TUGAS AKHIR – MN 184802

ANALISA HAMBATAN KAPAL AKIBAT KEKASARAN TAK-HOMOGEN DI ARAH MEMANJANG DENGAN METODE CFD: STUDI KASUS KRISO CONTAINER SHIP (KCS)

Hani Thalib
NRP 04111740000056

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022

TUGAS AKHIR – MN 184802

ANALISA HAMBATAN KAPAL AKIBAT KEKASARAN TAK-HOMOGEN DI ARAH MEMANJANG DENGAN METODE CFD: STUDI KASUS KRISO CONTAINER SHIP (KCS)

Hani Thalib
NRP 04111740000056

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022

FINAL PROJECT – MN 184802

CFD ANALYSIS OF SHIP RESISTANCE DUE TO INHOMOGENEOUS ROUGHNESS IN THE LONGITUDINAL DIRECTION: A CASE STUDY OF KRISO CONTAINER SHIP (KCS)

Hani Thalib
NRP 04111740000056

Supervisor
Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.

DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA HAMBATAN KAPAL AKIBAT KEKASARAN TAK-HOMOGEN DI ARAH MEMANJANG DENGAN METODE CFD: STUDI KASUS KRISO CONTAINER SHIP (KCS)

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:

HANI THALIB
NRP 04111740000056

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.
NIP 19691231 200604 1 178

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Perkapalan

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

SURABAYA, 27 JANUARI 2022

LEMBAR REVISI

ANALISA HAMBATAN KAPAL AKIBAT KEKASARAN TAK-HOMOGEN DI ARAH MEMANJANG DENGAN METODE CFD: STUDI KASUS KRISO CONTAINER SHIP (KCS)

TUGAS AKHIR
Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 27 Januari 2022

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

Oleh:

HANI THALIB
NRP 04111740000056

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. I. Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D. .....
2. Prof. Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D. .....
3. Dony Setyawan, S.T., M.Eng. .....

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc. .....

SURABAYA, 27 Januari 2022

vii

HALAMAN PERUNTUKAN

Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunianya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

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

1. Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan ilmu dan motivasinya yang diberikan kepada Penulis selama penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Prof. Ir. I. Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D., Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D., dan Dony Setyawan, S.T., M.Eng. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini;
3. Dedi Budi Purwanto, S.T., M.T. selaku Dosen Wali atas bimbingan ilmu dan motivasinya yang diberikan kepada Penulis selama menjalankan studi sarjana;
4. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Perkapalan ITS;
5. Kedua orang tua Penulis: Bapak Alm. dr. Abdul Hakim Thalib dan Ibu Tri Prihartini, serta Adik Penulis, Lukman Thalib, yang senantiasa memberikan semangat serta bimbingan moral selama pengerjaan Tugas Akhir dan selama Penulis menjalankan masa belajarnya.
6. Muhammad Ridho Fauzan Ganfi dan Rr. Niken Danartika Hadi Putri yang telah membantu memberikan saran dan masukkan serta teman diskusi selama pengerjaan Tugas Akhir ini;
7. M. Hafiz Nurwahyu Aliffrananda, S.T., M.T. yang telah membantu dalam pembuatan model simulasi Kapal KRISO *Container Ship*, mengajari simulasi pada *software NUMECA FINE^{TM}/Marine* serta membantu dalam evaluasi laporan TA baik secara prinsip maupun secara teknis.
8. Kurnia Dewi Fortuna yang telah meminjamkan fasilitas computer untuk kebutuhan penulis dalam mengolah data melalui perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* serta memberikan semangat kepada penulis selama Menyusun Tugas Akhir ini.
9. Dan semua pihak yang telah membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Semoga segala bantuan dan dukungan yang diberikan kepada Penulis dalam penyelesaian masa belajar pascasarjana dan tesis dicatat oleh Tuhan Yang Maha Esa sebagai amal ibadah. Penulis juga menyadari bahwa masih ada kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang membangun akan Penulis terima demi kesempurnaan penulisan. Semoga Tugas Akhir ini dapat menjadi alat dan rujukan dalam upaya meningkatkan kualitas studi dan pendidikan.

Surabaya, 27 Januari 2022

Hani Thalib

ANALISA HAMBATAN KAPAL AKIBAT KEKASARAN TAK-HOMOGEN DI ARAH MEMANJANG DENGAN METODE CFD: STUDI KASUS KRISO CONTAINER SHIP (KCS)

Nama Mahasiswa	:	Hani Thalib
NRP	:	04111740000056
Departemen / Fakultas	:	Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing	:	Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc

