

**ANALISIS STABILITAS GERAK OLENG KAPAL FERRY RO-RO
BERDASARKAN PENGUJIAN MODEL
(STUDI KASUS KMP LAKAAN)**

SKRIPSI

*Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Jurusan Perkapalan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin*



Oleh:

SAHUDIN

D 311 14 004

**JURUSAN PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN**

MAKASSAR

2019





**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

Kampus Teknik Unhas Gowa, Jalan Poros Malino Km.06 Gedung Perkapalan A
Telp/Fax : (0411)585637, kapal@ft.unhas.ac.id Romang Lompoa 92171

**LEMBAR PENGESAHAN
SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat guna meraih gelar Sarjana Teknik
pada Fakultas Teknik, Departemen Teknik Perkapalan
Universitas Hasanuddin
Kampus Gowa

Nama : Sahudin
Stambuk : D311 14 004
Program Studi : Teknik Perkapalan
Judul : Analisis Stabilitas Gerak Oleng Kapal Ferry Ro-Ro
Berdasarkan Pengujian Model (Studi Kasus KMP. Lakaan)
Gowa, Desember 2019

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Hj. Rosmani, MT.
Nip. 19600620 198802 2 001

Daeng Paroka, ST., MT., P.hD
Nip. 19720118 199802 1 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Perkapalan

Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT.
Nip. 19730206 200012 1 002



ABSTRAK

SAHUDIN, *Analisis Stabilitas Gerak Oleng Kapal Ferry Ro-Ro Berdasarkan Pengujian Model. (Rosmani dan Daeng Paroka).*

Stabilitas kapal adalah kemampuan kapal untuk kembali ke kedudukan tegaknya semula sewaktu kapal mengalami kemiringan akibat faktor luar maupun faktor dari dalam kapal. Stabilitas dinamis menitik beratkan perhatian pada gerak kapal akibat gaya dan momen pengganggu serta dapat diselesaikan dengan persamaan gerak oleng kapal dengan arah datang gelombang dari samping yang dapat didekati dengan melakukan pengujian model. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh *freeboard* terhadap respon gerak oleng kapal dan mengetahui pengaruh penggunaan *bilge keel* dan tanpa *bilge keel* terhadap respon gerak oleng kapal. Pengaruh dari *freeboard* dan *bilge keel* dilakukan dengan metode pengujian model dan dianalisis menggunakan formula yang diberikan oleh *International Maritime Organization*. Adapun hasil yang diperoleh bahwa pengaruh *freeboard* yang semakin tinggi akan menghasilkan respon gerak oleng kapal yang signifikan serta pengaruh dari *bilge keel* dilihat dari faktor k dimana respon gerak oleng kapal akan semakin besar dengan bertambahnya nilai faktor k. Nilai k yang dihasilkan pada pengujian dengan sudut 1,5792 derajat adalah 0,4854, pada sudut 2,8399 derajat diperoleh nilai k sebesar 0,5729, pada sudut 3,7261 derajat diperoleh nilai k sebesar 0,5829, pada sudut 4,4233 derajat diperoleh nilai k sebesar 0,5809. Nilai dari faktor k dievaluasi dengan kriteria cuaca yang diizinkan oleh *International Maritime Organization* sehingga diperoleh bahwa batas maksimum dari faktor k berdasarkan pengujian lebih kecil dibandingkan dengan yang diperoleh berdasarkan kriteria *International Maritime Organization*.

Kata Kunci : Stabilitas, Respon Gerak Oleng, *Freeboard*, *Bilge Keel*, faktor k.



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat merampungkan skripsi dengan judul: Analisis Stabilitas Gerak Olong Kapal Ferry Ro-Ro Berdasarkan Pengujian Model. Ini untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan studi serta dalam rangka memperoleh gelar Sarjana Pendidikan Strata Satu pada Program Studi Teknik Perkapalan Jurusan Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penghargaan dan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Ayahanda tercinta Jeni dan Ibunda yang kusayangi Nuri yang telah mencurahkan segenap cinta dan kasih sayang, perhatian moril maupun materil serta kepada kakanda Darwin dan Darwan terima kasih selalu mengingatkan pada jalan kebenaran. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan Rahmat, Kesehatan, Karunia dan Keberkahan di dunia dan di akhirat atas budi baik yang telah diberikan kepada penulis.

Penghargaan dan terima kasih penulis berikan kepada Ibu Ir. Hj. Rosmani, MT selaku Pembimbing I dan Bapak Daeng Paroka, ST., MT.,P.hD selaku Pembimbing II yang telah membantu penulisan skripsi ini. Serta ucapan terima kasih kepada :

1. Seluruh dosen di Departemen Teknik Perkapalan terima kasih telah mendidik penulis selama proses perkuliahan yang telah banyak memberikan ilmu-ilmu perkapalan.
2. Sahabat seperjuangan menyelesaikan tulisan ini La Bureng (Muhammad Ilham / D311 14 317)
3. Sahabat seperjuangan perkapalan 2014
4. Seluruh Asisten Laboratorium Fisika Dasar 2014 atas dukungannya dan b'anya.

omelap Grup sebagai tempat ternyaman dari awal masuk perkuliahan
ngga terselesaikannya tulisan ini



6. Cilallang Crew, saya bangga atas hiburan bermain game PUBG dan Mobile Legend bersama.
7. Spartan Komando saya bangga menjadi bagian dari kalian
8. MEC Kosong terima kasih telah memberikan peluang sebagai tempat membully kalian semua para jomblo terkosong dalam grup.
9. Seluruh mahasiswa Teknik Perkapalan saya bangga menjadi bagian dari kalian.
10. LEC 14 Grup terima kasih telah bersama-sama sejak SMA hingga sekarang kalian menjadi yang luar biasa.

Akhir kata penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Karena itu, penulis memohon saran dan kritik yang sifatnya membangun demi kesempurnaannya dan semoga bermanfaat bagi kita semua. Aamiin.

