

**STUDI TAHANAN KAPAL AKIBAT TRIM MENGGUNAKAN  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

***STUDY OF SHIP RESISTANCE DUE TO TRIM USING  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**MUHAMMAD ANJAS SYAM**

**D052202006**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERKAPALAN**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**

**STUDI TAHANAN KAPAL AKIBAT TRIM MENGGUNAKAN  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

***STUDY OF SHIP RESISTANCE DUE TO TRIM USING  
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**MUHAMMAD ANJAS SYAM**

**D052202006**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERKAPALAN**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**

**PENGAJUAN TESIS**

**STUDI TAHANAN KAPAL AKIBAT TRIM MENGGUNAKAN  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister  
Program Studi Ilmu Teknik Sipil  
Disusun dan diajukan oleh

ttd

**MUHAMMAD ANJAS SYAM  
D052202006**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**TESIS**

**STUDI TAHANAN KAPAL AKIBAT TRIM  
MENGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**MUHAMMAD ANJAS SYAM**

**D052202006**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

pada tanggal 24 Oktober 2023

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

**Pembimbing Utama,**



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

**Pembimbing Pendamping,**



**Dr.Eng. A. Ardianti, ST., MT**  
Nip.19850526 201212 2 002

**Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin**



**Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.**  
Nip.19730926 200012 1 002

**Ketua Program Studi,  
Magister Teknik Perkapalan**



**Dr. Ir. Syamsul Asri, MT.**  
Nip. 19650318 199103 1 003

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muhammad Anjas Syam  
Nomor mahasiswa : D052202006  
Program studi : Magister Teknik Perkapalan

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “STUDI TAHANAN KAPAL AKIBAT TRIM MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, S.T., M.T. dan Dr. Eng. A. Ardianti, S.T., M.T.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 30 November 2023

Yang menyatakan



Muhammad Anjas Syam

## KATA PENGANTAR

### **Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh**

Segala Puji bagi ALLAH ﷻ, Tuhan Seluruh Alam, Semoga Sholawat dan Salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad ﷺ beserta keluarganya dan sahabat sahabatnya

Penelitian ini berjudul **“STUDI TAHANAN KAPAL AKIBAT TRIM MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*”**. Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan studi serta dalam rangka memperoleh gelar Magister Teknik, Pendidikan Strata Dua pada Departemen Teknik Perkapalan Jurusan Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa penyelesaian tugas akhir ini adalah suatu kebahagiaan tersendiri bagi penulis karena tantangan dan hambatan yang menghadang selama mengerjakan tugas akhir ini dapat terlewati dengan doa, usaha dan upaya yang sungguh-sungguh. Penulisan juga menyadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan karena keterbatasan penulis maka dari itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun agar dikemudian hari dapat diperbaiki segala kekurangannya.

Penghargaan dan ucapan terimakasih yang tak terhingga kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis sehingga penulis bersemangat dan termotivasi untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orang Tua dan Keluarga yang selalu memberikan dukungan moral maupun materil serta doa-doa yang dipanjatkan untuk kesuksesan penulis.
2. Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I yang selalu memberikan masukan dan arahan selama penelitian.
3. Dr. Eng. A. Ardianti, ST., MT., selaku Dosen pembimbing II yang selalu memberikan masukan dan arahan selama penelitian dan penulisan tesis.
4. Prof. Ir. Andi Haris Muhammad, S.T., M.T., Ph.D., Dr. Ir. Ganding Sitepu, Dipl-Ing, dan Dr. Ir. Misliah, MS. Tr. selaku Dosen penguji yang selalu memberikan masukan dan arahan selama penelitian dan penulisan tesis.

5. Dr. Ir. Syamsul Asri, M.T. selaku Ketua Prodi Magister Teknik Perkapalan yang selalu memberikan arahan selama proses penyelesaian dan memperoleh gelar Magister Teknik.
6. Dosen - dosen Departemen Teknik Perkapalan atas ilmu yang telah diberikan selama penulis kuliah di Departemen Teknik Perkapalan.
7. Seluruh staf Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang selalu membantu segala administrasi selama kuliah.
8. Kepada teman-teman angkatan Strata Satu Teknik Perkapalan 2015 yang banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Kepada teman-teman program Magister Teknik Perkapalan 2021 yang sama sama berjuang dan mendukung dalam proses penyelesaian dan memperoleh gelar Magister Teknik.
10. Kepada kanda-kanda senior dan adik-adik junior yang penulis tidak bisa sebutkan satu persatu.
11. Yang terakhir penulis mengucapkan terima kasih untuk seluruh pihak baik secara langsung maupun tidak langsung yang memiliki peranan dan kontribusi di dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Semoga segala amal dan kebaikannya kepada penulis mendapatkan balasan yang berlimpah dari ALLAH ﷻ, Besar harapan penulis semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya bagi penulis selaku mahasiswa yang mengerjakannya.

Penulis

Muhammad Anjas Syam

## ABSTRAK

**MUHAMMAD ANJAS SYAM.** *Studi Tahanan Kapal akibat Trim menggunakan Computational Fluid Dynamics* (dibimbing oleh **Suandar Baso, Andi Ardianti**)

Ketika kapal mengalami trim, parameter-parameter geometri kapal yang tercelup di air berubah dibandingkan dengan kondisi *even keel* seperti sarat kapal, panjang garis air dan luas permukaan basah. Semua faktor ini memiliki efek pada tahanan kapal pada kecepatan dan kondisi muatan tertentu. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis tahanan kapal pada kondisi trim. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh trim terhadap tahanan kapal, serta menjelaskan perbandingan tahanan kapal pada kondisi *even keel*, trim haluan dan trim buritan berdasarkan analisis Computational Fluid Dynamics. Metode perhitungan tahanan dalam penelitian ini menggunakan software *CFD (Autodesk CFD)*. Jenis kapal dalam penelitian ini adalah kapal kontainer, sedangkan untuk variasi trim yang digunakan, terdiri dari kondisi *even keel*, kondisi trim haluan dan kondisi trim buritan. Dalam penelitian ini, analisis hidrodinamika kapal menggunakan aplikasi *Autodesk CFD* telah berhasil dilakukan, parameter dinamis seperti *velocity magnitude*, distribusi *static pressure* pada lambung kapal, karakteristik pola aliran dan tahanan telah didapatkan. Tahanan model kapal dalam kondisi trim haluan dan trim buritan menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu meningkat sesuai dengan bertambahnya nilai trim. Namun untuk perbandingan tahanan model kapal dari setiap kondisi trim dengan tahanan model kapal kondisi *even keel* terdapat perbedaan dimana tahanan kondisi trim haluan mengalami peningkatan dengan nilai persentase rata-rata sebesar 3,32%. Sedangkan untuk kondisi trim buritan mengalami penurunan dengan nilai persentase rata-rata sebesar 0,06%. Kemudian, secara keseluruhan, tahanan model kapal kondisi trim haluan -1,441 m memiliki tahanan terbesar yaitu 6,044 N dibandingkan dengan kondisi lainnya. Sedangkan, tahanan model kapal kondisi trim buritan 0,5 m memiliki tahanan terkecil yaitu 5,674 m.

**Kata kunci:** tahanan kapal, trim haluan, trim buritan, *autodesk CFD*

## ABSTRACT

**MUHAMMAD ANJAS SYAM.** *Study of Ship Resistance due to Trim using Computational Fluid Dynamics* (supervised by **Suandar Baso, Andi Ardianti**)

When a ship experiences trim, the geometric parameters of the underwater ship change compared with even keel condition, such as the ship's draft, length of waterline, and wetted surface area. All these factors affect the ship resistance at certain speeds and loading conditions. Therefore, an analysis of the resistance of a ship experiencing trim is necessary. The purpose of this research is to understand the influence of trim on ship resistance, and to explain the comparison of ship resistance in even keel, trim by bow, and trim by stern conditions based on Computational Fluid Dynamics analysis.. The method for calculating resistance in this research applies CFD software (Autodesk CFD). The type of ship in this study is a container ship, and for the trim variations, it includes even keel condition, trim by bow and trim by stern. In this study, the hydrodynamic analysis of the ship using Autodesk CFD application has been successfully conducted. Dynamic parameters such as velocity magnitude, static pressure distribution on the ship's hull, flow pattern characteristics, and resistance have been obtained. The ship model's resistance trim by bow and trim by stern conditions shows a similar tendency, increasing with the trim value. However, when comparing the ship model resistance from each trim condition with the ship model resistance in the even keel condition, there is a difference. The trim by bow condition experiences an increase with an average percentage value of 3.32%. Meanwhile, the trim by stern condition experiences a decrease with an average percentage value of 0.06%. Then, overall, trim by bow condition of -1.441 m shows the highest resistance at 6.044 N compared to the other conditions. On the other hand, the ship model's resistance under trim by stern condition at 0.5 m has the smallest resistance, which is 5.674 N.

