

SKRIPSI

**ANALISA FENOMENA SLOSHING PADA TANGKI MUAT KAPAL
TANKER TERHADAP KARAKTERISTIK GELOMBANG**

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD AQLI AKBAR

D081 17 1016



DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**“ANALISA FENOMENA SLOSHING PADA TANGKI MUAT KAPAL
TANKER TERHADAP KARAKTERISTIK GELOMBANG”**

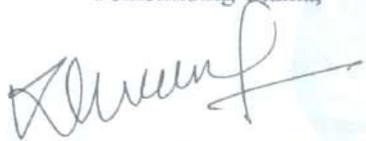
Disusun dan diajukan oleh:

**MUHAMMAD AQLI AKBAR
D081171016**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi program Sarjana Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 18 Juli 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

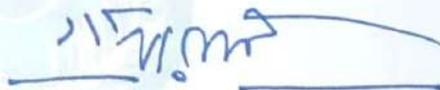
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D
NIP.197201181998021001

Pembimbing Pendamping,



Muh. Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D
NIP.197606062005011003

Ketua Departemen Teknik Kelautan,



Dr. Ir. Chairul Photonan, ST., MT.
NIP. 197506052002121003

LEMBAR PENGESAHAN KOMISI PENGUJI

**"ANALISA FENOMENA SLOSHING PADA TANGKI MUAT KAPAL
TANKER TERHADAP KARAKTERISTIK GELOMBANG"**

Disusun dan diajukan oleh:

MUHAMMAD AQLI AKBAR
D081171016

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Tanggal : 18 Juli 2022

Di : Gowa

Dengan Panel Ujian Skripsi

1. Ketua : Prof. Daeng Paroka, ST., MT., Ph.D
2. Sekertaris : Muhammad Zubair Muis Alie, ST., MT., Ph.D
3. Anggota 1 : Ir. Juswan, MT.
4. Anggota 2 : Habibi, ST., MT

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Kelautan


Dr. Ir. Chairul Paotonan, ST., MT.
Nip: 197506052002121003

PERNYATAAN KEASLIAN SKIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Aqli Akbar
NIM : D081171016
Program Studi : Teknik Kelautan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa skripsi saya berjudul

“Analisa Fenomena Sloshing Pada Tangki Muat Kapal Tanker Terhadap Karakteristik Gelombang”

Adalah skripsi yang saya tulis ini benar-benar hasil dan karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari saya terbukti atau tidak dapat dibuktikan bahwa atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 18 Juli 2022

Yang menyatakan,


Muhammad Aqli Akbar

ABSTRAK

Muhammad Aqli Akbar, D081171016. “Analisa Fenomena sloshing pada tangki muat kapal tanker terhadap karakteristik gelombang.” Di bawah bimbingan **Daeng Paroka** dan **Muhammad Zubair Muis Alie**.

Penggunaan kapal *tanker* memiliki peranan yang sangat penting dalam industri maritim. Salah satu bagian yang penting pada kapal ini adalah tangki yang didesain sebagai wadah tempat menyimpan muatan. Sebagai media penyimpanan, tangki akan selalu mendapatkan beban yang berasal dari dalam maupun beban yang berasal dari luar tangki, sloshing merupakan salah satu beban yang berasal dari dalam. Sloshing timbul akibat adanya gerakan kapal/tangki mengakibatkan gerak bebas fluida berosilasi menghantam dinding tangki. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh muatan terhadap gerakan dan beban sloshing pada tangki dengan variasi jumlah muat. Model tangki yang digunakan mengambil referensi kapal tanker general purpose yang mengangkut minyak mentah dalam kondisi dua dimensi persegi panjang dibagian (midship) dengan lebar 8,6 m dan tinggi 8 m pada sisi kiri dan kanan centerline. Amplitudo gelombang yang akan dipakai dalam penelitian ini terdiri dari tiga variasi yaitu 2,43 m, 2,93 m dan 3,43 m. Variasi muatan yang digunakan adalah volume muatan 10% (ketinggian 0.8 m), 30% (ketinggian 2,4 m), 50% (ketinggian 4 m), 70% (ketinggian 5,6 m) dan 90% (ketinggian 7,8 m). Simulasi dilaksanakan dengan metode numerik yaitu Computational Fluid Dynamic (CFD) menggunakan software Ansys Fluent. Gerak tangki didasarkan dari gerakan kapal yang dibatasi pada gerak *heav* dan *roll*. Nilai tekanan yang dihasilkan menunjukkan bahwa semakin besar ketinggian muatan fluida tangki dan semakin besar nilai amplitude gelombang maka akan semakin besar pula nilai tekanan yang terjadi pada dinding tangki.

Kata Kunci: *Heaving*, *Rolling*, *Sloshing*, Tekanan, dan Tangki.

ABSTRACT

Muhammad Aqli Akbar, D081171016. *"Analysis of the sloshing phenomenon on tanker cargo tanks against wave characteristics." Under the guidance of Daeng Paroka and Muhammad Zubair Muis Alie.*

The use of tankers has a very important role in the maritime industry. One of the important parts of this ship is the tank which is designed as a container for storing cargo. As a storage medium, the tank will always get a load that comes from inside or from outside the tank, sloshing is one of the loads that comes from inside. Sloshing arises due to the movement of the vessel/tank resulting in free motion of the oscillating fluid hitting the tank wall. The purpose of this study was to analyze the effect of the load on the movement and sloshing load on the tank with variations in the number of loads. The tank model used as a reference is a general purpose tanker that transports crude oil in a two-dimensional rectangular condition (midship) with a width of 8.6 m and a height of 8 m on the left and right sides of the centerline. The wave amplitude that will be used in this study consists of three variations, namely 2.43 m, 2.93 m and 3.43 m. The load variations used are 10% (0.8 m height), 30% (2.4 m height), 50% (4 m height), 70% (5.6 m height) and 90% (7.8 m height). The simulation was carried out using a numerical method, namely Computational Fluid Dynamic (CFD) using Ansys Fluent software. The movement of the tank is based on the movement of the ship which is limited to heave and roll motion. The resulting pressure value indicates that the greater the height of the tank fluid charge and the greater the wave amplitude value, the greater the pressure value that occurs on the tank wall.

Keywords: Heaving, Rolling, Sloshing, Pressure, and Tank.

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“ANALISA FENOMENA SLOSHING PADA TANGKI MUAT KAPAL TANKER TERHADAP KARAKTERISTIK GELOMBANG”** yang disusun guna memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Serta tidak lupa shalawat serta salam tetap selalu tucurahkan kepada *Rasulullah* Muhammad SWT, sahabat, keluarga serta para ummatnya.

