



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS PENINGKATAN HAMBATAN GESEK KAPAL
AKIBAT PERTUMBUHAN *MARINE FOULING* PADA
LAMBUNG KAPAL MENGGUNAKAN METODE
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**Shindi Regitasyali
NRP 0411164000024**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS PENINGKATAN HAMBATAN GESEK KAPAL
AKIBAT PERTUMBUHAN *MARINE FOULING* PADA
LAMBUNG KAPAL MENGGUNAKAN METODE
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS***

**Shindi Regitasyali
NRP 0411164000024**

**Dosen Pembimbing
Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



FINAL PROJECT - MN 184802

**FRICION RESISTANCE ANALYSIS DUE TO MARINE
FOULING GROWTH ON SHIP HULL WITH
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHOD**

**Shindi Regitasyali
NRP 0411164000024**

**Supervisor
Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PENINGKATAN HAMBATAN GESEK KAPAL AKIBAT PERTUMBUHAN *MARINE FOULING* PADA LAMBUNG KAPAL MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SHINDI REGITASYALI
NRP 0411164000024

Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.
NIP 19670406 199203 1 001

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Perkapalan

Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D.
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 5 AGUSTUS 2020



LEMBAR REVISI

ANALISIS PENINGKATAN HAMBATAN GESEK KAPAL AKIBAT PERTUMBUHAN *MARINE FOULING* PADA LAMBUNG KAPAL MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 5 AGUSTUS 2020

Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SHINDI REGITASYALI
NRP 0411164000024

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.

2. Dr. Ir. I Ketut Suastika

3. Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T.



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

SURABAYA, 5 AGUSTUS 2020

HALAMAN PERUNTUKAN

Dedicated for myself and both of my parents.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas berkah dan rahmat-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Laporan ini berisi pemaparan terkait ilmu dan penerapannya dalam pengerjaan tugas akhir. Penulis berharap laporan ini dapat digunakan sebagai referensi untuk keperluan akademis di waktu yang akan datang.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Orang tua dan keluarga yang tak hentinya memberikan doa dan dukungan kepada Penulis selama menyelesaikan masa studi;
2. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
3. Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D., Dr. Ir. I Ketut Suastika dan Dr. Eng. Yuda Apri Hermawan, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini;
4. Teman-teman seperjuangan tugas akhir Hidrodinamika Hanif Yuliansyah, Adnan Faiz Fauzi, Ahmad Septiawan Saputra, Rakasiwi Ferdin Kusuma, Zhafir Tri Setiabudi Putra, Aden dan Muhammad Alimul Hafiz atas saran dan dukungan dalam mengerjakan tugas akhir ini;
5. Teman-teman *Kapal in Exile* dan *P56 Ironclad* atas dukungan dan bantuan selama masa perkuliahan;
6. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh Penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata, semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 5 Agustus 2020

Shindi Regitasyali

ANALISIS PENINGKATAN HAMBATAN GESEK KAPAL AKIBAT PERTUMBUHAN *MARINE FOULING* PADA LAMBUNG KAPAL MENGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Nama Mahasiswa : Shindi Regitasyali
NRP : 0411164000024
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Kekasaran pada lambung kapal dapat disebabkan oleh cat *anti-fouling* dan *marine fouling* yang tumbuh pada lambung kapal. Peningkatan kekasaran dapat menyebabkan kenaikan hambatan gesek kapal, di mana hambatan gesek kapal dapat mencapai 80% - 85% dari total hambatan yang dialami kapal. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah dilakukan untuk memprediksi kenaikan hambatan kapal tersebut. Cara yang digunakan pada penelitian ini adalah dengan menguji model pelat datar berdasarkan asumsi William Froude bahwa nilai hambatan gesek pelat datar sama dengan nilai hambatan gesek kapal. Metode pengujian pada penelitian ini adalah metode simulasi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian ini meliputi pengujian validasi dan prediksi. Pada pengujian validasi, model pelat datar dan variasi kekasaran *biofouling* yang digunakan mengacu pada eksperimen *wind tunnel* oleh Yuliansyah (2019) dan penelitian Suastika et al (2020). Sedangkan, pada pengujian prediksi, model pelat datar yang digunakan mengacu pada penelitian Suastika et al (2020) dan variasi kekasarannya mengacu pada penelitian Schultz (2007). Variasi kekasaran pada pengujian validasi dan prediksi secara garis besar meliputi kondisi *smooth*, *regular roughness* dan *irregular roughness*. Hasil simulasi yang didapat berupa *friction drag* yang diolah menjadi koefisien hambatan gesek (C_F). Kemudian, dilakukan analisis terkait peningkatan hambatan gesek (ΔC_F) antara ketiga kondisi pelat datar. Pada akhir penelitian ini, disimpulkan bahwa peningkatan C_F bergantung pada tingkat kekasaran dan tingkat kerapatan kekasaran. Selain itu, variasi kekasaran *irregular roughness* menghasilkan persentase kenaikan C_F yang lebih kecil dibanding *regular roughness* dengan nilai *averaged roughness length scale* yang serupa.

Kata kunci: *biofouling*, *computational fluid dynamics*, *friction resistance*, *roughness length scale*, *surface roughness*..

FRICION RESISTANCE ANALYSIS DUE TO MARINE FOULING GROWTH ON A SHIP HULL WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS METHOD

Author : Shindi Regitasyali
Student Number : 0411164000024
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Hull roughness can be a product of anti-fouling paints and biofoulings that grow on a ship hull. This increase in roughness is responsible to the increase in the ship's frictional resistance, which accounts to 80 – 85% of the ship's total resistance. Due to this reason, numerous researches have been conducted to predict the increase of ship's resistance due to the roughness caused by anti-fouling paints and marine fouling. This research utilized the use of a flat plate model based on William Froude's assumption that the friction resistance of a flat plate is equal to that of a ship. The method used to investigate this issue is through the means of Computational Fluid Dynamics (CFD). This research consists of validation and prediction simulations. For the validation process, the flat plate model and the roughness variations referred to a wind tunnel experiment done by Yuliansyah (2019) and a research conducted by Suastika et al (2020) by means of CFD. Meanwhile, for the prediction process, the flat plate model referred to the same research conducted by Suastika et al (2020) and the extreme roughness variations referred to a research conducted by Schultz (2007). The surface condition for all simulations consists of smooth, regular roughness and irregular roughness. Through the simulations, the value of friction drag was obtained and used to calculate the skin friction coefficient (C_F). The results of each surface conditions were then compared to each other using the increase of friction coefficient (ΔC_F). At the end of this research, it can be concluded that ΔC_F depends on roughness conditions, namely the roughness height (k_s) and the roughness density (C_s). It can also be concluded that the variation of irregular roughness resulted in a smaller increase in C_F than the regular roughness with the similar averaged roughness length scale.

Keywords: biofouling, computational fluid dynamics, friction resistance, roughness length scale, surface roughness..

DAFTAR ISI

LEMBAR REVISI.....	vii
HALAMAN PERUNTUKAN.....	ix
KATA PENGANTAR	xi
ABSTRAK	xiii
ABSTRACT	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat	3
1.6. Hipotesis.....	3
BAB 2 STUDI LITERATUR.....	5
2.1. <i>Biofouling</i>	5
2.2. Hambatan Kapal	7
2.2.1. Konsep Dasar Hambatan Kapal	7
2.2.2. Hambatan Gesek	10
2.2.3. Hambatan <i>Viscous Pressure</i>	11
2.2.4. Hambatan <i>Wave-making</i>	12
2.2.5. <i>Appendage Resistance</i>	13
2.3. Boundary Layer Theory	14
2.4. <i>Computational Fluid Dynamics</i>	16
2.4.1. Pengenalan CFD	16
2.4.2. <i>CFD Equations</i>	18
2.4.3. <i>Turbuncce Model</i>	20
2.4.4. Pemodelan <i>Boundary Layer</i> Pelat Datar	24
2.5. <i>Surface Roughness</i>	26
BAB 3 METODOLOGI.....	31
3.1. Bagan Alir	31
3.2. Pengumpulan Data.....	32
3.3. Pemodelan 3D Pelat Datar	33
3.4. Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i>	33
3.5. Pengolahan Data Hasil Pengujian.....	34
BAB 4 pemodelan dan simulasi	35
4.1. Simulasi pada Perangkat Lunak CFD	35
4.1.1. Geometri	35
4.1.2. <i>Meshing</i>	38
4.1.3. <i>Solver</i>	39
4.1.4. <i>Post-processor</i>	46

4.2. <i>Grid-Independence Study</i>	46
4.3. <i>Surface Roughness</i>	47
BAB 5 Hasil dan pembahasan.....	53
5.1. Pengolahan Data.....	53
5.2. Simulasi CFD untuk Eksperimen <i>Wind Tunnel</i>	53
5.3. Simulasi CFD untuk Validasi Penelitian Suastika et al (2020).....	57
5.4. Simulasi CFD untuk Prediksi Penelitian Suastika et al (2020).....	57
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	67
6.1. Kesimpulan.....	67
6.2. Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A Hasil Pengukuran <i>Drag</i> CFD	
LAMPIRAN B Hasil Perhitungan Koefisien Hambatan Gesek	
LAMPIRAN C Visualisasi Ketebalan <i>Boundary Layer</i> pada Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)	
dst.	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 a) <i>Biofilm</i> , b) dan c) <i>Macrofouling</i> pada lambung kapal.....	5
Gambar 2-2 Tahap Pembentukan <i>Biofouling</i>	6
Gambar 2-3 Konsep konversi energi pada kapal.....	8
Gambar 2-4 Komponen hambatan kapal.....	8
Gambar 2-5 Gaya Geser dan Tekanan pada Lambung Kapal	9
Gambar 2-6 <i>Kelvin Wave Pattern</i>	13
Gambar 2-7 <i>Boundary Layer</i> pada Pelat Datar	15
Gambar 2-8 Bagian-Bagian <i>Boundary Layer</i>	15
Gambar 2-9 Contoh <i>grid generation</i> (Sumber: Molland eet al, 2017)	17
Gambar 2-10 Model Turbulensi	20
Gambar 2-11 <i>Velocity profile</i> pada <i>turbulent boundary layer</i>	24
Gambar 2-12 Perbedaan Permukaan Amplas	26
Gambar 2-13 Perbandingan Kekasaran Amplas dan Kekasaran Teknis.....	26
Gambar 2-14 Contoh Kekasaran Teknis sesuai <i>Grit</i> Amplas	27
Gambar 2-15 Ilustrasi <i>Equivalent Sand-Grain Roughness</i> Pada ANSYS Fluent	27
Gambar 3-1 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	32
Gambar 4-1 <i>Domain Validation Study</i> oleh Demirel (2014)	35
Gambar 4-2 Kondisi Batas oleh Date dan Turnock (1999).....	36
Gambar 4-3 Kombinasi Kekasaran pada Pelat Datar oleh Suastika et al (2020)	37
Gambar 4-4 <i>Boundary Conditions</i>	38
Gambar 4-5 <i>Structured Mesh</i> untuk Pelat Datar pada ICEM.....	39
Gambar 4-6 <i>General Setting</i> pada ANSYS Fluent	40
Gambar 4-7 <i>Turbulence model</i>	40
Gambar 4-8 Pengaturan <i>Material Properties</i>	41
Gambar 4-9 Pengaturan <i>Inlet</i>	41
Gambar 4-10 Pengaturan <i>Outlet</i>	42
Gambar 4-11 Pengaturan untuk Model Pelat Datar.....	42
Gambar 4-12 Pendefinisian <i>Top Wall</i>	43
Gambar 4-13 <i>Solution methods</i>	43
Gambar 4-14 <i>Residual Monitors</i>	44
Gambar 4-15 <i>Report Plots Drag Force</i> untuk <i>Flat Plate</i>	44
Gambar 4-16 Pemilihan Metode <i>Solution Initialization</i>	45
Gambar 4-17 <i>Calculation Settings</i>	45
Gambar 4-18 <i>Grid Inependence Study</i>	47
Gambar 4-19 Perbedaan <i>grit</i> kekasaran amplas	48
Gambar 4-20 Variasi Kekasaran oleh Yuliansyah (2019)	49
Gambar 4-21 Variasi Kekasaran Ekstrem untuk Prediksi Penelitian Suastika et al (2020).....	51
Gambar 5-1 Perbandingan <i>Skin Friction Coefficient</i> untuk <i>Smooth Plate</i>	54
Gambar 5-2 Perbandingan <i>Regular Roughness</i> antara CFD dan Wind Tunnel	56
Gambar 5-3 Prediksi CF <i>Extreme Regular Roughness</i> L = 30 m.....	58
Gambar 5-4 Hubungan Antara CF dan <i>Extreme Regular Roughness</i> L = 30 m	59
Gambar 5-5 Prediksi C_F <i>Extreme Irregular Roughness</i> L = 30 m	60
Gambar 5-6 Perbandingan C_F <i>Extreme Regular</i> dan <i>Irregular Roughness</i> L = 30 m.....	61

Gambar 5-7 Prediksi C_F dengan Nilai Kekasaran Ekstrem Reguler untuk $L = 60$ m..... 62
Gambar 5-8 Hubungan Antara C_F dan Extreme Regular Roughness $L = 60$ m..... 62
Gambar 5-9 Prediksi C_F dengan Nilai *Extreme Irregular Roughness* untuk $L = 60$ m..... 64
Gambar 5-10 Prediksi C_F Akibat *Extreme Regular* dan *Irregular Roughness* untuk $L = 60$ m
..... 64
Gambar 5-11 Ketebalan *Boundary Layer* Prediksi Penelitian Suastika et al (2020) $L = 60$ m 65

DAFTAR TABEL

Tabel 2-1 Model Turbulensi Berdasarkan Persamaan <i>Transport</i>	21
Tabel 3-1 Ukuran Utama KM Mentari Pratama	32
Tabel 3-2 Ukuran Model Pelat Datar Eksperimen Yuliansyah (2019).....	33
Tabel 3-3 Ukuran Model Pelat Datar Penelitian Suastika et al (2020).....	33
Tabel 4-1 <i>Grid Independence Study</i>	46
Tabel 4-2 Skala Kekasaran <i>Biofouling</i> Menggunakan Amplas.....	48
Tabel 4-3 Kekasaran pada Penelitian Suastika et al (2020)	49
Tabel 4-4 Ukuran Model pada Penelitian Suastika et al (2020).....	49
Tabel 4-5 Padanan Nilai Kekasaran pada Percobaan Schultz (2007).....	50
Tabel 4-6 Kekasaran Prediksi Penelitian Suastika et al (2020).....	50
Tabel 5-1 Hasil <i>Drag</i> CFD.....	53
Tabel 5-2 Perbandingan <i>Skin Friction Coefficient</i> untuk <i>Smooth Plate</i>	54
Tabel 5-3 Hasil Eksperimen <i>Wind Tunnel</i> untuk Regular Roughness.....	55
Tabel 5-4 Hasil CFD untuk <i>Regular Roughness</i> Eksperimen <i>Wind Tunnel</i>	55
Tabel 5-5 Nilai K_{s+} untuk Eksperimen <i>Wind Tunnel</i> dan Simulasi CFD.....	56
Tabel 5-6 Validasi Penelitian <i>Regular Roughness</i> Suastika et al (2020) untuk $L = 30$ m.....	57
Tabel 5-7 Prediksi C_F <i>Extreme Regular Roughness</i> untuk $L = 30$ m.....	57
Tabel 5-8 Prediksi C_F <i>Extreme Regular Roughness</i> (%) untuk $L = 30$ m.....	58
Tabel 5-9 Prediksi C_F <i>Extreme Irregular Roughness</i> $L = 30$ m.....	59
Tabel 5-10 Prediksi C_F <i>Extreme Irregular Roughness</i> (%) $L = 30$ m	59
Tabel 5-11 Prediksi C_F <i>Extreme Regular Roughness</i> untuk $L = 60$ m	61
Tabel 5-12 Persentase Kenaikan C_F <i>Extreme Regular Roughness</i> untuk $L = 60$ m.....	61
Tabel 5-13 Prefiksi C_F <i>Ekstreme Irregular Roughness</i> untuk $L = 60$ m.....	63
Tabel 5-14 Persentase Kenaikan C_F <i>Extreme Irregular Roughness</i> untuk $L = 60$ m	63

DAFTAR SIMBOL

L	= Panjang kapal (m)
L_{wl}	= <i>Length of Water Line</i> (m)
L_{oA}	= <i>Length Overall</i> (m)
L_{BP}	= <i>Length Between Perpendiculars</i> (m)
B	= Lebar kapal (m)
H	= Tinggi kapal (m)
T	= Sarat kapal (m)
V_s	= Kecepatan dinas kapal ($m \cdot s^{-1}$)
S	= Luasan permukaan basah (m^2)
Δ	= <i>Displacement</i> (ton)
DWT	= <i>Deadweight tonnage</i> (ton)
LWT	= <i>Lightweight tonnage</i> (ton)
C_p	= Koefisien prismatic
C_B	= Koefisien blok
ρ	= Massa jenis fluida ($kg \cdot m^{-3}$)
g	= Percepatan gravitasi ($m \cdot s^{-2}$)
ν	= Viskositas kinematis fluida ($Ns \cdot m^2$)
μ	= Viskositas dinamis fluida ($m^2 \cdot s^{-1}$)
F_n	= <i>Froude number</i>
Re	= <i>Reynolds number</i>
D	= Hambatan drag (N)
A	= Luas permukaan model (m^2)
C_D	= Koefisien <i>drag friction</i>
C_F	= Koefisien kekasaran
ΔC_F	= Peningkatan koefisien kekasaran (%)
C_{VP}	= Koefisien hambatan <i>viscous</i>
C_W	= Koefisien hambatan gelombang
C_T	= Koefisien hambatan total
k_s	= <i>Roughness height</i> (μm)
C_s	= <i>Roughness constant</i>
τ	= Tegangan geser ($N \cdot mm^{-2}$)
P	= Tekanan (Pa)
y^+	= <i>Dimensionless wall distance</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Transportasi merupakan salah satu penyumbang gas buang terbanyak yang berdampak buruk terhadap lingkungan. Pada tahun 2012, IMO mempublikasikan hasil penelitian yang menyatakan bahwa emisi yang dikeluarkan akibat aktivitas pelayaran internasional mencapai 2.2% dari total gas buang CO₂ di dunia. Selaras dengan 17 *Sustainable Development Goals* yang dideklarasikan oleh PBB pada tahun 2015, International Maritime Organization (IMO) telah memperketat batasan emisi yang dikeluarkan oleh aktivitas pelayaran pada April 2018. Kebijakan ini mendorong upaya untuk meminimalisasi penggunaan bahan bakar kapal. Selain dampak lingkungan, penggunaan bahan bakar kapal yang berlebih juga merugikan pelaku bisnis kapal dalam segi ekonomi. Semakin tinggi penggunaan bahan bakar kapal, maka semakin tinggi biaya yang dikeluarkan. Kerugian tersebut dapat dihindari dengan cara memodifikasi desain kapal hingga menggunakan bahan bakar alternatif. Salah satu komponen penting dalam memperkirakan penggunaan bahan bakar kapal ialah hambatan. Kapal dengan nilai hambatan yang tinggi membutuhkan penggunaan bahan bakar yang lebih banyak.

Hambatan kapal sendiri terdiri dari beberapa komponen, salah satunya berupa hambatan gesek. Hambatan tersebut ditimbulkan oleh gesekan yang terjadi antara lambung kapal dengan fluida yang dilaluinya. Sebuah penelitian menyimpulkan bahwasanya hambatan gesek (R_F) merupakan komponen yang besarnya mencapai 80-85% dari total hambatan (R_T) pada kapal berkecepatan rendah dan 50% dari total hambatan pada kapal berkecepatan tinggi (van Manen dan van Oossanen, 1988).

Peningkatan hambatan kapal dapat disebabkan oleh berbagai faktor, salah satunya ialah pertumbuhan binatang laut (*marine fouling/biofouling*) pada lambung kapal. Akibat pertumbuhan *biofouling*, permukaan lambung kapal menjadi lebih kasar sehingga meningkatkan hambatan gesek sebesar 2% - 4% per bulan (Aertssen, 1966). Apabila $C_F \approx 60\%C_T$, nilai C_T dapat meningkat sebesar 1%-2% dalam hitungan bulan. Sehingga, C_T dapat meningkat sebesar 10%-30% per tahun (Molland et al, 2017).

Dalam simulasi numerik, memodelkan *fouling* adalah hal yang hampir tidak mungkin. Hal ini karena bentuk, ukuran dan persebaran *fouling* bervariasi di lapangan. Keterbatasan tersebut mendorong berbagai peneliti untuk memodelkan *fouling* menggunakan metode lain. ITTC merekomendasikan para peneliti untuk mengembangkan rumus atau metode, berdasarkan data eksperimen, untuk memprediksi efek *coating* dan *biofouling* terhadap hambatan kapal (Demirel dkk 2017).

Salah satu peneliti, yaitu Michael Schlutz, telah melakukan penelitian terhadap peningkatan *drag* akibat *biofouling* dengan mempelajari efek *biofilm*, *filamentous algae*, dan *calcerous macrofouling*. Hasil yang didapatkan adalah peningkatan *drag* akibat *biofouling* terjadi secara signifikan, meskipun peningkatan tersebut tergantung pada tipe *biofouling* dan persebarannya (Schlutz, 2007). Selain itu, Demirel dkk (2017) telah melakukan validasi terhadap eksperimen *towing tank* yang dilakukan oleh Schultz dengan metode simulasi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Eksperimen pelat datar yang serupa juga telah dilakukan oleh Yuliansyah (2019) dengan menggunakan terowongan angin/*wind tunnel*.

Penelitian ini menganalisis efek kekasaran *biofouling* yang bervariasi terhadap peningkatan nilai hambatan gesek yang diamati dalam bentuk koefisien hambatan gesek (C_F) dengan menggunakan metode CFD. Masing-masing variasi kekasaran memiliki pengaruh yang berbeda terhadap peningkatan hambatan gesek. Perbedaan tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran terhadap pengaruh kekasaran *biofouling* pada kondisi lapangan.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang akan dikaji dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Berapakah nilai koefisien hambatan gesek C_F pada pelat datar?
2. Bagaimanakah peningkatan nilai C_F akibat pertumbuhan *biofouling* pada pelat datar?
3. Bagaimanakah perbedaan nilai C_F untuk tiga kondisi kekasaran yang berbeda?

1.3. Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah di atas, tujuan penelitian Tugas Akhir ini antara lain:

1. Mengetahui nilai-nilai koefisien hambatan gesek C_F pada pelat datar;
2. Memperoleh peningkatan nilai C_F akibat pertumbuhan *biofouling* pada pelat datar;
3. Mengetahui perbedaan nilai C_F untuk tiga kondisi kekasaran yang berbeda.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah untuk mempermudah proses penelitian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Model pelat datar berdasarkan model eksperimen *wind tunnel* yang digunakan oleh Yuliansyah (2019) dan penelitian Suastika et al (2020);
2. Pengujian validasi dan prediksi penelitian Suastika et al (2020) dilakukan pada 2 variasi panjang pelat datar, yaitu pada $L = 30$ m dan $L = 60$ m dan 2 variasi kecepatan yaitu 9,78 m/s dan 12 m/s;
3. Kekasaran *fouling* dimodelkan menggunakan *roughness length scale* yaitu *roughness height* dan *roughness constant*;
4. Pengujian dilakukan dalam 3 kondisi yang berbeda: *smooth*, *regular surface roughness*, dan *irregular surface roughness*;
5. Metode pengujian menggunakan *Computational Fluid Dynamics*;
6. Pengujian validasi *wind tunnel* dilakukan pada 5 variasi *Reynolds Number*, yaitu pada 1.10×10^5 , 2.20×10^5 , 3.40×10^5 , 4.30×10^5 dan 5.40×10^5 .

1.5. Manfaat

Manfaat dari Tugas Akhir ini terhadap permasalahan yang ada di bidang ilmu, pengetahuan dan teknologi, meliputi:

1. Mengetahui nilai-nilai koefisien hambatan gesek C_F pada pelat datar;
2. Memperoleh peningkatan nilai C_F akibat pertumbuhan *biofouling* pada pelat datar;
3. Mengetahui perbedaan nilai C_F untuk tiga kondisi kekasaran yang berbeda;
4. Hasil pengujian dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.6. Hipotesis

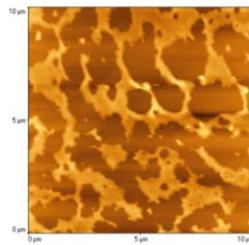
Peningkatan *friction resistance* yang diakibatkan oleh *biofouling* bergantung pada tingkat kekasarannya. *Regular* dan *irregular roughness* memiliki pengaruh yang berbeda terhadap peningkatan hambatan gesek. Nilai C_F yang diperoleh dapat menghasilkan nilai hambatan gesek yang sesuai dengan eksperimen pelat datar menggunakan *wind tunnel* oleh Yuliansyah (2019) dan penelitian Suastika et al (2020).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2 STUDI LITERATUR

2.1. *Biofouling*

Pengertian *biofouling* dari segi industri maritim adalah kumpulan mikroorganisme yang menempel, bertumbuh dan berkembang biak pada permukaan, salah satu di antaranya adalah lambung kapal. Pada umumnya, organisme laut yang menempel pada permukaan terbagi menjadi dua kategori yaitu *microfouling* dan *macrofouling*. Kategori pertama yaitu *microfouling* / *biofilm*, terdiri dari bakteri dan diatom yang langsung menempel pada permukaan yang tercelup air (Shan & JiDao, 2010). *Microfouling* memiliki sifat heterogen dalam segi pertumbuhan dan lama penempelan pada permukaan. Lapisan utama dari *biofilm* tidak menutupi semua bagian permukaan, melainkan hanya menutupi beberapa bagian dari permukaan saja (Gambar 2-1 a). Ketebalan *biofilm* juga bergantung pada komposisi media yang ditempelinya dan lama waktu penempelan. Kategori kedua yaitu *macrofouling*, terdiri dari barnakel/teritip, kerang, *polychaete worms*, *bryozoans* dan rumput laut. *Macrofouling* pada umumnya dikelompokkan menjadi *soft fouling* dan *hard fouling*. *Soft fouling* memiliki ciri fisik yang bersifat lunak, sedangkan *hard fouling* (Gambar 2-1 b, c) memiliki cangkang pada bagian luar untuk melindungi bagian dalamnya (Lehaitre, Delauney, Compeere, & Chantal, 2008).



a)

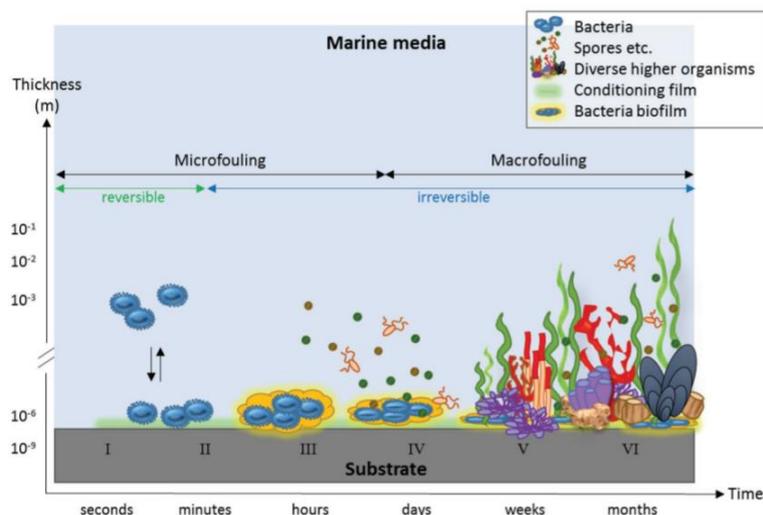


b)

c)

Gambar 2-1 a) *Biofilm*, b) dan c) *Macrofouling* pada lambung kapal
(Sumber: Lehaitre et al, 2008)

Pertumbuhan *biofouling* terbagi menjadi beberapa tahap. Tahap pertama adalah pengisapan partikel organik atau non-organik seperti protein segera setelah permukaan tercelup air laut dalam hitungan detik dan membentuk lapisan utama (*conditioning film*). Kemudian, bakteri mulai menempel pada permukaan. Pada tahap ini, bakteri dapat dihilangkan (*reversible adsorption*) dengan pembilasan sederhana karena interaksi antara bakteri dan lapisan pendukungnya (*condition film*) sangat lemah (Shan, 2020). Tahap *reversible adsorption* terjadi beberapa menit segera setelah permukaan tercelup air laut. Tahap ketiga adalah tahap produksi *extra-cellular polymer* dan perekat *extra-cellular* (Herget et al, 2018) yang kemudian membentuk ikatan antara *biofilm* dan lapisan pendukung untuk menghasilkan *film microbial* pada permukaan yang ditempelinya (Lehaître et al, 2008). Akibat adanya ikatan tersebut, tahap ketiga adalah tahap awal dari *irreversible adhesion* (Shan, 2020). Tahap keempat adalah pembentukan lendir melalui penggabungan spora, kuman, hingga jentik-jentik (*larvae*) kerang dan alga. Tahap terakhir yaitu tahap kelima dan keenam adalah penempelan *soft biofouling* seperti *macroalgae*, bunga karang (spons), tunik dan anemone dan penempelan *hard biofouling* seperti teritip, *tubeworms*, *bryozoans*, dan kerang. Tahap kelima dan keenam terjadi setelah benda tercelup selama berminggu-minggu hingga berbulan-bulan dalam air laut. Tahap pembentukan *biofouling* diilustrasikan oleh **Gambar 2-2**.



Gambar 2-2 Tahap Pembentukan *Biofouling*
(Sumber: Herget et al, 2018)

Dalam pertumbuhannya, *biofouling* dipengaruhi oleh faktor-faktor fisik, kimia dan biologi. Termasuk di antaranya adalah lokasi geografik, temperatur dan musim, kualitas air laut, cahaya, ketersediaan nutrisi, dsb. Pertumbuhan *fouling* lebih intens terjadi pada perairan tropis, akibat temperatur air laut yang lebih hangat di daerah tersebut. Sebaliknya, temperatur yang

lebih dingin dapat menyebabkan kematian pada beberapa jenis *biofouling*. Pada daerah perairan dingin, pertumbuhan *fouling* terjadi pada bulan April sampai September, sedangkan pada daerah tropis, laju pertumbuhan *fouling* bernilai tinggi di sepanjang tahun.