**Keywords:** ship resistance, trim by bow, trim by stern, autodesk CFD

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS.....</b>	<b>ii</b>
<b>PERSETUJUAN TESIS .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL .....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	4
1.5 Ruang Lingkup .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Tahanan Kapal .....	5
2.2 Komponen Tahanan Kapal .....	6
2.3 Trim Kapal .....	8
2.4 Aliran Fluida .....	9
2.5 Hukum Perbandingan Model .....	15
2.6 Autodesk CFD .....	18
2.7 <i>Maxsurf</i> .....	22
2.8 <i>Rhinoceros 3D</i> .....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>25</b>
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	25
3.2 Jenis Penelitian.....	25

3.3 Metode Pengumpulan Data.....	25
3.4 Metode Pengolahan Data .....	27
3.4.1 Penentuan Variasi Trim .....	27
3.4.2 Pemodelan Kapal .....	29
3.4.3 Pemodelan Ulang menggunakan Aplikasi Rhinoceros.....	29
3.4.4 Simulasi CFD.....	32
3.4.5 Verifikasi.....	37
3.4.6 Analisa Data.....	37
3.4.7 Kesimpulan .....	38
3.5 Diagram Alir .....	39
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>40</b>
4.1 <i>Initial Condition</i> .....	40
4.2 Variasi Trim .....	41
4.3 Pengaturan <i>Mesh</i> .....	42
4.3.1 <i>Mesh Independence Study</i> .....	42
4.3.2 Statistik Jumlah <i>Mesh</i> .....	43
4.4 Nilai <i>Residual In</i> dan <i>Residual Out</i> .....	44
4.5 Visualisasi <i>Velocity Magnitude</i> , <i>Static Pressure</i> dan Pola Aliran .....	44
4.5.1 Visualisasi <i>Velocity Magnitude</i> .....	44
4.5.2 Visualisasi <i>Static Pressure</i> .....	50
4.5.3 Visualisasi Pola Aliran.....	53
4.6 Prediksi Tahanan Model Kapal.....	55
4.7 Perbandingan Nilai Tahanan Model Kapal menggunakan Autodesk CFD dan metode Holtrop menggunakan Maxsurf.....	57
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>59</b>
5.1 Kesimpulan .....	59
5.2 Saran.....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>61</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>64</b>

**DAFTAR TABEL**

<b>Tabel 1</b> Data ukuran utama kapal.....	25
<b>Tabel 2</b> Penentuan variasi trim.....	28
<b>Tabel 3</b> Ukuran model kapal skala 1:50.....	28
<b>Tabel 4</b> Ukuran tangki pengujian (domain).....	31
<b>Tabel 5</b> <i>Material Environment</i> .....	40
<b>Tabel 6</b> <i>Property Setting in Boundary Condition</i> .....	40
<b>Tabel 7</b> <i>Mesh Size</i> .....	41
<b>Tabel 8</b> Statistik Jumlah Mesh .....	43
<b>Tabel 9</b> Nilai <i>residual in</i> dan <i>residual out</i> hasil simulasi.....	44
<b>Tabel 10</b> Perbandingan tahanan model kapal dari setiap variasi trim.....	55
<b>Tabel 11</b> Perbedaan tahanan model metode CFD dan Maxsurf.....	58

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b> Tahanan pada kapal .....	5
<b>Gambar 2</b> Kondisi kapal secara memanjang .....	9
<b>Gambar 3</b> Aliran <i>streamline</i> yang melintasi suatu <i>body</i> .....	10
<b>Gambar 4</b> Contoh aliran fluida dari suatu <i>sub-merged body</i> .....	13
<b>Gambar 5</b> Aliran Laminer .....	14
<b>Gambar 6</b> Aliran Transisi .....	14
<b>Gambar 7</b> Aliran Turbulen .....	15
<b>Gambar 8</b> Simulasi CFD pada lambung kapal .....	18
<b>Gambar 9</b> Tampilan pemodelan kapal pada <i>Maxsurf Modeler</i> .....	23
<b>Gambar 10</b> Tampilan pemodelan pada <i>Rhinoceros 3D</i> .....	24
<b>Gambar 11</b> <i>Lines plan</i> kapal Intan Daya 17 .....	26
<b>Gambar 12</b> Data trim pada <i>intact stability calculation</i> .....	26
<b>Gambar 13</b> Pengaturan trim dan <i>displacement</i> .....	27
<b>Gambar 14</b> Data hydrostatics trim -1,441 m .....	28
<b>Gambar 15</b> Pemodelan pada aplikasi <i>Maxsurf Modeler</i> .....	29
<b>Gambar 16</b> Pemodelan pada aplikasi <i>Rhinoceros</i> .....	30
<b>Gambar 17</b> Ukuran kolam pengujian (domain) berdasarkan ITTC.....	31
<b>Gambar 18</b> Pemodelan kolam pengujian (domain) dalam 3D .....	31
<b>Gambar 19</b> Visualisasi tahap <i>geometry</i> model kapal dan <i>boundary layer</i> .....	33
<b>Gambar 20</b> Visualisasi input material model kapal dan <i>boundary layer</i> .....	33
<b>Gambar 21</b> Visualisasi input <i>boundary condition</i> model kapal dan <i>boundary layer</i> .....	34
<b>Gambar 22</b> Visualisasi tahap <i>meshing sizing</i> .....	35
<b>Gambar 23</b> Visualisasi jenis mesh tetrahedral.....	36
<b>Gambar 24</b> Visualisasi tahap <i>solve</i> model kapal dan <i>boundary layer</i> .....	36
<b>Gambar 25</b> Diagram alir penelitian .....	39
<b>Gambar 26</b> Perbedaan sarat haluan ( $T_f$ ) dan sarat buritan ( $T_a$ ) setiap kondisi trim .....	41
<b>Gambar 27</b> Perbandingan nilai tahanan terhadap jumlah mesh .....	42
<b>Gambar 28</b> Visualisasi velocity magnitude kondisi trim haluan .....	46

<b>Gambar 29</b> Visualisasi velocity magnitude kondisi <i>even keel</i> .....	47
<b>Gambar 30</b> Visualisasi velocity magnitude kondisi trim buritan .....	49
<b>Gambar 31</b> Visualisai <i>Static pressure</i> kondisi trim haluan .....	51
<b>Gambar 32</b> Visualisai <i>Static pressure</i> kondisi <i>even keel</i> .....	51
<b>Gambar 33</b> Visualisai <i>Static pressure</i> kondisi trim buritan.....	52
<b>Gambar 34</b> Visualisasi pola aliran kondisi trim haluan.....	53
<b>Gambar 35</b> Visualisasi pola aliran kondisi <i>even keel</i> .....	54
<b>Gambar 36</b> Visualiasi pola aliran kondisi trim buritan.....	54
<b>Gambar 37</b> Grafik hubungan antara trim dan tahanan kapal.....	56
<b>Gambar 38</b> Perbandingan persentase tahanan model kondisi trim haluan dan trim buritan.....	57
<b>Gambar 39</b> Grafik perbedaan nilai tahanan metode CFD dan Maxsurf.....	58

**DAFTAR LAMPIRAN**

<b>Lampiran 1</b> Hasil wall calculator drag force model kapal .....	65
<b>Lampiran 2</b> Penentuan Skala Model .....	67
<b>Lampiran 3</b> Penentuan Kecepatan Model .....	68
<b>Lampiran 4</b> Data <i>Hydrostatics</i> dari setiap variasi trim .....	69
<b>Lampiran 5</b> Visualisasi <i>velocity magnitude</i> tampak bawah disertai dengan vektor.....	71
<b>Lampiran 6</b> Visualisasi Pola Gelombang .....	74

## DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan	
$R_T$	Tahanan total	N
$C_T$	Koefisien tahanan total	
$(1 + k)$	<i>Form factor</i>	
P	Tekanan	Pa
$\rho$	Massa jenis	$\text{Kg/m}^3$
G	Percepatan gravitasi bumi	$\text{m/s}^2$
H	Tinggi tertentu dari garis datar	m
V	Kecepatan sebuah benda	m/s
P	Tekanan statis fluida	$\text{N/m}^2$
$\mu$	Viskositas	Pa.s
$\Lambda$	Skala perbandingan	
$L_s$	Panjang kapal	m
$L_m$	Panjang model	m
$B_s$	Lebar kapal	m
$B_m$	Lebar model	m
$T_s$	Sarat kapal	m
$T_m$	Sarat model	m
Fr	Angka froude	
$V_s$	Kecepatan kapal	m/s
$V_m$	Kecepatan model	m/s
Rn	Angka Reynold	
LOA	<i>Lenght over all</i>	m

LBP	<i>Lenght between perpendicular</i>	m
LWL	<i>Length water line</i>	m
B	<i>Breadht</i>	m
D	<i>Draught</i>	m
D	<i>Draft</i>	m
V	<i>Velocity</i>	knot
$\Delta$	<i>Displacement</i>	ton
S	<i>Watted surface area</i>	m <sup>2</sup>
CP	<i>Perismatic coefficient</i>	
CB	<i>Block coefficient</i>	

---

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Mobilisasi barang dengan menggunakan transportasi laut, berdampak pada timbulnya masalah lingkungan. Transportasi laut terutama kapal yang menggunakan penggerak mesin diesel merupakan salah satu sumber pencemaran udara. Kapal dengan mesin besar menggunakan konsumsi bahan bakar minyak diesel atau solar menghasilkan sejumlah emisi gas buang seperti Nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan sulfur oksida (SO<sub>x</sub>) yang telah diketahui dapat menyebabkan masalah kesehatan dan lingkungan. Sebagai upaya menghadapi hal tersebut, International Maritime Organization (IMO) telah mendorong peningkatan efisiensi energi dan mengembangkan langkah strategis untuk mengurangi emisi kapal. Sejak tahun 2013, IMO telah menetapkan dua standar dalam penghematan bahan bakar kapal. Keduanya dikenal dengan nama Energy Efficiency Design Index (EEDI) dan Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) (Seo *et al.*, 2015).