Penulis dengan segala kerendahan hati menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah senantiasa memberi bantuan berupa pikiran, jiwa, dan raganya kepada penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini, terutama kepada:

1. Ayahanda **La Boy** dan Ibunda **Harniwaty**, orang tua tercinta kami yang senantiasa mencurahkan kasih sayang, doa dan dukungan serta motivasi yang tiada hentinya kepada penulis.
2. Bapak **Prof. Daeng Paroka S.T.,M.T.,Ph.D.** selaku Pembimbing I yang telah berkenan memberikan segenap waktu dan pengetahuannya kepada Penulis dalam penyelesaian Skripsi ini, semoga ilmu yang telah diberikan berkah dan teramalkan.
3. Bapak **Muhammad Zubair Muis Alie, S.T., M.T., Ph.D.** selaku Pembimbing II senantiasa memberikan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini dan juga bimbingan dan arahan selama berada dikampus Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.
4. Bapak **Ir. Juswan M.T** dan Bapak **Habibi, ST., M.T.** selaku Penguji, yang telah menghantarkan penulis memperoleh gelar akademik pada Departemen Teknik Kelautan.
5. Bapak **Dr. Chairul Paotonan, S.T., M.T.** selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

6. **Dosen–Dosen Departemen Teknik Kelautan** yang telah memberikan ilmu serta pengalamannya yang sangat bermanfaat selama perkuliahan.
7. **Staf Tata Usaha Departemen Teknik Kelautan**, yang sangat membantu Penulis baik kebutuhan administrasi untuk menyelesaikan studi maupun kebutuhan perkuliahan lainnya.
8. Teman-teman Mahasiswa khususnya **Teknik Kelautan 2017**, yang selalu menemani dan mengisi hari-hari perkuliahan menjadi sangat menyenangkan.
9. Kepada orang-orang yang telah mendukung Penulis yang tidak sempat disebutkan namanya satu persatu, Penulis mengucapkan terima kasih banyak.

Penulis menyadari dalam penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat penulis harapkan sebagai bahan untuk menutupi kekurangan dari penulisan skripsi ini. Penulis berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu Teknik Kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Gowa, 18 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| LEMBAR PENGESAHAN | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN KOMISI PENGUJI | iii |
| PERNYATAAN KEASLIAN SKIPSI..... | iv |
| <i>ABSTRACT</i> | vi |
| KATA PENGANTAR..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR GAMBAR..... | xi |
| DAFTAR TABEL | xii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3. Tujuan Penulisan..... | 2 |
| 1.4. Manfaat Penulisan..... | 2 |
| 1.5. Batasan Masalah..... | 3 |
| 1.6. Sistematika Penulisan..... | 3 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1. Kapal Tanker..... | 5 |
| 2.2. Teori Gelombang | 6 |
| 2.3. Gerakan Kapal Terhadap Gelombang | 10 |
| 2.4. Sloshing | 12 |
| 2.5. Penilaian Beban Sloshing | 13 |
| 2.6. Persamaan Navier-Stokes | 14 |
| 2.7. Computational Fluid Dynamic..... | 16 |
| BAB 3 METODE PENELITIAN..... | 21 |
| 3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian | 22 |
| 3.2. Teknik Pengumpulan Data | 22 |
| 3.3. Metode Analisa Data | 23 |
| 3.4. Penggunaan User Define Function (UDF) | 30 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN | 32 |
| 4.1. Penentuan Node Pressure pada Tangki | 32 |
| 4.2. Gerakan Tangki dengan Dynamic Mesh | 33 |
| 4.3. Simulasi Sloshing F 0,675 untuk amplitude gelombang 2,43 m | 34 |
| 4.4. Simulasi Sloshing F 0,672 untuk amplitudo gelombang 2,93 m | 47 |
| 4.5. Simulasi Sloshing F 0.672 untuk amplitudo gelombang 3.43 m | 60 |
| 4.6. Simulasi Sloshing F 1,675 untuk amplitude gelombang 2,43 m. | 73 |

| | |
|---|-----|
| 4.7. Simulasi Sloshing F 1,672 untuk amplitudo gelombang 2,93 m | 86 |
| 4.8. Simulasi Sloshing F 1.672 untuk amplitudo gelombang 3.43 m | 99 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN..... | 113 |
| 5.1. Kesimpulan..... | 113 |
| 5.2. Saran..... | 113 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 114 |
| LAMPIRAN..... | 116 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|-----|
| Gambar 2.1 Definisi Gelombang Reguler..... | 7 |
| Gambar 2.2 Gelombang Reguler di Permukaan Laut..... | 7 |
| Gambar 2.3 Pengaruh Kedalaman Air pada Kinematika Gelombang..... | 8 |
| Gambar 3.1 Flowchart penelitian | 21 |
| Gambar 3.2 Jendela kerja maxsurf modeler (Mahmud, 2018)..... | 22 |
| Gambar 3.3 Jendela kerja maxsurf motion | 24 |
| Gambar 3.4. Input tab analisis maxsurf motion..... | 26 |
| Gambar 3.5 Tampilan grafik RAO | 28 |
| Gambar 3.6 Tampilan nilai RAO | 28 |
| Gambar 3.7 UDF Untuk Gerakan Kapal Pada Amplitude Gelombang 2,43 m | 30 |
| Gambar 3.8 UDF Untuk Gerakan Kapal Pada Amplitude Gelombang 2,93 m | 31 |
| Gambar 3.9 UDF Untuk Gerakan Kapal Pada Amplitude Gelombang 3,43 m | 31 |
| Gambar 4.1 Node Pressure pada Geometri Tangki..... | 32 |
| Gambar 4.17 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi A | 45 |
| Gambar 4.18 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi B | 46 |
| Gambar 4.19 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi C | 47 |
| Gambar 4.38 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi A | 58 |
| Gambar 4.39 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi B | 59 |
| Gambar 4.40 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi C | 60 |
| Gambar 4.59 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi A | 71 |
| Gambar 4.60 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi B | 72 |
| Gambar 4.61 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi C | 73 |
| Gambar 4.101 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi A | 84 |
| Gambar 4.102 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi B | 85 |
| Gambar 4.103 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi C | 86 |
| Gambar 4.101 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi A | 97 |
| Gambar 4.102 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi B | 98 |
| Gambar 4.103 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi C | 99 |
| Gambar 4.122 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi A | 110 |
| Gambar 4.123 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi B | 111 |
| Gambar 4.124 Grafik hubungan tekanan maksimum dan volume sisi C..... | 112 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| tabel 3.1 data gelombang alur pelayaran..... | 23 |
| tabel 3.2 rasio tinggi gelombang dan periode..... | 25 |
| Tabel 4.1 Koordinat <i>Node Pressure</i> | 33 |
| Tabel 4.2 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 10% | 35 |
| Tabel 4.3 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 30% | 37 |
| Tabel 4.4 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 50% | 39 |
| Tabel 4.5 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 70% | 41 |
| Tabel 4.6 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 90% | 43 |
| Tabel 4.7 Nilai tekanan Maksimum pada sisi A..... | 44 |
| Tabel 4.8 Nilai tekanan Maksimum pada sisi C..... | 46 |
| Tabel 4.9 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 10% | 48 |
| Tabel 4.10 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 30% | 50 |
| Tabel 4.11 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 50% | 52 |
| Tabel 4.12 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 70% | 54 |
| Tabel 4.13 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 90% | 56 |
| Tabel 4.14 Nilai tekanan Maksimum pada sisi A..... | 57 |
| Tabel 4.15 Nilai tekanan Maksimum pada sisi B..... | 58 |
| Tabel 4.16 Nilai tekanan Maksimum pada sisi C..... | 59 |
| Tabel 4.17 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 10% | 61 |
| Tabel 4.18 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 30% | 63 |
| Tabel 4.19 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 50% | 65 |
| Tabel 4.20 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 70% | 67 |
| Tabel 4.21 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 90% | 69 |
| Tabel 4.22 Nilai tekanan Maksimum pada sisi A..... | 70 |
| Tabel 4.23 Nilai tekanan Maksimum pada sisi B..... | 71 |
| Tabel 4.24 Nilai tekanan Maksimum pada sisi C..... | 72 |
| Tabel 4.25 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 10% | 74 |
| Tabel 4.26 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 30% | 76 |
| Tabel 4.27 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 50% | 78 |
| Tabel 4.28 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 70% | 80 |