ABSTRAK

KRISO *Container Ship* merupakan kapal kontainer modern dengan *bulbous bow* yang didesain pada tahun 1997 dan dapat ditemukan di situs web MOERI atau NMRI. Pada penelitian ini, kapal *KRISO Container Ship* direncanakan akan disimulasikan dengan permukaan lambung halus, lambung kasar homogen, dan lambung kasar tak-homogen, di mana masing – masing kekasaran akan berpengaruh pada koefisien hambatan gesek (C_F) dan koefisien hambatan total (C_T). Penelitian pengaruh kekasaran pada kapal KCS akan disimulasikan dengan menggunakan metode CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Simulasi CFD dimulai dengan pembuatan model 3D kapal menggunakan data *lines plan* kapal dan diverifikasi menggunakan data hidrostatik yang tercantum dalam website MOERI atau NMRI. Validasi lambung halus dilakukan dengan membandingkan nilai C_F hasil simulasi CFD dengan nilai C_F ITTC 1957. Validasi lambung dengan kekasaran homogen QQQ (Q = 325 µm) dilakukan dengan membandingkan nilai C_F hasil simulasi CFD dengan hasil perhitungan menggunakan *similarity law* (Granville, 1978). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekasaran homogen akan meningkatkan nilai C_F sebesar 55% pada simulasi *full viscous* dan sebesar 56.8% pada simulasi *free surface* jika dibandingkan dengan lambung halus. Kekasaran tak-homogen baik dalam simulasi *full viscous* maupun *free surface* memiliki nilai C_F yang lebih rendah jika dibandingkan dengan kekasaran homogen QQQ. Urutan kekasaran pada kekasaran tak-homogen juga berpengaruh pada nilai C_F. Dalam studi ini ada 6 variasi kekasaran tak-homogen yang disimulasikan. Urutan C_F yang diperoleh adalah sebagai berikut: RPQ < QPR < RQP < PQR < QRP < PRQ. Luasan masing-masing segmen kekasaran tidak sama, di mana luasan terbesar berada pada daerah *parallel middle body* (3819.414 m^2) diikuti dengan luasan pada daerah *stern* (3252.252 m^2), dan luasan terkecil berada pada daerah *bow* (2797.859 m^2). Ketinggian kekasaran pada daerah *parallel middle body* memberikan kontribusi besar pada peningkatan hambatan gesek dan C_F. Apabila bagian PMB diberikan kekasaran tertinggi (R = 568.75 µm) seperti pada kasus kekasaran PRQ maka C_F nya akan memiliki nilai tertinggi sebesar 2.136×10^{-3} untuk simulasi *full viscous* dan sebesar 2.168×10^{-3} untuk *free surface*. Namun jika bagian PMB diberikan kekasaran terendah (P = 81.25 µm) seperti pada kasus kekasaran RPQ menghasilkan nilai C_F terendah sebesar 2.062×10^{-3} untuk simulasi *full viscous* dan sebesar 2.114×10^{-3} untuk *free surface*.

Kata kunci: *Computational fluid dynamics*, kekasaran homogen, kekasaran tak-homogen arah memanjang, koefisien hambatan gesek, koefisien hambatan total.

CFD ANALYSIS OF SHIP RESISTANCE DUE TO INHOMOGENEOUS ROUGHNESS IN THE LONGITUDINAL DIRECTION USING CFD METHOD: A CASE STUDY OF KRISO CONTAINER SHIP (KCS)

Author : Hani Thalib
Student Number : 04111740000056
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : Prof. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.

ABSTRACT

KRISO Container Ship is a modern container ship with a bulbous bow designed in 1997 and can be found on the MOERI or NMRI websites. In this study, the KRISO Container Ship is planned to be simulated with a smooth hull surface, a homogeneous rough hull, and a inhomogeneous rough hull, where each roughness will affect the coefficient of frictional resistance (C_F) and the coefficient of total resistance (C_T). Research on the effect of roughness on the KCS ship will be simulated using the CFD (Computational Fluid Dynamics) method. The CFD simulation begins with the creation of a 3D model of the ship using the lines plan data and verified using the hydrostatic data listed on the MOERI or NMRI website. Smooth hull validation was carried out by comparing the C_F value of the CFD simulation results with the C_F value of ITTC 1957. Validation with homogeneous roughness QQQ (Q = 325 m) was carried out by comparing the C_F value of the CFD simulation results with the results of calculations using the similarity law (Granville, 1978). The results showed that homogeneous roughness would increase the C_F value by 55% in the full viscous simulation and by 56.8% in the free surface simulation when compared to the smooth hull. The inhomogeneous roughness in both the full viscous and free surface simulations has a lower C_F value when compared to the QQQ homogeneous roughness. The order of roughness on the inhomogeneous roughness also affects the C_F value. In this study there were 6 variations of simulated inhomogeneous roughness. The C_F sequence obtained is as follows: RPQ < QPR < RQP < PQR < QRP < PRQ. The area of each roughness segment is not the same, where the largest area is in the parallel middle body area (3819.414 m^2) followed by the stern area (3252.252 m^2), and the smallest area is in the bow area (2797.859 m^2). The height of roughness in the parallel middle body region contributes greatly to the increase in frictional resistance and C_F. If the PMB section is given the highest roughness (R = 568.75 m) as in the case of PRQ roughness, the C_F will have the highest value of 2.136×10^{-3} for full viscous simulation and 2.168×10^{-3} for free surface. However, if the PMB section is given the lowest roughness (P = 81.25 m) as in the case of RPQ roughness, the lowest C_F value is 2.062×10^{-3} for full viscous simulation and 2.114×10^{-3} for free surface.

Keywords: Coefficient of frictional resistance, coefficient of total resistance, computational fluid dynamics, homogeneous roughness, longitudinal direction non-homogeneous roughness.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
LEMBAR REVISI ..... **Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.**
HALAMAN PERUNTUKAN ix
KATA PENGANTAR xi
ABSTRAK xiii
ABSTRACT xiii
DAFTAR ISI xiv
DAFTAR GAMBAR xvii
DAFTAR TABEL xix
DAFTAR SIMBOL xx
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang Masalah 1
1.2. Perumusan Masalah 2
1.3. Tujuan 2
1.4. Batasan Masalah 2
1.5. Manfaat 2
1.6. Hipotesis 3
BAB 2 DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Dasar Teori 5
2.1.1 Hambatan Kapal 5
2.1.2 *Computational Fluid Dynamics* (CFD) 11
2.1.3 Kekasaran Permukaan 15
2.2 Tinjauan Pustaka 18
2.2.1 Karakteristik dari Gesekan Kulit Akibat Kekasaran Tak-Homogen 18
2.2.2 Memprediksi Efek Biofouling pada Hambatan Kapal Menggunakan CFD 19
2.2.3 Validasi Pendekatan CFD untuk Efek Kekasaran Pemodelan Resistensi Kapal 23
BAB 3 METODOLOGI 29
3.1 Gambaran Umum Metodologi 29
3.2 Tahap Pengerjaan 31
3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data 31
3.2.2 Pemodelan Geometri KRISO *Container Ship* 32
3.2.3 Penentuan *Meshing* 35