Aturan di atas menghasilkan optimasi kinerja kapal pada proses desain untuk mencapai bentuk lambung dan sistem propulsi yang baik. Namun, untuk kapal yang sudah ada, tidak banyak kemungkinan untuk mengubah bentuk lambung atau meningkatkan sistem propulsi. Cara lain yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi adalah kapal perlu mengonsumsi lebih sedikit bahan bakar atau beroperasi dengan cara yang efisien dalam pemakaian bahan bakar. MEPC70 mengarahkan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar kapal, mulai dari penanganan kapal, perencanaan perjalanan, manajemen armada yang lebih baik, dan lain sebagainya. Penanganan kapal bisa melibatkan pemanfaatan waktu pelayanan (TRT) di pelabuhan hingga pengaturan trim kapal (Fadillah, 2015).

Pengoptimalan trim adalah salah satu metode termudah dan termurah dalam pengoptimalan performa kapal dan pengurangan konsumsi bahan bakar. Pengoptimalan trim tidak memerlukan berbagai modifikasi bentuk lambung kapal. Pengoptimalan dapat dilakukan dengan cara melakukan proses bongkar muat secara

tepat atau memilih pengaturan posisi muatan dengan tepat pada saat pemuatan (Reichel *et al.*, 2014).

FORCE Technology adalah konsultan terkemuka dalam optimasi trim, di mana pengujian trim telah dilakukan untuk hampir 300 kapal termasuk kapal tanker, kapal kontainer, kapal LNG dan kapal feri. Pengujian yang telah dilakukan menunjukkan potensi penghematan bahan bakar hingga 15% pada kondisi tertentu dibandingkan dengan kondisi *even keel*. Dalam operasi armada secara keseluruhan, penghematan dapat mencapai 2 hingga 3% (Reichel *et al.*, 2014). Metodologi untuk mempelajari tindakan optimasi trim didasarkan pada kenyataan bahwa ketika kapal diatur trimnya, parameter-parameter berikut dalam geometri kapal akan berubah dibandingkan dengan kondisi *even keel*. Karakteristik lambung kapal dibawah air memengaruhi nilai tahanan kapal, terutama pada bagian haluan dan buritan, sarat kapal, panjang garis air dan luas permukaan basah. Semua faktor ini memiliki efek pada tahanan kapal pada kecepatan dan kondisi muatan tertentu. Dengan demikian, dengan mempelajari pengaruh trim pada tahanan kapal, perancang kapal akan dapat memberikan konfigurasi terbaik kepada operator kapal dalam hal trim pada kedalaman dan kecepatan tertentu dari sudut pandang tahanan kapal minimal. Kunci dari tindakan optimasi trim adalah memprediksi tahanan kapal dengan akurat dan efisien (Le *et al.*, 2021).

Umumnya, tahanan kapal dihitung menggunakan percobaan model pada towing tank. Namun biaya yang diperlukan sangat besar. Metode numerik dengan menggunakan software perkapalan dapat menjadi salah satu solusi dalam menghitung tahanan kapal (Sugianto dkk, 2014). CFD (*Computational Fluid Dynamic*) merupakan ilmu sains penyelesaian numerik dinamika fluida selain pendekatan teori dan eksperimen murni. Konsep dasar penggunaan software berbasis CFD itu sendiri adalah penyelesaian metoda numerik dengan sebuah persamaan fluida yaitu Persamaan Navier-Stokes, dengan prinsip hukum kekekalan massa, kekekalan momentum dan kekekalan energi. Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa alat CFD telah banyak dikembangkan dan terlibat dalam aplikasi desain kapal dan penelitian kapal. CFD ini telah digunakan dalam desain kapal praktis untuk memprediksi aliran di sekitar lambung, tekanan, kontur gelombang, tahanan, interaksi gelombang dan lambung kapal dan lain sebagainya. Meskipun

CFD telah berkembang secara progresif dalam enam puluh tahun terakhir dan semakin luas tersedia, akan lebih berkembang di masa depan (Suandar Baso dkk, 2021)

Seiring dengan perkembangan dan peningkatan CFD oleh beberapa peneliti dan konsultan desain kapal, workshop CFD dalam hidrodinamika kapal telah diadakan oleh *International Towing Tank Conference (ITTC)* sejak tahun 1980. ITTC menyediakan pedoman praktik yang dapat diterapkan pada sebagian besar aplikasi hidrodinamika kapal. Meskipun demikian, validasi simulasi numerik adalah cara penting untuk menginterpretasi hasil, dan identifikasi aspek-aspek simulasi merupakan usaha yang harus terus ditingkatkan.

Berdasarkan penjelasan tersebut, perlu dicatat bahwa kemajuan CFD dalam penyelidikan hidrodinamika kapal telah dilakukan dengan baik, namun akan terus berkembang dan ditingkatkan di masa depan untuk memperoleh hasil yang memuaskan. Lebih lanjut, OpenFOAM, sebagai sumber terbuka, telah banyak digunakan oleh peneliti dan industri. Di sisi lain, sumber terbuka, yaitu Autodesk CFD, menggunakan metode diskritisasi, Metode Elemen Hingga (FEM), yang berbeda dengan OpenFOAM. Autodesk CFD gratis ini tersedia dalam versi untuk mahasiswa dan pendidik (Autodesk CFD, 2017). Autodesk CFD dapat memprediksi nilai tahanan kapal, kecepatan fluida di, distribusi tekanan dan pola aliran yang bertindak pada permukaan model kapal.

Berdasarkan dari uraian penjelasan di atas maka dilakukan penelitian dengan judul **“Studi Tahanan Kapal akibat Trim menggunakan *Computational Fluid Dynamics*”**

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang terkait dengan penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh trim terhadap tahanan kapal?
2. Berapakah besar tahanan kapal setelah dilakukan variasi kondisi trim berdasarkan analisis CFD?
3. Bagaimana perbandingan tahanan kapal pada kondisi even keel, trim haluan dan trim buritan?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh trim terhadap tahanan kapal.
2. Untuk menentukan besar perubahan tahanan kapal setelah dilakukan variasi kondisi trim berdasarkan analisis CFD.
3. Untuk menjelaskan perbandingan tahanan kapal pada kondisi even keel, trim haluan dan trim buritan.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sebagai informasi dan tambahan referensi bagi pembaca mengenai pengaruh trim terhadap nilai tahanan kapal.
2. Sebagai pedoman bagi operator kapal dalam pengendalian trim saat kapal beroperasi.
3. Dijadikan sebagai media bahan ajar terkait dengan materi tahanan kapal.
4. Sebagai dasar bagi penelitian lanjutan di bidang terkait.

### **1.5 Ruang Lingkup**

Ruang lingkup penelitian ini difokuskan pada:

1. Penelitian dilakukan dengan menggunakan bantuan software Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamic).
2. Kapal yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis kapal kontainer.
3. Perhitungan model tahanan kapal dilakukan pada kondisi air tenang (stillwater).
4. Perhitungan nilai tahanan kapal tidak mempertimbangkan komponen tahanan tambahan
5. Perhitungan nilai tahanan kapal dengan beberapa variasi kondisi yakni even keel, tiga kondisi trim haluan dan tiga kondisi trim buritan.