Kerugian yang disebabkan oleh *biofouling* adalah bertambahnya kekasaran lambung kapal akibat korosi dan penempelan *biofouling* pada lambung kapal itu sendiri. *Biofouling* memiliki bentuk dan ukuran yang tidak beraturan (*arbitrary*) sehingga membuat permukaan lambung kapal menjadi lebih kasar. Kekasaran yang ditimbulkan tersebut berdampak pada meningkatnya hambatan gesek dan konsumsi bahan bakar kapal (Kempf, 1937). Hambatan kapal adalah gaya yang bergerak berlawanan dengan arah kapal ketika kapal bergerak melalui suatu fluida. Kapal harus memiliki gaya yang cukup sehingga dapat melawan hambatan tersebut untuk tetap bergerak. Hambatan ini terdiri dari beberapa komponen, di mana salah satunya adalah hambatan gesek (R_F). Sebuah penelitian menyimpulkan bahwa hambatan gesek mencapai 80% – 85% hambatan total (R_T) (van Manen & van Oossanen, 1998). Komponen inilah yang secara langsung dipengaruhi oleh kekasaran permukaan lambung kapal.

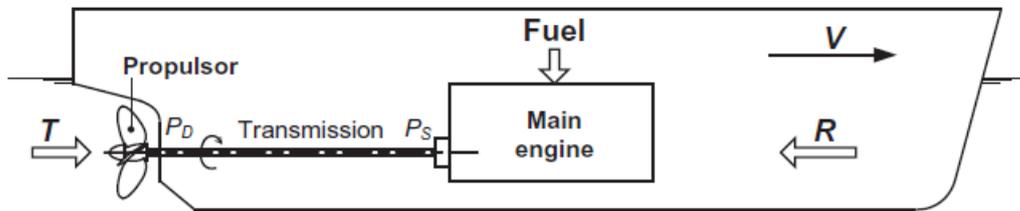
Semakin besar hambatan kapal, maka semakin besar gaya yang dikeluarkan kapal untuk tetap bergerak. Semakin besar gaya yang dibutuhkan, maka semakin besar keperluan bahan bakar yang harus dikonsumsi kapal. Peningkatan konsumsi bahan bakar dapat mencapai 40% apabila tidak dilakukan perlindungan lambung kapal terhadap pertumbuhan *marine fouling* (Milne, 1990). Sedangkan, hal ini bertentangan dengan kebijakan yang dikeluarkan oleh International Maritime Organization (IMO) pada 2018, yang membatasi zat pengeluaran/emisi bahan bakar. Terdapat berbagai upaya dalam mencegah penempelan *biofouling* pada lambung kapal, salah satu di antaranya adalah penggunaan cat *antifouling*. Pada kenyataannya, cat *antifouling* juga meningkatkan kekasaran pada lambung kapal, meski tidak sebesar *biofouling*. Oleh karena itu, berbagai penelitian telah dilakukan untuk memprediksi efek kekasaran pada lambung kapal yang disebabkan oleh cat *antifouling* dan *biofouling* terhadap peningkatan hambatan gesek kapal, seperti yang telah dilakukan oleh Demirel (2014, 2017).

2.2. Hambatan Kapal

2.2.1. Konsep Dasar Hambatan Kapal

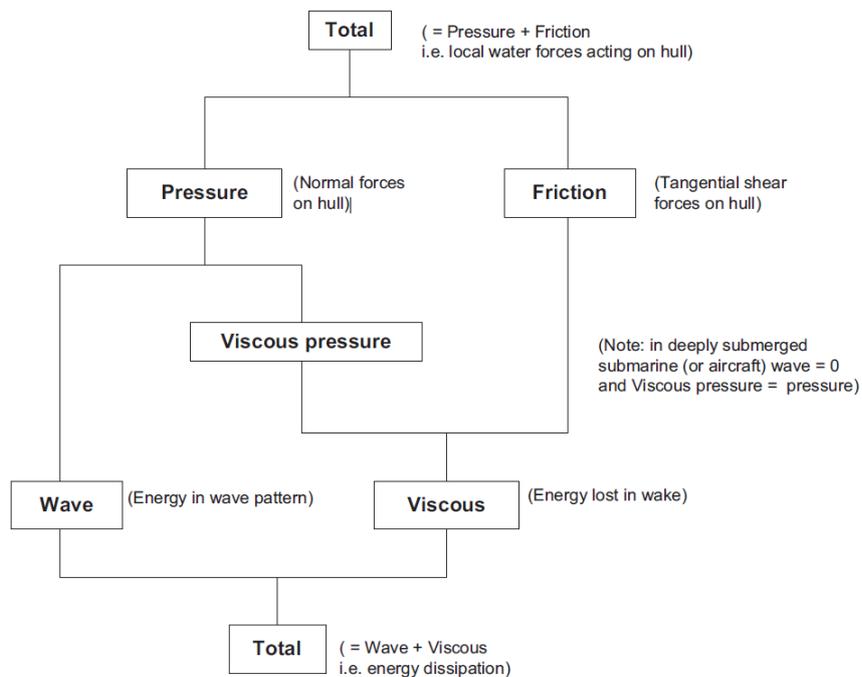
Kapal yang bergerak melalui suatu fluida menerima gaya resistensi atau tahanan yang bergerak melawan arah gerak kapal tersebut. Pada tahap awal desain kapal, salah satu komponen yang ditentukan adalah *service speed* (V_s). Agar kapal dapat bergerak dengan kecepatan yang diinginkan (V_s), dibutuhkan gaya dorong (T) yang memadai untuk mendorong

kapal sehingga dapat bergerak melawan resistensi dari fluida yang dilaluinya (R). Gaya dorong (T) merupakan hasil perputaran *propeller* yang diputar oleh poros menggunakan energi dari mesin kapal. Sehingga, nilai resistensi kapal adalah hal penting yang harus diperhitungkan.



Gambar 2-3 Konsep konversi energi pada kapal
(Sumber: Molland et al, 2017)

Komponen hambatan kapal secara lebih lengkap dapat dilihat pada **Gambar 2-4**.



Gambar 2-4 Komponen hambatan kapal
(Sumber: Molland et al, 2017)

Dari **Gambar 2-4**, dapat dilihat bahwa gaya resistensi terdiri dari komponen hambatan gesek (*friction resistance*, R_F) dan hambatan akibat tekanan (*pressure resistance*). Hambatan tekanan pada umumnya digolongkan ke dalam hambatan sisa (*residual resistance*, R_R). Hambatan gesek adalah gaya yang bekerja secara tangensial terhadap lambung kapal, gaya ini merupakan akumulasi gaya geser (*shear stress*, τ) yang disebabkan oleh viskositas fluida. Sementara itu, hambatan tekanan adalah gaya yang bekerja normal atau tegak lurus terhadap lambung kapal. Hambatan tekanan terjadi karena sebagian efek viskositas fluida (*viscous*

pressure resistance) dan sebagian lagi karena hambatan gelombang (*wavemaking resistance*). Pada kondisi tertentu, hambatan tekanan hanya diakibatkan oleh efek viskositas fluida saja. Hal ini dapat terjadi apabila komponen hambatan tekanan akibat gelombang sama dengan nol (lihat **Gambar 2-4**) atau sebagai contoh, ketika benda tercelup sepenuhnya dalam air (*full viscous*), mengingat gelombang terjadi akibat adanya *free surface* atau interaksi dua fluida dengan massa jenis yang berbeda. Ilustrasi perbedaan hambatan gesek dan hambatan akibat tekanan dapat dilihat pada **Gambar 2-5**.



Gambar 2-5 Gaya Gesek dan Tekanan pada Lambung Kapal
(Sumber: Molland et al, 2017)

Sehingga, hambatan total dapat ditulis ke dalam persamaan sebagai berikut:

$$R_T = R_F + R_R + R_A \dots\dots\dots(2.1)$$

$$R_T = R_F + R_{VP} + R_W + R_A \dots\dots\dots(2.2)$$

di mana,

- R_T = Hambatan total
- R_F = Hambatan gesek
- R_W = Hambatan gelombang
- R_A = Hambatan *appendages*

Hambatan kapal pada umumnya dapat disajikan dalam bentuk non-dimensional melalui persamaan (2.3):

$$C_T = R_T / (\frac{1}{2} \rho S V^2) \dots\dots\dots(2.3)$$

di mana,

- R_T = Hambatan total
- C_T = Koefisien hambatan total
- ρ = Massa jenis fluida
- S = Luas permukaan basah
- V = Kecepatan

Kemudian secara keseluruhan, persamaan (2.2) juga dapat ditulis dalam bentuk non-dimensional, dengan menerapkan persamaan (2.3) untuk komponen hambatan lainnya. Sehingga, persamaan (2.2) dapat menjadi:

$$C_T = C_F + C_{VP} + C_W + C_A \dots \dots \dots (2.4)$$

di mana,

- C_T = Koefisien hambatan total
- C_F = Koefisien hambatan gesek
- C_{VP} = Koefisien *viscous pressure*
- C_W = Koefisien hambatan gelombang
- C_A = Koefisien hambatan *appendages*

2.2.2. Hambatan Gesek

Gaya gesek berupa penjumlahan komponen yang bergerak secara tangensial terhadap lambung kapal sehingga menimbulkan hambatan gesek ketika kapal bergerak. Gaya gesek tersebut timbul akibat kontak air dengan permukaan atau kulit kapal. Komponen ini dipengaruhi oleh variasi kecepatan pada saat kapal berlayar, viskositas dan massa jenis air yang dilalui, serta panjang dan kekasaran luas bagian lambung kapal yang tercelup oleh air (Lackenby, 1962).

William Froude ketika melakukan percobaan *towing tank* mengambil asumsi bahwa gesekan pada permukaan kulit model dan kapal memiliki besar yang sama dengan gesekan pada permukaan pelat datar dengan panjang dan luasan basah yang sama dengan masing-masing model dan kapal. Prosedur yang digunakan Froude adalah mengukur hambatan pada model berskala kecil untuk kemudian diuji menggunakan *towing tank* Torquay di Inggris. Hambatan yang diperoleh dikurangi oleh nilai hambatan gesek hasil dari eksperimen pelat datar untuk mendapatkan nilai hambatan residu. Hambatan residu terdiri dari *wave-making resistance* yang diduga sama besar untuk model dan kapal pada kecepatan yang sama (Lackenby, 1962). Apabila hambatan gelombang dan hambatan *appendages* diabaikan, maka persamaan (2.4) menjadi:

$$C_D = C_{VP} + C_F \dots \dots \dots (2.5)$$

Hughes (1952) mengajukan metode ekstrapolasi antara model dan kapal dengan membagi hambatan total menjadi hambatan *viscous pressure* dan hambatan gelombang. Sehingga, persamaan (2.5) menjadi:

$$C_D = (1 + k)C_F \dots \dots \dots (2.6)$$

di mana,

- C_D = Koefisien *drag*
- $(1 + k)$ = *Form factor*
- C_F = Koefisien hambatan gesek

di mana:

C_D = Koefisien *drag*

C_{VP} = Koefisien hambatan viskositas

C_F = Koefisien gesek

Nilai koefisien hambatan gesek C_F dapat dihitung dengan rumus *frictional resistance coefficient* ITTC-57:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

Re (*Reynolds Number*) dapat ditentukan menggunakan rumus:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \dots\dots\dots(2.8)$$

di mana:

Re = *Reynolds Number*

V = Kecepatan kapal ($m.s^{-1}$)

ν = Viskositas kinematis fluida

L = Panjang karakteristik/lintasan

Reynolds Number merupakan suatu besaran tanpa satuan yang melambangkan rasio antara gaya inersia dengan viskositas fluida untuk menentukan jenis aliran fluida berupa laminar atau turbulen. Sistem yang beroperasi pada *Reynolds Number* yang sama akan memiliki karakteristik aliran yang sama meskipun panjang fluida, kecepatan dan karakteristik lintasan bervariasi. Nilai hambatan gesek dapat diprediksi menggunakan nilai *skin friction coefficient* yang didapatkan dari rumus ITTC pada persamaan (2.7), sehingga:

$$R_F = C_F \left(\frac{1}{2} \rho S V^2\right) \dots\dots\dots(2.9)$$

di mana,

R_F = Hambatan gesek (N)

C_F = Koefisien hambatan gesek

ρ = Massa Jenis Fluida ($m^3.kg^{-1}$)

S = Luas permukaan basah (m^2)

V = Kecepatan ($m.s^{-1}$)

2.2.3. Hambatan *Viscous Pressure*

Tekanan normal yang terjadi pada kapal menimbulkan hambatan *viscous pressure*. Tekanan ini biasanya merupakan wujud kekentalan fluida yang dilalui oleh kapal. Besar kecilnya hambatan *viscous pressure* bergantung pada nilai kekentalan fluida. Apabila fluida

memiliki nilai viskositas yang tinggi, maka hambatan *viscous pressure* yang diterima kapal semakin tinggi, begitu juga sebaliknya (Lackenby, 1962).

Hambatan ini direpresentasikan dengan *form factor* $(1 + k)$, karena besar tekanan dipengaruhi oleh bentuk kapal. *Form factor* dapat ditemukan pada persamaan (2.6). Nilai *form factor* dapat diperoleh menggunakan beberapa rumus empiris berdasarkan hasil pengujian model sebagai berikut (Molland et al, 2017):

Watanabe:

$$k = -0.095 + 25.6 \frac{C_B}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \sqrt{\frac{B}{T}}} \dots\dots\dots (2.10)$$

Conn and Ferguson:

$$k = 18.7 \left(C_B \frac{B}{L}\right)^2 \dots\dots\dots (2.11)$$

Grigson, berdasarkan ITTC line setelah dimodifikasi:

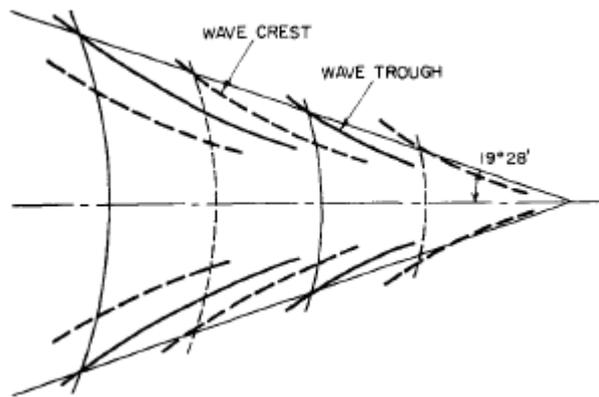
$$k = 0.028 + 3.30 \left(\frac{S}{L^2} \sqrt{C_B \frac{B}{L}}\right) \dots\dots\dots (2.12)$$

di mana,

- S = Luas permukaan basah
- L = Panjang kapal
- C_B = *Block coefficient*
- B = Lebar kapal

2.2.4. Hambatan *Wave-making*

Hambatan gelombang adalah jumlah gaya pada kapal yang disebabkan oleh tekanan normal fluida di sepanjang kapal. Pada benda yang tercelup jauh di dalam air dan bergerak secara horisontal dengan kecepatan konstan di bawah permukaan, tidak ada gelombang yang terbentuk, tetapi tekanan normal akan bervariasi di sepanjang kapal. Jika benda bergerak di dekat permukaan, variasi tekanan menyebabkan gelombang yang mengubah distribusi tekanan di sepanjang lambung, resultan dari gaya ini dinamakan *wave-making resistance* (SNAME, 1988). Energi yang dikeluarkan untuk menggerakkan benda melalui tekanan tersebut sama dengan energi yang diperlukan untuk menjaga *wave system*. *Ship waves system* pertama kali ditinjau oleh Lord Kelvin (1887, 1904) dengan memperhatikan satu titik tekanan yang bergerak dalam garis lurus di sepanjang permukaan air, yang menyebabkan gelombang yang membentuk pola tertentu. Pola tersebut membentuk gelombang transversal dan gelombang divergen yang memancar dari titik tekanan dan membentuk sudut $19^\circ 28'$ dari ujung pusat gerakan.



Gambar 2-6 Kelvin Wave Pattern

Bentuk gelombang yang terbentuk oleh kapal sangat dipengaruhi oleh kecepatannya. Oleh karena itu, hambatan ini dipengaruhi oleh kecepatan kapal. Hambatan gelombang dapat dihitung menggunakan rumus (Lewis, 1998):

$$\frac{R_W}{W} = C_1 C_2 C_3 e^{m_1 Fr^d} + m_2 \cos(\lambda Fr^{-2}) \dots \dots \dots (2.13)$$

di mana,

R_W = Wave-making resistance (N)

W = Displacement weight (N)

$C_1, C_2, C_3, \lambda, m$ = Koefisien yang bergantung pada bentuk lambung kapal

Fr = Froude number

2.2.5. Appendage Resistance

Pada umumnya, hambatan tambahan pada kapal disebabkan oleh *rudder, stabilizer, bossings, bilge keels, bulbous bow* dan hal-hal lain yang menyebabkan hambatan kapal. Hambatan tambahan sebagian besar disebabkan oleh hambatan gesek atau *skin friction* berdasarkan luasan tambahan yang tercelup air, apabila bentuk tambahan tersebut didesain dengan baik. Hambatan tambahan dapat disebabkan oleh *flow separation* akibat desain yang kurang baik. *Flow separation* terjadi karena adanya *momentum loss* yang berlebih di dekat dinding permukaan, lebih tepatnya pada *boundary layer*, yang bergerak *downstream* melawan kenaikan tekanan (White, 2011). Aliran *streamline* pada permukaan benda mencapai titik di mana nilai *shear stress*-nya sama dengan nol, dan *streamline* tersebut menjauh dari permukaan.

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \dots \dots \dots (2.14)$$

Persamaan (2.14) disebut juga sebagai *adverse pressure gradient*.

Bentuk tambahan yang dekat dengan permukaan air atau terletak di sekitar sarat kapal, dapat menyebabkan hambatan gelombang. Hambatan ini adalah akumulasi luas ($S_{T=Total}$) permukaan basah kapal (S) dan luas bentuk-bentuk lain yang ada (S_{APP}), sehingga dapat diekspresikan ke dalam persamaan sebagai berikut (Lewis, 1998):

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{FO} S_T (1 + k) \dots\dots\dots (2.15)$$

dan

$$(1 + k) = 1 + k_1 + [1 + k_2 - (1 + k_1)] \frac{S_{app}}{S_{tot}} \dots\dots\dots (2.16)$$

di mana,

- R_{APP} = Hambatan *appendage* (N)
- C_{FO} = Koefisien hambatan gesek
- ρ = Massa Jenis Fluida ($m^3 \cdot kg^{-1}$)
- S_T = Luas permukaan basah (m^2)
- V = Kecepatan ($m \cdot s^{-1}$)
- $1 + k$ = *Effective form factor*
- k_1 = *Bare hull*
- k_2 = *Effective form factor of appendages*

2.3. Boundary Layer Theory

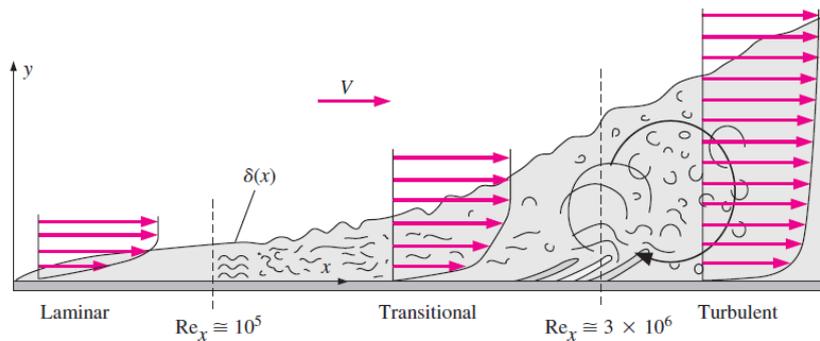
Lapisan batas atau yang biasa disebut *boundary layer* adalah daerah aliran yang sangat tipis di dekat dinding benda di mana gaya viskositas dan rotasi tidak bisa diabaikan. *Boundary layer* pertama kali dikemukakan dan diformulasikan oleh Ludwig Prandtl pada 1904. Salah satu pencapaian terbesar setelah ditemukannya *boundary layer theory* adalah kemampuan untuk memprediksi *flow separation* yang terjadi pada *adverse (positive) pressure gradients*. Di dekat dinding benda, tidak ada gerakan relatif antara fluida dan dinding tersebut, kondisi ini dinamakan *no-slip condition*.

Pelat datar banyak digunakan sebagai contoh pengamatan *boundary layer*. Tebal *boundary layer* (δ) tergantung pada jarak x sepanjang pelat datar. Secara kaidah, δ didefinisikan sebagai jarak dari dinding benda ketika komponen kecepatan yang bergerak paralel terhadap dinding benda mencapai 99% dari *freestream velocity*, yaitu kecepatan fluida di luar *boundary layer*. Untuk pelat datar, semakin tinggi *freestream velocity* V , maka semakin tebal δ *boundary layer* menjadi semakin tipis (Cengel, 2006). Sebaliknya, semakin rendah *freestream velocity*, maka nilai δ menjadi semakin tebal. *Boundary layer thickness* untuk pelat datar dapat dihitung menggunakan persamaan (2.17) (White, 2011).

$$\delta = \frac{0,16x}{Re^{1/7}} \dots\dots\dots(2.17)$$

Ketebalan *boundary layer* dipengaruhi oleh kecepatan benda, karena merupakan fungsi dari *Reynolds Number*. Karena ketebalan *boundary layer* berbanding terbalik dengan *Reynolds Number*, maka pada kecepatan rendah, ketebalan *boundary layer* semakin besar. Sebaliknya, pada kecepatan tinggi, ketebalan *boundary layer* semakin kecil.

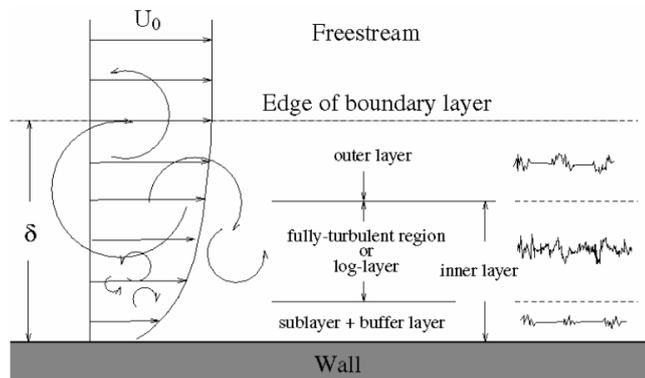
Pada pelat datar, *boundary layer* dibagi menjadi dua tipe berdasarkan *Reynolds Number* yaitu *laminar boundary layer* dan *turbulent boundary layer*. Di antara *laminar* dan *turbulent boundary layer* terdapat daerah transisi. Pada umumnya, daerah transisi ini terjadi pada $Re = 5 \times 10^5$. Berikut ilustrasi *boundary layer* pada pelat datar:



Gambar 2-7 *Boundary Layer* pada Pelat Datar
(Sumber: Cengel, 2006)

Boundary layer yang berada di dekat dinding benda terbagi menjadi tiga bagian:

1. *Inner layer (sublayer)*, di mana efek viskositas fluida mendominasi aliran;
2. *Overlap layer (log-layer)*, di mana profil kecepatan memiliki variasi secara logaritmik;
3. *Outer layer (defect layer)*, di mana efek turbulen *eddy* skala besar mendominasi aliran.



Gambar 2-8 Bagian-Bagian *Boundary Layer*
(Sumber: Baker, A., 2002)

2.4. Computational Fluid Dynamics

2.4.1. Pengenalan CFD

Computational Fluid Dynamics atau CFD adalah analisis sistem yang mencakup aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia menggunakan *computer-based simulation*. CFD banyak digunakan untuk memecahkan masalah laju kapal dalam sektor kelautan selama dua dekade terakhir. Di beberapa galangan, CFD telah menjadi bagian terintegrasi dari tahap *design spiral*. Aliran kompleks akibat laju kapal dapat diprediksi dengan tingkat akurasi yang bervariasi dan tingkat kepercayaan yang terkait. Prediksi tersebut mencakup distribusi tekanan pada lambung kapal, efek *free surface* dan *viscous drag*. Sejauh ini, CFD paling banyak digunakan untuk memprediksi *steady viscous drag* yang dialami oleh bentuk lambung kapal.

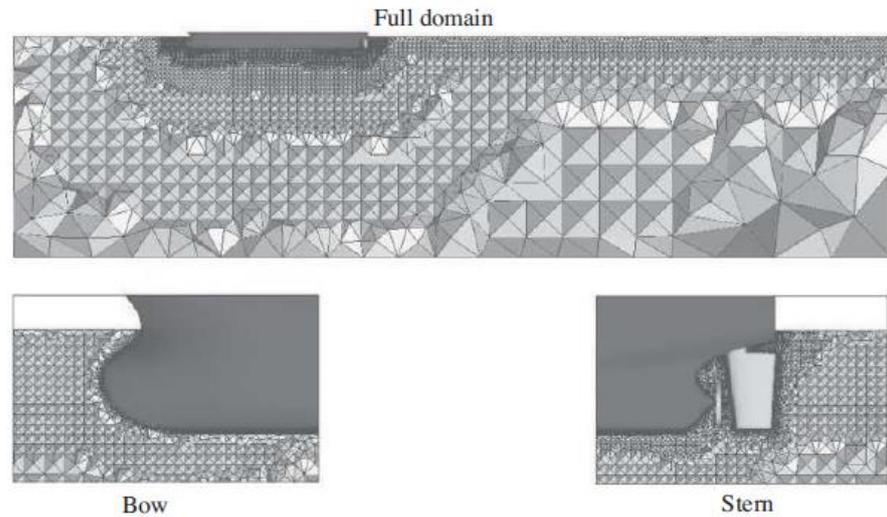
Secara tradisional, arsitek perkapalan bergantung pada pengujian model untuk memprediksi hambatan kapal desain baru. Hal ini tidak menghapus percobaan model secara sepenuhnya, tetapi CFD dapat membantu mengurangi jumlah model yang diuji coba. Sehingga, dapat menghemat anggaran dan waktu. CFD mengalami perkembangan secara komersil sehingga pada saat ini, perangkat lunak tersebut berada dalam jangkauan para arsitek perkapalan. Akan tetapi, mencapai tingkat keakuratan yang tinggi adalah tantangan bagi arsitek perkapalan yang baru mengenal bidang CFD.

CFD terdiri dari tiga elemen utama yaitu *pre-processor*, *solver* dan *postprocessor*. Pengguna dapat mengatur *input* berupa parameter masalah yang diinginkan untuk menganalisa hasilnya. Elemen tersebut disusun dalam algoritma numerik yang dapat membantu menyelesaikan persoalan aliran fluida.

1. Pre-processor

Adalah tahap *input* dalam penyelesaian masalah aliran fluida menggunakan CFD. Pada tahap ini, pengguna mendefinisikan geometri dan daerah yang akan dianalisa, daerah ini disebut sebagai *computational domain/boundary condition*. Tahap selanjutnya adalah *grid generation*, yaitu pembagian domain komputasi tersebut menjadi sub-domain atau domain-domain yang lebih kecil yang disusun sedemikian rupa sehingga tidak terjadi tumpang tindih antara sub-domain yang satu dan sub-domain lainnya. Sub-domain tersebut disebut juga sebagai *grid* atau *mesh* yang menyusun sebuah *control volume* secara keseluruhan. Fenomena fisik dan kimia juga perlu dimodelkan beserta definisi sifat aliran yang digunakan. Selain itu, spesifikasi kondisi batas (*boundary condition*) yang tepat pada

control volume yang mengalami interaksi dengan *boundary condition* dilakukan pada tahap ini.



Gambar 2-9 Contoh *grid generation*
(Sumber: Molland et al, 2017)

2. Solver

Terdapat tiga cabang penyelesaian numerik: *finite difference*, *finite element* dan *spectral method*. Pada kali ini, hanya dibahas mengenai *finite volume method*. Secara garis besar, algoritma numerik untuk tahap ini terbagi ke dalam tiga tahap. Tahap pertama adalah integrasi *governing equations* aliran fluida di sekitar *control volume* pada *domain*. Tahap kedua adalah diskretisasi, yaitu konversi hasil persamaan integral menjadi persamaan aljabar. Tahap terakhir adalah penyelesaian persamaan aljabar menggunakan metode iterasi.

3. Post-processor

Tahap *post-processor* menyediakan tampilan hasil yang luar biasa, sehingga paket CFD dilengkapi dengan alat visualisasi data yang serba guna, meliputi:

- *Domain geometry and grid display*
- *Vector plots*
- *Line and shaded contour plots*
- *2D and 3D surface plots*
- *Particle tracking*
- *View manipulation (translation, rotation, scaling, etc)*
- *Color PostScript output*

Post-processor juga dilengkapi dengan animasi untuk tampilan hasil dinamis. Di samping itu, semua kode menghasilkan *output* alfanumerik yang dapat dipercaya

dan memiliki fasilitas ekspor data untuk tahap manipulasi lebih lanjut di luar kode CFD.

2.4.2. CFD Equations

Prinsip dasar persamaan CFD adalah konservasi masa, momentum dan energi. Hasil simulasi CFD dikatakan baik dan dapat dipercaya apabila dapat memenuhi parameter konservasi hukum fluida tersebut. Kondisi ini disebut dengan konvergensi. *Governing equations* yang digunakan merupakan cabang dari prinsip dasar Hukum Newton dan *Reynolds' Transport Theorem* yang diekspresikan dalam bentuk umum persamaan integral. Akan tetapi, bentuk umum tersebut tidak sesuai untuk analisis yang tepat hingga mencapai skala elemen fluida. Oleh karena itu, dilakukan pendekatan Eularian yang dikembangkan menjadi bentuk persamaan diferensial yang mencakup tensor dan notasi untuk deskripsi spasial dan bidang aliran (Wah-Yen, 2017). Penjelasan terkait persamaan dasar (*governing equations*) CFD secara keseluruhan adalah di luar cakupan penelitian ini. Oleh karena itu, hanya dibahas persamaan yang bersangkutan dengan penelitian kali ini.

