

**PREDIKSI *COURSE STABILITY INDEX* KAPAL FERI  
DENGAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



**LELA SUDIRMAN**

**D091181001**

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2022**

# LEMBAR PENGESAHAN

## **PREDIKSI *COURSE STABILITY INDEX* KAPAL FERI DENGAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

Disusun dan diajukan oleh

**Lela Sudirman  
D091181001**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 30 Desember 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,


Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping

  
Andi Haris Muhammad, ST.,MT.,Ph.D  
NIP 19690402000031002

  
Muhammad Iqbal Nikmatullah, ST.,MT  
NIP 198701312019031007

Ketua Program Studi,

  
Dr. Eng Faisal Mahmuddin, ST.,M.Inf.Tech.,M.Eng  
NIP 198102142005011003



## LEMBAR PERSETUJUAN

Judul Skripsi : Prediksi *Course Stability Index* Kapal Feri dengan  
*Computational Fluid Dynamic*  
Nama Mahasiswa : Lela Sudirman  
Nim : D091181001

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh Panitia Ujian Sarjana Program Strata Satu (S1) Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada tanggal 30 Desember 2022

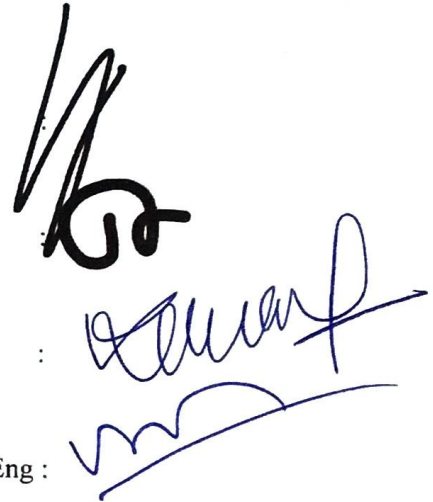
Panitia Ujian Sarjana

Ketua : Andi Haris Muhammad, ST.,MT.,Ph.D

Sekretaris : Muhammad Iqbal Nikmatullah, ST.,MT

Anggota : Prof. Daeng Paroka, ST.,MT.,Ph.D

Anggota : Dr.Eng Faisal Mahmuddin, ST.,M.Inf.Tech.,M.Eng :

The image shows four handwritten signatures in blue ink, corresponding to the names listed in the committee section. The signatures are written in a cursive style. The first signature is the largest and most prominent, followed by three smaller ones below it.

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Lela Sudirman

Nim : D091181001

Program Studi : Teknik Sistem Perkapalan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis saya yang berjudul :

Prediksi *Course Stability Index* Kapal Feri  
dengan *Computational Fluid Dynamic*

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alih tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, Desember 2022

Yang membuat pernyataan,



Lela Sudirman

# **COURSE STABILITY INDEX PREDICTION OF FERI SHIP WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC**

Lela Sudirman. <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Departemen Teknik Sistem Perkapalan FT-UH

Email : [lelasudirman8@gmail.com](mailto:lelasudirman8@gmail.com)

## **ABSTRACT**

KMP Bontoharu is a ro-ro ferry that carries passengers and vehicles, operated in crossing waters from the port of Bira, Bulukumba to the Port of Selayar. From the initial design until the ship was completed, a number of exclusive tests were also carried out, especially those related to the ship's operational capability. These tests include testing the speed of the ship and testing the ability to maneuver the ship. This research was carried out with the aim of knowing the ship's hydrodynamic coefficient and course stability index with computational fluid dynamics, using variations in depth  $h/T = 4$  (deep water),  $h/T = 2$  (medium deep water),  $h/T = 1,3$  (shallow water) with variations in drift angles of  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$  and  $16^\circ$  and variations in distance  $R$ . Based on the simulation results using CFD, the effect caused by the ship's hull is showing the resistance of the ship with variations in speed from 9 to 12,864 knots, it can be concluded that resistance increases along with increasing speed and also increasing along with decreasing depth. Then, showing the hydrodynamic coefficient, especially ship maneuvers, can be derived from the calculation of forces and moments based on CFD simulation results. It can be concluded that the value of the surge force will decrease with increasing hull drift, otherwise the sway force and hydrodynamic yaw moment will increase with the drift angle of the hull. Meanwhile, at the variation of the distance  $R$ , there is a decrease in the surge force and an increase in the sway force and hydrodynamic yaw moment at each depth variation. Based on the hydrodynamic coefficient, the course stability index  $h/T = 4$  is 0,00026;  $h/T = 2$  of 0,00031 and  $h/T = 1,3$  of 0,00037 with an average of 0,00031%.

Keywords : Ferries, ship resistance, hydrodynamic coefficient, course stability



# PREDIKSI COURSE STABILITY INDEX KAPAL FERI DENGAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC

Lela Sudirman. <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Departemen Teknik Sistem Perkapalan FT-UH

Email : [lelasudirman8@gmail.com](mailto:lelasudirman8@gmail.com)

## ABSTRAK

KMP Bontoharu merupakan kapal jenis feri ro-ro yang membawa penumpang dan kendaraan, dioperasikan di perairan penyebrangan dari pelabuhan Bira, Bulukumba ke Pelabuhan Selayar. Sejak pendesainan awal hingga kapal selesai dibangun, sejumlah pengujian eksklusif juga dilakukan, khususnya yang berhubungan dengan kemampuan operasi kapal. Pengujian tersebut diantaranya adalah pengujian kecepatan kapal dan pengujian kemampuan olah gerak kapal. Dilakukan penelitian ini dengan tujuan untuk mengetahui koefisien hidrodinamika kapal dan *course stability index* dengan *computational fluid dynamic*, menggunakan variasi kedalaman  $h/T = 4$  (*deep water*),  $h/T = 2$  (*medium deep water*),  $h/T = 1,3$  (*shallow water*) dengan variasi sudut drift  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$  dan  $16^\circ$  dan variasi jarak R. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan CFD, pengaruh yang ditimbulkan lambung kapal yaitu menunjukkan Tahanan kapal dengan variasi kecepatan 9 – 12,864 knot, disimpulkan bahwa tahanan semakin meningkat seiring dengan penambahan kecepatan dan semakin meningkat pula seiring dengan pengurangan kedalaman. Kemudian, menunjukkan koefisien hidrodinamika khususnya manuver kapal, dapat diturunkan dari perhitungan gaya dan momen berdasarkan hasil simulasi CFD. Disimpulkan bahwa nilai *surge force* akan menurun seiring meningkatnya *drift* lambung kapal sebaliknya *sway force* dan momen *yaw* hidrodinamika akan meningkat terhadap sudut *drift* lambung kapal. Sedangkan pada variasi jarak R terjadi penurunan *surge force* dan terjadi kenaikan pada *sway force* dan momen *yaw* hidrodinamika pada setiap variasi kedalaman. Berdasarkan koefisien hidrodinamika didapat *course stability index*  $h/T = 4$  sebesar 0,00026 ;  $h/T = 2$  sebesar 0,00031 dan  $h/T = 1.3$  sebesar 0,00037 dengan rata-rata sebesar 0,00031%.

Kata kunci : Kapal feri, Tahanan kapal, Koefisien hidrodinamika, *Course stability*

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.*

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT atas rampungnya skripsi ini. Tidak sedikit kendala yang menghadang penyusun dalam menyelesaikan skripsi ini, namun berkat rahmat dan hidayah-Nya telah membimbing penyusun untuk terus berusaha menyelesaikan salah satu mata kuliah di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Ini merupakan persyaratan untuk menyelesaikan studi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penyusun harus mengakui, skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, semua karena keterbatasan waktu dan pengetahuan serta kemampuan penyusun sebagai manusia biasa. Untuk itu penyusun memohon maaf atas semua kekurangan dan kesalahan yang terjadi di dalam penyusunan skripsi “**Prediksi Course Stability Index Kapal Feri dengan Computational Fluid Dynamic**” ini, dan penyusun juga berharap masukan dan saran agar kedepannya penyusun dapat lebih baik lagi.

Dalam penyusunan skripsi ini, banyak pihak-pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung, secara moril maupun material. Oleh sebab itu penulis mengucapkan terima kasih yang tulus :

1. Kepada Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Kepada Bapak Andi Haris Muhammad, S.T.,M.T.,Ph.D. selaku Dosen Pembimbing dan sekaligus Penasehat akademik penulis yang senantiasa meluangkan waktunya untuk membantu penulis dengan memberikan bimbingan, kritik dan saran.
3. Kepada Bapak Muhammad Iqbal Nikmatullah. S.T.,M.T selaku Dosen Pembimbing yang senantiasa meluangkan waktunya dan telah sabar membantu penulis dengan memberikan bimbingan, kritik dan saran.
4. Kepada Bapak Prof. Daeng Paroka ST.,MT.,Ph.D dan Bapak Dr. Eng Faisal Mahmudin ST.,M.Inf.Tech.,M.Eng selaku Dosen Penguji.

5. Bapak/Ibu Dosen yang telah memberikan bekal dan pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan.
6. Kepada Staf Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Kepada kedua Orang Tua penulis yang telah memberikan banyak support dan doa sehingga penulis bisa sampai di tahap ini.
8. Kepada kanda senior dan teman-teman LABO PROPULSI yang sudah membantu dan memberikan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
9. Kepada teman-teman SISTER18 sudah kebersamai penulis selama masa perkuliahan dan teman-teman THRUZTER sudah memberikan pengalaman untuk penulis.
10. Kepada Bidadari18 telah kebersamai penulis dengan drama penuh suka dan dukanya
11. Kepada teman teman KKN 107 PAREPARE atas cerita dan pengalaman menarik untuk penulis.
12. Kepada Nur Annisa Arif, Shabrina Velina, dan Cindy Bandaso sudah menjadi pendengar yang baik untuk penulis.
13. Kepada teman-teman SMA, sobat video call yang telah kebersamai dan selalu meluangkan waktunya dengan berbagai cerita dan pengalamannya untuk penulis.
14. Dan mereka semua yang namanya tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Semoga skripsi ini dapat menjadi kemudahan penulis dalam mendapatkan gelar sarjana dan penelitian tersebut dapat digunakan sebagaimana mestinya sehingga dapat menjadi referensi serupa di masa yang akan datang. Segalah kekurangan dalam penelitian ini semoga dapat menjadi pembelajaran kedepannya.