Gowa, Desember 2019

Penulis



DAFTAR ISI

SAMPUL	
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR NOTASI	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Gerak Kapal.....	6
2.2 Stabilitas Kapal	7
2.3 Pengaruh Freeboard.....	8
2.4 Pengaruh Bilge Keel.....	10
2.5 Teori Gelombang Reguler	11
2.6 Percobaan Pada Gelombang Beratruran.....	13
2.7 Metode Prediksi Rolling Pada Kriteria Cuaca	17
2.8 Perbandingan Model	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	21
3.2 Jenis Data	21
3.3 Teknik Pengambilan Data	22
3.4 Pengujian Model	22



3.5	Pelaksanaan Ujian	33
3.6	Metode Analisa Data.....	33
3.7	Kerangka Pemikiran.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		36
4.1	Data Kapal Ferry KMP Lakaan.....	36
4.2	Inclining Test	37
4.3	Roll Decay Test.....	38
4.4	Menghitung Nilai r	43
4.5	Menghitung Nilai x_l	46
4.6	Menghitung Nilai k	47
4.7	Perbedaan Sudut Olong Akibat Freeboard.....	49
4.8	Hasil Analisa Data.....	51
BAB V PENUTUP.....		53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA		54



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Enam gerakan kapal di laut lepas	6
Gambar 2. Titik G, B dan M pada saat kapal oleng	7
Gambar 3. <i>Freeboard Deck</i> pada kapal	8
Gambar 4. <i>Freeboard Deck</i> tipe kapal Ferry Ro-Ro	9
Gambar 5. Linearisasi lengan stabilitas kapal dengan metode <i>piece-wise linear</i>	10
Gambar 6. Definisi dari gelombang regular	12
Gambar 7. <i>Towing tank</i> Laboratorium Hidrodinamika	22
Gambar 8. <i>Frame</i> direkatkan pada pola <i>waterline</i>	25
Gambar 9. Pemasangan kulit	25
Gambar 10. Penimbangan dan test <i>draft</i> model	26
Gambar 11. Kerangka Pemikiran	35
Gambar 12. Rencana Garis KMP. Lakaan dan detail <i>bilge keel</i>	37
Gambar 13. Kurva <i>Roll Decay Test</i> KG aktual tanpa <i>bilge keel</i>	39
Gambar 14. Kurva <i>Roll Decay Test Limiting</i> KG tanpa <i>bilge keel</i>	40
Gambar 15. Kurva <i>Roll Decay Test</i> KG aktual dengan <i>bilge keel</i>	41
Gambar 16. Kurva <i>Roll Decay Test Limiting</i> KG dengan <i>bilge keel</i>	42
Gambar 17. Kurva Hasil <i>Roll Decay Test</i> , Asis, 2017	50
Gambar 18. Kurva faktor x_1 berdasarkan pengujian dan Kriteria IMO	51
Gambar 19. Kurva faktor k Hasil Pengujian dan Kriteria IMO	52



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Tabel Wave Steepness Factor	16
Tabel 2. Tabel nilai X_1	18
Tabel 3. Tabel nilai X_2	18
Tabel 4. Tabel nilai k	18
Tabel 5. Tabel nilai s	18
Tabel 6. Ukuran Seri Model Kapal	23
Tabel 7. Tabel kebutuhan Bahan model.....	24
Tabel 8. Tabel kebutuhan Peralatan model	24
Tabel 9. Matriks waktu pengujian.....	27
Tabel 10. Matriks Kebutuhan Pengujian.....	28
Tabel 11. Jadwal Pengujian Model	33
Tabel 12. Ukuran Utama KMP. Lakaan.....	36
Tabel 13. Data Muatan, Daya Mesin dan Kecepatan Kapal	36
Tabel 15. Hasil Inclining Test Model	37
Tabel 16. Hasil Perhitungan Nilai N KG aktual tanpa <i>bilge keel</i>	39
Tabel 17. Hasil Perhitungan Nilai N Limiting KG tanpa <i>bilge keel</i>	40
Tabel 18. Hasil Perhitungan Nilai N KG aktual dengan <i>bilge keel</i>	41
Tabel 19. Hasil Perhitungan Nilai N Limiting KG dengan <i>bilge keel</i>	43
Tabel 20. Hasil Perhitungan Nilai r_1	44
Tabel 21. Hasil Perhitungan Nilai r_2	45
Tabel 22. Hasil Perhitungan Nilai r_3	45
Tabel 23. Hasil Perhitungan Nilai X_1 untuk nilai r_1	46
Tabel 24. Hasil Perhitungan Nilai X_1 untuk nilai r_2	47
Tabel 25. Hasil Perhitungan Nilai X_1 untuk nilai r_3	47
Tabel 26. Hasil nilai k untuk x_1 dan r_1	48
Hasil nilai k untuk x_1 dan r_2	49
Hasil nilai k untuk x_1 dan r_3	49



DAFTAR NOTASI

G	: Titik berat kapal
B	: Titik tekan apung
M	: Titik Metasentra
Δ	: Displacement Kapal
A	: Amplitudo gelombang
H	: Tinggi gelombang
λ	: Panjang gelombang
T_{wave}	: Periode gelombang
T_{ϕ}	: Periode Oleng
k	: Koefisien dari fungsi luas <i>bilge keel keel</i>
X_1	: Koefisien dari fungsi lebar/sarat
X_2	: Koefisien dari fungsi koefisien blok
ω_o	: Frekuensi natural kemiringan
ω	: Frekuensi natural gelombang
s	: Wave Steepness
r	: Effective wave slope coefficient
N	: Koefisien Momen Peredam (Bertin's Coefficient)
ϕ_i	: Sudut kemiringan
$\delta\phi_i$: Selisih sudut kemiringan
	: Rata-rata sudut kemiringan
	: Regular waves roll-back angle
	: Percepatan gravitasi



ρ_m : Massa jenis air tawar

ρ_s : Massa jenis air laut



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Inclining Test

Lampiran 2 Roll Decay Test Air Tenang

Lampiran 3 Perhitungan Nilai N

Lampiran 4 Roll Decay Test Pada Gelombang

Lampiran 5 Kurva Roll Decay Test Gelombang

Lampiran 6 Menentukan Nilai r

Lampiran 7 Menentukan Nilai X_1

Lampiran 8 Menentukan Nilai k



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keberadaan sebuah transportasi sangat berpengaruh terhadap perkembangan kehidupan bermasyarakat, berbangsa dan bernegara sebagai alat penggerak, pemindah yang dapat menunjang kemajuan perkembangan di seluruh daerah. Untuk mewujudkan hal tersebut, perlu adanya perlakuan yang baik pada semua sistem transportasi salah satunya transportasi laut. Perkembangan transportasi laut dewasa ini tidak terlepas dari kemajuan teknologi yang telah beredar di berbagai wilayah Indonesia hingga dapat memproduksi kapal dalam negeri seperti kapal ferry ro-ro.