3.2.4 Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) 35
3.2.5 Validasi Hasil Simulasi CFD 35
3.2.6 Analisis Hasil dan Pembahasan 36
3.2.7 Kesimpulan 36
BAB 4 SIMULASI CFD KRISO CONTAINER SHIP FULL VISCOUS 37
4.1 Pembuatan Meshing dari 3D Model Kapal 37
4.1.1 Import 3D Model Kapal "KRISO Container Ship" ke NUMECA FINE^{TM}/Marine beserta pembuatan Domain Kapal 37
4.1.2 Setup Meshing 3D Model Kapal KRISO Container Ship di NUMECA FINE^{TM}/Marine 39
4.2 Grid Independent untuk Simulasi KRISO Container Ship Full Viscous 43
4.3 *Setup Solver* untuk Simulasi 3D Model Kapal KCS Full Viscous 45
4.4 Validasi Hasil Simulasi Kapal KRISO *Container Ship full viscous* 48
4.4.1 Perhitungan Koefisien Gesekan *Full Viscous* dengan Rumus Empirik 49
BAB 5 SIMULASI CFD KRISO CONTAINER SHIP FREE SURFACE 51
5.1 Pembuatan Meshing dari 3D Model Kapal 51
5.1.1 Import 3D Model Kapal "KRISO Container Ship" ke NUMECA FINE^{TM}/Marine beserta pembuatan Domain Kapal 51
5.1.2 Setup Meshing 3D Model Kapal "KRISO Container Ship" di NUMECA FINE^{TM}/Marine 53
5.2 Grid Independent untuk Simulasi KRISO *Container Ship Free Surface* 57
5.3 Setup Solver untuk Simulasi 3D Model Kapal KCS *free surface* 59
5.4 Validasi Hasil Simulasi Kapal *KRISO Container Ship Free Surface* 59
5.4.1 Perhitungan Koefisien Gesekan *Free Surface* dengan Rumus Empirik 60
5.4.2 Validasi Hasil C_T Simulasi Kapal KRISO Container Ship *Free Surface* Dengan Data Pembanding Lainnya 60
BAB 6 HASIL DAN PEMBAHASAN 63
6.1 Pengolahan Data dan Validasi 63
6.2 Validasi Simulasi Kekasaran KRISO Container Ship dengan Metode Granville 64
6.2.1 Perhitungan Koefisien Gesekan *Full Viscous* dengan Rumus Granville 64
6.2.2 Perhitungan Koefisien Gesekan *Free Surface* dengan Rumus Granville 66
6.3 Hambatan Kapal Hasil Simulasi CFD untuk Setiap Variasi Ketinggian Kekasaran 68
6.4 Perbandingan Hambatan Kapal Simulasi Full Viscous untuk Setiap Variasi Kekasaran 79
6.5 Perbandingan Hambatan Kapal Simulasi Free Surface untuk Setiap Variasi Kekasaran 85
6.6 Visualisasi Gelombang KRISO *Container Ship* Simulasi *Free Surface* 90

6.7 Profil Kecepatan Rata – Rata Simulasi *Full Viscous* dan *Free Surface*.....91
BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN 95
7.1 Kesimpulan.....95
7.2 Saran.....95
Daftar Pustaka.....97
LAMPIRAN.....101
LAMPIRAN A *Simulation Time History of KRISO Container Ship Full Viscous Condition*103
LAMPIRAN B *Simulation Time History of KRISO Container Ship Free Surface Condition* 107
LAMPIRAN C *Visualization of Relative Velocity Full Viscous Condition* 111
LAMPIRAN D *Visualization of Relative Velocity Free Surface Condition*.....115
LAMPIRAN E *Visualization of Viscous Stress Full Viscous Condition*.....119
LAMPIRAN F *Visualization of Viscous Stress Free Surface Condition* 123
BIODATA PENULIS 127

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Konsep konversi energi pada kapal 5
Gambar 2. 2 Komponen hambatan kapal 6
Gambar 2. 3 Gaya geser dan tekanan pada lambung kapal 6
Gambar 2. 4 Aliran *Boundary Layer* pada a)permukaan halus dan b)permukaan kasar 10
Gambar 2. 5 Lapisan Batas dari *Boundary Layer* 10
Gambar 2. 6 Aliran fluid pada kombinasi dari 3 segmen pelat 18
Gambar 2. 7 Kombinasi dari tiga segmen pelat pada simulasi permukaan kasar yang homogen dan tidak homogen 19
Gambar 2. 8 Perbandingan peningkatan persentase *friction coefficient* antara permukaan kapal asli, slime kecil, slime berat, sedikit berkapur, berkapur, dan berkapur berat 20
Gambar 2. 9 a) Kecepatan dan b) Kontur Energi Kinetik Turbulen di bagian tengah lambung KCS untuk kondisi pengotoran berkapur yang halus dan berat (V = 24 knot) 21
Gambar 2. 10 a) Kecepatan dan b) Kontur Energi Kinetik Turbulen di bagian tengah pelat datar yang mewakili lambung KCS untuk kondisi pengotoran berkapur halus dan berat (V=24 knot) (jarak kisi dalam meter). 22
Gambar 2. 11 Penampang melintang diwarnai dengan kecepatan aksial terbatas pada U = 0.99 V menggambarkan lapisan batas (V = 24 knot) 23
Gambar 2. 12 Ilustrasi skema metodologi antara Towing Test dan penerapan CFD 24
Gambar 2. 13 Plat Datar dan Model KRISO *Container Ship* 25
Gambar 2. 14 *Total coefficient* dari model kapal KCS dalam kondisi permukaan halus dan kasar, diprediksi dari simulasi CFD dan data eksperimen Song 26
Gambar 2. 15 Distribusi tekanan pada KRISO *Container Ship* 26
Gambar 2. 16 Pola gelombang disekitar KRISO *Container Ship* 27
Gambar 3. 1 Bagian Alir Pengerjaan Tugas Akhir 31
Gambar 3. 2 Linesplan KRISO *Container Ship* 32
Gambar 3. 3 Model 3D Geometri KRISO *Container Ship* 33
Gambar 3. 4 Model 3D Geometri KRISO *Container Ship* yang Sudah di Split 33
Gambar 3. 5 Ilustrasi variasi kekasaran tak-homogen pada KRISO *Container Ship* (KCS) ... 34
Gambar 4. 1 *Setting C-Wizard* dan *import* 3D model kapal 38
Gambar 4. 2 Ukuran domain untuk simulasi 39
Gambar 4. 3 Tahap-tahap *meshing* pada *Software* HEXPRESS 39
Gambar 4. 4 *Setting* yang digunakan pada *Initial Mesh* 40
Gambar 4. 5 *Setting* yang digunakan pada *Adapt to Geometry* 40
Gambar 4. 6 *Setting* yang digunakan pada *Snap to Geometry* 41
Gambar 4. 7 *Setting* yang digunakan pada *Optimize* 41
Gambar 4. 8 *Settings* yang digunakan pada *Viscous Layers* 42
Gambar 4. 9 Hasil *mesh* 3D model KCS lambung halus/kasar homogen 43
Gambar 4. 10 Hasil *mesh* 3D model KCS lambung kasar Tak-homogen PQR 43
Gambar 4. 11 *Grid Independent full viscous* simulasi KRISO *Container Ship* 45
Gambar 4. 12 *Fluid Properties* yang digunakan untuk simulasi 45
Gambar 4. 13 *Setup Solver* pada *Body Motion* 46
Gambar 4. 14 *Setup Solver* untuk *Initial Solution Parameters* 47
Gambar 4. 15 *Setup* pada *Computational Control* 48
Gambar 5. 1 *Setting C-Wizard* dan *Import* 3D model kapal 52
Gambar 5. 2 Ukuran domain untuk simulasi 53