Gowa, Desember 2022

Penyusun



## DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
LEMBAR PERSETUJUAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
ABSTRACT .....	v
ABSTRAK .....	vi
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xv
BAB 1 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 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Kapal Feri Ro Ro.....	5
2.2 Tahanan Kapal.....	6
2.3 Olah gerak kapal.....	10
2.3.1 Manuver kapal.....	10
2.3.2 Gerakan kapal.....	14
2.3.3 Persamaan gaya gerak manuver .....	15
2.3.4 Validasi koefisien hidrodinamika .....	19
2.4 Computational Fluid Dynamic .....	20
2.4.1 Simulasi computational fluid dynamic .....	23
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	28

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	28
3.2 Pengumpulan Data.....	28
3.3 Diagram penelitian .....	29
3.4 Tahapan penelitian.....	31
3.4.1 Studi literatur.....	31
3.4.2 Pembuatan model.....	31
3.4.3 Simulasi <i>computational fluid dynamic</i> .....	32
3.4.4 Validasi .....	41
3.4.5 Kesimpulan.....	42
Bab 4 hasil dan pembahasan .....	43
4.1 Hasil Simulasi CFD dan Pembahasan .....	43
4.1.1 Tahanan kapal dengan variasi kecepatan dan kedalaman .....	43
4.1.2 <i>Surge force, sway force</i> dan momen <i>yaw</i> hidrodinamika variasi <i>drift</i>	44
4.1.3 <i>Surge force, sway force</i> dan momen <i>yaw</i> hidrodinamika variasi	
<i>turning</i> .....	50
4.1.4 Koefisien hidrodinamika hasil simulasi CFD .....	57
4.2 Validasi dan perbandingan .....	61
BAB 5 PENUTUP.....	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA .....	64
LAMPIRAN	
- Data kapal KMP Bontoharu	
- Nilai tahanan kapal KMP Bontoharu	
- Pengaturan <i>setup</i> CFD untuk <i>Drift test</i>	
- Pengaturan <i>setup</i> CFD untuk <i>turning test</i>	
- Visualisasi tahanan pada variasi kedalaman	
- Visualisasi aliran <i>drift test</i>	
- Visualisasi aliran <i>turning circle test</i>	
- Hasil simulasi <i>drift test</i>	
- Hasil simulasi <i>turning circle test</i>	

- Grafik *surge force*, *sway force*, dan *yaw* momen hasil simulasi drift test
- Grafik *surge force*, *sway force*, dan momen *yaw* hasil simulasi *turning circle test*
- Grafik gabungan *surge force*, *sway force*, dan momen *yaw* hasil simulasi

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Komponen tahanan kapal .....	6
Gambar 2.2 Tahanan gesek (viscous resistance).....	7
Gambar 2.3 Tahanan gelombang .....	9
Gambar 2.4 Turning circle test.....	12
Gambar 2.5 10/10 Zig-zag maneuver test .....	13
Gambar 2.6 <i>Stopping Ability test</i> .....	14
Gambar 2.7 Enam derajat kebebasan .....	15
Gambar 2.8 Koordinat sistem yang digunakan pada air tenang [19].....	16
Gambar 2.9 Interpretasi hasil simulasi software Ansys CFX R18.1 .....	27
Gambar 3.1 Lines plan KMP Bontoharu.....	29
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian.....	30
Gambar 3.3 Model lambung kapal KMP Bontoharu .....	31
Gambar 3.4 Model lambung kapal pada <i>software</i> Rhinoceros 6.0 .....	32
Gambar 3.5 Tahap simulasi pada <i>software</i> ansys CFX R18.1 .....	32
Gambar 3.6 Ukuran <i>boundary condition drift test</i> .....	33
Gambar 3.7 Hasil <i>mesh</i> pada <i>fluid domain</i> .....	34
Gambar 3.8 Hasil <i>mesh</i> pada lambung kapal .....	34
Gambar 3.9 Visualisasi aliran model lambung kapal.....	37
Gambar 3.10 Jarak kapal terhadap sumbu putar .....	38
Gambar 3.11 Gambar ukuran <i>boundary condition turning circle</i> .....	39
Gambar 3.12 Hasil <i>meshing</i> kondisi <i>turning circle</i> .....	39
Gambar 3.13 Hasil visualisasi pada Ansy CFX R18.1 .....	41
Gambar 4. 1 Grafik tahanan pada beda kedalaman.....	43
Gambar 4.2 Grafik surge force drift test pada $h/T = 4$ .....	45
Gambar 4.3 Grafik sway force drift test pada $h/T = 4$ .....	45
Gambar 4.4 Grafik momen yaw drift test pada $h/T = 4$ .....	46
Gambar 4.5 Grafik surge force drift test pada $h/T = 2$ .....	47
Gambar 4.6 Grafik sway force drift test pada $h/T = 2$ .....	47
Gambar 4.7 Grafik momen yaw drift test pada $h/T = 2$ .....	48

Gambar 4.8 Grafik surge force drift test pada $h/T = 1,3$ .....	49
Gambar 4.9 Grafik sway force drift test pada $h/T = 1,3$ .....	49
Gambar 4.10 Grafik momen yaw drift test pada $h/T = 1,3$ .....	50
Gambar 4.11 Grafik surge force turning circle test pada $h/T = 4$ .....	52
Gambar 4.12 Grafik sway force turning circle test pada $h/T = 4$ .....	52
Gambar 4.13 Grafik momen yaw turning circle test pada $h/T = 4$ .....	53
Gambar 4.14 Grafik surge force turning circle test pada $h/T = 2$ .....	54
Gambar 4.15 Grafik sway force turning circle test pada $h/T = 2$ .....	54
Gambar 4.16 Grafik momen yaw turning circle test pada $h/T = 2$ .....	54
Gambar 4.17 Grafik surge force turning circle test pada $h/T = 1,3$ .....	55
Gambar 4.18 Grafik sway force turning circle test pada $h/T = 1,3$ .....	56
Gambar 4.19 Grafik momen yaw turning circle test pada $h/T = 1,3$ .....	56
Gambar 4.20 Grafik gabungan surge force pada kondisi drift test .....	57
Gambar 4.21 Grafik gabungan sway force pada drift test .....	58
Gambar 4.22 Grafik gabungan momen yaw pada drift test .....	58
Gambar 4.23 Grafik gabungan surge force pada turning circle .....	59
Gambar 4.24 Grafik gabungan sway force pada turning circle .....	60
Gambar 4.25 Grafik gabungan momen yaw pada turning circle .....	60

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data ukuran utama kapal KMP Bontoharu .....	28
Tabel 3.2 Koefisien bentuk kapal.....	29
Tabel 3.3 Elemen <i>mesh running</i> .....	35
Tabel 3.4 Domain <i>fluid</i> berdasarkan <i>drift test</i> .....	35
Tabel 3.5 Domain <i>hull</i> berdasarkan <i>drift test</i> .....	36
Tabel 3.6 Domain <i>fluid</i> berdasarkan <i>turning circle</i> .....	40
Tabel 3.7 Domain <i>hull</i> berdasarkan <i>turning circle</i> .....	41
Tabel 4.1 Tahanan kapal dengan CFD, Holtrop dan Eksperimen.....	43
Tabel 4.2 <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> Variasi <i>drift</i> .....	44
Tabel 4.3 Momen <i>yaw</i> hidrodinamika variasi <i>drift</i> .....	44
Tabel 4.4 <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> Variasi <i>turning</i> .....	51
Tabel 4.5 Momen <i>yaw</i> hidrodinamika variasi <i>turning</i> .....	51
Tabel 4.6 Koefisien hidrodinamika pada <i>drift test</i> .....	59
Tabel 4.7 Nilai koefisien hidrodinamika pada <i>turning circle test</i> .....	61
Tabel 4.8 Nilai <i>course stability index</i> hasil simulasi.....	61
Tabel 4.9 Pebandingan koefisien hidrodinamika dengan pendekatan empiris .	62

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Data kapal KMP Bontoharu .....	68
Lampiran 1.2 Nilai tahanan kapal KMP Bontoharu.....	69
Lampiran 1.3 Pengaturan setup CFD untuk drift test .....	70
Lampiran 1.4 Pengaturan setup CFD turning circle test .....	71
Lampiran 1.5 visualisasi tahanan pada variasi kedalaman.....	72
Lampiran 1.6 Visualisasi aliran <i>drift test</i> .....	77
Lampiran 1.7 Visualisasi aliran <i>turning circle test</i> .....	82
Lampiran 1.8 Hasil simulasi <i>drift test</i> .....	82
Lampiran 1.9 Hasil simulasi <i>turning circle test</i> .....	85
Lampiran 1.10 Grafik <i>surge force</i> , <i>sway force</i> , dan momen <i>yaw</i> hasil simulasi <i>drift test</i> .....	87
Lampiran 1.11 Grafik <i>surge force</i> , <i>sway force</i> , dan momen <i>yaw</i> hasil simulasi <i>turning circle test</i> .....	90
Lampiran 1.12 Grafik gabungan <i>surge force</i> , <i>sway force</i> dan momen <i>yaw</i> hasil simulasi .....	94



## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Angkutan penyebrangan yang banyak digunakan di Negara-negara yang memiliki perairan yaitu Kapal jenis feri ro ro, dioperasikannya kapal ini karena dipandang lebih sesuai dengan kondisi perairan serta operasional, juga lebih ekonomis dan dapat mengangkut penumpang, kendaraan dan barang-barang lainnya. Feri yang membawa penumpang dan kendaraan harus memperhatikan stabilitas, karena menyangkut keselamatan penumpang di kapal. Untuk itu kapasitas penumpang harus terbatas, serta pemuatan kendaraan, sehingga kapal tetap stabil saat berlayar. Pembatasan ini telah direncanakan, baik penumpang maupun kendaraan selama perancangan proses kapal [1]. Dalam pembangunan kapal feri, empat unsur desain dalam rancang bangun kapal yang perlu dipenuhi ketika suatu produk desain bisa dianggap berhasil yakni; aspek keamanan (*safety*), aspek kenyamanan (*ergonomic*), aspek keindahan (*estetika*), dan aspek filosofi. Stabilitas kapal merupakan salah satu parameter penting dalam keselamatan kapal selama pelayaran. Pernyataan ini terkandung demikian pernyataan Organisasi Maritim Internasional (IMO). Selama proses desain kapal perlu untuk mengetahui karakteristik lambung kapal dengan karakteristik stabilitas kapal [2].

