik mengenai standar minimum sisa stabilitas (*residual stability*) setelah bocor mulai ditampilkan pada konvensi SOLAS 1960 [IMO, 1973] menggunakan pendekatan deterministik, yaitu dalam melakukan perhitungan sudah ditentukan lebih dahulu satu atau dua kompartemen yang akan mengalami kebocoran, dengan persyaratan setelah terjadi kebocoran sesuai Gambar 1(b), yaitu; garis air maksimal setelah bocor adalah pada *margin line* (garis yang jaraknya 76 mm dibawah geladak kekuatan), sudut oleng harus kurang dari 7° dan nilai minimum GM 0.05 m. Gambar 1 menunjukkan skema tahap perubahan aturan *damage stability* deterministik kapal penumpang sesuai ketentuan SOLAS.

Aturan *damage stability* probabilistik diperkenalkan pertama kali oleh Professor Kurt Wendel [Wendel, 1960] melalui penelitiannya tentang “*Subdivision of Ships*”. Hal ini disebabkan metode deterministik yang ada di SOLAS 1960

dianggap sudah tidak dapat digunakan karena kenyataannya tidak dapat ditentukan kompartemen mana yang mengalami kebocoran dan bagaimana akibat yang ditimbulkannya. Dalam perkembangan selanjutnya kebocoran tak simetris (*asymmetrical flooding*) dan tahap kebocoran antara (*intermediate stage of flooding*) perlu dipertimbangkan.



**Gambar 1** : Evolusi standar stabilitas bocor di SOLAS: (a) persyaratan SOLAS 48; (b) persyaratan SOLAS 60; (c) persyaratan SOLAS 90; (d) kebocoran tahap antara SOLAS 90

Persyaratan minimum terkait dengan sudut maksimum oleng saat tahap kebocoran antara diformulasikan pada konvensi SOLAS 1974 [IMO, 1974]. Dalam waktu yang bersamaan IMO melalui Resolusi IMCO A.265(VIII) [IMO, 1973] mempublikasikan aturan penyekatan dan stabilitas untuk kapal penumpang dengan konsep *probabilistic damage stability*. Selanjutnya setelah terjadinya kecelakaan tenggelamnya kapal *Herald of Enterprise* pada tahun 1987, aturan *damage stability* mengalami perbaikan lebih lanjut. Akibat kecelakaan tersebut maka muncul ketentuan SOLAS 1990 dengan persyaratan kondisi final setelah kebocoran sesuai Gambar 1(c), yaitu;

- Jarak minimum stabilitas positif di bawah kurva GZ sebesar 15°, dimulai dari sudut maksimum 7° untuk satu kompartemen bocor atau 12° untuk dua kompartemen bocor.
- Minimum luasan di bawah kurva GZ sebesar 0.015 m.rad.
- Sudut maksimum GZ tidak boleh kurang dari 0.10 m.

Pada tahun 1994 terjadi kecelakaan kapal penumpang ro-ro *Estonia* yang merenggut ratusan korban jiwa, hal ini mendesak komunitas maritim internasional untuk melakukan investigasi terkait pengaruh air di geladak atau dikenal *Water on Deck* (WOD) pada stabilitas bocor kapal penumpang ro-ro. Konferensi SOLAS 95 tidak bisa menyepakati perubahan aturan *damage stability* SOLAS 90 secara internasional khususnya berkaitan dengan standar aturan WOD, hal ini disebabkan kedua kapal yang mengalami kecelakaan tersebut diatas merupakan kapal standar SOLAS 74, sehingga belum ada kepastian kapal-kapal mana (sesuai SOLAS 90) yang mampu bertahan dari kerusakan WOD di wilayah operasionalnya. Namun demikian,

konferensi tersebut sepakat untuk mempercepat pemenuhan kapal-kapal penumpang yang ada terhadap persyaratan SOLAS 90 dan memungkinkan negara-negara anggota menyetujui perjanjian regional guna meningkatkan persyaratan WOD di SOLAS 90. Peningkatan aturan *damage stability* SOLAS 90 melalui perjanjian regional selanjutnya dilakukan oleh beberapa negara eropa wilayah barat daya yang kemudian dikenal dengan *Stockholm Agreement* [Vassalos, 2002a;b], aturan tersebut berlaku terbatas untuk kapal-kapal yang beroperasi di wilayah perairan mereka. Aturan *Stockholm Agreement* mempertimbangkan pemenuhan kriteria *damage stability* SOLAS 90 berdasar asumsi kebocoran geladak kendaraan hingga ketinggian air sampai dengan 50 cm (asumsi volume air bergantung pada kerusakan lambung timbul dan ketinggian gelombang). Aplikasi dari *Stockholm Agreement* menyebabkan tambahan penyekatan secara melintang dan sebagian membujur pada geladak kendaraan dengan menggunakan sekat bergerak atau tetap, pemasangan *sponsons* dilambung kapal dan penurunan muatan untuk menambah lambung timbul. Hal ini berdampak pada operasi kapal dan efisiensi, dan juga diperlukan biaya tambahan untuk modifikasi kapal yang sudah ada. Perkembangan selanjutnya regulasi *Stockholm Agreement* dipakai oleh seluruh negara eropa dan menyebar keseluruh dunia, walaupun regulasi tersebut juga disesuaikan dengan karakter regional setempat.

Konsep *damage stability* probabilistik beberapa tahun kemudian dimodifikasi dan diselipkan pada revisi SOLAS 74 tahun 1992, berisi tentang *damage stability* berlaku untuk semua kapal barang panjang 100 keatas yang dibangun setelah 1992 [IMO, 1997]. Pendekatan probabilitas *damage stability* mengarah pada penentuan karakteristik faktor keselamatan kapal yang diperhitungkan sesuai konsep Wendel [Wendel, 1960]. Faktor pertama adalah indek penyekatan dicapai A, mewakili ukuran probabilitas kemampuan bertahan kapal terhadap kebocoran. Faktor kedua, disebut dengan indek penyekatan R merupakan nilai minimum untuk indek A dan mewakili tingkat kemampuan bertahan kapal yang diperhitungkan, sesuai dengan ukuran kapal dan jumlah orang diatas kapal yang memiliki resiko tabrakan.

Berdasarkan pada keputusan komite keselamatan maritim (MSC) IMO, semua konsep perhitungan *damage stability* (deterministik dan probabilistik) untuk kapal penumpang dan kapal barang yang diberlakukan pada tahun 1990-an, harus diharmonisasi dan disatukan kedalam satu konsep perhitungan yang kemudian dikenal dengan metode harmonisasi (*harmonized method*). Setelah melalui proses kajian yang melibatkan peneliti dari seluruh dunia, maka aturan *damage stability* dapat diselesaikan pada tahun 2004 dan keputusan final diambil pada tahun 2005. Adapun hasilnya ditampilkan secara formal dalam aturan SOLAS edisi 2009 yang diberlakukan sejak 1 Januari 2009 [IMO, 2006].

Begitu pula di Indonesia, kajian yang berhubungan dengan karakteristik gerakan kapal diperairan Indonesia telah dilakukan, salah satu proyek penelitian terbesar yang telah dilakukan adalah program *the Japan Society Program for the Promotion of Science (JSPS)* yaitu kerjasama penelitian yang melibatkan beberapa universitas di Indonesia dan Jepang khususnya bidang perkapalan serta BPPTIndonesia [JSPS-DGHE, 2006]. Kajian dilakukan selama 5 tahun (1997-2006) dengan tema keselamatan kapal penumpang feri di Indonesia. Adapun tujuan dari kajian ini adalah untuk mengurangi dan mencegah kecelakaan kapal. Hasil dari kajian ini diantaranya yaitu pengenalan dan aplikasi teori gerak kapal diatas gelombang berdasar pada aturan domestik negara Jepang yang selanjutnya akan diterapkan di Indonesia, metode baru untuk menghitung distribusi tinggi dan periode gelombang wilayah perairan Indonesia, pengumpulan dan pemetaan karakteristik kapal yang beroperasi di Indonesia, mengetahui sebab akibat kecelakaan kapal diIndonesia.

Zaky dkk (2014) juga telah melakukan kajian gerak dinamis kapal (*seakeeping*) guna memodifikasi formula tinggi haluan kapal ICLL 66 Protokol 88 yang disesuaikan dengan kondisi kapal dan perairan Indonesia. Konfirmasi perhitungan numerik dilakukan melalui pengujian model *seakeeping* di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) terhadap sebuah kapal barang dan data gelombang perairan Indonesia [Zaky dan Ali, 2013]. Meskipun secara spesifik tidak menghasilkan standar stabilitas domestik, namun hasil kajian ini bisa menjadi acuan dalam melaksanakan kajian lebih lanjut yang berhubungan dengan kriteria stabilitas diperairan Indonesia.

## 2. Solusi Peningkatan Karakteristik *Damage stability*

Untuk memenuhi ketentuan IMO khususnya aturan *damage stability*, maka perlu dilakukan beberapa modifikasi desain dengan tujuan untuk meningkatkan keselamatan kapal penumpang feri ro-ro, diantaranya melalui beberapa cara sebagai berikut:

### Pemasangan *bilge keel* pada lambung kapal

*Bilge keel* merupakan sebuah perangkat efektif untuk mengurangi gerakan oleng kapal, dimana perangkat ini berfungsi untuk menambah redaman (*damping*) ketika kapal mengalami gerakan oleng. Perangkat ini cukup sederhana, murah dan tidak membutuhkan perawatan yang rumit. Besarnya amplitudo gerakan oleng kapal dipengaruhi oleh perubahan lengan stabilitas dan redaman setelah terjadi gerakan oleng pada kapal atau disebut *roll damping*. Sebagian besar *roll damping* dihasilkan oleh *bilge keel* terutama untuk kapal dengan nilai koefisien blok rendah. Gambar 2 menunjukkan aplikasi *bilge keel* pada lambung kapal.

Probabilitas kapal terbalik berkurang secara drastis ketika lambung kapal dipasang dengan *bilge keel*, pengurangan secara signifikan diperoleh untuk ukuran *bilge keel* besar seiring dengan besarnya redaman yang dihasilkan [Bassler dan Reed, 2009; Ikeda, 2004].



Gambar 2 : *Bilge keel* pada lambung kapal

Sedangkan penempatan *bilge keel* pada tengah bilga memiliki koefisien redaman terbesar dibandingkan dengan lokasi lain [Ikeda, 2004; Gu *et al*, 2015]. Keuntungan dari penggunaan *bilge keel* adalah biaya murah, konstruksi sederhana dan efektif. Dan juga memiliki kinerja yang baik pada semua variasi kecepatan kapal dan menambah redaman ketika kapal mengalami gerakan oleng yang cukup besar. Adapun kerugiannya yaitu menambah hambatan karena penambahan bentuk lambung kapal akibat *bilge keel* dibagian bawah garis air, akan tetapi permasalahan ini dapat dikurangi dengan disain dan pemasangan *bilge keel* searah dengan aliran fluida.

**Penambahan sekat kedap melintang pada geladak kendaraan**

Alternatif lain yang bisa dilakukan yaitu dengan menambah sekat kedap melintang yang bisa dipindahkan pada geladak kendaraan. Dengan cara membagi geladak kendaraan menjadi beberapa kompartemen menggunakan sekat kedap melintang tersebut. Penambahan sekat kedap melintang pada geladak kendaraan (Gambar 3) secara signifikan mampu meningkatkan kemampuan bertahan kapal ketika mengalami kebocoran sampai dengan 20% [Zaky, 2012].

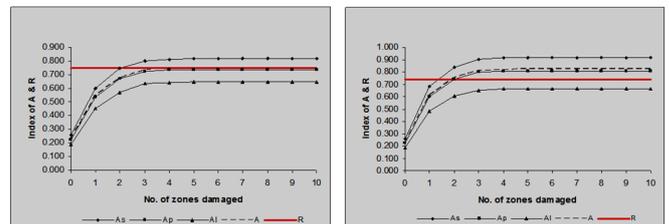


Gambar 3 : Sekat kedap melintang pada geladak kendaraan

Akan tetapi cara ini terkendala pada efektifitas sistem dan kesulitan dalam proses aplikasinya [Lloyd, 1990]. Sekat kedap melintang di atas geladak kendaraan telah diimplementasikan pada kapal feri ro-ro. Salah satu contoh aplikasi pada kapal *Kapetan Alexandros A* sesuai Gambar 3, merupakan kapal feri ro-ro yang mengangkut penumpang dan kendaraan dengan rute pelayaran Italia menuju Albania, dimana sekat kedap melintang dipasang pada geladak kendaraan dan dilengkapi dengan pintu akses untuk kendaraan dan manusia dengan posisi sekat dapat dipindah secara fleksibel.

**Penambahan sekat kedap memanjang pada geladak kendaraan**

Berikutnya dengan menambah sekat kedap memanjang pada geladak kendaraan dengan jarak yang relatif dekat dengan sisi luar lambung kapal dan dibagi dengan sekat kedap melintang [Brown, 1991], yang berarti penambahan ruang kedap atau *wing space* diatas geladak kendaraan. Variasi penambahan sekat kedap memanjang pada geladak kendaraan menghasilkan kontribusi yang cukup signifikan bagi kemampuan bertahan kapal saat terjadi kebocoran [Zaky, 2012]. Dengan adanya penambahan sekat memanjang di geladak kendaraan (skenario 3), nilai indeks A meningkat sebesar 10% dibandingkan dengan geladak kendaraan tanpa sekat (skenario 1).

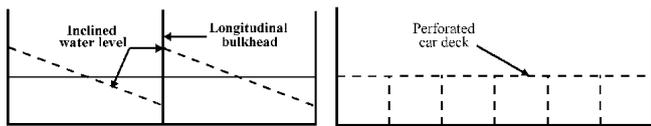


Gambar 4 : Hasil simulasi penyekatan skenario 1 (kiri) dan skenario 2 (kanan) di geladak kendaraan [Zaky, 2012]

Solusi ini cukup membantu untuk meningkatkan ketahanan kapal pada saat bocor, akan tetapi lebar *wing space* berpengaruh terhadap berkurangnya muatan diatas geladak kendaraan.

**Aplikasi sekat kedap memanjang pendek dan geladak berlubang pada geladak kendaraan**

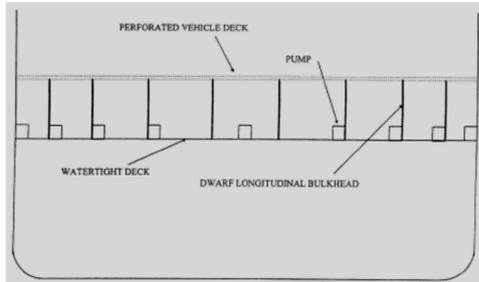
Ross dan Jordan [Ross, 1995a;b;c] melakukan penambahan sekat memanjang pendek pada geladak kendaraan dan mengganti geladak kendaraan yang ada dengan tipe geladak berlubang (*perforated deck*), sesuai Gambar 5.



**Gambar 5 :** Sekat kedap memanjang pada *centerline* geladak kendaraan (kiri) dan aplikasi geladak berlubang (kanan) di geladak kendaraan [Ross, 1995a;b;c]

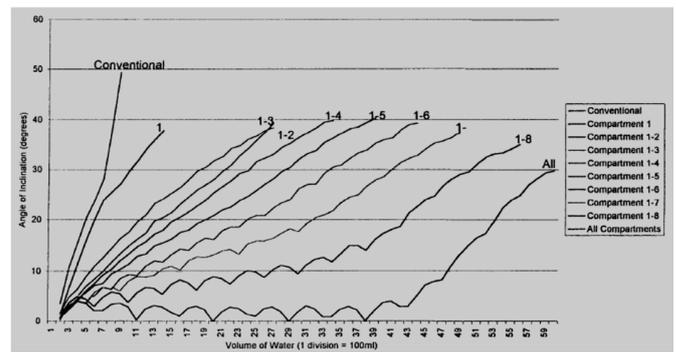
Dengan menggunakan pendekatan momen inersia yang dipengaruhi oleh lebar kompartemen yang diperhitungkan, pengaruh pemakaian sekat kedap memanjang yang dipasang pada *centerline* geladak kendaraan dapat mengurangi hilangnya stabilitas bocor sebesar empat kali (Gambar 5 kiri), lalu untuk dua sekat kedap memanjang yang sama lebar pada geladak kendaraan dapat mengurangi hilangnya stabilitas bocor sebesar sembilan kali.

Permasalahan yang timbul akibat terlalu banyak penambahan sekat memanjang yaitu mengganggu mobilitas kendaraan pada saat bongkar muat. Permasalahan ini telah diselesaikan oleh [Ross, 1995a;b;c] melalui usulan pemasangan sekat memanjang pendek (*dwarf longitudinal bulkhead*) yang terjepit diatas geladak kedap dan dibawah geladak kendaraan berlubang, sesuai Gambar 6.



**Gambar 6 :** Pemasangan *dwarf longitudinal bulkhead* diantara *watertight deck* dan *perforated car deck* [Ross et al, 1997]

Geladak tersebut dilengkapi dengan saluran pembuangan yang ditampung oleh *void* untuk kemudian dibuang menggunakan pompa hidrolik yang dikendalikan secara otomatis yang bekerja pada saat kapal mengalami kebocoran, hasilnya semakin banyak pemasangan sekat memanjang, maka peluang kapal terbalik semakin kecil. Kajian selanjutnya dilaksanakan oleh Ross dkk [Ross et al, 2000;2003] dengan melakukan eksperimen terhadap model kapal penumpang feri ro-ro.



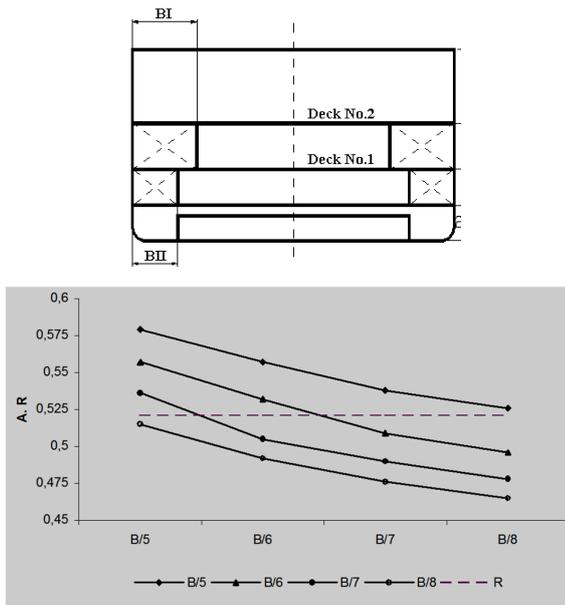
**Gambar 7 :** Sudut oleng akibat masuknya air untuk satu s/d 8 kompartemen [Ross, 2000]

Proses pengujian dilakukan dengan mengisi air kedalam kompartemen dibawah geladak berlubang, sehingga kompartemen tersebut (mulai kompartemen 1 sampai dengan 8) terisi secara berurutan. Gambar 7 menunjukkan kapal dengan modifikasi sekat memanjang pendek memiliki kemampuan bertahan terbalik lebih besar daripada kapal konvensional. Semakin banyak sekat memanjang pendek yang dipasang dibawah geladak berlubang kendaraan, maka kemampuan bertahan kapal dari terbalik menjadi lebih baik.

### Aplikasi kompartemen samping

Kompartemen samping (*wing compartment*) pada kapal feri ro-ro memiliki beberapa fungsi utama [Pawlowski, 1999], sebagai berikut:

- Meningkatkan kemampuan lambung kapal untuk menyerap energi ketika tabrakan, sehingga mengurangi tingkat kerusakan dan mampu bertahan ketika terjadi benturan yang ringan.
- Memiliki kontribusi dalam meningkatkan kekuatan konstruksi kapal.
- Dapat difungsikan sebagai tangki balas untuk menghindari kapal trim berlebihan.
- Meningkatkan karakteristik *damage stability*.
- Membuat bentuk tangki muat lebih halus dan rapi.
- Melindungi kapal dari kebocoran akibat retak yang terjadi pada lambung luar kapal.



Gambar 8 : Midship section (atas) dan nilai indeks A dan R (bawah) untuk variasi lebar wing tank [Slapnicar, 2009]

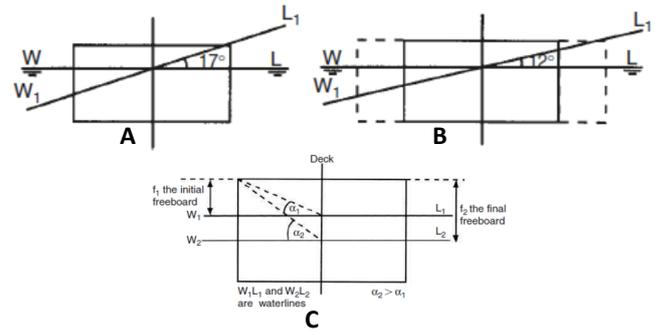
Untuk meningkatkan karakter stabilitas bocor, salah satu cara dengan memvariasikan lebar wing tank yang berpengaruh terhadap penambahan daya apung kapal [Slapnicar, 2009], dimana semakin lebar wing tank maka nilai indeks A yang dihasilkan semakin besar, karena dengan memperlebar wing tank probabilitas kebocoran bagian dalam yang menyebabkan kapal tenggelam adalah kecil. Gambar 8 menunjukkan semakin lebar wing tank terhadap lebar kapal ( $B/5$ ), maka nilai indeks A semakin besar. Hal ini disebabkan momen oleng akan semakin besar jika kebocoran wing tank tidak simetris terhadap centerline yang artinya posisi titik berat melintang volume wing tank berada jauh ke samping kiri/kanan dari centerline.