| | |
|---|-----|
| Tabel 4.29 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 90% | 82 |
| Tabel 4.30 Nilai tekanan Maksimum pada sisi A..... | 83 |
| Tabel 4.31 Nilai tekanan Maksimum pada sisi B..... | 84 |
| Tabel 4.32 Nilai tekanan Maksimum pada sisi C..... | 85 |
| Tabel 4.33 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 10% | 87 |
| Tabel 4.34 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 30% | 89 |
| Tabel 4.35 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 50% | 91 |
| Tabel 4.36 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 70% | 93 |
| Tabel 4.37 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 90% | 95 |
| Tabel 4.38 Nilai tekanan Maksimum pada sisi A..... | 96 |
| Tabel 4.39 Nilai tekanan Maksimum pada sisi B..... | 97 |
| Tabel 4.40 Nilai tekanan Maksimum pada sisi C..... | 98 |
| Tabel 4.41 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 10% | 100 |
| Tabel 4.42 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 30% | 102 |
| Tabel 4.43 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 50% | 104 |
| Tabel 4.44 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 70% | 106 |
| Tabel 4.45 Render gerakan dan distribusi tekanan volume 90% | 108 |
| Tabel 4.46 Nilai tekanan Maksimum pada sisi A..... | 109 |
| Tabel 4.47 Nilai tekanan Maksimum pada sisi B..... | 110 |
| Tabel 4.48 Nilai tekanan Maksimum pada sisi C | 111 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Minyak bumi seperti halnya dengan gas alam, terbentuk secara alamiah dan dieksplorasi dari lokasi sumur minyak yang terletak jauh dari konsumen. Penggunaan pipa sebagai sistem transmisi dan distribusi, memiliki beberapa kekurangan yaitu hanya untuk jarak yang relatif dekat, dan jalur bersifat tetap (fix distribution system), dengan kata lain masih diperlukan sarana distribusi alternatif yang mampu mengangkut gas dalam jumlah besar dan tidak terikat batasan jarak. Cara yang paling efektif untuk mengangkut muatan yaitu dalam bentuk cair dengan menggunakan kapal tanker dalam ukuran tertentu.

Dengan demikian penggunaan kapal tanker memiliki peranan yang sangat penting dalam industri maritim. Salah satu bagian yang penting pada kapal ini adalah tangki yang didesain sebagai wadah tempat menyimpan muatan. Oleh karena itu, desain dari tangki harus diperhatikan sedemikian rupa agar efek kerusakan pada tangki yang ditimbulkan akibat faktor internal atau eksternal kapal dapat diminimalisir.

Masalah yang sering muncul dalam pendistribusian muatan pada kapal tanker adalah adanya pergerakan fluida di dalam tangki akibat gerakan kapal saat berlayar. Pergerakan fluida yang berada di dalam sebuah tangki disebut *Sloshing Impact*. Pengaruh *sloshing* berupa beban *impact* dapat menyebabkan kerusakan struktur tangki (Lee S.J, 2005).

Karakteristik gelombang *sloshing* permukaan bebas dalam tangki sangat dipengaruhi oleh ketinggian pengisian muatan (*filling level*). Perencanaan volume ruang muat pada umumnya tidak lebih dari 98% dari volume total tangki pada suhu tertentu berdasarkan jenis muatan yang diangkut. Sedangkan pada kondisi kapal kosong, fluida didalam tangki harus disisakan pada level *flammability range* (dalam volume : 5% - 15%). Hal ini bertujuan sebagai salah satu komponen dalam sistem pendinginan tangki saat kapal berada dalam kondisi tanpa muatan. Kedua kondisi volume muatan dalam tangki tersebut akan menghasilkan efek gerakan *sloshing* pada pelayaran samudra (Shaleh, 2015).

Ada beberapa kerusakan yang diakibatkan oleh *sloshing*. Salah satu kapal yang pernah mengalaminya adalah OBO 9000 DWT dengan membawa muatan cair yang terisi 50% tangki. Kapal ini mengalami gerakan *rolling* yang ekstrim ketika melakukan pelayaran (Hakim., 2017)

1.2. Perumusan Masalah

Dengan memperhatikan pokok permasalahan yang dibahas pada latar belakang, rumusan masalah terdiri sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik gerak kapal terhadap gelombang pada alur pelayaran?
2. Berapa besar *pressure* maksimum yang terjadi pada dinding tangki muatan kapal tanker akibat *sloshing* yang ditimbulkan dari gerakan *rolling*, dan *heaving* kapal?
3. Bagaimana pengaruh variasi *filling level* terhadap besarnya *pressure* pada dinding tangki muatan kapal tanker akibat *sloshing*?

1.3. Tujuan Penulisan

Dengan memperhatikan pokok permasalahan yang telah dibahas pada latar belakang, tujuan penulisan terdiri sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik respon gerak kapal pada berbagai kondisi lingkungan pelayaran.
2. Mengetahui tekanan maksimum pada dinding tangki akibat *sloshing* pada berbagai kondisi perairan.
3. Mendapatkan pengaruh *filling level* terhadap distribusi tekanan pada dinding tangki pada variasi kondisi perairan.

1.4. Manfaat Penulisan

Hasil penelitian diharapkan dapat memberi manfaat kepada seluruh pihak yang terkait dengan penelitian tugas akhir ini, terutama pada pihak yang terkait secara langsung, adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Sebagai pedoman bagi awak kapal dalam pengaturan muatan pada setiap tangki.
2. Menjadi pertimbangan tambahan dalam merencanakan konstruksi dari tangki muatan pada kapal tanker
3. Menjadi acuan untuk penelitian lanjutan yang berhubungan dengan masalah *sloshing* pada kapal tanker atau muatan cair lainnya.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan pada penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Dimensi utama kapal yang dianalisa meliputi; LOA 108 m; LBP 101,85 m; B 19,2 m; H 9,3 m; T 6 m; dan Displacement 9863 ton.
2. Tangki yang dianalisa merupakan tipe tangki bentuk segiempat, yang terletak pada bagian midship dengan dimensi panjang 17,2 m dan tinggi 8 m yang disimulasikan dengan model penampang dua dimensi.
3. Gerakan kapal yang diteliti adalah gerakan *rolling* dan *heaving* kapal yang analisisnya dilakukan dengan software *maxsurf motion*.
4. Analisa *sloshing* gerakan muatan dilakukan dengan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) tanpa mempertimbangkan konstruksi dan material tangki.
5. Variasi *filling level* fluida muatan dalam tangki terdiri dari 10%, 30%, 50%, 70% dan 90% kapasitas muat.
6. Material properti fluida adalah property material fluida, *fuel oil liquid* (minyak mentah).