## BAB II

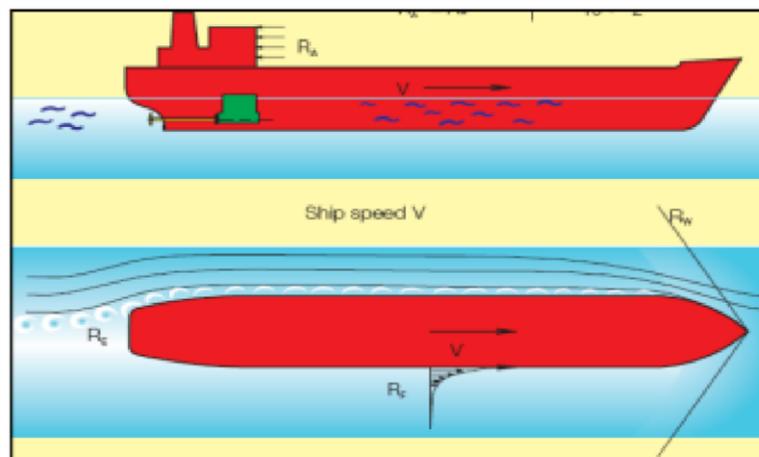
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tahanan Kapal

Tahanan kapal (*ship resistance*) adalah gaya fluida yang bekerja pada kapal sedemikian rupa sehingga melawan gerakan kapal tersebut. Tahanan tersebut sama dengan komponen gaya fluida yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal. (Harvald, 1992).

Tahanan kapal ini perlu diketahui karena merupakan faktor penting yang berpengaruh dalam merencanakan bentuk lambung kapal, selain itu juga tujuannya adalah dalam menghitung daya mesin induk kapal, yang berhubungan dengan konsumsi bahan bakar yang dibutuhkan sehingga dapat dihitung/diestimasi biaya operasional kapal.

Untuk mengatasi tahanan tersebut, maka kapal membutuhkan sejumlah gaya dorong sehingga dapat melewati air laut dengan kecepatan tertentu sesuai dengan kebutuhan operasionalnya. Gaya dorong ini bekerja untuk melawan tahanan pada badan kapal yang tercelup di air, tahanan gelombang dan tahanan dari angin yang mengenai badan kapal yang berada di atas permukaan air laut. Gambaran komponen tahanan ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Sumber: Gria Madya Saputro, 2018

**Gambar 1** Tahanan pada kapal

Tahanan total kapal tersebut merupakan komponen tahanan kapal yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal. Secara sederhana tahanan total kapal dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

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

Dimana :

- $R_T$  : Tahanan total (kN)
- $C_T$  : Koefisien tahanan
- $V$  : Kecepatan kapal (m/s)
- $S$  : Luas bidang basah (m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : Massa jenis (ton/m<sup>3</sup>)

## 2.2 Komponen Tahanan Kapal

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:

### a. 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 tahanan gesek. Tahanan gesek terjadi akibat adanya gesekan permukaan badan kapal dengan media yang dilaluinya. Oleh semua fluida mempunyai viskositas, dan viskositas inilah yang menimbulkan gesekan tersebut. Penting tidaknya gesekan ini dalam suatu situasi fisik tergantung pada jenis fluida dan konfigurasi fisik atau pola alirannya (*flow pattern*). Viskositas adalah ukuran tahanan fluida terhadap gesekan bila fluida tersebut bergerak. Jadi tahanan viskositas (RV) adalah komponen tahanan yang terkait dengan energi yang dikeluarkan akibat pengaruh viskositas.

Tahanan gesek ini dipengaruhi oleh beberapa hal, sebagai berikut :

1) Angka Reynolds (*Reynold's number, Rn*)

Bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskositas yang mengkualifikasikan hubungan gaya tersebut dengan suatu kondisi laminar dan turbulenta. Rumus bilangan Reynolds dapat dilihat pada Persamaan (2).

$$Rn = \frac{V \times L}{\mu} \quad (2)$$

Dimana

V : Kecepatan ( $m/s$ )

L : Panjang (m)

$\mu$  : Viskositas air ( $m^2/s$ )

2) Koefisien gesek (*friction coefficient, Cf*)

Adapun rumus koefisien gesek sesuai pada Persamaan (3).

$$Cf = \frac{0,075}{(\text{Log } Rn - 2)^2} \quad (3)$$

(Merupakan formula dari ITTC)

3) Rasio kecepatan dan panjang kapal (*speed length ratio, Slr*)

Adapun rasio kecepatan dan panjang kapal terdapat pada Persamaan (4).

$$Slr = \frac{Vs}{\sqrt{L}} \quad (4)$$

Dimana L adalah panjang antara garis tegak kapal (m) dan Vs adalah kecepatan kapal (m/s).

b. Tahanan Sisa (*Residual Resistance*)

Tahanan sisa didefinisikan sebagai kuantitas yang merupakan hasil pengurangan dari hambatan total badan kapal dengan hambatan gesek dari permukaan kapal. Hambatan sisa terdiri dari ;

1) Tahanan Gelombang (*Wave Resistance*)

Tahanan gelombang adalah hambatan yang diakibatkan oleh adanya gerakan kapal pada air sehingga dapat menimbulkan gelombang baik pada saat air tersebut dalam keadaan tenang maupun pada saat air tersebut sedang bergelombang.

2) Tahanan Udara (*Air Resistance*)

Tahanan udara diartikan sebagai tahanan yang di alami oleh bagian badan kapal utama yang berada diatas air dan bangunan atas(*Superstructure*) karena gerakan kapal di udara. Tahanan ini tergantung pada kecepatan kapal dan luas serta bentuk bangunan atas tersebut. Jika angin bertiup maka tahanan tersebut juga akan tergantung pada kecepatan angin dan arah relatif angin terhadap kapal.

3) Tahanan Bentuk (*Form Resistance*)

Tahanan ini erat kaitannya dengan bentuk badan kapal, dimana bentuk lambung kapal yang tercelup di bawah air menimbulkan suatu tahanan karena adanya pengaruh dari bentuk kapal tersebut.

4) Tahanan tambahan (*Added Resistance*)

Tahanan ini mencakup tahanan untuk korelasi model kapal. Hal ini akibat adanya pengaruh kekasaran permukaan kapal, mengingat bahwa permukaan kapal tidak akan pernah semulus permukaan model. Tahanan tambahan juga termasuk tahanan udara, anggota badan kapal dan kemudi.

Komponen tahanan tambahan terdiri dari :

- Tahanan anggota badan (*Appendages Resistance*)

Yaitu tahanan akibat adanya bos poros, penyangga poros, lunas bilga, daun kemudi dan sebagainya.

- Tahanan kekasaran (*rudeness Resistance*)

Tahanan yang terjadi akibat kekasaran dari korosi air, pengotoran pada badan kapal, dan tumbuhan laut.

- Hambatan kemudi (*Steering Resistance*)

Tahanan yang terjadi akibat pemakaian kemudi mengakibatkan timbulnya hambatan kemudi (Arwini, 2018).

### 2.3 Trim Kapal

Trim didefinisikan sebagai perbedaan antara sarat di AP (*TA*) dan sarat di FP (*TF*).

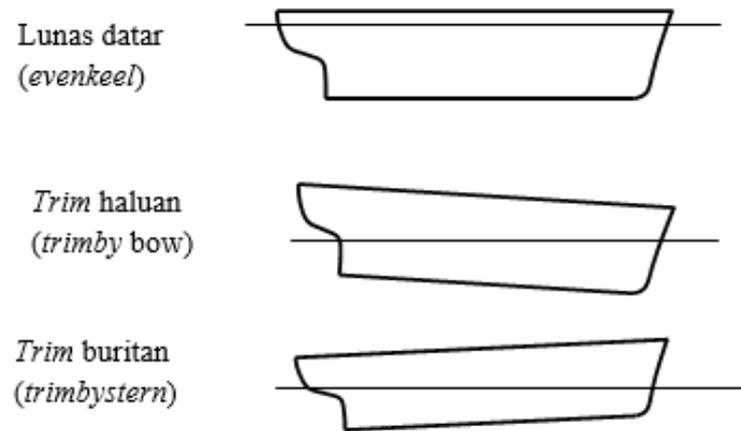
$$Trim = TA - TF \quad (5)$$

Hasil positif menunjukkan terjadi Trim Buritan. Pada saat kapal dalam kondisi trim, displasemen dan kecepatan kapal tetap konstan, tidak ada penambahan

ballast dan kapal tidak mengalami penambahan kecepatan meskipun hambatan berubah ketika kondisi trim (Larsen *et al*, 2012).

Secara umum terdapat tiga kondisi yang dapat dialami kapal, dan dapat dilihat pada Gambar 2.

- Evenkeel yaitu draft depan kapal sama dengan draft belakang kapal.
- Trim haluan yaitu draft belakang lebih kecil dari draft depan.
- Trim buritan yaitu draft belakang lebih besar dari draft depan.