**Peningkatan stabilitas karena pengaruh bentuk badan kapal**

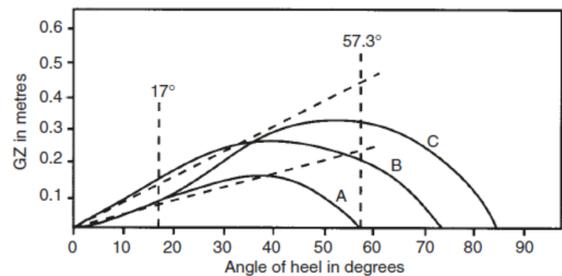
Dengan mengaplikasikan bentuk badan kapal 'V' dibanding U' sehingga nilai KM bertambah tanpa perubahan nilai VCoG, sehingga stabilitas awal dan kurva GZ bertambah besar. Peningkatan pada stabilitas dapat digunakan untuk memperbesar freeboard melalui geladak kedap, akan tetapi cara ini akan berdampak pada penambahan nilai KG terkait dengan berat dan muatan yang akan bergeser keatas. Dalam aplikasinya peningkatan karakteristik stabilitas bocor terbatas pada kelayakan bentuk konvensional rencana garis [Lloyd, 1990].

**Memperbesar rasio B/T dan lambung timbul kapal**

Cara lain yaitu dengan memperlebar bentuk badan kapal sehingga menambah tinggi titik metacentre, akan tetapi cara ini berdampak pada akselerasi dan manuver kapal [Derrett, 2006].



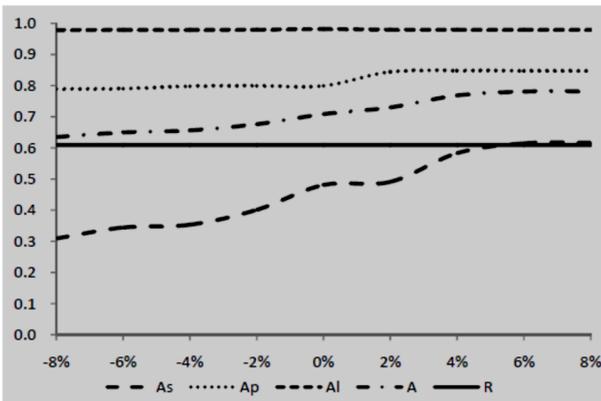
Gambar 9 : Penambahan lebar kapal



Gambar 10 : Lengan stabilitas akibat penambahan lebar kapal dan pengurangan lambung timbul

Pada Gambar 10, kurva stabilitas (B) akibat penambahan lebar kapal sesuai Gambar9B menunjukkan bahwa pada sudut oleng kecil meningkat signifikan daripada kurva yang asli (A) sesuai Gambar9A, hal ini menunjukkan terjadinya kenaikan nilai GM seiring bertambahnya lebar kapal, akan tetapi sudut ketenggelaman terhadap tepian geladak menjadi berkurang. Ketika tepi geladak tenggelam, lebar WPA akan berkurang dan hal ini akan diperlihatkan pada kurva berupa penurunan nilai GZ seiring penambahan sudut oleng. Dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan lebar akan memperbesar GM dan GZ, jarak stabilitas positif meningkat, sudut ketenggelaman berkurang dan nilai KB hampir sama. Selanjutnya kurva stabilitas (C) mewakili tren kurva akibat penambahan lambung timbul dengan mengurangi sarat sesuai Gambar9C, kondisi lebar dan KG sama sesuai dengan kondisi asli pada Gambar 9A, Hasilnya sampai dengan sudut ketenggelaman terhadap tepian geladak nilainya sama dengan kurva A, tetapi setelah itu kurva lengan stabilitas C bertambah lebih besar dari kurva A. Dengan penambahan lambung timbul akan memperbesar GM dan maksimum GZ, jarak stabilitas positif meningkat, sudut ketenggelaman bertambah besar dan nilai KB berkurang.

Pengaruh lebar badan kapal terhadap karakteristik damage stability memiliki tren yang sama, berdasarkan hasil kajian optimasi yang telah dilakukan oleh Zaky dan Purwono (2012) terhadap sebuah FPSO. Semakin lebar badan kapal maka semakin besar pula kemampuan bertahan kapal terhadap kebocoran (nilai indeks dicapai A) terhadap indeks dipersyaratkan R.



Gambar 11 : Pengaruh variasi B/T terhadap indek penyekatan

Gambar 11 menunjukkan bahwa nilai indek A semakin besar seiring dengan semakin besar rasio B/T. Hal ini diakibatkan semakin besar lebar badan FPSO maka stabilitas (GM) semakin baik dan nilai sarat berkurang akibat penurunan tinggi lambung timbul.

**Penambahan sponsons badan lambung kapal**

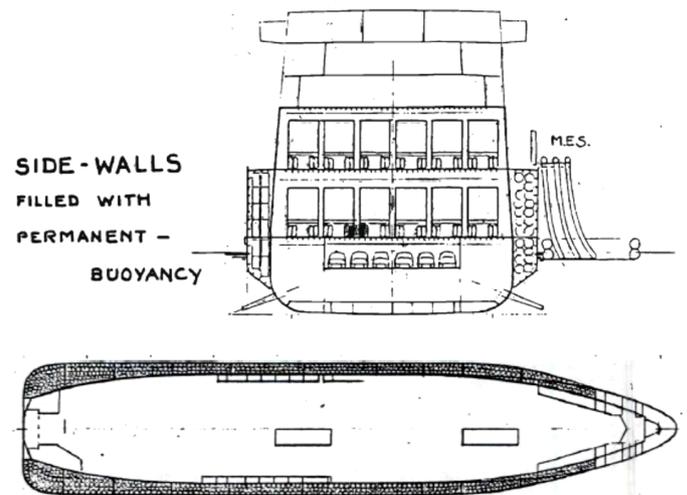
Dengan menambah sponsons (Gambar 12) yang melekat pada sisi luar lambung kapal [Lloyd, 1990], maka *damage stability* kapal dapat ditingkatkan. Dimana untuk menghindari kebocoran pada satu sisi lambung kapal setelah terjadi kerusakan maka sponsons perlu dibagi dengan sejumlah sekat melintang atau dengan cara lain menggunakan material apung permanen pada sponson. Adapun kekurangan dari metode ini yaitu menimbulkan gerakan *rolling* yang kurang baik akibat penambahan GM, menambah tahanan kapal, bergantung pada situasi dermaga dimana harus ada *clearence* antara sisi dermaga dan kapal akibat penambahan sponson, dan mempersulit proses penurunan sekoci.



Gambar 12 : Aplikasi sponson pada kapal feri ro-ro

**Aplikasi daya apung permanen**

Dengan mengaplikasikan daya apung permanen (*permanent buoyancy*) pada kompartemen kosong menggunakan material apung, misal; drum, bola plastik, pipa pvc, blok foam dll [Vossnack, 1987], hal ini bertujuan untuk mengurangi laju air yang masuk pada saat kompartemen tersebut bocor, sehingga semakin kecil permeabilitas kompartemen semakin kecil pula air yang masuk akibat kebocoran, seperti diperlihatkan pada Gambar 13. Adapun kekurangannya, yaitu kompartemen yang diisi dengan material apung akan mengurangi kapasitas muatan, khususnya di geladak kendaraan.



Gambar 13 : Pemakaian daya apung permanen yang diletakkan di *sponsons* [Vossnack, 1987]

Vredeveltd dkk [Vredeveltd, 2000] menginformasikan bahwa pemasangan blok foam atau dikenal dengan *Expanded PolyStyrene foam* (EPS) pada kompartemen kosong (*void*) sangatlah efektif dan relatif murah guna meningkatkan ketahanan kapal feri ro-ro terkait dengan *damage stability* dan tabrakan, karena sifat material tersebut yang mengapung, ringan dan mampu menyerap energi. Foam EPS juga aman terhadap resiko terbakar sehingga bisa ditempatkan diruang tertutup, kedap udara dan tempat terbuka.

Gambar 14 menunjukkan pemakaian blok foam pada *wing tank*. Pengawasan terhadap kualitas foam dan pengaruhnya di *wing tank* dilaksanakan oleh klasifikasi dengan interval waktu 5 tahun. Beberapa kajian mengklaim bahwa blok foam dapat menyerap energi akibat tubrukan sampai dengan 12% dan penyerapan foam terhadap air untuk 20 kg/m<sup>3</sup>, yaitu nol dengan jangka waktu pendek.



**Gambar 14 :** Blok foam yang digunakan pada sebuah kapal feri ro-ro (atas), kompartemen samping (bawah) yang telah dipasang foam [Vredeveltd, 2000]

### 3. Kesimpulan

Kapal feri ro-ro dengan geladak kendaraan terbuka dan lambung timbul rendah memiliki karakteristik stabilitas yang riskan untuk terbalik, hal ini diperparah lagi jika kapal tersebut mendapatkan gaya eksternal (angin, arus dan gelombang) yang mengakibatkan kapal oleng, terlebih lagi jika mengalami kebocoran akibat tubrukan atau kandas. Untuk itu diperlukan beberapa solusi guna meningkatkan karakteristik stabilitas khususnya saat mengalami kebocoran.

Banyak sekali cara untuk meningkatkan karakteristik *damage stability* kapal feri ro-ro, diantaranya melalui penambahan alat kestabilan, penambahan sekat pada geladak kendaraan dan ruangan kapal, perubahan bentuk dan dimensi kapal, pengurangan sarat, penambahan volume apung dan material apung. Kesemuanya itu dapat diterapkan bergantung pada karakteristik kapal, efektifitas dan kajian optimasi dari perlakuan yang akan diaplikasikan.

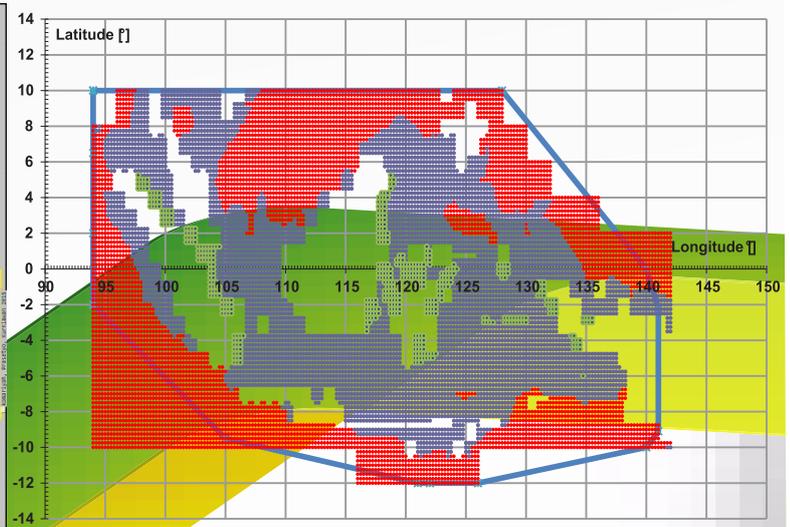
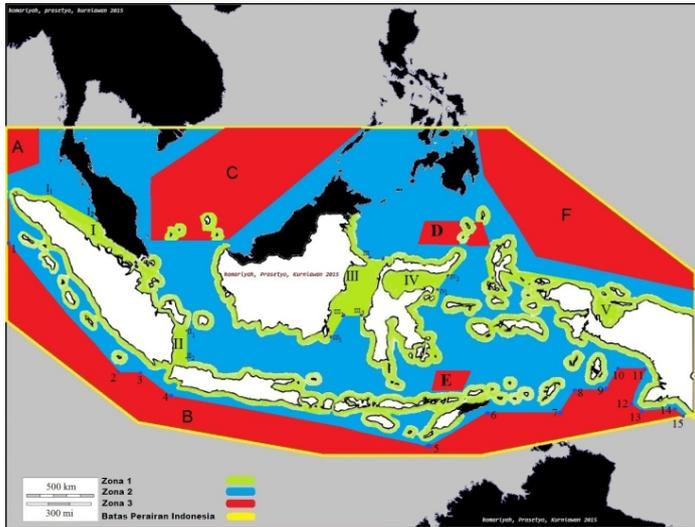
### Daftar Pustaka

- [1] BASSLER C C dan REED A M, An Analysis Of The Bilge Keel Roll Damping Component Model, Proceeding 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, St Petersburg Rusia, 2009.
- [2] Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), BKI Ship Register, 2012.
- [3] BROWN J G, Buoyant Wing Spaces-Economic Compliance with SOLAS 90, The second Henry Kummerman Foundation International Conference on Ro-Ro Safety and Vulnerability - The Way Ahead, London, 1991.
- [4] DERRET D R, Ship Stability for Master and Mates, sixth edition-consolidated 2006, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2006.
- [5] Estonia Joint Accident Investigation Commission (EJAIC), Final Report about the M/V Estonia accident, 1994.
- [6] GU Y, Day S, Boulougouris E, A Study on the Effects of Bilge Keels on Roll Damping Coefficient, Proceeding 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, UK, 14-19 June 2015.
- [7] IKEDA Y, Prediction Methods of Roll Damping of Ships and Their Application to Determine Optimum Stabilization, Journal of Marine Technology, Vol. 41, No.2, pp.89-93, 2004.
- [8] International Maritime Organization (IMO), Regulations on Subdivision and Stability of Part B of Chapter II of the International Convention for the Safety of Life at Sea, Resolution A.265 (VIII), adopted on November 20, 1973.
- [9] International Maritime Organization (IMO), 1974 International Convention for the Safety of Life at Sea, adopted on November 1, 1974.
- [10] International Maritime Organization (IMO), 1974 International Convention for the Safety of Life at Sea AS amended Regulation 25, Part B, Chapter II-1, 1997.
- [11] International Maritime Organization (IMO), Adoption of Amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended, Resolution MSC.216 (82), adopted on December 8, 2006.
- [12] International Maritime Organization (IMO), SOLAS Consolidated Edition 2009 Chapter II-1 Part B-1, 2009.
- [13] JSPS-DGHE Program on Marine Transportation Engineering, Collection of Wave Data and Safety of Ships Operating in Indonesian Domestic Seas, Final Report, Jakarta, 2006.
- [14] Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), Accident Reports 2003-2016, Jakarta, 2016a.
- [15] Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT), Laporan Investigasi Kecelakaan Pelayaran; Tenggelmnya KMP. Refalia 2, Jakarta, 2016b.
- [16] LLOYD C G, UK DoT-Research into enhancing the stability and survivability of Ro-Ro passenger ferries-Overview study, London, 1990.
- [17] PAWLOWSKI M, Subdivision of RO/RO Ships for Enhanced Safety in the Damaged Condition, Journal of Marine Technology, Vol. 36, No.4, pp.194-202, 1999.

- [18] PUCILL F dan VELSCHOU S, Ro-Ro passenger ferry safety studies - Model tests of a typical ferry, The International Symposium on the Safety of Ro-Ro Passenger Ships, RINA, London, 1990.
- [19] RAWSON K J, Tupper E C, Basic Ship Theory, Fifth Edition Volume 1, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [20] ROSS C T F and JORDAN D, A Design to Improve the Damage Stability of Ro-Ro-Ferries, Shipping World and Shipbuilder, pp 36-37, March 1995a.
- [21] ROSS C T F and JORDAN D, New Design to Improve Damaged Stability, Safety at Sea International, pp 30-31, August 1995b.
- [22] ROSS C T F and JORDAN D, More on the Damage Stability of Ro-Ro Ferries, Shipping World & Shipbuilder, pp 36-38, September 1995c.
- [23] ROSS C T F, Roberts H V, Tighe R, Tests on Conventional and Novel Model Ro-Ro Ferries, SNAME J of Marine Technology, Vol. 34, No. 4, pp. 233-240, Oct 1997.
- [24] ROSS C T F, Stothard S, Slaney A, Damage Stability Characteristics of Model Ro/Ro Ferries, SNAME Journal of Marine Technology, Vol. 37, No. 1, pp. 57-63, Winter 2000.
- [25] ROSS C T F, Mourtos I, Papanikolaou G, Effect of Longitudinal Bulkheads on Damage Stability of Model RO/RO Ferries, SNAME J of Marine Technology, Vol. 40, No. 1, pp 20-24, January 2003.
- [26] SLAPNICAR V, Grubisic I, Relation Between Subdivision and Safety Ro-Ro Ships, Zagreb, Croatia, 2009.
- [27] VASSALOS D dan PAPANIKOLAOU A, Stockholm Agreement – Past, Present, Future (Part 1), Journal of Marine Technology, Vol. 39, No.3, pp.137-158, 2002a.
- [28] VASSALOS D dan PAPANIKOLAOU A, Stockholm Agreement – Past, Present, Future (Part 2), Journal of Marine Technology, Vol. 39, No.4, pp.199-210, 2002b.
- [29] VOSSNACK E, Buoyancy in the wings, The Kummerman International Conference on Ro-Ro Safety and Vulnerability-the Way Ahead, London, 1987.
- [30] VREDEVELDT A W, Journée J M J, Vermeer H, the Effect of Crashworthiness and Solid Buoyancy on Survivability of Damaged and Flooded Ro-Ro Ships, Seventh International Conference on Stability of Ships and Ocean Structures, Launceston, Tasmania, 2000.
- [31] WENDEL K, Die Wahrscheinlichkeit des Uberstehens von Verletzungen. Schiffstechnik, 7, No. 36, 47-61, 1960.
- [32] ZAKY M, Analisa Keselamatan Kapal Feri Ro-Ro Ditinjau Dari Damage Stability, Master Tesis, FTK ITS, 2012.
- [33] ZAKY M. dan Ali B, Kajian Awal Penentuan Lambung Timbul dan Tinggi Haluan Minimum Kapal Untuk Wilayah Perairan RI, Jurnal Transportasi Laut, Volume 25, No.5, Mei 2013.
- [34] ZAKY M, Utama I K A P, Kurniawan A, Syarif R, Wasito A M, Initial Study on The Development of Minimum Bow Height Formula for Indonesian Waterways Based On Probability of Deck Wetness, Proceeding 9<sup>th</sup> International Conference on Marine Technology (MARTECH 2014), Surabaya, 24-26 October 2014.
- [35] ZAKY M dan Purwono, A, Kajian Keselamatan FPSO Ditinjau Dari Damage Stability, Proseding Seminar Nasional Teori dan Aplikasi Teknologi Kelautan (SENTA), ITS Surabaya, 2012.

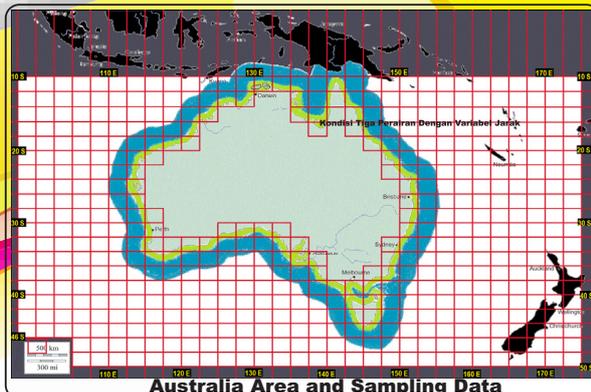
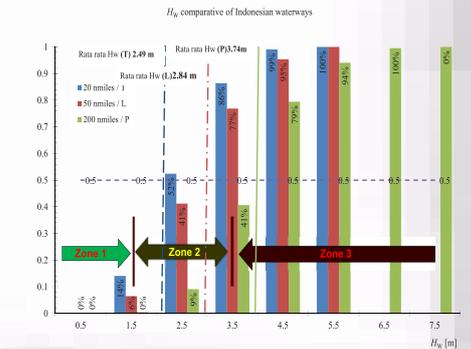
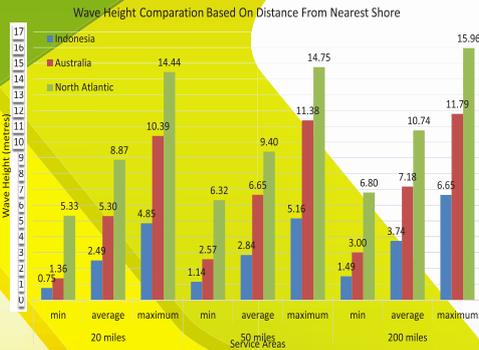
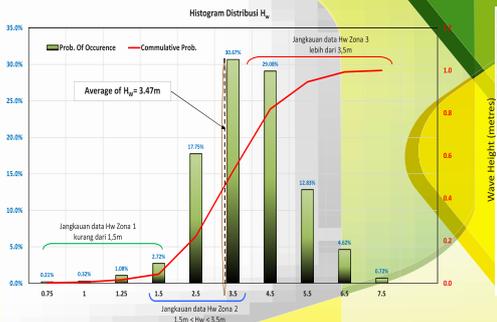


**Mochammad Zaky**, merupakan Staf Peneliti bidang Hidrodinamika dan Stabilitas di Divisi Penelitian dan Pengembangan PT. Biro Klasifikasi Indonesia (Persero). Saat ini Penulis aktif pada kegiatan penelitian aturan garis muat dan stabilitas untuk perairan Indonesia.