1.6. Sistematika Penulisan

Hasil penelitian akan dituang dalam tulisan secara terperinci dan tersusun sebagai berikut:

BAB 1 : PENDAHULUAN

Dalam bab ini dijelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini dijabarkan teori-teori gambaran wilayah penelitian, berbagai literatur yang menunjang pembahasan dan digunakan sebagai dasar pemikiran dari penelitian ini.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini dikemukakan lokasi atau daerah penelitian, waktu penelitian, jenis penelitian, jenis data, metode pengolahan data, dan kerangka pikir penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan uraian mengenai pembahasan permasalahan yang diteliti, berupa hasil-hasil simulasi dan data-data mengenai pengaruh fenomena sloshing pada tangki terhadap frekuensi gelombang.

BAB V : PENUTUP

Dalam bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran-saran yang direkomendasikan penulis terkait penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kapal Tanker

Kapal tanker adalah kapal yang dirancang untuk mengangkut minyak atau produk turunannya. Seperti dijelaskan oleh Annex II Marpol 73/78, apabila kapal mengangkut muatan atau bagian dari muatan minyak secara curah.

Kapal tanker adalah sebuah kapal yang dibangun untuk mengangkut muatan cairan minyak yang tidak terbungkus, termasuk sebuah pengangkut kombinasi (*combination carrier*) jika digunakan untuk keperluan ini (International Chamber of Shipping, 2006).

Menurut G.S. Marton dalam buku *Tanker Operation Fifth Edition* dalam industri pelayaran ada beberapa kategori kapal tanker (Marton, 2007).

- a. Berdasarkan muatan yang diangkut
 - 1) *Crude-oil Carriers* adalah kapal tanker yang digunakan untuk angkutan minyak mentah.
 - 2) *Black-oil Product Carriers* adalah kapal tanker yang mengutamakan mengangkut minyak hitam seperti: MDF (*Marine Diesel Fuel-Oil*), dan sejenisnya.
 - 3) *Light-oil Product Carriers* Adalah kapal tanker yang digunakan untuk mengangkut minyak petroleum bersih seperti kerosine, gas-oil, RMS (Reguler Mogas) dan sejenisnya
- b. Berdasarkan ukurannya
 - 1) *Handy-size Tankers* adalah kapal tanker yang mempunyai bobot 5.000-35.000 Ton. Umumnya digunakan untuk mengangkut minyak jadi (Product oil)
 - 2) *General Purpose Tankers* memiliki bobot 10.000 MT – 25.000 MT dwt dan umumnya di pakai untuk mengangkut refind product.
 - 3) *Medium-size Tankers* adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati antara 35.000-160.000 Ton. Dan umumnya digunakan untuk mengangkut minyak mentah, atau kadang berfungsi sebagai “mother ship” jika digunakan mengangkut minyak jadi.

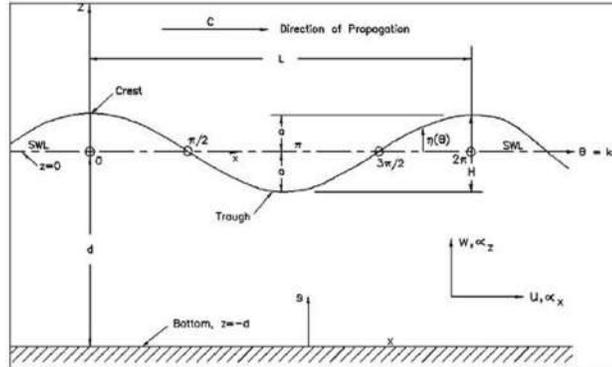
- 4) VLCC (*Very-Large Crude Carriers*) adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati antara 160.000-300.000 Ton. Umumnya digunakan untuk crude oil saja.
- 5) ULCC (*Ultra-Large Crude Carriers*) adalah kapal tanker yang mempunyai bobot mati lebih dari atau sama dengan 300.000 ton. Umumnya digunakan untuk mengangkut crude oil saja.

2.2. Teori Gelombang

Dalam pergerakan tangki yang menghasilkan *sloshing* yang diakibatkan gerakan kapal oleh gelombang, maka perlu diketahui bagaimana karakteristik gerakan gelombang yang menggerakkan kapal tersebut. Gelombang yang didefinisikan sebagai perubahan bentuk karena gerakan permukaan air. Selanjutnya setiap gelombang yang dimaksudkan adalah gelombang air laut. Sebelum mempelajari lebih jauh mengenai gelombang, lebih dahulu diperkenalkan hal-hal yang berhubungan dengan gelombang sebagai berikut (Bhattacharya, R, 1978)

- a. Puncak Gelombang (*Crest*) adalah titik dimana permukaan air berada pada elevasi tertinggi.
- b. Lembah Gelombang (*Trough*) adalah titik dimana permukaan air berada pada elevasi terendah.
- c. Garis Datum adalah garis datar permukaan air (diambil secara statistik) pada waktu air tenang.
- d. Elevasi Gelombang (ζ) adalah jarak suatu titik pada permukaan gelombang dengan garis datum pada suatu waktu tertentu.
- e. Amplitudo Gelombang (ζ_w) adalah garis vertikal antara titik tertinggi atau titik terendah dengan garis datum.
- f. Panjang Gelombang (λ) adalah jarak dari puncak (lembah) gelombang dengan puncak (lembah) gelombang berikutnya.
- g. Kecepatan Gelombang (V) adalah perubahan jarak yang ditempuh suatu titik persatuan waktu.
- h. Percepatan gelombang (V') adalah perubahan kecepatan gelombang itu sendiri persatuan waktu
- i. Frekuensi Gelombang (ω) adalah banyaknya puncak (lembah) gelombang

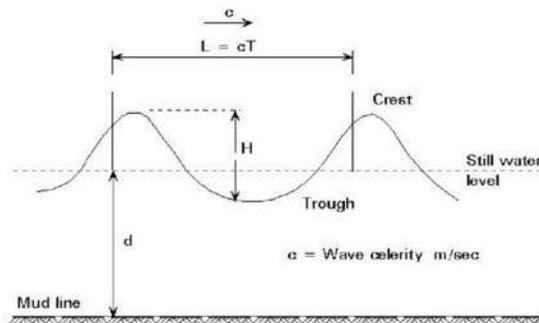
yang dilalui oleh suatu titik per satuan waktu



Gambar 2.1. Definisi gelombang reguler (Bhattacharrya, 1978)