**Gambar 2** Kondisi kapal secara memanjang

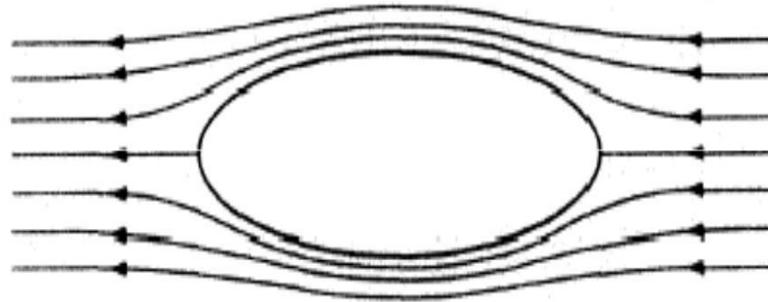
Kondisi trim dapat menyebabkan perubahan parameter pada kapal. Parameter

- parameter yang berubah diantaranya adalah sebagai berikut:
  - *Draft*
  - *Wetted surface area (WSA)*
  - *Water line length (LWL)*
  - *Residual resistance coefficient*
  - *Thrust deduction*
  - *Wake fraction*
  - *Propeller efficiency*

## 2.4 Aliran Fluida

Fluida adalah zat yang mengalir atau berubah bentuk dan memiliki kecenderungan untuk mengalir. Ketika fluida mengalir melalui suatu titik atau jalur, terdapat berbagai parameter yang terkait dengan aliran fluida berubah dalam pola

yang berbeda. Dua parameter umum dalam setiap aliran fluida adalah tekanan fluida dan kecepatan aliran partikel fluida. Aliran fluida dapat dibagi menjadi pola yang berbeda berdasarkan variasi parameter aliran dengan mempertimbangkan waktu dan jarak. Hidrodinamika klasik mengarahkan pada bagaimana bentuk pola aliran fluida yang melintasi suatu *body* seperti yang ditunjuk pada Gambar 3.



**Gambar 3** Aliran *streamline* yang melintasi suatu *body*

Ketika fluida bergerak melintasi *body*, jarak antara *streamline* tersebut mengalami perubahan, dan kecepatan aliran fluida pun juga mengalami perubahan, hal ini disebabkan aliran massanya didalam *streamlines* tersebut adalah konstan. Berdasarkan teorema Bernoulli maka hal ini juga berkaitan dengan adanya perubahan tekanan. Untuk suatu *streamline* yang diberikan tersebut; jika  $p$ ,  $\rho$ ,  $v$ , dan  $h$  adalah tekanan, massa jenis, kecepatan, dan tinggi tertentu dari garis datar; maka dapat diformulasikan sesuai pada Persamaan (6) (Suryo W. Adji, 2009).

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh = constant \quad (6)$$

Teori hidrodinamika sederhana senantiasa bekerja dengan fluida tanpa viskositasnya. Didalam suatu sistem fluida *non-viscous*. Suatu *body* yang ditenggelamkan dan digerakkan pada sistem fluida *non-viscous* tersebut, maka *body* tersebut tidak mengalami adanya tahanan (*resistance*) meskipun fluida tersebut dilalui oleh gerakan *body*, maka kondisi fluida tersebut kembali ke bentuk awalnya setelah di lintasi *body* tersebut, ada sejumlah gaya – gaya lokal yang bekerja pada *body* tersebut, akan tetapi gaya – gaya tersebut saling meniadakan ketika

diintegrasikan pada seluruh *body*. Gaya – gaya lokal tersebut terjadi sebagai akibat terjadinya perubahan tekanan, yang diakibatkan oleh adanya perubahan kecepatan di dalam aliran fluida (Suryo W. Adji, 2009).

Dalam mempelajari dinamika aliran fluida, maka akan sangat berguna bila kita kembangkan suatu angka dari *parameter non-dimensional*. Dimana angka tersebut dapat mengkarakteristikan aliran dan gaya – gaya yang bekerja, hal ini didasari pada sifat – sifat fluidanya. Sifat – sifat fisik fluida yang erat hubungannya dalam mempelajari tahanan kapal adalah massa jenis ( $\rho$ ), viskositas ( $\mu$ ), tekanan statis fluida ( $p$ ). Jika tahanan kapal (*resistance*) adalah ( $R$ ), kecepatan adalah ( $V$ ), dan panjang kapal adalah ( $L$ ), maka tahanan kapal dalam analisa *dimensional* dapat diformulasikan sesuai pada Persamaan (7) (Sutiyo W. Adji, 2009).

$$R = f [L^a V^b \rho^c \mu^d g^e p^f] \quad (7)$$

Sejumlah *quantity* yang masuk pada ekspresi formulasi tersebut di atas, masih dapat diekspresikan ke bentuk *fundamental dimensions*; dimensi waktu ( $T$ ), dimensi massa ( $M$ ), dan dimensi panjang ( $L$ ). Sebagai contoh tahanan kapal ( $R$ ) adalah gaya, sehingga memiliki dimensi *fundamental* ( $MLT^{-2}$ ) dan massa jenis ( $\rho$ ) memiliki dimensi ( $ML^{-3}$ ), dan sebagainya, maka dengan men-subtitusi keseluruhan parameter ke bentuk dimensi fundamental-nya, diperoleh hubungan sesuai pada Persamaan (8) (Suryo W. Adji, 2009).

$$\frac{ML}{T^2} = f \left[ L^a \left( \frac{L}{T} \right)^b \left( \frac{M}{L^3} \right)^c \left( \frac{M}{LT} \right)^d \left( \frac{L}{T^2} \right)^e \left( \frac{M}{LT^2} \right)^f \right] \quad (8)$$

Dari persamaan tersebut diperoleh dua kelompok persamaan dimensi fundamental, yakni persamaan dimensi fundamental dengan angka pangkat yang diketahui dan yang lainnya dengan angka pangkat yang tidak diketahui. Untuk persamaan dimensi fundamental dengan angka pangkatnya tidak diketahui, maka dapat digolongkan menjadi tiga ekspresi yang dapat di lihat pada Persamaan (9) (Suryo W. Adji, 2009).

$$R = \rho V^2 L^2 f \left[ \left( \frac{\mu}{\rho V L} \right)^d, \left( \frac{gL}{V^2} \right)^e, \left( \frac{p}{\rho V^2} \right)^f \right] \quad (9)$$

Maka, persamaan keseluruhan dari tahanan (*resistance*) dapat ditulis sesuai pada Persamaan (10) (Suryo W. Adji, 2009).

$$R = \rho V^2 L^2 f \left[ f_1 \left( \frac{\mu}{\rho V L} \right)^d, f_2 \left( \frac{gL}{V^2} \right)^e, f_3 \left( \frac{p}{\rho V^2} \right)^f \right] \quad (10)$$

Sehingga melalui analisa terhadap ekspresi tersebut di atas, dapat diindikasikan bahwa kombinasi *non-dimensional* yang signifikan yang dapat dilihat pada Persamaan (11) (Suryo W. Adji, 2009)

$$\frac{R}{\rho V^2 L^2} V L \frac{\rho}{\mu}, \frac{V}{(gL)^{0.5}}, \frac{p}{\rho V^2} \quad (11)$$

Dari ketiga rasio tersebut di atas, diperoleh *Resistance Coefficient* ( $C_T$ ), Reynold number (Re), Froude number (Fn). Sedangkan rasio yang keempat adalah mempunyai relasi terhadap kavitasi. Pada topik tahanan kapal, yang paling sering digunakan adalah angka Re dan Fn (Suryo W. Adji, 2009).

Rasio  $\mu/\rho$  adalah dikenal dengan pengertian angka viskositas kinematis, yang dinyatakan dengan notasi  $\nu$ . Jika  $L^2$  pada ekspresi rasio *non-dimensional* yang pertama tersebut adalah merupakan luasan basah dari *body*, yang dinotasikan dengan S, maka ketiga rasio *non-dimensional* di atas dapat diekpresikan sesuai pada Persamaan (12) (Suryo W. Adji, 2009).

$$\frac{R}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = f \left( \frac{VL}{\nu}, \frac{gL}{V^2} \right) \quad (12)$$

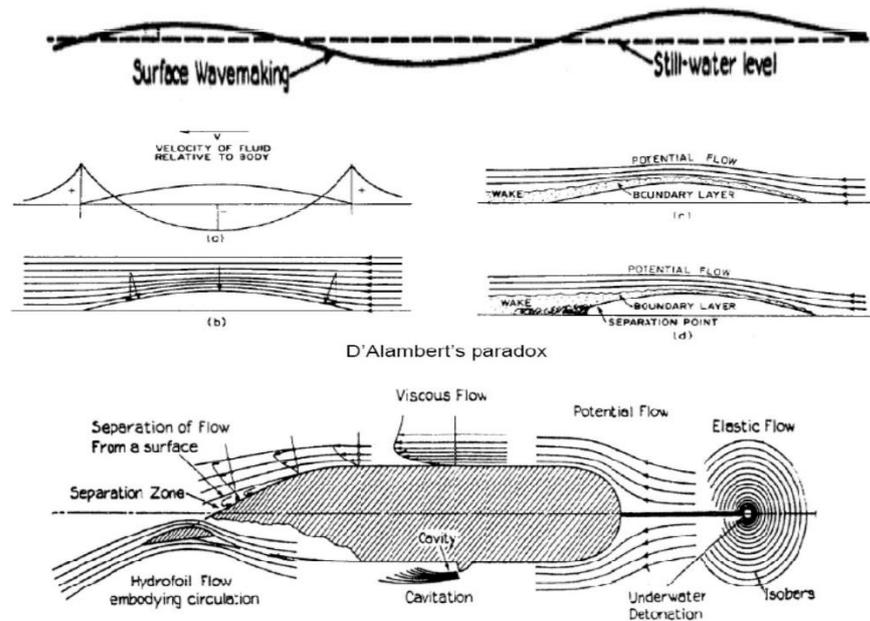
Dan tahanan kapal (*resistance*) dapat diformulasikan sesuai pada Persamaan (13) (Suryo W. Adji, 2009).