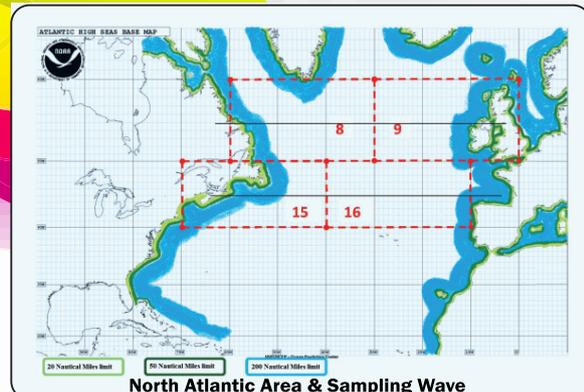


Hasil Analisa pada data berbasis jarak pelayaran dan data berbasis history gelombang di Indonesia

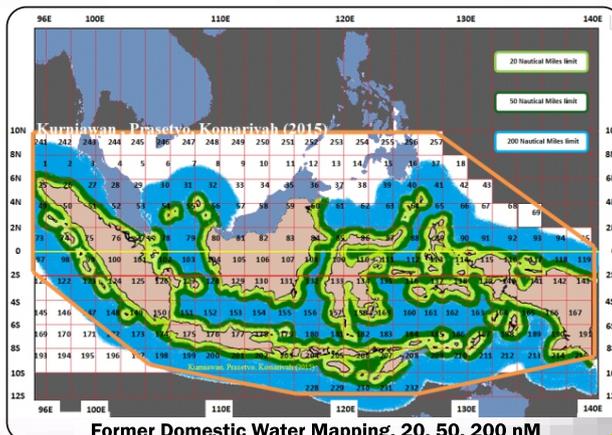
### $H_w$ perairan Indonesia, dari sistem zonasi terhadap data berbasis jarak dari garis pantai



Australia Area and Sampling Data



North Atlantic Area & Sampling Wave



Former Domestic Water Mapping, 20, 50, 200 nM



# DEVELOPMENT OF RULES-REGULATIONS FOR SHIP INTENDED SAIL IN DOMESTIC INDONESIAN WATERWAYS: Ship's Service Area

Mohammad Arif Kurniawan, Fredhi Agung Prasetyo, Siti Komariyah

## Abstract

In the last study, Kurniawan (2016) compared three water areas (North Atlantic ocean, Australian waterways and Indonesian waterways) in term of ocean environment condition, that is significant wave height. There are significant different between North Atlantic ocean and Indonesian waterways as well as between Australian waterways and Indonesian waterways. The procentage ratio between those areas are 200% and 133%. Continuing the last study, the further analysis of Indonesian waterways are conducted to get general model around of this area. The proposal of the service area model that is used in term of regulation and rules of Classification society and The Indonesian Adminitrator are analysed. The meto-ocean data was provided by using ECMWF hind-cast data.

The sampling meto-ocean data are collected for area on the basis of recent service area definition. The statistical data are analyzed and examined. The new ship's service area is developed for domestic Indonesian waterways. The effect of new proposal on the former service area is discussed.

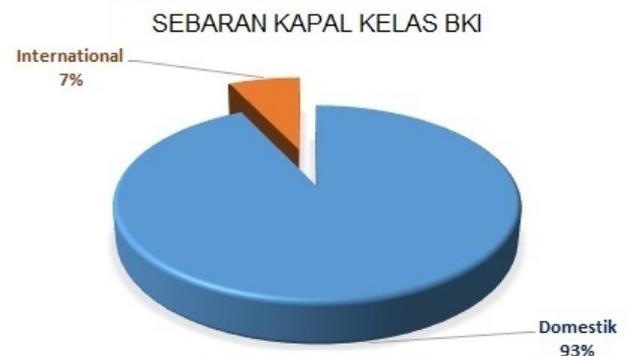
**Keywords:** Ocean environment, Indonesian waterways, domestic voyage, service area/daerah pelayaran, classification society,

## 1. PENDAHULUAN

Biro Klasifikasi Indonesia, BKI sebagai salah satu organisasi yang diakui (*recognized organization*) RO oleh pemerintah Indonesia untuk melakukan survey dan sertifikasi statutoria atas nama Pemerintah untuk kapal Berbendera Indonesia [1]. Untuk itu, BKI berperan sebagai badan klasifikasi yang mendorong peningkatan keselamatan pelayaran serta perlindungan lingkungan dengan melaksanakan survey sejak kapal dibangun untuk menjamin bahwa kapal dibangun sesuai aturan klasifikasi yang berlaku serta secara regular melaksanakan survey periodik sepanjang umur kapal. Dimana, BKI mengembangkan standar teknis aturan untuk merancang dan membangun kapal kapal yang diklaskan dan berlayar di perairan domestik Indonesia dan/atau Internasional.

BKI sudah melaksanakan bisnis klasifikasi sejak 1964, dimana berdasar data Register BKI untuk kapal yang masih aktif yang ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar tersebut menunjukkan distribusi kapal Klas BKI yang beroperasi untuk pelayaran Internasional maupun Domestik Indonesia. Kapal klas BKI yang berlayar di domestik Indonesia mendominasi dibandingkan kapal yang berlayar Internasional. Untuk itu, penguatan standar aturan pelayaran domestik Indonesia merupakan hal yang penting dan utama,

sehingga keselamatan pelayaran domestik Indonesia akan tetap tercipta dan terselenggara.



**Gambar 1 :** Distribusi wilayah operasi (Pelayaran Internasional dan Pelayaran Domestik Indonesia) kapal Klas BKI.

Aturan teknik BKI dikembangkan dari beberapa sumber yang bervariasi, antara lain: peraturan dan standar nasional maupun internasional, hasil studi dan penelitian, serta dari penerapan hasil rekayasa yang umum dan dapat digunakan. Secara umum aturan teknik tersebut dikhususkan untuk kapal yang memiliki daerah pelayaran tidak terbatas, dimana kapal tersebut diperiksa untuk dapat beroperasi di seluruh wilayah pelayaran di seluruh dunia tanpa terkecuali. Kondisi

lingkungan yang menjadi acuan adalah kondisi lingkungan di Laut Atlantik Utara [2][3].

Saat ini di negara Indonesia sedang tumbuh dan berkembang atau lebih tepatnya bangkit kembali untuk membangun armada kapal domestiknya, khususnya kapal yang hanya beroperasi di wilayah perairan Indonesia. Selain mendukung upaya pemerintah untuk membangkitkan kembali Indonesia sebagai negara maritim hal ini juga menjadi tugas utama BKI sebagai salah satu pemegang peranan penting dalam dunia maritim yang juga bertujuan untuk mendukung armada nasional. Untuk itu maka pengembangan dibidang peraturan kapal-kapal yang khusus beroperasi di wilayah domestik menjadi perhatian utama, dengan pertimbangan jika tetap menggunakan rules yang digunakan selama ini, maka akan terjadi design yang kurang tepat dimana kondisi lingkungan di Laut Atlantik Utara dua kali lebih *extreme* dibandingkan wilayah perairan Indonesia. Sehingga diperlukan penyesuaian khususnya bagi kapal yang hanya beroperasi di wilayah domestik perairan Indonesia.

Di paper ini, kelanjutan studi yang telah dilaksanakan [4] dengan menggunakan data rekaman tinggi gelombang di seluruh perairan Indonesia, menganalisa kondisi tinggi gelombang yang terjadi, sehingga akan didapatkan pola umum penyebaran kondisi lingkungan perairan Domestik Indonesia, serta usulan daerah pelayaran yang sesuai kondisi lingkungan. Efek dari proposal yang diajukan terhadap daerah pelayaran yang ada didiskusikan.

## 2. PERBANDINGAN TIGA WILAYAH PERAIRAN

BKI sebagai badan badan klasifikasi melakukan sertifikasi dan klasifikasi. Fungsi utamanya adalah untuk menjamin keselamatan kapal dan bangunan lepas pantai. Kapal yang diklaskan BKI, akan memiliki tanda klas yang diantaranya adalah notasi yang spesifik menunjukkan daerah pelayaran kapal tersebut dan ditulis dengan jelas di sertifikatnya.

### 2.1 Daerah Pelayaran

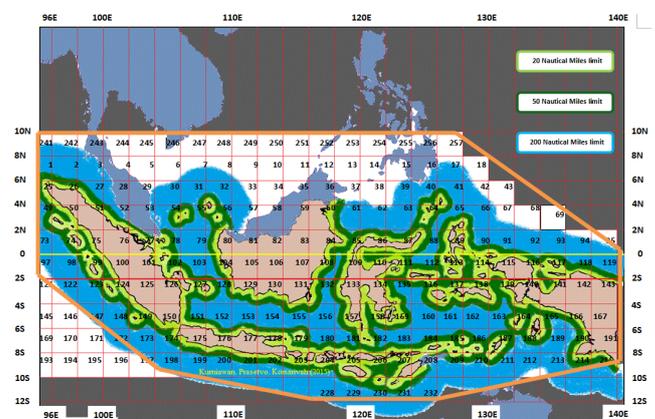
Daerah pelayaran mengacu pada peraturan teknik untuk kapal laut baja [5] adalah:

- Daerah pelayaran tidak terbatas (“*Seagoing*”/ *Unrestricted*, tanpa notasi)
- Daerah pelayaran terbatas (*Restricted*); dengan notasi
  - **P** ; ≤ 200 Nmiles
  - **L** ; ≤ 50 Nmiles
  - **T** ; perairan terbatas pada laut tenang, perairan terlindung, pelabuhan, atau yang setara.

Gambar 2 menunjukkan peta perairan Indonesia dengan simulasi pembagian jarak pelayaran, sesuai aturan BKI [5].

Terlihat digambar bahwa sebagian wilayah perairan Indonesia secara umum dapat dicapai oleh kapal klas BKI yang berlayar dengan notasi **P**.

Lebih lanjut, jika dikorelasikan dengan kapal klas BKI, maka distribusi kapal Klas BKI dengan masing-masing notasi daerah pelayaran ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar tersebut menunjukkan bahwa 6 % kapal klas BKI memiliki notasi “*Seagoing*”, 75% untuk notasi **P**, 11% untuk notasi **L**, 8% untuk notasi **T** dan sisanya adalah notasi **D**. Data ini menunjukkan bahwa notasi kapal Klas BKI yang memiliki notasi daerah Pelayaran **P** mendominasi data register dan berbanding lurus dengan komposisi *coverage* pelayaran **P** pada peta perairan Indonesia Gambar 2.



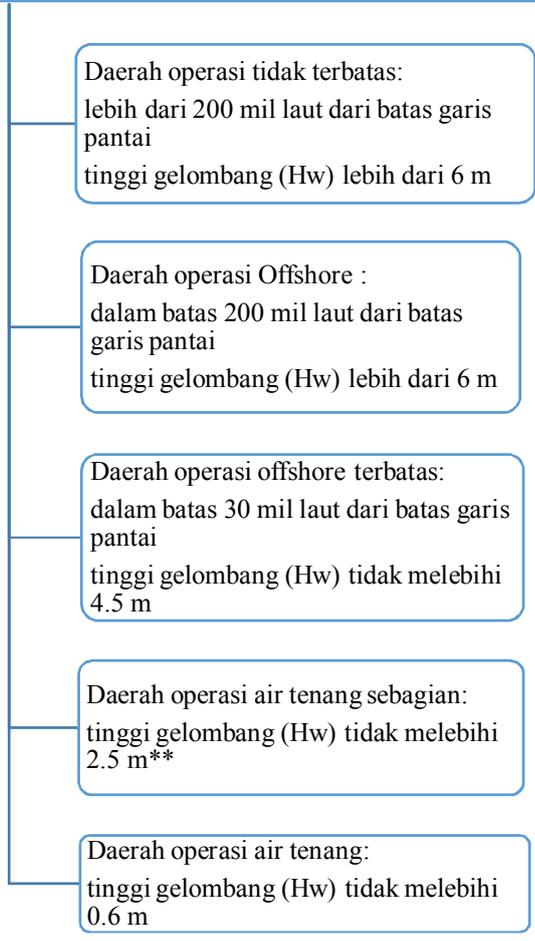
**Gambar 2 :** Peta perairan Indonesia dengan batas perairan sesuai PM.7 2013 [6]. Terdapat pembagian untuk data tinggi gelombang (Kurniawan [7]) serta daerah pelayaran berjarak 20 mil laut, 50 mil laut dan 200 mil laut dari garis pantai.



**Gambar 3 :** Distribusi daerah Pelayaran Kapal Klas BKI. Daerah pelayaran sesuai [5]; Seagoing/Unrestricted, P (200 mil laut), L (50 mil laut), T (20 mil laut) dan D (sheltered water); ditampilkan di gambar.

Selain itu, ada beberapa pembagian daerah pelayaran yang dapat didiagramkan sebagaimana Gambar 4, dengan merujuk pada KM 65 tahun 2009 mengenai Standar Kapal Non Konvensi berbendera Indonesia[8].

**Daerah Pelayaran sesuai peraturan Standar kapal non konvensional berbendera Indonesia (NCVS) [8]**



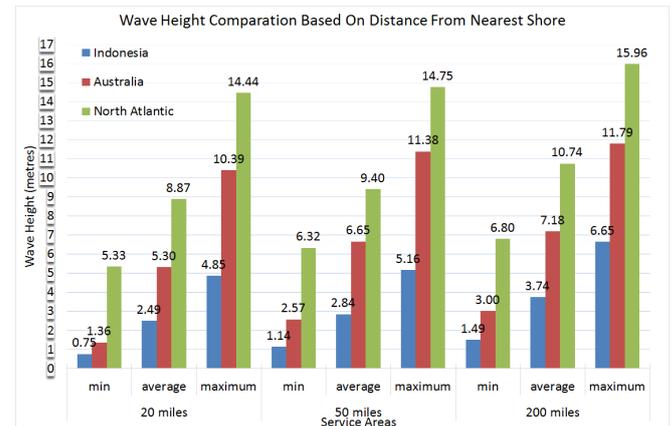
**Gambar 4 :** Pembagian daerah pelayaran kapal non-konvensi Berbendera Indonesia berdasarkan KM 65 tahun 2009 [8]. \*\*Sesuai NSCV part B edisi 1.1 [9] daerah air tenang sebagian (*partially smooth waters*) memiliki tinggi gelombang tidak melebihi 1.5 meter.

**2.2 Perbandingan Laut Atlantik Utara, Perairan Australia, Perairan Indonesia**

Kurniawan[4] telah membandingkan tiga wilayah perairan yang berbeda, yaitu Laut Atlantik Utara, perairan Australia dan perairan Indonesia. Daerah pelayaran 20 mil laut, 50 mil laut dan 200 mil laut pada setiap wilayah ditentukan batasnya, dan data tinggi gelombang signifikan untuk masing masing daerah pelayaran dan seluruh wilayah perairan dibandingkan.

Gambar 5 menunjukkan hasil perbandingan antara perairan Indonesia, perairan Australia dan Laut Atlantik Utara. Bahwa untuk daerah pelayaran 200 mil laut, tinggi gelombang rata-rata di laut Atlantik Utara lebih tinggi dibandingkan dua wilayah perairan yang lain, dan perairan Australia juga lebih tinggi dibandingkan dengan perairan Indonesia. Hal ini juga berlaku untuk minimum tinggi gelombang dan maksimum

tinggi gelombang di seluruh daerah pelayaran. Secara umum dapat disimpulkan bahwa untuk seluruh kelompok jarak pelayaran; kondisi tinggi gelombang laut Atlantik Utara memiliki prosentase rasio sebesar 400% sedangkan perairan Australia sebesar 200% jika dibandingkan dengan perairan Indonesia, meskipun pada beberapa daerah memiliki perbedaan hingga 700%.

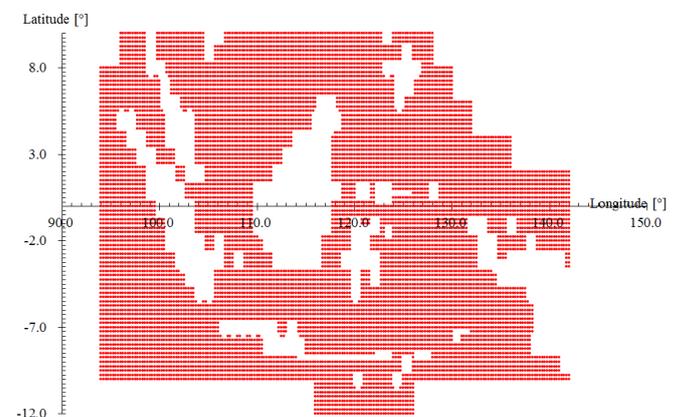


**Gambar 5 :** Perbandingan tinggi gelombang pada tiga perairan yang berbeda, Perairan Indonesia, Perairan Australia dan Laut Atlantik Utara. Tiga daerah pelayaran digambarkan dalam perbandingan yaitu 20 mil laut, 50 mil laut dan 200 mil laut.

**3. ANALISA PERAIRAN INDONESIA**

**3.1 Data gelombang**

Data hind-cast yang diunduh dari *European centre for medium-range weather forecasts* (ECMWF)[10] digunakan lebih lanjut dalam analisa. Data primer yang digunakan adalah tinggi gelombang signifikan (*Significant wave height, H<sub>w</sub>*) serta periode gelombang rata rata (*mean wave period, T<sub>w</sub>*). Data diambil dari pengukuran sepanjang 1979 hingga 2014 dalam 4 kali periode pengambilan dalam satu hari yaitu pukul 00.00, 06.00, 12.00 dan 18.00.

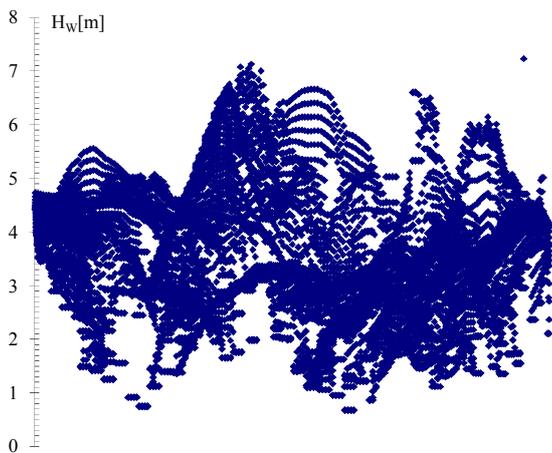


**Gambar 6 :** Titik lokasi pengambilan data untuk perairan Indonesia.

Gambar 6 menunjukkan titik lokasi pengambilan data pada perairan Indonesia. Akurasi data yang digunakan adalah  $0.25^\circ$  dalam koordinat lintang dan bujur, namun untuk menyederhanakan analisa, rentang  $0.75^\circ$  serta  $1.0^\circ$  saja yang digunakan.

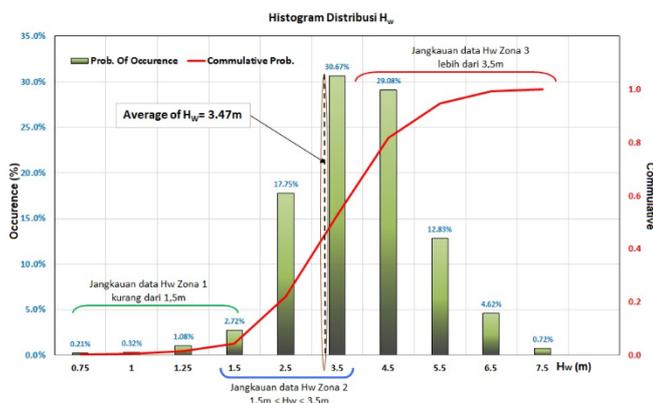
### 3.2 Hasil dan Diskusi

Dari seluruh data  $H_w$  dan  $T_w$  yang diperoleh dari ECMWF, maka untuk setiap titik lokasi dianalisa karakteristik statistiknya. Distribusi maksimum  $H_w$  untuk seluruh titik lokasi pada Gambar 6 ditunjukkan di **Gambar 8**.



**Gambar 7** : Distribusi maksimum tinggi gelombang signifikan ( $H_w$ ) untuk perairan Indonesia pada titik koordinat yang diambil pada lokasi sesuai Gambar 6.

Karakteristik statistik menunjukkan bahwa perairan Indonesia pada lokasi yang dipilih, memiliki minimum  $H_w$  sebesar 0.68 meter, dengan maksimum  $H_w$  7.23 meter dan rata-rata  $H_w$  3.47 meter. Standar deviasi sebesar 1.18 meter. Histogram distribusi  $H_w$  ditunjukkan di **Gambar 8**.



**Gambar 8** : Histogram Distribusi  $H_w$  sesuai Gambar 6.

Secara umum pada gambar 8,  $H_w$  dikelompokan setiap 1 meter penambahan dan untuk rentang 0.5m ~ 1.5m,  $H_w$  dikelompokan setiap 0.25 meter penambahan (0.5m, 0.75m,

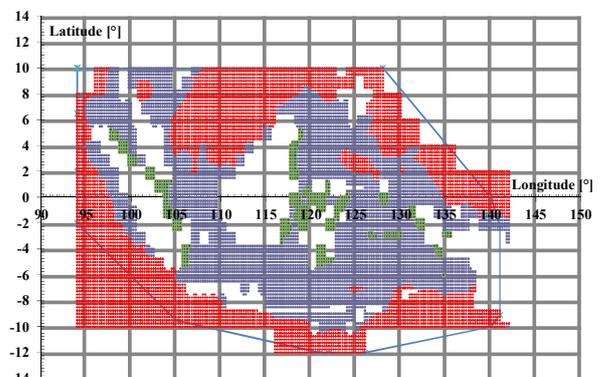
1.0m, 1.25m, 1.5m, 2.5m, ...). Karena pada 0.5m frekuensi  $H_w$  yang terjadi tidak ada, maka rentang axis dimulai dari 0.75m.

