

**SIMULASI NUMERIK *DYNAMIC STABILITY*
PADA KAPAL DI GELOMBANG**

SKRIPSI

*Diajukan guna memenuhi persyaratan untuk meraih gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin*



ABDUL WAHID HASIM

D311 16 307

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2021

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

Simulasi Numerik Dynamic Stability Pada Kapal di Gelombang

Disusun dan diajukan oleh:

ABDUL WAHID HASIM

D311 16 307

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi pada Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Gowa, 12 Juli 2021

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Pembimbing I Menyetujui, **Pembimbing II**

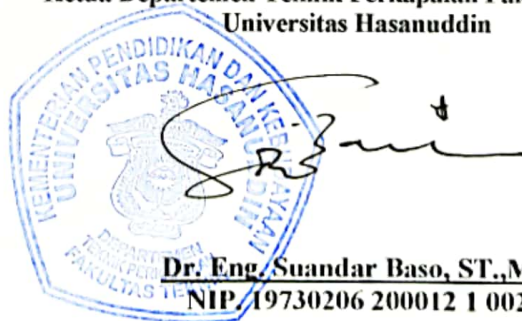


Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT
NIP. 19730206 200012 1 002



Andi Dian Eka Anggriani, ST., MT
NIP. 19870824 201903 2 009

Mengetahui,
**Ketua Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin**



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Abdul Wahid Hasim

NIM : D311 16 307

Program Studi : Teknik Perkapalan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Simulasi Numerik Dynamic Stability Pada Kapal di Gelombang

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar - benar merupakan hasil karya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil orang lain, maka saya bersedia mengenai sanksi atas perbuatan tersebut

Gowa, 12 Juli 2021

Yang menyatakan,



Abdul Wahid Hasim

ABSTRAK

Abdul Wahid Hasim, 2021. “SIMULASI NUMERIK *DYNAMIC STABILITY* PADA KAPAL DI GELOMBANG”. (Dibimbing oleh Suandar Baso dan Andi Dian Eka Anggriani)

Salah satu fokus pengembangan oleh IMO yaitu *Pure Loss of Stability*, *Pure Loss Stability* adalah fenomena dimana nilai dari ketinggian metasentra awal (MG) bernilai negatif diakibatkan oleh berkurangnya luas penampang garis air yang terjadi pada saat kapal berlayar melalui puncak gelombang. Oleh karena itu untuk mengetahui kemampuan stabilitas kapal di gelombang maka pada penelitian ini difokuskan untuk mengetahui formulasi numerik dalam penentuan properti penampang garis air yang akan digunakan untuk melacak kemampuan stabilitas kapal di gelombang. Adapun hasil yang diperoleh bahwa bentuk penampang garis air di gelombang dapat digambarkan menggunakan persamaan $y_u = -y_n \cos \varphi + z_n \sin \varphi$ dan $y_i = y_n \cos \varphi + z_n \sin \varphi$ hanya jika nilai y_n dan z_n dapat memenuhi persamaan $z_u = -y_n \sin(-\varphi) + z_n \cos \varphi$ dan $z_i = -y_n \sin \varphi + z_n \cos \varphi$ dimana $z_u, z_i = z_{Gelombang}$. Perhatikan bahwa y_u adalah lebar penampang kapal oleng bagian portside, y_i adalah lebar penampang kapal oleng bagian starboard, y_n adalah lebar penampang kapal kondisi kapal tegak untuk setiap z_n , dan z_n adalah ordinat tinggi kapal kondisi kapal tegak. Dengan menggunakan persamaan tersebut pada kapal general cargo KM Ovale hasil analisis kemampuan stabilitas kapal di gelombang diperoleh bahwa kemampuan stabilitas kapal sangat rentan jika letak puncak gelombang terletak pada bagian tengah kapal ditandai dengan nilai GZ maksimum pada sudut keolengan 20 derajat kehilangan sebesar 51.14% dibandingkan dengan nilai GZ pada kondisi kapal tegak.

Kata Kunci: *Pure Loss Stability*, *Second generation intact stability*, *General cargo*, simulasi metode numerik

ABSTRACT

Abdul Wahid Hasim, 2021. “NUMERICAL METHOD SIMULATION OF DYNAMIC STABILITY ON SHIP IN WAVES”. (Supervised by Suandar Baso and Andi Dian Eka Anggriani)

One of the focuses of development by IMO is Pure Loss of Stability. Pure Loss Stability is the phenomenon during which the value of initial metacentric height GM is negative due to small water plane areas that may occur while the ship sails through a wave crest. Therefore, to determine the ship stability capability in waves, this research is focused on knowing the numeric formulation in determining water plan property which will be used to track the ship stability capability in waves. The results obtained are that water plan in wave can be described using the equations $y_u = -y_n \cos \varphi + z_n \sin \varphi$ and $y_i = y_n \cos \varphi + z_n \sin \varphi$ only if the values of y_n and z_n can comply the equation $z_u = -y_n \sin(-\varphi) + z_n \cos \varphi$ and $z_i = -y_n \sin \varphi + z_n \cos \varphi$ where $z_u, z_i = z_{wave}$. Note that y_u is breadth of the ship on portside in heeling condition, y_i is breadth of the ship on starboard in heeling condition, y_n is breadth of the ship in even keel condition for each z_n , and z_n is the ordinate height of the ship in even keel condition. By using this equation on the general cargo ship KM Ovale, the results of the analysis of the ship stability capability in waves obtained that the ship stability capability is very susceptible if the location of the wave crest is located in the midship marked by the maximum GZ value when heeling condition is 20 degrees, the loss is 51.14% compared to the value of GZ in the ship in even keel condition.

Keywords: Pure Loss Stability, Second generation intact stability, General cargo, numerical method simulation

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT Tuhan semesta alam yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “Simulasi Numerik *Dynamic Stability* Pada Kapal Di Gelombang”. Shalawat dan salam juga tak lupa penulis ucapkan untuk junjungan Rasulullah Muhammad SAW.