Gambar 5. 3 Tahap-tahap *meshing* pada *Software* HEXPRESS.....53
Gambar 5. 4 *Settings* yang sigunakan pada *Initial Mesh* 54
Gambar 5. 5 *Setting* yang digunakan pada *Adapt to Geometry* 54
Gambar 5. 6 *Setting* yang digunakan pada *Snap to Geometry*.....55
Gambar 5. 7 *Setting* yang digunakan pada *Optimize* 55
Gambar 5. 8 *Setting* yang digunakan pada *Viscous Layers* 56
Gambar 5. 9 Hasil *Mesh* 3D model KCS dengan lambung halus/kasar homogen 57
Gambar 5. 10 Hasil *Mesh* 3D model KCS dengan lambung kasar tak-homogen PQR 57
Gambar 5. 11 *Grid Independent free surface* simulasi KRISO *Container Ship*.....59
Gambar 5. 12 *Fluid Properties* yang digunakan untuk simulasi 59
Gambar 6. 1 Pertambahan persentase nilai %C_F dalam simulasi *full viscous*.....76
Gambar 6. 2 Pertambahan persentase nilai %C_F dalam simulasi *free surface* 77
Gambar 6. 3 Perbandingan nilai *Coefficient Total* antara *full viscous* dan *free surface*.....77
Gambar 6. 4 Perbandingan visualisasi *relative velocity* pada midship kapal KCS simulasi *full viscous* dan *free surface* 78
Gambar 6. 5 Posisi koordinat absolut pada simulasi *full viscous* 78
Gambar 6. 6 Posisi koordinat absolut pada simulasi *Free Surface*.....79
Gambar 6. 7 Visualisasi *Magnitude of Relative Velocity* pada *midhsip* kapal KCS.....80
Gambar 6. 8 Visualisasi *Turbulent Kinetic Energy* pada *midship* kapal KCS.....80
Gambar 6. 9 Persilangan Kecepatan Axial yang dimanifestasikan dengan warna 81
Gambar 6. 10 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung halus 82
Gambar 6. 11 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar homogen.....82
Gambar 6. 12 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar tak-homogen ..83
Gambar 6. 13 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung halus 84
Gambar 6. 14 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar homogen 84
Gambar 6. 15 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar tak-homogen 85
Gambar 6. 16 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung halus 86
Gambar 6. 17 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar homogen.....86
Gambar 6. 18 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar tak-homogen ..87
Gambar 6. 19 Perbandingan visualisasi kekasaran RPQ antara simulasi *full viscous* dan *free surface*.....88
Gambar 6. 20 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung halus 88
Gambar 6. 21 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar 89
Gambar 6. 22 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar tak-homogen 90
Gambar 6. 23 Visualisasi gelombang pada KCS dengan kecepatan 24 Knot 91
Gambar 6. 24 Fungsi kekasaran *full viscous* yang diajukan oleh Ligrani & Moffat (1986).....91
Gambar 6. 25 Profil kecepatan rata-rata permukaan halus dan pergeseran profil kecepatan permukaan kasar (325 µm) dalam simulasi *full viscous*. 92
Gambar 6. 26 Fungsi Kekasaran *free surface* yang diajukan oleh Ligrani & Moffat (1986)...92
Gambar 6. 27 Profil Kecepatan rata-rata permukaan halus dan pergeseran profil kecepatan permukaan kasar (325 µm) dalam simulasi *free surface*. 93