Kapal ferry ro-ro adalah salah satu kapal penyeberangan yang berlayar menghubungkan pulau-pulau dalam jarak yang dekat atau sering disebut sebagai jembatan penyeberangan. Hal ini disebutkan dalam Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM. 26 Tahun 2012 tentang Penyelenggaraan Angkutan Penyeberangan bahwa angkutan penyeberangan adalah angkutan yang berfungsi sebagai jembatan penyeberangan yang menghubungkan jaringan jalan dan/atau jaringan jalur kereta api yang dipisahkan oleh perairan untuk mengangkut penumpang dan kendaraan beserta muatannya.

Kebutuhan penggunaan kapal ferry ro-ro dalam negeri dari tahun ke tahun semakin dibutuhkan. Dengan peningkatan tersebut akan memberikan dampak positif dalam sistem penyaluran barang-barang maupun bagi masyarakat yang hendak menyeberang untuk melakukan aktivitas rutin di berbagai wilayah dalam negeri. Dalam pelayaran tidak selalu berjalan dengan baik, banyak faktor yang menjadi pertimbangan dalam berlayar salah satunya dari faktor cuaca buruk yang biasa saja terjadi secara tiba-tiba yang pada akhirnya menyebabkan terjadinya kecelakaan apabila dalam rasionalnya kapal tidak mampu bertahan pada kondisi cuaca buruk yang disertai badai serta gelombang tinggi.



Berdasarkan hasil investigasi kecelakaan pelayaran KNKT tahun 2010-2016 jumlah kecelakaan yakni sebesar 54 kecelakaan dengan persentase 24,07% tenggelam, 35,19 % terbakar, 31,48 % tubrukan, 5,56 % kandas dan 3,7 % kecelakaan lain-lain. Dari beberapa kejadian kecelakaan tersebut, yang menjadi kecelakaan yang beresiko tinggi adalah ketenggelaman kapal. Ketenggelaman kapal bisa terjadi akibat dari faktor internal maupun eksternal. Faktor internal seperti pengaruh dari titik MG positif bisa saja dibuktikan dengan dokumen stabilitas awal sedangkan faktor eksternal seperti cuaca tidak selamanya bisa diprediksi sebab cuaca bisa saja datang kapan saja. Adapun dituliskan dalam IMO (2006) bahwa semua tipe kapal seharusnya memenuhi kriteria B/d lebih kecil dari 3,5, OG/d di antara -0,3 dan 0,5 , serta T lebih kecil dari 20 detik saat berada pada cuaca buruk. Akan tetapi banyak diantaranya kapal-kapal di perairan Indonesia yang tidak memenuhi kriteria tersebut salah satunya KMP Lakaan. Respon gerak oleng kapal pada cuaca buruk sangat dipengaruhi oleh penggunaan *bilge keel* seperti yang dituliskan oleh Bassler and Reed (2009) bahwa *bilge keel* yang besar akan meningkatkan komponen gaya redaman dan mengurangi interaksi redaman pada lambung.

Paroka D. dkk (2007) juga menuliskan bahwa salah satu faktor lain yang berpengaruh secara signifikan terhadap stabilitas kapal adalah lambung timbul sebab lambung timbul minimum dalam prakteknya diestimasi terpisah dari stabilitas kapal. Hal ini dapat berakibat terjadinya ketidaksesuaian antara lambung timbul minimum dan tinggi metacentra minimum yang mana akan berpengaruh secara signifikan terhadap performa dan keselamatan kapal dalam pelayaran.

Oleh karena itu, suatu upaya untuk mereduksi kecelakaan telah dilakukan dalam penelitian khususnya pada kapal ferry ro-ro KMP Lakaan mengenai prediksi stabilitas gerak oleng kapal ferry ro-ro pada karakteristik perairan di Indonesia (Asis, 2017).

Dalam penelitian Asis (2017) telah melakukan simulasi numerik untuk mengetahui bagaimana performa kapal ferry ro-ro tersebut



menghadapi cuaca pada saat operasionalnya yang dihitung hingga *car deck*. Dilihat dari data sekunder yang ada di dalamnya bahwa terdapat ruang kedap hingga *winch deck*, hal ini memungkinkan memberikan pengaruh besarnya respon gerak oleng kapal serta dengan adanya penggunaan *bilge keel* pada lambung kapal. Melihat kondisi tersebut penulis hendak melakukan penelitian dengan pertimbangan tinggi lambung kapal ferry ro-ro mencapai *winch deck* dengan penggunaan *bilge keel* dan tanpa *bilge keel*. Untuk melihat performa yang sebenarnya dapat di dekati dengan melakukan percobaan model di *Towing Tank*, sehingga penelitian ini difokuskan pada **“Analisis Stabilitas Gerak Oleng Kapal Ferry Ro-Ro Berdasarkan Pengujian Model” (Studi Kasus KMP. Lakaan)**.

1.2 Rumusan Masalah

Dilihat dari latar belakang yang dijelaskan, maka permasalahan yang akan diteliti adalah :

1. Bagaimana pengaruh *freeboard* terhadap respon gerak oleng kapal ?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan *bilge keel* terhadap redaman gerak oleng kapal ?

1.3 Tujuan Masalah

Dilihat dari rumusan masalah yang ada, tujuan yang ingin dicapai adalah :

1. Mengetahui pengaruh *freeboard* terhadap respon gerak oleng kapal.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan *bilge keel* terhadap redaman gerak oleng kapal.