Dari gambar tersebut, dapat ditentukan batas atas rentang distribusi yang terdekat dengan rata-rata  $H_w$ , yaitu 3.5 meter. Sedangkan rentang bawah, dapat ditentukan sesuai dengan  $H_w$  pada kondisi lingkungan ‘daerah operasi air tenang sebagian’ (lihat Gambar 4), yaitu tinggi gelombang sampai dengan 2.5 meter [8] atau 1.5 meter [9]. Untuk rentang  $H_w$  diantara 1.5 – 3.5 meter memiliki populasi sebesar 51.1%, sedangkan untuk rentang  $H_w$  diantara 2.5 – 3.5 meter memiliki populasi sebesar 48.42%. Dengan melihat populasi yang paling dominan, maka  $H_w$  yang terjadi di perairan Indonesia memiliki tiga rentang  $H_w$ , yang dapat ditabulasikan sesuai Tabel 1.

Tabel 1. Deskripsi zona Tinggi gelombang signifikan perairan Indonesia.

Zona	Deskripsi
1	$H_w < 1.5$ meter
2	$1.5 \text{ meter} \leq H_w \leq 3.5$ meter
3	$H_w > 3.5$ meter

Lebih lanjut, jika kita gabungkan fungsi koordinat titik lokasi (Gambar 6) dengan deskripsi zona  $H_w$  untuk perairan Indonesia (Tabel 1), maka dapat ditunjukkan pada Gambar 9. Pada tersebut, zona 1 dideskripsikan dengan warna hijau, zona 2 dengan warna biru dan zona 3 dengan warna merah.



**Gambar 9** : Pemetaan wilayah perairan Indonesia sesuai range maksimum  $H_w$  pada setiap titik lokasi.

Dari hasil tersebut diatas, maka diusulkan adanya pembagian zona wilayah perairan Indonesia menjadi 3 bagian, yaitu zona 1, zona 2 dan zona 3, yang dapat menjadi dasar ditetapkan sebagai notasi daerah pelayaran untuk wilayah domestik perairan Indonesia.

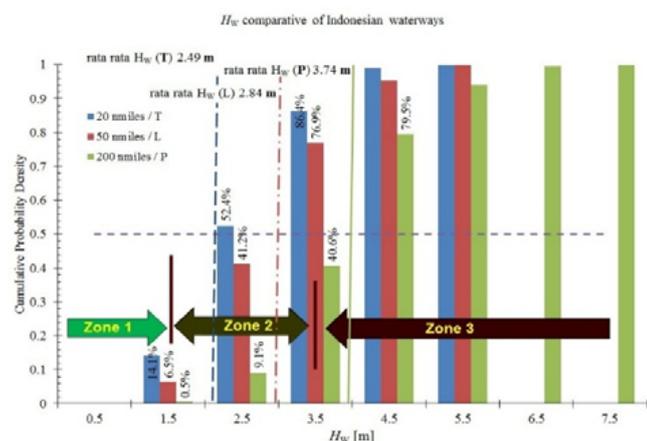
## 4. PENGEMBANGAN ATURAN TEKNIK BKI

Dalam berjalannya proses pengembangan aturan teknik, maka hasil penelitian harus dapat dikomposisikan dalam

kaidah-kaidah aturan teknik. Untuk itu hasil pembagian sistem zonasi dalam usulan daerah pelayaran domestik perairan Indonesia harus dilaksanakan adaptasi dan adopsi terlebih dahulu.

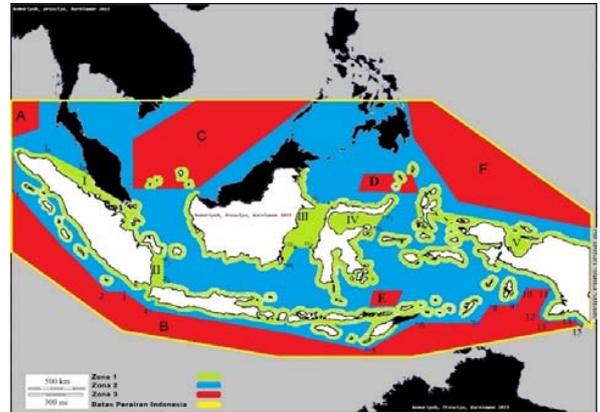
Seperti yang telah dijelaskan di bagian 2, maka saat ini hampir seluruh badan klasifikasi menggunakan daerah pelayaran berbasis jarak dari garis pantai, yaitu Unrestricted, P, L dan T. Dengan usulan perubahan daerah pelayaran dengan menggunakan sistem zonasi; zona 1, zona 2 dan zona 3, maka diperlukan perbandingan langsung antara kedua definisi daerah pelayaran tersebut.

Gambar 10 menunjukkan perbandingan  $H_w$  untuk perairan Indonesia. Pengelompokan  $H_w$  setiap 1 meter penambahan digunakan pada gambar tersebut (0.5m, 1.5m, 2.5m, ...). Gambar tersebut menampilkan kondisi  $H_w$  pada zona 1, zona 2, zona 3 mewakili sistem zonasi dan P (200 mil laut), L (50 mil laut), T (20 mil laut) mewakili daerah pelayaran berbasis jarak dari garis pantai. *Cumulative probability density* pada setiap daerah pelayaran P, L dan T ditampilkan untuk seluruh rentang tinggi gelombang. Rata-rata  $H_w$  untuk daerah pelayaran T adalah 2.49 meter, daerah L adalah 2.84 meter sedangkan daerah P adalah 3.74 meter. Kemudian pada sistem zonasi batas untuk setiap zona juga diplotkan pada gambar. Terlihat bahwa untuk daerah pelayaran T dan L, rentang tinggi gelombang di daerah tersebut untuk perairan Indonesia mulai dari 1.5m  $H_w$  hingga 5.5m  $H_w$ . Untuk daerah P, mulai dari 2.5m  $H_w$  hingga 7.5m  $H_w$ . Dalam sistem zonasi, maka dapat disimpulkan bahwa zona 3 terdiri dari 60%  $H_w$  di daerah pelayaran P, 23%  $H_w$  daerah L, dan 14%  $H_w$  daerah T. Untuk zona 1 terdiri dari 0.5%  $H_w$  daerah P, 6.5%  $H_w$  daerah L dan 14.1%  $H_w$  daerah T. Sedang zona 2, terdiri dari 35%  $H_w$  daerah P, 70.5%  $H_w$  daerah L dan 71.9%  $H_w$  daerah L.



**Gambar 10** : Perbandingan  $H_w$  perairan Indonesia, dari sistem zonasi dan daerah pelayaran berbasis jarak dari garis pantai.

Merujuk kepada hasil perbandingan diatas, dan terkait kondisi operasional kapal serta jarak dari garis pantai, sistem zonasi diusulkan untuk menjadi daerah pelayaran Domestik perairan Indonesia. Usulan digambarkan pada Gambar 11.

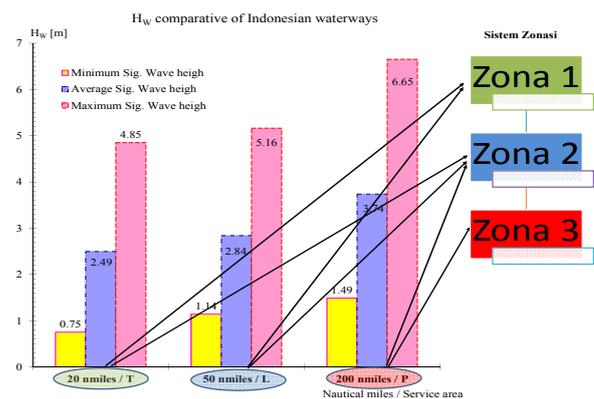


**Gambar 11** : Usulan pembagian daerah pelayaran Domestik perairan Indonesia, dengan sistem zonasi. Zona 1, zona 2 dan zona 3 dalam sistem zonasi.

Dalam usulan sistem zonasi daerah pelayaran Domestik perairan Indonesia terdiri dari:

- Zona 1, daerah perairan tenang Domestik Indonesia
- Zona 2, daerah perairan moderate Domestik Indonesia
- Zona 3, daerah pelayaran extreme Domestik Indonesia.

Effect dari proposal daerah pelayaran domestik dengan daerah pelayaran yang digunakan sekarang adalah equivalensi diantara kedua definisi daerah pelayaran tersebut. Equivalensi didasarkan kepada *logbook* wilayah operasi kapal yang bersangkutan atau rencana wilayah operasi.



**Gambar 12** : Equivalensi daerah pelayaran berbasis jarak dari garis pantai dengan sistem zonasi untuk domestik perairan Indonesia.

Gambar 12 menampilkan equivalensi daerah pelayaran berbasis jarak dari garis pantai dengan sistem zonasi untuk pelayaran domestik perairan Indonesia. Wilayah operasi kapal merupakan wilayah yang memiliki kondisi lingkungan

tinggi gelombang signifikan sesuai Tabel 1 dan berada di daerah sesuai Gambar 11.

## 5. KESIMPULAN

Sebagai kelanjutan penelitian dilakukan pada tiga daerah perairan yaitu laut Atlantik Utara, perairan Australia, dan perairan Indonesia dengan menggunakan data hindcast, maka dilakukan analisa lanjutan terhadap perairan Indonesia. Penelitian ini memberikan penjelasan analisis statistika di perairan Indonesia, dimana  $\pm 51.1\%$  kondisi tinggi gelombang signifikan perairan Indonesia dalam rentang 1.5 meter hingga 3.5 meter, 47.25% memiliki tinggi gelombang signifikan diatas 3.5 meter serta rata rata tinggi gelombang 3.74 meter. Untuk itu, maka wilayah perairan Indonesia dibagi menjadi tiga daerah kondisi lingkungan berdasarkan tinggi gelombang signifikan:

1.  $H_w < 1.5$  [meter];
2.  $1.5 \leq H_w \leq 3.5$  [meter];
3.  $H_w > 3.5$  [meter].

Dengan menggabungkan koordinat dan kondisi lingkungan serta jarak dari garis pantai, maka diusulkan adanya “sistem zonasi” dalam pembagian daerah pelayaran domestik perairan Indonesia. Dalam sistem zonasi, daerah pelayaran domestik perairan Indonesia dibagi menjadi 3 zonasi, yaitu zona 1, zona 2 dan zona 3.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Data yang dimanfaatkan dalam penelitian ini berasal dari ECMWF (European Centre For Medium-Range Weather Forecast, dengan diperoleh dan diakses melalui [http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim\\_full\\_daily/](http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_full_daily/).

Penelitian ini adalah bagian dari kegiatan penelitian yang dilakukan oleh kelompok peneliti “wave structure dan material” divisi Riset dan Pengembangan PT.Biro Klasifikasi Indonesia yang dilaksanakan oleh Penulis. Grup peneliti menyampaikan ucapan terimakasih dan rasa hormat

sepenuhnya kepada pihak pihak yang mendukung terlaksananya kegiatan penelitian ini.

## 7. REFERENSI

- [1] Australian Transport Council, “ National Standard for Commercial Vessels – part B, General Requirements”, NMSC Inc, 2011.
- [2] BKI, “Rules for Classification and Surveys, Volume I”, Rules for the classification and construction of seagoing steels ships part 1, BKI, 2016.
- [3] Direktorat Jenderal Perhubungan Laut, DJPL, Surat Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Laut Nomor PK.204/1/3/DJPL-16 tentang Penunjukan Biro Klasifikasi Indonesia (Persero) sebagai Recognized Organization untuk melaksanakan survey dan sertifikasi Statutoria atas nama Pemerintah pada kapal Berbendera Indonesia, 2016.
- [4] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int).
- [5] IACS, “IACS Recommendation No. 34 Standard Wave Data”, IACS, 2001.
- [6] IMO MSC resolusi MSC.287(87), “Adoption of the International Goal-Based Ship Construction Standards for Bulk Carriers and oil Tankers”, IMO, 2010.
- [7] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. “PM. No. 7 2013, Kewajiban klasifikasi bagi kapal berbendera Indonesia pada badan klasifikasi”, Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2013.
- [8] Kurniawan M A, Prasetyo F A, Komariyah S, “A comparison of three different water areas and its influence for development of rules regulations”, proceeding of Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting (TEAM) 2016.
- [9] Kurniawan M A, Prasetyo F A, Komariyah S, “Study on wave scatter mapping of Indonesia waterways based on hind-cast data”, proceeding of Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting (TEAM) 2014, ITU published.
- [10] Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, “KM 65 Tahun 2009, Standar Kapal Non Konvensi (Non Convention Vessel Standard) Berbendera Indonesia”, Kementerian Perhubungan RI, 2009.



**Mohammad Arif Kurniawan**, Peneliti Divisi Riset & Pengembangan, Biro Klasifikasi Indonesia. Bidang minat riset: wave induced load, structure response, material behaviour on ship structure.



**Siti Komariyah**, Peneliti Divisi Riset & Pengembangan, Biro Klasifikasi Indonesia. Bidang minat riset: wave induced load, structure response, material behaviour on ship structure.



**Fredhi Agung Prasetyo**, Peneliti Divisi Riset & Pengembangan, Biro Klasifikasi Indonesia. Bidang minat riset: wave induced load, structure response, material behaviour on ship structure.

# STUDI KASUS: ANALISA NUMERIK *NOVEL DESIGN* SEPATU KEMUDI

Topan Firmandha

## Abstrak

One of the popular rudder types is a rudder supported by sole piece, considering economic factor and also security aspect. The problem arises from installation and maintenance process because the rudder often stuck by sole piece, therefore sole piece become innovation target, and the latest innovation as an effort of efficiency is the sole piece with bolt connection. The advantage of this design is to offer an ease in the installation process of rudder, and the adequacy of its strength is tested by numerical analysis with 24mm bolt diameter. The result shows that the equivalent stress is 148 N/mm<sup>2</sup>, and it is above Class requirement which requires maximum equivalent stress at any point on sole piece length not exceed 115 N/mm<sup>2</sup>, while the bolts are safe from shear failure criteria. Hence two numerical experiments were performed on the bolt with 20 mm and 30 mm diameter, and it is figured that two stresses criteria of Class still could not be fulfilled. At the end it is conclude that this novel design cannot be accepted by Classification standard.

Keywords : sole piece; bolt connection; rudder; novel design

## 1. Pendahuluan

Kemudi merupakan suatu alat pada kapal yang digunakan untuk mengubah dan menentukan arah gerak kapal, baik arah lurus maupun berbelok. Kemudi kapal ditempatkan diujung belakang lambung kapal (buritan) biasanya di belakang propeller (baling-baling). Prinsip kerja kemudi kapal yaitu dengan mengubah laju arah fluida di bagian belakang baling-baling yang akhirnya mengakibatkan perubahan arah gerak kapal. Kemudi kapal beroperasi dengan digerakkan secara mekanik maupun hidrolik dari anjungan dengan menggerakkan roda kemudi.

Umumnya kemudi memiliki beberapa tipe, mulai dari tipe gantung, semi gantung, dan model kemudi dengan sepatu kemudi/sole piece. Dari beberapa tipe kemudi tersebut, model kemudi dengan sole piece ini (selain gantung) yang populer digunakan, selain karena faktor keamanan namun juga kemudahan, yakni kemudahan sistem, pembentukan struktur serta perakitan konstruksinya yang menjadikannya lebih ekonomis. Kemudi model ini pada keseluruhan ujungnya memiliki tumpuan yakni pada bantalan poros dan sepatu kemudi yang menjadikan perhitungannya menjadi lebih sederhana dan karena terikat pada ujung-ujungnya membuat kemudi tidak mudah terlepas ketika beroperasi sehingga menjadi tipe yang lebih aman ketika digunakan.

Adapun kekurangan jenis kemudi dengan *sole piece* ini adalah pada proses pemasangan dan pelepasan kemudi yang sedikit agak rumit, ringkasnya diuraikan dalam beberapa point sebagai berikut :

- pasang *eye plat* pada daun kemudi (*starboard* dan *portside*) dan 1 buah pada linggi buritan serta kiri-kanan lambung buritan
- lepas stopper, baut *flens*, dan baut-baut pada ujung *shaft* kemudi
- ikat tali-tali (*wire rope*) pada *eye plate* sesuai tempatnya (*starboard* dan *portside*) serta beri pengaman pada ujung *shaft* diruang kuadran
- angkat kemudi kiri dan kanan dengan *chain block* secara bersamaan sampai pena kemudi terangkat dan keluar dari *sole piece*
- geser kemudi ke kiri atau ke kanan dan turunkan daun kemudi beserta *shaft* kemudi.

## 2. Novel Design Sepatu Kemudi

Sepatu kemudi sebagaimana yang telah lazim diketahui merupakan bagian bawah (perpanjangan) linggi buritan yang mendatar hingga ke titik AP / poros kemudi. Sepatu kemudi berfungsi untuk membantu menahan berat kemudi, serta menahan kemudi agar tidak terlepas ketika beroperasi. Guna memenuhi fungsinya tersebut maka sepatu kemudi harus didesign sedemikian rupa sehingga memiliki kekuatan yang cukup sehingga mampu menahan gaya-gaya kombinasi akibat berat konstruksi kemudi, lingkungan (tekanan fluida dibelakang propeler), dan juga gaya yang terjadi akibat pergerakan rudder ketika kapal melakukan manuver untuk merubah arah/posisi. Sepatu kemudi yang lazim digunakan saat ini adalah sepatu kemudi yang dibentuk secara utuh baik dari besi tuang atau rakitan plat yang dilas mulai poros kemudi hingga linggi buritan.

Untuk memudahkan proses pemasangan, ataupun reparasi kemudi dengan sole piece maka salah satu hasil kreasi designer terkini (*novel design*) adalah struktur sepatu kemudi/*sole piece* yang di sambung/diikat dengan baut (lihat Gambar 1). Cara kerja novel design sepatu kemudi dengan sambungan baut ini yakni dengan memisahkan *sole piece* menjadi 2 bagian (separuh adalah bagian yang masih tersambung dengan linggi buritan, dan separuh bagian lainnya adalah yang dapat dilepas yang memiliki tempat pena kemudi) dengan melepas baut sambungan ketika reparasi/pelepasan kemudi, dan dilakukan sebaliknya jika akan memasang kemudi kembali. Secara ringkas proses pelepasan kemudi dengan sole piece sambungan baut dapat diuraikan sebagai berikut :

- pasang *eye plat* pada daun kemudi (*starboard* dan *portside*) dan 1 buah pada linggi buritan serta kiri-kanan lambung buritan
- lepas *stopper*, baut *flens*, dan baut-baut pada ujung *shaft* kemudi
- ikat tali-tali (*wire rope*) pada *eye plate* sesuai tempatnya (*starboard* dan *portside*) serta beri pengaman pada ujung *shaft* diruang kuadran
- lepas baut *sole piece* dan bagian *sole piece* yang memiliki tempat pena kemudi.
- turunkan kemudi secara vertikal beserta *shaft* kemudi.

Dengan prosedur pemasangan dan pelepasan kemudi seperti diatas, tentu saja akan memudahkan dalam proses eksekusi dan dapat mempercepat waktu pengerjaan, selain tentunya menjadi lebih aman dikarenakan komponen penghalang berupa *sole piece* dihilangkan.

Sisi kemudahan telah diketahui dari *novel design* ini, namun dari sisi kekuatan belum dilakukan assesmen. Salah satu cara melakukan assesmen kecukupan kekuatan struktur sepatu kemudi adalah dengan memenuhi persyaratan Klasifikasi. Dalam hal ini BKI dalam Rules for Hull, Section 13, C.4<sup>[1]</sup> digunakan sebagai referensi utama untuk meluluskan persyaratan kekuatan *novel design* sepatu kemudi sambungan baut ini.

