

SKRIPSI
STUDI PENGARUH *BIOFOULING* TERHADAP TAHANAN
KAPAL MENGGUNAKAN PROGRAM AUTODESK CFD
(Computational Fluid Dynamics)

Disusun dan diajukan oleh :

HERI SAPUTRA
D031 18 1015



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023

ii

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**STUDI PENGARUH *BIOFOULING* TERHADAP TAHANAN
KAPAL MENGGUNAKAN PROGRAM AUTODESK CFD
(*Computational Fluid Dynamics*)**

Disusun dan diajukan oleh

HERI SAPUTRA

D031 18 1015

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Perkapalan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 02 Maret 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

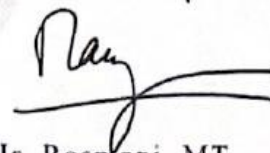
Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT.

NIP: 19730206 200012 1 002

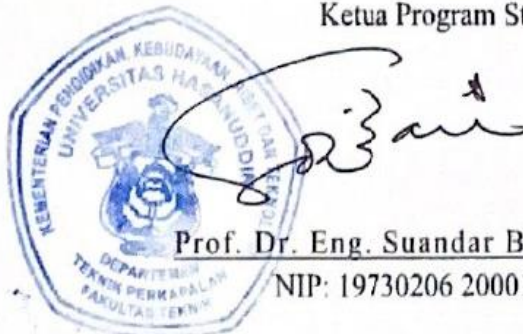
Pembimbing Pendamping,



Ir. Rosnani, MT.

NIP: 19600620 198802 2 001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT.

NIP: 19730206 200012 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Heri Saputra

NIM : D031 18 1015

Program Studi : Teknik Perkapalan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

“STUDI PENGARUH *BIOFOULING* TERHADAP TAHANAN KAPAL
MENGUNAKAN PROGRAM AUTODESK CFD
(*Computational Fluid Dynamics*)”

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

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 02 Maret 2023

Yang Menyatakan



Heri Saputra

ABSTRAK

HERI SAPUTRA. *Studi Pengaruh Biofouling Terhadap Tahanan Kapal Menggunakan Program Autodesk CFD* (dibimbing oleh Suandar Baso dan Rosmani)

Pada saat kapal berlayar dengan kurun waktu tertentu, maka akan didapati pengotoran biologis yang disebabkan oleh *biofouling*. Tumbuhnya *biofouling* pada permukaan lambung kapal dapat menyebabkan dampak negatif salah satunya berdampak terhadap tahanan kapal. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk menentukan perbandingan nilai tahanan kapal pada kondisi lambung tanpa *biofouling* (*smooth hull*) dan kondisi lambung yang ditempeli *biofouling* (*roughness hull*) serta menentukan besar perubahan nilai tahanan kapal akibat pengaruh *biofouling* kemudian menentukan karakteristik aliran fluida yang terjadi di sepanjang lambung kapal berdasarkan analisis Autodesk CFD. Pengambilan data dilakukan dengan mengolah ukuran utama, gambar *lines plan* kapal, dan ketebalan *biofouling* kemudian dengan menggunakan *software* Autodesk CFD (*Computational Fluid Dynamics*) untuk mendapatkan nilai tahanan dan karakteristik aliran fluida di sepanjang lambung kapal. Berdasarkan hasil perhitungan nilai tahanan model kapal, pada kondisi kecepatan 1,220 m/s model kapal yang ditempeli *biofouling* (*roughness hull*) sebesar 3,739 N lebih besar dibandingkan model kapal tanpa *biofouling* (*smooth hull*) dengan nilai tahanan sebesar 3,280 N dengan rata-rata persentase kenaikan tahanan sebesar 13,642%.

Kata kunci : Autodesk CFD, *Biofouling*, Tahanan kapal

ABSTRACT

HERI SAPUTRA . *Study of the Effect of Biofouling on Ship Resistance Using the Autodesk CFD Program* (supervised by Suandar Baso and Rosmani)

When the ship sails for a certain period of time, biological contamination will be found caused by *biofouling*. The growth of *biofouling* on the surface of the ship's hull can cause negative impacts, one of which is the impact on ship resistance. Therefore this study aims to determine the comparison of the ship's resistance value in hull conditions without *biofouling* (*smooth hull*) and hull conditions with *biofouling* (*roughness hull*). as well as determine the large change in the value of the ship's resistance due to the influence of *biofouling* then determines the characteristics of the fluid flow that occurs along the ship's hull based on Autodesk CFD analysis. Data collection was carried out by processing the main dimensions , ship *line plan* drawings , and *biofouling thickness* and then using Autodesk CFD (*Computational Fluid Dynamics*) software to obtain resistance values and fluid flow characteristics along the hull. Based on the results of calculating the resistance value of the ship model, at a speed of 1,220 m/s the model of the ship that is plastered with *biofouling* (*roughness hull*) of 3,739 N greater than the ship model without *biofouling* (*smooth hull*) with a resistance value of 3,280 N with an average percentage increase in resistance of 13,642%.

Keywords : Autodesk CFD, *Biofouling*, Ship resistance

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmattulahi wabarakatuh.

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tugas akhir yang berjudul :

**“STUDI PENGARUH *BIOFOULING* TERHADAP TAHANAN KAPAL
MENGUNAKAN PROGRAM AUTODESK CFD
(*Computational Fluid Dynamics*)”**

Pengerjaan tugas akhir ini merupakan persyaratan bagi setiap mahasiswa untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa penyelesaian tugas akhir ini adalah suatu kebanggaan tersendiri, karena tantangan dan hambatan yang menghadang selama mengerjakan tugas akhir ini dapat terlewati dengan usaha dan upaya yang sungguh-sungguh. Dalam penyusunan tugas akhir penulis tidak mungkin melakukan sendiri tanpa adanya bantuan dari orang-orang disekitar. Melalui lembar ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta Ayahanda Mustafa Pros dan Ibunda Haslina, serta kakak-kakak penulis Risal Herwin, Musminarfa, Herpin, Musdayana, Musdayani, Herwadi, dan Musmira atas segala dukungan, kesabaran, pengorbanan, semangat, motivasi, materi dan doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tugas akhir ini dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT. selaku ketua Departemen Teknik Perkapalan sekaligus selaku pembimbing I dan ibu Ir. Rosmani, MT. selaku kepala Laboratorium Hidrodinamika Kapal sekaligus selaku pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan dan kesabaran mendidik dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. Eng. Andi Ardianti, ST., MT. dan bapak Muhammad Akbar Asis, ST., MT. selaku penguji dalam tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Lukman Bochary, MT. selaku penasehat akademik yang selalu membimbing dan memberikan arahan dalam perencanaan mata kuliah.

5. Ibu Uti, Pak Afif, Kak Ani dan Kak Jeje selaku staf Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala kebaikan dan kesabarannya selama penulis mengurus segala persuratan di kampus.
6. Seluruh Dosen Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala kebaikan dan kemurahan hatinya.
7. Kepada teman-teman angkatan THRUZTER 2018, terima kasih telah memberi pengalaman hidup yang sangat berarti selama penulis menuntut ilmu di Jurusan Perkapalan.
8. Kepada teman-teman seperjuangan skripsi ANDROMAX 2018. Untuk memperoleh gelar sarjana memang tidak mudah kawan, tapi yakin kita dapat melewatinya.
9. Kepada kanda-kanda senior dan adik-adik junior atas segala bantuannya.
10. Kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa didalam tugas akhir ini masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis memohon maaf dan meminta kritikan yang bersifat membangun demi kesempurnaan penelitian ini. Akhir kata penulis berharap semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi peneliti sendiri maupun bagi semua pihak yang berkenan untuk membaca dan mempelajarinya.

