

**EVALUASI STABILITAS KAPAL KAYU TRADISIONAL  
BERDASARKAN ATURAN STABILITAS INTERNATIONAL**

*EVALUATION STABILITY OF TRADITIONAL WOODEN  
SHIP ACCORDING TO THE REGULATIONS STABILITY  
INTERNATIONAL*

MUHAMMAD AKBAR ASIS  
D052182001



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2020**

**EVALUASI STABILITAS KAPAL KAYU TRADISIONAL  
BERDASARKAN ATURAN STABILITAS INTERNATIONAL**

*EVALUATION STABILITY OF TRADITIONAL WOODEN  
SHIP ACCORDING TO THE REGULATIONS STABILITY  
INTERNATIONAL*

MUHAMMAD AKBAR ASIS  
D052182001



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2020**

**EVALUASI STABILITAS KAPAL KAYU TRADISIONAL  
BERDASARKAN ATURAN STABILITAS INTERNATIONAL**

**EVALUATION STABILITY OF TRADITIONAL WOODEN  
SHIP ACCORDING TO THE REGULATIONS STABILITY  
INTERNATIONAL**

Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi  
Teknik Perkapalan

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD AKBAR ASIS  
D052182001

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2020**

**EVALUASI STABILITAS KAPAL KAYU TRADISIONAL  
BERDASARKAN ATURAN STABILITAS INTERNATIONAL**

*EVALUATION STABILITY OF TRADITIONAL WOODEN SHIP  
ACCORDING TO THE REGULATIONS STABILITY INTERNATIONAL*

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD AKBAR ASIS

Nomor Pokok D052182001

Telah dipertahankan di depan panitia ujian tesis

Pada tanggal 24 November 2020

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui  
Komisi Penasihat,

Daeng Paroka., ST. MT. Ph.D.  
**Ketua**

Dr. Ir. Syamsul Asri, MT.  
**Anggota**



Ketua Program Studi  
Magister Teknik Perkapalan

Dr. Ir. Syamsul Asri., MT.



Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Muhammad Arsyad Thaha.MT.

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Muhammad Akbar Asis  
Nomor mahasiswa : D052182001  
Program studi : Teknik Perkapalan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima saksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 24 November 2020

Yang menyatakan



**Muhammad Akbar Asis**

## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa dengan selesainya tesis ini.

Gagasan yang melatari tajuk permasalahan ini timbul dari hasil pengamatan penulis terhadap banyaknya kejadian kecelakaan akibat dari cuaca buruk khusus untuk kapal kayu yang belum diatur sejak menyeluruh, Penulis bermaksud menyumbangkan beberapa masukan dan pandangan terhadap kejadian-kejadian tersebut.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan tesis ini, yang hanya berkat bantuan berbagai pihak, maka tesis ini selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih kepada Daeng Paroka, ST. MT. PhD. sebagai Ketua Komisi Penasihat dan Dr. Ir. Syamsul Asri. MT. selaku anggota komisi penasihat yang telah banyak memberikan masukan mulai pengembangan minat sampai terhadap permasalahan penelitian ini, pelaksanaan penelitiannya sampai dengan penulisannya dan Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Dosen penguji Prof.Ir. Mansyur Hasbullah.M.Eng., Dr. Ir. Ganding Sitepu.Dip.Ing., Dr.Eng. Suandar Baso, ST. MT., Terima kasih juga penulis sampaikan kepada teman-teman mahasiswa S1 Teknik Perkapalan dan rekan-rekan kuliah S2 Teknik Perkapalan yang telah banyak membantu dalam rangka pengumpulan data dan informasi dan terimakasih kepada keluarga saya yang telah memberikan support yang tinggi. Terakhir ucapan terima kasih

juga disampaikan kepada mereka yang namanya tidak tercantum tetapi telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini.

Makassar, 10 November 2020

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Muhammad Akbar Asis', written in a cursive style.

**Muhammad Akbar Asis**

## ABSTRAK

**MUHAMMAD AKBAR ASIS**, Evaluasi Stabilitas Kapal Kayu Tradisional Berdasarkan Aturan Stabilitas International (dibimbing oleh : Daeng Paroka dan Syamsul Asri)

Aturan stabilitas kapal-kapal di Indonesia masih mengadopsi aturan *Intact stability code* akan tetapi penerapan aturan tersebut belum sesuai dengan karakteristik kapal di Indonesia lebih khusus kapal kayu, sehingga perlu dilakukan evaluasi seperti pengaruh karakteristik bentuk lambung terhadap stabilitas dan mengevaluasi lengan stabilitas serta. Metode untuk menentukan lengan stabilitas yakni *Benyamin spance dengan maxsurf stability*. penentuan faktor redaman, efektif slope gelombang melalui pengujian *roll decay dan drfit test*. Hasil yang didapatkan karakteristik kapal kayu memiliki sudut *rise of floor* yang lebih besar sehingga perubahan penampang garis air dan prismatic yang ekstrim akan mempengaruhi lengan stabilitas. Perubahan lengan stabilitas cenderung semakin kecil dengan berkurangnya rasio lebar dan sarat kapal dan evaluasi stabilitas kriteria umum pada umumnya tidak memenuhi sudut GZ maksimum dan luasan 30-40 derajat dengan titik berat diatas 1H dan masih memenuhi untuk kapal kayu pada rentang rasio lebar terhadap sarat 3.5 – 4.5 pada titik berat kurang 1H, Pengaruh redaman terhadap stabilitas kapal berdasarkan pegujian roll decay didapatkan perubahan respon roll amplitude B/T kecil respon gerak besar sebaliknya B/T besar. Koefisien redaman untuk kapal B/T 5.51, hal ini menandakan bahwa pengaruh geometri kapal mempengaruhi redaman. Begitu dengan penambahan *bilge keel* respon roll amplitude akan kecil. Sedangkan koeffisien efektif gelombang B/T yang kecil nilai efektif slope gelombang akan lebih besar dibandingkan dengan B/T besar. Nilai  $r$  yang besar akan memberikan sudut kemiringan kapal akibat gelombang juga akan besar sehingga momen oleng akibat pengaruh gelombang. Luasan minimum berdasarkan KG dan MG kritis didapatkan jauh lebih besar dari yang dipersyaratkan oleh IMO ini berarti kriteria cuaca harus dipertimbangkan untuk menilai stabilitas kapal kayu.

Kata kunci : Kapal Kayu , Stabilitas , Kriteria Stabilitas

## ABSTRACT

**MUHAMMAD AKBAR ASIS**, *Evaluation stability of traditional wooden ship according to the regulations stability International (supervise by Daeng Paroka dan Syamsul Asri)*

*The regulation of stability of ships in Indonesia still adopt the Intact stability code, but the implementation of these regulation is not in accordance with the characteristics of ships in Indonesia more specifically wooden ship, so it is necessary to evaluate such as the effect of hull characteristics on stability and determine hydrodynamic coefficient factors according to the characteristics of Indonesia ship and waters. The methods for dertermining the righting arm is Benyamin spance with Maxsurf stability. Determination of damping factor, effective wave slope by roll decay and drift experimental. The result obtained by wooden ship characters have a larger rise of floor angle so that extreme waterplan and prismatic changes will affect the ringthing arm. Ringthing arm changes tend to get smaller with reduced ships width and draught ratio and stability evaluations based on general criteria generally do not meet to the maximum GZ angle and 30-40 degree area with a maximum center of gravity of 1H. still meet for wooden ship at breadth-to-draught ratio of 3.5 -4.5 with Center of gravity of less than 1H , his indicates that the influence of geometry affects the damping. With the addition of the bilge keel the roll amplitude response will be small. Meanwhile, the effective coefficient of the small B / T wave, the effective value of the wave slope will be greater than the large B / T. A large r value will give a large tilt angle of the ship due to waves so that the tilt moment is influenced by the waves. Minimum area based on KG and mg critically obtained much greater than required by the IMO this means the criteria weather should be considered to assess the stability of wooden ship.*

*Keyword : Wooden ship, Stability, Stability criterion*

**DAFTAR ISI****Halaman**

PRAKATA	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR ARTI LAMBANG ,SINGKATAN DAN ISTILAH	xviii
PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	3
D. Kegunaan Penelitian	4
E. Batasan Masalah	5
F. Sistematika Penulisan	5
TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Karakteristik Bentuk Kapal Kayu	7
B. Parameter Geometri Kapal yang berpengaruh terhadap Stabilitas	9
C. Kecelakaan dan Performa Stabilitas Kapal Kayu	12
D. Lengan Stabilitas	14
E. Aturan Stabilitas International	19
F. Redaman Kapal	32

G. Effective Wave Slope	34
H. Pengujian Stabilitas berdasarkan Aturan Stabilitas International	36
I. Penelitian Terdahulu	45
J. Kerangka Konseptual	47
<b>METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>49</b>
A. Rancangan Penelitian	49
B. Lokasi dan Waktu Penelitian	49
C. Bahan dan Alat	50
B. Populasi dan Sampel	52
C. Teknik Pengumpulan Data	53
D. Definisi Operasional	54
E. Kerangka Alur Penelitian	59
<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>60</b>
A. Pemilihan Populasi dan Sampel	60
B. Data Ukuran Utama, Rasio Ukuran Utama dan Gambar Rencana Garis Kapal Sampel	62
C. Analisis Karakteristik Geometri Kapal Kayu terhadap Stabilitas	66
D. Analisis Karakteristik Geometri berdasarkan Rasio Ukuran Utama Kapal Kayu dengan Karakteristik Lengan Stabilitas	69
E. Evaluasi Karakteristik Lengan Stabilitas terhadap Kriteria Umum Aturan Stabilitas International	75
F. Analisis Tinggi Sarat Maksimum dan Tinggi Lambung Timbul Minimum berdasarkan Kriteria Umum	82
G. Pengaruh Redaman Kapal terhadap Stabilitas Kapal	84
H. Pengaruh Koefisien Efektif Slope Gelombang Terhadap Stabilitas	93
I. Batas Performa Stabilitas Kapal Kayu berdasarkan Aturan Stabilitas International	95

J. Hasil Evaluasi Stabilitas Kapal Kayu berdasarkan Aturan Stabilitas International 99	
PENUTUP	101
A. Kesimpulan	101
B. Saran	102
DAFTAR PUSTAKA	103

## DAFTAR TABEL

<b>Nomor</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 1. Kriteria umum berdasarkan karakteristik lengan stabilitas.....	20
Tabel 2. Nilai faktor k.....	26
Tabel 3. Nilai faktor $X_1$ .....	26
Tabel 4. Nilai faktor $X_2$ .....	27
Tabel 5. Nilai s.....	27
Tabel 6 Jadwal pelaksanaan penelitian .....	50
Tabel 7. Kelas Interval.....	60
Tabel 8. Ukuran utama kapal sampel .....	62
Tabel 9. Rasio perbandingan ukuran utama .....	63
Tabel 10. Variasi rasio lebar kapal terhadap sarat dan lambung timbul terhadap lebar.....	70
Tabel 11. Variasi titik berat kapal.....	71
Tabel 12. Parameter kriteria umum yang memenuhi dan tidak memenuhi pada kondisi titik berat kritis kapal 1 (B/H 3.00).....	79
Tabel 13. Parameter kriteria umum yang memenuhi dan tidak memenuhi pada kondisi titik berat kritis kapal 2 (B/H 3.77).....	80
Tabel 14. Parameter kriteria umum yang memenuhi dan tidak memenuhi pada kondisi titik berat kritis kapal 1 (B/H 2.09).....	81
Tabel 15. Kofisien a dan b redaman .....	86
Tabel 16. Koenfisien a dan b redaman berdasarkan variable sudut.....	91
Tabel 17. KG dan MG kritis pada kriteria level 1 .....	98