Penulisan tugas akhir ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Dalam penyusunan tugas akhir ini memerlukan proses yang panjang, mulai dari awal persiapan hingga tahap akhir penyelesaian. Tidak sedikit hambatan dan kesulitan yang ditemukan oleh penulis sehingga tanpa bantuan semangat, diskusi, dan bimbingan dari berbagai pihak maka tugas akhir ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu saya ucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak dan Ibu tercinta, yang telah memberikan dorongan semangat, segala doa yang telah dipanjatkan, serta waktu dan tenaga yang telah diluangkan sehingga bisa mendidik penulis sampai tahap ini.
2. Bapak Dr. Eng Suandar Baso, ST., MT., selaku pembimbing 1 sekaligus Ketua Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang selalu membimbing dan menjadi teman berdiskusi untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Mohon maaf jika selama penulis berkuliah hingga selesainya penyusunan tugas akhir ini ada kesalahan dan kekecewaan yang telah penulis lakukan.

3. Ibu Andi Dian Eka Anggriani, ST., MT, selaku pembimbing 2 yang telah memberikan ilmu, motivasi dan nasihat didalam perkuliahan hingga selesainya penyusunan tugas akhir ini.
4. Ibu Ir. Hj. Rosmani, MT. dan Bapak Dr. Ir. Syamsul Asri, MT. selaku dosen penguji yang banyak memberikan masukan untuk menyempurnakan tugas akhir ini.
5. Seluruh Dosen Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, terima kasih atas seluruh ilmu dan diskusi yang telah diberikan selama penulis berkuliah di Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Seluruh Civitas Akademika Universitas Hasanuddin, terima kasih atas seluruh *support* dalam proses akademik maupun non-akademik selama penulis berkuliah di Universitas Hasanuddin.
7. Enam puluh empat orang saudara/saudari saya se-Teknik Perkapalan 2016, terima kasih atas kebersamaannya selama menjalani masa perkuliahan.
8. Teman-teman CRUIZER 2016, terima kasih atas segala support, rasa kekeluargaan, serta
9. Kanda-kanda senior, dinda-dinda junior dan teman-teman se-Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan rahmat dan karunianya kepada semua pihak yang telah memberikan segala bantuannya. Hasil penelitian ini tentu saja memiliki banyak kekurangan karena keterbatasan kemampuan penulis. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat dan menjadi suatu karya yang memberi dampak positif dan dapat pula bermanfaat bagi pembaca dan penulis.

AamiinYaaRabbAlamiin

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1 Kapal General Cargo.....	5
2.2 Gerak Kapal.....	5
2.3 Transformasi Geometri	8
2.4 Gelombang Reguler.....	11
2.5 Stabilitas Kapal di Gelombang.....	13
2.6 <i>Second Generation Intact Stability</i>	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	19
3.2 Jenis dan Pengumpulan data	19
3.3 Metode Pengolahan data	19
3.3.1 Data Kapal	19
3.3.2 Pemodelan Kapal	20
3.3.3 Transformasi Geometri Bodyplan	22
3.3.4 Data Gelombang	23
3.3.5 Perhitungan Properti Penampang Garis Air Kapal Oleng	23

3.3.6 Perhitungan Properti Volume Kapal Oleng	23
3.3.7 Simulasi Perhitungan Stabilitas Kapal.....	24
3.3.8 Penarikan Kesimpulan	24
3.4 Kerangka Pemikiran.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Verifikasi Desain Model Kapal.....	25
4.2 Persamaan Numerik Rotasi Penampang Bodyplan	26
4.2.1 Penampang Garis Air Kapal Oleng	26
4.2.2 Properti Penampang Garis Air Kapal Oleng.....	30
4.2.3 Properti Volume Kapal Oleng	31
4.2.4 Stabilitas Kapal.....	32
4.3 Fase Gelombang.....	34
4.4 Gerak Kapal di Gelombang.....	36
4.5 Perubahan Properti Penampang Garis Air Akibat Beda Fase Gelombang	38
4.6 Perubahan Properti Volume Akibat Beda Fase Gelombang	44
4.7 Lengan Stabilitas Akibat Beda Fase Gelombang.....	47
4.8 Evaluasi Stabilitas Kapal.....	52
BAB V PENUTUP.....	55
4.1 Kesimpulan	55
4.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Transformasi Rotasi Berdasarkan Grid Penampang	23
Tabel 4.1	Validasi data hidrostatis.....	22
Tabel 4.2	Data penyusun gelombang	36
Tabel 4.3	Data gerak kapal.....	37
Tabel 4.4	Perubahan properti penampang garis air kapal statis pada tinggi gelombang 1.5 meter dan kondisi Load 0	39
Tabel 4.5	Perubahan properti penampang garis air kapal statis pada tinggi gelombang 1.5 meter dan kondisi Load 1	40
Tabel 4.6	Perubahan properti penampang garis air kapal statis pada tinggi gelombang 3 meter dan kondisi Load 0	41
Tabel 4.7	Perubahan properti penampang garis air kapal statis pada tinggi gelombang 3 meter kondisi Load 1	42
Tabel 4.8	Perubahan properti penampang garis air kapal <i>motion</i> pada tinggi gelombang 3 meter kondisi Load 1	43
Tabel 4.9	Perubahan <i>displacement</i> kapal statis pada tinggi gelombang 1.5 meter	44
Tabel 4.10	Perubahan <i>displacement</i> kapal statis pada tinggi gelombang 3 meter	44
Tabel 4.11	Perubahan <i>displacement</i> kapal <i>motion</i> pada tinggi gelombang 3 meter	45
Tabel 4.12	Panjang GZ kapal statis pada kondisi Load 0 dan gelombang 1.5 meter	47
Tabel 4.13	Panjang GZ kapal statis pada kondisi Load 0 dan gelombang 3 meter	48
Tabel 4.14	Panjang GZ kapal statis pada kondisi Load 1 dan gelombang 1.5 meter	49
Tabel 4.15	Panjang GZ kapal statis pada kondisi Load 1 dan gelombang 3 meter	50
Tabel 4.16	Panjang GZ kapal <i>motion</i> pada kondisi Load 1 dan gelombang 3 meter	51
Tabel 4.17	Evaluasi kriteria Level 1 <i>Pure Loss Stability</i>	52