### 3. Metodologi

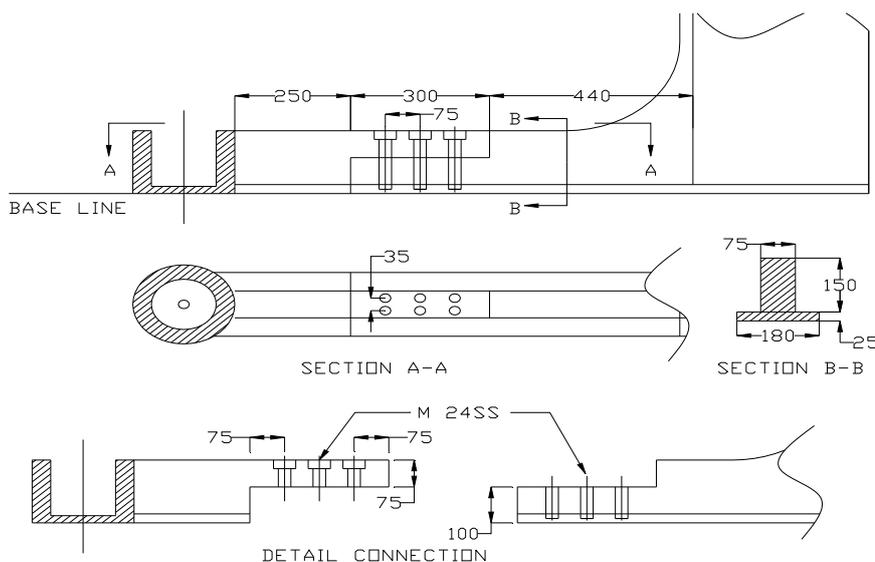
IACS dalam Unified requirement (UR) S10.9 "Strength of sole pieces and of rudder horns"<sup>[2]</sup> sebagaimana juga BKI dalam Rules for Hull, Section 13, C.4 menyatakan bahwa pengecekan kekuatan *sole piece* dapat dilakukan dengan 2 cara/metode, yakni dengan menggunakan rumus prescriptive dan dengan perhitungan langsung (misal: Elemen Hingga). Persyaratan masing-masing metode dapat dilihat sebagai berikut :

#### Formula Prescriptive

Pengecekan kekuatan *sole piece* menggunakan formula prescriptive dilakukan dengan melihat kecukupan modulus penampang *sole piece*, dan juga luas penampang minimum yang sesuai dengan rumus berikut :

$$W_z = \frac{B_1 \cdot x \cdot k}{80} \quad ; \quad W_y = \frac{W_z}{2}$$

$$A_s = \frac{B_1}{48} k$$



Gambar 1 : Novel design sepatu kemudi

dimana :

$W_z$  adalah minimum modulus penampang *sole piece* terhadap sumbu-z [ $\text{cm}^3$ ]

$W_y$  adalah minimum modulus penampang *sole piece* terhadap sumbu-y [ $\text{cm}^3$ ]

$A_s$  adalah luas penampang minimum pada jarak-x [ $\text{mm}^2$ ]

$B_1$  adalah gaya tumpuan dari kemudi [N]

$x$  adalah jarak dari penampang yang ditinjau dan diukur dari sumbu kemudi [m]

$k$  adalah faktor material (untuk baja normal nilai  $k = 1$ )

### Perhitungan Langsung

Untuk perhitungan langsung maka disyaratkan bahwa nilai tegangan total (*equivalent*) dan tegangan geser pada setiap titik dari struktur *sole piece* sepanjang  $\ell_{50}$  tidak boleh melebihi nilai berikut :

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \tau^2} = \frac{115}{k}$$

$$\sigma_b = \frac{B_1 \cdot x}{W_z}$$

$$\tau = \frac{B_1}{A_s}$$

$$= B_1 \cdot \frac{B_1}{48} k = 48 \cdot k$$

dimana :

$\sigma_v$  adalah tegangan total (*equivalent*) [ $\text{N/mm}^2$ ]

$\sigma_b$  adalah tegangan bending [ $\text{N/mm}^2$ ]

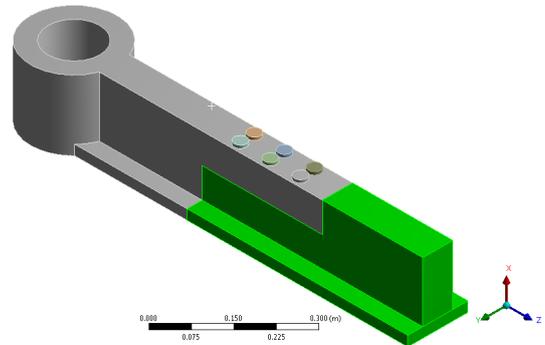
$\tau_s$  adalah tegangan geser [ $\text{N/mm}^2$ ]

Dikarenakan sambungan *sole piece* dengan baut ini memiliki 2 jenis beban yang berbeda arah, dan disinyalir terjadi pula gesekan (*friction*) antar sambungan komponen, serta adanya gaya geser yang bekerja pada baut penyambung, maka metode yang lebih tepat digunakan pada penelitian ini adalah dengan metode perhitungan langsung menggunakan Elemen Hingga, dengan menggunakan software ANSYS.

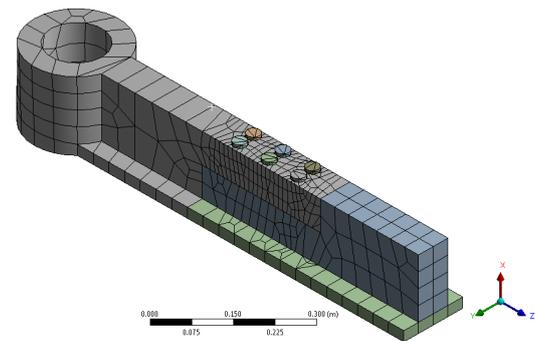
Analisa numerik diterapkan pada studi kasus *novel design* sepatu kemudi sambungan baut ini, dengan menggunakan ANSYS berbasis elemen hingga. Dalam pemodelan sepatu kemudi ini (lihat Gambar 2) setidaknya ada 3 komponen model yang harus terpisah :

- bagian sepatu kemudi terhubung dengan *pintle*
- bagian sepatu kemudi terhubung dengan linggi buritan
- baut pengikat antar sepatu kemudi

Jenis elemen yang digunakan pada ke-3 komponen diatas semuanya adalah elemen solid, meshing elemen yang digunakan adalah standar/default ANSYS, dan dilakukan refinemesh pada bagian sepatu kemudi yang tertembus oleh baut. Hasil Meshing komponen sepatu kemudi seperti yang nampak pada Gambar 3.



Gambar 2 : 3 komponen model sepatu kemudi



Gambar 3 : Meshing elemen solid

### Pembebanan

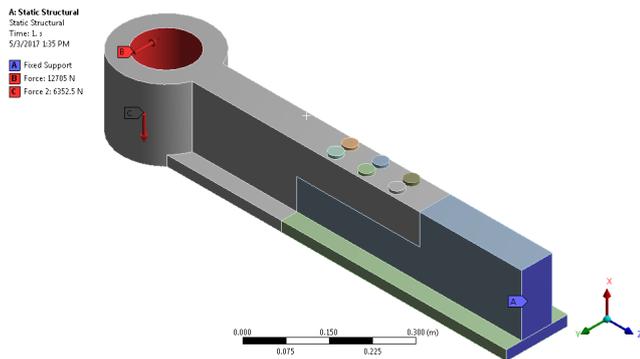
Beban-beban yang digunakan pada model dihitung berdasarkan Rules BKI, Part 1, Vol. II, Rules for Hull, Section 13 dan 14. Besarnya pembebanan telah mempertimbangkan faktor getaran propeller dan imbas fluida akibat putaran propeler, yang disebabkan kecilnya clearance antara *sole piece* dan ujung propeller (Watson menyebutkan misal untuk propeler dengan empat daun maka minimal *clearance* tip propeler dan *sole piece* adalah  $0,03K^{[3]}$ ).

Beban yang di berikan kepada model terdiri dari 2 komponen :

- beban vertikal, yakni komponen berat rudder ditambah dengan faktor lingkungan = 6325,5 N
- beban horizontal, yakni beban yang terjadi ketika kemudi berbelok = 12705 N

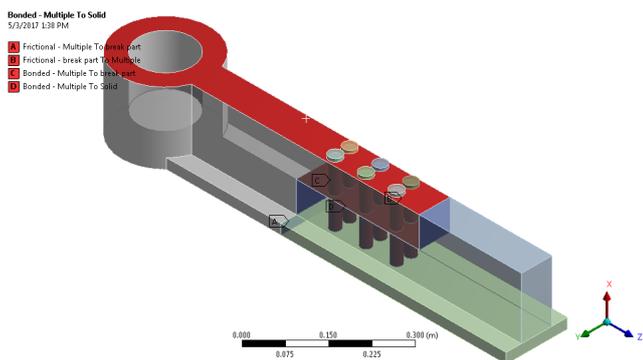
Seperti yang nampak bahwa beban horizontal memiliki nilai 2x beban vertikal, hal ini memberikan isyarat bahwa baut

menerima beban geser yang cukup besar, sehingga ukuran baut (diameter) akan menentukan faktor kecukupan kekuatan terhadap pembebanan horizontal ini. Kondisi batas dari model ini adalah dijepit pada bagian sepatu kemudi yang terhubung dengan linggi buritan, bagian ini dijepit karena linggi buritan yang biasanya berupa besi cor/tuang adalah struktur yang begitu kaku dan kokoh sehingga mampu menjepit sempurna ujung sepatu kemudi. Detail pembebanan dan kondisi batas nampak pada Gambar 4.



Gambar 4 : Pembebanan dan kondisi batas

Untuk menjaga model agar lebih mendekati kondisi sebenarnya, maka antar 3 jenis model diatas diberikan kondisi batas berupa adanya gesekan (tidak terjadi slip) antar komponen model, dikarenakan bagian sepatu kemudi yang terhubung dengan pintle dan bagian sepatu kemudi yang terhubung dengan linggi buritan hanyalah dihubungkan dengan ke-6 baut, sehingga masih memungkinkan terjadinya gesekan. Untuk itu kondisi geser permukaan berupa *frictional* diberikan pada model sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 5.



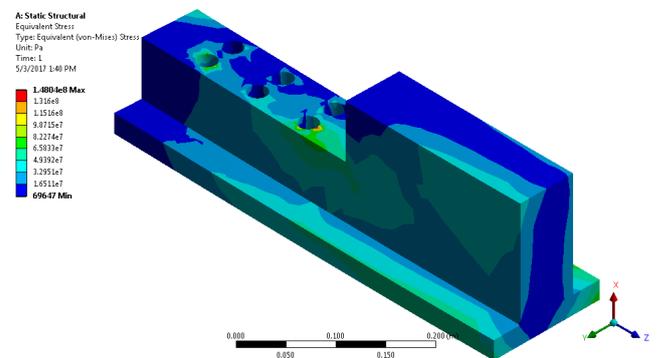
Gambar 5 : Kondisi batas-gesekan permukaan

#### 4. Hasil dan Diskusi

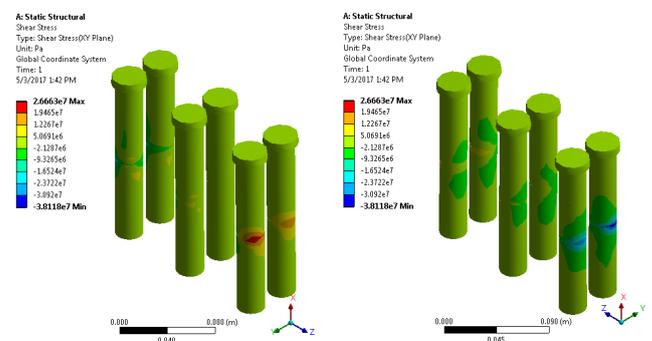
Hasil *running* ANSYS Static Structural dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7. Gambar 6 menunjukkan nilai tegangan total pada model komponen 2, dan dapat dilihat bahwa

tegangan total maksimum bernilai 148 N/mm<sup>2</sup> yang terjadi pada bagian sepatu kemudi yang terhubung dengan linggi buritan, tepatnya pada titik pertemuan antara baut terjauh dari pintle dan badan *sole piece*. Sedangkan Gambar 7 adalah nilai tegangan geser yang terjadi pada baut, dengan nilai maksimum adalah 27 N/mm<sup>2</sup> dan minimum adalah 38 N/mm<sup>2</sup>.

Sedangkan Klasifikasi dalam BKI Rules for Hull, Section 13, C.4 bab *Sole piece* menjelaskan bahwa nilai tegangan total akibat beban tekuk dan beban geser pada setiap titik struktur sepatu kemudi sepanjang  $\ell_{50}$  tidak boleh melebihi 115 N/mm<sup>2</sup> dan nilai tegangan gesernya tidak melebihi 48N/mm<sup>2</sup>. Panjang  $\ell_{50}$  sesuai *Rules* adalah panjang yang diukur dari titik pusat pintle hingga ujung sepatu kemudi pada linggi buritan.



Gambar 6 : Tegangan total komponen 2

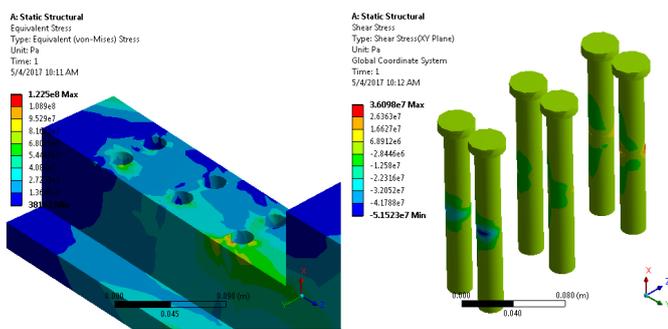


Gambar 7 : Tegangan geser pada baut

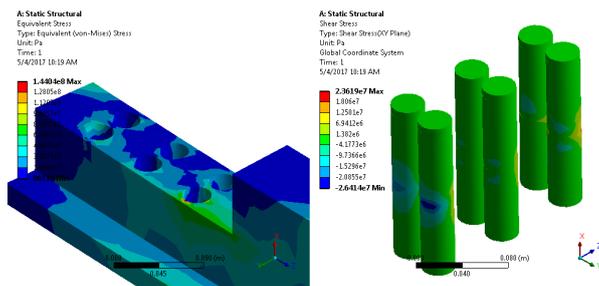
Berdasar keterangan diatas dapat diketahui bahwa tegangan geser maksimum/minimum pada baut penyambung (38 N/mm<sup>2</sup>) masih dalam batas keamanan yang dipersyaratkan (48 N/mm<sup>2</sup>), sehingga ukuran baut dengan diameter 24 mm sebanyak 6 buah sudah cukup untuk menahan gaya/beban horizontal akibat pergerakan kemudi. Sedangkan untuk tegangan total yang terjadi (148 N/mm<sup>2</sup>) sudah melampaui batas yang dipersyaratkan oleh Klas (115 N/mm<sup>2</sup>), hal ini disebabkan terlalu besarnya diameter baut, sehingga menyisakan jarak kecil baut ke tepi *sole piece*.

Ukuran baut dalam struktur ini memegang peranan yang sangat penting dalam pemenuhan 2 kriteria yakni tegangan total dan tegangan geser. Semakin besar diameter baut maka menjadikan tegangan geser yang terjadi pada baut semakin kecil, namun sisa material *sole piece* terutama pada bagian tepi baut semakin kecil yang mengakibatkan tegangan total (*equivalent*) membesar. Sebaliknya jika diameter baut diturunkan maka secara otomatis tegangan geser yang terjadi pada baut akan membesar dan tegangan total pada badan *sole piece* akan menurun. Oleh karena itu ukuran baut harus diatur sedemikian rupa sehingga 2 kriteria tegangan yang terjadi baik pada baut itu sendiri dan badan *sole piece* tercapai secara keseluruhan.

Percobaan numerik untuk baut dengan ukuran diameter 20 mm dan 30 mm dilakukan untuk menopang dan memberi solusi praktis dari *novel design* ini. Hasil percobaan dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9. Diameter baut 20 mm disajikan pada Gambar 8 dan diameter baut 30 mm disajikan pada Gambar 9.



Gambar 8 : Tegangan total dan Tegangan geser baut Ø20mm



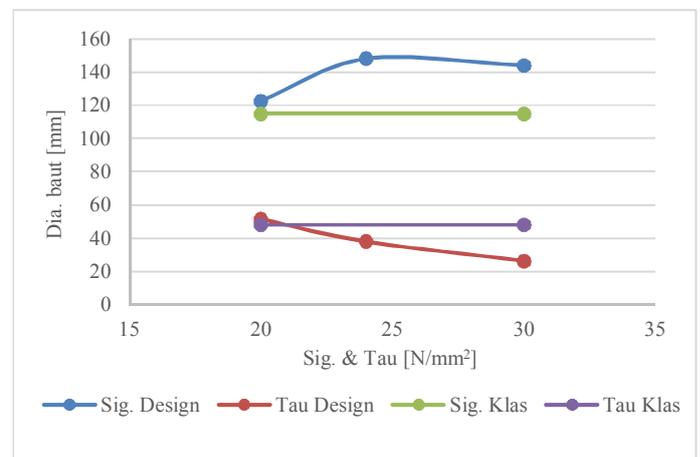
Gambar 9 : Tegangan total dan Tegangan geser baut Ø30mm

Hasil dari percobaan numerik diatas dapat di jabarkan sebagai berikut :

- Percobaan untuk baut dengan diameter 20 mm  
Tegangan total (*equivalent*) : 122,5 N/mm<sup>2</sup>  
Tegangan geser : 51,5 N/mm<sup>2</sup>
- Percobaan untuk baut dengan diameter 30 mm  
Tegangan total (*equivalent*) : 144 N/mm<sup>2</sup>  
Tegangan geser : 26,4 N/mm<sup>2</sup>

Dari percobaan baut Ø 20 mm dapat diketahui bahwa nilai tegangan total (*equivalent*) berada di atas nilai yang disyaratkan Klas, dan nilai tegangan geser pada baut juga di atas yang dipersyaratkan Klas. Sedangkan dari percobaan baut Ø 30 mm dapat diketahui bahwa nilai tegangan total (*equivalent*) berada di atas nilai yang disyaratkan Klas, namun nilai tegangan geser pada baut berada di bawah aturan yang dipersyaratkan Klas.

Untuk memudahkan analisa maka dibuatlah kurva yang berisi ukuran baut beserta hasil analisa tegangannya (baik tegangan total maupun tegangan geser), dengan specimen baut ukuran diameter 20 mm, 24 mm dan 30 mm. Dari hasil analisa tegangan tersebut ditambahkan pula tegangan-tegangan maksimum yang dipersyaratkan oleh Klas. Detail kurva perbandingan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 : Komparasi Tegangan dan Diameter baut

Keterangan Gambar 10 :

- Dia. Baut adalah diameter baut penyambung [mm]
- Sig. adalah tegangan total [N/mm<sup>2</sup>]
- Tau adalah tegangan geser [N/mm<sup>2</sup>]
- Sig. Design adalah tegangan total *novel design* [N/mm<sup>2</sup>]
- Tau Design adalah tegangan geser *novel design* [N/mm<sup>2</sup>]
- Sig. Klas adalah tegangan total maksimum yang diijinkan Klas [N/mm<sup>2</sup>]
- Tau Klas adalah tegangan geser maksimum yang diijinkan Klas [N/mm<sup>2</sup>]

Dari Gambar 10 dapat diketahui bahwa perilaku tegangan total dan tegangan geser pada *Novel Design sole piece* yang disambung baut ini saling berseberangan, dimana jika tegangan total naik maka tegangan geser turun, dan begitu juga sebaliknya.

Menariknya pada baut terkecil yakni hingga ukuran diameter 20 mm, nilai tegangan total yang terjadi pada badan *sole piece* masih diatas persyaratan Klas, pada diameter ini juga nilai tegangan geser pada baut sudah berada diatas yang dipersyaratkan Klas. Kalaupun diameter baut kembali dkecilkan hingga di bawah 20 mm, maka dimungkinkan nilai tegangan total-nya akan turun dibawah persyaratan Klas, namun nilai tegangan geser-nya sudah bisa dipastikan diatas dan melewati persyaratan Klas.

Untuk itu model *sole piece* dengan sambungan baut meskipun memiliki kemudahan dalam proses maintenance kemudi, namun jika ditinjau dari segi kekuatan struktur belum dapat memenuhi persyaratan Klasifikasi.

## 5. Kesimpulan

Analisa numerik (metode perhitungan langsung) telah dilakukan pada novel design sepatu kemudi yang disambung baut untuk membuktikan kecukupan kekuatan struktur sepatu kemudi sesuai standar Klasifikasi, lebih khusus sesuai persyaratan Rules for Hull, Section 13, C.4. Hasil analisa numerik dengan menggunakan software ANSYS pada penelitian ini menunjukkan bahwa satu dari dua kriteria tegangan yang harus dipenuhi mengalami kegagalan, yaitu masih tingginya tegangan total (*equivalent*) pada model dibanding dengan persyaratan Klas, dimana tegangan total pada model sebesar  $148 \text{ N/mm}^2$ , sedangkan tegangan total maksimum yang dipersyaratkan Klas adalah  $115 \text{ N/mm}^2$ .

Memperkecil diameter baut pada percobaan numerik selanjutnya memberikan hasil yang belum memadai, turunnya tegangan total pada baut dengan diameter 20 mm (meskipun

sedikit masih di atas persyaratan Klas) namun malah menaikkan tegangan geser hingga melebihi persyaratan Klas. Hasil akhir percobaan ini adalah sebarang pengaturan ukuran diameter baut pada *sole piece* maka tidak akan terpenuhi 2 kriteria tegangan, jika salah satunya terpenuhi maka kriteria lainnya akan gagal. Oleh karena itu Klas belum bisa menerima design *sole piece* baru ini sampai dapat dipenuhinya 2 kriteria tegangan.

## Ucapan Terimakasih

Terimakasih dihaturkan pertama kepada SM. PAT Bapak Fredhi Agung P. yang telah menginstruksikan penulis untuk mengalisa permasalahan ini, selanjutnya kepada staf Divisi Rancang Bangun Bapak M. Shodik yang telah memberi input permasalahan kepada Div. Riset dan Pengembangan, dan terakhir kepada Bapak Sukron Makmun atas masukan, koreksi dan verifikasi terhadap laporan dan analisa *sole piece* ini.

## Daftar Pustaka

- [1] Ansys, Ansys-static structural Theory Manual, Ansys Inc., (2012)
- [2] BKI, Rules for Hull, Biro Klasifikasi Indonesia, (2014)
- [3] D.G.M Watson, Practical Ship Design, Elsevier, (1998)
- [4] IACS, Unified Requirement S10, International Association Classification Society, (2015)



**Topan Firmandha**, Staf Div.Riset dan Penelitian bagian Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Teknik. e-mail : topan@bki.co.id

# STUDI PENILAIAN KEKUATAN BUCKLING PELAT PADA STRUKTUR KAPAL MENGGUNAKAN ATURAN BKI

Sukron Makmun

## Abstrak

The buckling strength assessment on local plates structure of ship using Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) rules was carried out by Rules for Hull, Sec. 3, F. Therefore, to give an explanation how the class applies those calculation, it would be needed a study of buckling strength assessment on the local plate structure using those rules. Where in these study would be explained about the recommendation calculation of critical plate thickness requirement due to buckling phenomena. Then, proof of buckling strength procedure according to BKI Rules for Hull would be proposed and applied to the plate with variation of aspect ratio ( $\alpha$ ) and edge stress ratio ( $\psi$ ). Results of this assessment shows that  $\alpha = 1$  and  $\psi = -1$  have the smallest effect in buckling failure on plates. Finally, case study of buckling assessment on the ship cross section shows that the use of the recommendation calculation of critical plate thickness is still relevant during the initial design stage of ship. But to get more real and rational results, proof of buckling strength according to Rules for Hull, Sec. 3, F should be carried out.