Sejak pendesainan awal hingga kapal selesai dibangun, sejumlah pengujian mutlak juga dilakukan, khususnya yang berhubungan dengan kemampuan operasi kapal. Pengujian tersebut diantaranya adalah pengujian kecepatan kapal dan pengujian kemampuan olah gerak kapal (*Manuver kapal*) [3]. Manuver adalah hal yang sangat penting untuk dapat memastikan kapal bisa dioperasikan dalam situasi dan kondisi yang ditentukan, Maneuvering kapal diasumsikan bergerak di air yang tenang. Kemampuan manuver juga menjadi aspek yang sangat kritis khususnya di pelabuhan untuk menghindari tabrakan dan terjadinya kandas [4].

Karakteristik manuver kapal dipengaruhi oleh beberapa faktor eksternal yang mencakup dua hal penting yaitu keadaan laut dan keadaan perairan. Pada beberapa keadaan lingkungan atau perairan terbatas, kecelakaan laut bisa saja terjadi jika kemampuan manuver kapal tidak memadai. Salah satu faktor eksternal yang

mempengaruhi adalah Gelombang. Sementara itu, Faktor *Internal* (kapal) adalah berat kapal, dimensi kapal, lambung, mesin (baling-baling), dan sistem kemudi. Sejumlah elemen tersebut secara langsung memberi pengaruh yang signifikan terhadap gaya dan momen hidrodinamika saat kapal maneuver [5].

Dalam menghitung atau memprediksi kemampuan maneuver kapal, perlu memperhatikan peraturan-peraturan yang ada, baik nasional maupun internasional. IMO juga telah merekomendasikan beberapa kriteria standar untuk maneuver kapal. Kriteria tersebut harus dipenuhi oleh sebuah kapal saat beroperasi baik di perairan yang dalam (*deep water*) maupun di perairan terbatas atau beroperasi disekitar pelabuhan atau di perairan yang dangkal (*Restricted and Shallow Water*). Kriteria tersebut diantaranya : *Turning Ability*, *Course-Keeping* dan *Yaw Checking Ability* serta *Stopping Ability*. Oleh sebab itu, pada penelitian ini akan mencari tahu Prediksi *Course Stability Index* Kapal Feri dengan *Computational Fluid Dynamic*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dikemukakan, maka dapat diidentifikasi beberapa rumusan masalah sebagaimana berikut ini :

1. Bagaimana karakteristik koefisien hidrodinamika kapal feri pada saat manuver?
2. Berapa nilai *course stability index* pada kapal feri?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah, maka permasalahan yang akan dibahas dibatasi dengan hal-hal berikut ini :

1. Kapal yang digunakan adalah Feri Ro Ro KMP Bontoharu 1050 GT
2. Penelitian menggunakan *software* Ansys CFX R18.1
3. Kecepatan kapal yang disimulasikan yaitu 6,618 m/s
4. Simulasi *drift test* dan *turning circle test* berdasarkan kedalaman :
  - a.  $h/T = 4$  (*Deep water*)
  - b.  $h/T = 2$  (*Medium deep water*)
  - c.  $h/T = 1,3$  (*Shallow water*)

5. Simulasi *drift test* kapal pada  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$  dan  $16^\circ$  dan *turning circle* pada  $R = 158,16$  ;  $189,8$  ;  $237,5$  ; dan  $316,3$ .
6. Koefisien hidrodinamika yang diestimasi adalah  $X'_{vv}$ ,  $Y'_v$ ,  $Y'_{vvv}$ ,  $N'_v$ ,  $N'_{vvv}$ ,  $X'_{rr}$ ,  $Y'_r$ ,  $Y'_{rrr}$ ,  $N'_r$  dan  $N'_{rrr}$ .
7. Perbandingan hasil simulasi CFD dengan pendekatan *empirical*
8. Tidak mengikut sertakan pengaruh kemudi kapal

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Untuk mengetahui karakteristik koefisien hidrodinamika kapal feri saat manuver
2. Untuk mengetahui nilai *Indeks stability* kapal feri dengan menggunakan *computational fluid dynamic*

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa manfaat yang akan didapatkan dan menjadi tinjauan bagi beberapa pihak yang memiliki keperluan dengan topik penelitian yang terkait, adalah sebagai berikut :

1. Memberikan gambaran karakteristik koefisien hidrodinamika kapal feri pada saat manuver
2. Sebagai referensi dalam penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan *index stability* kapal feri menggunakan CFD

#### 1.6 Sistematika penulisan

Sistematika penulisan digunakan untuk mempermudah dalam menemukan penulisan. Adapun sistematika penulisan dalam skripsi sebagai berikut :

##### BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan Latar belakang, Rumusan masalah, Tujuan penelitian, Batasan masalah, Manfaat penulisan, dan Sistematika penulisan.

##### BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini disajikan teori dasar yang digunakan dalam penyelesaian skripsi

ini yaitu teori dasar mengenai kapal feri, tahanan kapal, manuver kapal dan simulasi *computational fluid dynamic* yang terkait dengan kapal feri yang didapatkan dari berbagai sumber.

### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini diuraikan tahapan berupa proses yang dimulai dari pengumpulan data kemudian tahapan penelitian.

### **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bab ini berisi penyajian data-data hasil yang diperoleh dalam penelitian meliputi hasil simulasi CFD serta validasi dan perbandingan hasil simulasi

### **BAB 5 PENUTUP**

Pada bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan pembahasan, juga memuat saran-saran dari pihak terkait untuk pengembangan penelitian ini.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kapal Feri Ro Ro

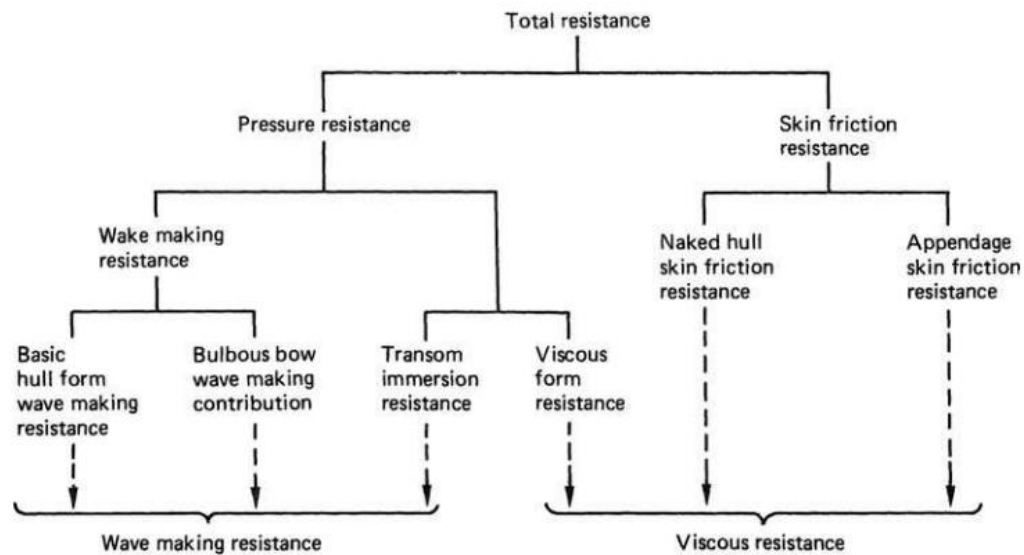
Pada tahun 1950 banyak terjadi inovasi terhadap penanganan cargo yang terfokus dalam pengembangan desain kapal. Salah satunya yang sukses dikembangkan adalah Kapal Ro-Ro. Bagaimanapun juga, kapal *roll on/roll of* atau kapal dengan pondasi kayu yang dapat mengembang dibangun untuk menyebrangi sungai dan membawa orang dan kendaraan beroda. kapal ini ditarik menggunakan tali, yang membentang di seberang sungai, terkadang penumpang diminta untuk membantu menarik kapal tersebut. Platform ini akhirnya dinamai dengan Feri [6].

Kapal feri merupakan salah satu jenis kapal yang berlayar pada jarak dekat atau kapal yang berlayar dari pulau satu ke pulau yang lain, sehingga dikenal juga sebagai kapal penyeberangan. Kapal feri yang dirancang dengan memiliki dua pintu ramp doors yaitu pintu depan dan pintu belakang [7]. Kapal feri mempunyai kriteria tersendiri dalam perencanaannya, antara lain menyangkut stabilitas kapal, kebutuhan luas geladak, batasan atas panjang dan sarat air kapal serta kemampuan manuver-nya.

Berbagai macam kendaraan air digunakan sebagai feri, tergantung pada jarak perjalanan, kapasitas kapal dan kecepatan yang diperlukan dan keadaan air yang harus dilalui. (1) Feri ujung ganda, memiliki bagian depan dan belakang yang dapat ditukar sehingga feri ini dapat berlayar bolak balik tanpa harus memutar, (2) *Hydrofoil*, digunakan karena kelebihanannya untuk melaju pada kecepatan tinggi, menggantikan *hovercraft*. *Hydrofoil* juga terbukti sebagai solusi praktis, mudah, cepat dan ekonomis. (3) *Hovercraft*, dikembangkan tahun 1960-an dan 1970-an untuk membawa mobil. *Hovercraft* digantikan oleh katamarang yang hampir sama cepat tetapi lebih tidak terpengaruh oleh keadaan laut dan cuaca, (4) Katamarang, biasanya dihubungkan dengan feri kecepatan tinggi. kendaraan jet air dapat menampung 375 kendaraan penumpang dan 1500 penumpang, (5) Feri ro-ro, feri besar dan konvensional dimana kendaraan dapat keluar masuk dengan mudah, dan (6) Feri kereta, kapal yang dirancang untuk membawa kereta, biasanya memiliki rel kereta.