Tabel 18. Luasan kurva lengan stabilitas sampai 30 derajat .....	99
Tabel 19. Matriks Waktu Pengujian .....	108
Tabel 20. Matriks Kebutuhan Pengujian .....	109

## DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 1. Body plan kapal kayu .....	8
Gambar 2. Angka kejadian kecelakaan kapal berdasarkan ukuran <i>gross tonnage</i> .....	12
Gambar 3. Angka Kejadian Kecelakaan Berdasarkan Jenis Kecelakaan	14
Gambar 4. Garis kerja gaya berat dan garis kerja gaya apung .....	15
Gambar 5. Lengan stabilitas .....	17
Gambar 6. Format kriteria stabilitas IMO .....	22
Gambar 7. Parameter evaluasi stabilitas kriteria cuaca .....	23
Gambar 8. Faktor X1 dengan rasio lebar terhadap sarat .....	32
Gambar 9. Effective wave slope .....	34
Gambar 10. Perpindahan titik pusat gravitasi GG' .....	37
Gambar 11. Roll decay tes .....	39
Gambar 12. Kerangka konsep .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Gambar 13. Model kapal .....	51
Gambar 14. Alat ukur <i>Inclinometer</i> dan penggunaan pada model .....	51
Gambar 15. Kerangka alur penelitian .....	59
Gambar 16. Gambar rencana gari kapal sampel 1 .....	63
Gambar 17. Gambar rencana garis kapal sampel 2.....	64
Gambar 18. Gambar rencana garis kapal sampel 3.....	65
Gambar 19. Perubahan koefisien water plan terhadap T/H untuk ketiga karakteristik kappa.....	67

Gambar 20. Koefisien prismatic vertical ( $C_{pv}$ ) terhadap T/H untuk ketiga karakteristik kapal .....	68
Gambar 21. Perubahan koefisien blok ( $C_b$ ) terhadap T/H untuk ketiga karakteristik bentuk kapal .....	69
Gambar 22. Kurva lengan stabilitas kapal B/H 3.00 (a) KG 1/4H (b) KG 1/2H (c) KG 2/3H (d)KG 1H ... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
Gambar 23 Lengan stabilitas maksimum kapal B/H 3.00 .....	76
Gambar 24. Luasan kurva lengan stabilitas 0 – 30 kapal B/H 3.00 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat.....	77
Gambar 25. . Luasan kurva lengan stabilitas 0 – 40 derajat kapal B/H 3.00 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat. ....	77
Gambar 26. Luasan kurva lengan stabilitas 30 – 40 kapal B/H 3.00 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat .....	77
Gambar 27. Initial MG pada kapal B/H 3.00.....	78
Gambar 28. Kurva hubungan sarat, lambung timbul terhadap kriteria stabilitas kapal B/H 3.00 (1H) .....	82
Gambar 29. Kurva hubungan sarat, lambung timbul terhadap kriteria stabilitas kapal B/H 3.77 .....	83
Gambar 30. Respon gerak roll berdasarkan pengujian <i>roll decay</i> .....	85
Gambar 31. Faktor $X_1$ pada variasi B/d.....	88
Gambar 32. Hasil respon gerak roll pada percobaan roll decay .....	89

Gambar 33. Periode oleng kapal .....	90
Gambar 34. Factor k redaman kriteria cuaca .....	93
Gambar 35. Koefisien efektif slope gelombang berdasarkan 3 karakteristik kapal dengan berbeda rasio lebar terhadap sarat .....	94
Gambar 36. Lengan stabilitas kapal 1.....	95
Gambar 37. Titik berat (KG 1/4H) Kapal B/H 3.00 .....	113
Gambar 38. Titik berat (KG 1/4H) Kapal B/H 3.00 .....	113
Gambar 39. Titik berat (KG 2/3H) Kapal B/H 3.00 .....	114
Gambar 40. Tiitik berat (KG 1H) Kapal B/H 3.00.....	114
Gambar 41. Tiitik berat (KG 5/4H) Kapal B/H 3.00.....	115
Gambar 42. Kurva lengan stabilitas kapal B/H 3.00 (a) kondisi KG 1/4H (b) kondisi KG 1/2H (c) kondisi KG 2/3H (d) kondisi KG 1H (3) kondisi KG 4/5H.....	118
Gambar 43. Kurva lengan stabilitas kapal B/H 2.09 (a) kondisi KG 1/4H (b) kondisi KG 1/2H (c) kondisi KG 2/3H (d) kondisi KG 1H .....	120
Gambar 44. Sudut Sudut lengan stabilitas maksimum kapal B/H 3.77..	122
Gambar 45. Luasan kurva lengan stabilitas 0 – 30 kapal B/H 3.77 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat. ....	122
Gambar 46. Luasan kurva lengan stabilitas 0 – 40 kapal B/H 3.77 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat.....	123

Gambar 47. Luasan kurva lengan stabilitas 30 – 40 kapal B/H 3.77 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat.....	123
Gambar 48. Initial MG pada kapal B/H 3.77.....	124
Gambar 49. Luasan kurva lengan stabilitas 0 – 30 kapal B/H 2.09 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat .....	124
Gambar 50. Luasan kurva lengan stabilitas 0 – 40 kapal B/H 2.09 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat .....	125
Gambar 51. Luasan kurva lengan stabilitas 30 – 40 kapal B/H 2.09 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat.....	125
Gambar 52. kurva GZ maksimum kapal B/H 2.09 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat .....	126
Gambar 53. Maksimum lengan stabilitas 30 derajat atau lebih kapal B/H 2.09 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat.....	126
Gambar 54. Initial kapal B/H 2.09 dengan variasi rasio lebar terhadap sarat dan posisi titik berat.....	127
Gambar 55. Tinjauan sudut bilge keel kapal 1 B/H 2.09 .....	128
Gambar 56. Lengan stabilitas berdasarkan variasi titik berat kapal B/H 3.77 .....	129
Gambar 57. Lengan stabilitas berdasarkan variasi titik berat kapal B/H 2.09 .....	129

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Prosedur Pelaksanaan Pengujian	108
Lampiran 2. Analisis Lengan Stabilitas terhadap Kriteria Umum Stabilitas dengan Variabel Rasio Lebar terhadap Sarat.	113
Lampiran 3. Lengan Stabilitas berdasarkan Rasio Lebar terhadap Sarat Kapal	116
Lampiran 4. Evaluasi Stabilitas berdasarkan Kriteria Umum.	121
Lampiran 5. Tinjau Posisi Bilge Keel Kapal 1 B/H 2.09.	128
Lampiran 6. Lengan Stabilitas berdasarkan Variasi Titik Berat Kapal.	129
Lampiran 7. Dokumentasi Pengukuran Kapal di Bulukumba.	130
Lampiran 8. Data Populasi Kapal Kayu Produksi Tanah Beru Kab. Bulukumba	135
Lampiran 9. Validasi pengujian	136

## DAFTAR ARTI LAMBANG ,SINGKATAN DAN ISTILAH

Lambang/Singkatan	Arti dan keterangan
MG	<i>Metasentra Gravity</i> , Jarak antara titik berat kapal ke titik semu metasentra.
KB	<i>Keel Buoyancy</i> , Jarak antara titik apung kapal ke titik keel .
KG	<i>Keel Gravity</i> , Jarak antara titik berat kapal ke lunas kapal.
h/GZ	Lengan stabilitas.
Ms	Momen statis.
Mh	Momen pengganggu.
D	Displacement kapal.
DWT	<i>Deadweight tonnage</i> , jumlah berat yang dapat ditampung oleh kapal untuk membuat terbenam sampai sarat.
IMO	<i>International Maritime Organization</i> .
GT	<i>Gross tonnage</i> , Perhitungan volume semua ruangan yang terletak dibawah geladak dan volume ruangan tertutup diatas geladak.
a	koefisien redaman linier.
b	koefisien redaman nonlinier/quaratic.
NCVS	<i>Non-konvention vessel standard Indonesian Flagged/ Standar Kapal non-konvensi</i>

	berbendera Indonesia.
X <sub>1</sub>	Variabel rasio lebar terhadap sarat pada kriteria cuaca .
X <sub>2</sub>	Variabel koefisien bentuk pada kriteria cuaca.
r	<i>Effective wave slope</i> , Efektif slope gelombang.
s	<i>Wave steepness</i> , Kelandaian gelombang.
A <sub>k</sub>	Luas <i>bilge keel</i> .
MSC	<i>Maritime Safety Committee</i> .
SDC	<i>Ship Design and Construction</i> .
<i>Roll Decay test</i>	Pengujian gerak roll di air tenang.
<i>Drift test</i>	Pengujian gerak roll di gelombang beraturan
<i>Downflooding angle</i>	Kemiringan kapal dimana bukaan dilambung, bangunan atas tidak kedap.

---

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang**

Kapal merupakan hasil interaksi manusia dengan alam utamanya air baik laut, sungai maupun danau mencakup elemen tematik sejarah yang luas yang sering menggunakan pendekatan global dan regional (Dokras and Nordic 2020). Kapal kayu memiliki sejarah yang berbeda baik dari karakteristik bentuk dan pembangunannya (Diah Retno et. al. 2018).

Perbedaan karakteristik kapal kayu dipengaruhi oleh kearifan lokal dan karakteristik lingkungan. Perbedaan tersebut seperti bentuk lambung walaupun karakteristik kapal kayu saat ini telah mengalami transformasi bentuk dan fungsi dari kapal barang menjadi kapal wisata akan tetapi bentuk dasar masih dipertahankan dan metode pembangunan yang masih tradisional (Zarma et al 2015).

Perancangan yang berbasis kinerja khususnya stabilitas diperlukan sesuai dengan hasil pengamatan dan diskusi penulis dengan Nakhoda dan awak kapal di Pelabuhan Tuju-tuju dan Larea-rea Kab. Sinjai yang pada umumnya mengoperasikan kapal kayu traditional bahwa masih bisa melayarkan kapal dengan lambung timbul yang kecil  $\pm 10$  centimeter pada kondisi perairan tenang sedangkan untuk kondisi bergelombang

lambung timbul  $\pm 30$  cm dengan lambung timbul kecil beresiko terjadinya kentenggelaman maka diperlukan studi lebih lanjut.

Ketenggelaman disebabkan beberapa faktor seperti lengan stabil yang kecil yang berkaitan terhadap karakteristik geometri dan titik berat kapal serta faktor external seperti angin dan gelombang. Karakteristik geometri yang berpengaruh terhadap karakteristik lengan stabilitas yakni rasio perbandingan ukuran utama seperti lebar terhadap sarat kapal dan lambung timbul terhadap lebar kapal, koefisien bentuk dan titik berat kapal (Asri et al 2014) karakteristik geometri kapal kayu tradisional seperti koefisien bentuk dan rasio B/T relative lebih kecil, serta *rise of floor* yang lebih besar seperti diteliti oleh (Ardiyanti 2007) sudut *rise of floor* kapal kayu antara sudut 25- 30 derajat, sehingga perubahan bentuk lambung dibawah garis air relative ekstrim kondisi ini akan mempengaruhi lengan stabilitas.

Stabilitas kapal juga dipengaruhi oleh gelombang yang berkorelasi terhadap efektif slope gelombang dan merupakan variable untuk mengevaluasi stabilitas kapal berdasarkan kriteria cuaca untuk menentukan momen roll eksitasi akibat gelombang (Paroka et al 2020). Respon gerak roll juga sangat dipengaruhi oleh redaman kapal yang mengontrol besar respon gerak. Fenomena tersebut karena pengaruh karakteristik geometri dan penambahan alat peredam seperti *fin* dan *bilge keel* yang didominasi oleh efek viskositas (Bassler and Reed 2009).