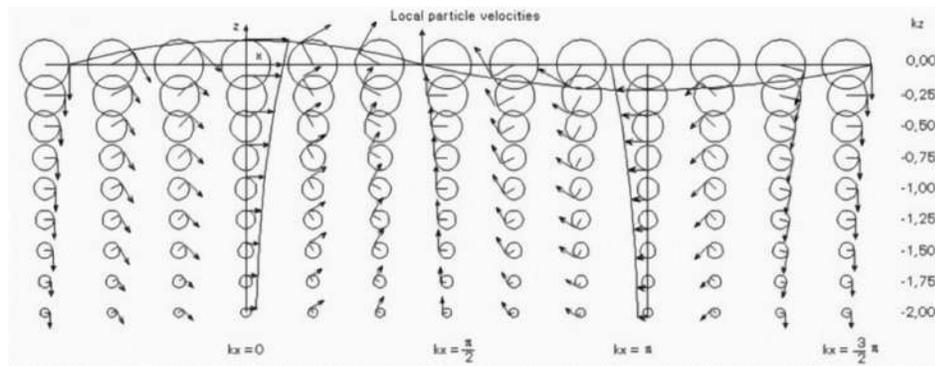
2.2.1. Gelombang Laut

Gelombang laut memiliki kondisi yang berbeda-beda di setiap tempat tergantung dari kondisi alam yang mempengaruhinya. Gelombang laut dipengaruhi oleh dalam atau tidaknya suatu perairan. Oleh karena itu bentuk dan sifat gelombang sangatlah kompleks. Gelombang dibedakan menjadi dua macam, yaitu gelombang *sinusoidal* dan gelombang *trochoidal*. Karena jenis gelombang tersebut sangat kompleks maka untuk melakukan perhitungan ilmiah dilakukan pendekatan agar dapat digambarkan sifat dari gelombang yang digunakan. Gelombang *sinusoidal* adalah gelombang harmonik yang mengikuti fungsi sinus, bagian puncak dan lembah gelombang mempunyai bentuk yang sama. Sedangkan gelombang *trochoidal* mempunyai puncak gelombang yang runcing dengan lembah gelombang yang datar dan lebih panjang. Jenis gelombang ini lebih sulit diterapkan dalam perhitungan meskipun bentuknya lebih mendekati bentuk gelombang sesungguhnya (Bhattacharrya, R, 1978).



Gambar 2.2. Gelombang reguler di permukaan laut (Bhattacharrya, 1978)

Gelombang diasumsikan pada perairan dalam sehingga pengaruh dasar (kedalaman) tidak terjadi atau diabaikan. Selain itu lebar perairan tak terbatas sehingga pengaruh sisi perairan kecil. Teori gelombang sangat berbeda dengan banyak variasi yang kompleks dikembangkan atas dasar asumsi sederhana, sesuai untuk rentang yang berbeda dari parameter gelombang. Di antara teori yang paling umum adalah: teori *Airy linear*, teori *Stokes*, teori gelombang *soliter*, teori *cnoidal*, teori aliran fungsi *Dean* dan teori numerik dengan *Chappear*. Misalnya hasil dari teori gelombang linier untuk kedalaman terbatas dan kondisi air yang dalam. Jalur partikel sesuai yang diilustrasikan di bawah ini. Perhatikan pengaruh kuat dari kedalaman air pada kinematika gelombang.



Gambar 2.3. Pengaruh kedalaman air pada kinematika gelombang (Bhattacharya, R, 1978)

Keadaan laut atau *Sea state* adalah referensi numerik yang umum digunakan untuk mengukur dan menjelaskan tingkat keganasan lautan atau *sea severity* pada suatu waktu tertentu. Pada awalnya ukuran ini didasarkan pada pengalaman yang diperoleh oleh para pelaut yang berlayar di lautan dunia. Para pelaut melakukan pengamatan secara visual pada karakteristik fluktuasi air laut, dan mengkorelasikannya dengan perkiraan kecepatan angin yang terkait. Mereka memakai hasil pengamatan visual dan perkiraan kecepatan angin untuk membuat laporan ke pihak berwenang di darat, atau lokasi lain di laut. (Djatkiko, 2012).

Pada akhirnya, dikarenakan banyaknya laporan tentang keadaan laut, dengan data berupa perkiraan tinggi gelombang dan kecepatan angin kemudian dikumpulkan, dan secara resmi digunakan oleh *World Meteorological Organization* untuk menyusun suatu acuan keadaan laut atau *sea state code*, seperti yang

ditunjukkan pada Tabel 2.1. Dari berbagai data yang terkumpul dan kemudian dikaji, ternyata tinggi gelombang observasi pada umumnya mempunyai harga yang mendekati tinggi gelombang signifikan H_s . Oleh karena itu, sea state code pada Tabel 2.1 tidak dikuantifikasikan berdasarkan tinggi gelombang observasi, namun berdasarkan tinggi gelombang signifikan (Djarmiko, 2012).

Tabel 2.1. Klasifikasi sea state menurut WMO

| Sea State Code | Signikan Wave Height (m) | | Description |
|----------------|--------------------------|-----------|-------------------|
| | Range | Mean | |
| 0 | 0 | 0 | Calm (glassy) |
| 1 | 0.0-0.1 | 0.05 | Calm (rippled) |
| 2 | 0.1-0.5 | 0.3 | Smooth (waveless) |
| 3 | 0.5-1.25 | 0.875 | Slight |
| 4 | 1.25-2.5 | 1.875 | Moderate |
| 5 | 2.5-4.0 | 3.25 | Rough |
| 6 | 4.0-6.0 | 5.0 | Very Rough |
| 7 | 6.0-9.0 | 7.5 | High |
| 8 | 9.0-14.0 | 11.5 | Very High |
| 9 | Over 14.0 | Over 14.0 | Phenomenal |

Sumber: Djarmiko, 2012

2.2.2. Frekuensi Gelombang

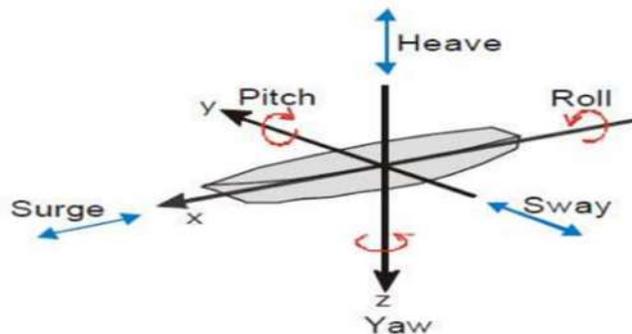
Frekuensi gelombang merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi perilaku bangunan apung yang bergerak, salah satunya adalah kapal. Hal tersebut dikarenakan oleh adanya perubahan frekuensi pada nilai tertentu akan menimbulkan kondisi resonansi atau magnifikasi respons. Perubahan frekuensi ini tidak lain adalah karena adanya kecepatan relatif antara gelombang dan kapal yang melaju. Sebagai akibatnya, perubahan tersebut akan memberi pengaruh terhadap hasil-hasil perhitungan parameter-parameter ataupun koefisien hidrodinamika, yang akhirnya memberikan hasil akhir berupa respons yang berbeda-beda pula (Djarmiko, 2012).

Frekuensi yang berubah karena gelombang berpapasan dengan kapal yang sedang melaju disebut frekuensi gelombang papasan atau *encountering wave frequency*, sering disingkat sebagai frekuensi papasan atau *encountering frequency*, yang diberikan notasi sebagai ω_e . (Bhattacharya, R, 1978)

2.3. Gerakan Kapal Terhadap Gelombang

Sebuah kapal yang bergerak di permukaan laut hampir selalu dalam gerakan *osilasi*. Berbagai jenis gerakan *osilasi* yang dialami kapal dapat dijelaskan dengan bantuan Gambar 2.4, yang menunjukkan enam jenis gerakan, tiga translasi dan tiga rotasi terhadap tiga sumbu utama (Shaleh, 2015).