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Notasi untuk segmen pelat dengan tinggi kekasaran yang sesuai 18
Tabel 3. 1 Ukuran utama KRISO *Container Ship* 32
Tabel 4. 1 *Grid Independent* simulasi KCS *full viscous* 44
Tabel 4. 2 Perhitungan *friction coefficient* menggunakan rumus empirik simulasi *full viscous* 50
Tabel 5. 1 *Grid Independent free surface* 58
Tabel 5. 2 Perhitungan *Friction Coefficient* dengan rumus empirik ITTC 60
Tabel 5. 3 Perbandingan nilai *Friction Coefficient* KCS yang diperoleh dari CFD saat ini dan dengan sumber lain 61
Tabel 6. 1 Nilai Hambatan KCS *full viscous* pada berbagai variasi 69
Tabel 6. 2 Nilai Hambatan KCS *free surface* pada berbagai variasi 69
Tabel 6. 3 Perbandingan nilai C_F pada simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada metode Granville (1978)). 70
Tabel 6. 4 Perbandingan nilai C_F pada simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada metode Granville (1978)). 71
Tabel 6. 5 Perbandingan nilai $\%\Delta C_F$ CFD-KCS *hull* dan Granville (1978) pada simulasi *full viscous* 71
Tabel 6. 6 Perbandingan nilai $\%\Delta C_F$ CFD-KCS *hull* dan Granville (1978) pada simulasi *free surface* 71
Tabel 6. 7 Perbandingan nilai C_F KCS pada simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan nilai C_F Pelat Datar oleh Suastika et al. (2021) dengan *Reynolds Number* 2.23×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Suastika et al. (2021)) 72
Tabel 6. 8 Perbandingan nilai C_F KCS pada simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan nilai C_F Pelat Datar oleh Suastika et al. (2021) dengan *Reynolds Number* 2.23×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Suastika et al. (2021)) 72
Tabel 6. 9 Perbandingan nilai C_F KCS lambung halus hasil simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 73
Tabel 6. 10 Perbandingan nilai C_F KCS lambung halus hasil simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 74
Tabel 6. 11 Perbandingan nilai Form Factor lambung halus hasil simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017)) 74
Tabel 6. 12 Perbandingan nilai C_F KCS lambung kasar homogen hasil simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017)) 74
Tabel 6. 13 Perbandingan nilai C_F KCS lambung kasar homogen hasil simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017)) 74
Tabel 6. 14 Perbandingan $\%\Delta C_F$ KCS pada lambung kasar homogen dan tak-homogen dalam simulasi *full viscous* 75
Tabel 6. 15 Perbandingan $\%\Delta C_F$ KCS pada lambung kasar homogen dan tak-homogen dalam simulasi *free surface* 75

DAFTAR SIMBOL

L	=	Panjang kapal (m)
Lwl	=	*Length of Water Line* (m)
LoA	=	*Length Overall* (m)
LBP	=	*Length Between Perpendiculars* (m)
B	=	Lebar kapal (m)
H	=	Tinggi kapal (m)
T	=	Sarat kapal (m)
Vs	=	Kecepatan dinas kapal ($m.s^{-1}$)
S	=	Luasan permukaan basah (m^2)
Δ	=	*Displacement* (ton)
DWT	=	*Deadweight tonnage* (ton)
LWT	=	*Lightweight tonnage* (ton)
C_p	=	Koefisien prismatik
C_B	=	Koefisien blok
ρ	=	Massa jenis fluida ($kg.m^{-3}$)
g	=	Percepatan gravitasi ($m.s^{-2}$)
ν	=	Viskositas kinematis fluida ($Ns.m^2$)
μ	=	Viskositas dinamis fluida ($m^2.s^{-1}$)
Fn	=	*Froude number*
Re	=	*Reynolds number*
D	=	Hambatan drag (N)
A	=	Luas permukaan model (m^2)
C_D	=	Koefisien *drag friction*
C_F	=	Koefisien kekasaran
ΔC_F	=	Peningkatan koefisien kekasaran (%)
C_{VP}	=	Koefisien hambatan *viscous*
C_W	=	Koefisien hambatan gelombang
C_T	=	Koefisien hambatan total
k_s	=	*Roughness height* (μm)
C_s	=	*Roughness constant*
τ	=	Tegangan geser ($N.mm^{-2}$)
P	=	Tekanan (Pa)
y^+	=	*Dimensionless wall distance*
U^+	=	*Dimensionless mean velocity*
ΔU^+	=	Fungsi Kekasararan

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Merancang suatu kapal merupakan sebuah pekerjaan yang dibutuhkan sebelum proses pembuatan kapal dilakukan. Hal yang cukup krusial dalam perancangan sebuah kapal adalah menentukan besarnya nilai hambatan. Banyak hal yang berkaitan dengan meminimalkan hambatan baik untuk mengurangi kebutuhan daya atau meningkatkan ekonomi bahan bakar, oleh karena itu sangatlah penting bentuk badan kapal yang *streamline* guna meminimalisir hambatan yang ada selama kapal berlayar (Molland, 2011).

Untuk memenuhi kebutuhan dunia yang mendunia, telah terjadi ekspansi transportasi laut yang pesat. Menurut Konferensi PBB tentang Perdagangan dan Pembangunan (UNCTAD, 2019), volume perdagangan lintas laut telah meningkat lebih dari tiga kali lipat selama empat dekade terakhir. Meskipun transportasi laut dianggap lebih hemat bahan bakar daripada metode pengangkutan lainnya, emisi gas rumah kacanya cukup besar dan berkembang pesat. Organisasi Maritim Internasional (IMO, 2014), memperkirakan emisi CO^2 maritim akan meningkat 50%–250% pada periode hingga 2050 tergantung pada skenario perkembangan ekonomi dan energi di masa depan.

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 et al., 2017).

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 (Manen et al., 1988).

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka permasalahan yang menjadi bahasan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana hambatan kapal KRISO *Container Ship* dengan permukaan lambung halus (tinggi kekasaran = 0 μm) dan dengan permukaan lambung kasar homogen (tinggi kekasaran = 325 μm)?
2. Bagaimana hambatan kapal KRISO *Container Ship* dengan permukaan lambung yang mempunyai kekasaran tak-homogen dengan berbagai variasi kekasaran di arah memanjang (lihat gambar 3.3 untuk ketinggian kekasaran yang disimulasikan)?