Kondisi saat ini kapal kayu masih belum menjadi perhatian khusus seperti belum disertifikasinya garis muat, stabilitas dan pengawasan pembangunan dan penerapan keselamatan yang rendah. Sehingga perlu dievaluasi batas-batas kerentanan terhadap stabilitas.

## **B. Identifikasi Masalah**

Beberapa permasalahan yang telah diidentifikasi dalam penelitian ini evaluasi stabilitas kapal kayu tradisional sebagai berikut :

1. Bagaimana hubungan antara karakteristik geometri kapal kayu dengan karakteristik lengan stabilitas ?
2. Bagaimana pengaruh redaman dan koefisien efektif slope gelombang terhadap stabilitas ?
3. Bagaimana batas kerentanan stabilitas kapal kayu dalam aturan stabilitas International ?

## **C. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah diatas maka tujuan dari penelitian sebagai berikut :

1. Menentukan pengaruh karakteristik geometri termasuk rasio ukuran utama, koefisien bentuk dan parameter hidrostatik terhadap karakteristik lengan stabilitas.

2. Menentukan pengaruh redaman dan koefisien efektif slope gelombang terhadap stabilitas.
3. Menentukan batas performa stabilitas kapal kayu dalam aturan stabilitas International.

#### **D. Kegunaan Penelitian**

Penelitian ini memiliki tujuan mengevaluasi stabilitas kapal di gelombang dan pengaruh angin yang nantinya akan berguna untuk dijadikan sebagai referensi/pertimbangan lebih khusus kepada jenis kapal kayu. kegunaan penelitian sebagai berikut :

1. Pengrajin

Sebagai bahan pertimbangan bagi pengrajin kapal kayu dalam membangun kapal kayu traditional berdasarkan kaidah perencanaan yang baik.

2. Pemilik kapal

Tercapainya *live on board* dan memberikan dampak terhadap standardisasi kapal kayu.

3. Peneliti

Pengembangan teoritis sebagai acuan pengetahuan dan pemahaman bidang stabilitas kapal khususnya kapal kayu.

#### 4. Pemerintah

Sebagai bahan pertimbangan dalam pengembangan regulasi standar kapal berbendera Indonesia khusus stabilitas kapal kayu dan sebagai referensi bagi lembaga Komite Keselamatan Transportasi dalam menganalisis penyebab kecelakaan kapal kayu.

### **E. Batasan Masalah**

Agar pembahasan yang dilakukan lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang ingin dicapai, maka perlu dibuat batasan-batasan yang diperlukan dalam pemecahan masalah sebagai berikut :

1. Objek penelitian hanya tipe kapal penangkap Ikan dan kapal wisata produksi Tanah Beru, Kabupaten Bulukumba.
2. Rasio ukuran utama hanya pada rasio B/T dan Fb/B.
3. Gelombang diasumsikan regular dan angin konstan.
4. Batas kegagalan stabilitas hanya pada level 1 didalam kriteria cuaca.

### **F. Sistematika Penulisan**

Untuk membantu mengetahui materi yang dibahas dalam penelitian ini, maka uraian secara singkat bab demi bab adalah sebagai

berikut:

- Bab I    Pendahuluan berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.
- Bab II    Tinjauan Pustaka, pada bab ini dibahas teori, pemikiran dan hasil penelitian terdahulu yang berhubungan dengan stabilitas kapal kayu.
- Bab III   Metodologi Penelitian, pada bab ini dikemukakan lokasi penelitian, jenis dan sumber data, metode pengambilan data, teknik analisa data, diagram alur penelitian, penyajian data berupa data offset kapal dan gambar rencana garis.
- Bab IV    Pembahasan berisi analisis hasil penelitian yang akhirnya akan mengeluarkan output yang merupakan arahan atau rencana yang direkomendasikan.
- Bab V    Penutup, berisi kesimpulan hasil analisa serta beberapa saran

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

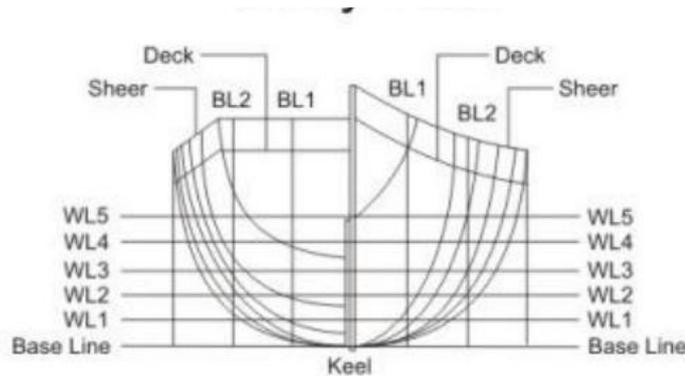
#### **A. Karakteristik Bentuk Kapal Kayu**

Kapal kayu pada umumnya dibangun tanpa gambar rencana garis dan pembentukan lambung dimulai dari pemasangan kulit tidak seperti pada pembangunan kapal secara konvensional sehingga memiliki keunikan tersendiri semuanya berdasarkan tradisi dan naluri dalam menentukan karakteristik bentuk lambung dan konstruksinya (Syarifuddin et al 2010).

Karakteristik bentuk kapal kapal lebih khusus kapal kayu di Sulawesi pada umumnya pinisi dengan lambung dasar *round* dengan layar depan dan belakang yang dirancang lebih runcing dan ditingkatkan dengan beberapa papan tambahan yang menyebabkan dek haluan menjadi lebih rendah dari pada dek utama dan buritan (Saenong 2013).

Karakteristik bentuk tersebut masih tetap dipertahankan akan tetapi untuk karakteristik ukuran telah menyesuaikan kebutuhan saat ini untuk kapal barang kapasitas ruang muat ditambah dan untuk kapal wisata pada umumnya menambah tinggi kapal dan tinggi bangunan atas hal ini dilakukan untuk mengakomodasi ruang penumpang di bawah geladak dan penambahan ruangan penunjang lainnya pada bangunan atas dan penambahan lebar kapal untuk meningkatkan kenyamanan.

Pertimbangan rasio ukuran utama dan koefisien bentuk, menurut Hasyimoto (Chonso, 1976) bahwa koefisien blok untuk kapal kayu berkisar antara  $c_b = 0.5 - 0.65$  dengan bentuk lambung alas bulat (*round bottom hull*) seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Body plan kapal kayu

Sumber : Yopi Novita,2016.

Tipikal kapal kayu yakni *displacement hull*, berkecepatan rendah dengan bobot yang besar, daya tekan ke bawah lebih rendah akan tetapi dapat mudah untuk terguling jika beban tidak seimbang tetapi resiko tersebut dapat dihindari dengan memasang lunas dan *bilga keel* untuk mengurangi efek roll yang besar.

Rasio B/T pada kapal kayu berkisar 0,56 – 5,00 (Iskandar BH 1995), rasio B/T merupakan fungsi dari lebar kapal yang sangat berpengaruh terhadap kemampuan stabilitas melintang akibat dari gelombang, karakteristik lainnya tipe kapal kayu *purse seine* pada umumnya memiliki lambung timbul yang kecil karena pertimbangan ketika kapal menarik dengan peralatan tangkap dan kapal memiliki geladak kerja yang luas dan

mudah menaikkan hasil tangkapan ke geladak lambung timbul minimum umumnya rawan terhadap risiko terbalik dibanding dengan kapal yang memiliki lambung timbul yang lebih tinggi (Muhammad et al. 2018).

Saat kapal dioperasikan dengan kondisi laut bergelombang yang dipengaruhi oleh panjang dan tinggi gelombang serta kecepatan operasi kapal. Kapal dengan lambung timbul minimum sangat rentan terhadap bahaya kehilangan stabilitas. Namun kondisi tersebut diatas membaik melalui penambahan lebar kapal dan pengaturan titik GM (Muhammad, Baharuddin, dan Hasan 2018).

## **B. Parameter Geometri Kapal yang berpengaruh terhadap Stabilitas**

Penentuan dimensi ukuran kapal karakteristik kapal sangat berkaitan terhadap ujuk kerja misalnya stabilitas, kapasitas, daya mesin dan bahkan efisiensi ekonomi (Schneekluth and Bertram 1998).

Pada tahapan awal perancangan yaitu penentuan ukuran utama kapal serta karakteristik geometri lainnya, karakteristik kapal baik yang berhubungan dengan masalah unjuk kerja seperti tahanan dan propulsi maupun yang berhubungan dengan masalah keselamatan seperti stabilitas, kekuatan dan manuver sudah harus bisa diprediksi.

Prediksi awal tersebut dapat dilakukan berdasarkan rasio ukuran utama kapal. Salah satu parameter penting yang berhubungan dengan masalah keselamatan kapal dalam pelayaran adalah stabilitas.

Bentuk badan kapal yang ada di bawah permukaan air juga mempunyai pengaruh terhadap karakteristik lengan stabilitas kapal khususnya kenaikan dasar kapal (*rise of floor*) pada kondisi tersebut sama pada kondisi kapal kayu yang memiliki perubahan karakteristik hidrostatis yang ekstrim, sehingga pada penelitian ini karakteristik geometri yang berhubungan dengan stabilitas adalah perbandingan antara lebar dan sarat kapal, perbandingan antara lambung timbul dan lebar kapal serta koefisien bentuk kapal.

Batas atau rentang rasio lebar dan sarat serta rasio lambung timbul dan lebar dengan karakteristik lengan stabilitas yang masih memenuhi kriteria stabilitas IMO dapat diketahui. Pada dasarnya, bentuk kapal didasarkan pada dimensi utama kapal, pertimbangan yang sangat penting adalah rasio perbandingan ukuran utama kapal dan koefisien bentuk. Adapun rasio perbandingan ukuran utama dan koefisien bentuk sebagai berikut :

1. Rasio lebar kapal terhadap sarat kapal (B/T)

Mempunyai pengaruh pada stabilitas kapal, (B/T) yang rendah mengurangi stabilitas kapal, rasio inilah yang sangat berperan penting pada performa stabilitas karena pengaruh pergeseran titik apung di setiap sarat yang bergantung pada bentuk lambung.

## 2. Rasio tinggi lambung timbul terhadap lebar kapal ( $F_b/B$ )

Perbandingan  $F_b/B$ , berhubungan terhadap lengan stabilitas kapal juga akan semakin besar dengan bertambahnya rasio lambung timbul dan lebar kapal akibat perubahan momen inersia garis air akibat dari perubahan lebar garis air yang terjadi secara drastis pada saat tepi geladak kapal sudah terbenam ke dalam air atau dasar kapal muncul di atas permukaan air.

## 3. Rasio panjang kapal terhadap lebar kapal ( $L/B$ )

Rasio ( $L/B$ ) yang besar untuk kapal dengan kecepatan tinggi dan mempunyai perbandingan ruang yang baik akan tetapi mengurangi kemampuan olah gerak dan stabilitas.

## 4. Rasio tinggi kapal terhadap sarat kapal ( $H/T$ )

Perbandingan  $H/T$  terutama berhubungan dengan daya apung cadangan, yang juga memberikan pengaruh performa stabilitas.