- *Continuity Equation*

Fisika dasar dari persamaan kontinuitas adalah prinsip konservasi massa yang pertama kali dikemukakan oleh Lavoisier pada 1785. Konservasi massa adalah konservasi hukum di mana laju perubahan massa di dalam *control volume (CV)* adalah sama dengan *mass flow rate* yang mengalir ke dalam CV. Bentuk diferensial dari persamaan konservasi massa sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \dots\dots\dots (2.18)$$

Divergen (∇) adalah tingkat kecenderungan suatu titik untuk mengalihkan besaran vektor dari titik tersebut ($\nabla F > 0$). Apabila besaran vektor mengarah ke pusat suatu titik, maka $\nabla F < 0$. Sedangkan, u adalah vektor kecepatan fluida. Aliran yang menuju suatu titik menyebabkan penambahan massa, dan sebaliknya, aliran yang meninggalkan suatu titik menyebabkan pengurangan massa.

Persamaan (2.18) adalah persamaan konservasi masa untuk aliran *unsteady*, tiga dimensi, *compressible* dan *incompressible fluid*. Bagian pertama pada ruas kiri persamaan (2.18) mewakili perubahan massa jenis terhadap waktu, sedangkan bagian kedua mendeskripsikan perubahan *mass flow rate* (Versteeg & Malalasekera,

2007). Apabila aliran tersebut *incompressible*, misalnya cairan, maka massa jenis $\rho =$ konstan sehingga persamaan (2.18) dapat ditulis menjadi:

$$\nabla(u) = 0 \dots\dots\dots(2.19)$$

- *Navier-Stokes Equation*

Partikel fluida diasumsikan sebagai bentuk tiga dimensi yang sangat kecil. Oleh karena itu, laju kenaikan momentum per unit volume ditinjau dari sumbu x, y dan z sebagai berikut:

x - momentum

$$\rho \frac{Du}{Dt} \dots\dots\dots(2.20)$$

y - momentum

$$\rho \frac{Dv}{Dt} \dots\dots\dots(2.21)$$

z - momentum

$$\rho \frac{Dw}{Dt} \dots\dots\dots(2.22)$$

Berdasarkan *Newton's Law of Motion*, laju kenaikan momentum dari suatu partikel fluida sama dengan jumlah gaya yang ada pada partikel fluida tersebut. Pada elemen fluida, terdapat komponen gaya dan tekanan. Dua tipe gaya pada elemen fluida yaitu *surface* dan *body force*. Pada persamaan momentum, *surface force* disebabkan oleh tekanan, viskositas dan gravitasi.

Sedangkan, *body force* terdiri dari gaya sentrifugal dan gaya elektromagnetik. Kondisi tegangan yang dialami elemen fluida didefinisikan dalam bentuk tekanan dan sembilan tegangan akibat viskositas. Tekanan (p) melambangkan tegangan normal, sedangkan (τ) melambangkan tegangan akibat viskositas. Apabila diambil contoh pada gaya yang bekerja pada sumbu – x, maka penjelasan tersebut dapat diekspresikan dengan:

$$\frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \dots\dots\dots(2.23)$$

Maka persamaan (2.20) – (2.22) menjadi persamaan (2.24) – (2.26).

Komponen momentum pada sumbu – x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \dots\dots\dots(2.24)$$

Komponen momentum pada sumbu – y

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \dots\dots\dots(2.25)$$

Komponen momentum pada sumbu – z

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \dots\dots\dots(2.26)$$

Di mana S_{Mx} , S_{My} dan S_{Mz} adalah nilai *body force*.

Fluida Newtonian adalah fluida yang tegangan viskositasnya proporsional terhadap laju deformasinya. Persamaan Navier-Stokes didapatkan dengan mensubstitusikan tegangan geser ke persamaan (2.18). Sehingga, hasil sederhana substitusi tersebut menjadi:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx} \dots\dots\dots(2.27)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \text{ grad } v) + S_{My} \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz} \dots\dots\dots(2.29)$$

2.4.3. Turbulence Model

Model turbulensi dikembangkan untuk memprediksi efek yang disebabkan oleh turbulensi. Terdapat beberapa model turbulensi yaitu *Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) based models*, *Detached Eddy Simulation (DES)* dan *Large Eddy Simulation (LES)*. Untuk lebih jelasnya, klasifikasi model turbulensi dapat dilihat pada Gambar 2-10.



Gambar 2-10 Model Turbulensi
(Sumber: Sadreghighi, 2018)

Laporan ini tidak membahas semua model turbulensi yang telah dikembangkan, melainkan hanya beberapa saja, yaitu:

1. *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS)

RANS adalah persamaan kontinuitas dan momentum di mana semua nilainya berupa hasil rata-rata pada selang waktu tertentu. Penggunaan model turbulensi RANS dalam dunia keinsinyuran sesuai dengan preferensi kebanyakan insinyur untuk meninjau karakteristik aliran secara garis besar. Oleh karena itu, penyelesaian variabel secara rata-rata lebih banyak digunakan. Model turbulensi RANS terdiri dari komponen rata-rata dan komponen yang berfluktuasi. Persamaan kontinuitas tidak berubah karena sifatnya yang linier terkait kecepatan, sedangkan persamaan momentum bersifat non-linier sehingga komponen yang berfluktuasi tidak sama dengan nol. Selain itu, terdapat pula *Reynolds stress* $u_i'u_j$ pada persamaan *time-averaged momentum* yang nilainya tidak diketahui. Begitu pula dengan persamaan *scalar transport*. Model turbulensi RANS digunakan untuk memprediksi nilai *Reynolds stress* dan *scalar transport* serta menutup sistem persamaan aliran fluida. Berdasarkan persamaan *transport* tambahan yang harus diselesaikan, model turbulensi RANS terbagi menjadi:

Tabel 2-1 Model Turbulensi Berdasarkan Persamaan *Transport*
(Sumber: Versteeg & Malalasekera, 2007)

Jumlah persamaan <i>transport</i> tambahan	Model Turbulensi
Nol	<i>Mixing length model</i>
Satu	Spalart-Allmaras <i>model</i>
Dua	$k - \varepsilon$ <i>model</i>
	$k - \omega$ <i>model</i>
	<i>Algebraic stress model</i>
Tujuh	<i>Reynolds stress model</i>

Penjelasan singkat terkait model turbulensi Spalart-Allmaras *model*, $k - \varepsilon$ *model* dan $k - \omega$ *model*:

a. Spallart Allmaras

Persamaan *transport* pada Spallart Allmaras mencakup parameter *kinematic eddy viscosity* dan spesifikasi *length scale* dalam bentuk aljabar. Model ini pada

awalnya dikembangkan untuk aplikasi dalam aerodinamika. Spallart Allmaras tidak memerlukan upaya komputasi yang besar, cukup stabil dan mudah untuk mencapai konvergensi karena hanya menyelesaikan satu variabel tambahan. Namun, Spallart-Allmaras tidak bisa digunakan untuk memprediksi aliran dengan *shear flow*, *separated flow* atau *decaying turbulence*. Selain aerodinamika, model turbulensi ini banyak digunakan dalam analisis *turbomachinery* karena dapat memprediksi hasil yang memuaskan untuk *adverse pressure gradients* dan *boundary layers* (Sadrehaghighi, 2018).

b. *k – ε model*

Model turbulensi *k – ε* banyak digunakan dalam dunia industri karena laju konvergensi yang baik dan tidak membutuhkan memori yang cukup besar. Model ini baik digunakan untuk aliran eksternal di sekitar bentuk geometri yang kompleks. Batasan model turbulensi *k – ε* terletak pada ketidakmampuannya dalam menghitung aliran dengan *adverse pressure gradients*, aliran pada lintasan lengkung yang tajam atau aliran *jet*. Model turbulensi *k – ε* mencakup dua persamaan *transport* yaitu energi kinetik turbulen (*k*) dan laju disipasi energi kinetik turbulen (*ε*). Kedua nilai tersebut digunakan untuk menghitung *velocity scale* dan *length scale* untuk menggambarkan kondisi turbulen dalam skala besar. Sehingga, *eddy turbulent viscosity* adalah hasil dari analisis dimensional menggunakan nilai *k* dan *ε*:

$$\mu_t = C\rho\nu\ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots(2.30)$$

Model turbulensi *k – ε* standar dengan persamaan *transport*:

- Untuk *k*,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho\varepsilon \dots\dots\dots(2.31)$$

- Untuk *ε*,

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \dots\dots\dots(2.32)$$

Di mana pada ruas kiri terdapat laju perubahan *k* atau *ε* dan *transport k* atau *ε* akibat konveksi dan pada ruas kanan terdapat *transport k* atau *ε* akibat difusi, dan laju produksi *k* atau *ε* dikurangi laju peniadaan *k* atau *ε* (Versteeg dan Malalasekera, 2007).

c. $k - \omega$ model

Sebagaimana model turbulensi $k - \varepsilon$, model turbulensi $k - \omega$ juga mencakup dua persamaan *transport* yaitu energi kinetik turbulen (k) dan frekuensi turbulen (ω). Perbedaan di antara model $k - \varepsilon$ dan model $k - \omega$ terletak pada definisi dinding kondisi batas dan *trend* ε dan ω yang berbeda di dekat dinding permukaan. Menurut persetujuan umum komunitas CFD, model $k - \varepsilon$ dengan memodelkan kaskade energi pada *eddies* dalam skala besar di pusat aliran dengan baik, sedangkan model $k - \omega$ lebih baik digunakan di dekat dinding permukaan (Menter, 1993). Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, model $k - \varepsilon$ dan model $k - \omega$ dapat digabungkan dengan mengganti koefisien pada persamaan kedua model tersebut. Penggabungan ini membentuk model $k - \omega$ *shear stress transport* atau $k - \omega$ *SST*. Model ini menyelesaikan persamaan ω di dekat dinding permukaan dan menyelesaikan persamaan ε di daerah *freestream*. Model $k - \omega$ *SST* dikembangkan oleh Menter (1993) dengan mengganti $\varepsilon = k\omega$ pada persamaan ε yang ada pada model $k - \varepsilon$ (Veersteg dan Malalasekera, 2007). Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian kali ini menggunakan model $k - \omega$ *SST*.

2. *Large eddy simulation* (LES)

LES merupakan pendekatan numerik yang menghitung turbulen *eddy* berskala besar dan turbulen *eddy* berskala kecil secara terpisah. Perhitungan *eddy* berskala besar harus diselesaikan dengan simulasi *time dependent*, sedangkan perhitungan *eddy* berskala kecil “diabaikan” untuk menghindari upaya komputasi yang tinggi. Hal ini dilakukan dengan mengaplikasikan *low-pass filtering* pada persamaan Navier-Stokes yang biasa dikenal dengan *time* dan *spatial-averaging*. *Eddy* berskala kecil dapat berdampak pada pergerakan *eddy* berskala besar. Oleh karena itu, meskipun LES adalah metode untuk menghitung *eddy* berskala besar, pemodelan *eddy* berskala kecil adalah hal penting. Hal ini dilakukan dengan menggunakan model *Sub-Grid-Scale* (SGS).

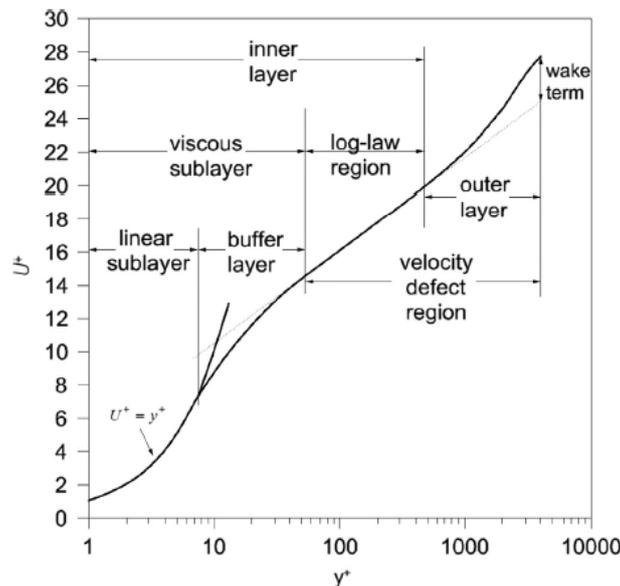
Pada umumnya, LES digunakan untuk menyelesaikan kasus aliran 3 dimensi dan aliran *time dependent*, sehingga lebih tepat untuk simulasi *transient*. LES menghitung rata-rata aliran *time dependent* dengan mengaplikasikan *filter* terhadap persamaan Navier-Stokes, berbeda dengan model turbulensi konvensional yang juga menggunakan prosedur rata-rata.

3. *Direct Numerical Simulation (DNS)*

DNS menyelesaikan persamaan Navier-Stokes tanpa memperkirakan turbulensi, sehingga membutuhkan resolusi numerik yang sangat tinggi agar dapat menangkap semua detail turbulen yang terjadi, dari skala disipasi yang terkecil sampai skala integral L yang berkaitan dengan energi kinetik. Oleh karena itu, DNS membutuhkan upaya komputasi yang begitu tinggi. Pada saat ini, DNS telah berkembang sehingga dapat menyelesaikan model *homogeneous compressible turbulence*, *isotropic* dan *sheared compressible turbulence*, *compressible channel flow*, *compressible turbulent boundary layer* dan *compressible turbulent mixing layer* berkecepatan tinggi (Versteeg dan Malalasekera, 2004). Model turbulensi DNS disertai dengan pemantauan dan pengontrolan kesalahan numerik. Oleh karena itu, DNS menggunakan kode khusus yang dioptimalkan sesuai tipe aliran yang akan ditinjau. Metode yang digunakan untuk menjawab keperluan tersebut adalah *spectral* dan *finite difference*.

2.4.4. *Pemodelan Boundary Layer Pelat Datar*

Untuk menangkap efek turbulen dalam sebuah aliran fluida yang berada di dekat dinding permukaan, digunakan lah konsep y^+ . Nilai y^+ adalah jarak *non-dimensional* yang diukur dari dinding permukaan. Nilai y^+ bergantung pada pembagian daerah dekat dinding permukaan atau daerah *viscous*, sebagaimana telah dibahas pada **Sub-Bab 2.3**.



Gambar 2-11 *Law of the wall* pada *turbulent boundary layer*
(Sumber: Schultz & Swain, 2000)

Dengan y^+ , kita dapat menentukan *first cell height* untuk *mesh* di sekitar dinding permukaan. Penentuan nilai y^+ dilakukan dengan meninjau daerah-daerah berikut:

1. Linier atau *viscous sub-layer*

Lapisan fluida yang berinteraksi secara langsung dengan dinding permukaan, yaitu lapisan fluida yang tidak memiliki jarak dengan dinding permukaan ($y^+ = 0$), bersifat statis atau memiliki kecepatan sama dengan nol ($u^+ = 0$), sehingga:

$$u^+ = y^+ \dots\dots\dots(2.33)$$

Fluida yang terdekat dengan dinding permukaan ini didominasi dengan efek viskositas. Pada kenyataannya, *viscous sub-layer* sangat tipis sehingga dapat diasumsikan bahwa tegangan geser pada dinding permukaan τ_w bernilai konstan.

$$\tau_w \cong \mu \frac{\partial u}{\partial y} = \tau(y) \dots\dots\dots(2.34)$$

Persamaan (2.35) adalah persamaan linier, sehingga fluida yang berada di dekat dinding permukaan disebut sebagai *linier sub-layer*. Ukuran *mesh* harus cukup kecil dan padat sehingga dapat menangkap efek turbulen yang ada pada lapisan ini. Oleh karena itu, pada lapisan ini nilai $y^+ < 5$ (Versteeg & Malalasekera, 2007).

2. *Log-law layer*

Lapisan di luar *viscous sub-layer* di mana efek viskositas dan efek turbulen sama-sama berpengaruh disebut sebagai *log-law layer*. Tegangan geser (τ) bervariasi sepanjang jarak dari dinding permukaan dan diasumsikan bernilai konstan dan sama dengan τ_w . Hubungan antara u^+ dan y^+ sebagai berikut:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \dots\dots\dots(2.35)$$

Di mana $\kappa \approx 0.4$ dan konstanta $B \approx 5.5$ (atau $E \approx 9.8$) untuk permukaan halus. Hubungan logaritmik antara u^+ dan y^+ pada persamaan (2.36) disebut *log-law*, sehingga lapisan ini disebut *log-law layer* dan memiliki nilai y^+ di antara 30 dan 500 ($30 < y^+ < 500$).

3. *Outer layer*

Pengukuran eksperimen menunjukkan bahwa *log-law* valid di $0.02 < y/\delta < 0.2$, dan untuk nilai y yang lebih tinggi digunakan *defect-law*. Pada daerah *overlap*, *log-law* sama

dengan *velocity-defect-law*. Bentuk logaritmik yang diperoleh Tennekes dan Lumley (1972) untuk daerah ini:

$$\frac{u_{max}-U}{u_\tau} = -\frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + A \dots\dots\dots(2.36)$$

di mana $A =$ konstan. Daerah ini biasa disebut sebagai *law of the wake*.

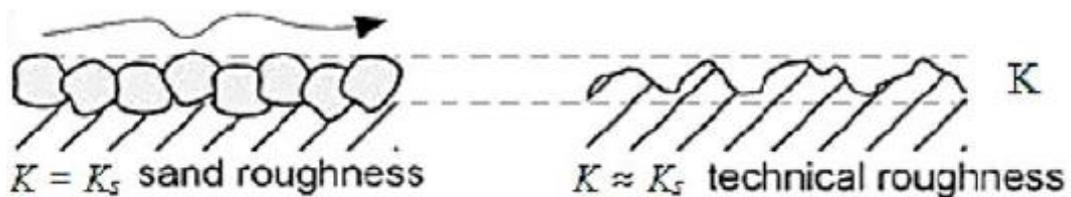
2.5. Surface Roughness

Pada umumnya, kekasaran diukur menggunakan parameter *roughness length scale*, yaitu *roughness height* (k), yang diasumsikan sebagai ketinggian butiran amplas (*sandpaper roughness height* = k_s). Nilai k_s yang semakin tinggi melambangkan permukaan yang semakin kasar. Amplas memiliki notasi kekasaran yaitu *grit*. Nilai *grit* yang tinggi menandakan amplas dengan permukaan halus, atau dengan nilai k_s yang tinggi. Sebaliknya, nilai *grit* yang rendah menandakan amplas dengan permukaan yang kasar, atau dengan nilai k_s yang rendah.



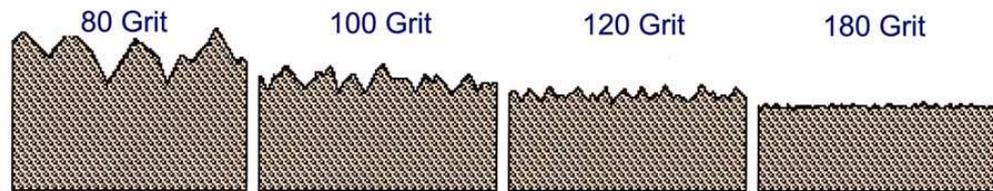
Gambar 2-12 Perbedaan Permukaan Amplas

Gambar 2-12 adalah perbandingan permukaan amplas dari nilai *grit* kecil sampai nilai *grit* besar. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa amplas *grit* 40 memiliki butiran yang lebih besar dibanding amplas *grit* 200.



Gambar 2-13 Perbandingan Kekasaran Amplas dan Kekasaran Teknis
(Sumber: ANSYS Inc., 2011)

Gambar 2-13 adalah ilustrasi tinggi kekasaran teknis (k) yang direpresentasikan dengan kekasaran amplas (*sandpaper roughness height*, k_s). Cara menentukan nilai k_s yang sesuai dengan nilai k yaitu dengan mengukur tinggi kekasaran teknis tersebut, lalu mencari nilai kekasaran amplas dengan ketinggian yang serupa.

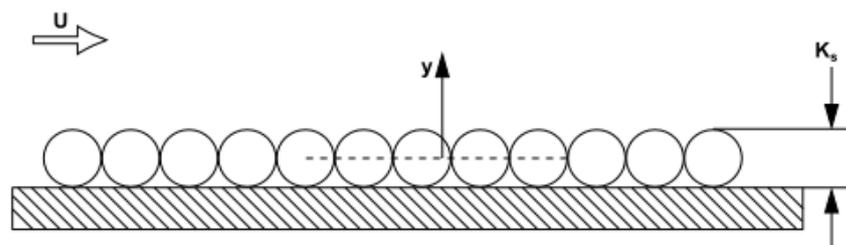


Gambar 2-14 Contoh Kekasaran Teknis sesuai *Grit* Amplas

Pada Gambar 2-14, dapat dilihat bahwa *grit 80* merepresentasikan permukaan dengan tinggi kekasaran yang lebih besar dari pada *grit 180*. Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, bahwa nilai *grit* amplas berbanding terbalik dengan nilai k_s .

Kekasaran permukaan pada ANSYS Fluent dimodelkan dengan *roughness length scale* berdasarkan 2 parameter, yaitu *roughness height* ($k = k_s$) dan *roughness constant* (C_s). Sehingga, untuk memodelkan kekasaran teknis lain, maka perlu dikonversi menjadi *roughness height*. Pendekatan ini hanya dapat digunakan apabila kekasaran bersifat konstan atau tetap di sepanjang permukaan model. Kekasaran yang tidak bersifat konstan dapat dimodelkan dengan *user-defined functions* (ANSYS Inc., 2017).

Roughness constant (C_s) pada ANSYS Fluent melambangkan kerapatan kekasaran. Nilai *default* yang diberikan ANSYS Fluent adalah $C_s = 0,5$. Sedangkan, menurut penelitian Suastika et al (2020), nilai $C_s = 0,253$ akan menghasilkan nilai hambatan yang sama dengan eksperimen Nikuradse pada pipa yang dindingnya ditempelkan dengan butiran pasir (*sand-grain*) yang tersusun secara rapat dan *uniform*. Di mana, model turbulensi yang digunakan adalah $k - \epsilon$. Untuk kekasaran permukaan yang susunannya tidak serapat eksperimen Nikuradse, maka disarankan untuk menggunakan nilai $C_s = 0,5 - 1$ (ANSYS Inc., 2017).



Gambar 2-15 Ilustrasi *Equivalent Sand-Grain Roughness* Pada ANSYS Fluent (Sumber: ANSYS Inc., 2017)

Gambar 2-15 adalah ilustrasi model kekasaran pada ANSYS Fluent pada permukaan datar. Permukaan kasar meningkatkan turbulensi sehingga *turbulent stress* dan *wall shear stress* meningkat. Hal ini menyebabkan penurunan kecepatan pada *turbulent boundary layer*. Efek kekasaran pada aliran dapat dilihat pada *velocity profile* (Schultz and Swain, 2000). Permukaan kasar mengakibatkan penurunan *velocity profile* di *log-law region*. Penurunan tersebut dinamakan juga ΔU^+ atau fungsi kekasaran (*roughness function*). Hal ini disebabkan adanya peningkatan *momentum deficit* akibat kekasaran dan berkaitan langsung dengan kenaikan *frictional drag* pada permukaan (Schultz, 2007). Oleh karena itu, *log-law velocity profile* untuk permukaan kasar pada *turbulent boundary layer* pada persamaan (2.28) menjadi:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta U^+ \dots\dots\dots(2.37)$$

di mana:

U^+ = rata-rata kecepatan *viscous* yang telah diskala

κ = konstanta Von Kármán (=0.41)

y^+ = jarak *cell* pertama dari dinding permukaan model

B = *smooth-wall log-law intercept* (=5.0)

ΔU^+ = *roughness function* (untuk *smooth walls*, $\Delta U^+ \equiv 0$)

Penurunan pada *velocity profile* ditunjukkan dengan peningkatan hambatan gesek. Fungsi kekasaran pada umumnya didapatkan melalui eksperimen, karena tidak ada fungsi kekasaran universal yang dapat mencakup semua jenis kekasaran. Nilai *roughness function* (ΔU^+) untuk *roughness length scale* berkaitan dengan nilai *nondimensional roughness height* atau *roughness Reynolds number* (K_s^+). Persamaan (2.39) adalah persamaan untuk menentukan besarnya nilai K_s^+ .

$$K_s^+ = \rho k_s u^* / \mu \dots\dots\dots(2.38)$$

di mana:

K_s^+ = *Roughness Reynolds Number*

ρ = Massa jenis fluida ($kg.m^{-3}$)

k_s = *roughness height* (μm)

u^* = *Friction velocity*

dan,

$$u^* = U_e \sqrt{\frac{C_F}{2}} \dots\dots\dots(2.39)$$

di mana,

U_e = Freestream velocity
 C_F = Koefisien hambatan gesek

Berdasarkan penelitian, terdapat tiga tingkatan kekasaran permukaan yaitu:

- *Hydrodynamically smooth*:

$$K_s^+ \leq 2.25 \dots\dots\dots(2.40)$$

- *Transitional*:

$$2.25 < K_s^+ \leq 90 \dots\dots\dots(2.41)$$

- *Fully rough*:

$$K_s^+ > 90 \dots\dots\dots(2.42)$$

Efek kekasaran yang berada di tingkat *hydrodynamically smooth* dapat diabaikan, sedangkan efek kekasaran pada tingkat transisi cukup besar karena elemen kekasaran sedikit lebih tebal dari *viscous sublayer* sehingga mulai mengacaukan lapisan tersebut. Kemudian, pada tingkat *fully rough regime*, elemen kekasaran berpengaruh sepenuhnya sampai menghancurkan *viscous sublayer*. Oleh karena itu, pada *fully rough regime*, efek *viscous* dapat diabaikan.

ANSYS Fluent menggunakan ketiga tingkatan tersebut untuk memodelkan kekasaran permukaan ke dalam proses simulasi numerik. Tingkatan kekasaran permukaan ditentukan oleh besarnya *Roughness Reynolds Number* yang ditentukan dengan persamaan (2.39). Setelah penentuan tingkat kekasaran, maka dapat dihitung nilai ΔU^+ , yang merupakan fungsi dari tingkat kekasaran itu sendiri atau $\Delta U^+(K_s^+)$. Rumus-rumus yang digunakan untuk menentukan fungsi kekasaran dikemukakan oleh Cebeci dan Bradshaw berdasarkan data kekasaran Nikuradse sebagaimana diekspresikan dalam persamaan (2.44) – (2.46) (ANSYS Inc., 2017).

- Untuk tingkat kekasaran *hydrodynamically smooth*:

$$\Delta U^+ = 0 \dots\dots\dots(2.43)$$

- Untuk tingkat kekasaran *Transitional*:

$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+ \right] \times \sin \{ 0.4258 (\ln K_s^+ - 0.811) \} \dots\dots\dots(2.44)$$

- Untuk tingkat kekasaran *Fully rough regime*:

$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + C_s K_s^+) \dots\dots\dots(2.45)$$

di mana:

C_s = *Roughness constant*
 κ = Konstanta von Kármán (= 0.41)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODOLOGI

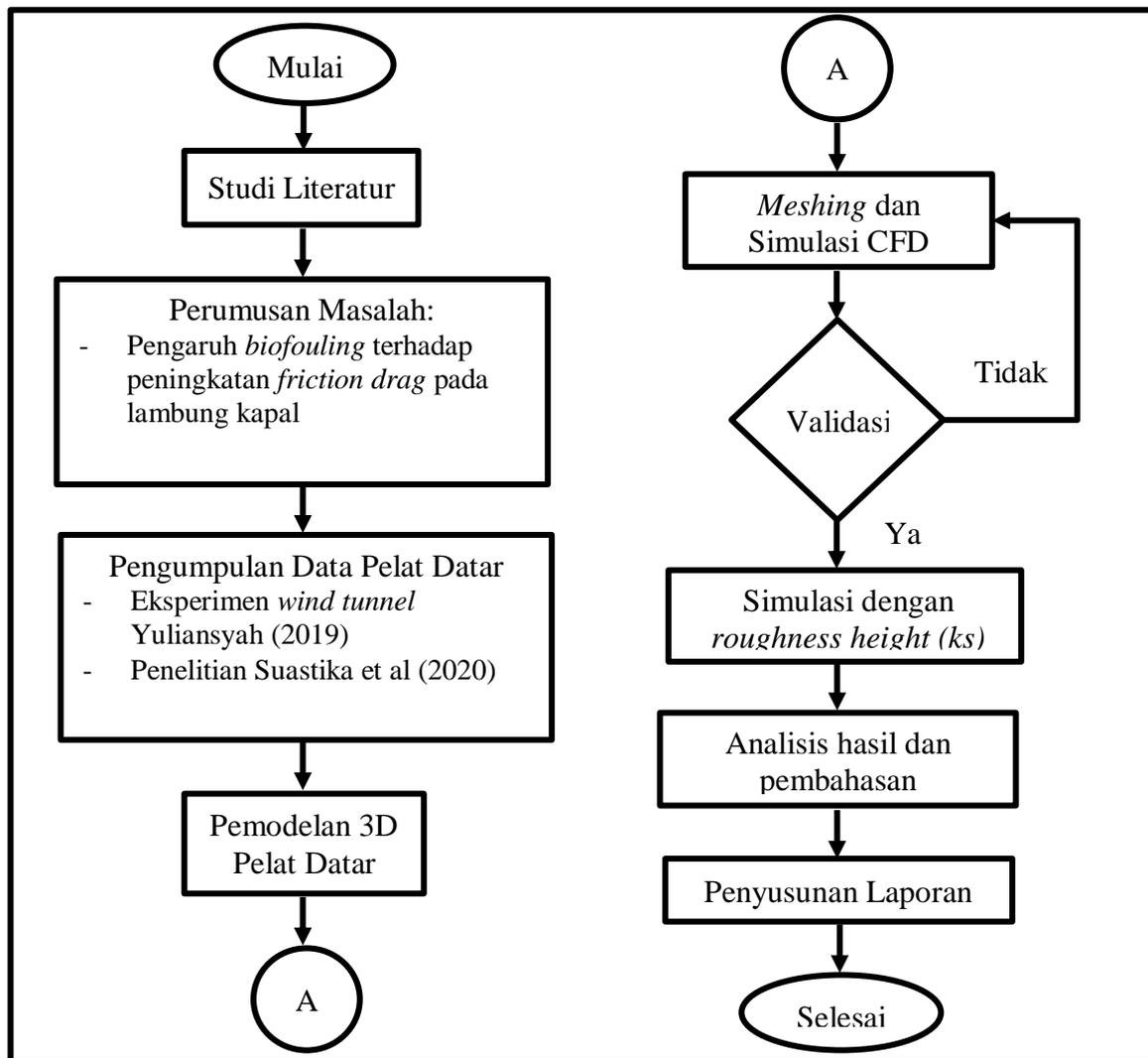
3.1. Bagan Alir

Ukuran kekasaran permukaan sangat kecil dibandingkan dimensi *full scale* kapal seperti panjang, lebar, sarat, dsb. Hal ini yang menyebabkan pengamatan efek kekasaran permukaan pada kapal secara langsung tidak dapat dilakukan secara tepat menggunakan model dan pengujian *towing*. Oleh karena itu, fungsi kekasaran ΔU^+ diperoleh dengan menarik pelat datar dan hasilnya diskala untuk menentukan C_F untuk kapal skala asli. Hal ini dilakukan menggunakan *Granville's similarity law* (Schultz, 1998).