$$R = \frac{1}{2} \rho C_R V^2 S \quad (13)$$

Dimana,  $C_R$  adalah koefisien tahanan kapal yang merupakan fungsi dari  $Re$  dan  $Fn$ , atau dapat dilihat pada Persamaan (14) (Suryo W. Adji, 2009).

$$C_R = C_R (Re, Fn) \quad (14)$$

Beberapa contoh pola aliran fluida dari suatu *sub-marged body* (*no wave*) yang dapat dilihat pada Gambar 4 (Suryo W. Adji, 2009).



Sumber: Suryo W. Adji, 2009

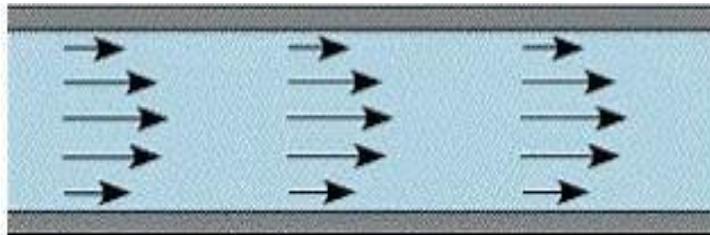
**Gambar 4** Contoh aliran fluida dari suatu *sub-marged body*

Fenomena aliran yang terkait dengan bentuk lambung kapal adalah aliran laminar, transisi dan turbulen. Hal yang paling berpengaruh terhadap bagaimana aliran yang terjadi pada lambung kapal adalah bentuk dari lambung kapal itu sendiri. Dalam hal ini, fenomena yang terjadi adalah *skin friction* yang nantinya akan menghasilkan bentuk aliran yang bersifat laminar dan turbulen. *Skin friction* memiliki nilai proposional dengan besar luasan basah. *Skin friction drag* pada sebuah pelat tipis sejajar dengan aliran fluida dapat berupa aliran laminar, turbulen atau campuran antara keduanya (Sardjadi, 2003).

Untuk menguji apakah suatu aliran laminar atau turbulen, biasanya digunakan formulasinya yang dikenal dengan Reynold number. Reynold number dirumuskan sebagai sebuah rasio dari hasil perkalian antara kecepatan dan panjang benda (kapal) dibagi dengan viskositas fluida yang dilaluinya. Pada nilai Reynold number

yang tinggi, lapisan fluida yang 16 bergeser pada lapisan batas laminar bergulung-bergulung dan berputar dalam gumpalan-gumpalan. Pada kondisi ini noise dan *skin friction* menjadi semakin besar. Daerah pada lapisan ini di kenal dengan lapisan batas turbulen. Sedangkan area perubahan dari laminar ke turbulen disebut daerah transisi (Sardjadi, 2003).

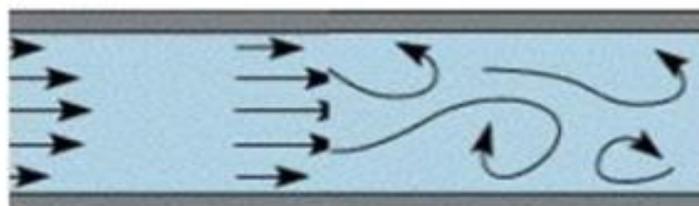
1. Aliran laminar ( $Re < 2300$ ) adalah aliran fluida yang ditunjukkan dengan gerak partikel-partikel fluidanya sejajar dengan garis-garis arusnya. Dalam aliran laminar, partikel-partikel fluida seolah-olah bergerak sepanjang lintasan-lintasan yang halus dan lancar, dengan satu lapisan meluncur satu arah pada lapisan yang bersebelahan. Sifat kekentalan zat cair berperan penting dalam pembentukan aliran laminar. Aliran laminar bersifat *steady* maksudnya alirannya tetap. Hal ini menunjukkan bahwa di seluruh aliran air, debit alirannya tetap atau kecepatan alirannya tidak berubah menurut waktu, adapun pola aliran laminar dapat dilihat pada Gambar 5 (Senoaji, 2015).



Sumber: (Senoaji, 2015).

**Gambar 5** Aliran Laminar

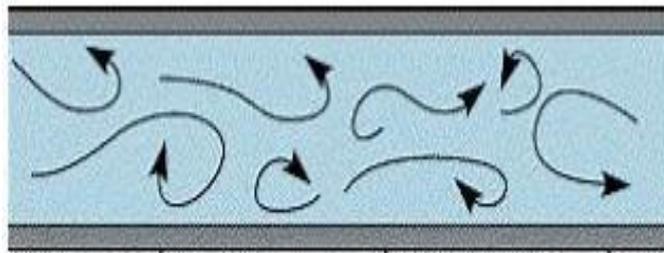
2. Aliran transisi ( $2300 > Re > 4000$ ) aliran Transisi adalah dimana kondisi partikel fluida berada pada peralihan dari kondisi seragam menuju kondisi acak, pada kondisi nyatanya kondisi seperti ini sangat sulit terjadi, adapun pola aliran transisi dapat dilihat pada Gambar 6 (Senoaji, 2015).



Sumber: (Senoaji, 2015).

**Gambar 6** Aliran Transisi

3. Aliran turbulen ( $Re > 4000$ ) kecepatan aliran yang relatif besar akan menghasilkan aliran yang tidak laminar melainkan kompleks, lintasan gerak partikel saling tidak teratur antara satu dengan yang lain. Sehingga didapatkan ciri dari aliran turbulen yaitu tidak adanya keteraturan dalam lintasan fluidanya, aliran banyak bercampur, kecepatan fluida tinggi, panjang skala aliran besar dan viskositasnya rendah, adapun pola aliran turbulen dapat dilihat pada Gambar 7 (Senoaji, 2015).



Sumber: (Senoaji, 2015).

**Gambar 7** Aliran Turbulen

## 2.5 Hukum Perbandingan Model

Sebelum membuat model, ukuran model merupakan prioritas utama yang perlu diperhatikan karena dalam hal ini besarnya ukuran model haruslah sesuai dengan tempat melakukan pengujian model sehingga diperlukan pengskalaan terhadap ukuran kapal sampel untuk mendapatkan ukuran model (Rosmani, 2011).

Dalam penentuan skala model tergantung dari ukuran utama kapal yang sebenarnya, ukuran tangki percobaan, dan kecepatan tarik. Mengingat bahwa permukaan bebas zat cair pada tangki percobaan sangat terbatas, sehingga ombak yang ditimbulkan oleh dinding tangki akibat adanya getaran akan mempengaruhi gerakan model tersebut (Rosmani, 2011).

Untuk menghindari terjadinya ombak pada dinding tangki atau biasa disebut dengan “blockage effect” maka ukuran model harus disesuaikan dengan ukuran tangki serta tinggi air dalam tangki dengan sarat model (Rosmani, 2011).

Dalam percobaan dengan menggunakan model fisik, ukuran kapal ditransfer ke skala model, dengan demikian maka harus ada atau harus dinyatakan beberapa hukum perbandingan untuk keperluan transfer tersebut. Hukum perbandingan yang dipakai harus memenuhi syarat – syarat sebagai berikut: (Rosmani, 2011).