Tabel 4.18 Evaluasi *Criterion 1 Level 2 Pure Loss Stability*53
Tabel 4.19 Evaluasi *Criterion 2 Level 2 Pure Loss Stability*54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Enam Derajat Kebebasan Gerak Kapal	6
Gambar 2.2 Ilustrasi Rotasi Sumbu-X	8
Gambar 2.3 Ilustrasi Rotasi Sumbu-Y	9
Gambar 2.4 Ilustrasi Rotasi Sumbu-Z.....	10
Gambar 2.5 Gelombang Reguler.....	12
Gambar 2.6 Penampang Garis Air di Profil Gelombang	13
Gambar 2.7 Penerapan Metode Benjamin-Spence.....	15
Gambar 2.8 Flow Chart Second Generation Intact Stability.....	17
Gambar 3.1 Rencana Garis Air Model Kapal	20
Gambar 3.2 Penampang Bodyplan Model Kapal.....	20
Gambar 3.3 Membuat File Desain Maxsurf.....	21
Gambar 3.4 Memilih Surface pada Maxsurf.....	21
Gambar 3.5 Menu Surface Control Point.....	22
Gambar 3.6 Penampang Bodyplan Kapal pada Maxsurf.....	22
Gambar 3.7 Flow Chart Diagram Pengerjaan Skripsi.....	24
Gambar 4.1 Pemodelan Kapal Dengan Maxsurf.....	25
Gambar 4.2 Ilustrasi Penentuan Ordinat x pada Kapal	26
Gambar 4.3 Ilustrasi Penentuan Ordinat y dan z pada Kapal	27
Gambar 4.4 Lebar penampang Kapal Oleng 7.5 Derajat Frame 18.....	28
Gambar 4.5 Perbedaan Tinggi Garis Air di Gelombang.....	29
Gambar 4.6 Penampang Garis Air di Gelombang	30
Gambar 4.7 Penampang Garis Air Kapal Oleng di Gelombang	30
Gambar 4.8 Titik Metasentra Kapal.....	33
Gambar 4.9 Diagram Panto Carena	34
Gambar 4.10 Profil Gelombang Fase 1	35
Gambar 4.11 Profil Gelombang Fase 2.....	35
Gambar 4.12 Profil Gelombang Fase 3.....	35
Gambar 4.13 Profil Gelombang Fase 4.....	36
Gambar 4.14 Time History Gerak Kapal <i>Heading Wave</i> dan Panjang Gelombang 81.6 meter	37

Gambar 4.15	Perubahan Penampang Garis Air Kapal Statis Fase Gelombang 1 dan Fase Gelombang 3	38
Gambar 4.16	Perubahan Penampang Garis Air Kapal Motion Fase Gelombang 1 dan Fase Gelombang 3	38
Gambar 4.17	Luas Penampang Gari Air Kapal Statis Kondisi Load 0 dan Tinggi Gelombang 1.5 meter untuk setiap sarat	39
Gambar 4.18	Luas Penampang Gari Air Kapal Statis Kondisi Load 1 dan Tinggi Gelombang 1.5 meter untuk setiap sarat	40
Gambar 4.19	Luas Penampang Gari Air Kapal Statis Kondisi Load 0 dan Tinggi Gelombang 3 meter untuk setiap sarat	41
Gambar 4.20	Luas Penampang Gari Air Kapal Statis Kondisi Load 1 dan Tinggi Gelombang 3 meter untuk setiap sarat	42
Gambar 4.21	Luas Penampang Gari Air Kapal <i>Motion</i> Kondisi Load 1 dan Tinggi Gelombang 3 meter untuk setiap sarat	43
Gambar 4.22	Perubahan <i>Displacement</i> Kapal Statis Kondisi Load 0 Berdasarkan Periode Gelombang	44
Gambar 4.23	Perubahan <i>Displacement</i> Kapal Statis Kondisi Load 1 Berdasarkan Periode Gelombang	46
Gambar 4.24	Perubahan <i>Displacement</i> Kapal <i>Motion</i> Kondisi Load 1 Berdasarkan Periode Gelombang	46
Gambar 4.25	Kurva Lengan Stabilitas (GZ) Kapal Statis pada Kondisi Loda 0 dan Tinggi Gelombang 1.5 meter.....	48
Gambar 4.26	Kurva Lengan Stabilitas (GZ) Kapal Statis pada Kondisi Load 0 dan Tinggi Gelombang 3 meter.....	49
Gambar 4.27	Kurva Lengan Stabilitas (GZ) Kapal Statis pada Kondisi Load 1 dan Tinggi Gelombang 1.5 meter.....	50
Gambar 4.28	Kurva Lengan Stabilitas (GZ) Kapal Statis pada Kondisi Load 1 dan Tinggi Gelombang 3 meter.....	51
Gambar 4.29	Kurva Lengan Stabilitas (GZ) Kapal Motion pada Kondisi Load 1 dan Tinggi Gelombang 3 meter	52

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sebagai negara kepulauan, transportasi laut memainkan peran penting dalam semua aspek pembangunan bangsa. Armada angkutan laut domestik mempunyai peran penting dan menjadi tulang punggung distribusi angkutan barang penumpang keseluruhan wilayah kepulauan Indonesia yang terbentang dari ujung kawasan barat (Sabang) hingga ujung kawasan timur Indonesia.

Untuk mewujudkan terciptanya armada angkutan laut yang kuat diperlukan adanya armada yang berkualitas baik dari segi teknis maupun operasional dan mampu melayani secara efektif, efisien dan aman keseluruhan wilayah perairan Indonesia.