## 2.2 Tahanan Kapal

Komponen utama tahanan kapal dapat dikelompokkan sebagaimana Gambar 2.1 Berikut :



Gambar 2.1 Komponen tahanan kapal [7]

Tahanan (*resistance*) kapal pada suatu kecepatan adalah gaya fluida yang bekerja pada kapal sedemikian rupa sehingga melawan gerak kapal. Tahanan tersebut sama dengan gaya fluida yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal. Sedangkan suatu tahanan kapal ini adalah sama dengan suatu gaya karena dihasilkan oleh air, maka ini disebut gaya hidrodinamika. Gaya hidrodinamika semata-mata disebabkan oleh pergerakan relatif kapal terhadap air. Untuk mengatasi tahanan tersebut, maka kapal membutuhkan sejumlah daya dorong sehingga dapat melewati air laut dengan kecepatan tertentu sesuai dengan kebutuhan operasinya. Daya dorong ini berupa gaya yang bekerja untuk melawan hambatan pada badan kapal yang tercelup di air, hambatan gelombang dan hambatan dari angin yang mengenai badan kapal yang berada di atas permukaan air laut. Hambatan-hambatan tersebut merupakan komponen tahanan kapal yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal. Adapun rumus dari tahanan total adalah sebagai berikut :

$$R_T = \frac{1}{2} C_T \rho V^2 S \quad (2.1)$$

Dimana :

$R_T$  = Tahanan total (kN)

$C_T$  = Koefisien tahanan

$V$  = Kecepatan kapal (m/s)

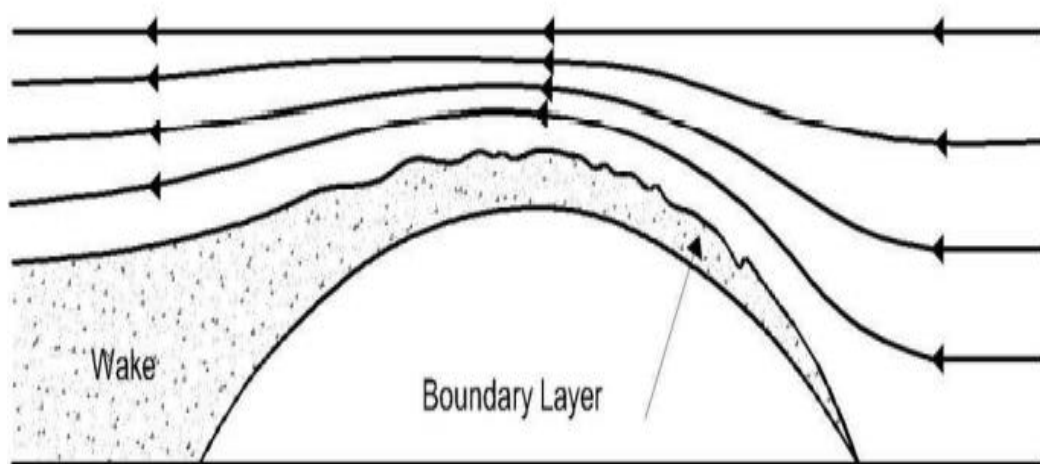
$S$  = Luas bidang basah benda (m)

$\rho$  = Massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

Pada dasarnya tahanan kapal dibagi menjadi dua yaitu tahanan yang berada di atas permukaan air dan tahanan yang berasal dari bawah permukaan air. Tahanan yang di atas permukaan air adalah yang bekerja pada bagian badan kapal yang kelihatan di atas permukaan air, disini pengaruh adanya udara yang mengakibatkan timbulnya hambatan. Komponen tahanan yang bekerja pada kapal dalam gerakan mengapung di air adalah :

1. Tahanan gesek (*Friction resistance*)

Tahanan gesek timbul akibat kapal bergerak melalui fluida yang memiliki viskositas seperti air laut, fluida yang berhubungan langsung dengan permukaan badan kapal yang tercelup sewaktu bergerak akan menimbulkan gesekan sepanjang permukaan tersebut, inilah yang disebut sebagai tahanan gesek [9].



Gambar 2.2 Tahanan gesek (*viscous resistance*) [10]

Gambar 2.2 menunjukkan lambung kapal yang terendam dalam fluida dengan viskositas, partikel fluida menempel pada tubuh menghasilkan pembentukan “*boundary layer*” dimana aliran dengan cepat mengubah kecepatan, dari kecepatan



nol disisi tubuh ke kecepatan arus bebas. Dua bentuk tahanan terjadi sebagai akibat dari tahanan gesek dan tahanan *viscous*.

Tahanan gesek ini dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu :

- a. Angka renold ( $Rn$ )

$$Rn = \frac{v \times L}{\nu} \quad (2.2)$$

Dimana :

$v$  = Kecepatan (m/s)

$L$  = Panjang (m)

$\nu$  = Viskositas air

- b. Koefisien gesek ( $Cf$ )

$$Cf = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (2.3)$$

Dimana :

$Cf$  = Koefisien gesek

$Rn$  = Angka renold

- c. Rasio kecepatan dan Panjang kapal ( $Slr$ )

$$Slr = \frac{Vs}{\sqrt{L}} \quad (2.4)$$

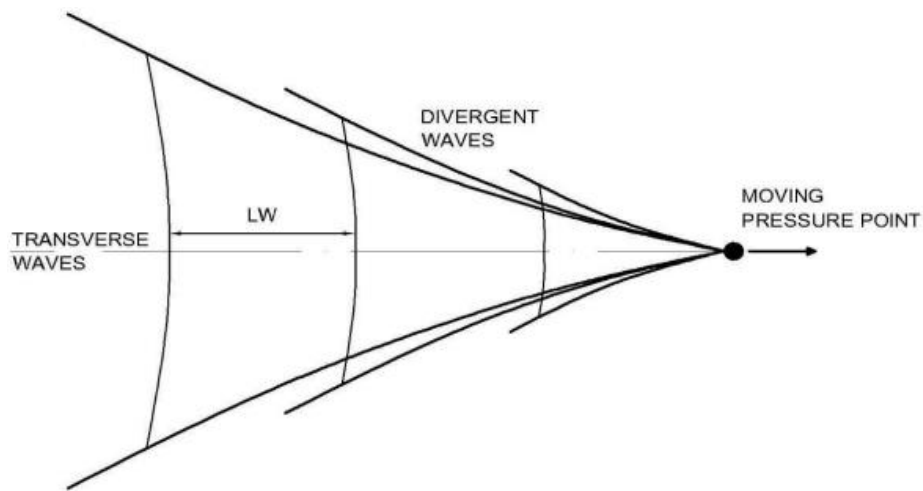
Dimana

$L$  = Panjang antara garis tegak kapal (*Length between perpendicular*)

$Vs$  = Kecepatan kapal

## 2. Tahanan gelombang

Saat kecepatan kapal meningkat maka tinggi gelombang yang terbentuk akibat gerakan kapal akan meningkat pula. Semakin tinggi gelombang yang terbentuk maka tahanan kapal akan meningkat pula begitupun sebaliknya semakin kecil gelombang yang terbentuk maka tahanan kapal akan berkurang. Panjang gelombang pada dasarnya *linear* dengan kecepatan kapal. Semakin cepat maka gelombang yang terbentuk akan semakin Panjang begitu pula sebaliknya. Visualisasi bentuk dan Panjang gelombang yang terbentuk antara reaksi akibat gerakan kapal lurus dengan fluida ditujukan pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2.3 Tahanan gelombang [10]

Gambar 2.3 menunjukkan hubungan antara Panjang gelombang dengan kecepatan kapal :

$$L_w = \frac{2\pi v^2}{g} \quad (2.5)$$

Dimana :

$L_w$  = Panjang gelombang (m)

$v$  = Kecepatan kapal (m/s)

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

Berikut merupakan persamaan yang menunjukkan pergerakan kapal berdasarkan *froude number* :

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g L}} \quad (2.6)$$

Dimana :

$F_n$  = *Froude number*

$v$  = kecepatan kapal (m/s)

$g$  = percepatan gravitasi ( $9,81 m/s^2$ )

$L$  = Panjang kapal (m)

### 3. Peningkatan tahanan di air dangkal

Peningkatan tahanan di perairan dangkal (*shallow water effect*) disebabkan oleh beberapa faktor yaitu sebagai berikut :

- a. Aliran air disekitar bagian bawah lambung di perairan dangkal dibatasi, oleh karena itu air yang mengalir di bawah lambung semakin cepat.
- b. Air yang bergerak lebih cepat menurunkan tekanan dibawah lambung, menyebabkan kapal *squat* dan meningkat luas permukaan basah dan tahanan gesekan.
- c. Gelombang yang dihasilkan di perairan dangkal cenderung lebih besar dari pada gelombang yang di hasilkan di dalam air dengan kecepatan yang sama. Oleh karena itu energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan gelombang ini meningkat (yaitu peningkatan tahanan gelombang di air dangkal). Faktanya, karakteristik pada kurva tahanan total akan terjadi pada kecepatan yang lebih rendah di perairan dangkal.

## 2.3 Olah gerak kapal

Olah gerak kapal (*ship maneuvers*) adalah kemampuan untuk tetap bertahan di laut dalam kondisi apapun dalam keadaan kapal sedang melaksanakan tugasnya. Oleh karena itu, kemampuan ini jelas merupakan aspek penting dalam hal perancangan kapal (*Ship Design*).