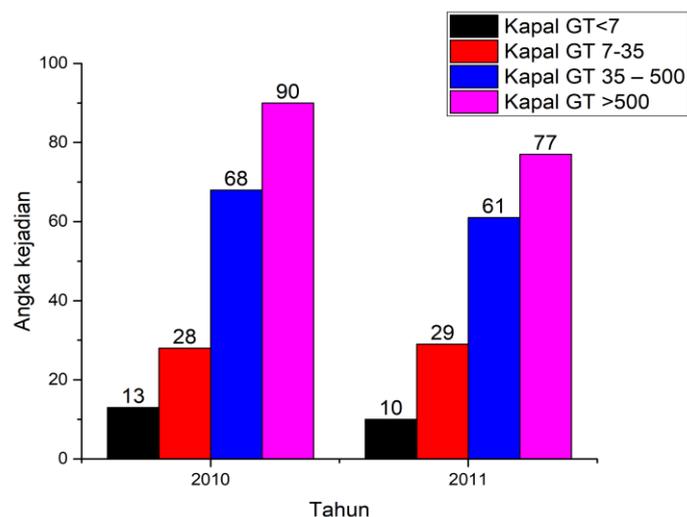
### Koefisien bentuk

Selain dimensi utama kapal, koefisien bentuk kapal juga turut mempengaruhi sifat dan karakteristik kapal, koefisien bentuk terdiri dari koefisien blok ( $C_b$ ), koefisien *midship* ( $C_m$ ), koefisien garis air ( $C_w$ ) dan koefisien prismatic ( $C_p$ ). Badan kapal mempunyai bentuk yang gemuk atau ramping tergantung dari nilai koefisien blok. Kapal cepat mempunyai nilai  $C_b$  kecil sedangkan kapal lambat mempunyai  $C_b$  yang besar. Kapal yang memerlukan ruang muat yang besar harus mempunyai penampang tengah kapal yang cukup besar ( $C_m$ ), koefisien garis air mempunyai

pengaruh terhadap jari-jari metasentra (MB), bentuk badan kapal tergantung dari nilai  $C_p$ . Apabila perubahan bentuk penampang melintang pada sepanjang panjang kapal yang kecil maka  $C_p$  bernilai besar.

### C. Kecelakaan dan Performa Stabilitas Kapal Kayu

Laporan KNKT data tahun 2013 menunjukkan sebagian besar kecelakaan laut terjadi pada kapal berbendera Indonesia dengan ukuran diatas GT 500 angka kejadian kecelakaan terbesar pada rentang ukuran tersebut ialah kapal-kapal baja sedangkan pada pada ukuran GT 7 sampai GT dibawah 500 tersebut rata-rata termasuk kapal kayu traditional yang termasuk kapal nonkonvensi menempati posisi kedua terbesar dapat dilihat pada Gambar 2.



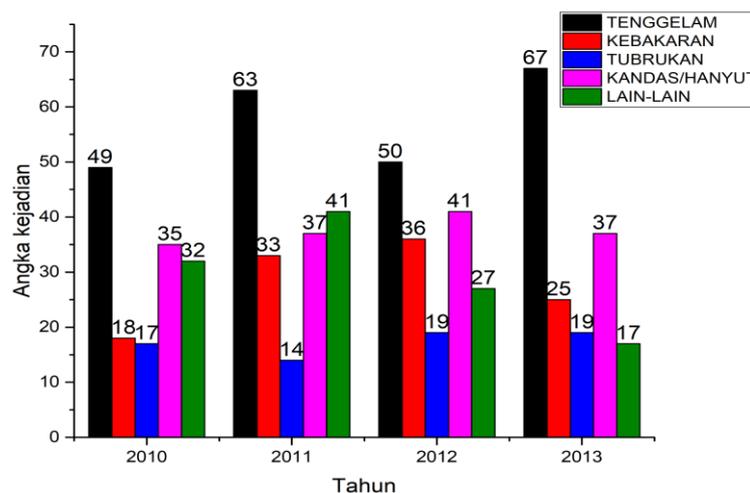
Gambar 2. Angka kejadian kecelakaan kapal berdasarkan ukuran *gross tonnage*

Sumber : (Prihartono 2015).

Kecelakaan kapal berdasarkan jenis kecelakaan akibat kebakaran, tubrukan, kandas, hanyut dan tenggelam angka kecelakaan ketenggelaman menempati posisi pertama dapat dilihat pada gambar 3. Dominasi ukuran kapal pada rentang 35 - 500 GT termasuk kapal kayu.

Ketenggelaman tersebut karena cuaca buruk dan kondisi kapal kayu yang tidak dapat dijamin kekedapannya dan proses pemuatan yang tidak mempertimbangkan stabilitas kapal karena ketidak tauan awak kapal (KNKT 2018).

Kecelakaan akibat tenggelam beberapa tahun ini menjadi sorotan utamanya kapal kayu seperti tenggelamnya KM Sinar Bangun 4 yang terjadi di danau toba karena kondisi cuaca buruk mempengaruhi tenggelamnya hasil analisis investigasi akibat kehilangan momen penegak kapal oleh faktor alam dan teknis atau kelalaian didalam pemuatan kapal (KNKT 2018).



Gambar 3. Angka Kejadian Kecelakaan Berdasarkan Jenis Kecelakaan

Sumber : (Prihartono 2015).

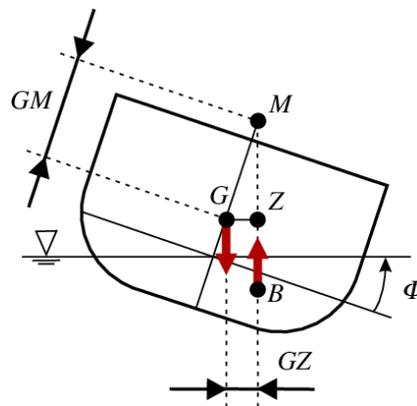
Pemerintah Indonesia telah berupaya mencegah kejadian tersebut dengan mengeluarkan aturan stabilitas kapal yang beroperasi dalam negeri yakni Standar Kapal Non-Konvensi Berbendera Indonesia atau *Non-Convention Vessel Standard (NCVS)* pada bab VI tentang garis muat section 7.2 (Kementerian Perhubungan 2009) dan menerbitkan peraturan menteri tentang garis muat kapal dan pemuatan akan tetapi belum kepada aturan stabilitas sesuai dengan karakteristik kapal dan perairan di Indonesia .

Aturan *Non-Convention Vessel Standard (NCVS)* berisi uji keseimbangan/kemiringan dan informasi stabilitas kapal berupa buku informasi stabilitas kapal(Kementerian Perhubungan 2009). Draft standar kapal non konvensi berbendera Indonesia bagi kapal-kapal yang tidak diatur dalam regulasi international, akan tetapi untuk menguji stabilitas tidak hanya sebatas itu saja, perlu dievaluasi kinerja stabilitas akibat gelombang dan angin dan peluang terjadinya ketenggelaman.

#### **D. Lengan Stabilitas**

Lengan stabilitas menunjukkan kemampuan kapal untuk kembali ke posisi semula pada saat mengalami kemiringan akibat gangguan dari luar.

Lengan stabilitas menggambarkan karakteristik stabilitas kapal. Oleh karena itu lengan stabilitas menjadi parameter kriteria stabilitas, sudut kemiringan akibat gelombang momen pengganggu berbanding terbalik lengan stabilitas. Jarak antara garis kerja gaya berat dengan garis kerja gaya apung pada sudut kemiringan kurang dari 6.0 derajat Ilustrasi garis kerja stabilitas kapal dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Garis Kerja Gaya Berat dan Garis Kerja Gaya Apung

Sumber : (Dostal, Kreuzer, and Sri Namachchivaya 2012)

Berdasarkan garis kerja gaya berat dan garis kerja gaya apung persamaan lengan stabilitas statis ( $GZ$ ) dapat dituliskan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 GZ &= (MB + KB - KG) \sin\varphi \\
 &= MB \sin\varphi + (KB - KG) \sin\varphi
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$GZ = MG \sin\varphi \quad (2)$$

Dimana :

$$MG = MB + KB - KG \quad (3)$$

$$MB = \frac{Ix}{V} \quad (4)$$

Dengan catatan bahwa dengan persamaan diatas hanya dapat digunakan apabila luas penampang garis air tidak mengalami perubahan yang signifikan atau diasumsikan sama dengan luas pada saat tegak atau dibawah dari 6 derajat.

Untuk menentukan sudut kemiringan kapal akibat momen pengganggu dari gelombang dan angin berbanding terbalik dengan *displacement* dan tinggi metasentra (GM) menggunakan persamaan 3.

$$\varphi = \sin^{-1} \left[ \frac{Mh}{(\Delta \times GM)} \right] \quad (5)$$

Dimana

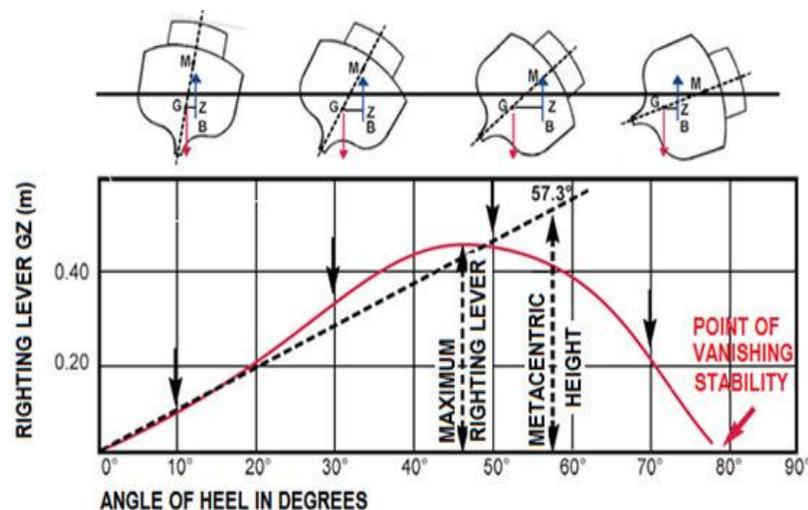
Mh : Momen pengganggu

$\Delta$  : Displacement

GM : Metasentra gravity

Pada sudut kemiringan lebih besar dari 6 derajat (Stabilitas lanjut), penentuan sudut kemiringan menggunakan kurva lengan stabilitas.. karena penampang garis air mengalami perubahan yang signifikan

sehingga jari-jari metesentra (MB) berbeda dengan pada saat tegak. Perpindahan titik tekan tidak lagi linier dengan perubahan sudut kemiringan, perpindahan titik tekan harus dihitung dengan metode tertentu *Benyamin-spance, Krylov, dll.* Karakteristik lengan stabilitas dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Karakteristik Lengan Stabilitas

Sumber : (Plato 2019)

Pada saat kapal tegak 0.0 derajat lengan stabilitas sama dengan nol. Lengan stabilitas mencapai maksimum (*max righting lever*) pada sudut kemiringan tertentu. Pada saat kemiringan tertentu lengan stabilitas akan kembali ke nol (*point of vanishing stability*). Momen yang akan mengembalikan kapal ke posisi semula pada saat mengalami kemiringan ialah momen stabilitas hasil kali antara lengan stabilitas dengan *displacement* kapal pada kondisi pemuatan tertentu, sehingga dapat dituliskan dengan Persamaan 6.

$$M_s = GZ \times \Delta \quad (6)$$

Dimana

GZ : Lengan stabilitas

$\Delta$  : Displacement kapal

Penentuan sudut kemiringan disebabkan oleh momen pengganggu sama dengan gaya pengganggu dikalikan dengan jarak garis kerja gaya pengganggu terhadap titik berat kapal sudut kemiringan akibat momen pengganggu ditentukan dengan menggunakan menggunakan kurva stabilitas.

Kurva lengan stabilitas dapat juga diketahui lengan stabilitas maksimum dimana pada saat sudut kemiringan dengan jarak garis kerja gaya berat dan gaya apung terbesar, momen maksimum yang dapat ditimbulkan untuk mengembalikan kapal pada posisi semula setelah momen pengganggu diiadakan dimana lengan stabilitas maksimum dipengaruhi oleh rasio lebar dan sarat kapal serta rasio lambung timbul dan lebar kapal dan sudut kemiringan dengan lengan stabilitas nol (*angel of vanishing stability*).