### 2.5.1 Kesamaan Geometris

Kesamaan geometris merupakan hal yang sangat sulit untuk dipenuhi mengingat bahwa dalam pelayaran kapal di laut, permukaan air laut dianggap luas tak berhingga dan kedalaman yang tak berhingga pula sementara ukuran kolam terbatas dengan ukuran model kapal harus kecil, sebanding dengan ukuran kolam satu lainnya. Demikian pula tekanan permukaan pada tangki percobaan yang dianggap sama dengan tekanan atmosfer, yang seharusnya tekanan tersebut harus diturunkan. Kondisi geometris yang dapat terpenuhi dalam suatu percobaan model hanya kesamaan geometris dimensi – dimensi linear model, misalnya:

Hubungan antara kapal dan model dinyatakan dengan  $\lambda$  dimana :

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} \quad (15)$$

Dimana :

$\lambda$  = Skala perbandingan

$L_s$  = Panjang kapal (m)

$L_m$  = Panjang model (m)

$B_s$  = Lebar kapal (m)

$B_m$  = Lebar model (m)

$T_s$  = Sarat kapal (m)

$T_m$  = Sarat model (m)

Kesamaan geometris juga menunjukkan hubungan antara model dan tangki percobaan. Beberapa referensi hubungan antara ukuran tangki percobaan dengan model kapal yaitu :

- Menurut Todd

$$L_m < T_{\text{tangki}}$$

$$L_m < \frac{1}{2} B_{\text{tangki}}$$

- Menurut Harvald

$$B_m < 1/10 B_{\text{tangki}}$$

$$T_m < 1/10 T_{\text{tangki}}$$

- Menurut University of New Castle

$$L_m < \frac{1}{2} B_{\text{tangki}}$$

$$B_m < 1/15 B_{\text{tangki}}$$

$$A_{O_m} < 0,4 A_{O_{\text{tangki}}}$$

### 2.5.2 Perbandingan Kinematis

Kesamaan kinematis antara model dan kapal lebih menitik beratkan pada hubungan antara kecepatan model dengan kecepatan kapal sebenarnya. Dengan adanya skala yang menunjukkan hubungan antara kecepatan model dan kecepatan kapal yang sebenarnya maka dapat dikatakan bahwa kesamaan kinematis bisa terpenuhi.

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g.L}} \quad (16)$$

Atau :

$$\frac{Vm}{\sqrt{g.Lm}} = \frac{Vs}{\sqrt{g.Ls}} \quad (17)$$

Dimana :

- Fn = Angka fraude
- L<sub>s</sub> = Panjang kapal (m)
- L<sub>m</sub> = Panjang model (m)
- V<sub>s</sub> = Kecepatan kapal (m/s)
- V<sub>m</sub> = Kecepatan model (m/s)
- g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

### 2.5.3 Perbandingan Dinamis

Gaya-gaya yang bekerja berkenaan dengan gerakan fluida sekeliling model dan kapal pada setiap titik atau tempat yang bersesuaian harus mempunyai besar dan arah yang sama, dalam hal ini kesatuan angka Reynold yang menggambarkan perbandingan gaya – gaya inersia dengan viskositas :

$$Rn = \frac{V.L}{\nu} \quad (18)$$

Atau :

$$Rn = \frac{Vm.Lm}{\nu} = \frac{Vs.Ls}{\nu} \quad (19)$$

Dimana :

$R_n$  = Angka reynold

$L_s$  = Panjang kapal (m)

$L_m$  = Panjang model (m)

$V_s$  = Kecepatan kapal (m/s)

$V_m$  = Kecepatan model (m/s)

$g$  = Percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

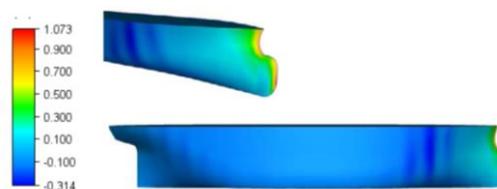
$\nu$  = Viskositas kinematis fluida ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) =  $1,1883 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

## 2.6 Autodesk CFD (*Computational Fluid Dynamic*)

### 2.6.1 Pengertian Autodesk CFD

Autodesk CFD (*Computational Fluid Dynamics*) merupakan cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisis masalah yang berkaitan aliran fluida dengan menggunakan simulasi berbasis komputer yang akan melakukan perhitungan pada setiap elemen pembagiannya. Setiap elemen tersebut dikontrol oleh suatu persamaan dengan menggunakan perhitungan numerik, untuk kemudian diperoleh hasil berupa gaya-gaya yang bekerja pada model ataupun keterangan lain yang dapat menggambarkan kondisi model pada kondisi batas tertentu.

CFD menerapkan perhitungan yang dikhususkan pada fluida beserta perilakunya, seperti aliran suatu fluida (*fluid flow*), perpindahan kalor (*heat transfer*), dan juga reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Perhitungan dengan CFD ini didasarkan atas prinsip-prinsip mekanika fluida, konservasi energi, momentum dan hukum kekekalan massa. Tampilan hasil simulasi CFD pada lambung kapal dapat dilihat pada Gambar 8.



Sumber: Baso dkk., 2021

**Gambar 8** Simulasi CFD pada lambung kapal

Secara sederhana proses perhitungan CFD dapat diawali dengan mendefinisikan suatu model menjadi elemen-elemen kecil. Setiap elemen yang terbentuk akan dikontrol dengan menggunakan konsep persamaan dinamika fluida. Persamaan dinamika fluida tersebut memanfaatkan kondisi batas (*boundary conditions*) sebagai variabel inputan untuk mendapatkan suatu nilai hasil. Autodesk CFD ini banyak digunakan karena mampu mengurangi biaya yang dikeluarkan untuk melakukan eksperimen dan mengefisiensi waktu yang panjang untuk melakukan eksperimen.

### 2.6.2 *Finite Element Method (FEM)*

*Finite Element Method (FEM)* dapat digunakan dalam aplikasi dinamika fluida dengan teknik khusus untuk solusi konservatif. FEM jauh lebih stabil dibandingkan dengan metode diskritisasi lainnya. Dalam Autodesk CFD, FEM digunakan untuk mengurangi persamaan diferensial parsial yang mengatur (PDES) menjadi satu set persamaan aljabar. Dalam metode ini, variabel dependen diwakili oleh fungsi bentuk polinomial atas area kecil atau volume (elemen). Kemudian, FEM adalah metode numerik khusus untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial dalam dua atau tiga variabel ruang dan untuk memprediksi perilaku setiap elemen. Hasilnya adalah satu set persamaan aljabar untuk variabel dependen pada titik diskrit atau node pada setiap elemen. Sejalan dengan itu, objek nyata menjadi sejumlah besar elemen hingga dianalisis dengan menggunakan salah satu jenis metode analisis komputerisasi, analisis elemen hingga (FEA). Autodesk CFD menggunakan FEM karena fleksibilitasnya dalam memodelkan bentuk geometris apa pun seperti linier untuk elemen tetrahedral 3D (kisi tidak terstruktur) di mana metode residu tertimbang Galerkin umumnya digunakan. Oleh karena itu, fleksibilitas geometrik yang melekat pada elemen hingga telah dipertahankan di Autodesk CFD (Baso dkk., 2021).

Konsep dasar penggunaan *Computational Fluid Dynamics* adalah persamaan Navier-Stokes dengan prinsip yakni kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi. PDES yang mengatur untuk persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

Dimana,  $\rho$  adalah density,  $t$  adalah waktu,  $u$  adalah komponen kecepatan arah-x,  $v$  adalah komponen kecepatan arah-y, dan  $w$  adalah komponen kecepatan arah-z.

Kemudian, persamaan momentum-X, momentum-Y, dan momentum-Z diturunkan dari persamaan kontinuitas sebagai berikut. Persamaan Momentum-X yaitu :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (21)$$

Persamaan Momentum-Y yaitu

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (22)$$

Persamaan Momentum-Z yaitu

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (23)$$

Dimana,  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  adalah percepatan gravitasi dalam arah x,y,z,  $\mu$  adalah viskositas, aliran rotasi  $S_\omega$ , dan SDR adalah resistance terdistribusi.

Dua suku sumber dalam persamaan momentum masing-masing adalah  $S_\omega$  untuk koordinator rotasi dan resistance terdistribusi SDR. Istilah resistensi terdistribusi dapat ditulis secara umum sebagai berikut :

$$S_{DR} = - \left( K_I + \frac{f}{D_H} \right) \frac{\rho V_i^2}{2} - C\mu V_i \quad (24)$$

Dimana,  $V$  adalah kecepatan,  $i$  mengacu pada arah koordinat global ( $u$ ,  $v$ , persamaan momentum  $w$ ),  $f$  adalah faktor gesekan,  $D$  adalah diameter hidrolis,  $C$  adalah permeabilitas. Istilah K-faktor dapat beroperasi pada persamaan momentum tunggal pada satu waktu karena setiap arah memiliki K-faktor uniknya sendiri. Dua jenis resistance lainnya beroperasi sama pada setiap persamaan momentum.

Istilah sumber lainnya adalah aliran berputar. Istilah ini dapat ditulis secara umum sebagai :

$$S\omega = -2\partial\omega i \times Vi - \partial\omega i \times \omega i \times ri \quad (25)$$

Dimana,  $\omega$  adalah kecepatan rotasi dan  $r$  adalah jarak dari sumbu rotasi. Untuk model turbulensi, penelitian ini menggunakan fungsi dinding atau kEpsilon (K- $\epsilon$ ),  $k$  adalah energi kinetic per satuan massa dan merupakan disipasi turbulen yang cocok untuk interaksi aliran luar mampat dengan geometry kompleks.