### 2.3.1 Manuver kapal

*Maneuverability* adalah identik dengan kata *Controllability*, yang dapat didefinisikan sebagai kualitas kapal dalam mengontrol kemudi (atau alat gerak bantu lainnya, baik *fixed* maupun *movable*) untuk merespon dan mengendalikan arah, kecepatan dan kinerja pergerakan kapal. Karakteristik manuver kapal dapat dibagi dalam beberapa bagian yaitu [11] :

Kapal dengan kemampuan manuver yang buruk dapat mengakibatkan kecelakaan yang nantinya akan menimbulkan pencemaran di laut. Untuk menghindari kapal-kapal yang dibangun dengan *maneuverability* yang buruk, *International Maritime Organization* (IMO), sebuah organisasi internasional yang berwenang untuk mengeluarkan peraturan-peraturan tentang keselamatan jiwa di laut dan perlindungan lingkungan laut, telah mengeluarkan peraturan tentang *maneuverability*. Pada bulan Desember 2002, IMO menetapkan resolution MSC.137 (76) “*Standarts for Ship Manoeuverability*”. Standar ini digunakan untuk

mengevaluasi kemampuan manuver kapal yang isinya adalah sebagai berikut :

a. *Turning ability*

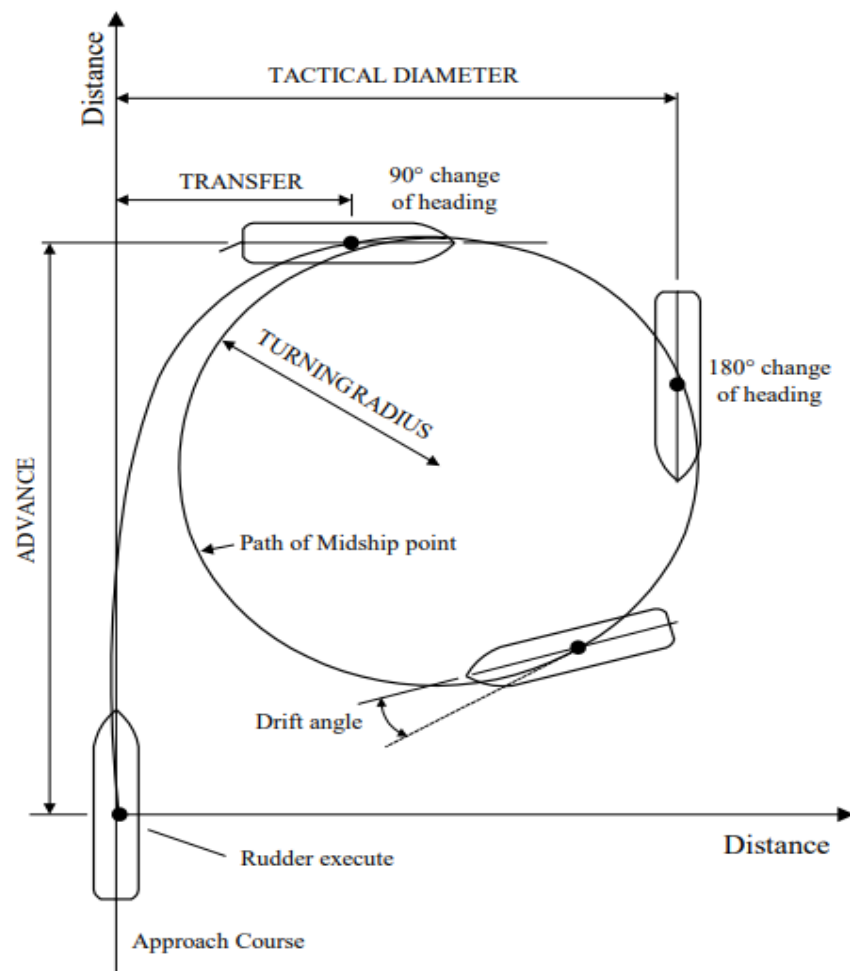
Kemampuan belok kapal (*Turning ability*) adalah ukuran kemampuan membelokkan kapal menggunakan *hard-ver rudder*, hasilnya menjadi “maju pada perubahan 90° heading” minimum dan “*tactical diameter*” didefinisikan oleh “*transfer* pada perubahan 180° heading”. Manuver putar harus dilakukan kekanan dan kekiri. Sudut kemudi, harus sudut kemudi desain maksimum yang diperbolehkan pada kecepatan uji, tetapi tidak harus lebih dari 35° (berlaku hanya untuk kapal yang dilengkapi dengan kemudi konvensional sebagai alat kendali arah utama) [12].

Respon yang diterima kapal karena defleksi dan gaya serta momen yang dihasilkan kemudi dibagi menjadi dua bagian:

- 1) Trasiem awal dimana terjadi percepatan *surge*, *sway*, dan *yaw*
- 2) Bagian belok tetap (*stedy turning*) dimana kecepatan belok dan kecepatan maju adalah tetap dan lintasan kapal bulat (*circular*)

Umumnya lintasan belok kapal diklasifikasikan dalam 4 pengukuran numerik yaitu:

- 1) *Advance*, jarak dari titik awal (origin) pelaksanaan, terhadap sumbu x kapal, bila sumbu berbelok 90°. Jarak maksimum *advance* yang diizinkan untuk bergerak putar (*turning*) adalah tidak lebih atau sama dengan 4,5 Lpp
- 2) *Transfer*, jarak dari origin *approach course* terhadap origin kapal bila sumbu x telah berbelok 90°
- 3) *Tactical diameter*, jarak dari *approach course* terhadap sumbu x kapal saat sumbu tersebut telah belok 180°. Kriteria diameter maju dan taktis harus ditentukan dari uji lingkaran putar. IMO mensyaratkan bahwa diameter taktis harus kurang dari 5 Lpp dan gerak maju harus kurang dari 4,5 Lpp [13].
- 4) *Steady turning diameter*, karakteristik diameter kemampuan putar kapal ditunjukkan dalam Gambar 2.4 berikut :



Gambar 2.4 *Turning circle test* [12]

Parameter lintasan putar/belok kapal berguna untuk memberikan gambaran karakteristik manuver kapal dilaut terbuka [14].

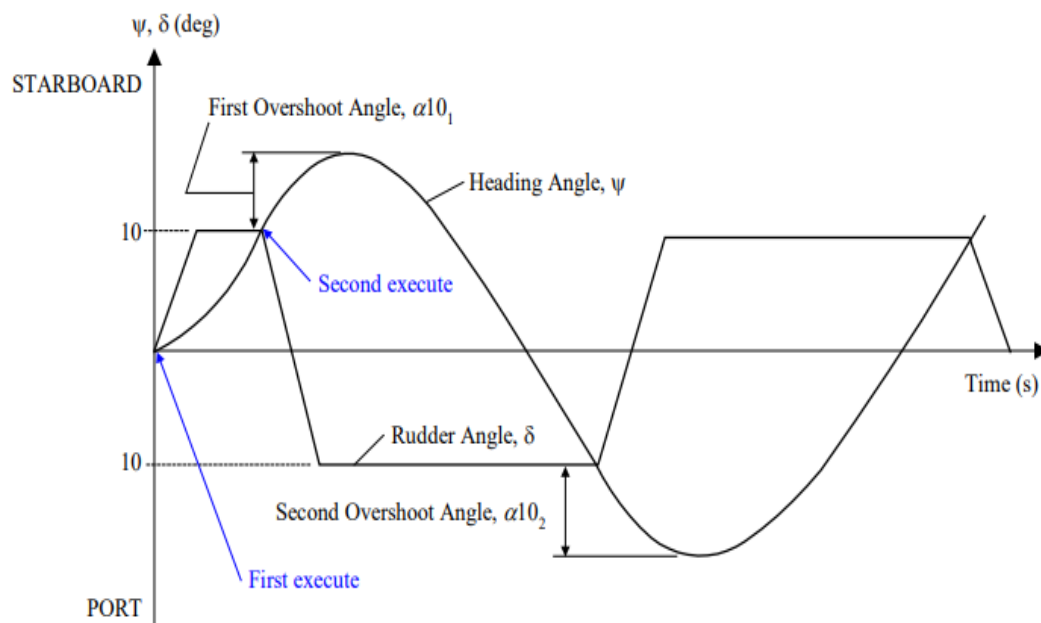
b. *Initial turning ability*

Ketika kemudi dibelokkan  $10^\circ$  kearah *starboard* atau *portside*, kapal tidak boleh bergerak sejauh 2,5 kali Panjang kapal ketika arahnya diubah sebesar  $10^\circ$  dari arah semula.

c. *Yaw checking ability* dan *course changing*

- 1) Sudut overshoot yang pertama pada  $10^\circ/10^\circ$  pengujian zig-zag tidak boleh melebihi  $10^\circ$  jika  $l/v$  kurang dari 10 detik,  $20^\circ$  jika  $l/v$  sebesar  $30^\circ$  atau lebih dan  $5 +^{1/2} (l/v)$  derajat jika  $l/v$  sebesar  $10^\circ$  atau lebih, tetapi kurang dari 30 detik

- 2) Sudut overshoot yang kedua  $10^\circ/10^\circ$  pengujian zig-zag tidak boleh melebihi  $25^\circ$  jika  $l/v$  kurang dari  $10^\circ$ ,  $40^\circ$  jika  $L/V$  sebesar 30 detik atau lebih, dan  $17,5 + 0,75 l/v$  derajat jika  $L/V$  sebesar  $10^\circ$  atau lebih, tetapi kurang dari 30 detik.
- 3) Sudut overshoot yang pertama pada  $20^\circ/20^\circ$  pengujian zig-zag tidak boleh melebihi  $25^\circ$



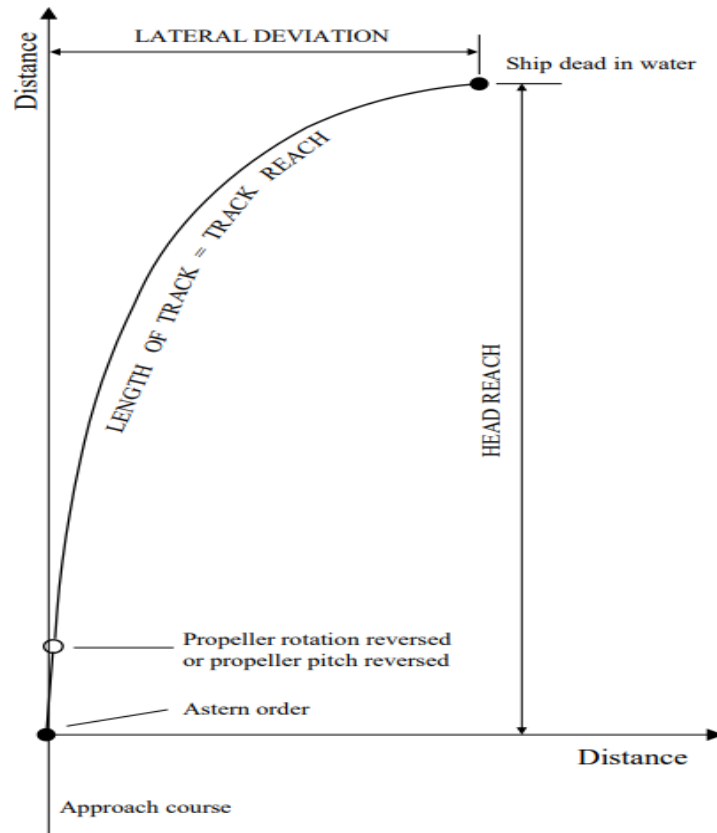
Gambar 2.5 10/10 Zig-zag maneuver test

Tes zig-zag harus dimulai ke kanan dan kekiri dan dimulai dengan menerapkan jumlah tertentu sudut kemudi ke pendekatan yang awalnya lurus. Sudut kemudian digeser secara bergantian kesalah satu sisi setelah deviasi tertentu dari haluan awal kapal tercapai terlihat pada Gambar 2.5 diatas.