1.4 Batasan Masalah

Dilihat dari permasalahan yang ada maka perlu ada pembatasan masalah agar dalam penelitian bisa mempermudah analisis dan menjadi teratur :

Penelitian ini hanya berlaku pada kapal ferry ro-ro KMP Lakaan



2. Stabilitas gerak oleng hanya dihitung pada muatan penuh kondisi titik KG aktual dan Limiting KG
3. Gerak yang diperhitungkan dalam percobaan hanya menggunakan satu derajat kebebasan yaitu gerak *rolling* kapal
4. Perhitungan freeboard sampai *winch deck*
5. Percobaan hanya dilakukan pada kondisi air tenang dan gelombang beraturan
6. Luas *bilge keel* yang digunakan adalah $9,34 \text{ m}^2$

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan tidak lain mempertimbangkan manfaat yang ingin dicapai yakni :

1. Memberikan data hasil percobaan bagi pihak tertentu yang terkait dalam hal memberikan izin berlayar bagi kapal ferry ro-ro.
2. Dijadikan sebagai media bahan ajar terkait dengan materi stabilitas gerak oleng kapal.
3. Dijadikan referensi perencanaan kapal ferry ro-ro untuk trayek pelayaran Kupang -Ndao

1.6 Sistematika Penulisan

Berikut adalah sistematika penulisan dalam penelitian ini yakni :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang, rumusan masalah, tujuan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi tentang teori-teori dasar yang digunakan sebagai acuan untuk menganalisa masalah sehingga diperoleh penyelesaian dari masalah yang ada.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



Pada bab ini berisi tentang metode yang digunakan untuk mengumpulkan data serta kerangka analisa data untuk menyelesaikan masalah secara bertahan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi tentang pembahasan mengenai masalah yang ada yakni mengetahui respon gerak kapal dalam gelombang dan pengaruhnya terhadap *freeboard* dan pengguna *bilge keel*

BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran-saran yang berkaitan dengan penulisan.

DAFTAR PUSTAKA

Di bagian daftar pustaka berisi tentang literatur-literatur yang menjadi sumber acuan penyelesaian penelitian.

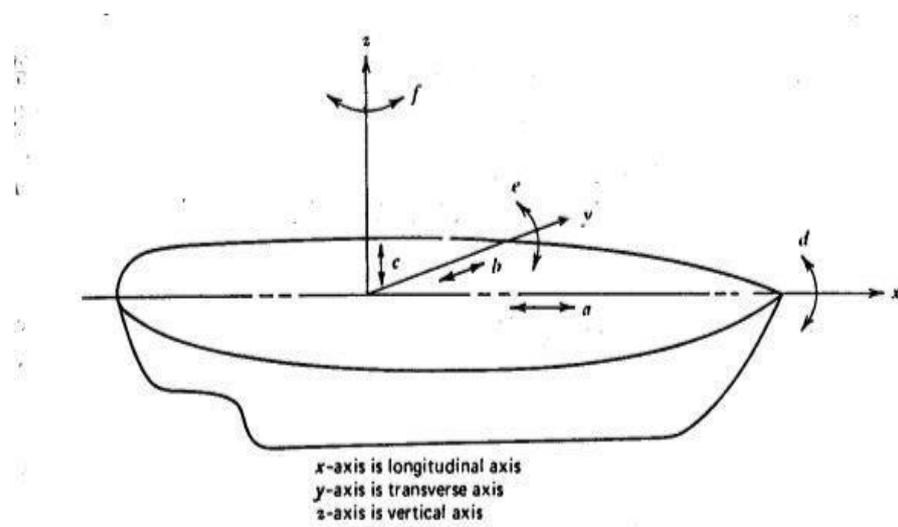
LAMPIRAN



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gerak Kapal

Mujahid A. S. (2011) menuliskan sebuah kapal yang bergerak di laut bebas hampir selalu mengalami gerakan osilasi. Gerakan osilasi yang dialami kapal diperlihatkan pada Gambar 1 yang mana memperlihatkan 6 jenis gerakan yang mana terdiri dari 3 gerakan dilatasi dan 3 gerakan rotasi terhadap sumbu x , y , z .



Gambar 1. Enam gerakan kapal di laut lepas

Mengacu pada gambar 1 terlihat; a adalah gerakan *surging* yaitu gerak osilasi maju mundurnya kapal, b adalah gerakan *swaying* yaitu gerak osilasi kesamping kiri dan kanan kapal, c adalah gerakan *heaving* yaitu gerak osilasi naik turun kapal, d adalah gerakan *rolling* yaitu gerak osilasi angular badan kapal terhadap sumbu *longitudinal* kapal dari sisi kiri ke kanan, e adalah gerakan *pitching* yaitu gerak osilasi angular pada sumbu melintang kapal (gerak angguk), f adalah gerakan *yawing* yaitu gerak osilasi angular badan kapal terhadap sumbu tegaknya. Pada gambar 1 terlihat bahwa



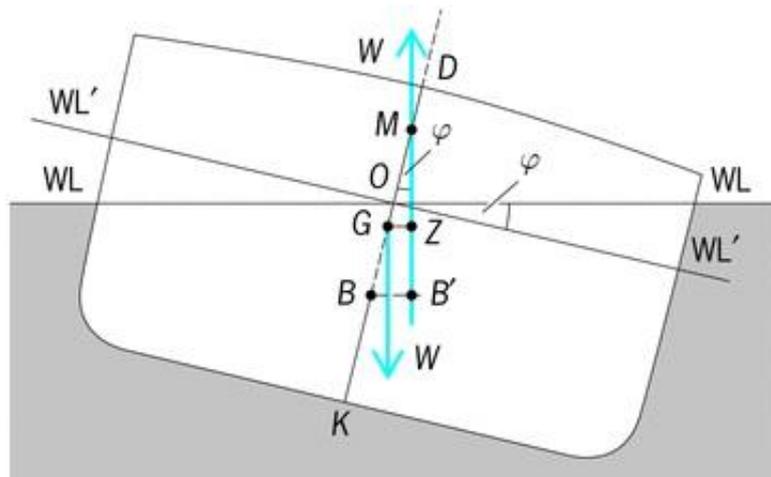
gerakan *rolling* merupakan gerak osilasi angular badan kapal terhadap sumbu longitudinal.