Wa'alaikumus.salam.warahmatullahi.wabarakatuh

Makassar, 23 Januari 2023

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kapal <i>Passenger</i>	5

2.2 <i>Biofouling</i>	6
2.2.1 Pengertian <i>Biofouling</i>	6
2.2.2 Proses Pembentukan dan Penempelan <i>Biofouling</i>	7
2.2.3 Pengaruh <i>Biofouling</i> Pada Kapal	9
2.3 Tahanan Kapal.....	10
2.3.1 Komponen Tahanan	11
2.3.2 Added Resistance Akibat <i>Biofouling</i>	14
2.4 Aliran Fluida.....	15
2.4.1 Aliran <i>Viscous</i> dan <i>Non Viscous</i>	18
2.4.2 Aliran Terkait Bentuk Lambung Kapal.....	19
2.4.3 Aliran Vortex	21
2.5 Hukum Perbandingan Model.....	24
2.5.1 Kesamaan Geometris	24
2.5.2 Kesamaan Kinematis.....	25
2.5.3 Kesamaan Dinamis.....	26
2.6 Autodesk CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	27
2.6.1 Pengertian Autodesk CFD.....	27
2.6.2 <i>Finite Element Method</i> (FEM).....	27
2.6.3 Proses Simulasi Autodesk CFD	30
BAB III METODE PENELITIAN.....	32
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	32

3.2 Jenis Penelitian.....	32
3.3 Jenis Data dan Metode Pengumpulan Data.....	32
3.4 Metode Pengolahan Data	32
3.4.1 Pengumpulan Data Kapal.....	33
3.4.2 Pengumpulan Data Ketebalan <i>Biofouling</i>	34
3.4.3 Pemodelan Kapal	35
3.4.4 Simulasi CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	41
3.4.5 Verifikasi.....	46
3.4.6 Analisis Data	46
3.4.7 Pembentukan Pola Aliran.....	47
3.4.8 Kesimpulan	47
3.5 Kerangka Pikir	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Skala Pemodelan dan <i>Boundary Layer</i>	49
4.1.1 Penentuan Skala Model.....	49
4.1.2 Pemodelan <i>Boundary Layer</i>	49
4.2 Nilai <i>Residual In</i> dan <i>Residual Out</i>	51
4.3 Visualisasi <i>Velocity Magnitude</i> dan <i>Static Pressure</i>	52
4.3.1 Visualisasi <i>Velocity Magnitude</i>	52
4.3.2 Visualisasi <i>Static Pressure</i>	54
4.4 Prediksi Tahanan Model Kapal.....	56

4.4.1 Tahanan Model Kapal Tanpa <i>Biofouling (Smooth Hull)</i>	57
4.4.2 Tahanan Model Kapal Ditempeli <i>Biofouling (Roughness Hull)</i>	58
4.5 Perbandingan Tahanan Model Kapal	60
4.6 Perbandingan Nilai Koefisien Tahanan Kapal	61
4.7 Karakteristik Aliran Fluida	62
BAB V PENUTUP	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kapal penumpang KM. Wilis.....	5
Gambar 2.2 Penempelan <i>biofouling</i> pada lambung kapal.....	7
Gambar 2.3 Skema tahap pembentukan <i>biofouling</i>	8
Gambar 2.4 Proses penempelan <i>biofouling</i> pada substrat logam	9
Gambar 2.5 Tahanan pada kapal.....	11
Gambar 2.6 Kekasaran fisik pada kapal.....	14
Gambar 2.7 Kekasaran biologis pada kapal	15
Gambar 2.8 Aliran <i>streamline</i> yang melintasi suatu body.....	15
Gambar 2.9 Contoh aliran fluida dari suatu <i>sub-merged body</i>	18
Gambar 2.10 Perbedaan (a) Fluida ideal, (b) Fluida <i>viscous</i>	19
Gambar 2.11 Aliran laminar	20
Gambar 2.12 Aliran transisi	20
Gambar 2.13 Aliran turbulen	21
Gambar 2.14 Skema terentuknya lapisan geser (<i>shear layer</i>) yang selanjutnya akan membentuk vortex A dan B	22
Gambar 2.15 Skema mekanisme terjadinya pelepasan vortex (<i>vortex shedding</i>) pada sebuah silinder dalam aliran steady	23
Gambar 2.16 Simulasi CFD pada lambung kapal	27
Gambar 2.17 Simulasi pengujian model dengan CFD.....	28
Gambar 3.1 <i>Lines plan</i> KM.Wilis.....	33
Gambar 3.2 Pengukuran ketebalan <i>biofouling</i>	34
Gambar 3.3 Titik pengukuran ketebalan <i>biofouling</i>	34
Gambar 3.4 Model kapal kondisi lambung tanpa <i>biofouling</i> (<i>smooth hull</i>)	35

Gambar 3.5 Tampilan awal model kapal pada <i>software Rhinoceros 6</i>	36
Gambar 3.6 <i>Smooth surface</i> setinggi <i>draft</i> yang akan dimodelkan menjadi <i>roughness surface</i>	36
Gambar 3.7 Proses mengaktifkan <i>point</i> pada <i>surface biofouling</i>	37
Gambar 3.8 Proses menginput nilai ketebalan <i>biofouling</i>	37
Gambar 3.9 Proses <i>extrudeCrv</i>	38
Gambar 3.10 Proses <i>trim surface</i>	38
Gambar 3.11 Proses <i>loft</i> pada deck model kapal	39
Gambar 3.12 Model kapal sebagai objek <i>solid</i>	39
Gambar 3.13 Model kapal tanpa <i>biofouling (smooth hull)</i>	40
Gambar 3.14 Model kapal yang ditemplei <i>biofouling (roughness hull)</i>	40
Gambar 3.15 Detail ketebalan/kontur <i>biofouling</i> pada model <i>smooth hull & roughness hull</i>	41
Gambar 3.16 Visualisasi tahap <i>geometry</i> model kapal dan <i>boundary layer</i>	42
Gambar 3.17 Visualisasi input material model kapal dan <i>boundary layer</i>	42
Gambar 3.18 Visualisasi input <i>boundary condition</i>	43
Gambar 3.19 Visualisasi <i>mesh sizing</i>	44
Gambar 3.20 Visualisasi tahap <i>clone</i>	45
Gambar 3.21 Visualisasi tahap <i>solve</i>	45
Gambar 4.1 Visualisasi model kapal dan dimensi <i>boundary layer</i>	50
Gambar 4.2 Visualisasi <i>velocity magnitude</i> model kapal pada kecepatan 1,220 m/s	52
Gambar 4.3 Visualisasi <i>velocity vector</i> model kapal pada kecepatan 1,220 m/s..	53

Gambar 4.4 Visualisasi <i>static pressure</i> model kapal pada kecepatan 1,220 m/s tampak samping	54
Gambar 4.5 Visualisasi <i>static pressure</i> model kapal pada kecepatan 1,220 m/s tampak bawah.....	55
Gambar 4.6 Grafik hubungan antara kecepatan dan tahanan model kapal tanpa <i>biofouling (smooth hull)</i>	57
Gambar 4.7 Grafik hubungan antara kecepatan dan koefisien tahanan model kapal tanpa <i>biofouling (smooth hull)</i>	58
Gambar 4.8 Grafik hubungan antara kecepatan dan tahanan model kapal ditemplei <i>biofouling (roughness hull)</i>	59
Gambar 4.9 Grafik hubungan antara kecepatan dan koefisien tahanan model kapal yang ditemplei <i>biofouling (roughness hull)</i>	59
Gambar 4.10 Grafik hubungan antara kecepatan dan tahanan model kapal <i>smooth hull</i> dan <i>roughness hull</i>	60
Gambar 4.11 Grafik hubungan antara kecepatan dan koefisien tahanan model kapal <i>smooth hull</i> dan <i>roughness hull</i>	62
Gambar 4.12 Pola aliran pada lambung model kapal	62
Gambar 4.13 Visualisasi pola aliran fluida pada model kapal pada kecepatan 1,220 m/s.....	63
Gambar 4.14 Visualisasi pola aliran fluida pada model kapal pada kecepatan 1,220 m/s tampak atas	63

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Ukuran utama kapal	33
Tabel 3.2 Statistik <i>mesh</i> model kapal <i>smooth hull</i>	43
Tabel 3.3 Statistik <i>mesh</i> model kapal <i>roughness hull</i>	44
Tabel 4.1 Ukuran model kapal skala 1:40.....	49
Tabel 4.2 Ukuran kolam eksperimen (<i>boundary layer</i>).....	50
Tabel 4.3 Data kecepatan (<i>velocity</i>).....	50
Tabel 4.4 Nilai <i>residual in</i> dan <i>residual out</i> model kapal tanpa <i>biofouling</i> (<i>smooth hull</i>)	51
Tabel 4.5 Nilai <i>residual in</i> dan <i>residual out</i> model kapal ditempeli <i>biofouling</i> (<i>roughness hull</i>)	51
Tabel 4.6 Nilai gradasi warna <i>velocity magnitude</i> pada model kapal.....	54
Tabel 4.7 Nilai rata-rata <i>static pressure</i> di sekitar body model kapal pada setiap variasi kecepatan.....	56
Tabel 4.8 Nilai tahanan dan koefisien tahanan model tanpa <i>biofouling</i> (<i>smooth hull</i>)	57
Tabel 4.9 Nilai tahanan dan koefisien tahanan model ditempeli <i>biofouling</i> (<i>roughness hull</i>)	58
Tabel 4.10 Perbandingan nilai tahanan model kapal <i>smooth hull</i> dan <i>roughness hull</i>	60
Tabel 4.11 Perbandingan nilai koefisien tahanan model kapal <i>smooth hull</i> dan <i>roughness hull</i>	61