Sampai saat ini, penelitian *surface roughness* masih berlangsung. Berbagai jenis penelitian yang telah dilakukan termasuk studi efek biofilm, *filamentous algae* dan *calcereous macrofouling*. Schlutz melakukan eksperimen pelat datar menggunakan fasilitas *towing tank* pada tahun 2007. Kemudian pada tahun 2017, Schultz kembali menganalisis eksperimen pelat datarnya menggunakan simulasi numerik. Hasil penelitiannya menunjukkan hasil yang sesuai antara eksperimen *towing tank* dengan simulasi numerik. Hingga saat ini, belum ada formula yang dapat memodelkan kekasaran permukaan yang ditimbulkan oleh cat *anti-fouling* atau *biofouling* (Demirel, 2017).

Date dan Turnock (1999) meneliti teknis yang diperlukan untuk memprediksi hambatan gesek pelat datar menggunakan *RANS Solver*. Date dan Turnock juga mendemonstrasikan bahwa efek kekasaran terhadap hambatan gesek dapat diprediksi menggunakan CFD. Metode yang digunakan Date dan Turnock adalah memodifikasi koefisien *wall function (log-layer constant)*. Meskipun menunjukkan hasil yang sesuai, metode ini tidak menggambarkan efek kekasaran pada hambatan gesek secara langsung.

Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 19.0. Model yang dipakai adalah pelat datar pada pengujian *wind tunnel* oleh Yuliansyah (2019). Ukuran pelat datar merupakan hasil skala 1:175 dari kapal KM Mentari Pratama. Terdapat tiga variasi kekasaran permukaan berupa *smooth surface*, *regular roughness*, dan *irregular roughness* yang akan diuji pada lima variasi *Reynolds Number*. Gambar 3-1 adalah bagan metodologi penelitian ini.



Gambar 3-1 Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir

3.2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini didasarkan pada hasil *survey* kapal KM Mentari Pratama saat *docking* di PT PAL Indonesia pada Februari 2019. Kapal pada saat itu telah beroperasi selama 2 tahun. Data yang diamati termasuk ukuran utama kapal dan tebal maksimal *fouling*. Tabel di bawah berupa data ukuran utama KM Mentari Pratama:

Tabel 3-1 Ukuran Utama KM Mentari Pratama

No.	Ukuran Utama	
1.	<i>Length over All</i>	98,00 m
2.	<i>Length of Water Line</i>	94,40 m
3.	<i>Length between Perpendiculars</i>	91,50 m
4.	<i>Beam Moulded</i>	15,80 m

3.3. Pemodelan 3D Pelat Datar

Efek kekasaran permukaan pada kapal secara langsung tidak dapat diamati secara tepat menggunakan model dan pengujian *towing*. Sebagai gantinya, pengamatan dilakukan dengan menarik pelat datar dan hasilnya diskala untuk menentukan C_F dan fungsi kekasaran ΔU^+ untuk kapal skala asli. Ukuran pelat datar yang digunakan pada penelitian ini menyesuaikan ukuran pelat datar yang digunakan oleh Yuliansyahsyah (2019) yang disajikan pada Tabel 3-2. Model ini akan diuji pada 5 variasi *Reynolds Number* yang berbeda.

Tabel 3-2 Ukuran Model Pelat Datar Eksperimen Yuliansyah (2019)

No.	Ukuran Utama	
1.	<i>Length</i>	0,56 m
2.	<i>Width</i>	0,75 m
3.	<i>Thickness</i>	0,004 m

Selanjutnya, ukuran pelat datar untuk simulasi prediksi dan validasi penelitian Suastika et al (2020) tertera pada Tabel 3-3.

Tabel 3-3 Ukuran Model Pelat Datar Penelitian Suastika et al (2020)

No.	Ukuran Utama	
A	Variasi 1	
1.	<i>Length</i>	30 m
2.	<i>Width</i>	3 m
B	Variasi 2	
1.	<i>Length</i>	60 m
2.	<i>Width</i>	6 m

Terdapat dua variasi ukuran pelat datar untuk simulasi prediksi dan validasi penelitian Suastika et al (2020). Untuk simulasi ini, masing-masing pelat datar akan diuji dengan 2 variasi *Reynolds Number*.

3.4. Simulasi *Computational Fluid Dynamics*

Simulasi dilakukan untuk setiap 3 kondisi lambung yaitu *smooth hull*, *regular roughness* dan *irregular roughness*. Pada penelitian ini, digunakan 4 variasi nilai *roughness height* (k_s), 1 untuk mewakili kondisi *smooth hull* dan 3 untuk mewakili kondisi kekasaran. Nilai k_s diasumsikan sesuai dengan percobaan pelat datar oleh Yuliansyah (2019) dan penelitian

Suastika et al (2020). Pada pemodelan kondisi *irregular roughness*, pelat datar dibagi menjadi 3 bagian sama panjang dan masing-masing bagian diberi nilai k_s yang berbeda. Sebagai contoh, keterangan 123 menunjukkan pelat datar diberi kekasaran 1 di bagian depan (*leading edge*), kekasaran 2 di bagian tengah (*middle*) dan kekasaran 3 di bagian belakang (*trailing edge*). Keterangan 213 menunjukkan pelat datar diberi kekasaran 2 di bagian depan, kekasaran 1 di bagian tengah dan kekasaran 3 di bagian belakang. Kekasaran 321 menunjukkan pelat datar diberi kekasaran 3 di bagian depan, kekasaran 2 di bagian tengah dan kekasaran 1 di bagian belakang, dsb.

3.5. Pengolahan Data Hasil Pengujian

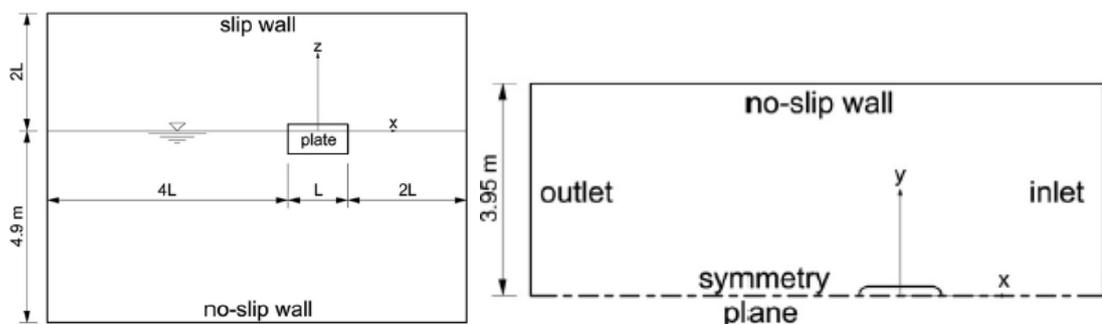
Pada tahap ini, hasil simulasi berupa hambatan (*drag*) setiap variasi kekasaran dan variasi kecepatan dicatat. Data tersebut digunakan dalam perhitungan *skin friction coefficient* menggunakan rumus ITTC 1978. Setiap nilai C_F kondisi kasar yang didapat dibandingkan dengan nilai C_F kondisi *smooth plate*. Perbedaan tersebut kemudian disajikan dalam bentuk persen (%) sebagai indikator kenaikan C_F untuk kondisi pelat yang berbeda.

BAB 4 PEMODELAN DAN SIMULASI

4.1. Simulasi pada Perangkat Lunak CFD

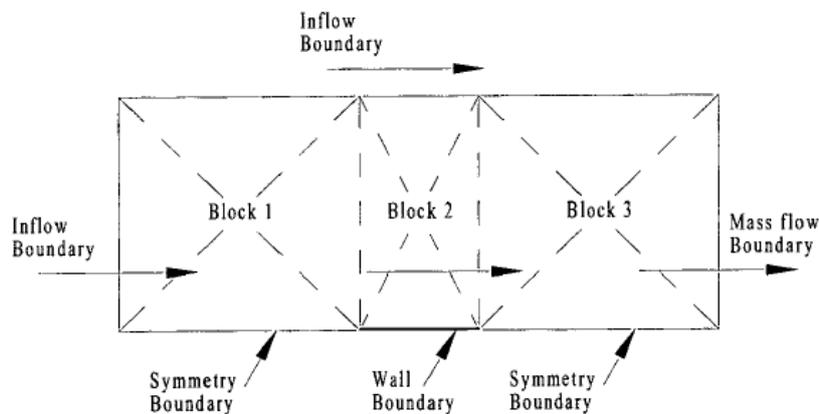
4.1.1. Geometri

Hasil yang didapatkan dari simulasi numerik adalah kumpulan dari interpolasi nilai-nilai *boundary conditions* pada saat proses perhitungan, sehingga penggunaan *boundary conditions* yang tidak realistis dapat mengakibatkan hasil yang salah dan dapat mengakibatkan divergensi dalam proses perhitungan. Divergensi adalah kebalikan dari konvergensi. Suatu solusi dikatakan mencapai konvergensi apabila *residuals* atau ukuran konservasi karakteristik fluida secara keseluruhan mencapai nilai yang sangat kecil (Versteeg & Malalasekera, 2007). Apabila suatu simulasi dapat mencapai konvergensi, maka dapat dikatakan hasil simulasi tersebut dapat dipercaya. Akan tetapi, konvergensi bukan lah satu-satunya parameter yang berpengaruh terhadap tingkat keakurasian simulasi numerik. Adalah hal penting dalam simulasi *computational fluid dynamics* untuk mendefinisikan kondisi batas (*boundary conditions*) yang dapat mendeskripsikan masalah secara akurat untuk mendapatkan hasil simulasi yang diinginkan. *Boundary conditions* adalah kondisi batas berupa geometri yang akan dianalisa pada suatu simulasi numerik. Terdapat berbagai kombinasi kondisi batas yang dapat diaplikasikan untuk kasus aliran *viscous* pada pelat datar yang dapat memberikan hasil yang *valid*. Akan tetapi, beberapa kombinasi membutuhkan upaya komputasi yang berlebihan. Demirel (2014) melakukan simulasi numerik untuk memvalidasi eksperimen hambatan gesek akibat cat *antifouling* pada pelat datar yang dilakukan oleh Schultz (2004), dengan ukuran domain sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4-1.



Gambar 4-1 Domain *Validation Study* oleh Demirel (2014)
(Sumber: Demirel, 2014)

Date dan Turnock (1999) dalam penelitiannya melakukan validasi terhadap eksperimen pelat datar yang dilakukan oleh William Froude. Dalam penelitian tersebut, Date dan Turnock (1999) menjelaskan tentang teknis yang diperlukan untuk memprediksi hambatan gesek menggunakan RANS *solver*. Berbeda dengan Demirel (2014) yang menggunakan model 3 dimensi, Date dan Turnock (1999) hanya menggunakan model 2 dimensi dari pelat datar yang akan diuji. Hal ini dikarenakan luas bagian ujung pelat hanya mencapai 0.5% dari total luasan pelat datar, sehingga hambatan geseknya dapat diabaikan (Date dan Turnock, 1999). Gambar 4-2 menunjukkan kondisi batas yang digunakan oleh Date dan Turnock (1999).

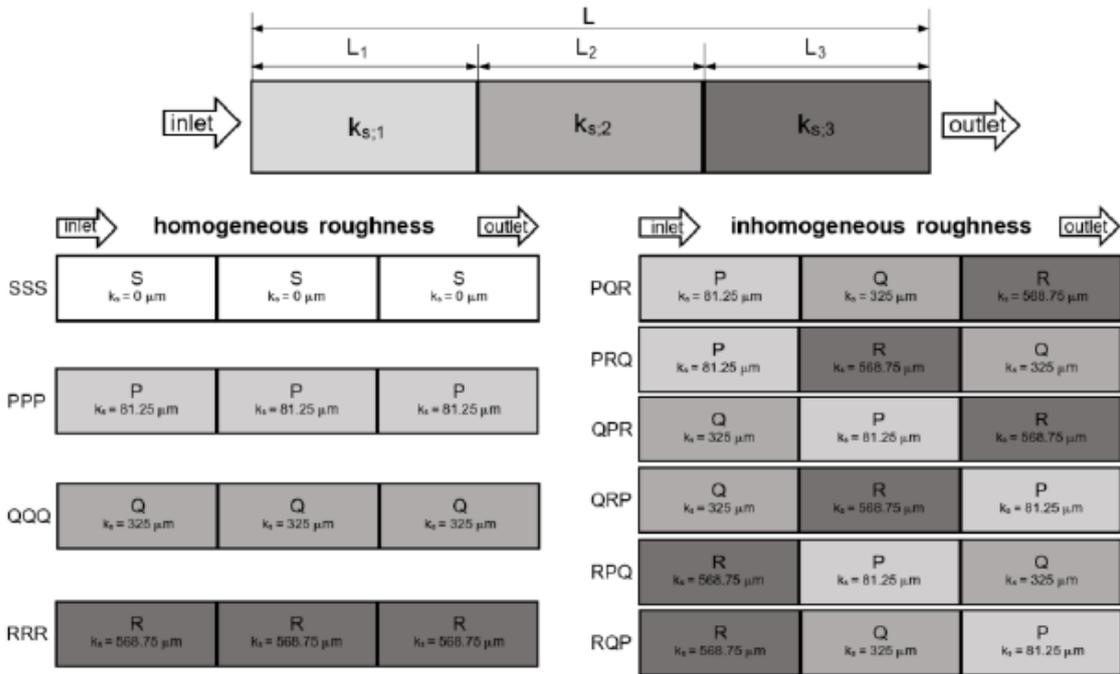


Gambar 4-2 Kondisi Batas oleh Date dan Turnock (1999)
(Sumber: Date dan Turnock, 1999)

Setelah melakukan berbagai studi parametrik, Date dan Turnock (1999) mendapatkan ukuran kondisi batas yang dapat memprediksi hambatan gesek pelat secara akurat, namun juga tidak memerlukan daya komputasi yang berlebihan. Kondisi batas yang dibuat oleh Date dan Turnock (1999) memiliki jarak *inlet/inflow boundary* dari pelat, jarak *outlet/mass flow boundary* dari pelat, dan jarak *upper inlet/inflow boundary* (bagian atas) dari pelat semuanya sebesar $2L$, di mana L sama dengan panjang pelat yang disimulasikan. Apabila ditinjau dari segi ukuran, maka kondisi batas yang dibuat oleh Date dan Turnock (1999) dapat mengurangi daya komputasi yang dibutuhkan untuk proses perhitungan karena ukurannya yang lebih kecil di banding kondisi batas yang dibuat oleh Demirel (2014). Selain itu, penggunaan model 2 dimensi oleh Date dan Turnock (1999) juga dapat mengurangi waktu komputasi. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan model 2 dimensi atas dasar pertimbangan tersebut.

Baru-baru ini, Suastika et al (2020) melakukan penelitian terkait karakteristik *drag* akibat variasi kekasaran *inhomogen*. Kondisi batas pada penelitian oleh Suastika et al (2020) hampir mirip dengan kondisi batas yang dibuat Date dan Turnock (1999), dengan sedikit perbedaan yaitu tidak ada jarak antara *inlet* maupun *outlet* dengan pelat datar. Hal ini dapat

meminimalisasi daya komputasi yang dibutuhkan sembari mendapatkan hasil yang akurat. Dalam penelitian Suastika et al (2020), pelat datar dibagi menjadi 3 bagian sama panjang ($= L_{pelat}/3$), di mana masing-masing bagian diberi nilai kekasaran (k_s) yang berbeda-beda sesuai variasi kekasaran.

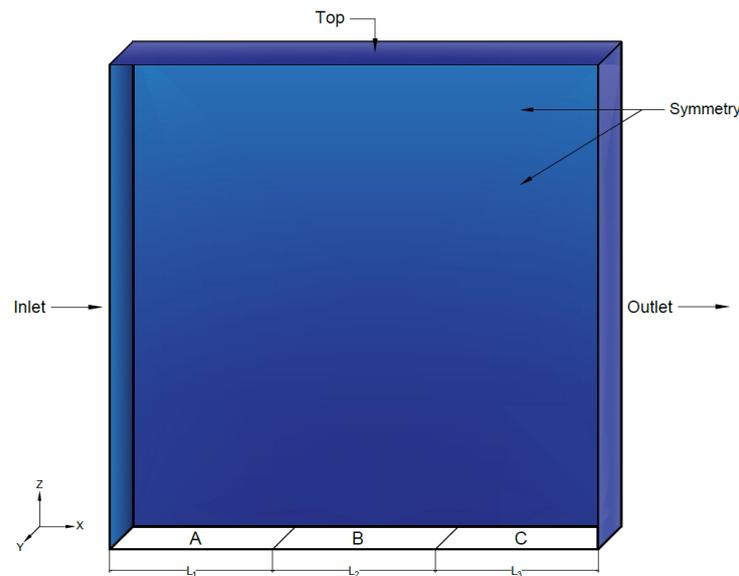


Gambar 4-3 Kombinasi Kekasaran pada Pelat Datar oleh Suastika et al (2020)
(Sumber: Suastika, 2020)

Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan kondisi batas yang mengacu pada penelitian Suastika et al (2020) menggunakan aplikasi ANSYS Integrated Computer Engineering and Manufacturing (ICEM). Pada penelitian ini, cukup untuk memodelkan salah satu sisi pelat datar saja. Hal ini mengurangi jumlah *cell* yang perlu dibuat dan mengurangi waktu komputasi yang diperlukan untuk mendapatkan hasil yang akurat. Kemudian, pelat datar dibagi menjadi 3 bagian sama panjang dan masing-masing bagian diberi nilai k_s yang berbeda-beda.

Boundary conditions dimodelkan dalam kondisi berikut, panjang pelat L dalam sumbu X , lebar pelat B dalam sumbu Z dan tinggi *boundary conditions* dalam sumbu Y . Dalam ICEM, geometri dapat dibuat secara *manual* atau dapat di-*import* dalam bentuk *file* yang sesuai. Karena model yang digunakan pada penelitian ini tidak terlalu rumit, maka dapat dibuat langsung menggunakan *tools* yang ada pada ICEM. Pada ICEM, geometri yang dibuat secara manual dimulai dengan membuat *points* sesuai ukuran geometri. *Points* tersebut disambung menjadi *curves*. Selanjutnya, *curves* yang saling bersinggungan membentuk suatu *surface*. Kemudian,

bagian/*parts* dari geometri yang telah ada diberi nama sesuai *boundary conditions*. Pada bagian kiri sumbu X adalah *inlet*, pada bagian kanan sumbu X adalah *outlet*, sepanjang sumbu X adalah pelat datar yang dibagi menjadi 3 bagian, pada bagian samping kanan dan kiri adalah *symmetry* dan bagian atas adalah *top*. Sepanjang sumbu Y adalah lebar dari pelat datar, sedangkan sepanjang sumbu Z sama dengan panjang pelat datar. **Gambar 4-4** merupakan ilustrasi *boundary conditions* sesuai deskripsi sebagai berikut:



Gambar 4-4 *Boundary Conditions*

Kondisi *regular roughness* memiliki kekasaran yang sama untuk ketiga bagian pelat, sedangkan kondisi *irregular roughness* memiliki kekasaran yang berbeda-beda. Bagian pelat A (L_1) di samping *inlet* diasumsikan sebagai haluan kapal, bagian pelat B (L_2) diasumsikan sebagai *midship* dan bagian pelat C (L_3) berada di samping *outlet* diasumsikan sebagai buritan kapal.

4.1.2. *Meshing*

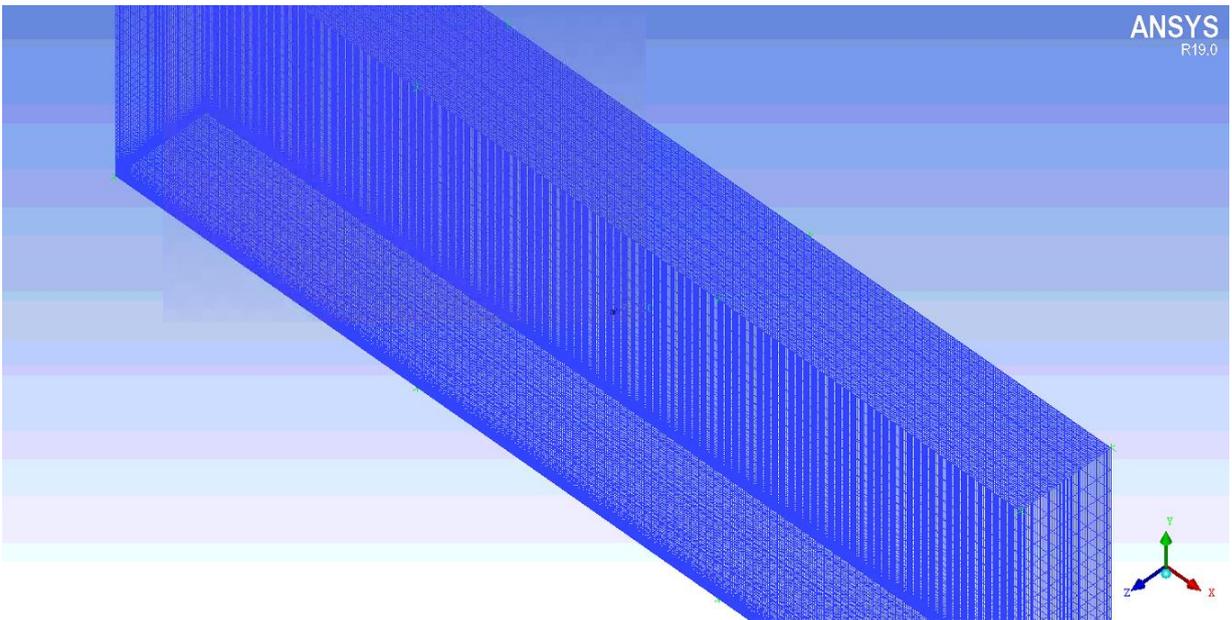
Structured mesh dapat digunakan untuk geometri model yang tidak terlalu rumit. ICEM menyediakan fitur *structured mesh* yang dapat diatur secara *manual*. Terdapat berbagai metode untuk membuat *structured mesh*, salah satunya dengan menggunakan sistem *blocking* pada ICEM yang digunakan untuk penelitian ini.

Penentuan ukuran *mesh* ditinjau dari permasalahan yang akan dianalisis. Hambatan gesek adalah hambatan yang didominasi oleh efek dari viskositas fluida yang terjadi pada daerah *viscous sublayer*. Berdasarkan penjelasan pada bab sebelumnya, ukuran *mesh* harus cukup kecil dan padat di sekitar daerah tersebut sehingga dapat menangkap efek turbulen yang

ada pada daerah *viscous sublayer*. Oleh karena itu, nilai y^+ yang digunakan adalah 1. Kita dapat menentukan *first cell height* dengan bantuan persamaan *Flat Plate Boundary-Layer Theory* sebagaimana dikemukakan oleh Dr. Hermann Schlichting pada 1966 melalui persamaan (4.1).

$$y^+ = 0.172 \cdot \left(\frac{\Delta y_P}{L}\right) \cdot Re^{0.9} \dots\dots\dots(4.1)$$

Elemen *mesh* yang terbentuk adalah *hexahedral* dan *quads*. Di sekitar pelat datar, *first cell height* diatur untuk memiliki *growth rate* sebesar 1.2x lipat. Hasil *mesh* yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 4-5.



Gambar 4-5 *Structured Mesh* untuk Pelat Datar pada ICEM

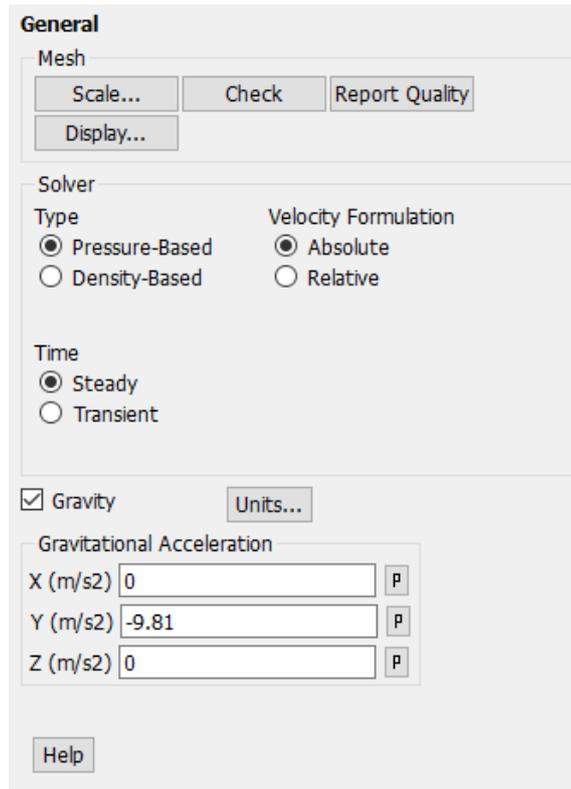
Untuk memastikan bahwa hasil analisis merupakan hasil yang akurat dan tidak dipengaruhi oleh konfigurasi *mesh*, maka perlu dilakukan *grid independence study* yang akan dibahas pada 4.24.2.

4.1.3. Solver

Penentuan pada tahap *solver* mencakup penentuan jenis fluida, *turbulence model*, *surface roughness*, hingga pengaturan *solver*. Komputer yang digunakan memiliki sistem operasi Windows 10 – Home Single Language 64-bit, dengan prosesor i7-4790 CPU dan RAM sebesar 32 GB.

1) General

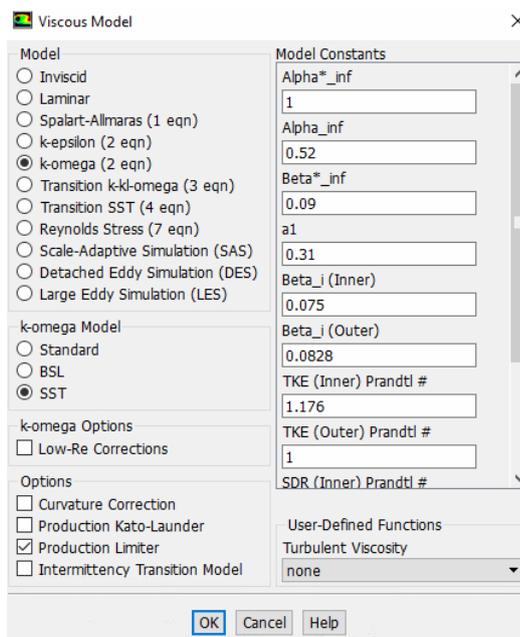
Pada pengaturan ini, dipilih *steady* sebagai mode *solution*. Nilai percepatan gravitasi pada sumbu Y dimasukkan $-9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



Gambar 4-6 *General Setting* pada ANSYS Fluent

2) *Models*

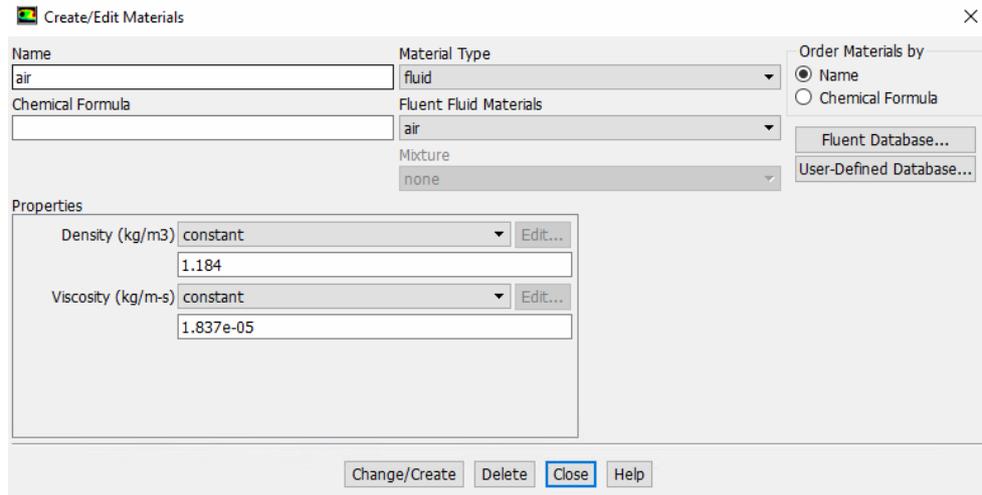
Model turbulensi yang akan digunakan di atur pada pengaturan ini, yaitu $SSTk - \omega$. Model turbulen ini dipilih karena menggabungkan model $k - \omega$ di dekat dinding permukaan dan model $k - \epsilon$ di daerah *far field* (Demirel, 2014).



Gambar 4-7 *Turbulence model*

3) *Materials*

Pengaturan *materials* mencakup pengaturan *material properties* dari fluida yang digunakan. Secara *default*, fluida yang telah diatur oleh *fluent* adalah udara. Nilai *density* dan *dynamic viscosity* disesuaikan dengan temperature uji, dalam kasus ini diasumsikan $25^{\circ} C$. Nilai *density* dan *dynamic viscosity* yang digunakan adalah masing-masing 1.184 kg.m^{-3} dan $1.837 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1} . \text{s}^{-1}$.