Keselamatan dan Stabilitas adalah dua aspek kesuksesan sebuah desain kapal bilamana dapat menjaga keseimbangan antara efisiensi dan kinerja kapal. (Luhmann H, 2015). Dalam berbagai skenario kapal niaga modern, kapal *general cargo* merupakan bidang investigasi yang menarik untuk investigasi stabilitas kapal terutama untuk variasi besar momen pengembali pada gelombang. (Kruger S, 2015)

Aturan tentang stabilitas kapal pertama kali di definisikan pada tahun 1968 oleh *Inter-Governmental Maritime Consultative Organization (IMCO)*, yang telah diubah namanya menjadi *International Maritime Organization (IMO)* pada tahun 1982. Aturan tersebut berupa kriteria berdasarkan dari grafik momen pengembali pada kondisi air tenang. Namun, beberapa kecelakaan tetap terjadi meskipun kapal-kapal telah memenuhi aturan tersebut. Berdasarkan kecelakaan ini IMO menyoroti kekurangan stabilitas kapal dalam beberapa konfigurasi pelayaran pada kondisi air bergelombang. (Grinnaert F, 2017).

Salah satu fokus pengembangan oleh IMO tentang aspek kegagalan stabilitas kapal yaitu *Pure Loss of Stability*, fenomena dimana nilai dari ketinggian metasentra awal (MG) bernilai negatif diakibatkan oleh berkurangnya luas penampang garis air yang terjadi pada saat kapal berlayar melalui puncak gelombang. Hal ini dapat menyebabkan kapal terbalik jika jumlah waktu yang dihabiskan dengan MG negatif cukup besar untuk menyebabkan sudut keolengan kapal semakin ekstrim. Situasi kritis akan terjadi ketika kecepatan kapal dekat dengan fase gelombang karena dalam kondisi tersebut kapal tetap berada di puncak gelombang untuk jangka waktu yang lama. (Chouliaras S, 2014). Berdasarkan fenomena tersebut, maka peneliti tertarik melakukan penelitian **Simulasi Numerik *Dynamic Stability* Pada Kapal di Gelombang**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka, rumusan masalah yang dikemukakan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana meformulasikan secara numerik panjang lengan momen pengembali kapal di variasi profil gelombang?
2. Bagaimana perilaku stabilitas kapal di gelombang akibat kondisi pemuatan dan variasi profil gelombang?

1.3 Batasan Masalah

Beberapa hal yang menjadi batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Kapal yang digunakan adalah jenis kapal General Cargo
2. Gelombang diasumsikan regular dengan arah datang gelombang 180 derajat
3. Penelitian dibatasi pada empat variasi profil gelombang dengan letak puncak gelombang terletak pada AP dan FP, 0.25L dari AP, 0.5L dari AP dan 0.75L dari AP
4. Penelitian dibatasi pada dua variasi tinggi gelombang yaitu 1.5 meter dan 3 meter

5. Kondisi pemuatan kapal dibatasi dengan dua kondisi yaitu *lightship condition* (Load 0) dan *Full Load at departure* (Load 1)

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang sudah dikemukakan sebelumnya maka tujuan penelitian ini adalah :

1. Menentukan formulasi numerik persamaan transformasi rotasi dan persamaan gelombang regular pada kapal
2. Menentukan perilaku stabilitas kapal akibat pengaruh kondisi pemuatan dan variasi profil gelombang

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan adalah sebagai berikut:

1. Sebagai bahan masukan bagi perancang kapal dalam mendesain kapal, kaitannya dengan stabilitas kapal di gelombang
2. Sebagai informasi bagi pengoperasian kapal kaitannya dengan keselamatan pelayaran berdasarkan berbagai profil gelombang dan tinggi gelombang

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I: Pendahuluan, dalam bab ini mengemukakan tentang informasi secara keseluruhan dari penelitian ini yang berkenaan dengan Latar belakang judul penelitian yang kemudian diturunkan pada Rumusan masalah, Batasan masalah, Tujuan penelitian, Manfaat penelitian, dan sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB 2: Landasan Teori, bab ini menguraikan dengan singkat tentang teori-teori yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini. Teori-teori tersebut mengenai Kapal *general cargo*, Gerak kapal, Transformasi geometri, Teori gelombang regular, Stabilitas kapal, dan *Second Generation Intact Stability*

BAB 3: Metodologi Penelitian, dalam bab ini dikemukakan mengenai lokasi dan waktu penelitian, jenis dan pengumpulan data, metode pengolahan data, serta kerangka pemikiran.

BAB 4: Hasil dan Pembahasan, dalam bab ini diuraikan pembahasan mengenai permasalahan yang diteliti yaitu pengaruh variasi profil gelombang dan tinggi gelombang terhadap stabilitas kapal

BAB 5: Penutup, dalam bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran-saran yang direkomendasikan penulis terkait tentang penelitian ini.

Daftar Pustaka

Lampiran

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Kapal *General Cargo*

Istilah “*general cargo*” mencakup banyak desain kapal yang berbeda dengan jenis kapal kargo lainnya. Dengan demikian, kapal ini tidak dikhususkan untuk mengangkut hanya muatan curah kering, kontainer atau *heavy-lift cargo* tetapi memiliki fleksibilitas untuk membawa jenis muatan tersebut. Kapal ini merupakan jenis yang paling banyak di dunia pada tahun 2002 kapal ini digunakan sebagai armada niaga dunia secara keseluruhan dan berjumlah sekitar 37% *deadweight*. (Linde H, 2004)

General cargo berarti kapal ini dapat mengangkut banyak jenis muatan kapal ini menggunakan penutup palka (*hatchcovers*), sekat-sekat (*bulkheads*) serta dek ganda (*tweendeck*) di dalam lubang palka. Penutup palka ini mempunyai ambang dengan ketinggian dan posisi tertentu. Biasanya ambang palka memiliki dimensi lebar dan panjang yang sama dengan lubang palka sehingga proses bongkar muat menjadi lebih mudah. (K. Van Dokkum, 2003)