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
R_{TM}	Tahanan total model	N
R_{FM}	Tahanan gesek model	N
f, n	Konstanta fungsi dari panjang dan sifat permukaan	
R_{RM}	Tahanan sisa model	N
C_T	Koefisien tahanan total	
C_F	Koefisien tahanan gesek	
C_R	Koefisien tahanan sisa	
C_{AA}	Tahanan akibat angin (<i>air resistance</i>)	
$(1 + k)$	<i>Form factor</i>	
P	Tekanan	Pa
ρ	Massa jenis	Kg/m ³
G	Percepatan gravitasi bumi	m/s ²
H	Tinggi tertentu dari garis datar	m
V	Kecepatan sebuah benda	m/s
R	Tahanan kapal	N
P	Tekanan statis fluida	Pa
μ	Viskositas	Pa.s
Λ	Skala perbandingan	
L_s	Panjang kapal	m
L_m	Panjang model	m
B_s	Lebar kapal	m

Singkatan	Arti dan Keterangan	Satuan
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
Δ	<i>Displacement</i>	ton
S	<i>Watted surface area</i>	m ²
CP	<i>Perismatic coefficient</i>	
CB	<i>Block coefficient</i>	

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel offset <i>lines plan</i> kapal KM. Wilis.....	70
Lampiran 2. Data hasil pengukuran ketebalan <i>biofouling</i> pada lambung kapal ...	71
Lampiran 3. Penentuan nilai kecepatan model kapal (V_m)	75
Lampiran 4. Visualisasi <i>velocity magnitude</i> pada setiap kecepatan	78
Lampiran 5. Visualisasi <i>velocity vector</i> pada setiap kecepatan	80
Lampiran 6. Visualisasi <i>static pressure</i> pada setiap kecepatan	83
Lampiran 7. Data nilai rata-rata <i>static pressure</i> pada setiap surface	88
Lampiran 8. Hasil perhitungan <i>wall calculator</i> tahanan model kapal	91
Lampiran 9. Visualisasi pola aliran fluida pada setiap kecepatan	94

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada umumnya setiap benda yang berada di laut dalam jangka waktu yang lama akan mengalami suatu kondisi dimana terdapat sekumpulan organisme yang menempel pada permukaan benda, salah satunya ditemukan pada lambung kapal. Pada saat kapal berlayar dengan kurun waktu tertentu, maka akan didapati pengotoran biologis yang disebabkan oleh biota laut (*biofouling*).

Tumbuhnya biota laut (*biofouling*) pada permukaan lambung kapal dapat menyebabkan dampak negatif dari segi ekonomi dan operasional kapal. *Biofouling* akan berpengaruh terhadap tingkat kekasaran permukaan lambung kapal, hal ini berdampak signifikan terhadap hambatan kapal. Hambatan yang terdiri dari beberapa komponen, salah satunya adalah tahanan yang disebabkan oleh gesekan antara lambung kapal dengan air atau tahanan gesek. Penempelan *biofouling* pada lambung dibawah sarat kapal dan propeller menyebabkan meningkatnya kekasaran pada area tersebut, sehingga memperbesar tahanan kapal dan meningkatkan pemakaian bahan bakar, hal ini berarti biaya bahan bakar akan meningkat. Selain itu, *biofouling* pada lambung kapal dapat menambah volume (*displacement*) kapal, mengurangi kecepatan kapal, dan berpengaruh terhadap pola aliran saat kapal berlayar.

Menurut Curtin (1985), menyatakan bahwa lapisan *biofouling* setebal 200 μm pada lambung kapal dapat mengurangi kecepatan sebesar 20%. Berkurangnya kecepatan ini menimbulkan kerugian yang cukup besar. Adapun teori lain menurut Maley, keberadaan *biofouling* pada lambung kapal yang telah berlayar 6-8 bulan dapat menyebabkan kecepatan kapal berkurang sampai 50% sehingga konsumsi bahan bakar meningkat sampai dengan 40%. Berkurangnya kecepatan kapal mengakibatkan tertundanya waktu berlayar selama 10-15% dari total waktu berlayar (Nurrohman, 2017).

Biofouling ini berkembang menyebabkan permukaan halus menjadi kasar dan bahkan tidak teratur. Kondisi ini berpengaruh terhadap karakteristik hidrodinamis sebuah kapal. Aliran fluida yang bergerak pada kondisi lambung kapal yang

terdapat *biofouling (roughness hull)* mengakibatkan timbulnya *turbulent boundary layer* karena permukaan lambung kapal menjadi lebih kasar dari sebelumnya. Hal ini dapat meningkatkan kebisingan pada bagian bawah air, mengakibatkan penurunan kecepatan dan maneuver daya jelajah kapal, serta dalam beberapa kasus *biofouling* dapat merusak sistem sensor bawah air.

Menurut teori tahanan Woods Hole Oceanographic Institution (1952), tahanan gesek kapal meningkat dengan signifikan akibat *biofouling* pada lambung yang disebabkan oleh mikro dan makroorganisme. Tahanan ini timbul akibat dari gesekan antara lambung kapal terhadap fluida. Aliran air di sekitar lambung kapal yang terdapat *biofouling* memberikan efek pada ketebalan *boundary layer*.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan secara eksperimental oleh (Yusim, 2016) yang menyatakan bahwa peningkatan hambatan total akibat pertumbuhan *biofouling* selama periode 1 tahun sebesar 36,65% untuk kapal dengan *biofouling* merata pada luas permukaan basah setinggi sarat dan 47,11% untuk kapal dengan pertumbuhan *biofouling* yang tidak merata. Maka dari itu, berdasarkan uraian diatas sehingga penulis tertarik untuk mengkaji tentang tahanan kapal dengan menggunakan *software*, dengan judul :

**“STUDI PENGARUH *BIOFOULING* TERHADAP TAHANAN KAPAL
MENGUNAKAN PROGRAM AUTODESK CFD
(*Computational Fluid Dynamics*)”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka, rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perbandingan tahanan kapal pada kondisi lambung tanpa *biofouling (smooth hull)* dan kondisi lambung yang ditemplei *biofouling (roughness hull)* berdasarkan analisis Autodesk CFD ?
2. Berapa besar perubahan kenaikan nilai tahanan kapal akibat pengaruh *biofouling* berdasarkan analisis Autodesk CFD ?
3. Bagaimana karakteristik aliran fluida disepanjang lambung kapal pada kondisi lambung tanpa *biofouling (smooth hull)* dan kondisi lambung yang ditemplei *biofouling (roughness hull)* berdasarkan analisis Autodesk CFD ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah adalah sebagai berikut :

1. Menentukan perbandingan tahanan kapal pada kondisi lambung tanpa *biofouling (smooth hull)* dan kondisi lambung yang ditempeli *biofouling (roughness hull)* berdasarkan analisis Autodesk CFD.
2. Menentukan besar perubahan nilai tahanan kapal akibat pengaruh *biofouling* berdasarkan analisis Autodesk CFD.
3. Menentukan karakteristik aliran fluida disepanjang lambung kapal pada kondisi lambung tanpa *biofouling (smooth hull)* dan kondisi lambung yang ditempeli *biofouling (roughness hull)* berdasarkan analisis Autodesk CFD.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai informasi mengenai pengaruh pertumbuhan *biofouling* dan hubungannya dengan tahanan kapal.
2. Sebagai tambahan referensi bagi pembaca mengenai perbandingan tahanan kapal pada kondisi lambung tanpa *biofouling (smooth hull)* dan kondisi lambung yang ditempeli *biofouling (roughness hull)* berdasarkan analisis Autodesk CFD.
3. Sebagai tambahan referensi bagi pembaca mengenai karakteristik pola aliran fluida yang terjadi akibat pengaruh pertumbuhan *biofouling* pada lambung kapal.

1.5 Batasan Masalah

Untuk membatasi ruang lingkup dan mempermudah analisa maka perlu adanya batasan masalah. Adapun batasan masalah penelitian yaitu sebagai berikut :

1. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bantuan software Autodesk *Computational Fluid Dynamics (CFD)*.
2. Data kapal dan survey pengamatan tebal *biofouling* dilakukan pada kapal *passenger* yang sedang *docking*.
3. Pengamatan tebal dan sebaran *biofouling* dilakukan pada lambung kapal setelah satu tahun masa pelayaran.

4. Perhitungan tahanan kapal dilakukan pada kondisi *even keel* dan kondisi air tenang (*still water*).
5. Perhitungan tahanan kapal dengan beberapa variasi kecepatan yakni mulai dari 5 knot, 7 knot, 9 knot, 11 knot, 13 knot, dan 15 knot yang dikonversi ke satuan m/s.
6. Skala model kapal yang digunakan yaitu 1:40.
7. Ukuran kolam eksperimen yang digunakan yaitu 9,25 x 4,07 x 2,78 dalam skala model.
8. Perhitungan tahanan kapal tidak mempertimbangkan komponen tahanan tambahan seperti : Tahanan anggota badan (*appendages resistance*) dan Tahanan kemudi (*steering resistance*).

1.6 Sistematika Penulisan

Hasil penelitian akan dituliskan secara terperinci dan tersusun sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

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

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini menguraikan berbagai literatur yang menunjang teori-teori yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini.

BAB III : METODE PENELITIAN

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

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan penyajian data yang telah diperoleh, proses pengolahan, hasil pengolahan data serta pembahasan.