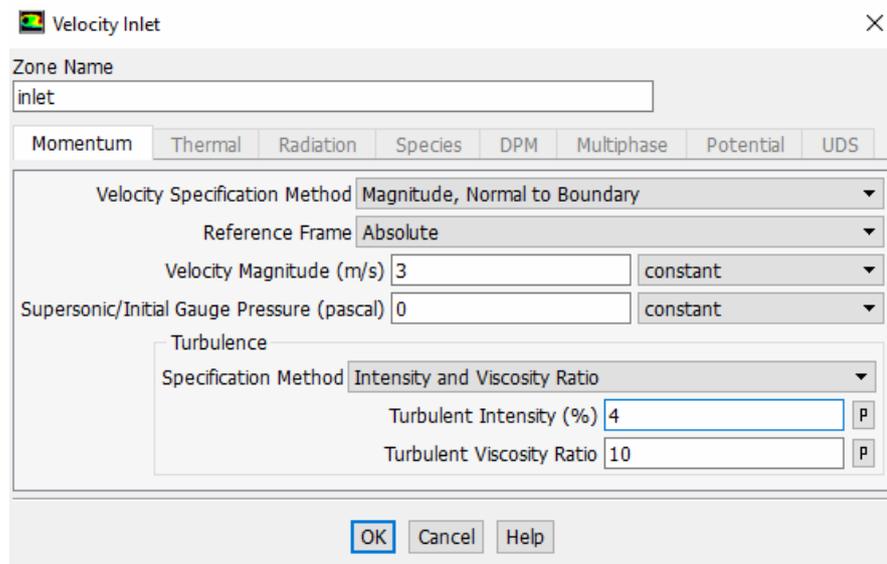


Gambar 4-8 Pengaturan *Material Properties*

4) *Boundary Condition*

a. *Inlet*

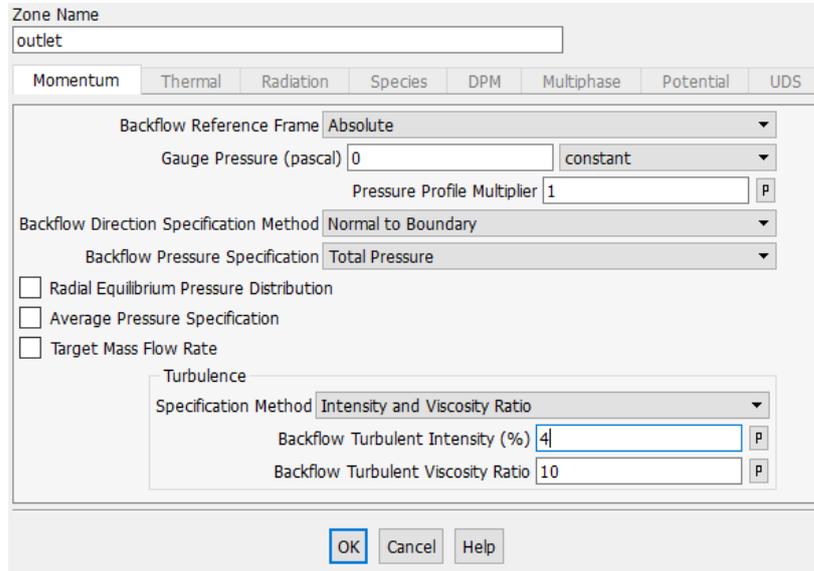
Inlet didefinisikan sebagai *velocity-inlet*. Nilai kecepatan diisi sesuai kecepatan pelat datar yang akan diuji. Pada pilihan *momentum*, nilai *turbulence intensity* dan *turbulence viscosity ratio* diubah menjadi masing-masing 4% dan 10.



Gambar 4-9 Pengaturan *Inlet*

b. *Outlet*

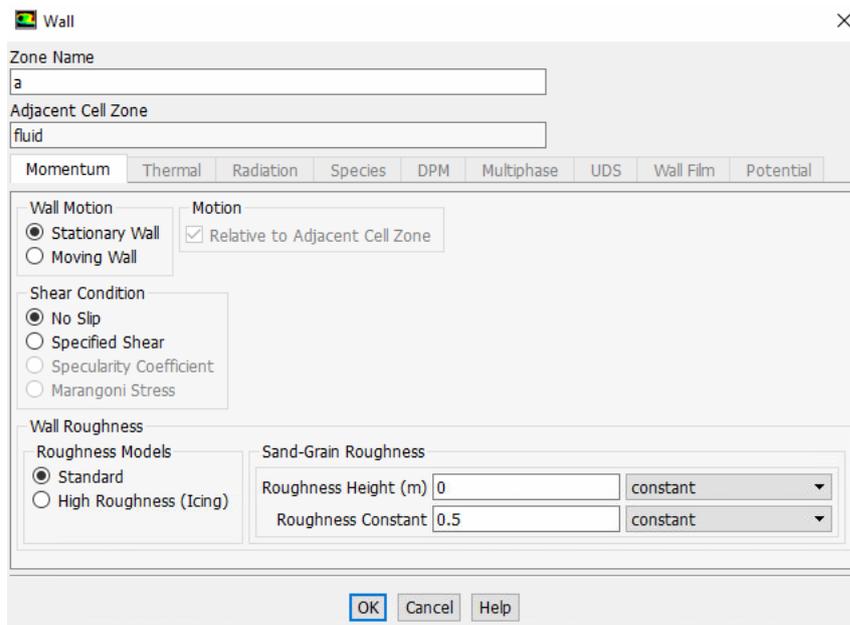
Outlet didefinisikan sebagai *pressure-outlet*. Nilai *backflow turbulence intensity* dan *backflow turbulence viscosity ratio* diubah menjadi masing-masing 4% dan 10.



Gambar 4-10 Pengaturan *Outlet*

c. *Flat Plate*

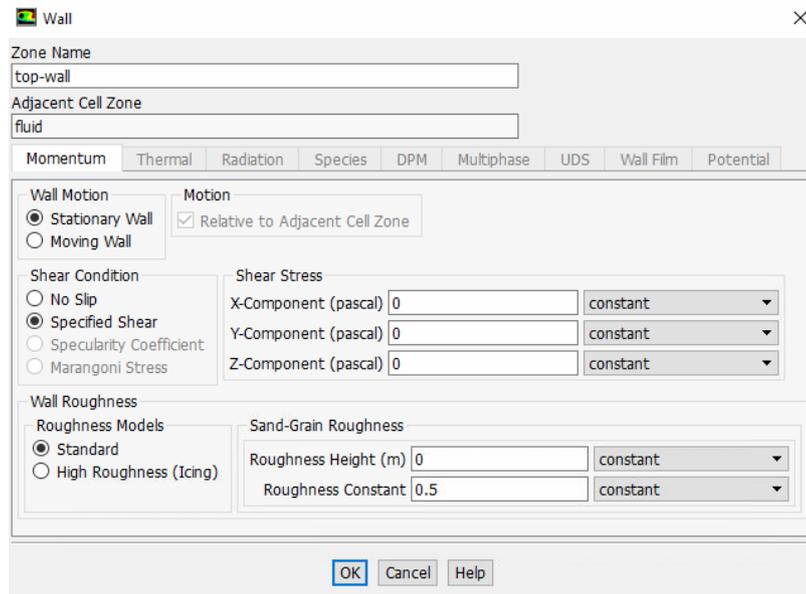
Pelat datar didefinisikan sebagai *no-slip wall*. Untuk menguji variasi kekasaran, nilai k_s pada pilihan *roughness height* dimasukkan sesuai dengan urutan variasi yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya.



Gambar 4-11 Pengaturan untuk Model Pelat Datar

d. *Top wall dan symmetry*

Top wall didefinisikan sebagai *slip wall* sedangkan *symmetry* didefinisikan sebagai *symmetry*.

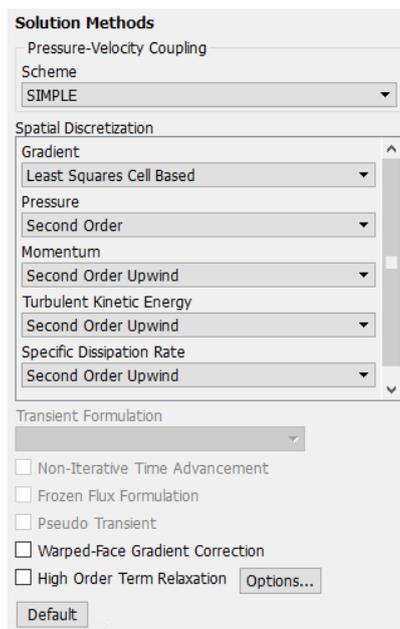


Gambar 4-12 Pendefinisian *Top Wall*

5) *Solution*

a. *Method*

Scheme yang digunakan adalah SIMPLE dengan *gradient* berupa *least-squares cell-based*. Selain itu, persamaan kontinuitas, persamaan momentum, *turbulence kinetic energy* dan *specific dissipation rate* menggunakan *second order upwind*.

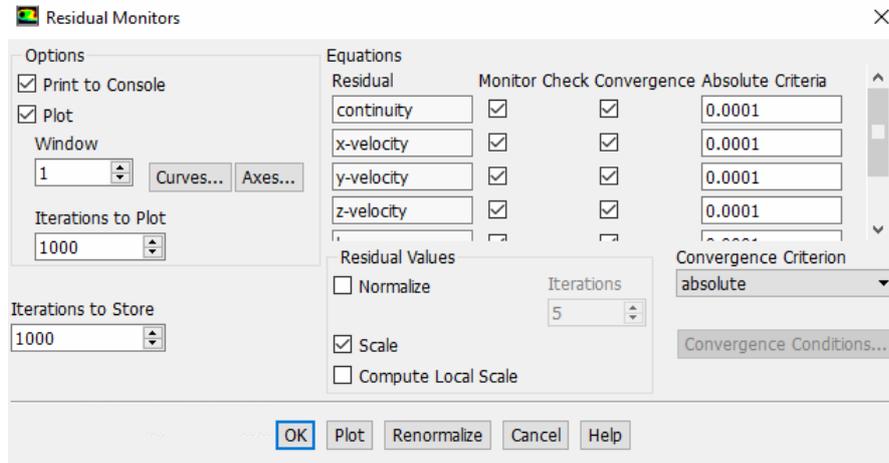


Gambar 4-13 *Solution methods*

b. Monitors

- Residual

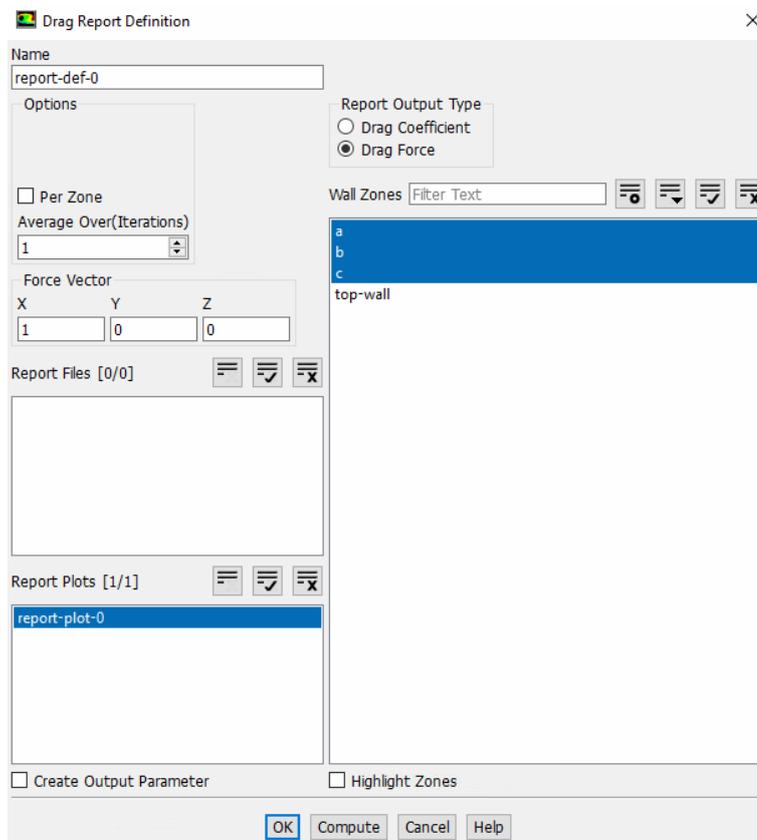
Nilai *residual* diubah dari *default* (1×10^{-3}) menjadi 1×10^{-4} .



Gambar 4-14 *Residual Monitors*

- Report plots

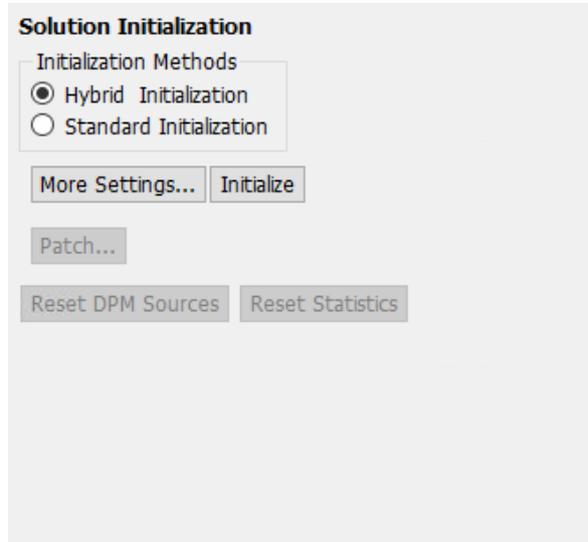
Jenis *force* yang akan disajikan dalam bentuk *plot* dapat dipilih pada pengaturan ini.



Gambar 4-15 *Report Plots Drag Force* untuk *Flat Plate*

6) *Solution Initialization*

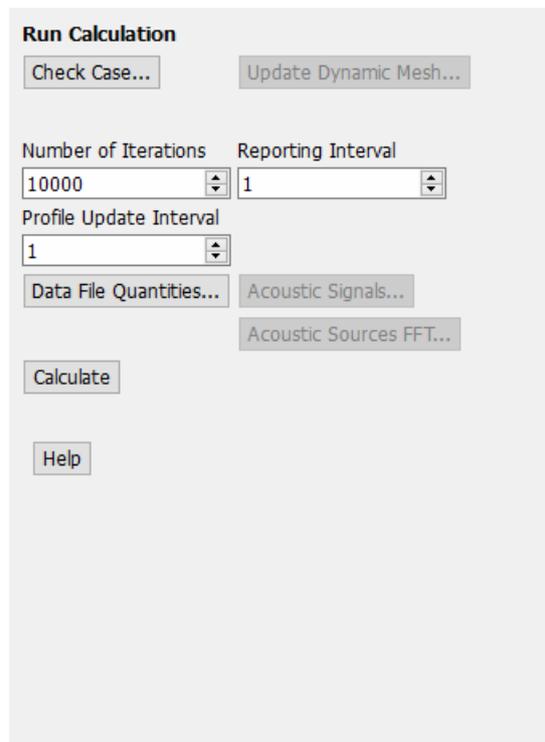
Metode *initialization* yang digunakan adalah metode *hybrid initialization*. Pada *hybrid initialization*, *pressure* atau tekanan dianggap konstan atau tidak berubah selama perhitungan berlangsung.



Gambar 4-16 Pemilihan Metode *Solution Initialization*

7) *Run Calculation*

Nilai *maximum iterations* dimasukkan sebesar 10.000. Setelah itu, perhitungan dapat dimulai dengan menekan tombol *calculate*.



Gambar 4-17 *Calculation Settings*

4.1.4. Post-processor

Post-processor yang akan ditinjau adalah *boundary layer thickness*, δ . Sesuai penjelasan pada bab 2.3, apabila simulasi dilakukan dengan benar, maka *boundary layer thickness* yang terbentuk di sepanjang pelat datar akan menyerupai Gambar 2-3. Namun, karena *boundary layer thickness* sangat kecil, maka tidak dapat dilihat perbedaan antara *boundary layer thickness* untuk kondisi *smooth* dan *boundary layer thickness* untuk kondisi *rough* secara lebih teliti apabila menggunakan fitur *contour* pada tahap *post-processor*. Cara lain untuk meninjau perbedaan tersebut adalah dengan membuat grafik *boundary layer thickness* secara manual.

4.2. Grid-Independence Study

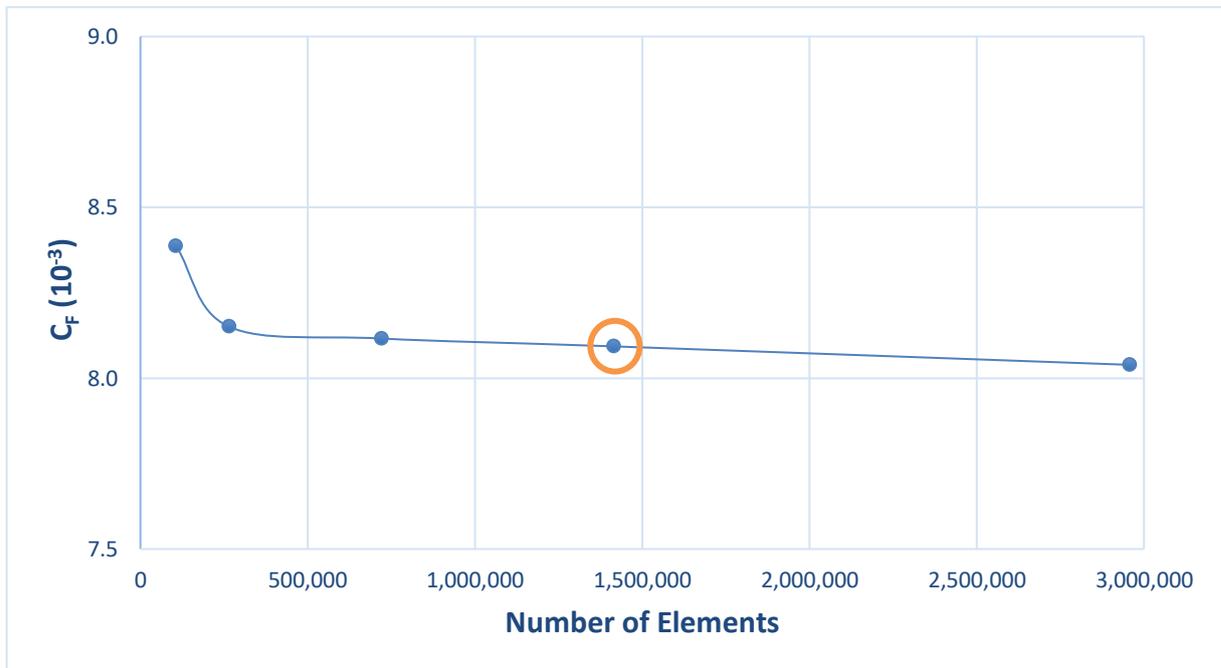
Sebelum melakukan analisis, perlu dilakukan *grid independence study* untuk memastikan bahwa ukuran *meshing* yang digunakan pada model dan *domain* tidak berpengaruh terhadap hasil dari simulasi. Dalam kata lain, keakurasian hasil simulasi tidak lagi dipengaruhi oleh jumlah *mesh* yang digunakan. Tata cara *grid independence study* adalah melakukan simulasi dengan jumlah elemen *mesh* terkecil, yaitu dalam penelitian ini sebanyak 105.750 elemen. Kemudian, jumlah elemen *mesh* ditingkatkan sebanyak 2 sampai 3 kali lipat dari jumlah *mesh* sebelumnya. Langkah ini diulang sebanyak 4 kali hingga jumlah *mesh* terbesar mencapai 2,956,710 elemen. *Grid independence* dicapai ketika hasil simulasi *mesh* yang lebih besar 2 sampai 3 kali lipat dari *mesh* sebelumnya dan hasil simulasi dari *mesh* sebelumnya itu sendiri hanya memiliki selisih di bawah 2%. Contoh *grid independence study* yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1 *Grid Independence Study*

No	Cell	$C_F (10^{-3})$	$C_F (CFD \text{ vs } ITTC) \text{ in } \%$	Selisih (%)
1	105.750	8,3876	3,45	
2	264.330	8,1511	0,53	2,90
3	720.360	8,1161	0,10	0,43
4	1.413.990	8,0926	0,19	0,29
5	2.956.710	8,0390	0,85	0,67

Contoh *grid independence study* ini dilakukan untuk validasi eksperimen *wind tunnel* oleh Yuliansyah (2019). *Grid independence study* cukup dilakukan pada satu kecepatan. Dalam contoh ini, *grid independence study* dilakukan pada kecepatan 3 m/s. Dapat dilihat pada nomor 4 bahwa *grid independence* telah dicapai dengan perbedaan sebesar 0.19% terhadap hasil perhitungan C_F dari ITTC dan perbedaan sebesar 0.291% antara simulasi dengan jumlah mesh 1.413.990 dan 2.956.710. Perbedaan tersebut memenuhi kriteria *grid independence* yaitu di

bawah 2%. Maka, *grid independence* telah dicapai pada jumlah *mesh* sebanyak 1.413.990 elemen. Hasil *grid independence study* pada Tabel 4-1 disajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4-18.



Gambar 4-18 *Grid Independence Study*

Pada **Gambar 4-18**, titik yang dilingkari adalah *nesh* dengan jumlah elemen 1.413.990.

4.3. **Pemodelan *Surface Roughness***

Pada penelitian ini, dilakukan validasi terhadap eksperimen pelat datar pada *wind tunnel* oleh Yuliansyah (2019), validasi terhadap simulasi numerik pelat datar oleh Suastika et al (2020) dan prediksi hambatan gesek menggunakan nilai kekasaran ekstrem dengan mengacu pada penelitian Suastika et al (2020). Hal ini untuk menganalisis efek kekasaran permukaan yang berada di rentang nilai kekasaran yang berbeda.

Nilai kekasaran *biofouling* yang digunakan untuk validasi eksperimen pelat datar oleh Yuliansyah (2019) direpresentasikan oleh *roughness height* yang serupa. Nilai kekasaran yang didapatkan merupakan hasil skala *biofouling* setelah dimodelkan berdasarkan *biofouling* yang menempel pada KM Mentari Pratama di PT PAL pada saat *dry-dock*. Faktor skala yang digunakan oleh Yuliansyah (2019) yaitu 1:175. Terdapat tiga amplas dengan kekasaran (*grit*) yang berbeda, hal ini untuk memodelkan persebaran *biofouling* yang telah diamati pada KM Mentari Pratama pada saat *survey*, yaitu *biofouling* paling banyak terdapat di bagian buritan (*stern*) kapal, *biofouling* paling sedikit terdapat di bagian tengah kapal (*midship*) dan persebaran

biofouling yang sedang terdapat di bagian haluan (*bow*) kapal. Variasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4-2.

Tabel 4-2 Skala Kekasaran *Biofouling* Menggunakan Amplas
(Sumber: Yuliansyah, 2019)

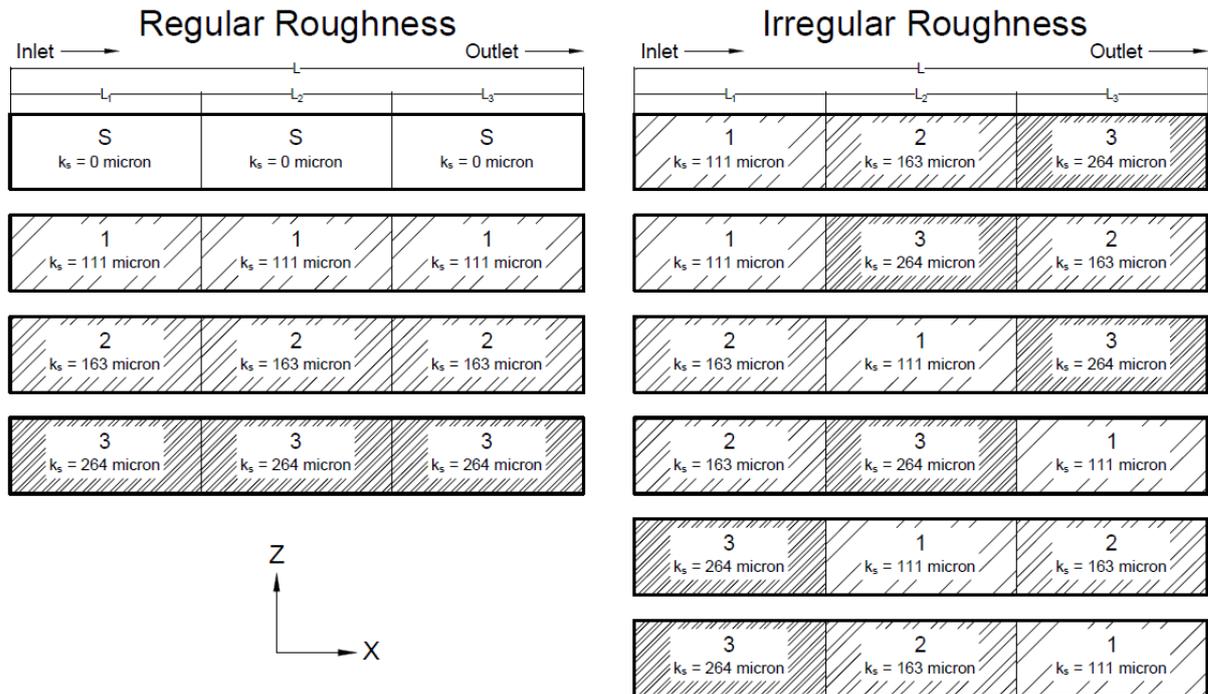
<i>Roughness</i>					
Section	ks (mm)	ks (μm)	Jenis/Ukuran Amplas		Dinotasikan sebagai
Stern	0.264	264	Amplas Medium	P60	Kasar 3
Midship	0.111	111	Amplas Sangat Halus	P150	Kasar 1
Bow	0.163	163	Amlas Halus	P100	Kasar 2

Perbedaan secara visual antara ketiga *grit* apabila dibandingkan dengan kondisi pelat yang *smooth* dapat dilihat pada Gambar 4-19.



Gambar 4-19 Perbedaan *grit* kekasaran amplas
(Sumber: Yuliansyah, 2019)

Terdapat 10 macam variasi kekasaran pelat datar yang digunakan, yaitu variasi *smooth plate*, variasi *regular roughness* dan variasi *irregular roughness*. Variasi yang digunakan pada eksperimen *wind tunnel* oleh Yuliansyah (2019) dapat dilihat pada Gambar 4-20. Kekasaran pada permukaan terbagi ke dalam 3 tingkat sebagaimana telah dijelaskan pada **sub-bab 2.5**. Perhitungan yang dilakukan untuk hasil eksperimen pelat datar Yuliansyah (2019) menggunakan persamaan (2.43) – (2.45).



Gambar 4-20 Variasi Kekasaran oleh Yuliansyah (2019)

Sedangkan, untuk simulasi validasi penelitian Suastika et al (2020), variasi kekasaran yang digunakan tertera pada Tabel 4-3. Urutan variasi kekasaran untuk validasi ini dapat dilihat pada Gambar 4-3.

Tabel 4-3 Kekasaran pada Penelitian Suastika et al (2020)

No.	k_s (μm)	Dinotasikan sebagai
1	81.25	Kasar 1
2	325	Kasar 2
3	568,75	Kasar 3

Setelah dilakuakn uji validasi terhadap penelitian Suastika et al (2020), maka dilakukan prediksi *skin friction coefficient* dengan nilai kekasaran yang lebih besar. Pada prediksi kali ini, model dan domain yang digunakan mengacu pada model yang digunakan oleh Suastika et al (2020). Dalam penelitian tersebut, dilakukan prediksi *skin friction coefficient* untuk pelat datar dengan variasi dimensi sebagaimana tertera pada Tabel 4-4.

Tabel 4-4 Ukuran Model pada Penelitian Suastika et al (2020)
(Sumber: Suastika, 2020)

No	L (m)	B (m)
1	30	3
2	60	6
3	120	12
4	240	24

Dari empat variasi model pelat datar yang ada, hanya digunakan dua variasi model yaitu $L = 30 \text{ m} \ \& \ B = 3 \text{ m}$ dan $L = 60 \text{ m} \ \& \ B = 6 \text{ m}$. Kedua model tersebut dipilih menyesuaikan dengan kemampuan komputasi yang ada. Masing-masing model diuji pada dua variasi kecepatan yaitu 19 knot (9,78 m/s) dan 23,32 knot (12 m/s).

Selanjutnya, pemilihan nilai kekasaran *extreme* untuk simulasi prediksi penelitian Suastika et al (2020) ini didasarkan pada percobaan yang dilakukan oleh Schultz (2007). Pada percobaan tersebut, Schultz (2007) mengasumsikan nilai kekasaran teknis *biofouling* dapat direpresentasikan dengan nilai kekasaran yang setara menggunakan *roughness height* sebagaimana tertera pada Tabel 4-5.