Karakteristik lengan stabilitas merupakan salah satu parameter yang dapat digunakan dalam menentukan kondisi batas lengan stabilitas yang memungkinkan kapal dapat beroperasi dengan aman adalah performa gerak *rolling* khususnya pada saat beroperasi pada gelombang samping.

Perbedaan karakteristik lengan stabilitas seperti tinggi metacentra (GM), luasan dibawah kurva lengan stabilitas, sudut kemiringan dengan lengan stabilitas maksimum, sudut kemiringan sama dengan nol dapat berpengaruh terhadap karakteristik gerak *rolling* selain faktor redaman. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa perubahan karakteristik lengan stabilitas berdampak signifikan terhadap karakteristik gerak *roll* khususnya pada amplitudo yang cukup besar, gerak *roll* dapat menjadi tidak stabil dan dapat berdampak terhadap ketenggelaman (Paroka et al. 2019).

## **E. Aturan Stabilitas International**

Saat ini Indonesia belum memiliki peraturan persyaratan stabilitas kapal yang khusus dan masih menggunakan aturan perhitungan stabilitas International yang tertuang pada *Intact Stability code* edisi 2009. Didalam aturan tersebut terdiri atas bagian A kriteria wajib dan bagian B rekomendasi untu tipe kapal tertentu dan tambahan petunjuk lainnya(IMO 2008).

### **1. Kriteria umum**

Bagian A kriteria wajib untuk semua kapal termasuk kriteria umum termasuk kriteria karakteristik lengan stabilitas seperti luasan dibawah pada kemiringan tertentu, sudut lengan stabilitas maksimum dan tinggi metasentra awal standar kriteria umum dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Umum berdasarkan Karakteristik Lengan Stabilitas

No	Parameter	Kriteria	Satuan
1	Maks. Luasan GZ 0 to 30	$\geq 3.151$	m.deg
2	Maks. Luasan GZ 0 to 40	$\geq 5.156$	m.deg
3	Maks. Luasan GZ 30 to 40	$\geq 1.718$	m.deg
4	Maks. GZ 30 atau lebih besar	$\geq 0.2$	m
5	Sudut maksimum GZ	$\geq 25$	deg
6	Tinggi Metasentra awal	$\geq 0.15$	m

Sumber : (IMO 2008)

Akan tetapi pada kapal tertentu sesuai bab 4 *intact stability code* petunjuk aplikasi berdasarkan Tabel 1 tidak dapat diterapkan untuk kapal B/d 2.5 maka ditetapkan kriteria alternatif (IMO 2008).sebagai berikut :

1. Maksimum lengan stabilitas kurang dari terjadi kurang dari 15 derajat
2. Luasan lengan stabilitas tidak kurang dari 4.0107 m.deg pada sudut 15 derajat. Hingga 15 derajat dan 3.151 m.deg hingga 30 derajat maksimum lengan stabilitas terjadi dibawah 30 derajat.. dimana maksimum lengan stabilitas antara 15 dan 30 derajat area luas sesuai dengan persamaan 7.

$$0.001 (30 \text{ derajat} - \varphi_{max}) \text{ m.deg} \quad (7)$$

## 2. Kriteria cuaca

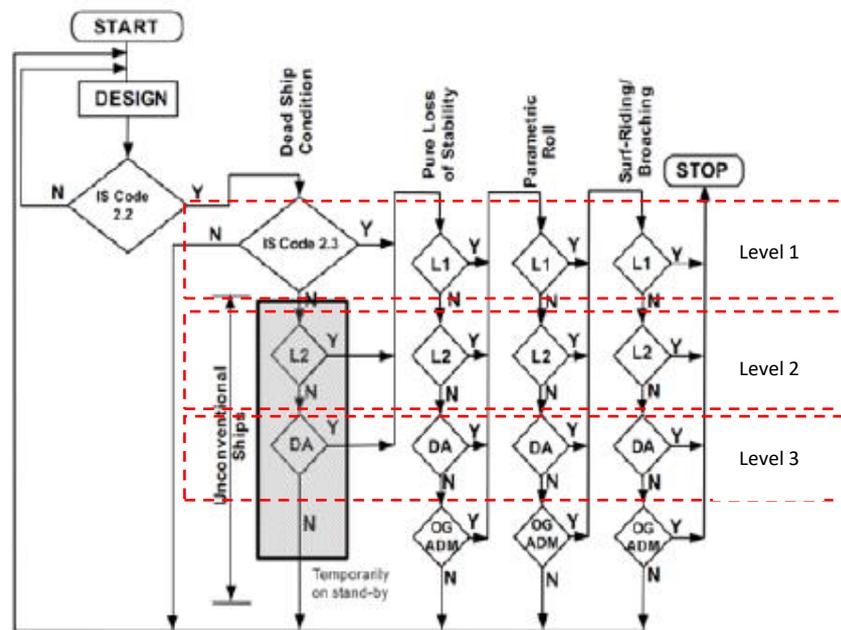
Kriteria cuaca merupakan pengembangan kriteria stabilitas berdasarkan karakteristik lengan stabilitas yang dinamakan kriteria generasi kedua yang diluncurkan pada tahun 2001 merupakan bagian dari revisi *intact stability* di IMO (Alvite-Castro et al. 2020). Kriteria stabilitas kriteria umum tidak memberikan keamanan yang memadai terhadap kegagalan stabilitas dinamis seperti pada saat kapal sekarang mengalami fenomena ketenggelaman.

Kriteria tersebut diambil dari sudut pandang berdasarkan data statistik kecelakaan kapal. Kriteria tersebut tidak memperhitungkan beberapa pertimbangan seperti momen redaman momen inersia dan lain-lain.

Kriteria kestabilan sementara dikembangkan oleh IMO yaitu *Second Generation Intact Stability Criteria*, sesuai ilmu hidrodinamika bukan hanya statistika hal itu dilakukan karena kriteria lama tidak memberikan keamanan yang memadai terhadap kegagalan stabilitas, sehingga IMO telah merevisi menyeluruh aturan *Intact Stability* dalam kerangka desain berbasis sasaran *Goal Based Design* (Alvite-Castro et al. 2020).

Beberapa konsep pedoman telah dikeluarkan. SDC1/INF.8 oleh Amerika dan Jepang membahas secara rinci persyaratan yang akan diterapkan termasuk penilaian kualitatif dan kuantitatif, sejauh ini sebagian besar pada bentuk kegagalan yang terkait dengan perubahan lengan stabilitas dalam gelombang.

Finalisasi generasi kedua kriteria stabilitas kapal utuh (*intact stability*), salah satu usaha dalam memperkenalkan dan meningkatkan keselamatan kapal, IMO telah mengembangkan *second generation intact stability criteria* yang menangani lima bentuk kegagalan dapat dilihat pada Gambar 6.



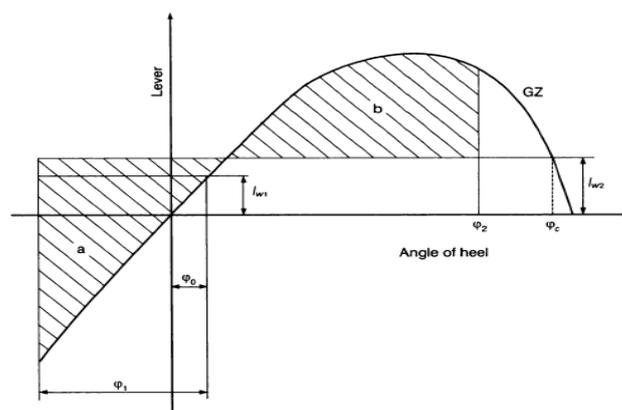
Gambar 6. Format kriteria stabilitas IMO

Sumber : (IMO 2006).

Pada setiap bentuk kegagalan terdapat 3 level kriteria *vulnerability* yaitu level 1, level 2 dan *direct stability assessment* sebagai level 3. Namun, kapal hanya dipersyaratkan untuk memenuhi salah satu dari 3 level tersebut. Ini berarti bahwa untuk kapal yang memenuhi level 1 tidak perlu lagi untuk memenuhi level 2 atau 3. Namun, kapal yang gagal yang memenuhi level 2 dan 3 harus memenuhi persyaratan *operasional*

*limitation dan operational guidance*. Akan tetapi, sampai saat ini ketidakkonsistenan pada level 1 dan 2 dari kriteria *vulnerability* belum menemukan pemecahannya. (Dir. Perkapalan dan Kelautan, 2019).

Bentuk kegagalan *dead ship condition* atau *severe wind and rolling criterion (weather criterion)* adalah kemampuan kapal menahan hembusan angin dan gelombang dari samping dan energi momen pengembali secara bersamaan dengan parameter perbandingan antara energi momen pengembali dengan energi momen oleng. Energi momen pengembali dapat diestimasi dari luasan yang dibatasi oleh kurva lengan stabilitas sampai dengan sudut kemiringan dimana lengan stabilitas telah mencapai *angle vanishing stability* atau sudut dimana bukaan yang ada di geladak utama sudah menyentuh permukaan air (*downflooding angle*) atau sudut 50 derajat, diambil nilai terkecil. Energi momen oleng akibat angin dan gelombang adalah luasan yang dibatasi oleh kurva lengan stabilitas sampai pada sudut kemiringan dalam arah berlawanan yang disebabkan oleh angin dan gelombang bekerja secara bersamaan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Parameter evaluasi stabilitas kriteria cuaca

Sumber : (IMO 2008)

Dimana :

- $\phi_0$  : Sudut kemiringan kapal akibat momen pengganggu angin dengan kecepatan konstan
- $\phi_1$  : Sudut oleng kapal gelombang dan angin yang bekerja secara bersamaan.
- $l_{w1}$  : Lengan pengganggu yang ditimbulkan angin dengan kecepatan konstan dimana IMO menetapkan kecepatan angin sama dengan 26 m/detik sebagai standar untuk kriteria cuaca.
- $l_{w2}$  : Lengan momen pengganggu akibat fluktuasi kecepatan angin.
- $\phi_c$  &  $\phi_2$  : Masing-masing adalah sudut kemiringan kapal dimana bukaan yang ada di geladak sudah menyentuh permukaan air (*downflooding angle*) dan sudut kemiringan kapal dimana lengan pengembali sama dengan nol dengan mempertimbangkan lengan momen pengganggu (*angle of vanishing stability*)

Luasan “b” pada Gambar 7 adalah energi momen pengembali sedangkan luasan “a” adalah energi momen oleng akibat angin dan gelombang. Dengan demikian maka kriteria cuaca dapat akan terpenuhi jika  $b/a$  lebih besar atau sama dengan satu (IMO 2008).

Momen pengganggu akibat angin dapat ditentukan sebagai berikut :

$$L_{w1} = \frac{P \times A \times Z}{1000 \times g \times \Delta} \quad (8)$$

$$L_{w2} = 1,5 \times L_{w1} \quad (9)$$

Dimana

P : Tekanan angin 504 Pa

A : Luas bidang tangkap angin ( $m^2$ )

Z : Jarak dari pusat bidang tangkap angin ke pusat area dibawah garis air atau setengah dari sarat kapal (m)

$\Delta$  : *DisplACEMENT* (ton)

g : Percepatan gravitasi 9,81 m/s

Penentuan sudut roll mengikuti persamaan sebagai berikut :

$$\Phi_1 \text{ (derajat)} = 109 \times k \times X_1 \times X_2 \times \sqrt{r \times s} \quad (10)$$

Konstanta 109 pada persamaan diatas adalah faktor keselamatan yang ditentukan berdasarkan hasil pengujian model. Faktor k,  $X_1$  ,  $X_2$  adalah faktor yang tergantung pada karakteristik geometri kapal seperti

ditunjukkan pada table 2, 3 dan 4 sedangkan r dan s masing-masing adalah efektif slope gelombang (*Effective wave slope coefficient*) dan kecuraman gelombang (*wave steepness*), lambung yang berbentuk *round* dengan *bilge keel* maka nilai  $k = 1$ , dan  $k = 0$  jika bentuk kapal berbentuk *sharp bilge keel* (IMO 2008).