Seperti terlihat pada gambar 2.4, metode pembagian komponen yang pertama adalah komponen gerakan translasi, yaitu *surging* terhadap sumbu-X, *swaying* terhadap sumbu lateral-Y, *heaving* terhadap sumbu vertikal-Z. Secara berurutan terhadap sumbu yang sama adalah gerakan *rotasi*, yaitu *rolling*, *pitching*, *yawing* (Shaleh, 2015).



Gambar 2.4. Notasi umum dan konvensi simbol terhadap deskripsi olah gerak kapal. (Sholeh, 2015)

Terdapat tiga macam gerakan dari enam macam gerakan diatas yang termasuk dalam gerakan osilasi murni, yaitu *heave*, *roll* dan *pitch*, karena hanya tiga gerakan ini yang bekerja dibawah pengaruh gaya atau momen pengembali ketika kapal diganggu saat berada dalam posisi kesetimbangannya. Berbeda untuk *surge*, *sway* dan *yaw*, dimana kapal tidak akan kembali pada posisi semula apabila diganggu, kecuali ada gaya atau momen yang dapat menyebabkan gangguan yang sama dan bekerja pada arah yang berlawanan (Pratama, 2017).

1. Heave motion

Gerakan *heaving* merupakan gerakan osilasi naik turun pada kapal. Sebagai contoh gambarannya, kita anggap bahwa sebuah kapal turun lebih dalam ke dalam air dari posisi kesetimbangan dan kemudian tiba-tiba dilepaskan. Sehingga gaya apung yang kemudian menjadi lebih besar dari berat kapal tersebut. Saat itu kapal akan bergerak vertikal ke atas dari posisi kesetimbangannya, sampai kapal terus

bergerak naik karena momentumnya. Namun setelah beberapa saat hal itu terjadi berat badan kapal akan menjadi lebih besar dari gaya apung. Hal ini akan cenderung memperlambat gerakan naik tersebut. Ketika kecepatan akhirnya nol, kapal mencapai posisi ekstrim. Disaat itu karena beratnya lebih besar dari gaya apung kapal akan bergerak vertikal kembali ke bawah. Kecepatan ke bawah akan meningkat sampai posisi kesetimbangan tercapai saat gaya apung bertambah menjadi sama dengan gaya berat. Namun, karena momentum kapal akan bergerak lebih jauh ke bawah sampai posisi ekstrim tercapai, yaitu posisi dimana kapal mulai bergerak ke arah sebaliknya. Tapi kapal tidak akan berhenti begitu saja karena timbal balik dari gaya - gaya yang terjadi. Hal inilah yang membuat gerakan *osilasi* sederhana terjadi. Gerak *osilasi* yang dikenal sebagai gerakan naik-turun, akan berlanjut tanpa henti jika tidak ada gaya redaman yang muncul dalam arah yang berlawanan gerak. Gerakan ini dikenal sebagai gerakan *osilasi* bebas. Namun jika ada redaman, gerakan tersebut disebut *osilasi* teredam.

Dalam kasus *osilasi* bebas, perbedaan perpindahan kapal ke posisi ekstrim atasnya dari posisi kesetimbangan adalah sama besarnya dengan perbedaan perpindahan dari posisi kesetimbangan ke posisi ekstrem terendah. Besarnya ini dikenal sebagai amplitudo gerakan *heaving*. Waktu yang diperlukan untuk satu siklus lengkap gerak disebut periode *heaving*, sehingga gerakan *heaving* menjadi gerak harmonik sederhana. Karena periode osilasi tersebut merupakan gerakan independen dari amplitudonya, sehingga dikenal sebagai natural period. Frekuensi gerakan tersebut juga disebut frekuensi natural kapal.

Namun, ketika ada redaman, amplitudo gerakan naik-turun secara bertahap menurun sampai kapal akhirnya berhenti di posisi kesetimbangan. Periode akan sedikit lebih besar dalam kasus *osilasi* teredam. Sekarang anggaplah bahwa kapal sedang terombang-ambing vertikal naik dan turun dengan kekuatan fluktuasi pada periode natural. Tetapi karena redaman, penyimpangan segera hilang dan *osilasi* steady-state berlangsung mereka ini dikenal sebagai tiga gaya *osilasi*, di mana amplitudo dan frekuensi gerak bergantung pada amplitudo dan frekuensi dari gaya yang menariknya.

2. Rolling motion

Persamaan matematis dari gerakan *rolling* analog dengan gerakan *pitching*

seperti dijabarkan sebagai berikut (Bhattacharrya, R, 1978)

$$a \frac{d^2\phi}{dt^2} + b \frac{d\phi}{dt} + c\phi = M_0 \cos \omega_e t \quad (2.1)$$

Dimana, $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ adalah momen Inersia, a merupakan *virtual mass moment* dari inersia untuk gerakan *rolling* dan $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ adalah percepatan angular dari gerakan *rolling*. Sedangkan, $\frac{d\phi}{dt}$ merupakan *damping moment*, b merupakan koefisien *damping moment* dan $\frac{d\phi}{dt}$ merupakan kecepatan sudut.

Sebagai penyederhanaan kasus, *damping moment* didasarkan pada asumsi bahwa linear dengan kecepatan sudut $\frac{d\phi}{dt}$. Besaran koefisien $c\phi$ pada persamaan (2.2) adalah momen pengembali, dimana c adalah koefisien momen, dan ϕ adalah perpindahan gerakan *rolling* dalam sudut atau radian.

Pada kasus gerakan *rolling*, fluktuasi besaran *exciting moment* $M_0 \cos \omega_e t$ bergantung pada frekuensi gelombang papasan ω_e . Jika sekarang semua koefisien telah disesuaikan dengan mode gerak *rolling*, maka gerakan *rolling* dari kapal dapat ditentukan (Bhattacharrya, R, 1978)

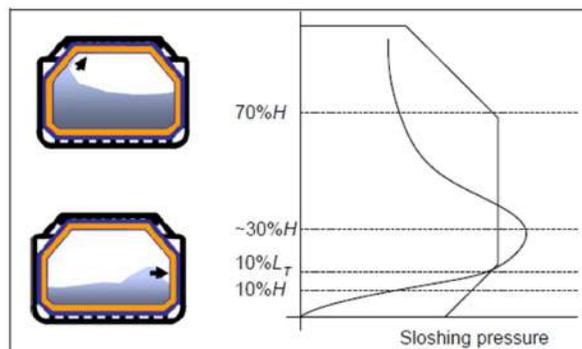
2.4. Sloshing

Fenomena *sloshing* dapat dipahami sebagai setiap gerakan permukaan cairan di dalam objek apa pun. Ketika wadah yang terisi sebagian terganggu oleh kekuatan eksternal, terjadi tumpahan, misalnya tangki berisi cairan yang dibawa oleh kendaraan yang bergerak. Tetapi untuk terjadinya *sloshing* wadah harus memiliki permukaan cairan yang bebas. *Sloshing* menyebabkan gaya dan momen *sloshing* tambahan yang akhirnya mengubah dinamika dan stabilitas sistem. Fenomena *sloshing* mencakup berbagai bidang seperti propelan slosh di roket dan pesawat ruang angkasa, kapal kargo dan juga truk yang membawa tangki dengan berbagai jenis cairan (Suyal.R, 2016)