1.3. Tujuan

Dari permasalahan yang telah dikemukakan, maka analisis ini mempunyai beberapa tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui Hambatan Kapal KRISO *Container Ship* dengan permukaan lambung halus (tinggi kekasaran = 0 μm) dan dengan permukaan lambung kasar homogen (tinggi kekasaran = 325 μm).
2. Mengetahui hambatan kapal KRISO Container Ship dengan permukaan lambung yang mempunyai kekasaran tak-homogen dengan berbagai variasi kekasaran di arah memanjang (lihat gambar 3.3 untuk ketinggian kekasaran yang disimulasikan).

1.4. Batasan Masalah

Ada beberapa batasan masalah dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. *Kekasaran* tak-homogen yang digunakan sebanyak 3 variasi kekasaran.
2. Ada 6 kombinasi dari variasi 3 kekasaran yang akan diuji dalam penentuan koefisien
3. Kapal yang digunakan adalah KRISO *Container Ship.*
4. Kecepatannya yang digunakan adalah 24 knots (*Reynolds Number* = 2.73×10^9).
5. Analisis kekasaran tak-homogen dilakukan secara longitudinal.
6. Metode pengujian menggunakan *Computational Fluid Dynamics.*

1.5. Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. Sebagai bahan pertimbangan bagi para desainer untuk memperhitungkan hambatan total dari suatu kapal dengan permukaan lambung tertentu yang bergerak di air pada kecepatan tertentu.

2. Mengetahui nilai-nilai koefisien hambatan gesek C_T pada KRISO *Container Ship.*
3. Mengetahui perbedaan nilai C_T untuk tiga variasi kekasaran dengan 6 kombinasi yang berbeda.

1.6. Hipotesis

Hipotesis dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Kekasaran akan meningkatkan hambatan total kapal.
2. Urutan kekasaran untuk kekasaran tak-homogen akan berpengaruh terhadap hambatan total kapal.

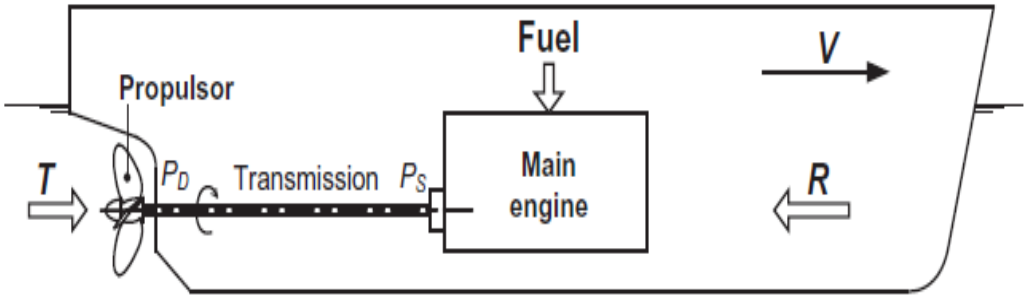
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2
DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

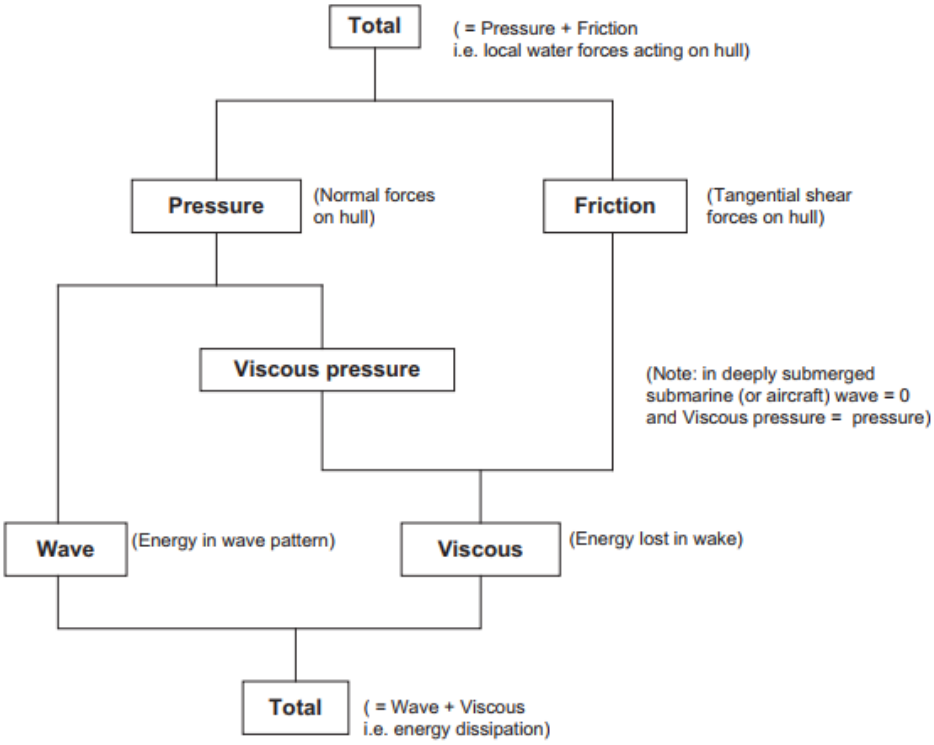
2.1.1 Hambatan Kapal

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* (Vs) agar kapal dapat bergerak dengan kecepatan yang diinginkan (Vs), dibutuhkan gaya dorong (T) yang memadai untuk mendorong kapal sehingga dapat bergerak melawan hambatan 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 diperhitungkan.



Gambar 2. 1 Konsep konversi energi pada kapal
(Sumber: Molland et al., 2017)

Hambatan kapal tersusun dari berbagai komponen yang secara lebih lengkap dapat dilihat pada Gambar 2.1. Dari Gambar 2.1, gaya resistensi terdiri atas komponen hambatan gesek (hambatan gesek, R_F) dan hambatan akibat tekanan (*pressure resistance*, R_P). Hambatan tekanan tergolong 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 (Molland et al., 2017).