Tabel 2. Nilai faktor k

$\frac{Ak \times 100}{Lwl \times B}$	K
0	1,0
1,0	0,98
1,5	0,95
2,0	0,88
2,5	0,79
3,0	0,74
3,5	0,72
$\geq 4,0$	0,70

Sumber : (IMO 2008)

Tabel 3. Nilai faktor  $X_1$ 

B/d	$X_1$
2,4	1,0
2,5	0,98
2,6	0,96
2,7	0,95
2,8	0,93
2,9	0,91
3,0	0,90
3,1	0,88
3,2	0,86
3,4	0,82
$\geq 3,5$	0,80

Sumber : (IMO 2008)

Tabel 4. Nilai faktor  $X_2$ 

$C_B$	$X_2$
$\leq 0,45$	0,75
0,5	0,82
0,55	0,89
0,6	0,95
0,65	0,97
$\geq 0,7$	1

Sumber : (IMO 2008)

Koefisien kelandaian efektif gelombang dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$r = 0,73 + 0,6 OG / d \quad (11)$$

Dimana

$r$  : Effective wave slope coefficient .

$OG$  : Tinggi titik berat kapal dari penampang garis air (m).

$d$  : Sarat kapal (m).

Tabel 5. Nilai  $s$ 

<i>Ship Roll Period(s)</i>	<i>Wave Steepness</i>
	$H/\lambda$
<6	0,100
6	0,100
7	0,098
8	0,093
12	0,065
14	0,053

16	0,044
18	0,038
20	0,032
22	0,028
24	0,025
26	0,023
28	0,021
30	0,020
>30	0,020

Sumber : (IMO 2008).

Nilai dari beberapa parameter diatas ditentukan berdasarkan data kapal dengan karakteristik geometri sebagai berikut :

1. B/d lebih kecil dari 3,5
2. (KG/d-1) antara -0,3 dan 0,5
3. T lebih kecil dari 20 detik

Untuk kapal diluar dari parameter tersebut sudut roll ( $\phi_1$ ) dapat ditentukan dengan eksperimen sesuai dengan prosedur MSC.1 / Circ.1200 atau menggunakan penilaian berdasarkan SDC 3/INF.10. dari hasil percobaan maka akan didapatkan nilai faktor redaman (k) dan faktor  $X_1$  diluar dari tabel faktor yang dikeluarkan IMO berdasarkan persamaan dibawah ini :

$$k = \frac{\phi_{ir}}{109 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot \sqrt{s \cdot r}} \quad (12)$$

$$X_1 = \frac{\phi_{ir}}{109 \cdot k \cdot x_2 \cdot \sqrt{s \cdot r}} \quad (13)$$

Dimana

0.7 : Faktor reduksi memperhitungkan karakteristik laut yang sebenarnya dengan gelombang *irregular*

$\phi_{ir}$  : Regular *wave roll-back angle*

109 : Faktor keselamatan

$x_1$  : Faktor rasio lebar terhadap sarat

$x_2$  : Faktor koefisien bentuk

$r$  : Efektif wave slope coefficient

$s$  : Kelandaian gelombang

Part B rekomendasi untuk kapal tertentu dan pedoman tambahan kriteria kerentanan level 1 dan 2 untuk kegagalan kriteria cuaca.

Level 1 Kriteria kerentanan untuk *Dead ship*.

Sebuah kapal dalam kondisi pemuatan tertentu dianggap tidak rentan dalam kondisi *dead ship* jika memenuhi kriteria *the severe wind and rolling (Weather criteria)* dengan menggunakan faktor kecuraman gelombang kriteria tersebut berdasarkan pada Table 5. Periode oleng pada Table 7 dihitung dengan menggunakan persamaan 14.

$$T = \frac{2 \times C \times B}{\sqrt{GM}} \quad (14)$$

Dimana koefisien C dihitung pada persamaan diatas dihitung dengan persamaan 15.

$$C : 0,373 + 0,023 (B/d) - 0,043 (L_{wl}/100) \quad (15)$$

Dimana

$L_{wl}$  : Panjang garis air (m)

B : Lebar moulded (m)

$C_b$  : Koefisien blok

d : Sarat kapal (m)

Level 2. Kriteria kerentanan untuk Dead ship condition

Sebuah kapal dianggap tidak rentan terhadap mode kegagalan kondisi *dead ship* jika :

$$C \leq R_{DS0} \quad (16)$$

Dimana

$R_{DS0}$  : [0.06][0.04]

C : Indeks probabilitas

Nilai c dihitung berdasarkan *short-term* kondisi lingkungan

$$C = \sum_{i=1}^N W_i C_{s,i} \quad (17)$$

Dimana

$W_i$  : Faktor bobot untuk kondisi lingkungan jangka pendek

$C_{s,i}$  : Indeks kegagalan stabilitas *dead ship* jangka pendek untuk kondisi lingkungan jangka pendek yang dipertimbangkan

$N$  : Jumlah kondisi lingkungan jangka pendek yang dipertimbangkan

Indeks kegagalan stabilitas *dead ship* jangka pendek, untuk kondisi lingkungan jangka pendek yang dipertimbangkan dalam probabilitas bahwa kapal akan melebihi sudut kemiringan yang ditentukan.

Probabilitas terbalik jangka pendek dihitung menggunakan persamaan persamaan 18.

$$C_i = 1 - \exp(-\lambda_{EA} T_{EXP}) \quad (18)$$

Dimana penilaian *capsizing*, dapat menggunakan persamaan 16.

$$\lambda_{EA} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \left( \exp\left(-\frac{\Delta\phi_{EA^+}^2}{m_0}\right) + \exp\left(-\frac{\Delta\phi_{EA^-}^2}{m_0}\right) \right) \quad (19)$$

Dimana

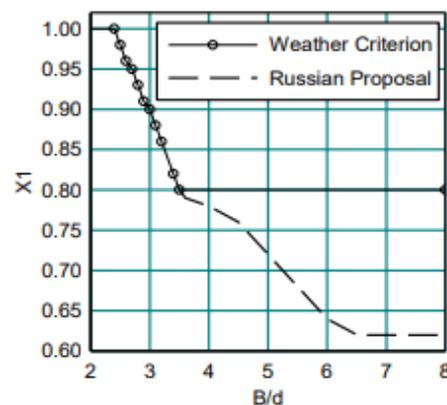
$T_{EXP}$  : Waktu paparan 1 jam yang direkomendasikan IMO

$m_0$  : Varian sudut roll

$m_2$  : varian kecepatan sudut gerak roll

## F. Redaman Kapal

Redaman adalah parameter penting dalam persamaan gerak roll karena mengontrol besarnya amplitudo gerak. Namun parameter ini paling sulit diperkirakan karena sifatnya yang kompleks seperti *wave damping*, *lift damping*, *friction damping*, *eddy making damping* dan *bilge keel*, penyelesaian *damping* telah dilakukan oleh Ikeda et al (1978) dengan memperkenalkan metode empiris untuk memperkirakan komponen yang memberikan kontribusi *damping*. Redaman yang didominasi oleh efek viskositas dan interaksi kapal dengan permukaan air, angin dan gelombang (Bassler and Reed 2009). *Friction damping* sangat dipengaruhi oleh tinggi sarat hal ini juga telah dipertimbangkan di kriteria cuaca mengenai pengaruh rasio lebar terhadap sarat kapal yakni faktor  $X_1$  didalam penjelasan rasio lebar terhadap sarat (Deakin 2008) yang kecil memberikan faktor  $X_1$  yang lebih besar hal ini dipengaruhi oleh tinggi sarat yang lebih besar sehingga redaman kecil akibat gesekan lambung dan air juga akan besar. Faktor rasio lebar terhadap sarat kapal dapat dilihat pada Gambar 8



Gambar 8. Faktor  $X_1$  dengan rasio lebar terhadap sarat

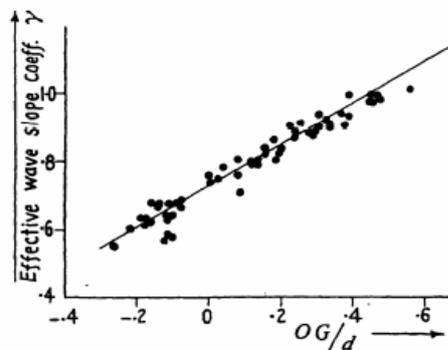
Sumber :(Deakin 2008)

Redaman akibat adanya *bilge keel* seperti yang ditemukan (Gu, Day, and Boulougouris 2015), untuk kapal FPSO pengaruh respon gerak roll kapal lebih kecil jika menggunakan *bilge keel* hal ini terjadi karena tekanan sekitar *bilge* lebih besar melawan gerak roll kapal dan (Pesman, Taylan 2013) menemukan bahwa *bilge keel* dapat menurunkan roll amplitude sekitar 30 % sampai 40%. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan stabilitas kapal pada saat beroperasi pada gelombang samping tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik lengan stabilitas tetapi juga oleh karakteristik redaman serta gaya dan momen eksitasi. Akan tetapi perubahan karakteristik respon gerak oleng khususnya yang berhubungan dengan resonansi sangat tergantung pada karakteristik lengan stabilitas.

Koefisien redaman dapat diestimasi dengan percobaan model melalui *roll decay test* bentuk pengujian model tanpa ada gangguan dari luar prosedur pengujian dapat dilihat pada sub bab H. hasil pengujian roll decay akan didapatkan koefisien linier dan koefisien non-linier . untuk koefisien linier termasuk *wave damping*, *friction damping* dan untuk non linier termasuk *bilge keel*.

### G. *Effective Wave Slope*

Efektif slope gelombang merupakan variable penting didalam kriteria stabilitas international lebih khusus kriteria cuaca. Koeifisen ini memiliki korelasi terhadap momen eksitasi yakni gelombang. Koeifisen ini sangat bergantung pada panjang gelombang dan lebar kapal ketika panjang gelombang lebih besar dari lebar kapal maka koeifisien efektif gelombang akan lebih besar (Paroka 2014). IMO menggunakan parameter jarak titik berat terhadap permukaan air tenang dan sarat kapal untuk mengestimasi koeifisien *effective wave slope*(IMO 2008) seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. *Effective wave slope*

Sumber :(IMO 2008)

Berdasarkan kriteria cuaca yang yang dikeluarkan IMO nilai r dapat ditulis dengan Persamaan 20.

$$r = 0.70 + 0.64 \frac{OG}{d} \quad (20)$$

Dimana

OG : Jarak titik berat dari permukaan air tenang

d : Sarat kapal

Penentuan *effective wave slope* juga dapat diselesaikan dengan metode yang digunakan oleh Wanatabe (Stefan 2019) yakni dengan mengintegrasikan tekanan gelombang terhadap badan kapal yang ada dibawah permukaan air pada kondisi air tenang atau dengan menggunakan *strip* teori dengan mengabaikan pengaruh difraksi gelombang karena persamaan untuk menentukan sudut oleng akibat gelombang dan angin diformulasikan pada kondisi resonansi maka estimasi koefisien efektif slope gelombang juga harus dilakukan pada frekuensi resonansi dimana frekuensi gelombang sama dengan frekuensi natural kapal

Koefisien *effective wave slope* dapat juga ditentukan pengujian model berdasarkan MSC.1-Circ.1200 yang dikeluarkan oleh IMO pada sub bab selanjut pengujian digelombang berdasar pengujian alternative yang terbagi atas dua metode diasumsikan sudut oleng akibat gelombang tetap dan secara langsung menghitung *roll excitation moment* dengan menggunakan dinamometer roll (IMO 2006).