BAB V : PENUTUP

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

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal *Passenger*

Kapal *passenger* atau kapal penumpang adalah sebuah tipe kapal yang dibangun secara khusus untuk mengangkut penumpang/orang. Untuk meningkatkan efisiensi atau melayani keperluan yang lebih luas, kapal *passenger* dapat berupa kapal pesiar, ataupun untuk perjalanan pendek terjadwal dalam bentuk kapal *ferry*.



Sumber: <https://kupang.tribunnews.com/2022>

Gambar 2.1 Kapal penumpang KM. Wilis

Menurut Peraturan Menteri Perhubungan No. PM 26 Tahun (2022), kapal penumpang adalah kapal yang mengangkut penumpang lebih dari 12 orang, sedangkan kapal Ro-Ro penumpang (*Ro-Ro Passenger Ship*) adalah kapal dengan ruang muatan Ro-Ro atau ruangan muatan khusus. *Roll on* (masuk) dan *Roll off* (keluar) merupakan istilah untuk sistem kerja kapal dimana kendaraan bisa masuk dan keluar dengan sendirinya menggunakan mesin penggerak pada masing-masing kendaraan. Oleh karena itu, kapal ini dilengkapi dengan pintu rampa (ramp door) yang dihubungkan dengan *moveble bridge* atau dermaga apung ke dermaga.

Di Indonesia perusahaan yang mengoperasikan kapal *passenger* adalah PT.Pelayaran Nasional Indonesia (PELNI), sedangkan kapal *ferry* penumpang dan kendaraan dioperasikan oleh PT.ASDP, PT.Dharma Lautan Utama, PT.Jembatan Madura dan berbagai perusahaan pelayaran lainnya.

Sebagai negara kepulauan penggunaan kapal *passenger* mempunyai peran yang sangat penting dengan karakteristik muatan terdiri dari kendaraan, barang dan manusia dengan jarak pelayaran yang beragam. Jaringan angkutan penyeberangan sebagai pendukung konektivitas nasional berperan menghubungkan pulau-pulau utama. Sedangkan dalam mendukung konektivitas lokal atau intra wilayah, jaringan ini berperan sebagai penghubung antar pulau dalam satu region, penghubung antar lokasi dalam satu daratan dan sebagai perpendekan angkutan jalan raya.

2.2 Biofouling

2.2.1 Pengertian Biofouling

Salah satu tantangan dalam industri perkapalan di antaranya adalah proses pengotoran biologis yang hidupnya menempel pada permukaan yang terendam di dalam air. Peristiwa ini bersumber dari biota dibawah permukaan air seperti bakteri, tumbuhan, alga dan binatang laut yang biasa disebut dengan *biofouling*.

Menurut Iswadi (2020) menyatakan bahwa, *biofouling* merupakan akumulasi mikroorganisme dan makroorganisme yang menempel pada permukaan bahan/material yang terendam di dalam laut yang dapat menyebabkan kerusakan struktural.

Adapun pengertian lain menurut Rittchhof, menyatakan bahwa secara umum *biofouling* merupakan penempelan dan pertumbuhan organisme pada permukaan benda yang tercelup di laut. Organisme ini dapat melekat secara sementara dan juga melekat secara permanen pada permukaan benda yang ditempelinya. Semua permukaan benda yang berada di bawah permukaan air dalam lingkungan laut dipengaruhi oleh penempelan organisme fouling seperti bakteri, alga dan invertebrata khususnya teritip dan remis (Baital, 2016).

Pertumbuhan *biofouling* yang tidak teratur dan sulit untuk diprediksi disebabkan beberapa faktor. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi terjadinya fenomena *biofouling* adalah jenis material yang digunakan sebagai komponen, suhu air laut, arus dan jarak penempatan alat dari pantai, dan kedalaman penempatan perangkat di bawah permukaan laut yang berkorelasi terhadap tingkat ketersediaan cahaya matahari (Iswadi, 2020).

Faktor-faktor tersebut membuat pertumbuhan *biofouling* begitu cepat dan tidak terbatas. Hal ini yang menyebabkan penumpukan *biofouling* pada

permukaan benda sehingga menimbulkan masalah yang signifikan. Berkaitan dengan dampak *biofouling* di perairan laut, disebutkan beberapa infrastruktur yang terdampak, diantaranya adalah *jetty*, *bridge*, dan *ship* (Iswadi, 2020).

Terkhusus dalam industri perkapalan *biofouling* menyebabkan peningkatan biaya melalui peningkatan penggunaan tenaga kerja, bahan bakar, material dan waktu docking.



Sumber: Noko Fishing, 2021

Gambar 2.2 Penempelan *biofouling* pada lambung kapal

2.2.2 Proses Pembentukan dan Penempelan *Biofouling*

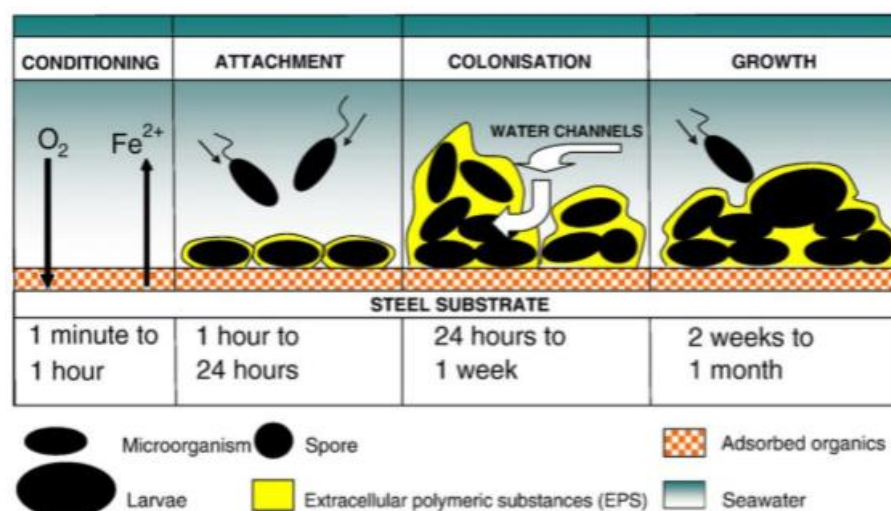
Menurut Lilik (2015) menyatakan bahwa, secara umum penempelan organisme *biofouling* dapat digolongkan menjadi 2 kategori yaitu mikrofouling atau organisme biofilm seperti bakteri, diatom dan makrofouling seperti alga, barnacles, kerang, cacing polichaeta, bryozoans dan seaweed. Proses *biofouling* melalui reaksi fisik, dimulai dari terbentuknya lapisan dari bahan organik seperti protein, polisakarida dan proteoglikan yang terbentuk pada permukaan substrat. Selanjutnya terjadi penempelan kolonisasi pertama oleh bakteri dan diatom, dilanjutkan pada kolonisasi kedua oleh spora makroalga dan protozoa serta yang terakhir kolonisasi tersier oleh larva makrofouler.

Pendapat lain menyatakan bahwa, organisme penyebab *biofouling* dapat dikategorikan ke dalam dua golongan, yaitu *biofouling* mikroskopik dan *biofouling* makroskopik. *Biofouling* mikroskopik terdiri dari bakteri, diatomeae, protozoa dan rotifer, sedangkan *biofouling* makroskopik yang banyak ditemukan pada objek bawah laut antara lain organisme *biofouling* atau lebih dikenal sebagai

barnacles atau ganggang. *Biofouling* makroskopik, oleh banyak pakar disebut-sebut memberikan dampak kerugian yang sangat besar karena dapat menyebabkan kekasaran dan menyebabkan korosi pada substrat logam (Ramadhani, 2016).

Menurut Raiklin, menyatakan bahwa proses *biofouling* pada suatu permukaan diawali dengan menempelnya mikroorganisme terutama oleh bakteri dan diatom yang tumbuh berkali lipat dengan sangat cepat. Bersamaan dengan bahan organik pertikulat lainnya, mikroorganisme ini akan membentuk lapisan tipis pada permukaan benda. Tahap ini merupakan tahap primer dimana mikroorganisme berperan sebagai perintis bagi organisme selanjutnya yang biasanya berukuran lebih besar. Hewan dan tumbuhan yang selanjutnya menempel pada permukaan tersebut biasanya berasal dari hewan dan tumbuhan yang secara alami hidup menempel (Baital, 2016).

Proses penempelan *biofouling* diawali ketika substrat bersentuhan langsung dengan air laut, maka zat organik air laut akan bereaksi dengan lapisan permukaan dari substrat, seketika akan terjadi lapisan penempelan oleh bakteri-bakteri laut dan organisme mikroskopik lainnya, seperti diatom-diatom dan microalgae. Keragaman organisme pada lapisan bacteria menyebabkan ketertarikan simbiosisme dan membuat spesies yang besar menempel pada permukaan substrat.