#### d. *Stopping ability*

Jarak pengujian stopping full stern tidak boleh melebihi 15 kali Panjang kapal. Tetapi nilai dapat berubah untuk kapal dengan displacement yang besar. Namun tetap tidak boleh melebihi 20 kali Panjang kapal [14]. Sudut overshoot pertama dalam uji zig-zag adalah ukuran kemampuan pengecekan haluan kapal yang didefinisikan pada Gambar 2.5, persyaratan dibawah ini adalah hasil harmonisasi standar IMO Sistem peringkat berdasarkan statistic percobaan laut [15]

- 1) *Track reach*, jarak sepanjang lintasan kapal yang ditempuh kapal dari saat itu bahwa perintah “*full astern*” diberikan sampai tanda perubahan kecepatan depan



Gambar 2.6 *Stopping Ability test*

- 2) *Head reach*, didefinisikan sebagai jarak sepanjang arah lintasan pada saat “*full astern*” perintah diberikan. Jarak diukur dari saat perintah “*full astern*” diberikan sampai kapal berhenti didalam air.

### 2.3.2 Gerakan kapal

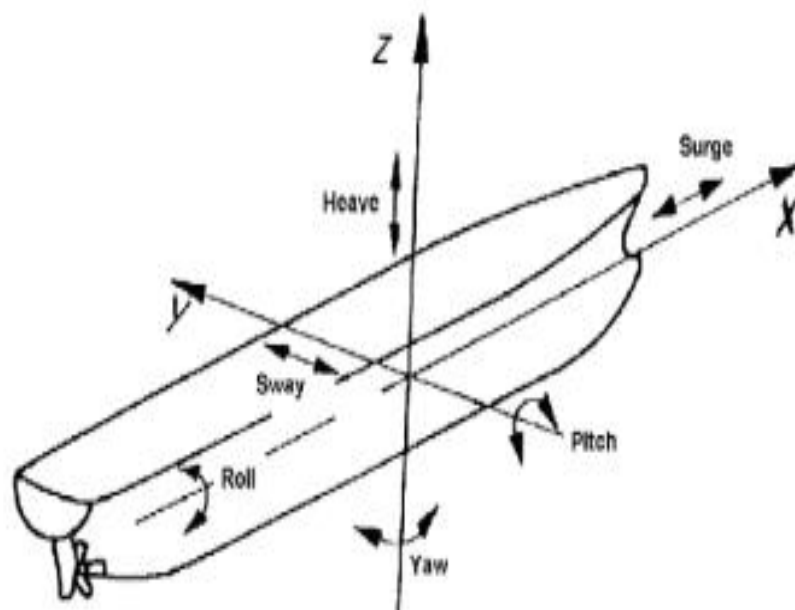
Saat kapal mengapung bebas dilaut atau perairan, kapal mengalami gerak osilasi yaitu gerakan translasi /lateral dan gerakan rotasi/ *rotasional*. Menurut arahnya, ada tiga gerakan translasi kearah sumbu X, Y, dan Z gerakan ini terjadi akibat gaya-gaya eksternal yang dialami kapal. Berikut gerakan kapal berdasarkan enam derajat kebebasan yaitu :

1. *Roll*, gerakan rotasi kapal pada sumbu X
2. *Pitch*, gerakan sudut rotasi kedepan dan belakang sumbu melintang kapal



sumbu melintang kapal, sepanjang sumbu Y

3. *Heave*, gerakan kapal naik turun secara vertical
4. *Surge*, salah satu gerak translasi dimana gerakan kapal maju mundur searah sumbu X (arah haluan/*forward* dan buritan/*backward*)
5. *Sway*, gerak translasi kapal yang mengalami perpindahan pada sumbu Y, pada gerak kapal titik beratnya tidak berubah sehingga tidak ada perubahan massa kapal dan titik apung juga tidak bergerak dan tidak ada kekuatan perlindungan [16]

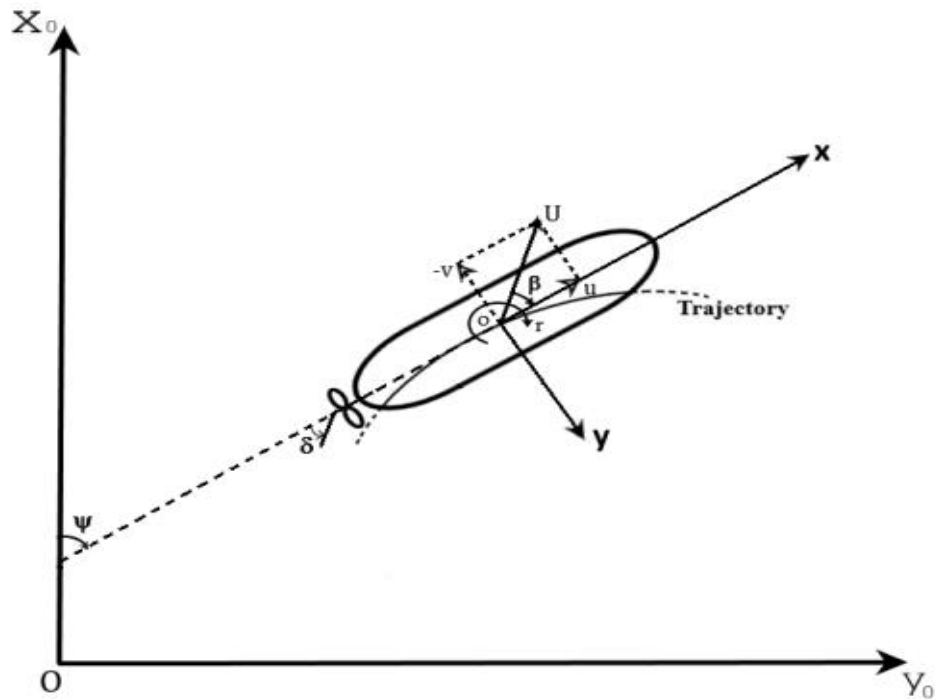


Gambar 2.7 Enam derajat kebebasan [17]

6. *Yaw*, salah satu gerak rotasi kapal yang sedang bergerak berputar pada sumbu Z sehingga jika diamati dari atas, dapat dilihat bahwa perputaran kapal bergerak

### 2.3.3 Persamaan gaya gerak manuver

Dalam MMG (*Maneuver Modelling Group*), gaya dan momen hidrodinamika bekerja pada kapal dibagi menjadi bagian yang berbeda seperti lambung, kemudi, dan baling-baling [18]. Dinamika dasar gerak dijelaskan dengan menggunakan hukum ke II newton tentang gerak, jadi sistem koordinat dapat didefinisikan untuk kapal bermanuver. Sistem koordinat tetap ( $0 - X_0Y_0Z_0$ ) dan kapal tetap ( $0 - xyz$ ) koordinat sistem di tunjukkan pada Gambar 2.8 [19].



Gambar 2.8 Koordinat sistem yang digunakan pada air tenang [19]

Gaya-gaya yang bekerja ditampilkan dengan koordinat sistem sumbu. Pada Gambar 2.8 sudut heading  $\psi$  mengacu pada sudut antar sumbu  $x$  dan  $x_0$ . Perbedaan antara haluan kapal dan arah jalur aktual (*velocity vector* pada COG) adalah sudut drift [19].

Dalam MANSIM, gaya dan momen hidrodinamika, massa, massa tambahan, momen inersia, momen tambahan inersia dan parameter kinematika lainnya yang non- dimensional berikut ini :

$$X, Y = \frac{1}{2} \rho U^2 L d \quad (2.7)$$

$$N = \frac{1}{2} \rho U^2 L d \quad (2.8)$$

$$u, v = U \quad (2.9)$$

$$r = U/L \quad (2.10)$$

$$m, m_x, m_y = \frac{1}{2} \rho L^2 d \quad (2.11)$$

$$I_z, I_z = \frac{1}{2} \rho L^4 d \quad (2.12)$$

Pada penelitian ini dikembangkan berdasarkan persamaan gerak kapal (Tiga derajat kebebasan) yaitu *Surge*, *Sway*, dan *Yaw* dengan asumsi sebagai berikut :

- Gerakan vertical (*heave*, *pitch*, dan *roll*) diabaikan.
- Kapal diasumsikan simetri terhadap xz bidang, maka  $y_G = 0$

Berikut persamaan gerak 3-Degree Of Freedom yaitu :

$$(m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)\dot{v}r - x_G m r^2 = X \quad (2.13)$$

$$(m + m_x)\dot{v} - (m + m_x)\dot{u}r - x_G m \dot{r} = Y \quad (2.14)$$

$$(I_{zG} + x_G^2 m + J_z)\dot{r} + x_G m(\dot{v} + ur) = N \quad (2.15)$$

Notasi  $m$ ,  $m_x$ , dan  $m_y$  adalah massa kapal, dan inersia massa tambahan dalam arah x dan masing-masing;  $I_{zG}$  dan  $J_z$  adalah momen inersia dan ditambahkan di sekitar sumbu Z masing-masing  $u$ ,  $v$  dan  $r$  adalah komponen kecepatan di pusat gravitasi kapal ( $G$ ).  $X$ ,  $Y$ , dan  $N$  mewakili gaya hidrodinamika dan momen. Subskrip  $X$ ,  $Y$ , dan  $Z$  dapat dibagi menjadi sub-komponen karena modular sesuai dengan konsep ekspresi MMG [19].

$$X = X_H + X_R + X_P \quad (2.16)$$

$$Y = Y_H + Y_R \quad (2.17)$$

$$N = N_H + N_R \quad (2.18)$$

Dimana :

$H$ ,  $R$ ,  $P$  adalah sebagai elemen lambung (*Hull*), daun kemudi (*Rudder*), propeller.