Tabel 4-5 Padanan Nilai Kekasaran pada Percobaan Schultz (2007)

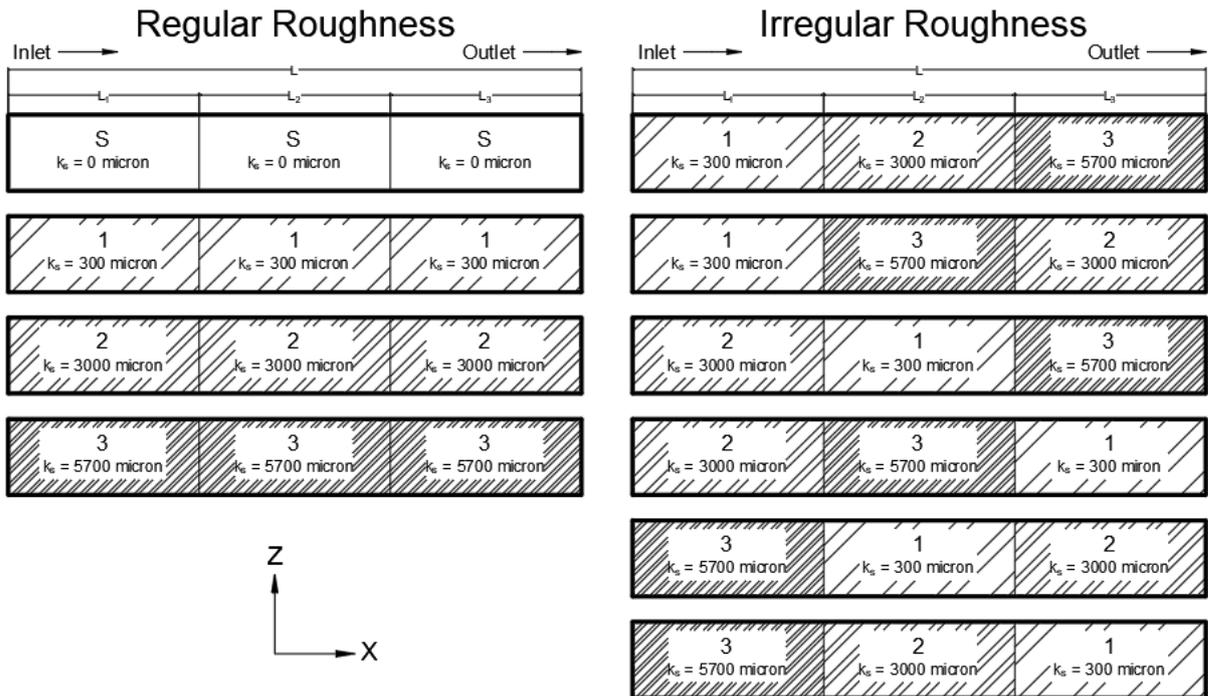
No	Description of Condition	$k_s \ (\mu\text{m})$
1	Hydraulically smooth surface	0
2	Typical as applied AF coating	30
3	Deteriorated coating or light slime	100
4	Heavy slime	300
5	Small calcareous fouling or weed	1000
6	Medium calcareous fouling	3000
7	Heavy calcareous fouling	10000

Apabila dilakukan perbandingan, maka penelitian Suastika et al (2020) menggunakan nilai kekasaran yang merepresentasikan *biofouling* yang berbentuk *light slime* sampai *heavy slime*. Oleh karena itu, prediksi penelitian Suastika et al (2020) menggunakan nilai kekasaran *extreme* yang dapat merepresentasikan *biofouling* yang berbentuk *heavy slime* sampai *medium – heavy calcareous fouling*. Hal ini dilakukan untuk mencari tau perbedaan koefisien hambatan gesek (ΔC_F) untuk variasi kekasaran yang berbeda. Nilai kekasaran yang disimulasikan pada prediksi ini tertera pada Tabel 4-6.

Tabel 4-6 Kekasaran Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)

No.	Extreme $k_s \ (\mu\text{m})$	Dinotasikan sebagai
1	300	Kasar 1
2	3000	Kasar 2
3	5700	Kasar 3

Sama seperti simulasi sebelumnya, variasi yang digunakan untuk simulasi prediksi penelitian Suastika et al (2020) dapat dilihat pada Error! Reference source not found.. Efek kekasaran pada simulasi prediksi ini tergolong ke dalam tingkat *fully rough regime*, yang ditentukan menggunakan persamaan (2.43) – (2.45).



Gambar 4-21 Variasi Kekasaran Ekstrem untuk Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Pengolahan Data

Bentuk dari model uji memiliki pengaruh terhadap tekanan yang diterimanya. Bentuk tersebut kemudian menimbulkan gaya searah dengan gaya gesek. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh dari proses perhitungan numerik ini yaitu *drag*, terdiri dari hambatan *viscous* dan hambatan *pressure*. Hambatan *pressure* dapat diabaikan karena pelat datar memiliki tekanan yang mendekati atau sama dengan nol karena bentuknya, sehingga persamaan (2.5) menjadi:

$$R_T = R_F \dots \dots \dots (5.1)$$

Setelah didapatkan nilai hambatan gesek, maka *skin friction coefficient* (C_F) dapat dihitung dengan persamaan (2.9). Nilai *skin friction coefficient* yang didapat pada simulasi *smooth plate* kemudian dibandingkan dengan nilai *skin friction coefficient* menggunakan persamaan (2.7), yaitu persamaan *correlation line* dari ITTC. Selisih perbedaan tersebut dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$\frac{C_{FCFD} - C_{FITTC}}{C_{FITTC}} \times 100\% \dots \dots \dots (5.2)$$

Persamaan (5.2) juga dapat digunakan untuk mencari selisih perbedaan untuk hasil simulasi *regular roughness* maupun *irregular roughness* dengan *smooth plate*, sehingga:

$$\Delta C_F = \frac{C_{Frough} - C_{Fsmooth}}{C_{Fsmooth}} \times 100\% \dots \dots \dots (5.3)$$

5.2. Simulasi CFD untuk Eksperimen Wind Tunnel

Hasil *drag* untuk simulasi *smooth hull* eksperimen *wind tunnel*, di mana $L = 0,56$ m, diperoleh untuk 5 variasi kecepatan, sebagaimana tertera pada tabel Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Hasil Drag CFD

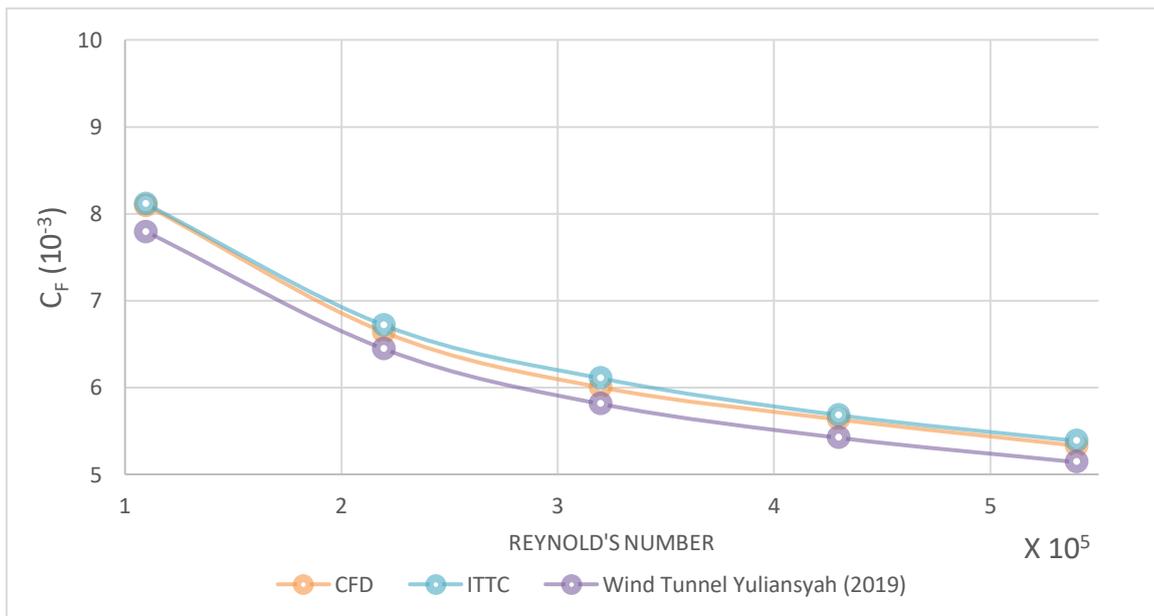
No	V (m/s)	Re	Drag (10^{-3} N)		%
			ITTC	CFD	
1	3	$1,10 \times 10^5$	3,6108	3,6040	0,19
2	6	$2,20 \times 10^5$	11,9589	11,8166	1,19
3	9	$3,20 \times 10^5$	24,4671	24,0490	1,71
4	12	$4,30 \times 10^5$	40,4790	40,1241	0,88
5	15	$5,40 \times 10^5$	59,9402	59,3297	1,02

Hasil *skin friction coefficient* dari simulasi CFD yang telah dibandingkan dengan nilai C_F dari pendekatan ITTC dan dari eksperimen *wind tunnel* (WT) oleh Yuliansyah (2019) disajikan dalam Tabel 5-2.

Tabel 5-2 Perbandingan *Skin Friction Coefficient* untuk *Smooth Plate*

No.	V (m/s)	Re	C_F		%	C_F		%
			ITTC	CFD		WT	CFD	
1	3	$1,1 \times 10^5$	8,1080	8,0926	0,19	7,7900	8,0926	3,88
2	6	$2,2 \times 10^5$	6,7133	6,6335	1,19	6,4400	6,6335	3,00
3	9	$3,2 \times 10^5$	6,1045	6,0002	1,71	5,8100	6,0002	3,27
4	12	$4,3 \times 10^5$	5,6809	5,6311	0,88	5,4200	5,6311	3,89
5	15	$5,4 \times 10^5$	5,3838	5,3289	1,02	5,1400	5,3289	3,68

Perbedaan hasil hambatan yang terbesar antara simulasi CFD dan ITTC adalah ketika kecepatan pelat datar mencapai 9 m/s, sedangkan perbedaan hasil hambatan terkecil dicapai ketika kecepatan sebesar 3 m/s. Perbedaan tersebut diakibatkan oleh beberapa variabel yang kepastiannya tidak diketahui secara pasti, seperti intensitas turbulensi. Tidak ada data terkait intensitas turbulensi pada *wind tunnel* ketika eksperimen pelat datar ini dilakukan. Meskipun begitu, hasil simulasi CFD sesuai dengan hasil perhitungan koefisien hambatan gesek menggunakan rumus ITTC, yang dapat dilihat pada persamaan (2.7). Oleh karena itu, simulasi ini dapat dikatakan *valid*. Gambar 5-1 merupakan ilustrasi untuk Tabel 5-2 Perbandingan *Skin Friction Coefficient* untuk *Smooth Plate* Tabel 5-2.



Gambar 5-1 Perbandingan *Skin Friction Coefficient* untuk *Smooth Plate*

Gambar 5-1 merupakan ilustrasi untuk Tabel 5-2 Perbandingan *Skin Friction Coefficient* untuk *Smooth Plate* Tabel 5-2. Dapat dilihat bahwa garis C_F hasil simulasi CFD berimpit dengan

garis C_F dari perhitungan ITTC, yaitu sesuai dengan Tabel 5-2 di mana perbedaan di antara keduanya mencapai 0.19 – 1.74%. Sedangkan, garis C_F hasil eksperimen *wind tunnel* menunjukkan *gap* lebih besar, yaitu sesuai dengan Tabel 5-2 di mana perbedaan di antara keduanya mencapai 2.94 – 3.92%.

Selain *smooth hull*, dilakukan juga simulasi CFD *regular roughness* yang menyesuaikan eksperimen *wind tunnel* oleh Yuliansyah (2019). Hasil eksperimen Yuliansyah (2019) dapat dilihat pada Tabel 5-3. K1 sebagai notasi untuk kekasaran 1 (111 micron), K2 sebagai notasi untuk kekasaran 2 (163 micron) dan K3 sebagai notasi untuk kekasaran 3 (264 micron).

Tabel 5-3 Hasil Eksperimen *Wind Tunnel* untuk Regular Roughness
(Sumber: Yuliansyah, 2019)

No	V (m/s)	Re	$C_F (10^{-3})$				Kenaikan C_F (%)		
			Smooth	K1	K2	K3	K1 (%)	K2 (%)	K3 (%)
1	3	$1,1 \times 10^5$	7,79	10,58	14,83	17,06	35,82	90,37	119,00
2	6	$2,2 \times 10^5$	6,44	7,46	8,8	9,94	15,84	36,65	54,35
3	9	$3,2 \times 10^5$	5,81	6,47	7,38	8,1	11,36	27,02	39,42
4	12	$4,3 \times 10^5$	5,42	6,01	6,7	7,34	10,89	23,62	35,42
5	15	$5,4 \times 10^5$	5,14	5,66	6,27	6,82	10,12	21,99	32,69

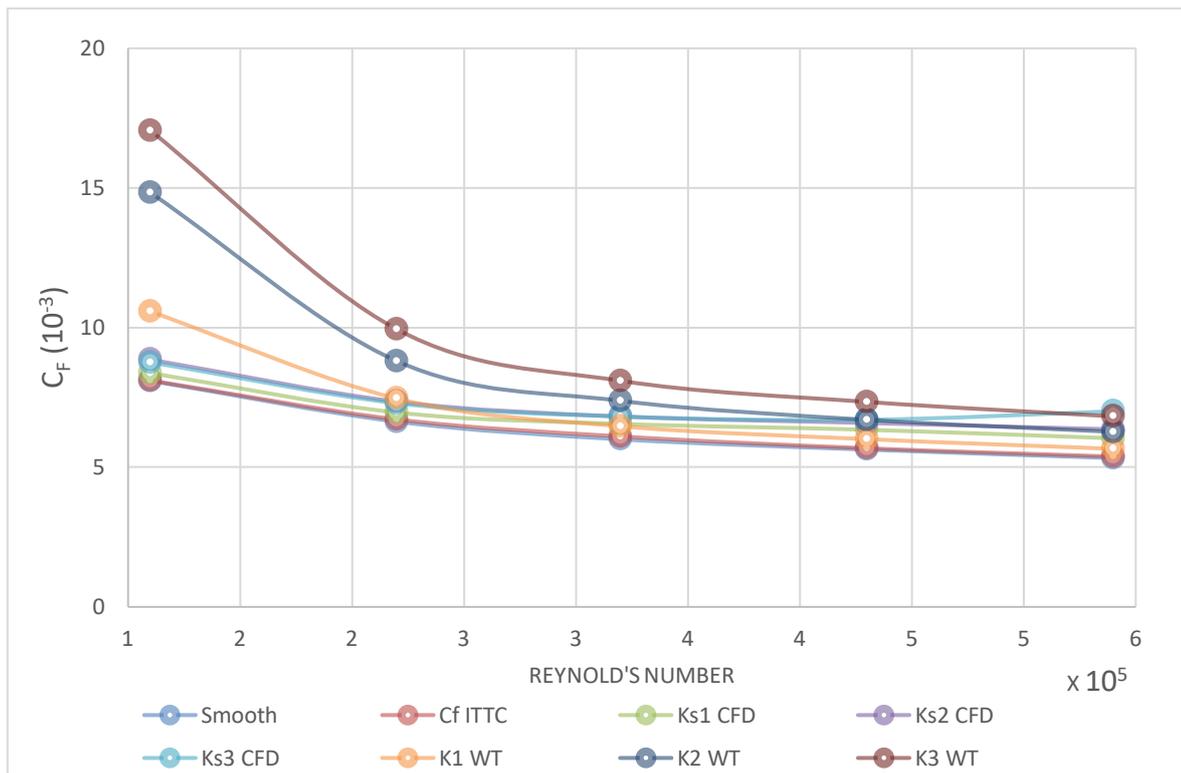
Sedangkan, nilai $C_{F_{rough}}$ dari simulasi CFD untuk eksperimen *wind tunnel* disajikan dalam Tabel 5-4.

Tabel 5-4 Hasil CFD untuk *Regular Roughness* Eksperimen *Wind Tunnel*

No	V (m/s)	Re	$C_F (10^{-3})$				Kenaikan C_F (%)		
			Smooth	K1	K2	K3	K1 (%)	K2 (%)	K3 (%)
1	3	$1,1 \times 10^5$	8,0926	8,3715	8,8543	8,7575	3,45	9,41	8,22
2	6	$2,2 \times 10^5$	6,6335	6,9608	7,3509	7,2915	4,93	10,82	9,92
3	9	$3,2 \times 10^5$	6,0002	6,5540	6,8195	6,8150	9,23	13,65	13,58
4	12	$4,3 \times 10^5$	5,6311	6,3426	6,5851	6,7015	12,63	16,94	19,01
5	15	$5,4 \times 10^5$	5,3289	6,0364	6,3596	7,0032	13,28	19,34	31,42

Jika dibandingkan, maka kenaikan *skin friction coefficient* (ΔC_F) akibat kekasaran antara eksperimen Yuliansyah (2019) dan simulasi CFD berbeda jauh. Perbedaan ini juga terletak pada *trend* ΔC_F . Pada eksperimen Yuliansyah (2019), nilai ΔC_F (%) mengalami penurunan dari 35,75% (kekasaran 1), 90, 39% (kekasaran 2) dan 118,97% (kekasaran 3) pada kecepatan 3m/s menjadi masing-masing 10,12% (kekasaran 1), 21,93% (kekasaran 2) dan 32,72% (kekasaran 3) secara berurutan. Hal ini dapat terjadi karena adanya variabel yang tidak diketahui, seperti nilai konstanta kekasaran (C_S) dapat ditemukan pada persamaan (2.44) dan persamaan (2.45), yaitu untuk menentukan nilai dari fungsi kekasaran (ΔU^+). Sehingga,

konstanta kekasaran dapat mempengaruhi hasil *drag* yang didapatkan baik dari eksperimen *wind tunnel* maupun simulasi CFD. Pada ANSYS Fluent, nilai *default* dari $C_s = 0.5$, sedangkan nilai konstanta kekasaran untuk masing-masing *grit* amplas yang digunakan oleh Yuliansyah (2019) tidak diketahui. Gambar 5-2 merupakan ilustrasi dari perbedaan koefisien hambatan untuk *regular roughness* antara simulasi CFD dan eksperimen *wind tunnel*.



Gambar 5-2 Perbandingan *Regular Roughness* antara CFD dan Wind Tunnel

Selain *skin friction coefficient*, dapat dilakukan perbandingan antara nilai *roughness Reynolds number* (K_s^+) dari masing-masing simulasi CFD dan eksperimen *wind tunnel*. Nilai K_s^+ dihitung untuk masing-masing simulasi CFD dan eksperimen *wind tunnel* menggunakan persamaan (2.41) – (2.43). Mengacu pada kriteria *roughness Reynolds Number*, maka efek kekasaran yang digunakan oleh Yuliansyah (2019) dan penelitian ini sebagian besar tergolong ke dalam *transitional regime*, kecuali untuk kecepatan 3m/s.

Tabel 5-5 Nilai K_s^+ untuk Eksperimen Wind Tunnel dan Simulasi CFD

No.	V (m/s)	Re	K _s ⁺ Wind Tunnel			K _s ⁺ CFD		
			K1	K2	K3	K1	K2	K3
1	3	1,1×10 ⁵	1,56	2,71	4,71	1,39	2,10	3,38
2	6	2,2×10 ⁵	2,62	4,18	7,20	2,53	3,82	6,16
3	9	3,2×10 ⁵	3,66	5,74	9,74	3,69	5,52	8,94
4	12	4,3×10 ⁵	4,70	7,30	12,37	4,83	7,23	11,82
5	15	5,4×10 ⁵	5,71	8,82	14,91	5,90	8,89	15,10

Pada tingkat *smooth regime*, partikel kekasaran cukup kecil sehingga dapat diredam oleh viskositas. Seiring meningkatnya *roughness Reynolds Number*, yaitu memasuki tingkat *transitionally rough regime*, partikel kekasaran mulai menghasilkan *pressure drag* yang dapat meningkatkan nilai *roughness function* dan meningkatkan *frictional drag* (Schultz, 2007).

5.3. Simulasi CFD untuk Validasi Penelitian Suastika et al (2020)

Adanya variabel yang tidak diketahui pada percobaan Yuliansyah (2019) menyebabkan tidak dapat dilakukan validasi menggunakan simulasi CFD. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan juga validasi terhadap penelitian Suastika et al (2020). Di mana pada penelitian Suastika et al (2020) mencakup pengujian pelat datar dengan kondisi permukaan *smooth*, *regular roughness* dan *irregular roughness* menggunakan metode CFD. Pada kali ini hanya dilakukan validasi terhadap kondisi permukaan *smooth* dan *regular roughness*. Model yang digunakan adalah pelat datar dengan $L = 30$ m dan $B = 3$ m dengan *Reynolds Number* sebesar 2.79×10^8 .

Tabel 5-6 Validasi Penelitian *Regular Roughness* Suastika et al (2020) untuk $L = 30$ m

Notasi	Ks (micron)	$C_F (10^{-3})$ (Suastika et al, 2020)	$C_F (%)$	$C_F (10^{-3})$ CFD	$\Delta C_F (%)$
S	0	1,8052	-	1,7865	-
Ks1	81,25	2,2499	24,63	2,2536	24,84
Ks2	325	2,9407	62,9	2,9392	62,82
Ks3	568,75	3,2400	79,48	3,2573	80,44

Tabel 5-6 merupakan perbandingan antara *skin friction coefficient* yang diperoleh oleh Suastika et al (2020) dengan *skin friction coefficient* yang diperoleh pada penelitian ini. Hasil simulasi CFD yang telah dilakukan menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda, yaitu dengan selisih nilai di bawah 5% dengan hasil penelitian Suastika et al (2020). Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa simulasi yang telah dilakukan bersifat *valid*.

5.4. Simulasi CFD untuk Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)

Setelah simulasi CFD untuk kekasaran reguler ekstrem selesai dilakukan, nilai *drag* yang didapatkan dari proses perhitungan numerik digunakan untuk menentukan nilai hambatan gesek, sebagaimana telah dilakukan untuk simulasi CFD *wind tunnel* dan simulasi CFD untuk validasi penelitian Suastika et al (2020). Nilai *drag* tersebut secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A.

Tabel 5-7 Prediksi C_F *Extreme Regular Roughness* untuk $L = 30$ m

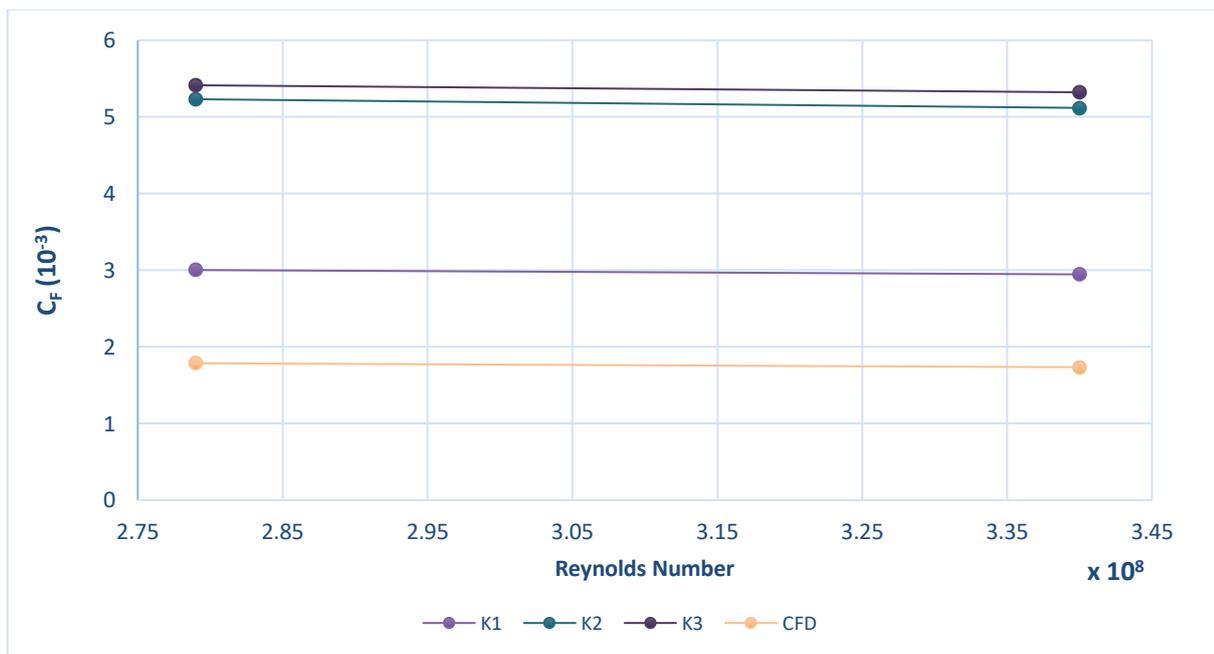
V (m/s)	Re	C_F CFD (10^{-3})	C_F K1 (10^{-3})	C_F K2 (10^{-3})	C_F K3 (10^{-3})
9,775	$2,79 \times 10^8$	1,7865	3,0025	5,2312	5,4131
12	$3,40 \times 10^8$	1,7340	2,9457	5,1176	5,3214

Dapat dilihat pada Tabel 5-7 bahwa perbedaan antara C_F untuk kondisi *smooth* dan C_F untuk kekasaran *regular roughness* cukup signifikan. Besar perubahan tersebut jika disajikan dalam bentuk persentase (%) sebagaimana tertera pada Tabel 5-8.

Tabel 5-8 Prediksi C_F *Extreme Regular Roughness* (%) untuk $L = 30$ m

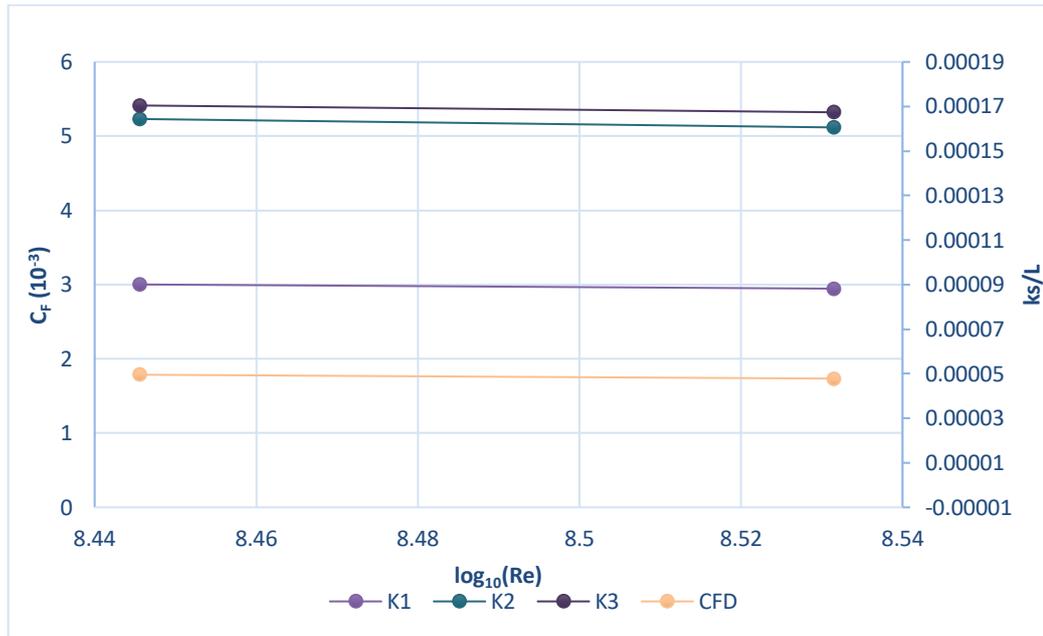
V (m/s)	Re	C_F CFD (10^{-3})	ΔC_F K1 (%)	ΔC_F K2 (%)	ΔC_F K3 (%)
9,775	$2,79 \times 10^8$	1,7865	68,07	192,82	203,00
12	$3,40 \times 10^8$	1,7340	69,89	195,14	206,89

Kenaikan *skin friction coefficient* didapatkan menggunakan persamaan (5.3). Kenaikan C_F pada $L = 30$ m untuk kedua kecepatan dapat dikatakan konstan. Hal ini dapat disebabkan oleh efek kekasaran yang digunakan tergolong ke dalam tingkat *fully rough regime*, yaitu ketika komponen *drag* pada tingkat ini disebabkan sepenuhnya oleh *pressure drag* yang dialami elemen kekasaran (Schultz, 2007). Ilustrasi kenaikan C_F ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 5-3.



Gambar 5-3 Prediksi C_F *Extreme Regular Roughness* $L = 30$ m

Pada Gambar 5-3, terlihat bahwa kurva C_F terhadap *Reynolds Number* membentuk garis lurus. Hal ini menandakan efek kekasaran dengan *extreme regular roughness* pada $L = 30$ m termasuk ke dalam *fully rough regime*.



Gambar 5-4 Hubungan Antara C_F dan *Extreme Regular Roughness* $L = 30$ m

Gambar 5-4 menunjukkan hubungan antara C_F untuk $L = 30$ m dan *extreme regular roughness* yang dinotasikan dengan k_s/L . Dapat dilihat bahwa pada grafik tersebut, kurva C_F terhadap $\log_{10} Re$ membentuk garis lurus. Kemudian, dilakukan simulasi CFD untuk *irregular roughness* dengan kekasaran ekstrem sesuai variasi kekasaran yang diilustrasikan pada **Gambar 4-21**. Setelah simulasi CFD untuk kekasaran irregular ekstrem selesai dilakukan, nilai *drag* yang didapatkan dari proses perhitungan numerik digunakan untuk menentukan nilai hambatan gesek, sebagaimana telah dilakukan untuk simulasi-simulasi sebelumnya. Nilai *drag* tersebut secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A.

Tabel 5-9 Prediksi C_F *Extreme Irregular Roughness* $L = 30$ m

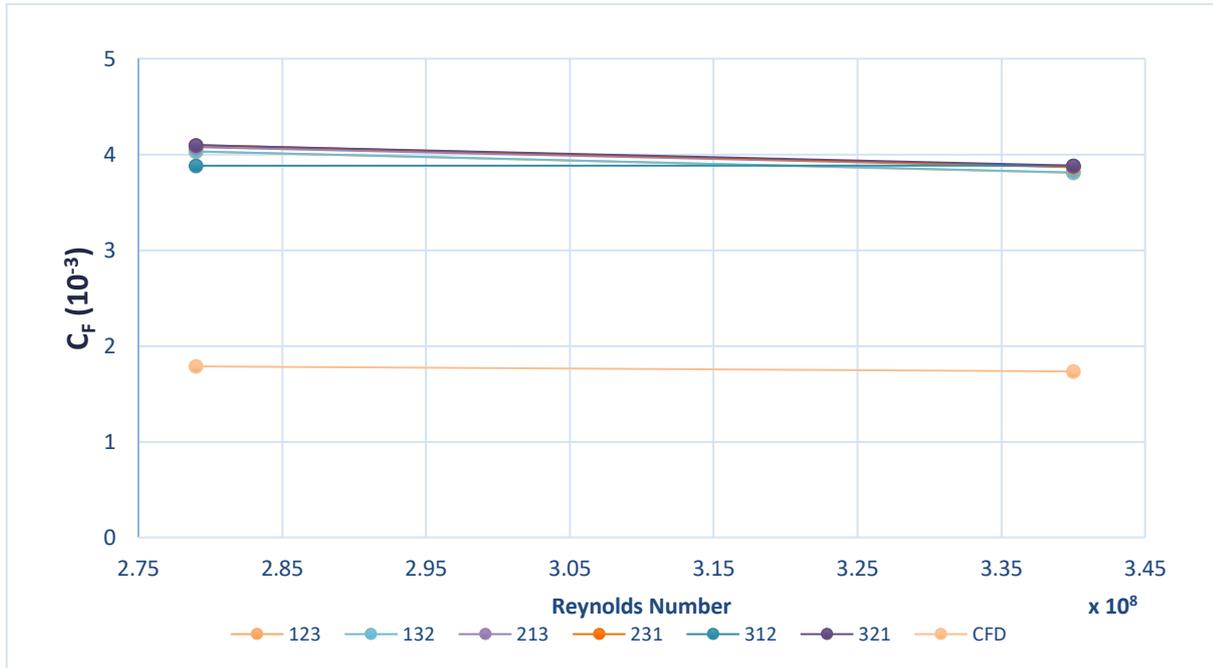
No	V (m/s)	Re	$C_F (10^{-3})$					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	4,0298	4,0309	4,0759	4,0971	3,8817	4,0971
2	12	$3,40 \times 10^8$	3,8076	3,8112	3,8660	3,8690	3,8829	3,8829

Dapat dilihat pada Tabel 5-9 bahwa perbedaan antara C_F untuk kondisi *smooth* dan C_F untuk kekasaran *irregular roughness* cukup signifikan. Besar perubahan tersebut jika disajikan dalam bentuk persentase (%) sebagaimana tertera pada Tabel 5-10.