Gambar 2. 2 Komponen hambatan kapal

(Sumber: Molland et al., 2017)

Hambatan terjadi karena sebagian efek viskositas fluida (*viscous pressure resistance*) dan sebagian lagi karena hambatan gelombang (*wave making 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 2.2) atau sebagai contoh, ketika benda tercelup sepenuhnya dalam air (*full viscous*), mengingat gelombang terjadi akibat adanya *free surface* atau interaksi antara dua fluida dengan massa jenis yang berbeda. Ilustrasi perbedaan hambatan gesek dan hambatan akibat tekanan dapat dilihat pada (Gambar 2.2).

Gambar 2. 3 Gaya geser dan tekanan pada lambung kapal
(Sumber: Molland et al., 2017)

$$R_T = R_F + R_R + R_A \quad \textbf{(2.1)}$$

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

di mana

R_T = Hambatan total (N)

R_F = Hambatan gesek (N)

R_W = Hambatan gelombang (N)

R_A = Hambatan *appendages* (N)

R_{VP} = Hambatan *viscous pressure* (N)

Hambatan total pada umumnya dapat disajikan dalam bentuk non-dimensional melalui :

$$C_T = R_T / (0.5\rho S V^2) \quad \textbf{(2.3)}$$

di mana

C_T = Koefisien Hambatan total

ρ = Massa jenis fluida (kg.m^3)

S = Luas permukaan basah (m^2)

V = Kecepatan (m/s)

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

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

di mana

C_F = Koefisien hambatan gesek

C_{VP} = Koefisien viscous pressure

C_W = Koefisien hambatan gelombang

C_A = Koefisien hambatan appendages

1. Hambatan gesek

Gaya gesek timbul akibat kontak air dengan permukaan atau kulit kapal (Lackenby, 1962).

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

di mana

C_D = Koefisien drag

C_{VP} = Koefisien viscous pressure

C_F = Koefisien hambatan gesek

Hambatan total terbagi menjadi hambatan viscous pressure dan hambatan gelombang berdasarkan metode ekstrapolasi antara model dan kapal. Sehingga, (2.4) menjadi:

$$C_D=(1+k)C_F \quad \textbf{(2.6)}$$

di mana

$(1+k)$ = Form factor

Nilai koefisien hambatan gesek C_F dapat dihitung dengan rumus koefisien hambatan gesek ITTC-57:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log R_e - 2)^2} \quad \textbf{(2.7)}$$

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

$$R_e = \frac{VL}{v} \quad \textbf{(2.8)}$$

di mana

R_e = *Reynolds Number*

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

v = Viskositas kinematis fluida

L = Panjang karakteristik (m)

Reynolds Number merupakan suatu besaran tanpa satuan yang melambangkan rasio antara gaya inersia dengan viskositas fluida untuk menentukan jenis aliran fluida berupa laminer 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 Koefisien hambatan gesek yang didapatkan dari rumus ITTC pada persamaan (2.7), sehingga:

$$R_F = C_F(\frac{1}{2}\rho S V^2) \quad \textbf{(2.9)}$$

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 ($m.s^{-1}$)

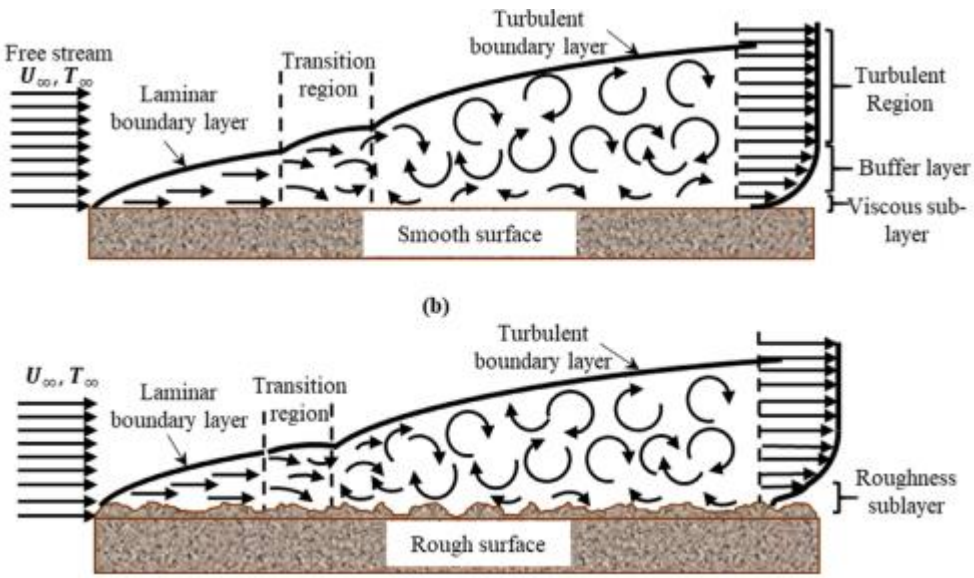
2.Hambatan *Viscous Pressure*

Tekanan normal yang terjadi pada kapal menimbulkan hambatan *viscous pressure*, berupa kekentalan fluida yang dilalui oleh kapal. Apabila fluida memiliki nilai viskositas yang tinggi, maka hambatan *viscous pressure* yang diterima kapal semakin tinggi, begitu juga sebaliknya (Lackenby, 1962). Hambatan *viscous pressure* direpresentasikan dengan *form factor* (1+k), karena besar tekanan dipengaruhi oleh bentuk kapal. *Form factor* dapat ditemukan pada (2.6).