Untuk mendapatkan hasil simulasi CFD, digunakan pengukuran gaya dan momen hidrodinamika dan non-dimensial yang bekerja pada lambung kapal. Untuk Gaya  $X$  dan  $Y$  dinyatakan sebagai berikut [18] :

$$X'_H = \frac{X_H}{\frac{1}{2} \rho L p p d U^2} \quad (2.19)$$

$$Y'_H = \frac{Y_H}{\frac{1}{2} \rho L p p d U^2} \quad (2.20)$$

Dan momen  $N$  dinyatakan sebagai berikut :

$$N'_H = \frac{N_H}{\frac{1}{2}\rho L p p^2 d U^2} \quad (2.21)$$

Dimana :

$X'_H$ ,  $Y'_H$ , dan  $N'_H$  merupakan koefisien hidrodinamika dan  $U$  merupakan kecepatan kapal

Untuk menghitung *drag* (X) dan *Lift* (Y) pada suatu lambung kapal dapat digunakan persamaan berikut :

$$X = F_D \cos\beta + F_L \sin\beta \quad (2.22)$$

$$Y = -F_D \sin\beta + F_L \cos\beta \quad (2.23)$$

Gaya dan momen kemudian diplot terhadap kecepatan ( $v'$ ). Dengan persamaan untuk *drift test* sebagai berikut :

$$v = -U \sin\beta \quad (2.24)$$

$$v' = v/U \quad (2.25)$$

sedangkan, untuk *turning circle* terhadap kecepatan ( $r'$ ) yaitu [20] :

$$r' = \frac{r \cdot L}{U} = \frac{L}{R} \quad (2.26)$$

Gaya dan momen hidrodinamika yang bekerja pada lambung dapat dilihat sebagaimana persamaan berikut [18] :

$$X'_H = -R'_0 + X'_{vv} v_m'^2 + X'_{vr} v_m' r' + X'_{rr} r'^2 + X'_{vvvv} v_m'^4 + \quad (2.27)$$

$$Y'_H = Y'_v v_m' + Y'_R r' + Y'_{vvv} v_m'^3 + Y'_{vvr} v_m'^2 r' + Y'_{vrr} v_m' r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \quad (2.28)$$

$$N'_H = N'_v v_m' + N'_R r' + N'_{vvv} v_m'^3 + N'_{vvr} v_m'^2 r' + N'_{vrr} v_m' r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \quad (2.29)$$

Dimana :

$X'_{vv}$ ,  $X'_{vr}$ ,  $X'_{rr}$ ,  $X'_{vvvv}$ ,  $Y'_v$ ,  $Y'_R$ ,  $Y'_{vvv}$ ,  $Y'_{vvr}$ ,  $Y'_{vrr}$ ,  $Y'_{rrr}$ ,  $N'_v$ ,  $N'_R$ ,  $N'_{vvv}$ ,  $N'_{vvr}$ ,  $N'_{vrr}$ , dan  $N'_{rrr}$  disebut hidrodinamika turunan dari manuver.

persamaan gaya gerak manuver berdasarkan kondisi drift test [21] :

$$X = X_0 + X_{vv} v^2 \quad (2.30)$$

$$Y = Y_v v + Y_{vvv} v^3 \quad (2.31)$$

$$N = N_v v + N_{vvv} v^3 \quad (2.32)$$

persamaan gaya gerak manuver berdasarkan *turning circle* [21] :

$$X = X_0 + X_{rr} r^2 \quad (2.33)$$

$$Y = Y_r r + Y_{rrr} r v^3 \quad (2.34)$$

$$N = N_r r + N_{rrr} r^3 \quad (2.35)$$

*Course Stability Index* (C) atau perhitungan harga C merupakan kemampuan kapal untuk mempertahankan posisi kapal tetap berada pada original course direction (arah sebenarnya) [22], didasarkan pada persamaan 2.36 berikut ini :

$$C = N'_v (m'u - Y'_r) + N'_r Y'_v \quad (2.36)$$

dengan tidak mengikut sertakan pengaruh kemudi kapal yang akan dihitung berdasarkan koefisien hidrodinamika.

### 2.3.4 Validasi koefisien hidrodinamika

Adapun validasi drift simulasi lambung kapal feri dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan *empirical* formula lee et al [23] dan yoshimura dan masumoto [24] serta kijima et al [25] :

$$X'_{vv} = 0,0014 - 0,1975d \left( \frac{1 - CB}{B} \right) \left( \frac{L}{d} \right) \quad (2.37)$$

$$X'_{vv} = 1,15 \left( \frac{CB}{L/B} \right) - 0,18 \quad (2.38)$$

$$Y'_v = - \left( -0,4545 \frac{d}{L} + 0,065 C_B \frac{B}{L} \right) \frac{L}{d} \quad (2.39)$$

$$Y'_v = - \left( 0,5\pi \frac{2d}{L} + 1,4 \frac{C_B}{L/B} \right) \quad (2.40)$$

$$Y'_v = - \left( 0,5\pi \frac{2d}{L} + 1,4 C_B \frac{B}{L} \right) \quad (2.41)$$

$$Y'_{vvv} = \left( -0,6469(1 - CB) \frac{d}{B} + 0,0027 \right) \frac{L}{d} \quad (2.42)$$

$$Y_{vvv} = -0,185 \frac{L}{B} + 0,48 \quad (2.43)$$

$$N_v = -2 \frac{d}{L} \quad (2.44)$$

$$N_v = \left( -0,23 \frac{d}{L} + 0,0059 \right) \frac{L}{d} \quad (2.45)$$

Adapun validasi turning simulasi lambung kapal feri dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan empirical formula lee et al [23] dan yoshimura dan masumoto [24] :

$$X_{rrr} = \left( -0,0027 + 0,0076 C_B \frac{d}{B} \right) \frac{L}{d} \quad (2.46)$$

$$X_{rrr} = -0,085 \frac{C_B}{L/B} + 0,008 - x_G m_y \quad (2.47)$$

$$Y_r = \left( -0,115 C_B \frac{B}{L} + 0,0024 \right) \frac{L}{d} \quad (2.48)$$

$$Y_{rrr} = \left[ -0,0233 C_B \frac{d}{B} + 0,0063 \right] \frac{L}{d} \quad (2.49)$$

$$Y_{rrr} = -0,051 \quad (2.50)$$

$$N_r = \left[ -0,003724 + 0,10446 \frac{d}{L} - 1,393 \left( \frac{d}{L} \right)^2 \right] \frac{L}{d} \quad (2.51)$$

$$N'_r = -0,54 \frac{2d}{L} + \left( \frac{2d}{L} \right)^2 \quad (2.52)$$

$$N_{rrr} = \left[ -0,0572 + 0,03 C_B \frac{d}{L} \right] \frac{L}{d} \quad (2.53)$$

$$N_{rrr} = \left[ \frac{0,25 C_B}{L/B} \right] - 0,056 \quad (2.54)$$

## 2.4 Computational Fluid Dynamic

CFD merupakan analisis sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia melalui simulasi berbasis *computer* [26]. Tujuan dari CFD ini adalah untuk menyelesaikan perkiraan (secara *numerik*) aliran persamaan dasar yang solusinya memberi kita gerakan dan karakteristik lain dari aliran. Teknik -teknik ini mematahkan domain spasial dan waktu untuk mencapai solusi. pemakaian CFD secara umum dapat dipakai untuk memprediksi :

1. Aliran suatu fluida beserta distribusi suhunya
2. Transfer massa
3. Perubahan fasa seperti pada proses *melting*, pengembunan dan Pendidihan

4. Reaksi kimia seperti oksidasi
5. Gerakan mekanis seperti piston, *fan* dan propeller pada kapal
6. Tegangan dan tumpuhan pada benda solid
7. Gelombang *electromagnet*

Persamaan dasar yang digunakan pada persamaan Navier-Stokes dalam perhitungan aliran fluida yaitu menggunakan persamaan energi, momentum dan kontinuitas. Persamaan Navier-Stokes ini ditemukan oleh G.G.Stokes di Inggris dan M.Navier di Prancis sekitar awal tahun 1800 [26] adapun persamaan-persamaannya yaitu sebagai berikut :

1. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.55)$$

2. Persamaan momentum

Momentum kearah sumbu X

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} + \left( \frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial x_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Momentum kearah sumbu Y

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} \\ = \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} + \left( \frac{\partial t_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial x_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.57)$$

Momentum kearah sumbu Z

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \\ + \left( \frac{\partial t_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial x_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.58)$$

3. Persamaan energi

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_r)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_r)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_r)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_r)}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \\ + \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} - \frac{1}{Re_r Pr_r} + \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{RE_r} \end{aligned}$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial x} (ut_{xx} + ut_{xy} + ut_{yy} + ut_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (ut_{xz} + ut_{yz} + ut_{zz}) \right) \quad (2.59)$$

Dimana :

X = kondisi sumbu x	$E_t$ = energi total (kJ)
Y = kondisi sumbu y	P = tekanan (N/m <sup>2</sup> )
Z = kondisi sumbu z	P = tekanan (N/m <sup>2</sup> )
u = komponen kecepatan U (m/s)	P = tekanan (N/m <sup>2</sup> )
v = komponen kecepatan V (m/s)	P = tekanan (N/m <sup>2</sup> )
w = komponen kecepatan W (m/s)	q = heat flux (kW/m <sup>2</sup> )
t = waktu (s)	Re = Bilangan Reynold
$\rho$ = densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Pr = bilangan Prandtl

Aspek penting dari segala jenis simulasi pada aliran fluida disekitar badan kapal yaitu metode yang digunakan untuk memodelkan hubungan udara/air. Navier Stokes sebagai teknik pemecahan CFD, banyak digunakan untuk berbagai jenis permasalahan aliran fluida. Dalam bentuk yang paling umum, gerak fluida diatur oleh sistem kesetimbangan Navier-Stokes mendefinisikan seluruh aliran fluida satu fasa. Persamaan ini menyatakan bahwa perubahan dalam momentum (percepatan) partikel-partikel fluida bergantung hanya kepada gaya viskos tekanan internal dan gaya viskos tekanan eksternal yang bekerja pada fluida. Persamaan Navier-Stokes dapat diinterpretasikan sebagai penjumlahan dari 4 gaya (*gravitational body force, pressure gradient forces, viscous forces dan inertial force*) [27]

1. *Gravitasi Body Force*, Seluruh gaya yang bekerja pada fluida tanpa adanya kontak fisik secara langsung dan terdistribusi secara merata dalam volume fluida.
2. *Pressure gradient force*
3. *Viscous Forces*, adalah ukuran kekentalan suatu fluida yang menunjukkan besar kecilnya gesekan internal fluida. Viskositas fluida berhubungan dengan gaya gesek antar lapisan fluida ketika satu lapisan bergerak melewati lapisan yang lain.
4. *Internal force*, kecenderungan semua benda fisik untuk mempertahankan keadaannya atau menolak perubahan terhadap keadaan geraknya.