### 2.6.3 Proses Simulasi Autodesk CFD

Secara umum *Computational fluid dynamics* (CFD) digunakan untuk memberikan penyelesaian dari masalah aliran pada kapal. Dengan menggunakan CFD memungkinkan untuk memprediksi fenomena aliran fluida yang lebih kompleks dengan berbagai tingkat akurasi.

Dalam melakukan sebuah simulasi pada CFD, dibutuhkan sebuah dasar yang berupa pemodelan numerik sehingga simulasi yang dilakukan pada CFD dapat berjalan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Adapun proses simulasi pada CFD terdapat tiga langkah proses, yaitu :

#### 1) Pre-Processing

Pada tahap awal ini proses dimulai dengan membuat model yang akan dianalisa, kemudian dilakukan proses input data seperti penentuan geometri benda, membentuk grid dan mesh, pengaturan *fluid properties*, serta penentuan kondisi batas model geometri yang akan disimulasikan.

#### 2) Processing / Solver Manager

Tahap ini dapat dilakukan setelah tahap Pre-processing telah selesai dilakukan..Pada tahap ini data yang telah diinput pada proses sebelumnya akan dihitung dan coba ditemukan hasilnya. Proses perhitungan yang dilakukan berupa iterasi atau perhitungan yang dilakukan hingga hasil mencapai nilai konvergensi.

#### 3) Post-Processing

Pada tahapan ini hasil dari *running* atau simulasi yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya dapat dilihat untuk dianalisa lebih lanjut. Hasil perhitungan yang ditampilkan berupa data numerik, animasi, grafik, dan data visualisasi pola aliran fluida pada model.

## 2.7 *Maxsurf*

*Maxsurf* adalah program aplikasi spesialis dalam bidang arsitektur perkapalan dan galangan kapal, teknik lepas pantai dan rekayasa struktur. Program ini dapat memvisualisasikan, dan mengoptimalkan desain kapal dengan pengaturan lengkap yang telah diintegrasikan. *Maxsurf* terdiri dari beberapa sub-program aplikasi, yaitu: *Maxsurf modeler*, *Maxsurf motion*, *Maxsurf resistance*, *Maxsurf stability*, *Maxsurf structure*, *Maxsurf fitting*, *Maxsurf link*, *Maxsurf vpp*

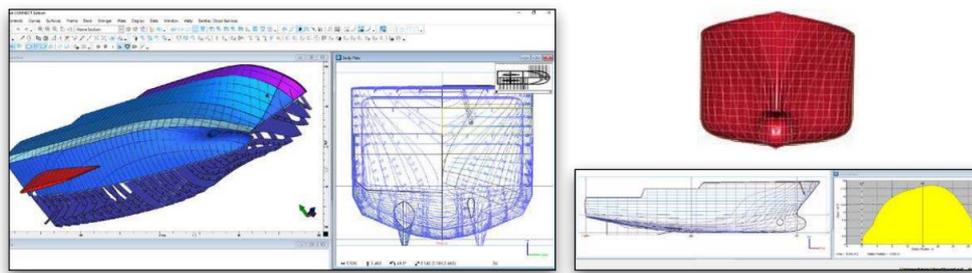
Beberapa fungsi pada program aplikasi ini seperti membuat bentuk lambung yang seimbang, sesuai dengan persyaratan stabilitas, tahanan kapal, seakeeping dan kekuatan kapal.

### 2.7.1 *Maxsurf Modeler*

*Maxsurf Modeler* menyediakan pemodelan yang cepat, fleksibel, dan intuitif untuk semua jenis lambung, superstruktur, dan peralatan. Permukaan NURB (Non Uniform Rational B-Spline) yang dipotong dapat digunakan untuk memodelkan berbagai jenis kapal, dari *yacht* hingga kapal niaga yang berukuran besar. Modul desain Modeler memungkinkan arsitek perkapalan untuk membuat bentuk lambung yang dioptimalkan dengan cepat dan akurat. Permukaan dapat digabungkan, dipotong, dan dimanipulasi untuk membuat model lengkap yang siap untuk dianalisis baik berupa, data hidrostatis dan kinerja atau detail konstruksi

Modeler menyediakan manipulasi langsung dan interaktif dari bentuk permukaan melalui mouse atau keyboard. Titik kontrol dapat ditarik dengan mouse, diatur secara numerik, atau dimanipulasi dengan berbagai perintah penataan. Modeler juga memberikan kemampuan untuk mentransformasikan secara otomatis bentuk lambung untuk cocok dengan dimensi dan properti hidrostatis yang diinginkan.

Permukaan yang rata dan akurat sangat penting untuk kinerja kapal yang optimal dan kemudahan konstruksi. Kemampuan Modeler memungkinkan untuk mengevaluasi kelengkungan dari seluruh permukaan, serta kelengkungan sepanjang kontur permukaan tertentu, seperti garis air atau diagonal. Tampilan kelengkungan secara otomatis dan interaktif diperbarui saat permukaan dimodifikasi. (Bentley *Maxsurf*, 2021). Tampilan pemodelan kapal pada *Maxsurf Modeler* dapat dilihat pada Gambar 9.



Sumber: (Bentley System, 2021).

**Gambar 9** Tampilan pemodelan kapal pada *Maxsurf Modeler*

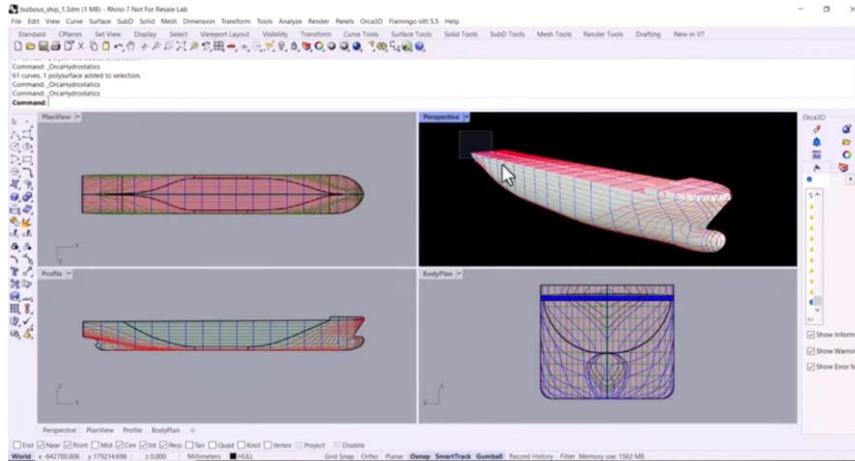
## 2.8 *Rhinoceros 3D*

*Rhinoceros* atau biasa disingkat Rhino adalah sebuah program pemodelan 3D yang berbasis metode NURBS (Non Uniform Rational B-Spline). Spline atau yang lebih di kenal dengan kurva. kurva adalah garis yang memiliki banyak radius lingkaran (multi radius) sehingga mampu mendefinisikan bentuk-bentuk kurva yang halus dan mulus seperti bentuk geometri yang organis.

*Rhinoceros* merupakan software 3D digital yang dikembangkan oleh perusahaan-perusahaan software dunia dengan lebih memperhatikan kebutuhan desainer sebagai pengguna dalam aktivitasnya, merencanakan dan mengembangkan suatu produk sehingga produk yang dihasilkan dapat terintegrasi secara maksimal yang meliputi kajian desain maupun engineering. Di dalamnya memuat program dengan cara kerja yang cenderung mengutamakan faktor estetika dan melibatkan aspek desain sehingga software ini banyak digunakan oleh para profesional desainer dalam dunia industri. Terlebih dengan metode NURBS pada *Rhinoceros* akan dapat menggambarkan secara matematis bentuk-bentuk model bebas dan bentuk-bentuk standar. Metode NURBS merupakan pengembangan dari metode spline konvensional untuk mewujudkan model-model organis karena kualitas permukaannya.

*Rhinoceros* sangat serbaguna dan akurat, sehingga menjadi tak tergantikan, termasuk mereka yang membutuhkan perangkat untuk desain kelautan dan arsitektur kapal. Inti dari daya tarik *Rhinoceros* adalah dasar dalam pemodelan NURBS yang membantu menciptakan kurva dan permukaan yang rumit dan mulus. Kemampuan ini sesuai dengan tuntutan desain kelautan dan arsitektur kapal, di mana kontur lambung kapal sangat penting. *Rhinoceros* memungkinkan desainer

untuk menggambarkan profil hidrodinamika dengan akurat, memastikan kapal tidak hanya menarik secara visual tetapi juga optimal dalam hal kinerja. (rhino3d.software, 2018). Tampilan pemodelan pada *Rhinoceros 3D* dapat dilihat pada Gambar 10.



Sumber: (rhino3d.software, 2018)

**Gambar 10** Tampilan pemodelan pada *Rhinoceros 3D*