Keywords: buckling strength; BKI Rules for Hull; buckling calculation; plate thickness; aspect ratio ( $\alpha$ ); edge stress ratio ( $\psi$ ).

## 1. Pendahuluan

Analisa kekuatan struktur kapal yang terdiri dari panel pelat, penegar, girder atau kombinasi dari pelat dan penegar atau yang disebut dengan panel pelat berpenegar secara sederhana didasarkan pada tegangan luluh (*yield stress*) dari material dan kekuatan tekuk (*buckling strength*). Pada saat ini, hal tersebut sudah sangat umum bahwa saat mendesain struktur dan sistem agar tidak mengalami kegagalan akibat *buckling* dan *yielding* [Timoshenko, 1936]. Namun, sampai pada pertengahan abad ke 19, desain kriteria kekuatan struktur masih didasarkan pada kekuatan luluh material. Hal ini dikarenakan material besi yang digunakan dalam membangun struktur kapal pada saat itu adalah material *brittle* (rapuh) dan lemah terhadap beban tarik seperti halnya beton (*concrete*). Alasan yang lain adalah fenomena *buckling* dan segala akibatnya belum dipahami dengan sangat baik. Meskipun telah diketahui bahwa struktur dapat mengalami kegagalan/keruntuhan akibat *buckling* pada saat mendapatkan beban tekan melalui uji runtuhnya model jembatan *box girder* milik Fairbrain yang terkenal pada tahun 1845 [Timoshenko, 1951]. Setelah [Bryan, 1891] kekuatan *buckling* pada panel secara teoritis dapat dipahami dan dihitung. Dan akhirnya kekuatan *buckling* digunakan sebagai persyaratan dalam penentuan ketebalan panel pelat.

Dalam pandangan ini panel pelat berpenegar atau panel pelat dapat menjadi tidak stabil jika mengalami fenomena *buckling* yang disebabkan oleh beban tekan (*compressive load*). Ketika tegangan tekan pada bagian struktur seperti pelat atau pelat

berpenegar mencapai nilai kritis tertentu, bagian struktur tersebut mengalami *buckling*. Setelah *buckling*, lendutan mulai meningkat akibat penambahan perpindahan *in-plane* (atau aksial), yang menyebabkan pengurangan kekakuan *in-plane* (atau aksial). Salah satu masalah struktural akibat *buckling* adalah penurunan kekakuan seperti yang dijelaskan sebelumnya. Masalah lainnya adalah terjadinya *yielding* lebih awal. Hal ini karena tegangan lentur yang dihasilkan oleh defleksi pada penambahan tegangan *in-plane* (atau aksial). *Yielding* ini secara lebih lanjut akan mengurangi kekakuan struktur.

Pada saat *buckling* terjadi pada suatu bagian struktur tertentu, kapasitas dalam menerima beban struktur tersebut akan menurun. Hal ini menyebabkan penyebaran ulang gaya-gaya internal pada bagian struktur lainnya yang tidak mengalami *buckling*, sehingga akan meningkatkan gaya internal pada anggota struktur lain tersebut. Dimana hal ini dapat menyebabkan runtuhnya seluruh struktur secara keseluruhan jika beban semakin meningkat. Inilah alasan mengapa terjadinya *buckling* tidak diperbolehkan pada bagian struktur kapal.

Menurut aturan klasifikasi, penilaian kekuatan struktur kapal dilakukan dalam 3 tahap. Tahap pertama adalah penilaian kekuatan memanjang kapal (*hull girder*) yang dilakukan dengan menganggap kapal sebagai sebuah balok (*beam theory*). Dimana sisi kapal diasumsikan sebagai *web plates* sedangkan geladak dan alas diasumsikan sebagai *flanges*. Pembebanan yang digunakan dalam *hull girder* adalah momen

bending vertikal dan horizontal, gaya geser vertikal serta momen torsi. Besarnya beban *hull girder* tersebut sangat tergantung dengan parameter geometri dari bentuk lambung kapal. Dimana distribusi beban pada keseluruhan panjang kapal diambil dari perhitungan *long term statistic* yang kemudian disatukan dan diadopsi pada semua aturan dari *class society* [IACS, 1997]. Tahap kedua adalah penilaian kekuatan melintang kapal. Konstruksi melintang tersebut antara lain adalah sekat melintang, wrang pelat, gading dan balok geladak. Dan tahap terakhir adalah penilaian kekuatan lokal struktur (pelat, penegar, girder dll). Bagian-bagian struktur lokal dihitung juga dengan mengaplikasikan *beam theory* (tegangan hasil kombinasi dari berbagai macam komponen beban *hull girder* yang digunakan sebagai beban struktur lokal) meskipun bagian-bagian tersebut juga mendapatkan pembebanan dari tekanan air laut dan inersia muatan.

Evaluasi kekuatan lokal struktur adalah menentukan ukuran geometrinya (tebal atau modulus penampang) terhadap tegangan hasil respon *hull girder* dan tekanan lateral dari air laut ataupun muatan. Dimana *beam theory* digunakan dalam menghitung tegangan atau defleksi pada penegar dan girder. Sedangkan teori pelat digunakan untuk menghitung ketebalan pelat. Evaluasi tersebut didasarkan pada tegangan yang bersifat tarik (*tension stress*). Untuk beban yang bersifat tekan (*compressive stress*) pada keseluruhan aturan klasifikasi mengaplikasikan analisa *buckling* baik untuk penegar maupun pelat. Namun berapa faktor keselamatan dan bagaimana cara pengaplikasian tiap-tiap klas mempunyai pola yang berbeda. Sehingga untuk memberikan salah satu gambaran bagaimana klas mengaplikasikan perhitungan *buckling* tersebut maka dilakukan studi penilaian *buckling* pada lokal struktur pelat menggunakan aturan BKI. Dalam studi ini akan dijelaskan mengenai dasar penurunan perhitungan ketebalan pelat akibat fenomena *buckling* sesuai dengan aturan BKI. Selain itu juga akan disajikan prosedur pengaplikasian perhitungan *buckling* tersebut pada pelat dengan variasi aspek rasio ( $\alpha$ ) dan rasio tegangan tepi ( $\psi$ ).

## 2. Buckling pada pelat

Pada berbagai literatur telah dijelaskan mengenai perilaku buckling yang terjadi pada berbagai jenis pelat dengan berbagai jenis beban dan jenis tumpuan pada tiap-tiap sisinya [Timoshenko dan Woinowsky-Krieger, 1959]. Dalam analisa kegagalan akibat fenomena buckling, definisi beban kritis dari struktur adalah kondisi dimana dengan beban tersebut struktur tersebut kehilangan kestabilannya. Perhitungan analisis mengenai beban tekuk kritis dengan menggunakan teori elastisitas dapat dilakukan dengan dua cara, baik dengan menggunakan metode energi atau dengan memecahkan persamaan diferensial pelat. Persamaan diferensial pada pelat ditunjukkan sebagai berikut [Brush & Almroth, 1975]:

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} = \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \left( N_x \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

Jika pelat diasumsikan datar sempurna, sebuah pelat segiempat yang mendapatkan tumpuan sederhana pada keempat sisinya dan mengalami pembebanan tekanan aksial  $N_x$  pada arah  $x$ , tanpa mempertimbangkan adanya efek *initial imperfection*, maka persamaan kesetimbangan tersebut menjadi sebagai berikut:

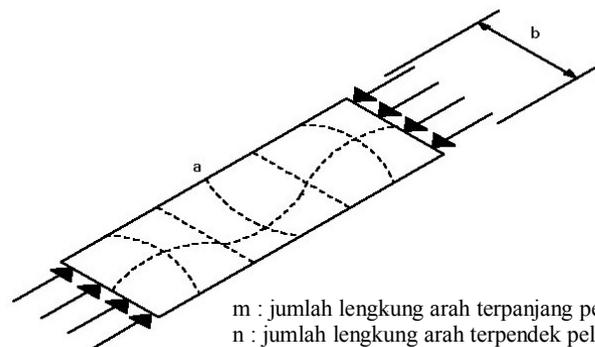
$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left( -N_x \frac{\partial^2 w(x,y)}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

Dimana  $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$  adalah *flexural rigidity* dan  $w(x,y)$

adalah defleksi keluar bidang pelat. Defleksi tersebut dapat digambarkan dengan fungsi sinus ganda dari deret fourier.

$$w(x,y) = \sum_{m=1,2,3} \sum_{n=1,2,3} w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3)$$

Dimana  $m$  dan  $n$  menunjukkan jumlah setengah gelombang sinus pada dua arah bidang pelat. Fungsi sinus tersebut menggambarkan defleksi keluar arah bidang pelat yang memenuhi kondisi tumpuan sederhana pada tiap-tiap sisinya. Sehingga tidak ada defleksi dan momen bending pada bagian pelat yang terpendek ( $b$ ) dan terpanjang ( $a$ ). Dimana untuk ilustrasi lebih lanjut dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1** : Mode kegagalan pada pelat ketika mendapatkan tekan aksial

Jika Persamaan (3) dimasukkan ke dalam Persamaan (2), maka akan menghasilkan persamaan sbb:

$$\left( \frac{m^4 \pi^4}{a^4} + \frac{2m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} \right) = \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} N_{xE} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \quad (4)$$

$$N_{xE} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{\left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}{\frac{m^2}{a^2}} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{m}{a} + \frac{n^2 a}{mb^2} \right)^2 \quad (5)$$

Kemudian tegangan kritis elastis diformulasikan sbb:

$$\sigma_E = \frac{N_{xE}}{t} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12 \cdot (1-\nu^2) \cdot b^2} \left( m \frac{b}{a} + \frac{n^2}{m} \cdot \frac{a}{b} \right)^2 \quad (6)$$

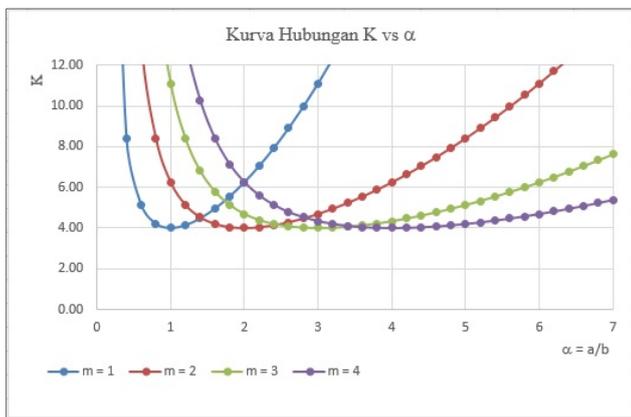
Dari Persamaan (6) tersebut dapat didefinisikan menjadi  $\alpha$  (aspek rasio) dan  $\sigma_e$  (tegangan *euler*) sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{a}{b} \quad \text{dan} \quad \sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1-\nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 \quad (7)$$

Sehingga persamaan tegangan kritis elastis menjadi:

$$\sigma_E = \sigma_e \left( \frac{m}{\alpha} + \alpha \frac{n^2}{m} \right)^2 = K \cdot \sigma_e \quad (8)$$

Dimana K adalah koefisien buckling, yang nilai K tersebut bervariasi yang disebabkan oleh hubungan aspek rasio ( $\alpha$ ) dan jumlah lengkungan pada arah memanjang (m) maupun melintang (n) pelat. Sehingga kurva hubungan K terhadap  $\alpha$  dengan jumlah lengkungan  $n = 1$  dan m bervariasi mulai dari 1, 2, 3 sampai 4 dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 : Kurva hubungan K dengan  $\alpha$

Dari Gambar 2 tersebut dapat diketahui bahwa nilai minimum dari koefisien *buckling* adalah 4, hal ini terjadi pada berbagai variasi jumlah lengkungan m. Nilai tersebut dicapai ketika hubungan antara aspek rasio dan jumlah lengkungan ( $\alpha = 1$ ;  $m = 1$ ), ( $\alpha = 2$ ;  $m = 2$ ) dan ( $\alpha = 3$ ;  $m = 3$ ) dst.

### 3. Pengecekan Kekuatan Buckling pada Pelat Menurut Rules BKI Vol II

#### Rekomendasi awal perhitungan tebal pelat kritis

Pada *Rules for Hull* [BKI, 2017] terdapat rekomendasi panduan perhitungan tebal pelat akibat *buckling*. Dimana sebagai acuan awal dalam pengecekan tebal kritis dari struktur baja pelat datar yang mengalami beban *buckling* dapat dilakukan dengan cara memasukkan nilai  $\pi = 3,14$ , *poisson ratio* ( $\nu = 0,3$ ) dan *modulus young* ( $E = 206000 \text{ N/mm}^2$ ) ke dalam Persamaan (7) dan (8). Dalam penerapannya BKI memberikan faktor

keamanan perhitungan *buckling* tersebut dengan formulasi sbb (BKI, 1996):

$$\sigma_{cr} = \sigma_E \quad \text{untuk} \quad \sigma_{cr} \leq 0,6 \cdot R_{EH}$$

$$\sigma_{cr} = R_{EH} \cdot \left( 1,474 - 0,674 \cdot \sqrt{\frac{R_{EH}}{\sigma_E}} \right) \quad \text{untuk} \quad \sigma_{cr} > 0,6 \cdot R_{EH}$$

Dengan  $\sigma_{cr} = \sigma_E$ , akan diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\sigma_{cr} = K \cdot \frac{3,14^2 \cdot 206000}{12 \cdot (1-0,3^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 = K \cdot 186184,8449 \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2$$

Sehingga formulasi ketebalan pelat kritis menjadi sebagai berikut:

$$\text{- untuk } \sigma_{cr} \leq 0,6 \cdot R_{EH}$$

$$t = b \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{186184,8449 \cdot K}} = \frac{1}{\sqrt{K}} \cdot b \cdot 0,0023175 \cdot \sqrt{\sigma_{cr}} \quad [\text{m}] \quad (9)$$

$$\text{- untuk } \sigma_{cr} > 0,6 \cdot R_{EH}$$

$$\sigma_{cr} = R_{EH} \cdot \left( 1,474 - 0,674 \cdot \sqrt{\frac{R_{EH}}{186184,8449 \cdot K \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2}} \right)$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{K}} \cdot \frac{b \cdot 0,0015620 \cdot \sqrt{R_{EH}}}{1,474 - \frac{\sigma_{cr}}{R_{EH}}} \quad [\text{m}] \quad (10)$$

$$\text{Dimana, } c = \frac{1}{\sqrt{K}}$$

Maka untuk sistem konstruksi pelat memanjang (diasumsikan beban tekan merata bekerja pada bagian terpendek pelat) dapat diketahui bahwa nilai minimum K adalah 4 (Gambar 2). Sehingga untuk konstruksi pelat memanjang dapat ditentukan nilai  $c = 0,5$ .

Sedangkan untuk sistem konstruksi pelat melintang (diasumsikan beban tekan merata bekerja pada bagian terpanjang pelat) pada berbagai literature nilai K

$$\text{diformulasikan sebagai berikut: } K = \left( 1 + \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right)^2 = (1 + \alpha^2)^2.$$

Dimana a adalah jarak penegar atau gading dari sistem konstruksi pelat. Sehingga nilai c untuk sistem konstruksi melintang adalah  $1/(1+\alpha^2)$ .

Jika Persamaan (9) dan (10) diaplikasikan pada perhitungan kekuatan *buckling* pada pelat alas kapal, maka dapat diasumsikan bahwa nilai ( $b = a$ ) adalah jarak gading dan ( $\sigma_{cr} = \sigma_{LB}$ ) adalah desain tegangan bending maksimum pada struktur alas kapal/*bottom*. Sehingga didapatkan formulasi perhitungan tebal kritis pelat alas sebagai berikut:

- Untuk  $\sigma_{LB} \leq 0,6 \cdot R_{EH}$ :  

$$t_{cr} = c \cdot 2,32 \cdot a \sqrt{\sigma_{LB}} + t_K \quad [mm] \quad (11)$$

- Untuk  $\sigma_{LB} > 0,6 \cdot R_{EH}$ :  

$$t_{cr} = c \cdot 1,57 \cdot a \cdot \frac{\sqrt{R_{EH}}}{1,474 - \frac{\sigma_{LB}}{R_{EH}}} + t_K \quad [mm] \quad (12)$$

Dimana nilai  $t_K$  pada persamaan (11) – (12) menurut *Rules for Hull* [BKI, 2017] merupakan faktor korosi dari material. Dan hal ini sangat tergantung dengan posisi struktur tersebut di dalam tangki (air tawar, air laut, minyak dll) atau di ruang kering.

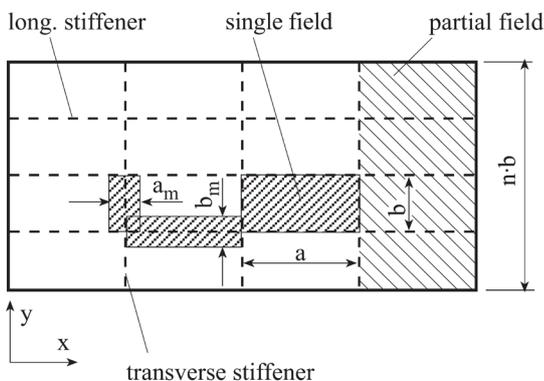
**Pembuktian kekuatan buckling pada pelat struktur**

Menurut *Rules for Hull, Sec. 3, F* [BKI, 2017] semua struktur yang mengalami beban tekan harus dicek kekuatan buckling-nya, dimana aturannya adalah sebagai berikut:

“All structural members which are subjected to compressive and/or shear stresses are to be examined for sufficient resistance to buckling. For this purpose the design stresses according to Section 5, D. and the stresses due to local loads are to be considered”.

Sehingga nilai tebal pelat kritis alas yang telah dicek dengan formulasi (11) atau (12) harus diverifikasi dengan persyaratan tersebut. Dimana nilai tegangan tepi didapatkan dari distribusi tegangan atau gaya geser pada penampang kapal dengan menerapkan beban kombinasi hull girder sesuai dengan *Rules for Hull, Sec. 5, D* [BKI, 2017].

Selanjutnya menurut aturan tersebut dijelaskan bahwa pengambilan model elemen pelat pada suatu struktur kapal diilustrasikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 sebagai berikut:



longitudinal : stiffener in the direction of the length a  
 transverse : stiffener in the direction of the breath b

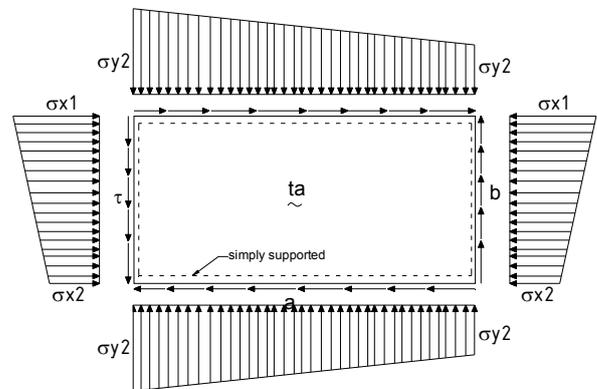
**Gambar 3** : Elemen Pelat (*Rules for Hull, Fig. 3.2* [BKI, 2017])

Pada Gambar 3 tersebut dapat diketahui bahwa suatu elemen pelat pada struktur kapal dapat terletak diantara penegar memanjang dan melintang. Dimana **a** (panjang elemen pelat) didefinisikan sejajar dengan penegar memanjang dan **b** (lebar elemen pelat) didefinisikan sejajar dengan penegar melintang.

Kemudian dengan mengikuti aturan tersebut perhitungan buckling pada elemen pelat dapat dilakukan dengan mengikuti tahap-tahap sebagai berikut:

**Tahap 1**

Menentukan properties dari material pelat yang akan dicek kekuatan buckling-nya. Sebagai contoh ilustrasi perhitungan berikut ini disajikan sebuah bentuk geometri elemen pelat dan pembebanannya pada Gambar 4.



**Gambar 4** : Contoh model elemen pelat

Berdasarkan Gambar 4, properties material dari elemen pelat tunggal dapat dijabarkan sebagai berikut:

- a : panjang bidang pelat tunggal [mm]
- b : lebar bidang pelat tunggal [mm]
- E : modulus young [N/mm<sup>2</sup>]
- R<sub>EH</sub> : tegangan luluh material [N/mm<sup>2</sup>]
- S : faktor keamanan
  - : 1,1 secara umum
  - : 1,2 untuk konstruksi yang hanya menerima beban setempat
  - : 1,05 untuk kombinasi beban bebas secara statik
- σ<sub>x</sub> : tegangan membran pada arah x [N/mm<sup>2</sup>], biasanya didefinisikan sebagai σ<sub>x1</sub> dan σ<sub>x2</sub>.
- σ<sub>y</sub> : tegangan membran pada arah y [N/mm<sup>2</sup>], biasanya didefinisikan sebagai σ<sub>y1</sub> dan σ<sub>y2</sub>.
- τ : tegangan geser pada bidang x-y [N/mm<sup>2</sup>]
- F<sub>1</sub> : faktor koreksi untuk kondisi batas pada penegar memanjang menurut *Rules for Hull, Table 3.2*.