Tabel 5-10 Prediksi C_F *Extreme Irregular Roughness* (%) $L = 30$ m

No	V (m/s)	Re	$C_F (10^{-3})$					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	125,57	125,63	128,15	129,34	117,28	129,34
2	12	$3,40 \times 10^8$	119,59	119,80	122,96	123,13	123,94	123,94

Ilustrasi kenaikan C_F ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 5-5.



Gambar 5-5 Prediksi C_F Extreme Irregular Roughness $L = 30$ m

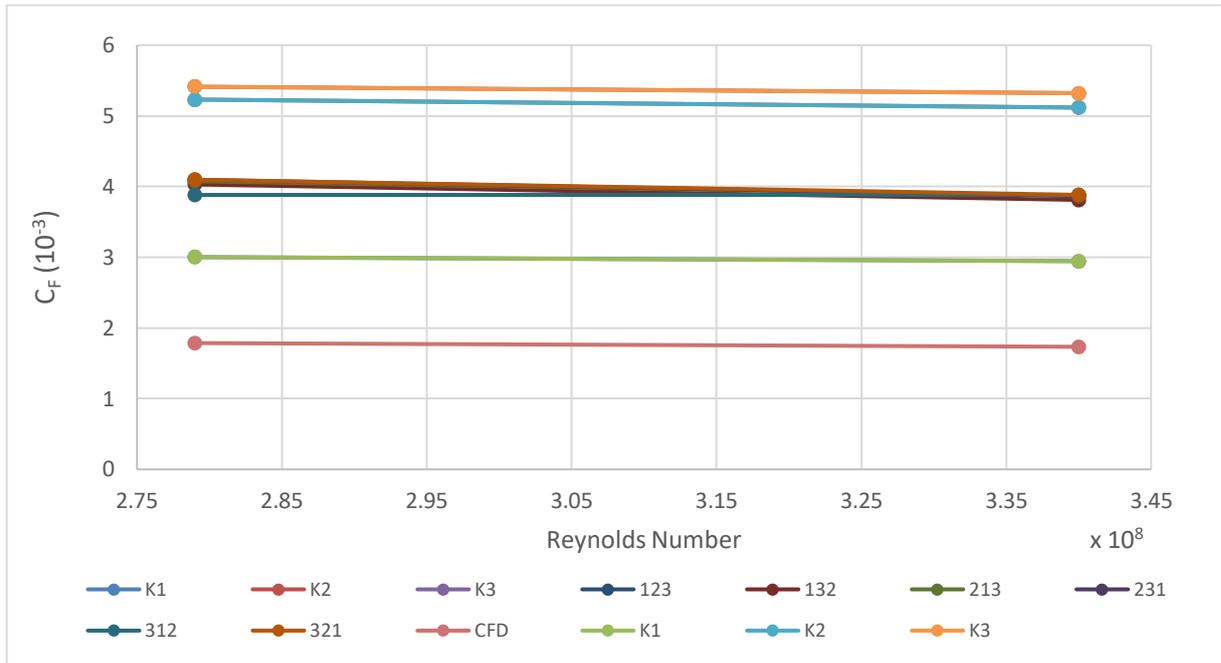
Hasil prediksi *extreme regular roughness* untuk $L = 30$ m memiliki kenaikan C_F yang lebih besar dari pada kenaikan C_F dengan *extreme irregular roughness*. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Suastika et al (2020) yaitu persentase kenaikan C_F *irregular roughness* lebih kecil dari persentase kenaikan C_F *regular roughness* yang memiliki nilai *averaged roughness length scale* yang serupa. Nilai rata-rata dari *extreme roughness height* yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\frac{k_{s1} + k_{s2} + k_{s3}}{3} = \bar{k}_s \dots\dots\dots (5.4)$$

Sehingga,

$$\frac{300 \mu m + 3000 \mu m + 5700 \mu m}{3} = 3000 \mu m = \bar{k}_s \dots\dots\dots (5.5)$$

Pada Gambar 5-6, dapat dilihat bahwa kurva yang menunjukkan kekasaran *irregular roughness* berada di bawah kurva *regular roughness* $K_s 2$ (3000 micron) dan di atas kurva *regular roughness* $K_s 1$ (300 micron).



Gambar 5-6 Perbandingan C_F Extreme Regular dan Irregular Roughness $L = 30$ m

Selanjutnya, dilakukan simulasi kekasaran ekstrem untuk $L = 60$ m. Nilai *drag* hasil simulasi ini secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A. Kemudian, nilai C_F ditentukan dengan cara yang sama seperti penentuan nilai C_F untuk simulasi *wind tunnel* dan simulasi CFD untuk validasi penelitian Suastika et al (2020), yaitu dengan menggunakan persamaan (2-9).

Tabel 5-11 Prediksi C_F Extreme Regular Roughness untuk $L = 60$ m

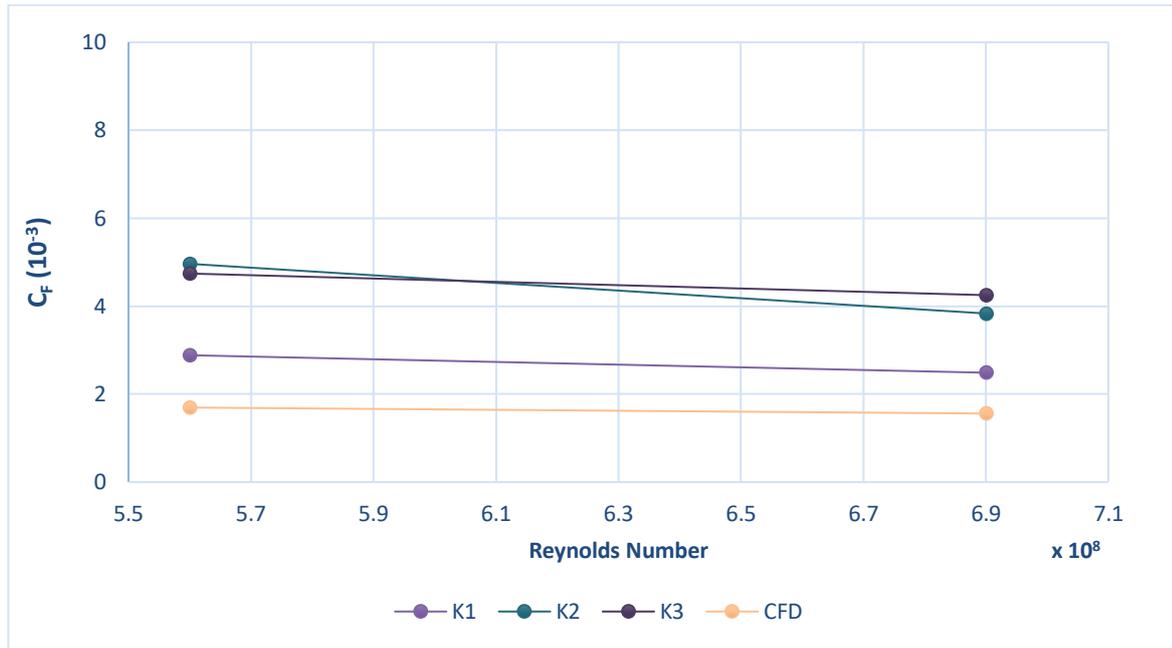
V (m/s)	Re	C_F CFD (10^{-3})	C_F K1 (10^{-3})	C_F K2 (10^{-3})	C_F K3 (10^{-3})
9.78	$5,60 \times 10^8$	1,6960	2,8852	4,9625	4,7425
12	$6,90 \times 10^8$	1,5601	2,4880	3,8345	4,2511

Besar perubahan tersebut jika disajikan dalam bentuk persentase (%) sebagaimana tertera pada Tabel 5-12.

Tabel 5-12 Persentasi Kenaikan C_F Extreme Regular Roughness untuk $L = 60$ m

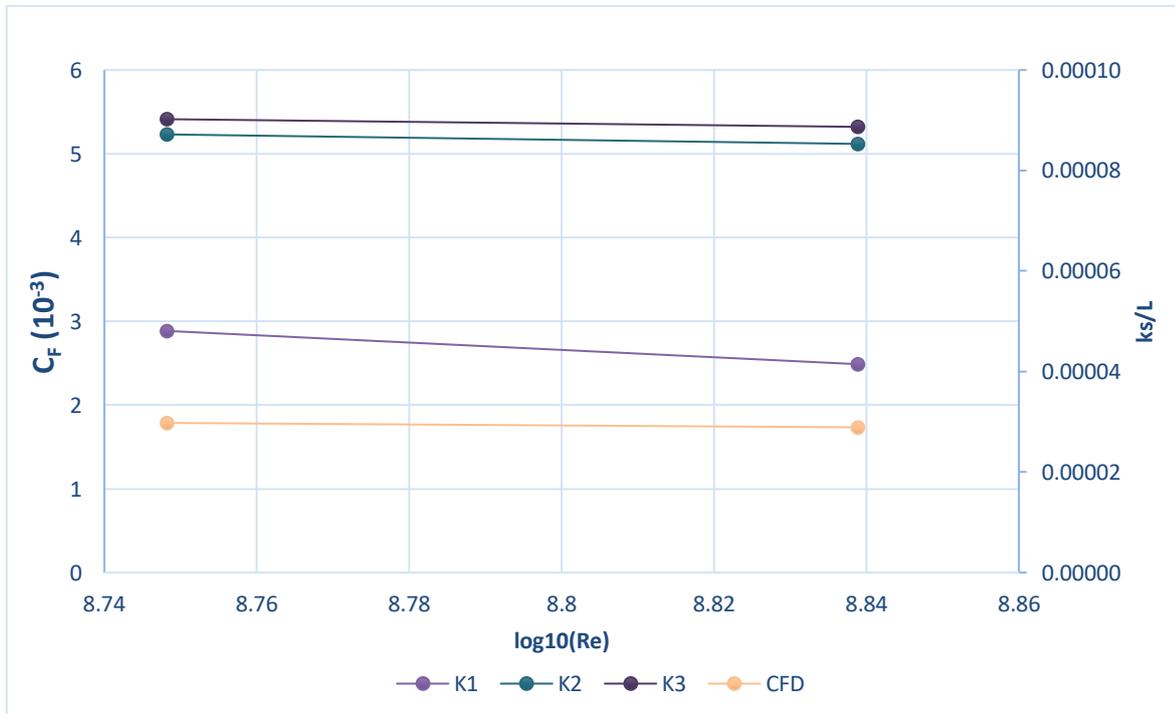
V (m/s)	Re	C_F CFD (10^{-3})	ΔC_F K1 (%)	ΔC_F K2 (%)	ΔC_F K3 (%)
9.78	$5,60 \times 10^8$	1,6960	70,12	192,61	179,63
12	$6,90 \times 10^8$	1,5601	59,47	145,78	172,49

Kenaikan *skin friction coefficient* didapatkan menggunakan persamaan (5.3). Kenaikan C_F pada $L = 60$ m untuk kedua kecepatan memiliki trend yang sama dengan trend kenaikan C_F pada $L = 30$ m, yaitu sama-sama mengalami penurunan, meski pun terdapat perbedaan yang cukup jauh di antara kedua trend penurunan tersebut. Ilustrasi kenaikan C_F ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 5-7.



Gambar 5-7 Prediksi C_F dengan Nilai Kekasaran Ekstrem Reguler untuk $L = 60$ m

Pada Gambar 5-7, terlihat bahwa kurva C_F terhadap $Reynolds$ Number membentuk garis lurus. Hal ini menandakan efek kekasaran dengan *extreme regular roughness* pada $L = 60$ m termasuk ke dalam *fully rough regime*.



Gambar 5-8 Hubungan Antara C_F dan Extreme Regular Roughness $L = 60$ m

Gambar 5-8 menunjukkan hubungan antara C_F untuk $L = 60$ m dan *extreme regular roughness* yang dinotasikan dengan k_s/L . Dapat dilihat bahwa pada grafik tersebut, kurva C_F terhadap $\log_{10} Re$ membentuk garis lurus.

Kemudian, dilakukan simulasi CFD *irregular roughness* pada pelat datar $L = 60$ m dengan variasi kekasaran ekstrem sesuai Gambar 4-21. Nilai *drag* hasil simulasi CFD ini secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran A. Setelah itu, nilai C_F untuk masing-masing variasi kekasaran pada pelat datar $L = 60$ m tertera pada Tabel 5-13.

Tabel 5-13 Prefiksi C_F *Ekstreme Irregular Roughness* untuk $L = 60$ m

No	V (m/s)	Re	$C_F (10^{-3})$					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	5,2720	5,2403	5,2598	4,6501	4,6390	4,6541
2	12	$6,90 \times 10^8$	3,5276	3,5249	3,5541	3,5278	3,5487	3,5392

Dapat dilihat pada Tabel 5-13, nilai C_F bernilai konstan untuk semua jenis variasi kekasaran pada kecepatan 12 m/s, sedangkan nilai C_F bernilai cukup fluktuatif pada kecepatan 9,775 m/s namun tetap pada rentang yang sama yaitu $C_F \approx 0,005$.

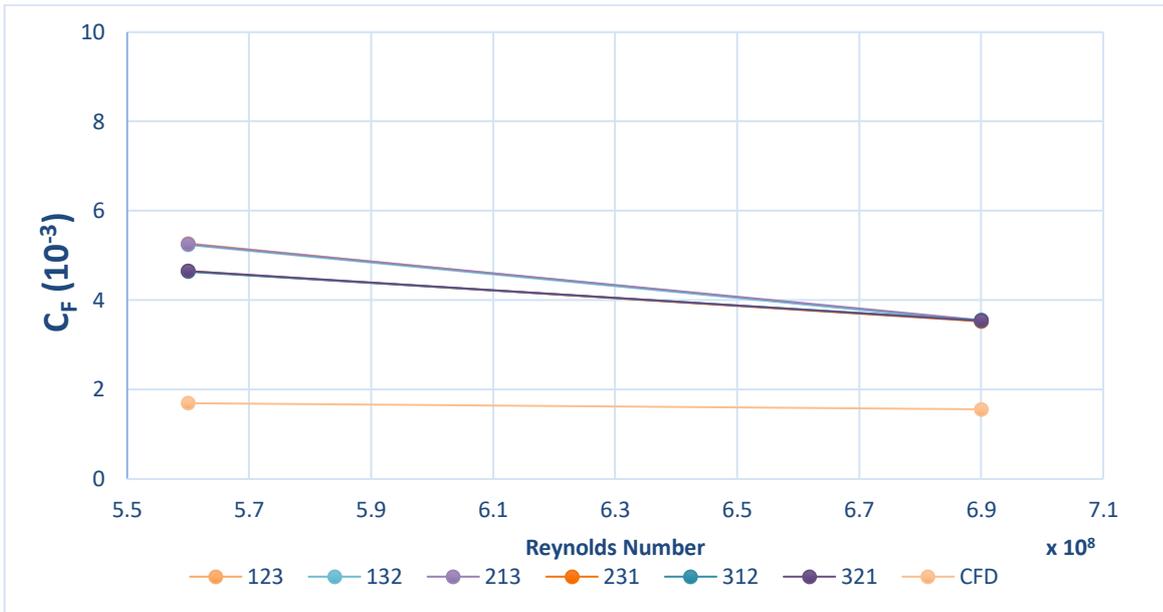
Persentase peningkatan nilai C_F untuk variasi kekasaran *irregular roughness* dapat dilihat pada Tabel 5-14.

Tabel 5-14 Persentase Kenaikan C_F *Ekstreme Irregular Roughness* untuk $L = 60$ m

No	V (m/s)	Re	$C_F (10^{-3})$					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	210,86	208,98	210,14	174,19	173,53	174,42
2	12	$6,90 \times 10^8$	126,11	125,94	127,81	126,12	127,47	126,85

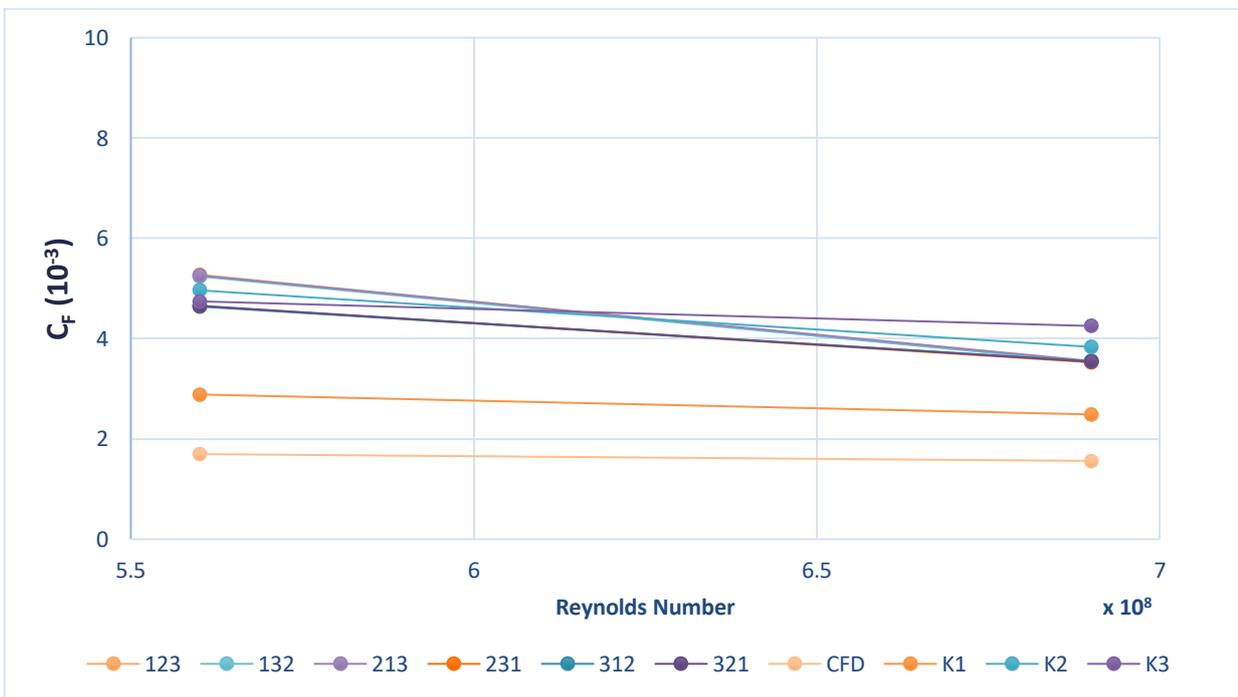
Pada variasi kekasaran 123, 132 dan 213 untuk $Re = 2,79 \times 10^8$ kenaikan nilai C_F untuk pelat datar $L = 60$ m yang diprediksi melebihi kenaikan nilai C_F untuk pelat datar $L = 60$ m akibat kekasaran *regular* yang telah dirata-rata. Hal ini tidak sesuai dengan hasil penelitian Suastika et al (2020), bahwa persentase kenaikan C_F *irregular roughness* lebih kecil dari persentase kenaikan C_F *regular roughness* dengan nilai *averaged roughness height* yang serupa dengan *roughness height* pada *irregular roughness*.

Namun, pada variasi kekasaran 231, 312 dan 321, kenaikan nilai C_F untuk $L = 60$ m yang diprediksi sesuai dengan kenaikan nilai C_F untuk pelat datar $L = 60$ m akibat kekasaran *regular* yang telah dirata-rata, sehingga sesuai dengan hasil penelitian Suastika et al (2020). Ilustrasi kenaikan C_F akibat *extreme irregular roughness* untuk pelat datar $L = 60$ m dapat dilihat pada Gambar 5-9.



Gambar 5-9 Prediksi C_F dengan Nilai *Extreme Irregular Roughness* untuk $L = 60$ m

Ilustrasi kenaikan C_F akibat *extreme regular roughness* dan *extreme irregular roughness* untuk pelat datar $L = 60$ m dapat dilihat pada Gambar 5-10.

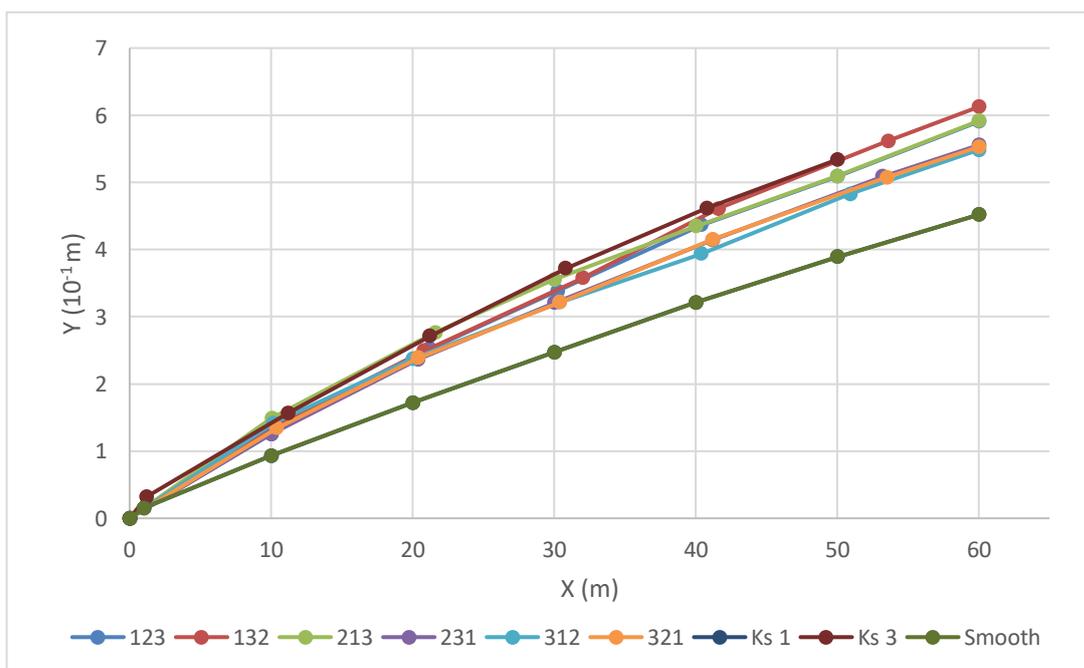


Gambar 5-10 Prediksi C_F Akibat *Extreme Regular* dan *Irregular Roughness* untuk $L = 60$ m

Meskipun terdapat perbedaan persentase kenaikan C_F di antara penelitian validasi dan prediksi Suastika et al (2020), tetapi *trend* yang dihasilkan tetap sama. Perbedaan yang ada dihasilkan oleh perbedaan penggunaan nilai kekasaran k_s . Semakin tinggi nilai k_s , maka semakin tinggi pula peningkatan nilai C_F yang ditimbulkan.

Dari pengujian prediksi penelitian Suastika et al (2020) untuk pelat datar $L = 30$ m, dapat diketahui bahwa peningkatan C_F akibat variasi kekasaran ekstrem dapat mencapai masing-masing 117,3 – 129,34% untuk kecepatan 9,78 m/s dan 119,59 – 123,94% untuk kecepatan 12 m/s. Sedangkan, untuk pelat datar $L = 60$ m, peningkatan C_F akibat variasi kekasaran ekstrem dapat mencapai masing-masing 159,67 – 210,86% untuk kecepatan 9,78 m/s dan 125,94 – 127,81% untuk kecepatan 12 m/s, dengan catatan bahwa pada kecepatan 9,78 m/s, hasil yang didapat melebihi kenaikan nilai C_F untuk pelat datar $L = 60$ m akibat kekasaran *regular* yang telah dirata-rata. Oleh karena kekasaran akibat *biofouling* tidak merata di sepanjang kapal, maka asumsi peningkatan nilai C_F untuk kapal diambil dari peningkatan nilai C_F akibat *irregular roughness*. Sehingga, dapat diasumsikan bahwa kekasaran ekstrem dapat menyebabkan peningkatan nilai C_F sebesar 117,3 – 129,34%.

Selain itu, kekasaran permukaan juga berpengaruh terhadap ketebalan *boundary layer*. Hal ini karena kekasaran permukaan meningkatkan turbulensi pada aliran yang melaluinya. Pada aliran yang semula laminar, maka dapat berubah menjadi aliran turbulen apabila tingkat kekasaran tergolong ke dalam *transitional rough regime* sampai *fully rough regime*. Pada aliran turbulen, tingkat turbulensi menjadi semakin tinggi akibat adanya kekasaran. Fenomena ini dapat ditinjau dengan mengamati ketebalan *boundary layer* yang terbentuk. Gambar 5-11 merupakan contoh ilustrasi ketebalan *boundary layer* dari hasil simulasi prediksi. Selbihnya dapat dilihat pada Lampiran C.



Gambar 5-11 Ketebalan *Boundary Layer* Prediksi Penelitian Suastika et al (2020) $L = 60$ m

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat dikatakan bahwa *software* CFD mampu menyelesaikan persoalan yang diangkat. Hal ini karena nilai C_F untuk *smooth surface* yang didapat dari simulasi serupa dengan nilai C_F hasil pendekatan ITTC. Begitu pula pada nilai C_F hasil simulasi untuk permukaan kasar *regular*, yaitu mendekati hasil simulasi permukaan kasar *regular* oleh Suastika et al (2020). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan hambatan gesek yang terjadi bergantung pada kondisi kekasarannya. Dapat diasumsikan bahwa kekasaran ekstrem akibat pertumbuhan *biofouling* dapat menyebabkan peningkatan nilai C_F sebesar 117,3 – 129,34%. Sehingga, kesimpulan dari Tugas Akhir ini sebagai berikut:

1. Kekasaran permukaan berpengaruh secara langsung terhadap peningkatan koefisien hambatan gesek kapal (C_F) yang tergantung pada tingkat kekasarannya yaitu antara *smooth regime*, *transitionally rough regime* dan *fully rough regime* dan tergantung pada tingkat kerapatan kekasaran (C_s).
2. Perbedaan variasi kekasaran *regular roughness* dan *irregular roughness* memiliki pengaruh yang berbeda terhadap peningkatan koefisien hambatan gesek (C_F). Peningkatan nilai koefisien hambatan gesek (C_F) akibat *irregular roughness* lebih rendah dari peningkatan C_F akibat *regular roughness* yang serupa dengan *averaged roughness height* pada *irregular roughness*.
3. Peningkatan nilai koefisien hambatan gesek (C_F) hasil simulasi CFD untuk validasi eksperimen *wind tunnel* menghasilkan nilai yang berbeda jauh. Meskipun begitu, *trend* peningkatan nilai C_F serupa. Hal ini akibat adanya variabel yang tidak diketahui secara pasti yaitu tingkat kerapatan kekasaran dan kesimpulan yang diperoleh pada poin nomor 2.
4. Peningkatan nilai koefisien hambatan gesek (C_F) hasil simulasi CFD untuk validasi dan prediksi penelitian Suastika et al (2020) mendapatkan hasil yang sesuai karena tingkat kerapatan kekasaran yang digunakan memiliki nilai yang serupa dan kesimpulan yang diperoleh pada poin nomor 2 merupakan kesimpulan yang diperoleh juga pada penelitian Suastika et al (2020).