## H. Pengujian Stabilitas berdasarkan Aturan Stabilitas International

### 1. Pengujian inclining test

Pengujian *inclining test* dimaksudkan untuk mendapatkan titik berat kapal. Pengujian ini diperlukan pemberat untuk memiringkan kapal dengan sudut kemiringan tidak lebih dari 10.0 derajat. Berat beban yang digunakan untuk membuat kemiringan tersebut ditentukan sedemikian rupa sehingga pada saat beban tersebut ditambahkan tidak akan mengubah karakteristik hidrostatis kapal.

Berat beban yang diperlukan untuk mengubah sarat sebesar 1.0 cm. Dengan kata lain bahwa penambahan beban untuk membuat kemiringan tersebut tidak akan mengubah sarat kapal lebih dari 1.0 cm. secara umum sudut kemiringan yang terjadi diukur dengan menggunakan bandul. Untuk menghindari gerakan bandul pada saat model mengalami kemiringan, pemberat bandul ditempatkan dalam fluida dengan kekentalan yang cukup tinggi seperti oli. Dengan perkembangan alat pengukuran digital kemiringan model dapat diukur dengan menggunakan *inclinometer*.

Pemberat untuk membuat kemiringan maksimum 10.0 derajat ditempatkan pada bidang tengah arah memanjang kapal. *Inclinometer* ditempatkan pada bidang tengah memanjang juga pada posisi yang lain untuk menyesuaikan sudut trim model sesuai dengan kondisi kapal sebenarnya. Pada kondisi tersebut *inclinometer* disetting menjadi sudut

0.0 derajat pada arah memanjang dan arah melintang kapal. Selanjutnya beban digeser dalam arah melintang ke sisi kiri dan kanan model sampai sudut kemiringan pada *inclinometer* menunjukkan sudut 10.00 derajat. untuk mendapatkan titik berat model pada kondisi pembebanan yang diberikan. langka pertama adalah menghitung tinggi metacentra (MG) model dengan menggunakan persamaan keseimbangan sebagai berikut :

$$w \times l = (W + w)MG \sin \theta \quad (19)$$

Dimana

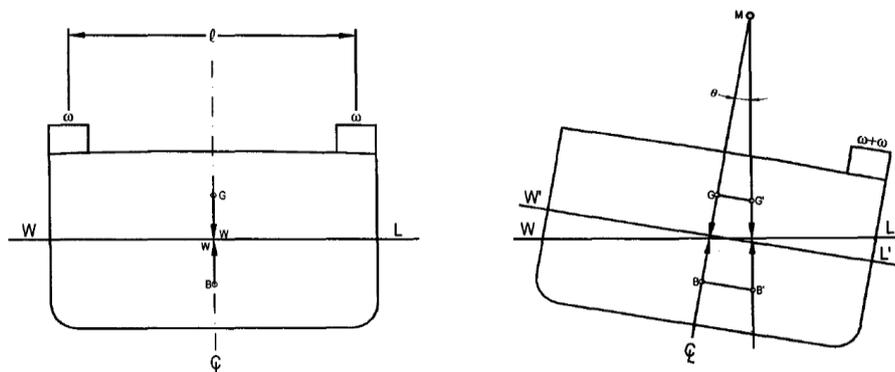
$w$  : Beban untuk membuat sudut kemiringan tertentu.

$l$  : Jarak pergeseran beban ke sisi kiri atau sisi kanan model.

$W$  : Berat model pada kondisi sarat maksimum

$\theta$  : Sudut kemiringan yang terjadi akibat pergeseran beban,

Perpindahan titik berat kaal akibat pergeseran beban dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Perpindahan titik pusat gravitasi GG'

Sumber :(Saputra, Yuniarsih, and Rianto 2017)

Jarak perpindahan titik pusat gravitasi GG' dihasilkan akibat adanya pergeseran beban uji akan diperoleh dengan Persamaan 21 dan selanjutnya nilai G<sub>Mo</sub> dapat diperoleh melalui Persamaan 22.

$$GG' = \frac{w \times l}{W} \quad (21)$$

$$MG_0 = \frac{GG''}{\sin \emptyset} \quad (22)$$

Dimana

GG' : Jarak perpindahan titik pusat gravitasi (m)

MG<sub>o</sub> : Tinggi metasentra (m)

W : Displacement kapal (ton)

l : Jarak perpindahan beban uji (m)

∅ : Sudut kemiringan kapal (derajat)

W : berat beban uji (ton)

Titik berat model akan didapatkan dengan menggunakan data hidrostatika kapal yang sebenarnya dengan faktor skala tertentu dengan menggunakan Persamaan 23.

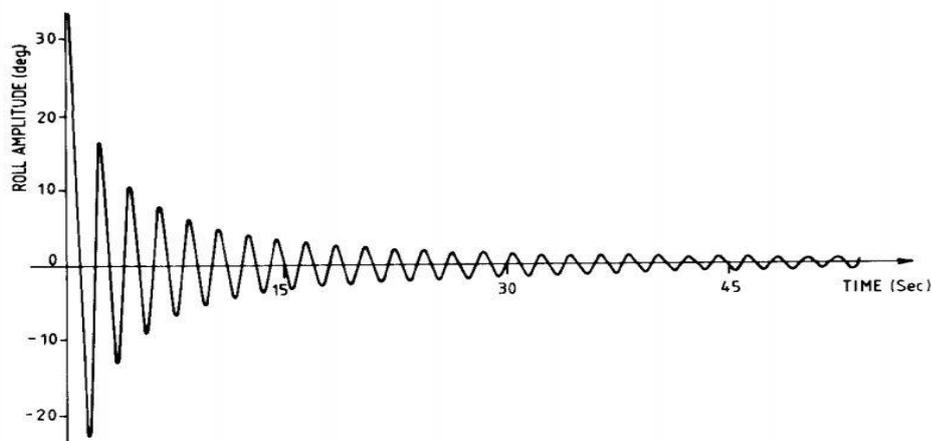
$$KG = MK - MG \quad (23)$$

Dimana MK adalah jarak antara titik keel pada dasar kapal dengan titik metacentra. MG diperoleh dari hasil *inclining test* dengan menggunakan Persamaan 2. Apabila titik berat yang diperoleh belum sama dengan titik berat kapal yang sebenarnya setelah dikalikan dengan faktor skala, beban atau pemberat yang ada diatas model ditata kembali dan percobaan

diulang sampai mendapatkan titik berat yang sama dengan titik berat kapal sebenarnya.

## 2. Pengujian *roll decay*

Pengujian *roll decay* dilakukan untuk mendapatkan periode oleng kapal serta koefisien redaman linier dan nonlinier. Pengujian ini dilakukan dengan kondisi model yang sama dengan kondisi kapal sebenarnya dengan faktor skala tertentu. Pada pengujian ini, model diberikan kemiringan awal tertentu dengan sudut tidak kurang dari 25.0 derajat setelah kemiringan mencapai 25.0 derajat atau lebih, model kemudian dilepaskan untuk bergerak bebas sampai amplitudo sudut oleng lebih kecil dari 0,5 derajat. Beberapa contoh hasil *roll decay test* ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Roll decay tes

Sumber : (Park et al. 2018)

Periode oleng kapal adalah waktu yang diperlukan untuk satu siklus gerak oleng. Pada data *roll decay test* mulai dari satu puncak ke puncak berikutnya atau dari satu lembah ke lembah berikutnya.

Periode oleng dan frekuensi natural kapal dapat ditentukan dengan Persamaan 24.

$$T_{\phi} = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (24)$$

Periode oleng dapat juga diketahui melalui pengujian model dengan data *time series* gerak rolling dari puncak ke puncak kemiringan, sehingga frekuensi natural dapat bisa didapatkan dengan persamaan 25.

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_{\phi}} \quad (25)$$

Koefisien redaman ditentukan berdasarkan penurunan amplitudo gerak oleng mulai awal sampai amplitudo oleng 0.5 derajat dengan persamaan kurva *Bertin's coefficient* dan roll periode dari fungsi roll amplitudo. Pada *roll decay*,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ , dengan menggunakan Persamaan 25 rata-rata sudut rolling dapat diselesaikan dengan Persamaan 26.

$$\phi_{mi} = \frac{\phi_i + \phi_{i-1}}{2} \quad (26)$$

Dan selisih sudut rolling untuk masing-masing puncak ditentukan dengan Persamaan 27.

$$\delta\phi_i = \phi_i - \phi_{i-1} \quad (27)$$

*Bertin's Coefficient*,  $N$  adalah fungsi dari  $\phi_{mi}$  di dapatkan dari rata-rata dan selisih sudut rolling dapat diselesaikan dengan persamaan 28.

$$N_i = N(\phi_{mi}) = \frac{\delta\phi_i}{(\phi_{mi})^2} = \frac{a}{\phi_{1r}} + b \quad (28)$$

Dimana

$\phi_{1r}$  : Sudut rolling percobaan gelombang

$a$  : Koefisien linier

$b$  : Koefisien nonlinier

Nilai  $a$  dan  $b$  dari percobaan roll decay test digunakan untuk penentuan nilai *Berthin's* koefisien (koefisien redaman), dengan menggunakan Persamaan 26 dan 30 yaitu rata-rata dan selisih sudut rolling maka dapat dibuat kurva fitting untuk masing-masing variable tersebut dan dapat dikeluarkan nilai *tredline* polinomial orde 2, dari *tredline* tersebut di dapatkan nilai koefisien  $a$  sama dengan nilai koefisien  $X_1$  dan koefisien  $b$  sama dengan nilai koefisien  $X_2$ .

### 3. Pengujian *drift test*

#### a) pengujian langsung

Pengujian dalam gelombang reguler dapat digunakan untuk secara langsung mendapatkan "sudut putar-balik gelombang reguler" . yakni respons roll puncak kapal dalam gelombang reguler untuk menentukan  $\phi_{ir}$ , amplitudo gerakan gulungan stasioner harus diukur untuk jumlah frekuensi yang cukup di sekitar frekuensi natural roll  $\omega_0 = 2\pi/T_0$ . Set minimum poin tes berikut direkomendasikan  $\omega/\omega_0 = 0,8, 0,9, 0,95, 0,975, 1,0, 1,05, 1,2$ , dengan  $\omega$  menjadi frekuensi gelombang reguler dalam rad /

s. Pengukuran tambahan dalam kedekatan puncak respons mungkin diperlukan untuk memungkinkan penentuan  $\phi_{ir}$  yang akurat terutama dalam kasus pengaruh kuat tuas non-linearitas .

Selama pengujian, model kapal harus diposisikan normal dengan arah gelombang sudut arah 90 derajat. Sudut *heading* model diperbaiki, dengan pemandu yang terpasang pada kereta penarik menjaga gerakan putar-ayun bebas dari pengekangan. Kereta harus melacak gerakan *drift* model yang disebabkan oleh aksi gelombang. GM dan  $T\phi$  harus disesuaikan dengan mempertimbangkan dampak panduan atau dikontrol oleh tali pemandu yang dipasang pada model pada garis tengah pada haluan dan buritan, secara simetris dan pada ketinggian vertikal antara garis air dan pusat gravitasi. Garis-garis ini dapat digunakan untuk memperbaiki model dalam gerakan *yaw* dengan memungkinkan *drift* dan *sway*, asalkan *heading* selama pengujian tidak menyimpang dari *beam sea* lebih dari 15 derajat.