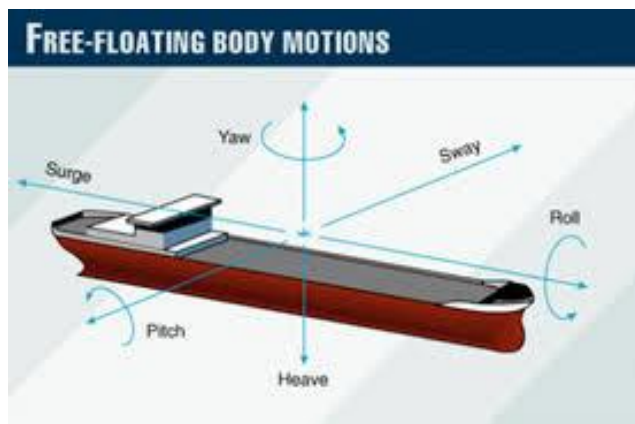
Rata-rata *deadweight* kapal *general cargo* sekitar 5600 DWT. Kapal yang lebih besar mencapai 30000 DWT dimaksudkan untuk membawa muatan dengan beberapa kemasan (*bagged, boxed, dan palletied*), atau kontainer sedangkan untuk kapal yang berukuran kurang dari 5000 DWT kebanyakan digunakan sebagai solusi fleksibel banyak orang mengangkut *dry-cargo* melalui pengiriman kapal laut. (Linde H, 2004)

2.2 Gerak Kapal

Olah gerak kapal (*seakeeping*) adalah kemampuan suatu kapal untuk tetap bertahan dilaut dalam kondisi apapun. Oleh karena itu kemampuan ini jelas merupakan aspek penting dalam hal perencanaan kapal (*Ship design*). Pada perencanaan bentuk lambung kapal, kualitas dari kinerja bentuk lambung merupakan bagian yang menjelaskan keadaan dimana kapal akan

oleng atau tenggelam (*ultimate loss of performance*) pada tiap kondisi gelombang, sehingga kinerja tersebut harus diketahui secara pasti bahkan dalam kondisi ekstrim sekalipun.

Kapal yang bergerak di laut bebas hampir selalu mengalami gerakan osilasi. Gerakan osilasi yang dialami kapal diperlihatkan pada Gambar 2.1 yang mana memperlihatkan enam jenis gerakan yang mana terdiri dari tiga gerakan translasi dan tiga gerakan rotasi terhadap sumbu x, y, dan z.



Gambar 2.1 Enam Derajat Kebebasan Gerak kapal

Gerak *surgin* merupakan gerak translasi kapal pada sumbu x, gerak *swaying* merupakan gerak translasi kapal pada sumbu y, gerak *heaving* merupakan gerak translasi kapal pada sumbu z, gerak *rolling* merupakan gerak rotasi kapal pada sumbu x, gerak *pitching* merupakan gerak rotasi kapal pada sumbu y, dan gerak *yawing* merupakan gerak rotasi kapal pada sumbu z.

Gerak *heaving*, *pitching* dan *rolling* bersifat osilasi, ini disebabkan oleh gaya pengembali yang diakibatkan oleh perubahan daya apung yang terlibat dalam gerak ini. Gerak kapal dalam menanggapi perilaku gelombang dapat dianggap sebagai sistem massa pegas teredam paksa. Persamaan gerak *heaving* dapat menggunakan persamaan berikut:

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega_0 t} \dots\dots\dots (2.1)$$

Persamaan gerak *pitching* dapat menggunakan persamaan berikut:

$$(I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_5 e^{i\omega_0 t} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana

- M = Massa kapal
- I_5 = Momen inersia gerak *pitching*
- A_{33} = Koefisien added mass gerak *heaving* untuk kondisi *heaving*
- A_{55} = Koefisien added mass gerak *pitching* untuk kondisi *pitching*
- A_{35} = Koefisien added mass gerak *heaving* untuk kondisi *pitching*
- A_{53} = Koefisien added mass gerak *pitching* untuk kondisi *heaving*
- B_{33} = Koefisien redam gerak *heaving* untuk kondisi *heaving*
- B_{55} = Koefisien redam gerak *pitching* untuk kondisi *pitching*
- B_{35} = Koefisien redam gerak *heaving* untuk kondisi *pitching*
- B_{53} = Koefisien redam gerak *pitching* untuk kondisi *heaving*
- C_{33} = Koefisien pengembali gerak *heaving* untuk kondisi *heaving*
- C_{55} = Koefisien pengembali gerak *pitching* untuk kondisi *pitching*
- C_{35} = Koefisien pengembali gerak *heaving* untuk kondisi *pitching*
- C_{53} = Koefisien pengembali gerak *pitching* untuk kondisi *heaving*
- F_3 = *Heave exciting force*
- F_5 = *Pitch exciting moment*
- η_3 = *instantaneous heave displacement*
- $\dot{\eta}_3$ = *instantaneous heave velocity*
- $\ddot{\eta}_3$ = *instantaneous heave acceleration*
- η_5 = *instantaneous pitch displacement*
- $\dot{\eta}_5$ = *instantaneous pitch velocity*
- $\ddot{\eta}_5$ = *instantaneous pitch acceleration*

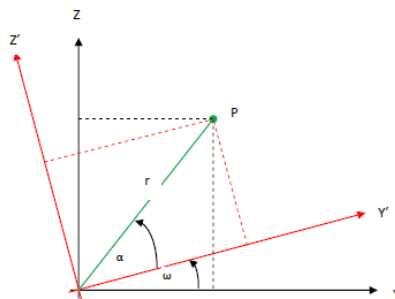
2.3 Transformasi Geometri

Transformasi merupakan suatu metode untuk mengubah lokasi suatu titik pembentuk objek, sehingga objek tersebut mengalami perubahan. Perubahan objek dengan mengubah koordinat dan ukuran suatu objek disebut dengan transformasi geometri. Transformasi tiga dimensi pada dasarnya hampir sama dengan transformasi dua dimensi, hanya pada tiga dimensi kita menghitung sumbu Z . sama seperti pada dua dimensi, terdapat tiga transformasi dasar yang dapat dilakukan terhadap verteks, yaitu:

1. Translasi: suatu pergerakan atau perpindahan semua titik dari objek pada suatu jalur
2. Skala: memperbesar atau memperkecil suatu ukuran dari sebuah objek dengan ukuran tertentu
3. Rotasi: reposisi seluruh titik dari suatu objek sepanjang jalur lingkaran dengan pusatnya pada titik putar

Transformasi rotasi tiga dimensi berbeda dengan rotasi dua dimensi yang menggunakan titik pusat $(0,0)$ sebagai pusat perputaran, rotasi pada benda (objek) tiga dimensi menggunakan sumbu koordinat sebagai pusat perputaran. Karena pada benda (objek) tiga dimensi terdapat tiga buah sumbu koordinat, maka terdapat tiga macam rotasi yang dapat dilakukan yaitu:

1. Rotasi sumbu x



Gambar 2.2 Ilustrasi Rotasi Sumbu-X

Rotasi pada sumbu x menggunakan matriks sebagai berikut:

Perhatikan bahwa

$$Y_p = r \cdot \cos(\alpha + \omega) = r \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega - r \sin \alpha \sin \omega$$

$$Y'_p = r \cdot \cos \alpha$$

$$Z'_p = r \cdot \sin \alpha$$

$$Y_p = Y'_p \cos \omega - Z'_p \sin \omega$$

$$Z_p = r \cdot \sin(\alpha + \omega) = r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \omega + r \cos \alpha \sin \omega$$

$$Z_p = Z'_p \cos \omega + Y'_p \sin \omega$$

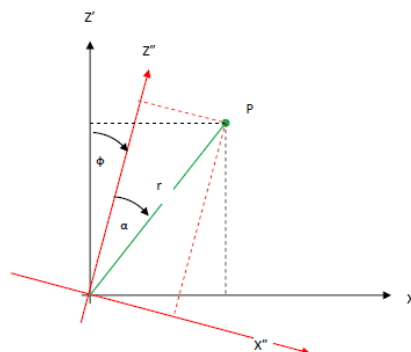
$$\begin{bmatrix} Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega \\ -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega \\ -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega \\ -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X'_p \\ Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.3)$$

2. Rotasi sumbu y



Gambar 2.3 Ilustrasi Rotasi Sumbu-Y

Rotasi pada sumbu y menggunakan matriks sebagai berikut:

Perhatikan bahwa

$$X'_p = r \cdot \sin(\alpha + \phi) = r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \phi + r \cos \alpha \sin \phi$$

$$Z'_p = r \cdot \cos(\alpha + \phi) = r \cdot \cos \alpha \cdot \cos \phi - r \sin \alpha \sin \phi$$

$$X''_p = r \sin \alpha$$

$$Z''_p = r \cos \alpha$$

$$X'_p = X''_p \cos \phi + Z''_p \sin \phi$$

$$Z'_p = Z''_p \cos \phi - X''_p \sin \phi$$

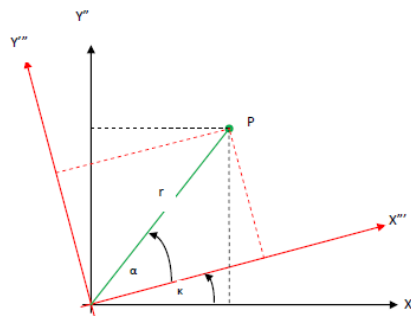
$$\begin{bmatrix} X'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X''_p \\ Z''_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X''_p \\ Z''_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X''_p \\ Z''_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_p \\ Z'_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X''_p \\ Y''_p \\ Z''_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_p \\ Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.4)$$

3. Rotasi sumbu z



Gambar 2.4 Ilustrasi Rotasi Sumbu-Z

Rotasi pada sumbu z menggunakan matriks sebagai berikut:

Perhatikan bahwa

$$X_p'' = r \cdot \cos(\alpha + \kappa) = r \cdot \cos \alpha \cdot \cos \kappa - r \sin \alpha \sin \kappa$$

$$Y_p'' = r \cdot \sin(\alpha + \kappa) = r \cdot \sin \alpha \cdot \cos \kappa + r \cos \alpha \sin \kappa$$

$$X_p'''' = r \cos \alpha$$

$$Y_p'''' = r \sin \alpha$$

$$X_p'' = X_p'''' \cos \kappa - Y_p'''' \sin \kappa$$

$$Y_p'' = Y_p'''' \cos \kappa + X_p'''' \sin \kappa$$

$$\begin{bmatrix} X_p'' \\ Y_p'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa \\ \sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p'''' \\ Y_p'''' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa \\ -\sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p'' \\ Y_p'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa \\ -\sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa \\ \sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p'''' \\ Y_p'''' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_p'''' \\ Y_p'''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa \\ -\sin \kappa & \cos \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p'' \\ Y_p'' \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} X_p'''' \\ Y_p'''' \\ Z_p'''' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p'' \\ Y_p'' \\ Z_p'' \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.5)$$

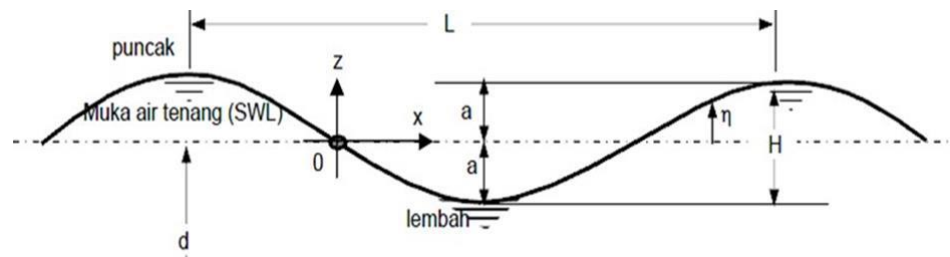
2.4 Gelombang Reguler

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 unntuk membuat penyederhanaan 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
7. Dasar laut dianggap datar, tetapi kedap, sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol.
8. Amplitudo gelombang adalah relatif kecil dibanding panjang gelombang
9. Gelombang dianggap memanjang