CFD terdiri dari metode-metode yang menyelesaikan persamaan bidang dasar yang sesuai dengan syarat batas oleh pendekatan yang melibatkan sejumlah besar elemen (matematika sederhana). Pendekatan ini mengarah secara otomatis ke sejumlah besar hal yang tidak diketahui.

#### **2.4.1 Simulasi computational fluid dynamic**

*Computational Fluid Dynamic* merupakan ilmu sains dalam penentuan penyelesaian numerik dinamika fluida. CFD memanfaatkan 3 kondisi batas (*Boundary Condition*) pada domain fluida sebagai variable input guna menjalankan persamaan tersebut. Sebagai contoh, ketika suatu model yang akan dianalisis melibatkan temperatur maka perhitungan yang dilakukan menggunakan persamaan energi atau konversi dari energi tersebut. Sehingga dapat dikatakan bahwa inisialisasi awal dari persamaan dinamika fluida adalah *boundary condition*. Secara umum proses penyelesaian masalah dengan menggunakan Ansys CFX terdiri dari tiga tahap yang harus dilalui yaitu *Pre-processor*, *solver (solution)*, dan *Post-Processor*.

##### 1. Tahap *Pra- Processor*

*Pre-processor* adalah tahap dimana data diinput mulai dari pembuatan domain serta pembuatan kondisi batas atau *boundary condition*. Ditahap ini juga sebuah benda atau ruangan yang akan dianalisa dibagi-bagi dengan jumlah *grid* tertentu atau sering disebut sebagai *meshing*. Secara umum tahap ini terdiri dari :

- a. Pemodelan
- b. Pembuatan domain fluid
- c. Pemodelan kondisi batas
- d. Optimasi model yang optimum serta pemilihan jumlah *grid* yang optimum

Data yang diperlukan pada batas tergantung dari tipe kondisi batas dan model fisik yang dipakai. Data yang diperlukan pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau data yang dapat diasumsikan. Tetapi asumsi data yang dipakai harus diperkirakan mendekati yang sebenarnya. Input data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh pada hasil simulasi. Dibawah ini beberapa kondisi batas pada Ansys CFX :

a. *Velocity inlet*

Kondisi batas *velocity inlet* digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran *incompressible*

b. *Mass flow inlet*

Nilai tekanan *gauge* digunakan sebagai tebakan awal oleh CFX, selanjutnya akan dikoreksi sendiri sejalan dengan proses iterasi. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulen sama dengan kondisi batas *velocity inlet*

c. *Pressure inlet*

Data tekanan total (absolute), tekanan *gauge*, temperatur, arah aliran dan dari nilai tekanan operasi dan tekanan *gauge*. Metode spesifikasi arah aliran dan turbulensi sama dengan kondisi batas *velocity inlet*.

d. *Pressure outlet*

Pola aliran ini harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*) dan besaran turbulen aliran balik kondisi batas yang dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar dapat di ketahui nilai sebenarnya.

e. *Outflow*

Kondisi batas ini digunakan apabila data keluar pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali pada sisi keluar di ekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar

f. *Pressure fair-field*

Kondisi batas ini untuk memodelkan aliran kompresibel *free-stream* yang mempunyai dimensi yang sangat panjang jarak antara *inlet* dan *outlet* jauh. Besaran yang dimasukan adalah tekanan *gauge* bilangan *Mach*, temperatur aliran arah aliran dan besarnya turbulensi pada sisi keluar

g. *Dinding (wall)*

Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas

ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan

h. *Symmetry* dan *axis*

Pada panel kondisi batas untuk kedua kondisi batas ini tidak ada input data yang diperlukan. Kondisi batas simetri digunakan apabila model geometri kasus yang bersangkutan dan pola aliran pada model tersebut simetri. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk memodelkan dinding tanpa gesekan pada aliran *viskos*. Sedangkan kondisi batas *axis* digunakan sebagai garis tengah (*centerline*) untuk kasus 2D *axisymmetry*.

i. *periodik*

Kondisi batas ini hanya dapat digunakan pada kasus yang mempunyai medan aliran dan geometri yang *periodic*, baik secara translasi atau rotasi

j. *Cell zone : Fluid*

Kondisi batas ini digunakan pada model yang didefinisikan sebagai fluida. Data yang dimasukkan hanya material fluida, didefinisikan sebagai media berpori

k. *cell zone : solid*

Data yang dimasukkan hanya material padatan didefinisikan *heat generation rate* pada kontinum solid . sedangkan kondisi batas ini digunakan pada kontinum model yang didefinisikan sebagai padatan.

l. *Porous media*

Kondisi batas ini digunakan dengan cara mengaktifkan pipihan *porous zone* pada panel fluida. *Porous zone* merupakan pemodelan khusus dari zona fluida selain padatan dan fluida. Digunakan untuk memodelkan aliran yang melewati media berpori dan tahanan yang terdistribusi, misalnya: *packed beds, filter papers, perforated plates, flow distributors, tube banks*.

2. Tahap *Solver*

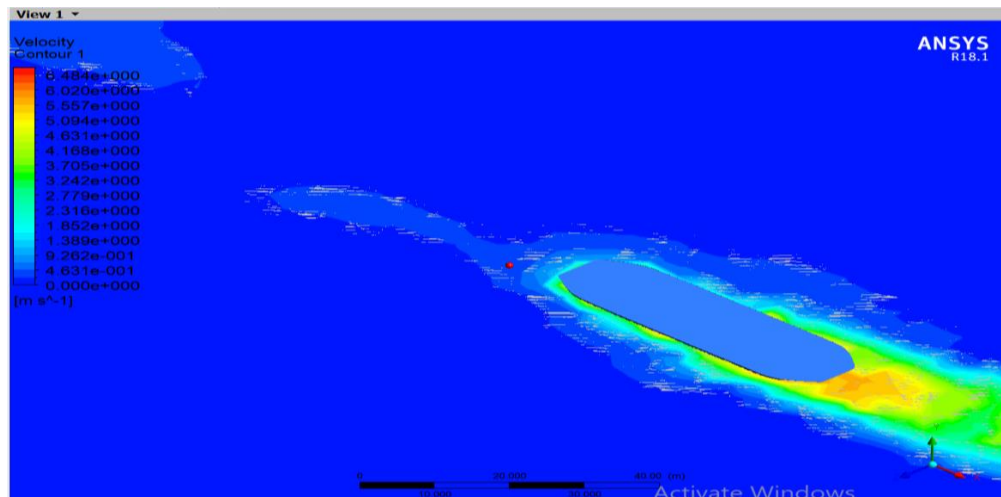
Pada tahap ini dilakukan proses perhitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara *iteratif*. Artinya perhitungan dilakukan hingga menuju *error* terkecil atau

hingga mencapai nilai yang konvergen. Pada tahap ini dilakukan perhitungan secara numerik untuk menyelesaikan masalah dengan CFD. Ada 3 aliran yang berbeda dari Teknik solusi numerik elemen hingga, beda hingga, dan metode *spectral* [27]. dengan penjelasan berikut ini :

- a. Metode Beda Hingga bekerja dengan mengganti suatu persamaan differensial dengan syarat batas menjadi sebuah sistem persamaan linier yang dilakukan dengan mendiskretisasi daerah asal dan mengubah turunan pada persamaan.
  - b. Metode Elemen Hingga adalah suatu metode yang membagi benda yang akan dianalisa, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian – bagian ini disebut elemen yang dihubungkan dengan nodal (*node*) Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Proses pembagian benda ini disebut *meshing*
  - c. Metode *Spectral* adalah formulasi dari metode elemen hingga yang menggunakan *polynomial Piecewise*. Metode ini lebih memiliki fungsi-fungsi basis polynomial berdimensi tinggi yang tidak seragam. Dengan derajat kebebasan yang lebih sedikit per *node*, dapat berguna untuk mendeteksi kelemahan kecil. Non-keseragaman *node* membantu membuat matriks massa diagonal, yang menghemat waktu dan memori komputer. Namun, metode ini kesulitan dalam pemodelan geometri yang kompleks.
3. Tahap *post-processor*

Pada tahap ini yaitu digunakan untuk menganalisis, visualisasi dan mempresentasikan hal interaktif sesuai dengan kasus yang sedang ditinjau. Hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam grafik, bahkan animasi dengan pola warna tertentu. Secara umum tahap ini terdiri dari :

- a. Perhitungan besar hambatan kapal
- b. Perhitungan distribusi kecepatan disekitar badan kapal
- c. Perhitungan distribusi tekanan disekitar badan kapal



Gambar 2.9 Interpretasi hasil simulasi *software* Ansys CFX R18.1

Adapun beberapa keuntungan yang diperoleh dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* antara lain : [27]

- a. Meminimumkan waktu dan biaya dalam mendesain suatu produk, bila proses desain tersebut dilakukan dengan uji eksperimen dengan akurasi tinggi
- b. Memiliki kemampuan sistem studi yang dapat mengendalikan percobaan yang sulit atau tidak mungkin dilakukan dalam eksperimen
- c. Memiliki kemampuan untuk studi di bawah kondisi berbahaya pada saat atau sesudah melewati titik kritis (termasuk studi keselamatan dan skenario kecelakaan). Keakuratannya akan selalu dikontrol dalam proses desain.

Pada bab ini telah dijelaskan teori-teori dan persamaan yang akan digunakan dalam penelitian. Selanjutnya metode yang digunakan dalam proses pengerjaan akan dijelaskan pada bab berikutnya.