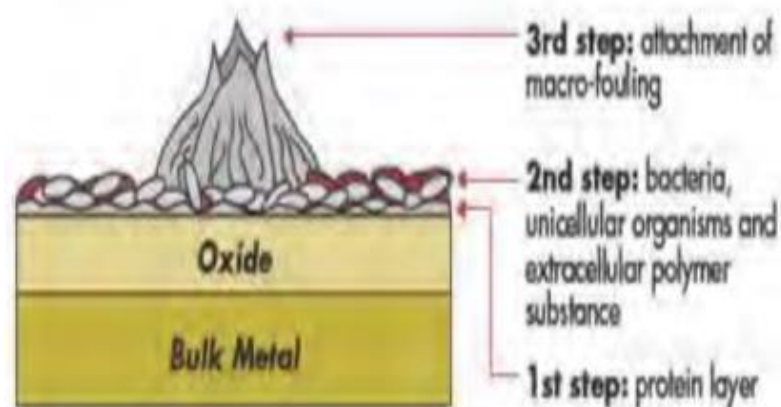


Sumber: L.D. Chambers, 2006

Gambar 2.3 Skema tahap pembentukan *biofouling*

Pembentukan *biofouling* pada suatu permukaan membutuhkan waktu tertentu dalam setiap tahapannya. Dalam hitungan detik, bakteri planktonik yang

terdapat diperairan mengalami pengendapan yang berubah-ubah. Selanjutnya bakteri melekat pada suatu permukaan hanya dalam hitungan menit. Bakteri yang melekat kemudian membentuk koloni dan menempel secara permanen karena terjadi produksi eksopolimer yang terjadi hanya dalam hitungan menit. Selanjutnya terjadi proses pematangan biofilm tahap awal yang terjadi hingga 24 jam, sedangkan pematangan biofilm tahan akhir terjadi hingga 1 minggu. Setelah pematangan tahap akhir, pada waktu 2 minggu hingga 1 bulan terjadi proses dispersi, yaitu proses dimana sebagian bakteri telah siap untuk menyebar dan berkoloni ditempat yang lain.



Sumber: Ramadhani, 2016

Gambar 2.4 Proses penempelan *biofouling* pada substrat logam

2.2.3 Pengaruh *Biofouling* Pada Kapal

Biofouling terjadi saat kapal yang terendam secara terus menerus dalam kurun waktu tertentu. *Biofouling* umumnya terjadi ketika kapal dalam kondisi *stasioner* (tidak bergerak), sehingga bagian yang terendam air secara terus menerus akan menjadi tempat berkembang biak bagi organisme *biofouling* dengan cepat.

Biofouling menjadi salah satu penyebab menurunnya kinerja dan kualitas dalam suatu sistem dari struktur kapal. *Biofouling* tidak terjadi pada bawah lambung kapal saja tetapi dapat menyerang struktur atau material lain yang terendam air secara terus menerus tanpa adanya pencegahan.

Pertumbuhan dan penumpukan *biofouling* pada kapal laut menimbulkan masalah yang signifikan, hal ini mengakibatkan kerugian yang cukup besar.

Callow (2002) menyatakan bahwa, pada lambung kapal *biofouling* mengakibatkan peningkatan kekasaran, hal ini menyebabkan peningkatan gaya hambat hidrodinamis saat kapal bergerak di air. Peningkatan konsumsi bahan bakar, pembersihan lambung, penghapusan cat dan pengecatan ulang, serta langkah-langkah terkait kepatuhan lingkungan semuanya berkontribusi pada biaya akibat *biofouling*.

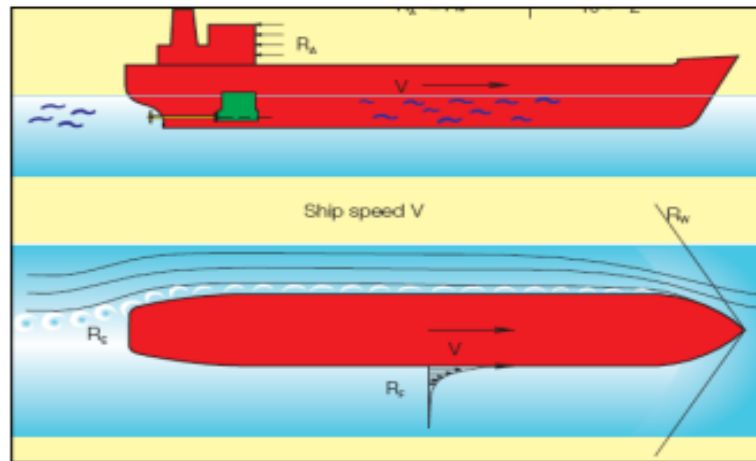
Biofouling juga dapat mempercepat terjadinya kerusakan akibat korosi yang ditimbulkan pada bagian ditemplei, dalam beberapa kasus struktur lambung dan sistem propulsi bisa rusak. Menurut Verde (2009:37) menyatakan bahwa, kapal yang ditumbuhi *biofouling* mengalami kenaikan *drag* hingga 20%. Teritip dan organisme lainnya menempel, mengakibatkan tahanan kapal dapat meningkat menjadi lebih dari 60%, hal ini mengurangi kecepatan kapal hingga 10% dan membutuhkan sebesar 40% peningkatan konsumsi bahan bakar untuk mengatasi hambatan tambahan.

2.3 Tahanan Kapal

Tahanan kapal (*ship resistance*) pada suatu kecepatan 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. Tahanan sebuah kapal pada dasarnya dipengaruhi oleh kecepatan, *displacement* dan bentuk hull 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 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.



Sumber: Gria Madya Saputro, 2018

Gambar 2.5 Tahanan pada kapal

Hambatan-hambatan tersebut merupakan komponen tahanan kapal yang bekerja sejajar dengan sumbu gerakan kapal. Adapun rumus dari tahanan total adalah sebagai berikut :

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

Dimana :

- R_T : Tahanan total (kN)
- C_T : Koefisien tahanan
- V : Kecepatan kapal (m/s)
- S : Luas bidang basah benda (m²)
- ρ : Massa jenis (ton/m³)

2.3.1 Komponen Tahanan

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 sebagai 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 Viskos (RV) adalah komponen tahanan yang terkait dengan energi yang dikeluarkan akibat pengaruh viskos.

Tahanan gesek ini dipengaruhi oleh beberapa hal, sebagai berikut :

- a. Angka Renold (*Renold's number, Rn*)

$$Rn = \frac{V.L}{\nu} \quad (2. 2)$$

Dimana :

V : Kecepatan (m/s)

L : Panjang (m)

ν : Viskositas (m^2/s)

- b. Koefisien gesek (*Friction coefficient, Cf*)

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

- c. Rasio kecepatan dan panjang kapal (*Speed length ratio, Slr*)

$$Slr = \frac{Vs}{\sqrt{L}} \quad (2. 4)$$

Dimana :

Vs : Kecepatan kapal (m/s)

L : *Lenght between perpendicular (m)*

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 :

a. 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.

b. Tahanan udara (*Air resistance*)

Tahanan udara diartikan sebagai tahanan yang dialami oleh bagian badan kapal utama yang berada diatas air dan bangunan atas (*super structure*) 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.

c. 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.

d. 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 :

a) Tahanan anggota badan (*Appendages resistance*)

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

b) Tahanan kekasaran

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

c) Tahanan kemudi (*Steering resistance*)

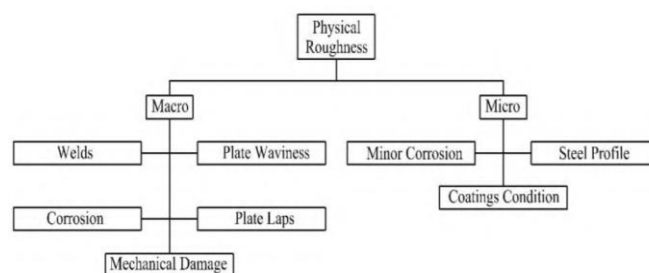
Untuk mempertahankan kelurusan lintasan, koreksi kedudukan umumnya dilakukan dengan memakai daun kemudi. Pemakaian daun kemudi menyebabkan timbulnya komponen tahanan tambahan yang disebut dengan tahanan kemudi.

2.3.2 Added Resistance Akibat *Biofouling*

Pada lambung kapal terdapat fenomena lapisan batas yang berkembang sepanjang lambung yang tercelup dalam air. Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap *skin friction* adalah kekasaran permukaan (*surface roughness*). Perbedaan tingkat kekasaran ini menyebabkan naiknya *skin friction* diatas lapisan batas turbulen pada permukaan licin. Kekasaran pada permukaan badan kapal dapat di sebabkan oleh beberapa hal, yaitu: kekasaran struktur, kontur permukaan, pengelasan, perubahan section, kerusakan lokal, lubang-lubang yang terjadi karena korosi, pelepuhan cat kasar dan yang utama disebabkan oleh adanya *biofouling*.