2.2 Stabilitas Kapal

Stabilitas kapal adalah kemampuan kapal untuk kembali pada posisi tegak atau kesetimbangan semula setelah mengalami kemiringan akibat gaya-gaya dari luar seperti ombak, angin, maupun gaya-gaya dari dalam kapal itu sendiri.

Faktor utama yang memegang peranan penting pada stabilitas suatu kapal yaitu :

1. Titik G (*Gravity*) atau titik berat kapal dari berat konstruksi itu sendiri.
2. Titik B (*Bouyancy*) atau titik tekan ke atas dari volume air yang dipindahkan oleh bagian kapal yang ada di dalam air.
3. Titik M (*Metacentra*) atau titik semua dari perpotongan vektor gaya tekan keatas ($\gamma.V$) ketika kapal dalam keadaan tegak (sudut inklinasi dalam limit mendekati nol) dengan vektor gaya tekan keatas ketika kapal mengalami kemiringan).



Gambar 2. Titik G, B dan M pada saat kapal oleng



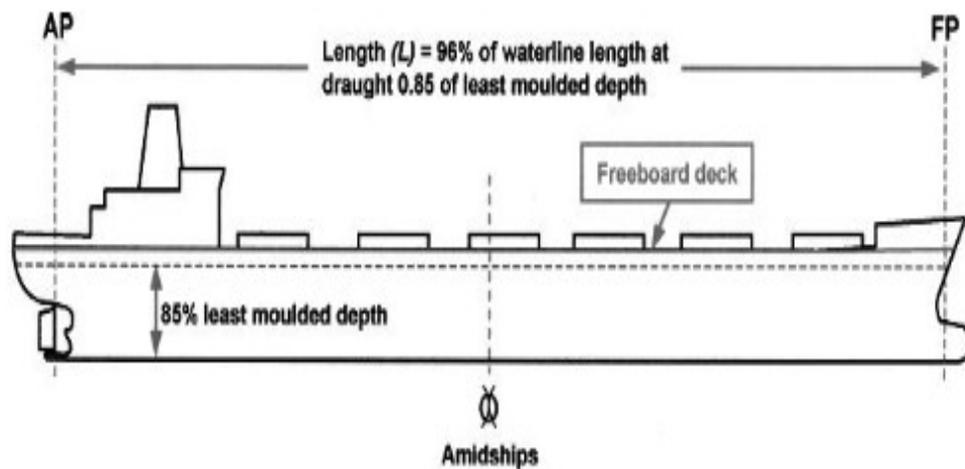
De Heree R. F. S dan Bakker A. R (1970) menuliskan bahwa pada saat kapal mengalami kemiringan dengan sudut $\varphi = 0$ secara teoritis atau

dengan sudut yang sangat kecil secara praktis digunakan persamaan sederhana.

$$MG_{\text{stabilitas}} = MG \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots(1)$$

2.3 Pengaruh Freeboard

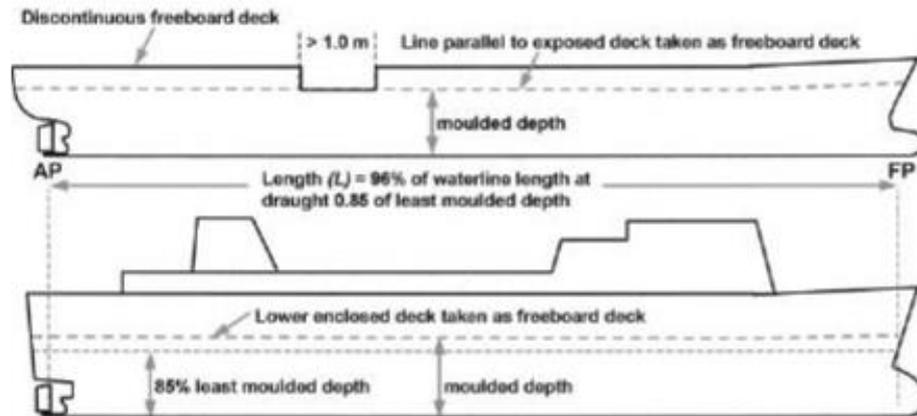
Freeboard deck adalah geladak teratas yang menyeluruh dan terbuka (tak terlindung) terhadap cuaca dan air laut dan mempunyai cara penutupan yang permanen dan kedap air, baik untuk bukaan – bukaan diatas geladak maupun pada sisi – sisi kapal.



Gambar 3. *Freeboard Deck* pada kapal

Pemilik kapal dapat memilih untuk mendesain kapal dengan *freeboard deck* yang lebih rendah dan permanen ke arah depan dan buritan setidaknya dari sekat kamar mesin sampai sekat haluan dan menerus ke atas (hal ini merupakan tipe kapal Ferry Ro-Ro). Dalam kasus ini bagian lambung kapal yang membentang di atas *freeboard deck* dapat diperlukan sebagai *erstructure* (IMO 2002).





Gambar 4. Freeboard Deck tipe kapal Ferry Ro-Ro

Paroka D. dkk (2007) menuliskan bahwa salah satu faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap stabilitas kapal adalah lambung timbul. Dalam prakteknya, lambung timbul minimum kapal diestimasi terpisah dari stabilitas kapal. Hal ini dapat berakibat terjadinya ketidaksesuaian antara lambung timbul minimum dan tinggi metacentra minimum yang mana akan berpengaruh secara signifikan terhadap performa dan keselamatan kapal dalam pelayaran. Untuk meningkatkan performa dan tingkat keselamatan kapal dalam pelayaran diperlukan metodologi alternative untuk mengevaluasi tingkat keselamatan kapal dalam pelayaran dengan mempertimbangkan kombinasi lambung timbul minimum dan criteria stabilitas minimum.