Banyak masalah teknik termasuk *sloshing* seperti ketidakstabilan kapal. Ketika fluida berinteraksi dengan dinding, terjadi pertukaran energi antara keduanya dan fluida dapat menunjukkan jenis gerakan yang berbeda. Cairan dapat memiliki gerakan seperti planar, rotasi, kacau dll tergantung pada eksitasi eksternal

(Suyal.R, 2016)

Dalam transportasi kapal, berdasarkan *Sloshing Assessment Guidance* (2009), faktor utama yang mempengaruhi sifat dari fenomena ini adalah bentuk tangki, ketinggian isian dan gerakan kapal di laut. Biasanya *sloshing* diartikan sebagai gerakan permukaan bebas cairan di dalam tangki. Sebagai konsekuensi dari gerakan ini dampak kekerasan dapat terjadi pada batas tangki dan dokumen ini menyangkut dirinya sendiri dengan prosedur desain yang diperlukan untuk meninjau kekuatan batas tangki terhadap dampak *sloshing* ini. Karakteristik gelombang *sloshing* permukaan bebas dalam tangki membran sangat dipengaruhi oleh ketinggian pengisian. Kecenderungan umum dengan ketinggian isian, diamati dari studi eksperimental (Lloyd's Register, 2009)



Gambar 2.5. Sloshing phenomena pada perbedaan ketinggian isi tangki (Lloyd's Register, 2009)

2.5. Penilaian Beban Sloshing

Prosedur dalam penilaian *sloshing* (*sloshing assessment*) terdiri dari dua tahap. Tahap pertama adalah menghitung estimasi *global ship motion* dalam pertimbangan gelombang yang mempengaruhi pengisian sebagian (*partial filling*) pada tangki. Sedangkan tahap kedua adalah perhitungan *sloshing* menggunakan daerah perairan yang telah dipilih sebelumnya. Pada umumnya, gerak *sloshing* di dalam tangki tidak dimasukkan dalam analisis konvensional *seakeeping* karena terlalu rumit. Dalam perhitungan *seakeeping*, cairan (*liquid*) di dalam tangki dianggap sebagai *rigid mass*. Namun secara teori dan eksperimen telah membuktikan bahwa hubungan antara *sloshing* dan perilaku gerak kapal saat

menyebabkan efek yang signifikan terutama dalam sudut pandang gerak *sway* dan *roll*. Langkah pertama, studi terkonsentrasi pada analisa gerak tangki dipandang dari sudut hidrodinamika. Metodologi yang dipakai adalah *linear potential theory*. Karena fenomena *sloshing* di dalam tangki sangatlah tidak beraturan terutama pada daerah perairan dengan level gelombang tinggi, maka *sloshing* dapat mengakibatkan gaya yang mempengaruhi gerak kapal, yang diatur oleh *global fluid motion* pada dinding tangki. Oleh sebab itu, kita memisalkan gerak liquid pada tangki sebagai *linear potential theory*.

Pada saat ini telah muncul beberapa teori yang dikembangkan dari teori linear, yang memiliki banyak keterbatasan dalam pemodelan permasalahan *sloshing*, hal tersebut ditunjang dengan berkembangnya kemampuan kinerja komputer yang semakin canggih sehingga munculah teori non-linier, yang memodelkan beban *sloshing* dengan lebih akurat dengan eksitasi gerakan yang lebih luas. Eksperimen menggunakan model yang diskala telah menjadi prosedur standar dalam penerapan di dalam teknik kelautan. Hal tersebut digunakan oleh beberapa biro klasifikasi besar seperti *Det Norske Varitas*, *Lloyd's Register* dan *American Bureau of Shipping*. Ketika percobaan memberikan data yang riil pada skala percobaan, menjadikan proses penskalaan menjadi hal yang penting dan tidak boleh diabaikan.

Perkembangan teknologi komputer telah memunculkan metode pendekatan terhadap pemodelan beban *sloshing* yang secara umum dikenal dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Beberapa produk komersial yang umum digunakan antara lain adalah Star-CD, Ansys Fluent, Flow-3D dan Fluent. Pada pendekatan dengan metode CFD, dimungkinkan untuk menganalisa parameter seperti efek viskositas cairan, kenaikan tekanan cairan dalam geometri bentuk tangki yang bermacam-macam

2.6. Persamaan Navier-Stokes

Dasar dasar Navier-Stokes digunakan dalam pergerakan fluida pada fenomena *Sloshing* dalam penerapan *Volume of Fluid* (VOF). Persamaan Navier-Stokes adalah sistem persamaan differensial non-linier yang mendeskripsikan bagaimana fluida mengalir. Metode yang digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida

selama ini adalah metode Euler yaitu *Finite Element* (FE) dan *Finite Difference* (FD) yang menggunakan anggapan bahwa, fluida merupakan sistem yang kontinyu dan mengikuti hukum-hukum gerak Newton. Cara ini sangat tidak efektif untuk dilakukan mengingat persamaan Navier-Stokes merupakan persamaan yang sangat kompleks.

Dasar persamaan Navier-Stokes didapatkan dengan mensubstitusi hukum ketiga Newton kedalam elemen fluida dV . Bentuk umum persamaan Navier-Stokes dituliskan pada persamaan berikut ini (Gilson, 2005)

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla \rho + F + \mu \left(\nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) \right) \quad (2.2)$$

F adalah gaya luar dan μ adalah viskositas fluida. Untuk fluida yang tidak termampatkan, maka persamaan $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ harus disubstitusikan pada sistem. Jika persamaan tersebut dikombinasikan dengan Persamaan 2.3, maka persamaan Navier-Stokes untuk fluida tidak termampatkan (misalnya air) dapat dituliskan pada persamaan berikut:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla \rho + F + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (2.3)$$

Dengan

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (2.4)$$

Dimana: ρ = Densitas (Kg/m^3)

u = Komponen Kecepatan ke arah sumbu X (m/s)

t = Waktu (s)

F = Gaya (Kg.m/s^2)

Simulasi aliran fluida dapat dilakukan dengan mencari solusi persamaan Navier-Stokes. Selama ini belum terdapat solusi analitik persamaan Navier-Stokes tersebut, karena itu untuk mencari solusi persamaan Navier-Stokes dapat dilakukan dengan metode numerik. Syarat awal dan syarat batas juga diperlukan dalam simulasi aliran fluida. Secara umum, syarat awal yang digunakan adalah

$$(\rho(t = 0, x, y, z), \vec{u}(t = 0, x, y, z)) \quad (2.5)$$

dan syarat batas untuk simulasi aliran fluida pada permukaan.