Karakteristik gelombang reguler yang memiliki tinggi dan periode yang relatif konstan dapat dilihat pada Gambar



Gambar 2.5 Gelombang Reguler

$$f(x) = A \cos(kx - \omega t) \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

Amplitudo gelombang (A) : ½ jarak tegak dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah (m)

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

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

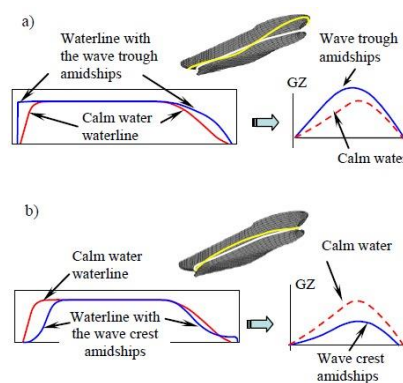
Periode Gelombang (T) : waktu yang ditempuh dari puncak ke puncak atau lembah ke lembah (s)

2.5 Stabilitas Kapal di Gelombang

Saat sebuah kapal berlayar melewati gelombang, bagian lambung kapal yang terendam akan mengalami perubahan. Perubahan ini dapat menjadi sangat signifikan jika panjang gelombang sebanding dengan panjang kapal. Fenomena ini terjadi ketika lembah gelombang terletak di tengah kapal dan berlaku untuk sebagian besar kapal *monohull*.

Bagian atas pada haluan kapal biasanya akan lebih lebar, menyebabkan penampang garis air lebih besar jika bagian atas kapal dari haluan terendam sebagian. Bagian atas pada buritan kapal umumnya lebih besar dibandingkan haluan kapal. Dengan demikian penampang garis air pada bagian buritan akan lebih besar jika bagian atas terendam.

Tidak seperti bagian haluan dan buritan, bagian tengah kapal adalah bagian yang mewakili *displacement* terbesar. Sehingga sangat sedikit terjadi perubahan lebar permukaan air kapal dengan lebar penampang pada posisi sarat. Ketika tinggi gelombang di bagian tengah kapal berada pada posisi rendah tetapi lebar penampang garis air tidak berubah secara signifikan.



Gambar 2.6 Penampang garis air di profil gelombang

Berdasarkan karakteristik hidrostatis kapal, dapat diketahui bahwa luas penampang garis air memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas kapal karena dipengaruhi oleh besarnya inersia penampang garis air. Jika luas penampang garis air berkurang maka besar momen pengembali akan berkurang.

$$GM = KB + BM - KG \dots\dots\dots(2.7)$$

Jika nilai KG bernilai konstan sepanjang waktu untuk setiap kondisi pemuatan. Sedangkan nilai KB akan mengalami peningkatan jika puncak gelombang berada pada bagian tengah kapal dan nilai KB akan mengalami penurunan jika lembah gelombang berada pada bagian tengah kapal

$$BM = \frac{I_y}{\nabla} \dots\dots\dots(2.8)$$

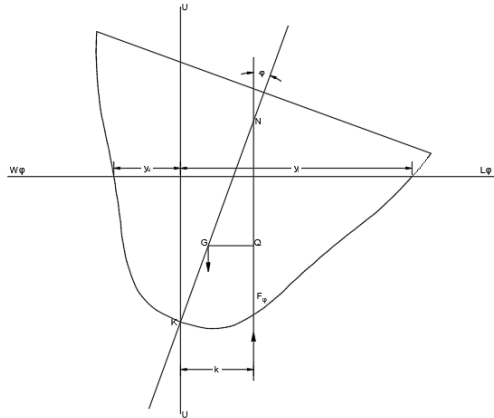
Perhatikan bahwa ∇ merupakan besar volume *displacement* kapal dan I_y adalah besar inersia penampang garis air

$$I_y = \iint_{AWL} y^2 dx dy \dots\dots\dots(2.9)$$

Jika nilai luas penampang garis air kecil akan mengakibatkan nilai BM yang kecil atau nilai MG yang negatif.

Perhatikan bahwa terdapat salah satu metode untuk menentukan besar lengan stabilitas kapal yaitu metode oleh Benjamin-Spence 1884. Dalam metode ini diasumsikan bahwa kapal dipotong sejajar dengan garis muat kapal. Dimana Gambar penampang yang lengkap, menunjukkan perpotongan badan kapal terhadap garis muat pada bagian *starboard* dan *port side*.

Metode ini bertujuan untuk menentukan jarak dari F_ϕ terhadap garis U-U (garis tegak lurus terhadap garis muat $W_\phi L_\phi$). Dimana garis tersebut melalui lunas



Gambar 2.7 Penerapan Metode Benjamin-Spence

Jika jarak k dapat diperoleh sehingga GZ dapat pula diperoleh dengan formula sebagai berikut:

$$GZ = k - GK \sin \varphi \dots\dots\dots(2.10)$$

Langkah berikutnya adalah mengGambarkan beberapa garis sejajar dengan garis muat dimana garis terendah terletak pada tangen terhadap penampang. Garis-garis sejajar tersebut mengGambarkan garis air untuk setiap sarat yang berbeda, sehingga untuk setiap garis air kita dapat menentukan nilai:

1. Luas penampang garis air
2. Momen statis luasan terhadap garis U-U

Dimana luas penampang dan momen statis luasan dapat diperoleh dengan formula sebagai berikut:

$$A_{W_{\varphi}L_{\varphi}} = \int_0^L (y_u + y_i) dx \dots\dots\dots(2.11)$$

dan

$$S_{u_{\varphi}} = \int_0^L \frac{1}{2} y_i^2 dx - \int_0^L \frac{1}{2} y_u^2 dx \dots\dots\dots(2.12)$$

$$S_{u_{\varphi}} = \frac{1}{2} \int_0^L (y_i^2 - y_u^2) dx \dots\dots\dots(2.13)$$

Untuk setiap luasan penampang di setiap garis air maka dapat diperoleh volume lambung kapal yang terbenam dan total momen volume terhadap garis U-U dapat diperoleh dengan membagi total momen volume dengan volume kapal yang terbenam. Sehingga, proyeksi horizontal dari jarak antara F_ϕ dan K, viz. k dapat dengan mudah diperoleh.