Dalam hal ini, salah satu metode untuk mengevaluasi stabilitas dan performa kapal dalam pelayaran adalah dengan memakai pendekatan probabilitas ketenggelaman (Paroka D. Dan Umeda, 2006b) :

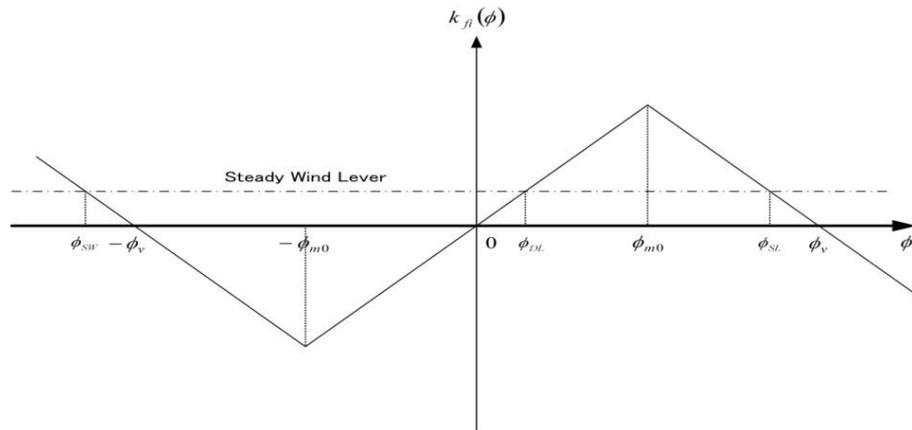
$$P(T) = P_l P_T (\phi > \phi_{m0} \text{ or } \phi < -\phi_{m0}) P_A (A > 0; \phi > \phi_{m0}) + P_w P_T (\phi > \phi_{m0} \text{ or } \phi < -\phi_{m0}) P_A (A < 0; \phi < -\phi_{m0}) \dots \dots \dots (2)$$

dimana P_l dan P_w adalah probabilitas gerak oleng melewati batas antara

men pertama dan kedua pada arah starboard dan port side. P_T adalah probabilitas gerak oleng melewati batas antara segmen pertama dan kedua a arah starboard atau port side selama periode waktu tertentu dan P_{CR}



adalah probabilitas sudut oleng lebih besar dari sudut kritis. ϕ_{m0} dan ϕ_{CR} masing-masing adalah batas antara segmen pertama dan kedua dan sudut oleng kritis seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Linearisasi lengan stabilitas kapal dengan metode piece-wise linear

2.4 Pengaruh Bilge Keel

Bilge Keel atau biasa disebut sebagai sirip *bilge keel* dimana dipasang pada lambung kapal secara menerus dengan cara dilas secara permanen dan kedap air berdasarkan BKI (2007).

Bassler and Reed (2009) menuliskan bahwa komponen *bilge keel* adalah sebagian besar berpengaruh terhadap total redaman. Untuk itu sangat penting untuk menghitung model *bilge keel* untuk menentukan batas proporsi lambung, ukuran *bilge keel*, dan amplitudo gerak oleng. *Bilge Keel* yang besar akan meningkatkan komponen gaya redaman dan mengurangi interaksi redaman pada lambung.

Persamaan sederhana untuk komponen gaya normal *bilge keel* pada kecepatan 0 knot dituliskan oleh Ikeda, et al. (1978a).

$$B_{BKN0} = \frac{8}{3\pi} \rho r^2 b_{BK}^2 \omega f^2 \left[\frac{22,5}{\pi f} + 2,4 \frac{r\phi}{b_{BK}} \right] \dots \dots \dots (3)$$



Dimana ρ adalah massa jenis air, r adalah jarak sumbu oleng ke *bilge keel*, b_{BK} adalah rentang *bilge keel*, ω adalah frekuensi oleng, ϕ adalah sudut oleng, dan f adalah koefisien persamaan emppiris,

$$r = d \sqrt{\left(H_0 - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{R}{d}\right)^2 + \left(1 - \frac{OG}{d} - \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \frac{R}{d}\right)^2} \dots\dots\dots (4)$$

dan radius *bilge*, R adalah

$$R = \begin{pmatrix} B/2 & H_0 < 1 \\ d & H_0 > 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

Dan

$$f = 1 + (0,3 \exp(-160\{1 - \sigma\})) \dots\dots\dots (6)$$

Total komponen gaya normal *bilge keel*, B_{BKN} adalah

$$B_{BKN} = B_{BKN0} + \frac{\pi}{2} \rho b_{BK}^2 r^2 U \dots\dots\dots (7)$$

2.5 Teori Gelombang Reguler

Teori gelombang adalah pendekatan dari sebuah kenyataan dengan beberapa asumsi penyederhanaan dan idealisasi. Gelombang reguler adalah gelombang yang memiliki karakteristik periode waktu (T) yang mana tiap satu siklus gelombang memiliki bentuk yang sama. Ini dipelajari untuk membuat penyederhanan akan agar bisa lebih mudah untuk dipelajari.

Asumsi dasar dari teori gelombang tersebut adalah sebagai berikut :

1. Fluida dianggap homogen
2. Tekanan permukaan diabaikan
3. Gaya coriolis karena rotasi bumi diabaikan
4. Tekanan pada permukaan bebas dianggap konstan dan seragam
5. Fluida dianggap ideal (tidak bisa ditekan)
6. Gerakan partikel berdiri sendiri, tidak saling mengganggu dan bertubrukan selama bergerak

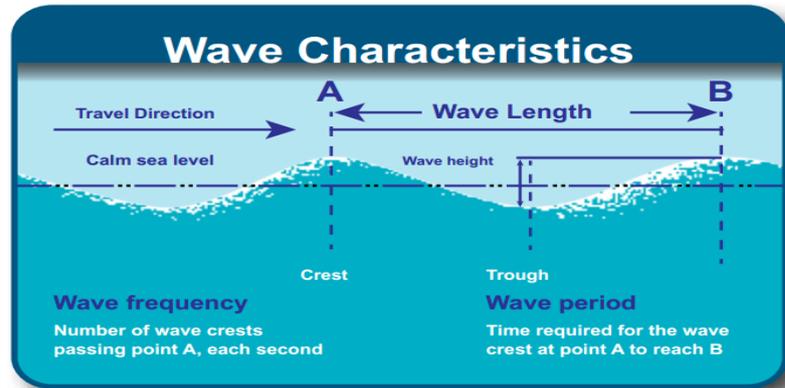
Dasar laut dianggap datar, tetapi kedap, sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol.