2.7. Computational Fluid Dynamic

CFD adalah metode penghitungan, memprediksi, dan pendekatan aliran fluida secara numerik dengan bantuan komputer. Aliran fluida dalam kehidupan nyata memiliki banyak sekali jenis dan karakteristik tertentu yang begitu kompleks, CFD melakukan pendekatan dengan metode numerasi serta menggunakan persamaan-persamaan fluida. (Pradana, 2019)

Kemampuan CFD dan pesatnya perkembangan kecepatan komputasi telah membuat penggunaan CFD sebagai alat untuk mendapatkan solusi dalam dunia engineering. Penggunaannya telah meliputi area yang luas pada industri dan aplikasi-aplikasi keilmuan. CFD dapat digunakan untuk menghasilkan prediksi kualitatif dan terkadang bahkan prediksi kuantitatif dalam aliran fluida, hal ini banyak dilakukan dengan menggunakan beberapa metode:

- a. Model matematik (PDE)
- b. Metode numerik (diskritisasi dan teknik solusi)
- c. Perangkat lunak

CFD digunakan oleh para ilmuwan dan engineer untuk melakukan sebuah “eksperiment numerik” dalam sebuah “virtual laboratorium”. Dalam karakteristik aliran, CFD dapat memperlihatkan pola-pola aliran yang lebih detail dan akurat yang akan sulit dan mahal, bahkan tidak mungkin dilakukan dengan menggunakan teknik eksperiment. Salah satu contoh aplikasi yang telah dilakukan adalah dalam analisa mendapatkan gaya-gaya dan efek dari sebuah riset yang memiliki sangat panjang dan berada didalam laut dalam.

Dalam hal prediksi sebuah fenomena aliran, maka CFD dapat digunakan untuk mendapatkan kuantitas yang diinginkan dengan resolusi yang tinggi untuk setiap bagian dan waktu. Pemanfaatan CFD juga digunakan sebagai metode untuk menyederhanakan (secara virtual) permasalahan dengan kondisi- kondisi operasi yang realistis dan tetap pada domain aliran yang aktual, meskipun demikian error/kesalahan selalu ada dan biasanya terjadi karena beberapa hal berikut

- a. Kesalahan dalam memodelkan objek penelitian
- b. Kesalahan dalam diskritisasi
- c. Kesalahan dalam melakukan iterasi
- d. Kesalahan dalam implementasi

Dalam hal kemampuan mendiskripsikan secara kuantitatif sebuah fenomena, maka metode pengukuran/eksperiment hanya mendapatkan satu kuantitas dalam satu waktu dan terbatas dalam jumlah titik pengukuran dan waktunya. Selain itu skala yang digunakan terbatas pada skala laboratorium dan meliputi area permasalahan dan kondisi operasi yang terbatas. Dengan demikian error/kesalahan yang mungkin terjadi adalah:

- a. Adanya kesalahan dalam melakukan pengukuran
- b. Adanya gangguan pada probe yang digunakan

Sebagai sebuah algoritma, CFD tidak sepenuhnya dapat menggantikan pengukuran secara eksperiment, tetapi jumlah dan biaya eksperiment yang dilakukan dapat berkurang sangat signifikan.

Komputasi Dinamika Fluida atau Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi pola aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika atau model matematika. Pada umumnya proses perhitungan untuk aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan persamaan energi, momentum dan kontinuitas. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes, persamaan ini ditemukan oleh G.G. Stokes di Inggris dan M. Navier di Perancis sekitar awal tahun 1800. Adapun persamaan-persamaannya adalah sebagai berikut (Yunus A, et al, 2006).

1. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

2. Persamaan Momentum

Momentum pada sumbu X:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

Momentum pada sumbu Y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

Momentum pada sumbu Z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

3. Persamaan Energi

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_r)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u E_r)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v E_r)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w E_r)}{\partial z} = & -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \\ & - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + uv_{xy} + v \tau_{xz}) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{yx} + uv_{yy} + v \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{zx} + uv_{zy} + v \tau_{zz}) \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Dengan: x = Koordinat Sumbu X (m)

y = Koordinat Sumbu Y (m)

z = Koordinat Sumbu Z (m)

u = Komponen Kecepatan ke arah sumbu X (m/s)

v = Komponen Kecepatan ke arah sumbu Y (m/s)

w = Komponen Kecepatan ke arah sumbu Z (m/s)

t = Waktu (s)

ρ = Densitas (Kg/m³)

E_r = Energi Total (J)

P = Tekanan (Pa)

T = Tegangan geser (Pa)

q = *Heat Flux* (Watt/m²)

Re = Bilangan Reynolds

Pr = Bilangan Prandtl

Pada dasarnya CFD mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. Persamaan yang asalnya kontinum (memiliki jumlah sel tak terhingga) dirubah menjadi model diskrit (jumlah sel terhingga).

Dalam hal ini perbandingan antar CFD dan eksperiment adalah sebagai berikut:

Eksperiment:

- a. Biaya mahal
- b. Membutuhkan waktu persiapan yang lebih lama

- c. Bersifat sekuensial
- d. Memiliki tujuan tunggal

Sedangkan pada sisi CFD:

- a. Biaya lebih murah
- b. Lebih cepat dilakukan
- c. Dapat dikerjakan secara paralel
- d. Dapat digunakan untuk tujuan yang lebih dari satu.

Namun demikian reliabilitas hasil dari simulasi CFD tidak pernah dapat mencapai 100% dikarenakan data input yang digunakan memiliki potensi perkiraan atau kurang presisi. Selain itu terdapat kemungkinan model matematik yang mungkin tidak sesuai serta akurasi yang terbatas tergantung kemampuan kecepatan komputer yang digunakan. Untuk beberapa kasus telah terbukti bahwa simulasi CFD memiliki reliabilitas yang tinggi, yaitu pada:

- a. Aliran laminar dengan kecepatan yang rendah
- b. Aliran-aliran single-phase

Dengan berkembangnya penelitian yang menggunakan simulasi CFD sebagai metode untuk lebih memperpendek *distance to reality* (DTR) pada banyak kasus dalam multidisiplin keilmuan kemudian muncul kaidah-kaidah yang banyak dilakukan oleh para peneliti dalam memposisikan CFD dan eksperimen. Salah satu kaidah yang banyak dipakai adalah menggunakan CFD sebagai metode prediksi dan eksperimen sebagai metode untuk melakukan validasi (Shaleh, 2015).

Menurut (Arsad, 2012) terdapat tiga tahapan yang dilalui pada saat melakukan simulasi dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics*. Diantara ketiga tahapan tersebut adalah

- a. *Pre-processing*

Langkah pertama dalam melakukan simulasi dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* adalah *preprocessing*. Tahap ini yaitu dengan membangun dan menganalisis model dari *Computational Fluid Dynamic*. Teknisnya adalah dengan membuat model dalam bentuk paket CAD (*Computer Aided Design*). Model tersebut lalu di-*importkan* pada pembacaan *meshing*. Setelah itu dilakukan pembuatan *mesh* yang sesuai serta menerapkan kondisi batas dan sifat-sifat fluidanya. Hal ini bergantung pada

jenis analisis yang dilakukan.

b. *Solving*

Tahap kedua adalah merupakan tahap penyelesaian. Tahap ini dilakukan perhitungan dengan menerapkan kondisi-kondisi yang telah ditetapkan pada tahap *preprocessing*.

c. *Post Processing*

Tahap terakhir dalam melakukan simulasi menggunakan Computational Fluid Dynamics adalah tahap post processing. Tahap ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi Computational Fluid Dynamic yang bisa berupa gambar, kurva ataupun animasi.