Perhatikan bahwa,

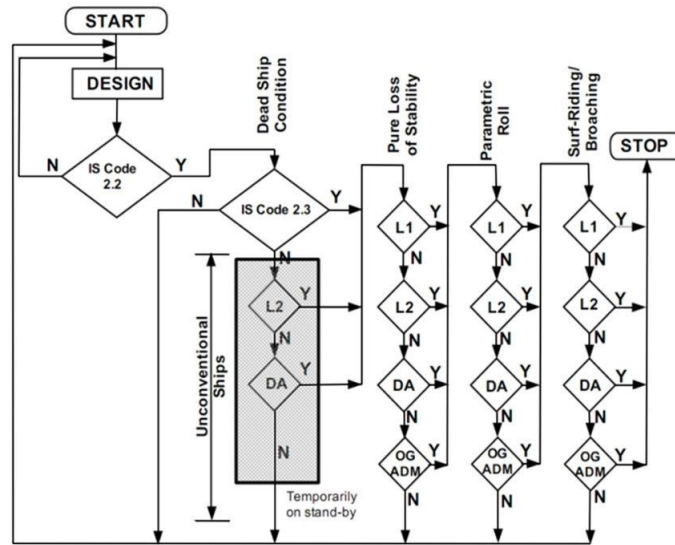
$$\int_0^z A_{W_\phi L_\phi} dz = \int_0^z dV_\phi = V_\phi \dots \dots \dots (2.14)$$

$$\int_0^z S_{u_\phi} dz = \int_0^z A_{W_\phi L_\phi} \cdot b_z dz = \int_0^z dV_\phi \cdot b_z = k_\phi V_\phi \dots \dots \dots (2.15)$$

Dengan mempertimbangkan hal diatas maka dapat dipehitungkan nilai luasan dan besar momen statis untuk setiap garis air dan di setiap keolengan kapal. Hasil dari perhitungan tersebut dapat digambarkan dalam sebuah diagram yang disebut diagram *panto carena*. Dimana diagram ini menggambarkan hubungan antara nilai $MK \sin \phi$ terhadap volume kapal

2.6 *Second Generation Intact Stability*

Stabilitas kapal adalah kriteria penting yang menjadi perhatian bagi perancang kapal dalam tahap desain. IS Code 2008 sebagai kriteria stabilitas kapal yang berlaku sampai saat ini dimana kecuali untuk kriteria cuaca IS Code 2008 hanya mempertimbangkan hidrostatika kapal. Hal ini tidak mencakup perilaku olah gerak kapal yang merupakan hal terpenting dalam konsep stabilitas kapal. IS Code 2008 selalu mempertimbangkan kapal dengan sudut trim yang dapat diabaikan. Pada kondisi arah datang gelombang yang berlawanan dengan arah gerak kapal (*head seas*), kapal dapat mengalami beberapa sudut trim yang signifikan yang dapat mempengaruhi besar lengan stabilitas kapal. Sehingga untuk peningkatan kriteria stabilitas kapal, IMO memperkenalkan *second generation intact stability*. (Ariffin A, 2015)



Gambar 2.8 Flow Chart Second Generation Intact Stability

Pengembangan *second generation intact stability* berfokus pada lima mode kegagalan stabilitas dinamis dengan cara melakukan perhitungan fenomena gerak dinamis kapal berdasarkan satuan waktu. (IMO, 2013a). Satu diantara lima mode tersebut adalah *Pure Loss Stability*.

Berdasarkan regulasi IMO *Interim Guidelines On The Second Generation Intact Stability Criteria* (MSC 1/Circ.1627). Sebuah kapal dianggap tidak rentan terhadap *pure loss stability* jika:

Kriteria level 1 untuk *pure loss stability failure mode*

$$GM_{min} \geq R_{PLA} \text{ dan } \frac{\nabla_D - \nabla}{A_w(D-d)} \geq 1.0 \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

$$R_{PLA} = 0.05 \text{ (m); dan}$$

$$GM_{min} = \text{nilai minimum dari tinggi metasentra}$$

$$= KB + \frac{I_{TL}}{\nabla} - KG$$

$$I_{TL} = \text{Momen inersia transversal penampang garis air}$$

Kriteria level 2 untuk *pure loss stability failure mode*

$$\max(CR_1, CR_2) \leq R_{PL0} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

$$R_{PL0} = 0.05; \text{ dan}$$

$$CR_1 = \sum_{i=1}^N W_i C1_i$$

$C1_i$ = Kriteria berdasarkan nilai *the angle of vanishing stability*, φ_v

$$= \begin{cases} 1 & \varphi_v < K_{PL1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$K_{PL1} = 30 \text{ (deg)}$$

$$CR_2 = \sum_{i=1}^N W_i C2_i$$

$C2_i$ = Kriteria berdasarkan kurva lengan stabilitas, φ_v , *under action of heeling lever specified by I_{PL2}*

$$= \begin{cases} 1 & \varphi_v < K_{PL1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

K_{PL1} = 15 derajat untuk kapal penumpang
25 derajat untuk tipe kapal lainnya

$$I_{PL2} = 8(H_i/\lambda)dFn^2$$