#### b) Pengujian Alternatif

Percobaan pada gelombang beraturan adalah salah satu standar prosedur untuk menentukan sudut *roll-back* gelombang beraturan yang dinyatakan dalam simbol  $\phi_{1r}$ . Beberapa kasus penentuan secara langsung tidak layak, seperti pada contoh kasus model yang panjang memiliki *roll period* yang besar . Dalam kasus seperti itu, prosedur alternatif yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan 3 langkah prosedur yakni :

1. Menentukan roll damping *Bertin's Coefficient* ( $N$ ) diperoleh dari percobaan *roll decay* pada air tenang.
2. Menentukan *effective wave slope coefficient* ( $r$ ) diperoleh dari percobaan rolling pada gelombang
3. Menentukan regular waves roll-back angle.

Menentukan roll damping *Berthing Coefficient* ( $N$ ) sesuai dengan subbab sebelumnya yaitu pengujian *roll decay* dengan menggunakan persamaan 27-28. Dan untuk menentukan *effective wave slope coefficient*,  $r$  di bawah ini ada dua metode yang dapat digunakan :

Saat amplitudo rolling stabil di dapatkan, periode natural rolling untuk amplitudo bisa diperhitungkan dengan hasil dari percobaan *roll decay*. Jika periode tersebut secara signifikan berbeda dari periode gelombang, perhitungan sudut rolling dapat diulang tetapi dengan menggunakan perhitungan periode yang baru yang di input ke dalam *wave maker*. *effective wave slope coefficient* ( $r$ ) ditentukan sebagai berikut :

$$r = \frac{g \cdot T_{\text{wave},r}^2 \cdot \phi_r^2 \cdot N(\phi_r)}{180\pi^2 \cdot H_r} \quad (29)$$

Dimana

$T_{\text{wave},r}^2$  : Periode gelombang (detik)

$H_r$  : Tinggi gelombang (m)

$g$  : Percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

Persamaan di atas *wave steepness* diasumsikan berhubungan dengan *wave height* dan *wave period*.

$$s = 2\pi \cdot H / (g \cdot T_{\text{wave}}^2) \quad (30)$$

Secara alternatif memungkinkan secara langsung menghitung momen eksitasi dengan menggunakan dinamometer. Model harus terhubung dengan *carriage* yang bisa melakukan gerakan *drift*, *sway*, *heave* dan *pitch* tetapi untuk *surge*, *roll* dan *yaw* harus tetap atau *fix*. Dinamometer dapat menghitung momen yang terhubung dengan *center of gravity* antara model dan kereta. Dinamometer harus di desain pada batas interaksi antara gaya yang terdeteksi termasuk 2% dari resultan gaya. Koefisien *r* kemudian ditentukan dengan rumus ;

Pada tahap ini bertujuan untuk memprediksi puncak dari roll untuk kecuraman dapat dilihat pada Tabel 7.

$$r = \frac{M_{\text{exc}}}{\Delta \cdot GM \cdot \pi \cdot s} \quad (31)$$

Tahapan ketiga prediksi oleng di gelombang beraturan dihitung berdasarkan kelandaian gelombang dan menggunakan nilai *N* pada tahapan sebelumnya, dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$\phi_{1r} = \sqrt{\frac{90\pi r s}{N(\phi_{1r})}} \quad (32)$$

Rumus ini termasuk keduanya sisi kanan dan kiri, perhitungan itu seharusnya dilakukan dengan prosedur dibawah ini :

1. Pada dasarnya diasumsikan  $20^\circ$
2. Sisi kanan rumus tersebut dihitung
3. Penentuan  $\phi_{1r}$  di substitusikan ke dalam sisi kanan rumus

Ketika nilai bertemu dengan nilai yang pasti, seharusnya diperlihatkan sebagai nilai akhir.

## I. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu ini menjadi salah satu acuan penulis melakukan penelitian sehingga penulisan dapat memperkaya teori yang digunakan dalam mengkaji penelitian yang dilakukan. Dari penelitian terdahulu, penulis tidak menemukan penelitian dengan judul yang sama seperti judul penulis. Namun penulis mengangkat beberapa penelitian sebagai referensi dalam memperkaya bahan kajian pada penelitian terdahulu berupa beberapa jurnal terkait dengan penelitian yang dilakukan penulis pada penelitian ini akan dievaluasi performa stabilitas kapal berdasarkan *second generation intact stability* :

Identifikasi karakteristik geometri kapal kayu yang dilakukan oleh (Saenong 2013) pada umumnya kapal pinisi memiliki bentuk lambung *round bottom* dengan haluan yang lebih lebih runcing kemudian (Zarma, Zakki, and Rindo 2015) bahwa karakteristik geometri kapal sangat dipengaruhi oleh kearifan lokal dan karakteristik lingkungan.

Karakteristik geometri yang berpengaruh terhadap stabilitas yakni rasio perbandingan ukuran utama seperti lebar terhadap sarat kapal dan lambung timbul terhadap lebar serta keofisien bentuk dan titik berat (Asri, Pallu, and Thaha 2014) karakteristik geometri kapal kayu traditional

seperti koefisien bentuk dan rasio B/T relative lebih kecil, serta *rise of floor* yang lebih besar seperti diteliti oleh (Ardiyanti 2007) sudut *rise of floor* kapal kayu antara sudut 25 - 30 derajat, sehingga perubahan bentuk lambung dibawah garis air relative ekstrim kondisi ini akan mempengaruhi lengan stabilitas.

Stabilitas kapal juga dipengaruhi oleh gelombang yang berkorelasi terhadap efektif slope gelombang dan merupakan variable untuk mengevaluasi stabilitas kapal berdasarkan kriteria cuaca untuk menentukan momen roll eksitasi akibat gelombang (Paroka, A.Haris dan Sabaruddin 2020). Respon gerak roll juga sangat dipengaruhi oleh redaman kapal yang mengontrol besar respon gerak. Fenomena tersebut karena pengaruh karakteristik geometri dan penambahan alat peredam seperti *fin* dan *bilge keel* yang didominasi oleh efek viskositas (Bassler and Reed 2009).

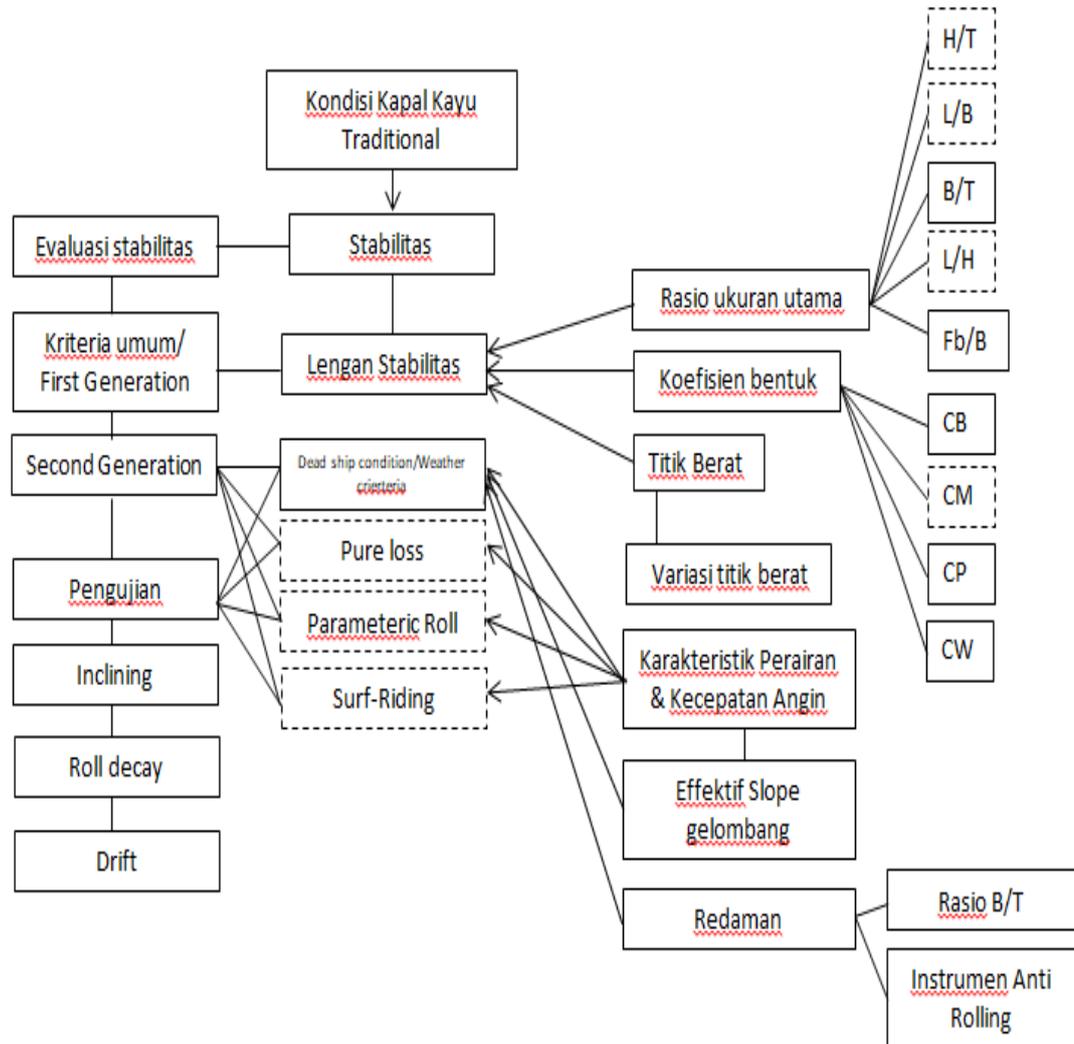
Pengembangan kriteria stabilitas di IMO pada Januari 2016, sejauh ini masih ada masalah yang tersisa seperti tingkat keamanan untuk kriteria kerentanan dan batas operasional dan pendoman, Umeda memaparkan secara keseluruhan pengembangan kriteria generasi kedua dan kendala yang ada, sedangkan penulis hanya pada pengaplikasian konsep tersebut. (Paroka,dkk 2019) Kriteria cuaca dan pengaruhnya terhadap performa kapal feri ro-ro Indonesia, Sudut lengan stabilitas maksimum memiliki efek yang lebih signifikan pada respon gerak roll ketikan amplitudo roll besar dalam objek penelitian ialah kapal feri ro-ro Indonesia

sedangkan penelitian penulis ialah kapal kayu tradisional (Paroka,dkk 2019) *Operational limitation of Indonesia traditional wooden boat in the framework of the second generation intact stability*, Hasilnya menunjukkan bahwa kapal kayu tradisional Indonesia memenuhi kriteria ketika sudut *down flooding* turun lebih besar dari 25,0 derajat, Batas operasi belum dikaitkan terhadap transformasi bentuk lambung kapal kayu pinisi.

## **J. Kerangka Konseptual**

Penelitian ini terfokus pada aspek stabilitas kapal. Kerangka pilir penelitian ini dimulai dari analisis karakteristik geometri kapal kayu berdasarkan rasio perbandingan ukuran utama dan koefisien bentuk kapal yang berpengaruh terhadap stabilitas kapal sesuai dengan hasil pengukuran serta variable-variabel hidrodinamika yang berkaitan terhadap parameter-parameter evaluasi kriteria stabilitas dan selanjutnya dapat menemukan solusi terhadap keselamatan kapal kayu.

Alur pikir penelitian ini dikelompok atas beberapa evaluasi stabilitas yaitu evaluasi berdasar kriteria umum atau karakteristik lengan stabilitas dan evaluasi berdasarkan kriteria cuaca yang hasilnya dapat menjadi pertimbangan didalam regulasi.



Gambar 12. Kerangka Konseptual

Keterangan :

- : Diteliti
- : Tidak diteliti
- : Behubungan
- : Berpengaruh