Biofouling pada lambung kapal memberi pengaruh yang besar dalam meningkatkan hambatan kapal, dimana keberadaan *biofouling* membuat permukaan lambung kapal menjadi kasar dan tidak teratur. Keberadaan *biofouling* ini tergantung pada rute dan waktu pelayaran kapal.

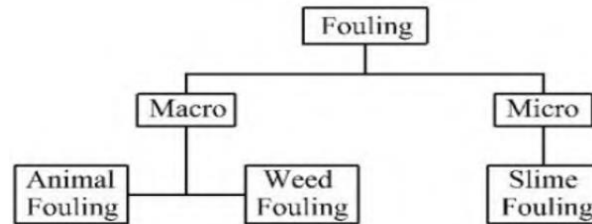
Hambatan kapal merupakan hal penting dalam perencanaan suatu kapal. Nilai hambatan tersebut dipengaruhi beberapa faktor diantaranya bentuk lambung, tingkat streamline dan kekasaran lambung. Secara khusus, kekasaran permukaan (*surface roughness*) pada kapal dibedakan menjadi dua yaitu kekasaran fisik dan kekasaran biologi. Kekasaran fisik pada kapal berupa tekstur permukaan pada pelat seperti hasil pengelasan, korosi, sambungan pelat, kerusakan mekanis, serta kondisi cat/lapisan.



Sumber: Baital, 2016

Gambar 2.6 Kekasaran fisik pada kapal

Sementara kekasaran biologis pada kapal yaitu kondisi tekstur permukaan pelat kapal yang diakibatkan oleh pengaruh dari pertumbuhan biota laut seperti *biofouling*.



Sumber: Baital, 2016

Gambar 2.7 Kekasaran biologis pada kapal

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *biofouling* merupakan proses biologis seperti pertumbuhan lumut dan teritip. *Biofouling* yang berkembang pada lambung kapal menimbulkan kekasaran tambahan dan menyebabkan meningkatnya hambatan kapal. Peningkatan kekasaran dalam hal ini yang diakibatkan oleh *biofouling* mengarah pada peningkatan nilai *frictional resistance*.

2.4 Aliran Fluida

Hidrodinamika klasik mengarahkan pada bagaimana bentuk pola aliran fluida yang melintasi suatu body seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Sumber: Adji, 2009

Gambar 2.8 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 massa-nya didalam *streamlines* tersebut adalah konstan. Berdasarkan Teorema Bernaulli maka hal ini juga berkaitan dengan adanya perubahan tekanan. Untuk suatu *streamline* yang diberikan tersebut ; jika p , ρ , v , dan h adalah Tekanan, Massa Jenis, Kecepatan, dan Tinggi tertentu dari garis datar; maka dapat diformulasikan, sebagai berikut (Adji, 2009) :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh = \text{constant} \quad (2.5)$$

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 dilintasi body tersebut, ada sejumlah gaya-gaya local yang bekerja pada body tersebut, akan tetapi gaya-gaya tersebut saling meniadakan ketika diintegrasikan pada seluruh body. Gaya-gaya local tersebut terjadi sebagai akibat terjadinya perubahan tekanan, yang diakibatkan oleh adanya perubahan kecepatan di dalam aliran fluida (Adji, 2009).

Dalam mempelajari dinamika aliran fluida, maka akan sangat berguna bila kita kembangkan suatu angka dari parameter-parameter non-dimensional. Dimana angka tersebut dapat meng-karakteristikan 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 [ρ], Viskositas [μ], Tekanan Statis Fluida [p]. Jika Tahanan Kapal (*resistance*) adalah [R], Kecepatan adalah [V], dan Panjang adalah [L], maka Tahanan kapal dalam Analisa dimensional dapat diformulasikan sebagai berikut (Adji, 2009).

$$R = f [L^a V^b \rho^c \mu^d g^e p^f] \quad (2.6)$$

Sejumlah quantity yang masuk pada ekpresi formulasi tersebut diatas, 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 [ρ] memiliki dimensi [ML^{-3}], dan sebagainya, maka dengan men-substitusi keseluruhan parameter ke bentuk dimensi fundamental-nya, diperoleh hubungan (Adji, 2009).

$$\frac{ML}{T^2} = f \left[L^a \left(\frac{L}{T} \right)^b \left(\frac{M}{L^3} \right)^c \left(\frac{M}{LT} \right)^d \left(\frac{L}{T^2} \right)^e \left(\frac{M}{LT^2} \right)^f \right] \quad (2.7)$$

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, sebagai berikut (Adji, 2009).

$$R = \rho V^2 L^2 f \left[\left(\frac{\mu}{\rho V L} \right)^d, \left(\frac{gL}{V^2} \right)^e, \left(\frac{p}{\rho V^2} \right)^f \right] \quad (2.8)$$

Maka, persamaan keseluruhan dari tahanan (*resistance*) dapat ditulis sebagai berikut (Adji, 2009).

$$R = \rho V^2 L^2 f \left[f_1 \left(\frac{\mu}{\rho V L} \right)^d, f_2 \left(\frac{gL}{V^2} \right)^e, f_3 \left(\frac{p}{\rho V^2} \right)^f \right] \quad (2.9)$$

Sehingga melalui analisa terhadap ekspresi tersebut diatas, dapat diindikasikan bahwa kombinasi non-dimensional yang signifikan adalah (Adji, 2009).

$$\frac{R}{\rho V^2 L^2} VL \frac{\rho}{\mu}, \frac{V}{(gL)^{0.5}}, \frac{p}{\rho V^2} \quad (2.10)$$

Dari ketiga rasio tersebut diatas, 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 C_T , Re dan Fn (Adji, 2009).

Rasio μ/ρ adalah dikenal dengan pengertian angka viskositas kinematis, yang dinyatakan dengan notasi ν . 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 diatas dapat diekpresikan menjadi, sebagai berikut (Surjo W. Adji, 2009).

$$\frac{R}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = f \left(\frac{VL}{\nu}, \frac{gL}{V^2} \right) \quad (2.11)$$

Dan tahanan kapal (*resistance*) dapat diformulasikan dengan ekspresi dibawah ini (Adji, 2009).

$$R = \frac{1}{2} \rho C_T V^2 S \quad (2.12)$$

Dimana, C_T adalah koefisien tahanan kapal yang merupakan fungsi dari Re dan Fn . Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut (Adji, 2009).

$$C_d = \frac{2Fd}{\rho A V^2} \quad (2.13)$$

Dimana,

C_d : Coefficient of drag

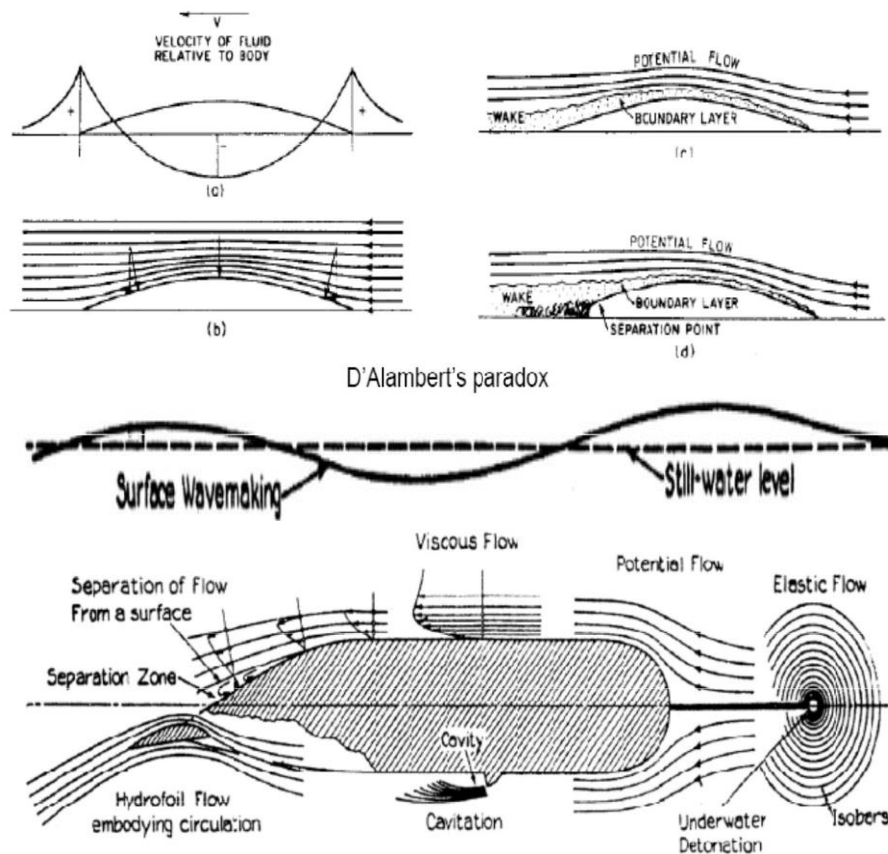
F_d : Drag force (N)

ρ : Density of fluid (kg/m^3)

A : Cross sectional area (m^2)

V : Velocity relative to fluid (m/s)

Beberapa contoh pola aliran fluida dari suatu *Sub-marged body (no wave)* (Adji, 2009).