**Tahap 2**

Dengan berdasarkan input data pada tahap 1, dapat dihitung nilai aspek rasio dari pelat tunggal (α), tebal pelat nominal (t<sub>n</sub>)

dan tegangan acuan ( $\sigma_e$ ) dari elemen pelat tersebut. Dimana formulasinya adalah sbb:

$$\alpha = \frac{a}{b}$$

$$t_n = t_a - t_K \quad [\text{mm}]$$

$$\sigma_e = 0.9 \cdot E \left( \frac{t_n}{b} \right)^2 \quad [\text{N/mm}^2]$$

### • Tahap 3

Perhitungan koefisien *buckling* (K) dilakukan dengan menyesuaikan bentuk geometri dan beban yang terjadi dengan definisi *load case* yang terdapat pada *Table 3.3-3.4*. Sehingga dengan melihat contoh model yang disajikan pada Tahap 1 dapat diketahui bahwa bentuk pembebanan yang sesuai adalah *load case 1*, *load case 2* dan *load case 5*.

Nilai K untuk *load case 1* dan *2* dapat diketahui dengan menghitung  $\alpha$  dan  $\psi$  (rasio tegangan tepi) terlebih dahulu, dimana  $\psi$  dapat diketahui dengan formulasi sbb.

$$\begin{aligned} - \psi \text{ untuk } \textit{load case 1} : & \frac{\min[\sigma_{x1}, \sigma_{x2}]}{\max[\sigma_{x1}, \sigma_{x2}]} \\ - \psi \text{ untuk } \textit{load case 2} : & \frac{\min[\sigma_{y1}, \sigma_{y2}]}{\max[\sigma_{y1}, \sigma_{y2}]} \end{aligned}$$

Sedangkan nilai K pada *load case 5* dapat diketahui cukup dengan input nilai  $\alpha$  saja. Jadi pada tahap ini akan dihasilkan nilai  $K_x$  (*load case 1*),  $K_y$  (*load case 2*) dan K (*load case 5*).

Agar diperhatikan nilai  $\alpha$  di *Table 3.3* untuk *load case 1* dan *2* diperuntukkan untuk nilai  $\alpha > 1$ , jika pelat didesain dengan nilai  $\alpha < 1$ , maka *load case 1* dihitung dengan *load case 2*, dan begitu juga sebaliknya.

### • Tahap 4

Setelah mendapatkan nilai K dapat dilanjutkan dengan menghitung acuan tingkat kerampingan ( $\lambda$ ) pada tiap-tiap *load case* dari elemen pelat tersebut. Dimana formulasinya adalah:

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_{eH}}{K \cdot \sigma_e}}$$

Pada tahap ini akan dihasilkan nilai  $\lambda_x$  (*load case 1*),  $\lambda_y$  (*load case 2*) dan  $\lambda_\tau$  (*load case 5*)

### • Tahap 5

Setelah mendapatkan nilai  $\lambda$  pada tiap *load case* (seperti yang telah didefinisikan pada tahap ke 3 dan 4) dapat dilakukan perhitungan nilai *reduction factor* ( $\kappa$ ) untuk tiap *load case*. Sehingga pada tahap ke 5 ini akan dihasilkan  $\kappa_x$ ,  $\kappa_y$  dan  $\kappa_\tau$ .

Sebagai catatan dalam perhitungan  $\psi$  ini harus diperhatikan beberapa hal sebagai berikut:

- Jika nilai  $\sigma_{x1}$  dan  $\sigma_{x2} \leq 0$  (*tension stress*),  $\sigma_x = 1.0$ .
- Jika nilai  $\sigma_{y1}$  dan  $\sigma_{y2} \leq 0$  (*tension stress*),  $\sigma_y = 1.0$ .

### • Tahap 6

Menghitung eksponen  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  dan B sesuai dengan *Rules for Hull, Sec. 3, F.2.1* [BKI, 2017].

### • Tahap 7

Menghitung *utilisation factor* (UF) untuk tegangan tekan pada arah  $x$ ,  $y$  dan tegangan geser dengan formulasi sbb:

$$\begin{aligned} UF_x &= \left( \frac{\max[\sigma_{x1}, \sigma_{x2}] \cdot S}{\kappa_x \cdot R_{eH}} \right)^{e_1}; \quad UF_y = \left( \frac{\max[\sigma_{y1}, \sigma_{y2}] \cdot S}{\kappa_y \cdot R_{eH}} \right)^{e_2} \\ ; \quad UF_\tau &= \left( \frac{|\tau| \cdot S \cdot \sqrt{3}}{\kappa_\tau \cdot R_{eH}} \right)^{e_3} \end{aligned}$$

Dengan mengetahui besarnya nilai UF pada tiap komponen tegangan pada elemen pelat, selanjutnya dapat dihitung besarnya UF kombinasinya dengan formulasi sbb:

$$\text{Comb.} = [UF_x + UF_y + UF_\tau] \cdot B \left( \frac{\max[\sigma_{x1}, \sigma_{x2}] \cdot \max[\sigma_{y1}, \sigma_{y2}] \cdot S^2}{R_{eH}^2} \right)$$

### • Tahap 8

Menghitung besarnya tebal aktual minimum dari elemen pelat, sehingga elemen pelat tersebut dapat dilakukan dengan cara melakukan penambahan/pengurangan secara inkremen pada nilai input *actual thickness*  $t_a$  sehingga nilai *Comb.*  $\approx 1$ . Dalam hal ini dapat dilakukan dengan bantuan *tool Goal Seek* pada perangkat lunak Microsoft Excel atau dengan menggunakan bantuan bahasa pemrograman tertentu (mis, MATLAB, Visual Basic, C++, dll).

## 4. Hasil dan Pembahasan

### (1) Perhitungan *buckling* pada pelat datar (*buckling of flat plate*)

Tahapan perhitungan *buckling* yang telah dijabarkan sebelumnya kemudian diaplikasikan untuk mengecek kekuatan *buckling* pada elemen pelat yang memiliki tumpuan sederhana pada keseluruhan sisinya. Variasi aspek rasio ( $\alpha$ ) pada elemen pelat tersebut mempunyai nilai 0.266, 1 dan 3.755. Selain itu variasi rasio tegangan tepi ( $\psi$ ) yang berkerja pada keseluruhan tepi pelat mempunyai nilai 1.0, 0.6, -0.6 dan -1.0. Dimana secara detail perhitungan *buckling* tersebut disajikan pada *Table 1*.

Tabel 1 : Perhitungan *buckling* pada pelat dengan variasi  $\alpha$  dan  $\psi$

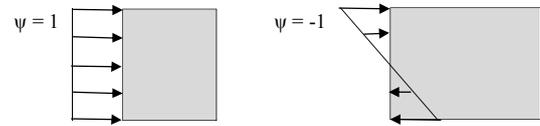
$\alpha$	0.266				1				3.755			
$\psi$	1	1> $\psi$ >0	0> $\psi$ >-1	-1	1	1> $\psi$ >0	0> $\psi$ >-1	-1	1	1> $\psi$ >0	0> $\psi$ >-1	-1
a mm	815	815	815	815	815	815	815	815	3060	3060	3060	3060
b mm	3060	3060	3060	3060	815	815	815	815	815	815	815	815
$t_a$ mm	<b>18.000</b>											
$t_k$ mm	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
E N/mm <sup>2</sup>	206000	206000	206000	206000	206000	206000	206000	206000	206000	206000	206000	206000
$R_{EH}$ N/mm <sup>2</sup>	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235
S	1.10	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
$F_1$	1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$\sigma_{x1}$ N/mm <sup>2</sup>	125.00	125.00	125.00	-125.00	125.00	125.00	125.00	-125.00	125.00	125.00	125.00	-125.00
$\sigma_{x2}$ N/mm <sup>2</sup>	125.00	80.00	-80.00	125.00	125.00	80.00	-80.00	125.00	125.00	80.00	-80.00	125.00
$\sigma_{y1}$ N/mm <sup>2</sup>	130.00	90.00	-90.00	-130.00	130.00	90.00	-90.00	-130.00	130.00	90.00	-90.00	-130.00
$\sigma_{y2}$ N/mm <sup>2</sup>	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00
$\tau$ N/mm <sup>2</sup>	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$\psi_x$	<b>1.0</b>	<b>0.6</b>	<b>-0.6</b>	<b>-1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>0.6</b>	<b>-0.6</b>	<b>-1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>0.6</b>	<b>-0.6</b>	<b>-1.0</b>
$\psi_y$	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-1.0</b>	<b>1.0</b>	<b>0.7</b>	<b>-0.7</b>	<b>-1.0</b>
<i>direct load</i>												
$UF_x$	1.626	1.1558	0.4735	0.3872	0.3949	0.3423	0.3423	0.3423	0.3949	0.3423	0.3423	0.3423
$UF_y$	0.425	0.3703	0.3703	0.3703	0.4249	0.3703	0.3703	0.3703	1.6921	1.2719	0.4943	0.4168
$UF_\tau$	0.058	0.0414	0.0178	0.0158	0.0172	0.0148	0.0148	0.0148	0.0582	0.0438	0.0176	0.0158
$\kappa_x$	0.363	0.5109	0.911	0.9689	0.9636	1	1	1	0.9636	1	1	1
$\kappa_y$	0.964	1	1	1	0.9636	1	1	1	0.3628	0.4845	0.9184	0.9689
$\kappa_\tau$	1.000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Comb.	2.107	1.5551	0.6383	0.4692	0.5913	0.3714	0.3714	0.3714	2.1434	1.6485	0.6216	0.4709
$t_{a\_req}$ mm	<b>30.24</b>	<b>23.36</b>	<b>14.69</b>	<b>13.63</b>	<b>16</b>	<b>14.2</b>	<b>7.88</b>	<b>6.9</b>	<b>30.45</b>	<b>24.45</b>	<b>14.64</b>	<b>13.71</b>
<i>bending in general</i>												
$UF_x$	1.257	1.0019	0.4735	0.3872	0.3949	0.3423	0.3423	0.3423	0.3949	0.3423	0.3423	0.3423
$UF_y$	0.425	0.3703	0.3703	0.3703	0.4249	0.3703	0.3703	0.3703	1.3098	1.0863	0.4943	0.4168
$UF_\tau$	0.047	0.0355	0.0178	0.0158	0.0172	0.0148	0.0148	0.0148	0.0468	0.037	0.0176	0.0158
$\kappa_x$	0.471	0.5841	0.911	0.9689	0.9636	1	1	1	0.9636	1	1	1
$\kappa_y$	0.964	1	1	1	0.9636	1	1	1	0.4705	0.5645	0.9184	0.9689
$\kappa_\tau$	1.000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Comb.	1.722	1.3835	0.6383	0.4692	0.5913	0.3714	0.3714	0.3714	1.7447	1.4453	0.6216	0.4709
$t_{a\_req}$ mm	<b>27.19</b>	<b>22.24</b>	<b>14.69</b>	<b>13.63</b>	<b>16</b>	<b>14.2</b>	<b>7.88</b>	<b>6.9</b>	<b>27.36</b>	<b>23.08</b>	<b>14.64</b>	<b>13.71</b>
<i>bending in w.t bulkhead</i>												
$UF_x$	0.980	0.8508	0.4735	0.3872	0.3949	0.3423	0.3423	0.3423	0.3949	0.3423	0.3423	0.3423
$UF_y$	0.425	0.3703	0.3703	0.3703	0.4249	0.3703	0.3703	0.3703	1.0237	0.9119	0.4943	0.4168
$UF_\tau$	0.036	0.0297	0.0178	0.0158	0.0172	0.0148	0.0148	0.0148	0.0363	0.0304	0.0176	0.0158
$\kappa_x$	0.596	0.6694	0.911	0.9689	0.9636	1	1	1	0.9636	1	1	1
$\kappa_y$	0.964	1	1	1	0.9636	1	1	1	0.596	0.6577	0.9184	0.9689
$\kappa_\tau$	1.000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Comb.	1.418	1.2029	0.6383	0.4692	0.5913	0.3714	0.3714	0.3714	1.4327	1.2409	0.6216	0.4709
$t_{a\_req}$ mm	<b>23.91</b>	<b>20.95</b>	<b>14.69</b>	<b>13.63</b>	<b>16</b>	<b>14.2</b>	<b>7.88</b>	<b>6.9</b>	<b>24.08</b>	<b>21.52</b>	<b>14.64</b>	<b>13.71</b>

Pada Tabel 1 hasil tebal pelat aktual yang dipersyaratkan ( $t_{a\_req}$ ) akibat efek *buckling* dibagi menjadi 3 kelompok. Yaitu pemeriksaan  $t_{a\_req}$  untuk kondisi *direct load*, *bending general* dan *bending in watertight bulkhead*. Selanjutnya dari Tabel tersebut diketahui bahwa nilai tebal aktual ( $t_a$ ) sebesar 18 mm. Dimana nilai tersebut digunakan sebagai parameter untuk menghitung nilai  $t_{a\_req}$ . Sehingga, jika  $t_{a\_req} > t_a$  artinya terjadi kegagalan *buckling* pada elemen pelat tersebut dan berlaku sebaliknya. Dari Tabel 1 ditunjukkan juga bahwa kegagalan *buckling* terjadi pada variasi  $\alpha < 1$  dan  $\alpha > 1$  pada rasio tegangan tepi ( $\psi$ ) = 1 dan  $1 > \psi > 0$ . Sedangkan pada variasi aspek rasio  $\alpha = 1$  tidak mengalami kegagalan *buckling* untuk semua variasi rasio tegangan tepinya.

Kemudian pengaruh rasio tegangan tepi pada perhitungan  $t_{a\_req}$  sangat jelas terlihat pada  $\psi = 1$ . Hal ini ditunjukkan dengan nilai  $t_{a\_req}$  yang paling besar dan terjadi pada semua variasi  $\alpha$ . Ketika  $\psi = 1$  artinya tegangan tepi yang berkerja pada tepi pelat berkerja bersifat merata. Dan sebaliknya ketika  $\psi = -1$  artinya tegangan tepi yang berkerja bersifat tekan dan tarik, sehingga pada Tabel 1 secara umum mempunyai nilai yang paling kecil pada semua variasi  $\alpha$ . Model pembebanan pada  $\psi = 1$  dan  $\psi = -1$  secara detail diilustrasikan pada Gambar 5.

Akibat adanya tegangan tepi pada arah y maka nilai  $t_{a\_req}$  untuk kondisi *direct load*, *bending general* dan *bending in water tight bulkhead* pada  $\alpha < 1$  dan  $\alpha > 1$  tidak sama. Namun hal ini tidak berlaku pada  $\alpha = 1$  karena pada nilai tersebut bentuk elemen

pelat adalah persegi sehingga efek tegangan tepi dari arah y dapat dihilangkan oleh tegangan tepi dari arah x.



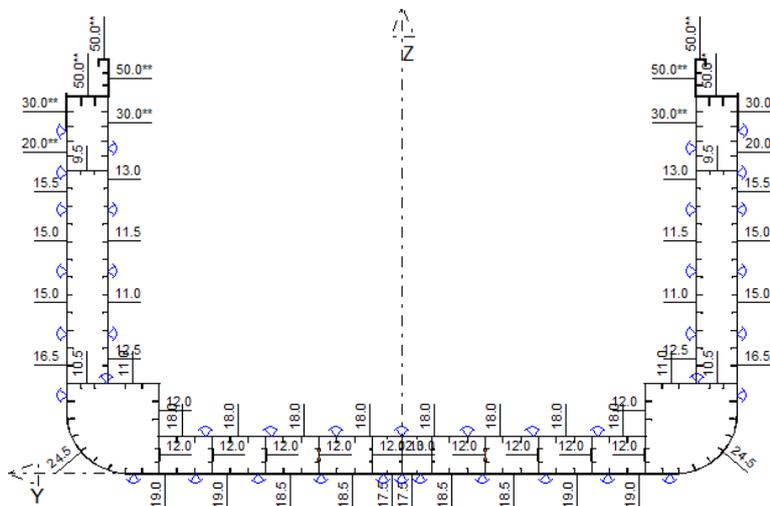
Gambar 5 : Rasio tegangan tepi  $\psi = 1$  dan  $\psi = -1$

**(2) Pengecekan *buckling* pelat pada penampang kapal**

Agar lebih komprehensif dalam pengaplikasian analisa buckling pada struktur kapal. Maka berikut ini disajikan sebuah bentuk penampang kapal dari kapal kontainer. Kapal tersebut mempunyai ukuran utama sebagai berikut:

- Lpp = 230 [m]
- Lwl = 234 [m]
- L = 226,9 [m]
- B = 32,25 [m]
- H = 18,3 [m]
- T = 13,5 [m]
- C<sub>B</sub> = 0,65
- v = 23 knot
- Pelayaran tak terbatas

Dimana bentuk penampang kapal tersebut secara detail diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6 : Geometri model penampang Kapal

Dari penampang kapal tersebut memiliki properties penampang sebagai berikut:

- Modulus penampang aktual alas  $W_{aB} = 25,523 [m^3]$
- Modulus penampang aktual geladak  $W_{aD} = 19,699 [m^3]$
- Momen inersia penampang  $I_{yy} = 203,463 [m^4]$
- Jarak gading  $l = 3060 [mm]$

Momen lengkung gelombang vertikal (*Vertical Wave Bending Moment*):

- $M_{wv,H} = 2077835,343 [kN.m]$  (*Hogging*)
- $M_{wv,S} = -2571615,058 [kN.m]$  (*Sagging*)

Momen lengkung air tenang (*Still Water Bending Moment*):

- $M_{sw,H} = 1896971,133 [kN.m]$  (*Hogging*)
- $M_{sw,S} = - 1403191 [kN.m]$  (*Sagging*)

Momen lengkung Total:

$$M_{T,H} = M_{SW,H} + M_{WV,H} = 3974806,34 \text{ [kN.m]}$$

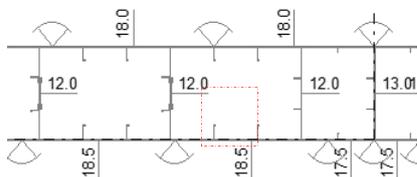
$$M_{T,S} = M_{SW,H} + M_{WV,H} = -3974806,34 \text{ [kN.m]}$$

Tegangan memanjang pada kondisi hogging pada alas dan geladak:

$$\sigma_{LB} = \frac{M_{T,H}}{W_{aB}} = \frac{3974806,34}{16,865} = 155,734 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{LD} = \frac{M_{T,H}}{W_{aB}} = \frac{3974806,34}{19,699} = 201,771 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Kemudian dilakukan pengecekan buckling pada satu panel pelat yang terletak di alas penampang kapal tersebut. Panel tersebut ditunjukkan pada Gambar 7 dibawah ini.



Gambar 7 : Panel pelat uji coba

Panel pelat uji yang di dalam kotak warna merah tersebut mempunyai dimensi sebagai berikut:

- a = 855 [mm] lebar panel pelat
- l = 3060 [mm] panjang panel pelat (jarak gading)
- R<sub>EH</sub> = 235 [N/mm<sup>2</sup>]
- σ<sub>x</sub> = tegangan tepi yang berkerja pada lebar pelat

- dari momen hogging dan sagging

$$\begin{aligned} \sigma_{x1} &= \sigma_{LB} \\ &= -156 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\ \tau &= 9 \text{ [N/mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

- dari beban kombinasi beban hull girder sesuai Rules for Hull, Sec. 5.D (BKI, 2017)

$$\begin{aligned} \sigma_{x2} &= -136 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\ \tau &= 6 \text{ [N/mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

Tegangan tepi yang berkerja diasumsikan bersifat merata sehingga nilai ψ = 1. Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya bahwa pada berbagai variasi ψ yang mempunyai paling besar pada persyaratan tebal pelat adalah bernilai 1.

Faktor korosi (t<sub>k</sub>) diambil dengan nilai 2 mm sesuai dengan formulasi faktor korosi Rules for Hull, Sec. 3, K (BKI, 2017). Kemudian pengecekan buckling dilakukan dengan dua cara:

- a) menggunakan formulasi acuan penentuan tebal pelat kritis sesuai dengan formulasi (11) atau (12). Sehingga menghasilkan t<sub>cr</sub> sbb:

$$t_{cr} = 0,5 \cdot 2,32 \cdot 0,855 \cdot \sqrt{156} + 2 = 14,387 \text{ [mm]}$$

- b) menggunakan tahap-tahap perhitungan buckling sesuai Rules for Hull, Sec. 3.F [BKI, 2017]. Hasil perhitungan berdasarkan tahap perhitungan buckling dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 : Pengecekan buckling berdasarkan Rules for Hull, Sec 3.F.