Amplitudo gelombang adalah relatif kecil dibanding panjang gelombang



9. Gelombang dianggap memanjang

Karakteristik gelombang regular yang memiliki tinggi dan periode yang relative konstan dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Definisi dari gelombang regular

Dimana :

Amplitudo gelombang (A) : $\frac{1}{2}$ jarak tegak dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

Tinggi gelombang (H) : jarak tegak dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

Panjang gelombang (λ) : jarak mendatar dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

Periode gelombang (T) : waktu yang ditempuh dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah

Dari beberapa parameter di atas kemudian bisa diturunkan lagi parameter yang lain yang biasanya dipergunakan dalam pembahasan teori gelombang.

$$k = \text{Bilangan gelombang} : k = \frac{\omega^2}{g}, k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda = \text{Panjang Gelombang} : \lambda = \frac{2\pi \cdot g}{\omega^2}$$

$$\omega = \text{Frekuensi gelombang} : \omega = \sqrt{\frac{2\pi \cdot g}{\lambda}}$$

$$T = \text{Periode Gelombang} : T = \frac{2\pi}{\omega}$$



$$s = \text{Kelandaian gelombang} : s = \frac{H}{\lambda}$$

Arah rambat gelombang terhadap gerak kapal dibedakan menjadi 3 yaitu :

1. *Heading Sea*, Jika kapal mendapat gelombang dari depan. maka pada waktu mengangguk, umumnya kapal cenderung mengangguk lebih cepat dari pada periode mengoleng. Bila gelombang dari depan dan kapal mempunyai kecepatan konstan maka periode kapal lebih besar dari pada periode gelombang
2. *Following Sea*, Jika kapal mendapat gelombang dari belakang. Kapal menjadi sulit dikemudian, haluan merewang (oleng) bagi kapal yang dilengkapi kemudi otomatis, penyimpangan kemudi yang besar dapat merusak sistemnya dan kemudi rusak akibat hantaman gelombang.
3. *Beam Sea*, Jika kapal mendapat gelombang dari samping. Kapal akan mengoleng, pada kemiringan yang besar dapat membahayakan stabilitas kapal. Olengan ini makin membesar, jika terjadi sinkronisasi antara periode oleng kapal dengan periode oleng semu, kemungkinan kapal terbalik dan tenggelam. Periode olengan kapal adalah lamanya olengan yang dijalani kapal dihitung dari posisi tegak, olengan terbesar kiri/kanan, kembali tegak, olengan terbesar disisi kanan/kiri dan kembali keposisi tegak. Periode gelombang semu adalah waktu yang diperlukan untuk menjalani satu kali panjang gelombang dari puncak ke puncak gelombang berikut. Pada kapal berlayar dalam gelombang, sebaiknya kecepatan kapal dikurangi, haluan dibuat sedemikian rupa sehingga gelombang datang dari arah diantara haluan dan arah melintang kapal , secara khusus olah gerak kapal menghadapi cuaca buruk.

2.6 Percobaan pada Gelombang Beraturan

Percobaan pada gelombang beraturan adalah salah satu standar sedur untu menentukan sudut roll-back gelombang beraturan yang yatakan dalam simbol ϕ_{1r} . Dalam beberapa kasus penentuan secara gsung ϕ_{1r} tidak layak, seperti pada contoh, dalam kasus model yang



panjang memiliki roll period yang besar T_{ϕ} . 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, dan
3. Menentukan regular waves roll-back angle (ϕ_{1r}).

2.4.1 Tahap Pertama

Tujuan dari tahap ini adalah menentukan Kurva Bertin's Coefficient dan roll period dari fungsi roll amplitude. Pada roll decay ϕ_1, ϕ_2, \dots (sudut), rata-rata sudut rolling

$$\phi_{mi} = \frac{\phi_i + \phi_{i-1}}{2} \dots\dots\dots (8)$$

dan selisih

$$\delta\phi_i = \phi_i - \phi_{i-1} \dots\dots\dots (9)$$

Bertin's Coefficient, N adalah fungsi dari ϕ_m di dapatkan dari

$$N_i = N(\phi_{mi}) = \frac{\delta\phi_i}{(\phi_{mi})^2} \dots\dots\dots (10)$$

2.4.2 Tahap Kedua

Tujuan dari tahap ini adalah menentukan effective wave slope coefficient, r . Di bawah ini ada dua metode yang dapat digunakan :

- 2.1 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. Sehingga effective wave slope coefficient, r ditentukan sebagai berikut :

$$r = \frac{g \cdot T_{wave,r}^2 \cdot \phi_r^2 \cdot N(\phi_r)}{180\pi^2 \cdot H_r} \dots\dots\dots(11)$$

Keterangan :

$T_{wave,r}^2$ dan H_r adalah periode gelombang dalam detik dan tinggi gelombang dalam meter yang masing-masing digunakan dalam percobaan, dan g percepatan gravitasi dalam m/s^2 . Dari persamaan di atas, wave steepness diasumsikan berhubungan dengan wave height dan wave period dengan :

$$s = 2\pi \cdot H / (g \cdot T_{wave}^2) \dots\dots\dots(12)$$

2.4.2.2 Secara alternatif memungkinkan secara langsung menghitung roll excitation moment M_{exc} dengan menggunakan dynamometer. Model harus terhubung dengan kereta atau 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 centre 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 :

$$r = \frac{M_{exc}}{\Delta \cdot GM \cdot \pi \cdot s} \dots\dots\dots(13)$$

2.4.3 Tahap Ketiga

Pada tahap ini bertujuan untuk memprediksi puncak dari roll untuk uraman dapat dilihat pada tabel 1 :



Tabel 1. Tabel Wave Steepness Factor

Ship Roll Period $T_{\phi}(s)$	Wave Steepness $s = H/\lambda$
<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)

Dengan menggunakan kurva untuk $N(\phi)$ dan estimasi nilai untuk r dari tahap sebelumnya dan menggunakan wave steepness s yang didapatkan dari tabel diatas, prediksi sudut rolling ϕ_{1r} dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\phi_{1r} = \sqrt{\frac{90 \pi r s}{N(\phi_{1r})}} \text{ (derajat) } \dots\dots\dots(14)$$

Rumus ϕ_{1r} ini termasuk keduanya sisi kanan dan kiri, perhitungan itu seharusnya dilakukan dengan prosedur dibawah ini :

1. ϕ_{1r} pada dasarnya diasumsikan 20°
2. Sisi kanan rumus tersebut dihitung
3. Penentuan ϕ_{1r} di substitusikan ke dalam sisi kanan rumus

Ketika nilai ϕ_{1r} bertemu dengan nilai yang pasti, seharusnya diperlihatkan sebagai nilai akhir.