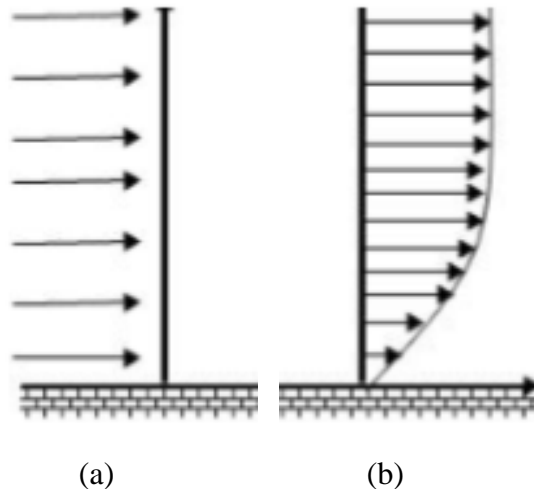
Sumber: Adji, 2009

Gambar 2.9 Contoh aliran fluida dari suatu *sub-merged body*

2.4.1 Aliran *Viscous* dan *Non Viscous*

Pada dasarnya aliran terbagi atas dua jenis yaitu aliran *viscous* dan aliran *non viscous*. Aliran *non viscous* merupakan aliran yang mempunyai gradien kecepatan dan tegangan geser yang mendekati nol. Sedangkan aliran *viscous* adalah merupakan aliran yang mempunyai gradien dan tegangan geser (mempunyai nilai yang lebih besar dari pada *non viscous*).

Pada aliran fluida ideal, semua partikel akan bergerak pada kecepatan yang sama, tetapi pada aliran *viscous* yang mempunyai tegangan geser akan menjadikan profil kecepatannya menjadi tidak seragam. Sebagaimana gambar di bawah ini.



Sumber: Nurrohman, 2017

Gambar 2.10 Perbedaan (a) Fluida ideal, (b) Fluida *viscous*

Menurut Yulistiyanto, pada aliran *viscous* kecepatan fluida yang tepat diatas permukaan padat sama dengan nol. Dan semakin jauh dari permukaan padat, secara berangsur-angsur tegangan geser yang terjadi semakin berkurang, sehingga berangsur-angsur pula kecepatan aliran potensial akan membesar. Dan pada suatu titik tertentu pengaruh tegangan geser terhadap aliran akan hilang sehingga kecepatan aliran potensial akan mencapai harga yang sama dengan aliran bebasnya (Nurrohman, 2017).

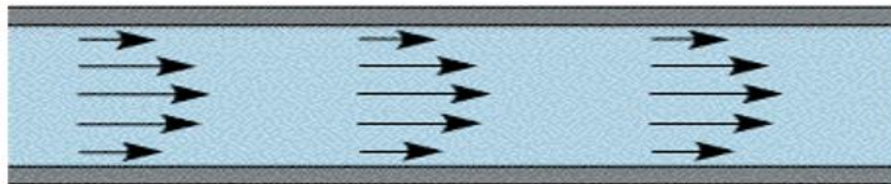
2.4.2 Aliran Terkait Bentuk Lambung Kapal

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 bahkan 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 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 ($Re < 2300$)

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.

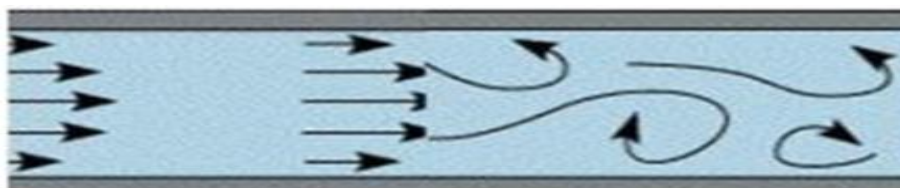


Sumber: Simanjuntak, 2017

Gambar 2.11 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.



Sumber: Simanjuntak, 2017

Gambar 2.12 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.



Sumber: Simanjuntak, 2017

Gambar 2.13 Aliran turbulen

2.4.3 Aliran Vortex

Bila suatu medan aliran fluida (air atau udara, misalnya) terhalang oleh sebuah benda maka pola aliran fluida tersebut akan terganggu dari kondisi stationernya akan mencari kondisi kesetimbangan barunya. Misalkan pada kasus sebuah silinder yang berada dalam aliran steady, maka akan terjadilah suatu pola aliran tertentu di sekeliling permukaan silinder tersebut. Ternyata, pola aliran ini salah satunya tergantung pada suatu parameter yang disebut Angka Reynolds (*Reynolds number*), Re . Parameter aliran fluida ini didefinisikan dengan (Prastianto, 2006) :

$$Re = \frac{D \cdot U}{\nu} \quad (2.14)$$

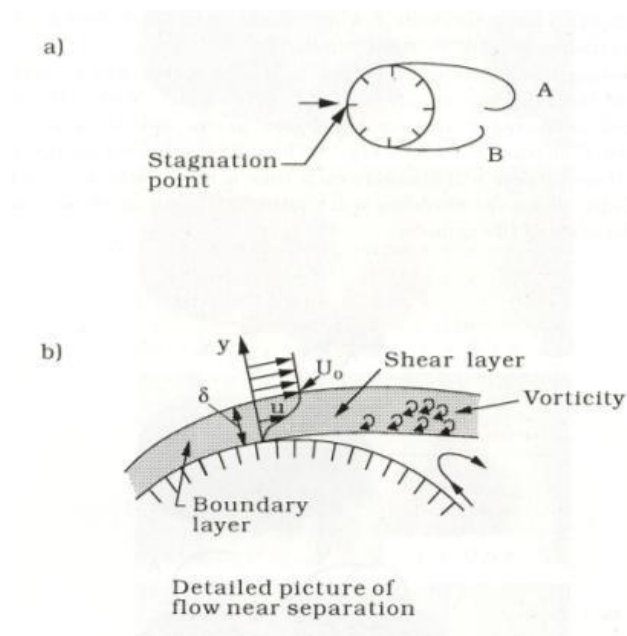
Dimana, D adalah diameter silinder, U adalah kecepatan aliran fluida datangnya dan ν menyatakan viskositas kinematis fluida (Prastianto, 2006).

Berdasarkan banyak percobaan visualisasi aliran yang telah dilakukan, nilai Re inilah yang akan menentukan bagaimana bentuk pola aliran yang akan terjadi. Beberapa diantaranya misalnya, bila nilai $Re < 5$, maka yang terjadi adalah pola aliran yang mulus, tanpa terjadi pusaran – pusaran lokal fluida (*vortex*) dan tidak terjadi pula pemisahan aliran pada saat aliran sudah melewati silinder (*creeping flow*). Selanjutnya bila kecepatan aliran dinaikan, yang berarti nilai Re makin bertambah besar, misalnya untuk rentang $5 < Re < 40$, maka akan mulai terbentuk *vortex*. Dalam rentang nilai Re ini akan terbentuk sepasang *vortex* simetris di

belakang silinder yang berputar stationer tanpa terpecah selama rentang nilai Re tidak berubah (Prastianto, 2006).

Namun ketika nilai angka Reynold (Re) ini terus dinaikan, maka medan aliran makin menjadi tidak stabil, yang mana lambat-laun formasi *vortex* yang terbentuk mulai berantakan dengan pola – pola yang tertentu. Maka pada saat itulah akan timbul suatu fenomena yang dinamakan Pelepasan *Vortex* (*Vortex Shedding*), yang mulai terjadi pada saat nilai $Re > 40$. Fenomena ini adalah terlepasnya *vortex* secara bolak-balik di sisi – sisi silinder dengan pola dan frekuensi tertentu. Pola pelepasan *vortex* ini pun secara lebih detil akan memiliki bentuk tertentu sesuai dengan angka Re -nya (Prastianto, 2006).

Fenomena pelepasan *vortex* ini memang biasa terjadi pada hampir semua jenis aliran fluida yang memiliki nilai angka $Re > 40$. Pada nilai Re ini, lapisan batas (*boundary layer*) di sekeliling permukaan silinder akan memisah akibat adanya gradien tekanan balik dari geometri yang divergen dari aliran di sekitar sisi belakang silinder. Akibatnya terbentuklah suatu lapisan geser (*shear layer*). Hal ini secara skematis diilustrasikan dalam gambar dibawah ini (Prastianto, 2006).