Parameter	Buckling 1	Buckling 2
a	[mm] 3060	3060
b	[mm] 855	855
α	3.579	3.579
t <sub>a</sub>	[mm] 18.500	18.500
t <sub>k</sub>	[mm] 2.00	2.00
t <sub>n</sub>	[mm] 16.500	16.500
E	[N/mm <sup>2</sup> ] 206000	206000
R <sub>EH</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ] 235	235
S	1.10	1.10
F <sub>1</sub>	1.00	1.00
σ <sub>x1</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ] 156	137
σ <sub>x2</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ] 156	137
σ <sub>y1</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ] 0	0
σ <sub>y2</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ] 0	0
τ	[N/mm <sup>2</sup> ] 9	6
ψ	1.0	1.0
UF <sub>x</sub>	0.650	0.518
UF <sub>y</sub>	0.000	0.000
UF <sub>τ</sub>	0.063	0.003
κ <sub>x</sub>	0.933	0.933
κ <sub>y</sub>	1.000	1.000
κ <sub>τ</sub>	1.000	1.000
Comb.	0.657	0.521
t <sub>a_req</sub>	[mm] 14.00	12.25

Hasil perhitungan tersebut kemudian divalidasi dengan hasil perhitungan menggunakan program DNVGL Poseidon. Dimana hasil perhitungannya disajikan pada Gambar 8.

Dari gambar 8 tersebut dapat diketahui bahwa hasil perhitungan buckling 1 mempunyai nilai yang sama (t<sub>a\_req</sub> = 14 mm) antara perhitungan numerik dan program DNVGL Poseidon. Namun pada perhitungan buckling 2, hasil perhitungan numerik menghasilkan nilai t<sub>a\_req</sub> = 12.25 mm sedangkan program DNVGL Poseidon menghasilkan nilai t<sub>a\_req</sub> = 12.5 mm. Hal ini diindikasikan karena belum dimasukkannya aturan pembulatan angka dari Rules for Hull, Sec. 1, K (BKI, 2017).

Frame No.	154	F	X	117.810 m	(1+av)=	1.168
Factors:	SW BM hogg=	0.477	Design BM hogg=	0.869	SW SF=	0.649
	sagg=	0.353	sagg=	0.838	Design SF=	0.912
F.El.;Item	LoLC y	a	Design Criteria	Shogg Tau	as built / required	
Attributes	LoLC z	1	DCat stat dyn	p2  Ssagg Reh	t   W   As   I	
	mm	mm	kN/m2	N/mm2	mm   cm3   cm2	cm4
SHELL;A						
==>	3	2723	855 S Ti1	-156	9 18.5	++
		0 3060	45 135 57 187	156 235	18.1	
required scantlings for Design Criteria				t	W   As   I	
				mm	cm3   cm2	cm4
Sig= 137;Tau= 6		S		18.1		
Sig= -137;Tau= -6		Ti1		12.5		
Sig=-156;Tau= 9		Buckling		14.0		
Sig=-137;Tau= 6		Buckling		12.5		
total required				18.1		

Gambar 8 : Perhitungan scantling panel pelat (Validasi-DNVGL Poseidon)

Aturan pembulatan angka tersebut berlaku dalam menentukan ketebalan pelat yang dipersyaratkan ketika menggunakan formulasi perhitungan yang termaktub dalam aturan BKI tersebut. Sehingga mudah dalam mencari/membeli pelat tersebut dipasaran. Dan pembulatan tersebut terjadi jika angka desimal dari pelat kurang dari atau sama dengan 0,2 atau 0,7 maka ketebalan pelat akan dibulatkan kebawah setenngah atau penuh. Dan hal ini berlaku sebaliknya jika angka desimal lebih dari 0.2 atau 0.7.

Hasil perhitungan menggunakan panduan perhitungan tebal pelat kritis ( $t_{cr}$ ) menghasilkan nilai taksiran yang lebih besar, yaitu sebesar  $t_{cr} = 14.387$  mm. Sedangkan perhitungan tebal pelat *buckling 1* dan *buckling 2* berturut – turut menghasilkan nilai sebesar 14.00 mm dan 12,25 mm.

## 5. Kesimpulan

Dari analisa latar belakang teori formulasi perhitungan *buckling* pada pelat, uji coba perhitungan pada berbagai variasi geometri dan beban pada elemen pelat dan uji coba perhitungan pada struktur kapal. Maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Formulasi rekomendasi perhitungan ketebalan pelat kritis elemen pelat datar diturunkan dengan menggunakan formulasi *Euler Buckling* yang sudah umum dipakai dalam dunia industri.
- Untuk tegangan yang lebih dari 60% dari tegangan luluh material, BKI melakukan koreksi secara sederhana pada formulasi dasarnya. Dimana faktor koreksi ini termaktub dalam aturan *Rules for Hull, Sec. 3, D*, Edisi tahun 1996.
- Hasil perhitungan kekuatan *buckling* menurut *Rules for Hull, Sec. 3, F* [BKI, 2017] telah dijabarkan kedalam

beberapa tahapan prosedur perhitungan, dimana tahapan perhitungan tersebut telah diuji coba pada berbagai variasi  $\alpha$  dan  $\psi$ . Dari hasil uji coba tersebut dapat diketahui bahwa nilai  $\alpha = 1$  dan  $\psi = -1$  memberikan kontribusi yang paling kecil untuk terjadinya kegagalan *buckling*.

- Aplikasi perhitungan *buckling* pada penampang kapal menunjukkan bahwa penggunaan rekomendasi formulasi perhitungan tebal pelat kritis dapat memberikan nilai yang lebih besar bila dibandingkan dengan menggunakan pembuktian *buckling* menurut *Rules for Hull, Sec. 3, F* (BKI, 2017). Sehingga rekomendasi perhitungan tersebut masih valid jika digunakan sebagai acuan awal perhitungan *buckling* pada pelat. Namun untuk mendapatkan ketebalan pelat yang lebih riil dan rasional pembuktian *buckling* menurut aturan tersebut harus dilakukan.

Dalam studi ini pengaruh kegagalan akibat fenomena *buckling* masih dikaji dan diterapkan pada daerah elastis material. Dan belum diketahui bagaimana perilaku struktur pelat tersebut sampai mengalami keruntuhan dan mencapai kapasitas puncaknya (*ultimate*).

## 6. Daftar Pustaka

- BKI, Rules for The Clasification and Construction, Part 1 Seagoing Ships, Vol. II, Rules for Hulls, 2017 Edition.
- BKI, Rules for The Clasification and Construction, Part 1 Seagoing Ships, Vol. II, Rules for Hulls, 1996 Edition.
- Bryan, G. H., On stability of Plane Plate Under Thrusts in its own Plane with Application to the Buckling of the Sides of a Ship, Preceeding London Mathematical Society, Vol. 22, pp. 54-67, 1891.

- [4] D. O. Brush and B. O. Almroth. Buckling of Bars, Plates and Shells. McGraw-Hill, Inc. New York, 1975.
- [5] IACS UR 11, Longitudinal Strength Standards, Requirements Concerning Strength of Ships, 1997.
- [6] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, Inc. New York, 1959.
- [7] S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, McGraw-Hill, Inc. New York. 1951.
- [8] S. P. Timoshenko, Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, Inc. New York. 1936.



**Sukron Makmun**, sejak tahun 2008 bergabung dengan PT Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Persero. Pada awal pengabdian duduk sebagai staf di Divisi Lambung dan Material. Pada tahun 2012 sampai sekarang menjadi staf Pengkaji IV pada Bagian Penelitian dan Aplikasi Teknik, Divisi Riset dan Pengembangan. Konsentrasi bidang penelitian yang saat ini digeluti adalah Ship and Offshore Structure.



**DEWARUCI**  
*Drawing Approval software  
For Hull, Machinery and Load Lines*



**BKI iSee**  
*Rules, ship information, quick calculation  
In Surveyor Pocket*



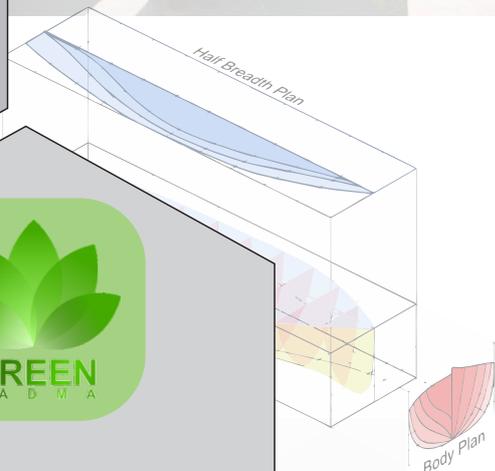
**BKI Rules Compilation**  
*Compilation Rules & Guidelines  
Software*



**UT REPORT**  
*Thickness data measurement  
Software*



**GREEN PADMA**  
*EEDI & EEOI verification*



*Imagine. Believe. Achieve.*

## DAFTAR ALAMAT KANTOR PT. BIRO KLASIFIKASI INDONESIA

### Kantor Pusat

Jl. Yos Sudarso Kav. 38-40, Tanjung Priok, Jakarta Utara - 14320  
 Phone: (62-21)-4301017, 4301703, 4300993 Fax: (62-21)-43936175  
 e-mail: ho@bki.co.id

Jaringan Pelayanan	Klasifikasi dan Statutoria	Komersil
<b>Belawan</b>	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
<b>Batam</b>	Graha BKI, Jl. Yos Sudarso Kav. 5 Batam - 29421 Phone: (62-778) 433388, 429023, 429024, 451228 Fax: (62-778) 429020 e-mail : bm@bki.co.id	Graha BKI, Jl. Yos Sudarso Kav. 5 Batam - 29421 Phone: (62-778) 428284, 428438, 428250, 432324 Fax: (62-778) 429021 e-mail: bmc@bki.co.id
<b>Pekanbaru</b>	Jl. Arifin Achmad No. 40, Kel. Tangkerang Tengah, Kec. Marpoyan Damai, Pekanbaru - 28282 Phone: (62-761) 8417295, 8417296 Fax: (62-761) 8417294 e-mail: pr@bki.co.id	Jl. Arifin Achmad No. 40, Kel. Tangkerang Tengah, Kec. Marpoyan Damai, Pekanbaru - 28282 Phone: (62-761) 8417291, 8417292, 7662170 Fax: (62-778) 8417293, 7662180 e-mail: prc@bki.co.id
<b>Jambi</b>	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: jb@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
<b>Palembang</b>	Jl. Perintis Kemerdekaan No. 226, 5 Ilir Palembang - 30115 Phone: (62-711) 713172, 713680 Fax: (62-711) 713151 e-mail: pb@bki.co.id	Jl. Perintis Kemerdekaan No. 226, 5 Ilir Palembang - 30115 Phone: (62-711) 713171, 713172, 713680 Fax: (62-711) 713173 e-mail: pbc@bki.co.id
<b>Banten (Cilegon)</b>	Jl. Gerem Raya KM. 5 No. 1A Kel. Gerem, Kec. Gerogol, Cilegon - Banten 42438 Phone: (62-254) 572673 Fax: (62-254) 572674 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
<b>Tanjung Priok</b>	Jl. Yos Sudarso 38-40 Tanjung Priok Jakarta Utara - 14320 Phone: (62-21) 43930990, 4301017, 4301703 Fax: (62-21) 4301702 e-mail: tp@bki.co.id	
<b>Cirebon</b>	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
<b>Semarang</b>	Jl. Pamularsih No. 12 Semarang - 50148 Phone: (62-24) 7610399 Fax: (62-24) 7610422 e-mail: sm@bki.co.id	Jl. Pamularsih No. 12 Semarang - 50148 Phone: (62-24) 7610744 Fax: (62-24) 76670354 e-mail: smc@bki.co.id
<b>Cilacap</b>		Jl. M.T. Haryono No. 96 Cilacap Phone: (62-282) 5392115 Fax: (62-282) 5392115 e-mail: cpc@bki.co.id
<b>Surabaya</b>	Jl. Kalianget No. 14, Tanjung Perak Surabaya - 60165 Phone: (62-31) 3295448, 3295449, 3295450 Fax: (62-31) 3294520 e-mail: sb@bki.co.id	Jl. Kalianget No. 14, Tanjung Perak Surabaya - 60165 Phone: (62-31) 3295448, 3295449, 3295450 Fax: (62-31) 3205451 e-mail: sbc@bki.co.id
<b>Pontianak</b>	Jl. Gusti Hamzah No. 211 Pontianak - 78116 Phone: (62-561) 739579 Fax: (62-561) 743107 e-mail: pk@bki.co.id	Jl. Gusti Hamzah No. 211 Pontianak - 78116 Phone: (62-561) 739579 Fax: (62-561) 743107 e-mail: pkc@bki.co.id
<b>Banjarmasin</b>	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
<b>Balikpapan</b>	Kantor Layanan Operasional Klas Jl. Mulawarman No. 122H, Sepinggan, Balikpapan, Kalimantan Timur - 76115 Phone: (62-542) 8521071, 8521072 Fax: (62-542) 8521073 e-mail: sd@bki.co.id	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
<b>Samarinda</b>	Jl. M.T. Haryono No. 199, Air Putih, Samarinda Kalimantan Timur - 75124 Phone: (62-541) 4121403, 4121404, 4121405, 4121406 Fax: (62-541) 4121407 e-mail: sd@bki.co.id	
<b>Makassar</b>	Jl. Sungai Cerekang No. 28 Makassar - 90115 Phone: (62-411) 3611993 Fax: (62-411) 36515460 e-mail: ms@bki.co.id	Jl. Sungai Cerekang No. 28 Makassar - 90115 Phone: (62-411) 3611993 Fax: (62-411) 36515460 e-mail: msc@bki.co.id
<b>Bitung</b>	Jl. Babe Palar No. 53, Madidir Unet Bitung - 95516 Phone : (62-438) 38720, 38721, 38722 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

Jaringan Pelayanan	Klasifikasi dan Statutoria	Komersil
<b>Ambon</b>	Jl. Laksdya Leo Wattimena No. 34, Passo Ambon - 97232 Phone: (62-911) 362805, 362806 Fax: (62-911) 361105 e-mail: ab@bki.co.id	Jl. Laksdya Leo Wattimena No. 34, Passo Ambon - 97232 Phone: (62-911) 362805, 362806 Fax: (62-911) 361105 e-mail: abc@bki.co.id
<b>Sorong</b>	Jl. Jend. Sudirman No. 140 Sorong - 98414 Phone: (62-951) 322600 Fax: (62-951) 323870 e-mail: sr@bki.co.id	Jl. Jend. Sudirman No. 140 Sorong - 98414 Phone: (62-951) 322600 Fax: (62-951) 323870 e-mail: src@bki.co.id
<b>Singapura</b>	7500A Beach Road #11-301, The Plaza Singapore - 199597 Phone: 65-68830651, 68830634, 68830643 Fax: 65-63393631 e-mail: sg@bki.co.id, class@bki.com.sg	
<b>Strategic Business Unit (SBU) Lepas Pantai</b>	Jl. Yos Sudarso 38-40 Tanjung Priok Jakarta Utara - 14320 Phone: (62-21) 4301017, 4301703, 4300993 Fax: (62-21) 43936175 e-mail: osh@bki.co.id	
<b>Strategic Business Unit (SBU) Marine</b>		Ruko Green Lake Sunter Jl. Danau Sunter Selatan Blok RC/C Sunter Podomoro, Jakarta Utara - 14350 Phone: (62-21) 4300139 Fax: (62-21) 43937409 e-mail: mns@bki.co.id
<b>Strategic Business Unit (SBU) Energy</b>		Ruko Green Lake Sunter Jl. Danau Sunter Selatan Blok RC/B Sunter Podomoro, Jakarta Utara - 14350 Phone: (62-21) 43912070, 43933925, 4366843 Fax: (62-21) 43937415 e-mail: ifs@bki.co.id
<b>Strategic Business Unit (SBU) Industry Industry</b>		Ruko Green Lake Sunter Jl. Danau Sunter Selatan Blok RC/A Sunter Podomoro, Jakarta Utara - 14350 Phone: (62-21) 4300762, 43912806, 43938304 Fax: (62-21) 43900972 e-mail: ids@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
<b>Part 0 - General</b>		
<b>Guidance</b>		
A	Petunjuk Masuk Ruang Tertutup	2014
<b>Part 1- Seagoing Ships (Rules/Guidelines/Guidance for The Classification and Construction)</b>		
<b>RULES</b>		
I	Rules for Classification and Surveys	2016
II	Rules for Hull	2017
III	Rules for Machinery Installations	2016
IV	Rules for Electrical Installations	2016
V	Rules for Materials	2014
VI	Rules for Welding	2015
VII	Rules for Automation	2014
VIII	Rules for Refrigerating Installation	2014
IX	Rules for Ships Carrying Liquefied Gasses in Bulk	2016
X	Rules for Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk	2014
XI	Rules for Approval of Manufacturers and Service Suppliers	2016
XII	Rules for Fishing Vessel	2003
XIII	Regulation (Rules) for The Redundant Propulsion and Steering Systems	2002
XIV	Rules for Non Metallic Material	2014
XV	Rules Common Structural Rules for Bulk Carrier	2014
XVI	Rules Common Structural Rules for Oil Tanker	2014
XVII	Rules Common Structural Rules for Bulk Carrier and Oil Tanker	2015
<b>Guidelines</b>		
1	Guidelines for the Use of Gas as Fuel for Ship	2015
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
11	Guidelines for Condition Assessment Program	2015
<b>Guidance</b>		
A	Guidance for Ventilation System on Board Seagoing Ships	2004
B	Petunjuk Percobaan Berlayar Kapal Motor (Guidance for Sea Trials of Motor Vessels)	2002
C	Guidance / Petunjuk Pemakaian Ultrasonic Thickness Measurement Report	2006

D	Guidance for the Inspection of Anchor Chain Cables	2002
E	Guidance for The Construction And Testing Towing Gears	2000
G	Guidance for the Corrosion Protection and Coating Systems	2004
H	Guidance for Assessment and Repair of Defects on Propellers	2000
I	Guidance / Petunjuk Klasifikasi dan Survey Kapal Notasi A90 dan A80	2015
K	Guidance for Mass Produces Engines	2016
W	Guidance for Approval and Type Approval of Materials and Equipment for Marine Use	2017
<b>Part 2-Inland Waterways</b>		
<b>RULES</b>		
I	Rules for Inland Waterways - Classification and Survey	2015
II	Rules for Inland Waterway - Hull Construction	2015
III	Rules for Inland Waterway - Machinery Installation	2015
IV	Rules for Inland Waterways - Electrical Installations	2015
V	Rules for Inland Waterways - Additional Requirements of Notation	2015
<b>Part 3-Special Ships</b>		
<b>RULES</b>		
I	Rules for Oil Recovery Vessel	2005
II	Rules for Floating Dock	2002
III	Rules for High Speed Craft	2016
IV	Rules for High Speed Vessels	1996
V	Rules for Fibreglass Reinforced Plastics Ships	2016
VI	Peraturan Kapal Kayu	1996
VII	Rules for Small Vessel Up to 24 M	2013
VIII	Rules for Classification and Construction of Wing-in-Ground Craft (WIG CRAFT)	2006
<b>Guidance</b>		
A	Guidance for FRP and Wooden Fishing Vessel up to 24 m	2015
<b>Part 4-Special Equipment And Systems</b>		
<b>Rules</b>		
I	Rules for Stowage and Lashing of Containers	2012
II	Rules for Dynamics Positioning Systems	2011
III	Regulation (Rules) for the Bridge Design on Seagoing Ships One Man Console	2004
<b>Guidelines</b>		
1	Guidelines for Certification Loading Computer Systems	2015
1-Ina	Pedoman untuk Sertifikasi Sistem Komputer Pemuatan	2015
<b>Guidance</b>		
A	Guide (Guidance) for Risk Evaluation for the Classification of Marine Related Facilities	2012
<b>Reference</b>		
	Reference Notes on Risk Assessment for the Marine and Offshore Oil and Gas Industries	2012
<b>Part 5-Offshore Technology</b>		
<b>Rules</b>		
I	Rules for Classification and Surveys	2016
II	Rules for Structures	2011
IV	Rules for Machinery Installations	2011

V	Rules for Electrical Installations	2011
VII	Rules for Fixed Offshore Installation	2011
VIII	Rules for Offshore Mooring Chains	2000
IX	Rules for Single Point Mooring	2013
X	Rules for Mobile Offshore Drilling Units and Special Purpose Units	1999
XII	Rules for Facilities on Offshore Installation	2013
<b>Guidelines</b>		
2	Guidelines for Classification and Construction Floating Offshore Liquefied Gas Terminals	2013
3	Guidelines for Classification and Construction Floating Production Installation	2016
<b>Guidance</b>		
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
<b>Part 6-Statutory</b>		
I	Regulation for the Audit and Registration of Safety Management Systems (Bilingual)	2012
II	(Regulation) Rules for the Verification and Registration of Ship Security Management System (Bilingual)	2004
<b>Guidelines</b>		
1	Guidelines for The Preparation Damage Stability Calculations and Damage Control Documentation on Board	2005
2	Guidelines for Environmental Service System	2011
3	Guidelines on Intact Stability	2014
4	Guidelines on Crew Accommodation	2016
5	Guidelines for Determination of the Energy Efficiency Design Index	2017
<b>Guidance</b>		
A	Guidance for the Audit and Registration of Safety Management Systems (Bilingual)	2012
B	Guidance for the Verification and Registration of Ship Security Management Systems (Bilingual)	2004
C	Guidance for Inclining Test	2015
C-Ina	Petunjuk Pengujian Kemiringan dan Periode Oleng Kapal	2015
G	Guidance on Intact Stability	2014
<b>Part 7-Class Notation</b>		
<b>Guidelines</b>		
1	Guidelines for Certification of Lifting Appliances (LA)	2013
2	Guidelines for Dynamic Loading Approach	2013
3	Guidelines for Spectral-Based Fatigue Analysis	2013
4	Guidelines for Livestock Carriers	2015
<b>Guidance</b>		
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
Part 8-Kapal Domestik		
<b>Guidelines</b>		
1	Pedoman Lambung	2016





**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