2.7 Metode Prediksi Rolling pada Kriteria Cuaca

Metode gabungan Japan, rumus untuk roll amplitude adalah :

$$\phi = \sqrt{C r s / N} \dots\dots\dots(15)$$

Keterangan :

ϕ adalah sudut rolling searah hembusan angin, dihitung dari sudut keseimbangan. C adalah nilai konstan. Sejak rumus ini pakai untuk menyamakan rolling pada gelombang reguler, nilai konstan termasuk faktor reduksi 0,7 untuk mewakili nilai pada gelombang irreguler.

N adalah koefisien Bertin untuk roll damping. Untuk kekurangan dari rumus yang telah ada atau detail data yang lebih, nilai 0,02 direkomendasikan untuk kapal-kapal normal dengan sirip *bilge keel*. s adalah wave steepness faktor, diestimasikan dari maksimum wave steepness. r adalah effective wave slope coefficient :

$$r = 0,73 + 0,6 OG/d \dots\dots\dots(16)$$

Keterangan :

OG adalah tinggi titik berat kapal dari waterline dan d adalah sarat kapal. Untuk menghitung nilai Roll Amplitude to Windward dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Roll Amplitude to Windward} = C k x_1 x_2 \sqrt{rs} \dots\dots\dots(17)$$

Keterangan :

k adalah fungsi dari luas *bilge keel* keel, x_1 adalah fungsi dari lebar/sarat , dan x_2 adalah fungsi dari koefisien blok. C adalah nilai konstan, dengan nilai 109 di pilih untuk level keamanan yang disediakan oleh metode Japan.



Tabel 2. Tabel nilai 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
≥ 3.5	0.80

Sumber : (IMO, 2008)

Tabel 3. Tabel nilai X_2

C_B	X_2
≤ 0.45	0.75
0.50	0.82
0.55	0.89
0.60	0.95
0.65	0.97
≥ 0.70	1.00

Sumber : (IMO, 2008)

Tabel 4. Tabel nilai k

$\frac{A_k \times 100}{L_{WL} \times B}$	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
≥ 4.0	0.70

Sumber : (IMO, 2008)

Tabel 5. Tabel nilai s

T	s
≤ 6	0.100
7	0.098
8	0.093
12	0.065
14	0.053
16	0.044
18	0.038
≥ 20	0.035

Sumber : (IMO, 2008)



2.8 Perbandingan Model

Zohuri B (2015) menuliskan bahwa dalam pembuatan model kapal harus memenuhi Hukum perbandingan sebagai berikut:

a. Kesamaan Geometris

Pada dasarnya kesamaan geometri antara model dan kapal dapat diperoleh jika rasio semua dimensi model dan kapal adalah sama. Secara matematika maka dapat menggunakan perhitungan sebagai berikut:

$$L_{\text{ratio}} = \frac{L_{\text{model}}}{L_{\text{ship}}} \text{ atau } \frac{L_M}{L_S} = L_r \dots\dots\dots(18)$$

Dimana :

L_r = skala model

L_m = panjang model (m)

L_p = panjang Kapal (m)

b. Kesamaan Kinematis

Kesamaan kinematis merujuk pada persamaan gerakan. Karena gerakan dideskripsikan oleh jarak dan waktu, itu menunjukkan kesamaan panjang (kesamaan geometri) dan kesamaan interval waktu. Jika panjang model dan prototipe memiliki rasio tetap kecepatannya harus memiliki rasio tetap terhadap interval waktu. Kesamaan kinematis dapat diketahui melalui persamaan berikut:

$$\frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = \frac{V_S}{\sqrt{gL_S}} \dots\dots\dots(19)$$

Dimana :

V_M = kecepatan model (m/det)

V_S = kecepatan kapal (m/det)

c. Kesamaan Dinamis

Kesamaan dinamis adalah kesamaan gaya. Perbedaan gaya antara kapal dan model harus memiliki rasio skala yang sama. Gaya yang dimaksud adalah tekanan, gaya grafitasi, viskositas, elastisitas dan tegangan permukaan. Selain itu, sifat fisik yang mempengaruhi adalah massa jenis,



viskositas, elastisitas, dan lainnya. Sebagai contoh, gaya yang bekerja pada inersia,

$$f_i = \rho V^2 l^2 \dots\dots\dots(20)$$

dan yang bekerja pada viskositas,

$$f_v = \mu V l \dots\dots\dots(21)$$

dan memiliki rasio konstan pada semua *homologous points* model dan prototype, memberikan persamaan berikut:

$$\frac{(f_i)_{\text{model}}}{(f_i)_{\text{prototype}}} = \frac{(f_v)_{\text{model}}}{(f_v)_{\text{prototype}}} \dots\dots\dots(22)$$

Atau

$$\left(\frac{f_i}{f_v}\right)_{\text{model}} = \left(\frac{f_i}{f_v}\right)_{\text{prototype}} = \left(\frac{Vl\rho}{\mu}\right)_{\text{model}} = \left(\frac{Vl\rho}{\mu}\right)_{\text{prototype}}$$

$$(Re)_{\text{model}} = (Re)_{\text{prototype}} \dots\dots\dots(23)$$

Dimana:

Re = *Reynold number*, Vl/v

V = Kecepatan

l = Panjang

v = Viskositas kinematis (m^2/det)

ρ = Massa jenis (kg/m^3)

Untuk menghindari terjadinya ombak pada dinding tangki atau biasa disebut dengan *blockage effect* maka ukuran model harus disesuaikan dengan ukuran tangki serta tinggi air dalam tangki dengan sarat model. Menurut harvald, penentuan lebar model (B_m) adalah sebagai berikut:

$$B_m < 1/10 B \text{ tangki} \dots\dots\dots(24)$$