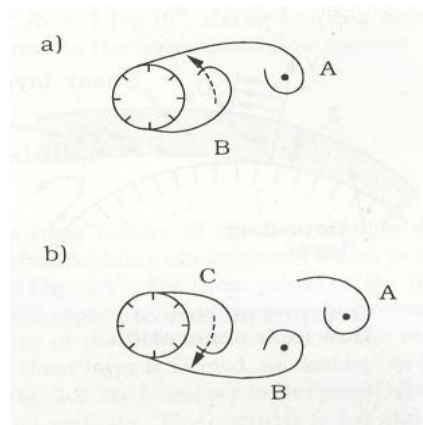


Sumber: Prastianto, 2006

Gambar 2.14 Skema terbentuknya lapisan geser (*shear layer*) yang selanjutnya akan membentuk *vortex* A dan B

Secara sederhana, mekanisme terjadinya pelepasan *vortex* pada kasus aliran air melalui sebuah silinder apabila $Re > 40$, maka pasangan *vortices* yang terbentuk menjadi tidak stabil oleh gangguan/usikan kecil, sehingga salah satu *vortex* akan tumbuh lebih besar dari yang lainnya. *Vorticity* dalam *Vortex A* berputar searah jarum jam (CW), sedangkan *vorticity* dalam *Vortex B* berputar berlawanan arah jarum jam (CCW). Selanjutnya gerakan aliran *vorticity* yang CCW akan memotong aliran *vorticity* yang mensuplay *Vortex A*, sehingga *Vortex A* terlepas lalu menjadi *vortex* bebas dan akhirnya tersert aliran ke arah belakang/menjauhi silinder (Prastianto, 2006).

Setelah *vortex A* terlepas, terbentuklah *vortex* baru menggantikan *vortex A* yaitu *Vortex C*. Maka selanjutnya, *Vortex B* akan mengalami hal yang sama dengan *Vortex A* sebelumnya, yaitu pertama, ukuran dan kekuatannya makin membesar lalu terpotong oleh *Vortex C* dan akhirnya terlepas menjadi *vortex* bebas. Proses seperti ini akan berlangsung terus-menerus setiap terjadi pelepasan *vortex* baru pada setiap sisi silinder seperti yang diilustrasikan pada gambar dibawah ini (Prastianto, 2006).



Sumber: Prastianto, 2006

Gambar 2.15 Skema mekanisme terjadinya pelepasan *vortex* (*vortex shedding*) pada sebuah silinder dalam aliran steady

Jadi pelepasan *vortex* hanya akan terjadi jika terdapat interaksi antara dua lapisan geser (*shear layer*) pada dua sisi silinder. Secara teoritik hal ini bisa dihindarkan dengan cara meniadakan interaksi tersebut. Misalnya dengan cara memberikan suatu pelat pemisah di bagian belakang silinder di antara dua lapisan tersebut. Sehingga interaksi antar *vortex* bisa dicegah, yang akhirnya tidak terjadi

pelepasan *vortex*. Konsep inilah yang mendasari timbulnya berbagai macam upaya penambahan struktur pada permukaan silinder (*suppression devices*) dalam rangka mengurangi terjadinya pelepasan *vortex*. Tetapi dalam prakteknya, fenomena pelepasan *vortex* ini tidak bisa dihindari, sejauh ini hanya dapat diminimalisir (Prastianto, 2006).

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 penskalaan 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 λ dimana :

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{T_s}{T_m} \quad (2.15)$$

Dimana :

λ = 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 :

1) Menurut Todd

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

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

2) Menurut Harvald

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

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

3) 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 Kesamaan 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.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.L}} \quad (2.16)$$

Atau :

$$\frac{Vm}{\sqrt{g.Lm}} = \frac{Vs}{\sqrt{g.Ls}} \quad (2.17)$$

Dimana :

- Fr = Angka fraude
- 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 m/s²)

2.5.3 Kesamaan 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 :

$$Rn = \frac{V.L}{\nu} \quad (2.18)$$

Atau :

$$Rn = \frac{Vm.Lm}{\nu} = \frac{Vs.Ls}{\nu} \quad (2.19)$$

Dimana :

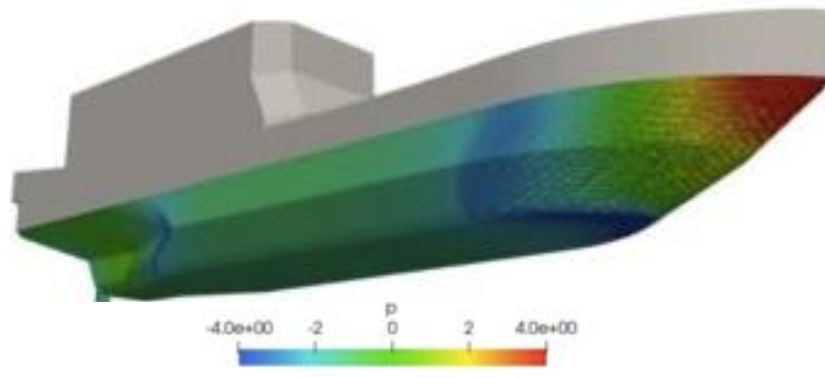
- Rn = Angka reynold
- L_s = Panjang kapal (m)
- L_m = Panjang model (m)
- V_s = Kecepatan kapal (m/s)
- V_m = Kecepatan model (m/s)
- g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- ν = Viskositas kinematis fluida (m²/s) = 1,1883 x 10⁻⁶ m²/s

2.6 Autodesk CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

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.

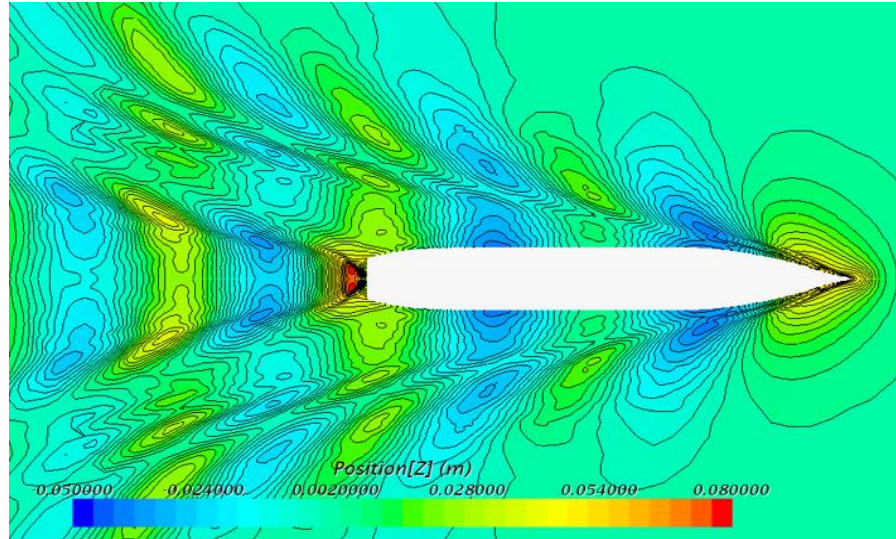
CFD menerapkan perhitungan yang dikhususkan pada fluida beserta perilakunya, seperti aliran suatu fluida (*fluid flow*), perpindahan kalor (*heat transfer*), dan juga reaksi kimia yang terjadi pada fluida. Perhitungan dengan CFD ini didasarkan atas prinsip-prinsip mekanika fluida, konservasi energi,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



Sumber: <http://aeroengineering.co.id/>, 2021

Gambar 2.16 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.



Sumber: https://sies.com.sg/Computational_Fluid_Dynamics.html

Gambar 2.17 Simulasi pengujian model dengan CFD

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, 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 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (2. 20)$$

Dimana, ρ 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. Momentum-X yaitu :

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ & = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [2\mu \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [\mu (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [\mu (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] + S\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (2. 21)$$

Persamaan Momentum-Y yaitu :

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \\ & = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} [\mu (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y} [2\mu \frac{\partial v}{\partial y}] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [\mu (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})] + S\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (2. 22)$$

Persamaan Momentum-Z yaitu :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} \\ & = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} [\mu (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial y} [\mu (\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [2\mu \frac{\partial w}{\partial z}] + S\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (2. 23)$$

Dimana, g_x , g_y , g_z adalah percepatan gravitasi dalam arah x,y,z, μ adalah viskositas, aliran rotasi $S\omega$, dan S_{DR} adalah resistance terdistribusi.

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

$$S_{DR} = - (K_i + \frac{f}{DH}) \frac{\rho V i^2}{2} - C\mu V i \quad (2. 24)$$

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 :

$$S\omega = -2 \rho \omega_i \times V_i - \rho \omega_i \times \omega_i \times r_i \quad (2.25)$$

Dimana, ω adalah kecepatan rotasi dan r adalah jarak dari sumbu rotasi. Untuk model turbulensi, penelitian ini menggunakan fungsi dinding atau k-Epsilon (K- ϵ), 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 property fluida, 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 menunjukkan error terkecil atau hingga mencapai nilai konvergensinya.

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.

Setiap tahapan tersebut membutuhkan tool dan analisa yang sesuai dan bagaimana tahapan itu diterapkan tergantung pada pendekatan numerik dan layout kode komputasi. Dalam proses CFD ada proses verifikasi dan validasi untuk mengetahui seberapa baik mewakili formula matematika yang diterapkan. Proses ini untuk memastikan kode komputasi bebas dari error karena kesalahan dalam penggunaan bahasa komputer.