6.2. Saran

Topik yang diangkat pada penelitian Tugas Akhir ini merupakan topik yang masih berkembang di dunia penelitian karena belum ditemukan fungsi kekasaran yang dapat mewakili semua jenis kekasaran yang ada. Kendati demikian, beberapa saran yang dapat dijadikan rekomendasi dalam penelitian serupa pada masa yang akan datang, antara lain:

1. Diharapkan pengujian eksperimen pada masa yang akan datang supaya dapat dilakukan pada saat yang bersamaan dengan simulasi CFD yang memodelkan kondisi serupa untuk mendapatkan hasil yang lebih selaras.
2. Pada pengujian selanjutnya untuk memperbanyak variasi nilai, tingkat dan kerapatan kekasaran yang berbeda untuk dapat memodelkan variasi persebaran *biofouling* pada dunia nyata secara lebih akurat.
3. Dapat dilakukan pengujian untuk ukuran model yang berbeda sehingga dapat dilakukan analisis pengaruh *biofouling* berdasarkan panjang model yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aertssen, G. (1963). *Service-performance and Seakeeping Trials on MV Lukuga*. Transactions of The Royal Institutions of Naval Architects, Vol. 108, pp. 305 – 343.
- Cengel, A., Cimbala, J. (2006) *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York, USA: McGraw Hill Companies.
- Date, J.C., Turnock, S.R. (1999). *A Study into the Techniques Needed to Accurately Predict Skin Friction Using RANS Solvers with Validation Against Froude's Historical Flat Plate Experimental Data*. Highfield, Southampton, UK: University of Southampton.
- Demirel, Y.K. & Khorasanchi, Mahdi & Turan, O., Incecik, A., Schultz, M. (2014). *A CFD for the frictional resistance prediction of antifouling coatings*. Ocean Engineering.
- Demirel, Y. K., Turan, O., Incecik, A. (2017). *Predicting The Effect of Biofouling on Ship Resistance Using CFD*. Glasgow, UK: University of Strathclyde.
- Herget, K., Frerichs, et al. (2020) *Functional Enzyme Mimics for Oxidative Halogenation Reactions that Combat Biofilm Formation*. Springer: *Nanozymology*.
- Kempf, G. (1937). *On The Effects of Roughness on The Resistance of Ships*. Cambridge, UK: Cambridge University.
- Lehaître, M., Delauney L., Compeère, Chantal (2008). *Biofouling and Underwater Measurements*. UNESCO: *Real-time Coastal Observing Systems for Marine Ecosystem Dynamics and Harmful Algal Blooms, chap12, p463*.
- Olsen, S. M. (2009). *Controlled Release of Environmentally Friendly Antifouling Agents from Marine Coatings*. Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark.
- Menter, E. R. (1993). Zonal two-equation k-w turbulence model for aerodynamic flows. In *Proceedings of the 24th Fluid Dynamics Conference* (AIAA Paper 1993-2006). Orlando, Florida, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Molland, A., Turnock, S.R., & Hudson, D. (2017). *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge, UK: Cambridge University.
- Sadrehaghghi, I. (2020). *CFD Open Series, Turbulence Modeling: A Review*. Annapolis, Maryland, US.
- Shan, C., JiaDao, W. (2010). *Progress of Marine Biofouling and Antifouling Technologies*. Beijing, China: Tsinghua University, State Key Laboratory of Tribology.
- Schlutz, M.P. (1998). *The Effect of Biofilms on Turbulent Boundary Layer Structures*. Florida, USA: Florida Institute of Technology.
- Schlutz, M.P. Swain, G.W., (2000). *The Influence of Biofilms on Skin Friction Drag*. Fort Pierce, Florida, USA: Harbor Branch Oceanographic Institute.
- Schlutz, M.P. (2007). *Effects of Coating Roughness and Biofouling on Ship Resistance and Powering*. Annapolis, Maryland, USA: United States Naval Academy.
- Suastika, I.K. et al (2020). Under review by Elsevier. *Characteristics of Drag Due To Streamwise Inhomogeneous Roughness*. Surabaya, Indonesia: Elsevier.
- van Manen, J.D., van Oossanen, P. (1988). Resistance. In: Lewis, E.V. (ed). *Principles of Naval Architecture. Second Revision. Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration*. Jersey City, New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Second Edition. Harlow, England: Pearson Education Limited.

- Wah-Yen, T., Rui-Zher, G., Asako, Y., Sidik, N.A.C. (2017). *Governing Equations in Computational Fluid Dynamics: Derivations and A Recent Review*. Kuala Lumpur, Malaysia: UCSI University Kuala Lumpur.
- White, F. M. (2011) *Fluid Mechanics*. Kingston, Rhode Island, US: University of Rhode Island.
- Yulian, H.M. (2019). *Studi Eksperimen Pengaruh Tumbuh Biofouling pada Lambung Kapal Terhadap Meningkatnya Friction Resistance*. Surabaya, Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN

Lampiran A Hasil Pengukuran *Drag* CFD

Lampiran B Hasil Perhitungan Koefisien Hambatan Gesek

Lampiran C Visualisasi Ketebalan *Boundary Layer* pada Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)

LAMPIRAN A
HASIL PENGUKURAN DRAG CFD

Ekspirimen *Wind Tunnel* Yuliansyah (2019)

Smooth hull

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			ITTC	CFD	
1	3	$1,10 \times 10^5$	3,6108	3,6040	0,19
2	6	$2,20 \times 10^5$	11,9589	11,8166	1,19
3	9	$3,20 \times 10^5$	24,4671	24,0490	1,71
4	12	$4,30 \times 10^5$	40,4790	40,1241	0,88
5	15	$5,40 \times 10^5$	59,9402	59,3297	1,02

Regular roughness

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)			Kenaikan Drag (%)		
			K1	K2	K3	K1	K2	K3
1	3	$1,10 \times 10^5$	3,7282	3,9432	3,9001	3,45	9,41	8,22
2	6	$2,20 \times 10^5$	12,3997	13,0946	12,9889	4,93	10,82	9,92
3	9	$3,20 \times 10^5$	26,2686	27,3328	27,3147	9,23	13,65	13,58
4	12	$4,30 \times 10^5$	45,1936	46,9214	47,7508	12,63	16,94	19,01
5	15	$5,40 \times 10^5$	67,2066	70,8046	77,9706	13,28	19,34	31,42

Validasi Penelitian Suastika et al (2020)

Smooth surface

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			ITTC	CFD	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	15,9123	15,7471	1,04

Regular roughness K1 = 81,25 micron

No	V (m/s)	Re	K1 Drag (10^3 N)		%
			Suastika et al (2020)	CFD	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	19,8315	19,8647	0,17

Regular roughness K2 = 300 micron

No	V (m/s)	Re	K2 Drag (10^3 N)		%
			Suastika et al (2020)	CFD	
2	9,775	$2,79 \times 10^8$	25,9212	25,9081	0,05

Regular roughness K2 = 568,75 micron

No	V (m/s)	Re	K3 Drag (10^3 N)		%
			Suastika et al (2020)	CFD	
3	9,775	$2,79 \times 10^8$	28,5595	28,7120	0,53

Irregular roughness

No.	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)				Kenaikan Drag (%)		
			Smooth	K1	K2	K3	K1	K2	K3
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	15,7471	19,8647	25,9212	28,5595	26,15	64,61	81,36

Irregular roughness (increase in %)

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)				Kenaikan Drag (%)		
			Smooth	K1	K2	K3	K1	K2	K3
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	15,9123	19,8647	25,9212	28,5595	24,84	62,90	79,48

Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)

L = 30 m

Regular roughness K1 = 300 micron

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			CFD	K1	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	15,7471	26,4658	68,07
2	12	$3,40 \times 10^8$	23,0339	39,1312	69,89

Regular roughness K2 = 3000 micron

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			CFD	K2	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	15,7471	46,1110	192,82
2	12	$3,40 \times 10^8$	23,0339	67,9819	195,14

Regular roughness K3 = 5700 micron

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			CFD	K3	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	15,7471	47,7143	203,00
2	12	$3,40 \times 10^8$	23,0339	70,6896	206,89

Irregular roughness

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	35,5211	35,5303	35,9269	36,1142	34,2154	36,1142
2	12	$3,40 \times 10^8$	50,5798	50,6273	51,3555	51,3957	51,5810	51,5810

Irregular roughness (increase in %)

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N) Increase in %					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	125,57	125,63	128,15	129,34	117,28	129,34
2	12	$3,40 \times 10^8$	119,59	119,80	122,96	123,13	123,94	123,94

L = 60 m

Regular roughness K1 = 300 micron

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			CFD	K1	
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	59,7969	101,7280	70,12

2	12	$6,90 \times 10^8$	82,8980	132,2009	59,47
----------	----	--------------------	---------	----------	-------

Regular roughness K2 = 3000 micron

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			CFD	K2	
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	59,7969	174,9693	192,61
2	12	$6,90 \times 10^8$	82,8980	203,7480	145,78

Regular roughness K3 = 5700 micron

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)		%
			CFD	K3	
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	59,7969	167,2126	179,63
2	12	$6,90 \times 10^8$	82,8980	225,8870	172,49

Irregular roughness

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N)					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	185,8827	184,7622	185,4516	163,9545	163,5631	164,0964
2	12	$6,90 \times 10^8$	187,4447	187,3016	188,8501	187,4522	188,5648	188,0575

Irregular roughness (increase in %)

No	V (m/s)	Re	Drag (10^3 N) (Increase in %)					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	210,86	208,98	210,14	174,19	173,53	174,42
2	12	$6,90 \times 10^8$	126,11	125,94	127,81	126,12	127,47	126,85

LAMPIRAN B
HASIL PERHITUNGAN KOEFISIEN HAMBATAN GESEK

Eksperimen *Wind Tunnel* Yuliansyah (2019)

Smooth surface

No	V (m/s)	Re	C _F ITTC		%
			ITTC	CFD	
1	3	1,1×10 ⁵	8,1080	8,0926	0,19
2	6	2,2×10 ⁵	6,7133	6,6335	1,19
3	9	3,2×10 ⁵	6,1045	6,0002	1,71
4	12	4,3×10 ⁵	5,6809	5,6311	0,88
5	15	5,4×10 ⁵	5,3838	5,3289	1,02

Regular surface

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)				Kenaikan C _F (%)		
			Smooth	K1	K2	K3	K1 (%)	K2 (%)	K3 (%)
1	3	1,1×10 ⁵	8,0926	8,3715	8,8543	8,7575	3,45	9,41	8,22
2	6	2,2×10 ⁵	6,6335	6,9608	7,3509	7,2915	4,93	10,82	9,92
3	9	3,2×10 ⁵	6,0002	6,5540	6,8195	6,8150	9,23	13,65	13,58
4	12	4,3×10 ⁵	5,6311	6,3426	6,5851	6,7015	12,63	16,94	19,01
5	15	5,4×10 ⁵	5,3289	6,0364	6,3596	7,0032	13,28	19,34	31,42

Validasi Penelitian Suastika et al (2020)

Smooth surface

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)		%
			Suastika et al (2020)	CFD	
0	9,775	2,79×10 ⁸	1,8052	1,7865	1,04

Regular roughness K1 = 81,25 micron

No	V (m/s)	Re	C _{F1} (10 ⁻³)		%
			Suastika et al (2020)	CFD	
1	9,775	2,79×10 ⁸	2,2499	2,2536	0,17

Regular roughness K2 = 300 micron

No	V (m/s)	Re	C _{F2} (10 ⁻³)		%
			Suastika et al (2020)	CFD	
2	9,775	2,79×10 ⁸	2,9407	2,9392	0,05

Regular roughness K3 = 568,75 micron

No	V (m/s)	Re	C _{F3} (10 ⁻³)		%
			Suastika et al (2020)	CFD	
3	9,775	2,79×10 ⁸	3,2400	3,2573	0,53

Kenaikan C_F Akibat Kekasaran

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)	Kenaikan C _F (%)
----	---------	----	------------------------------------	-----------------------------

			Smooth	K1	K2	K3	K1	K2	K3
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	1,7865	2,2536	2,9392	3,2573	26,15	64,53	82,33

Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)

L = 30 m

Regular roughness K1 = 300 micron

No	V (m/s)	Re	$C_f (10^{-3})$		%
			CFD	K1	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	1,7865	3,0025	68,07
2	12	$3,40 \times 10^8$	1,7340	2,9457	69,89

Regular roughness K2 = 3000 micron

No	V (m/s)	Re	$C_f (10^{-3})$		%
			CFD	K2	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	1,7865	5,2312	192,82
2	12	$3,40 \times 10^8$	1,7340	5,1176	195,14

Regular roughness K3 = 5700 micron

No	V (m/s)	Re	$C_f (10^{-3})$		%
			CFD	K3	
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	1,7865	5,4131	203,00
2	12	$3,40 \times 10^8$	1,7340	5,3214	206,89

Irregular roughness

No	V (m/s)	Re	$C_f (10^{-3})$					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	4,0298	4,0309	4,0759	4,0971	3,8817	4,0971
2	12	$3,40 \times 10^8$	3,8076	3,8112	3,8660	3,8690	3,8829	3,8829

Irregular roughness increase (in %)

No	V (m/s)	Re	$C_f (10^{-3})$					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	$2,79 \times 10^8$	125,57	125,63	128,15	129,34	117,28	129,34
2	12	$3,40 \times 10^8$	119,59	119,80	122,96	123,13	123,94	123,94

L = 60 m

Smooth plate

No	V (m/s)	Re	$C_f (10^{-3})$		%
			ITTC	CFD	
1	9,775	$5,60 \times 10^8$	1,6470	1,6960	2,98
2	12	$6,90 \times 10^8$	1,6036	1,5601	2,71

Regular roughness K1 = 300 micron

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)		%
			ITTC	CFD	
1	9,775	5,60 × 10 ⁸	1,6960	2,8852	70,12
2	12	6,90 × 10 ⁸	1,5601	2,4880	59,47

Regular roughness K2 = 3000 micron

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)		%
			ITTC	CFD	
1	9,775	5,60 × 10 ⁸	1,6960	4,9625	192,61
2	12	6,90 × 10 ⁸	1,5601	3,8345	145,78

Regular roughness K3 = 5700 micron

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)		%
			ITTC	CFD	
1	9,775	5,60 × 10 ⁸	1,6960	4,7425	179,63
2	12	6,90 × 10 ⁸	1,5601	4,2511	172,49

Irregular roughness

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	2,79x10 ⁸	5,2720	5,2403	5,2598	4,6501	4,6390	4,6541
2	12	3,40x10 ⁸	3,5276	3,5249	3,5541	3,5278	3,5487	3,5392

Irregular roughness increase (in %)

No	V (m/s)	Re	C _F (10 ⁻³)					
			K123	K132	K213	K231	K312	K321
1	9,775	2,79x10 ⁸	210,86	208,98	210,14	174,19	173,53	174,42
2	12	3,40x10 ⁸	126,11	125,94	127,81	126,12	127,47	126,85

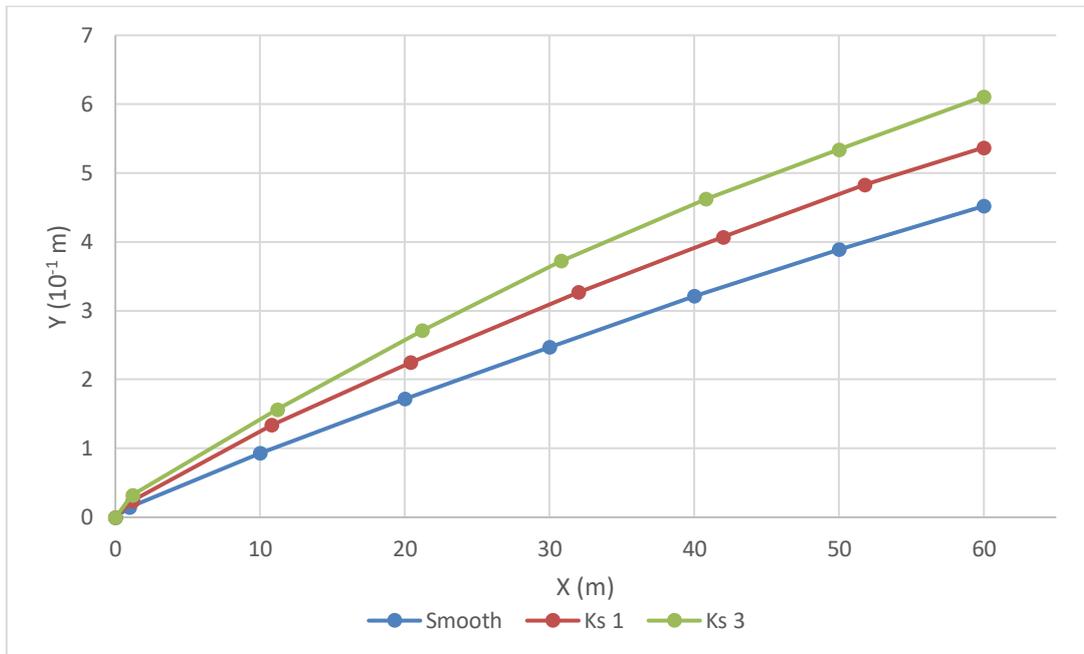
LAMPIRAN C
VISUALISASI KETEBALAN *BOUNDARY LAYER* PADA
PREDIKSI PENELITIAN SUASTIKA ET AL (2020)

Prediksi Penelitian Suastika et al (2020)

L = 60 m

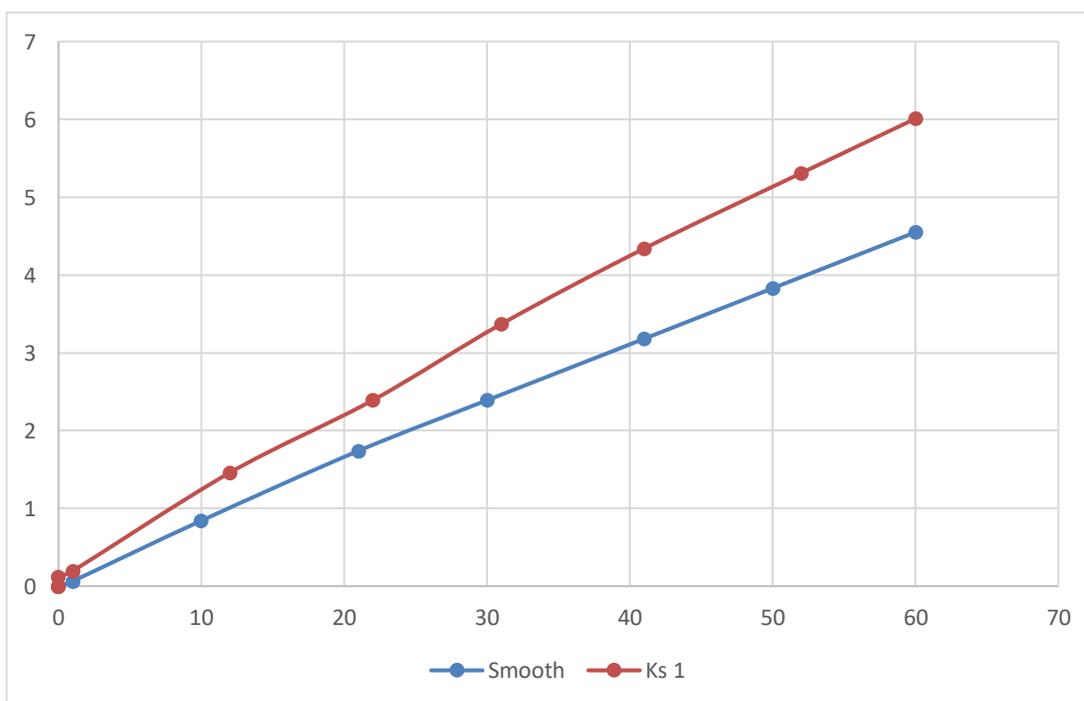
9,775 m/s

Regular roughness



12 m/s

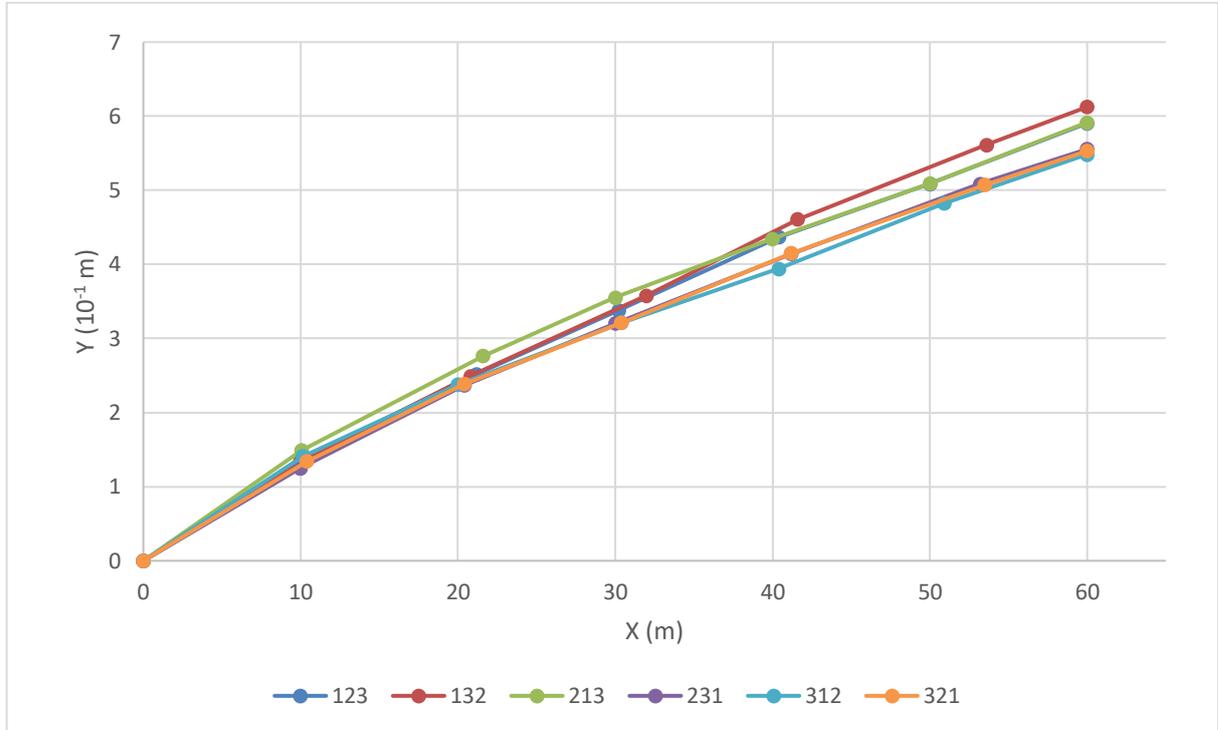
Regular roughness



L = 60 m

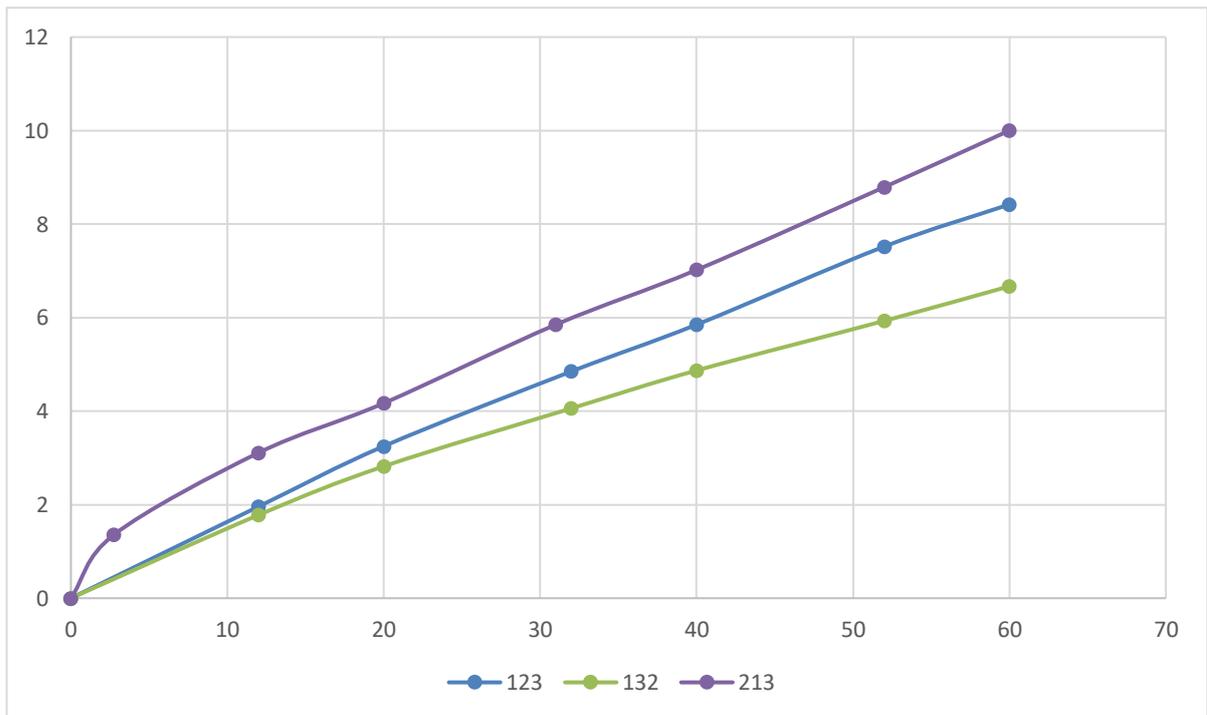
9,775 m/s

Irregular roughness



12 m/s

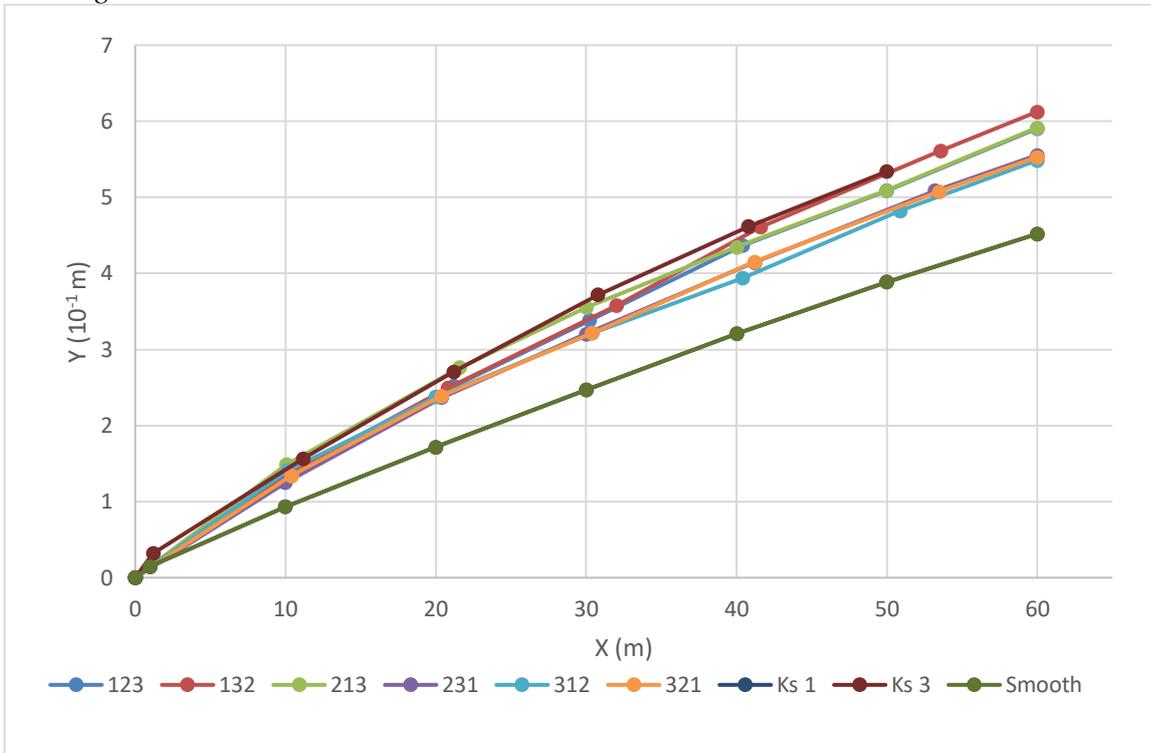
Irregular roughness



L = 60 m

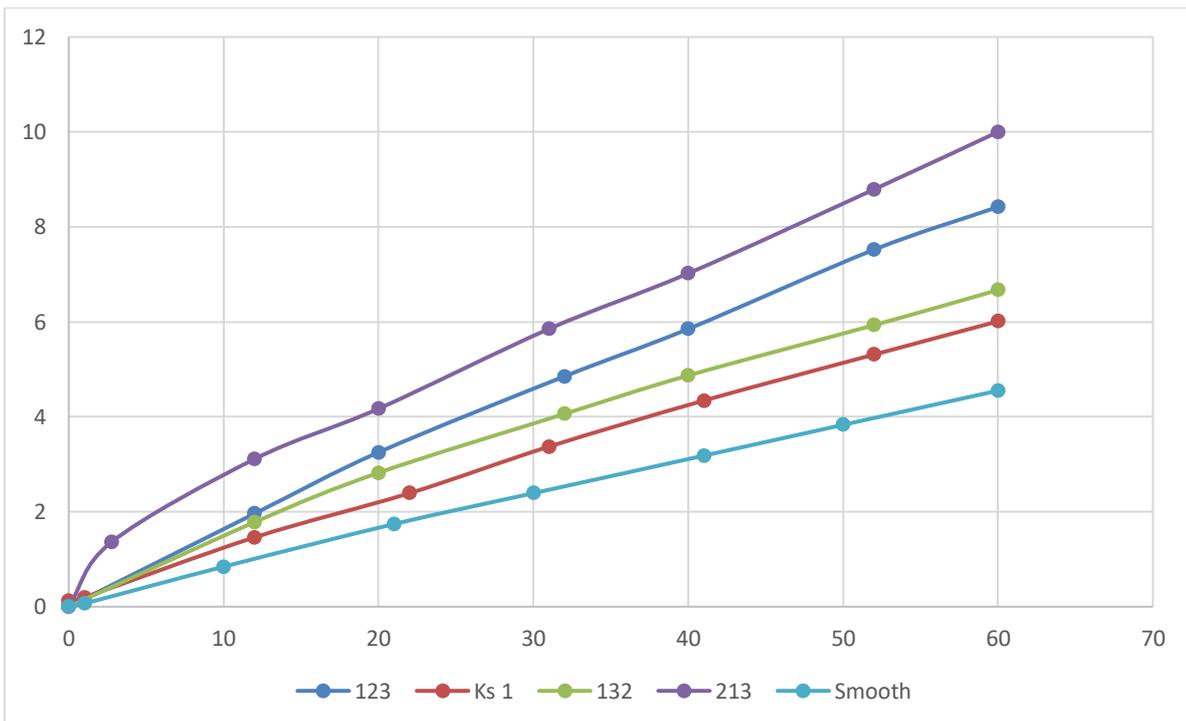
9,775 m/s

All roughness



12 m/s

All roughness



BIODATA PENULIS



Shindi Regitasyali dilahirkan di Jakarta, 11 Oktober 1998. Penulis merupakan anak pertama dari 4 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar di TK Bu Katsur Cikini, kemudian melanjutkan pendidikan ke SD Yasporbi I Pancoran, SMPN 1 Jakarta dan SMAN 3 Jakarta. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2016 melalui jalur SNMPTN undangan.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah Penulis juga pernah menjadi *staff* BSO *Hydromodelling* Himatekpal 2017/2018, Sekretaris II BEM FTK ITS 2017/2018 serta Kepala Internal Departemen *Hydromodelling* Himatekpal 2018/2019. Penulis juga pernah menjadi *grader* untuk mata kuliah Mekanika Fluida. Selain bidang perkapalan, Penulis juga memiliki ketertarikan pada bidang lain yaitu pendidikan dan pengembangan diri Islami.

Email: shindiregita@gmail.com

Instagram: @regitasyali