3. *Surface Roughness*

Kekasaran permukaan mungkin merupakan hasil dari proses manufaktur dan penggunaan normal suatu produk (keausan). Ini juga dapat dihasilkan dari mekanisme termasuk erosi, korosi dan proses pengendapan seperti di turbin gas (Bons, 2010), *biofouling* di lambung kapal dan mesin kelautan (Walker et al., 2014). Kedua jenis kekasaran ini dapat membahayakan keselamatan, kinerja, dan efisiensi sistem, terutama karena perubahan struktur turbulen serta momentum dan transfer energi. Sebagai contoh, dalam studi *review* pada turbin gas (Bons, 2010), melaporkan bahwa proses degradasi dan pengendapan alami mempengaruhi kekasaran permukaan yang cukup untuk mengurangi kinerja kompresor dan turbin.

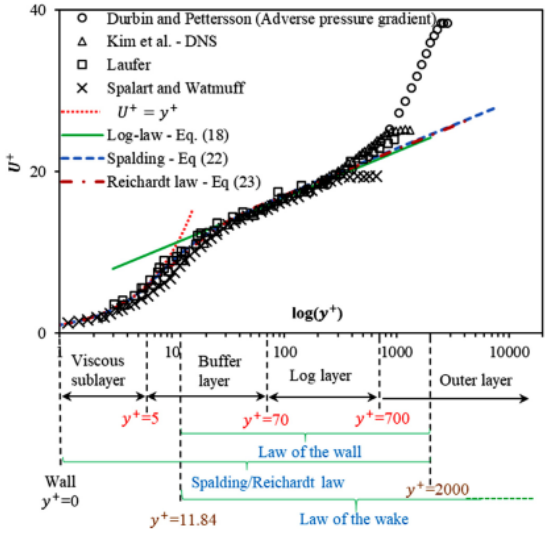
Selain studi eksperimental, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah banyak diadopsi untuk studi aliran kasar. Kekasaran permukaan dapat diperhitungkan dalam CFD dengan memasukkan efek kekasaran dalam model CFD turbulen, seperti LES model dinding atau *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), atau penyelesaian langsung melalui penggunaan DNS atau LES. Adopsi metode numerik yang sesuai tergantung pada fisika masalah (Geometri, bilangan Reynolds, dll) dan yang lebih penting, sumber daya komputasi yang tersedia. Kemampuan komputasi modern telah memungkinkan peneliti untuk melakukan *Direct Numerical Simulation* (DNS) aliran turbulen di atas permukaan kasar dengan geometri kompleks, termasuk kekasaran tidak beraturan/acak atau permukaan nyata yang dipindai (Forooghi et al., 2018). Pada gambar 2.4 diperlihatkan bahwa terdapat klasifikasi aliran laminar. Klasifikasi nilai dari aliran laminar adalah ($Re \leq 2300$), aliran transisional ($2300 \leq Re \leq 4000$), aliran turbulen ($Re \geq 4000$) (Cengel, Y.A., Cimbala, 2006).



Gambar 2. 4 Aliran *Boundary Layer* pada a)permukaan halus dan b)permukaan kasar
(Sumber: Kadivar et al., 2021)

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

1. *Inner layer (viscous sub-layer)*, di mana efek viskositas fluida mendominasi aliran;
2. *Overlap layer (log-layer)*, di mana terdapat pencampuran turbulen tingkat rendah;
3. *Buffer layer*, di mana terdapat pencampuran turbulen tingkat tinggi karena produksi turbulen di wilayah ini dan peningkatan intensitas turbulensi.
4. *Outer layer (defect layer)*, di mana efek turbulen *eddy* skala besar mendominasi aliran.



Gambar 2. 5 Lapisan Batas dari *Boundary Layer*
(Sumber: Deshmukh & Samad, 2019; Durbin & Reif, 2010; Kim et al., 2020; Laufer, 1954)

Pada umumnya, kekasaran diukur menggunakan parameter *roughness length scale*, yaitu *roughness height* (k). Permukaan kasar meningkatkan turbulensi sehingga *turbulent stress* dan *wall shear stress* meningkat. Hal ini menyebabkan penurunan kecepatan *pada turbulent boundary layer*. Karakteristik dari gesekan kulit akibat kekasaran tidak homogen

2.1.2 *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Dewasa ini, metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) sudah cukup berkembang. CFD merupakan seperangkat metode numerik yang diterapkan untuk mendapatkan solusi perkiraan masalah dinamika fluida, perpindahan panas, dan fenomena yang berkaitan dengan reaksi kimia. CFD juga dapat digunakan untuk mendapatkan nilai *form factor* yang didapatkan dari hambatan viskos dan hambatan gesek suatu lambung kapal dengan RANS-*solver* dan *wind tunnel* (Molland & Utama, 2002).

Dalam proses analisisnya, CFD menggunakan persamaan-persamaan yang didasarkan pada persamaan kontinuitas, serta persamaan momentum dan energi. Persamaan-persamaan ini merupakan pernyataan matematis dari tiga prinsip dasar fisika yaitu:

1. Hukum Kekekalan Massa (*The Conservation of Mass*)
2. Hukum Newton Kedua (*Newton's Second Law of Motion*)
3. Hukum Kekekalan Energi (*The Conservation of Energy*)

Persamaan dasar yang digunakan dalam CFD yaitu persamaan *Navier-Stokes* yang menjelaskan tentang pergerakan suatu fluida. Dalam persamaan *Navier-Stokes*, diasumsikan *fluida incompressible* (tidak dapat dimampatkan). Bentuk umum dari persamaan *Navier-Stokes* yaitu sebagai berikut:

$$\rho\left(\frac{\delta V}{\delta t} + v.\nabla v\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2 v + f \qquad \textbf{(2.10)}$$

di mana:

V = Kecepatan Aliran

∇ = Perpindahan

ρ = Massa jenis fluida

μ = Gaya gesek

f = Gaya dari luar

t = Waktu

Pendekatan untuk analisis numerik dari turbulensi dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu simulasi dan pemodelan. Pada simulasi, metode yang digunakan adalah *Direct Numeric Simulation* (DNS) dan *Large Eddy Simulation* (LES) sedangkan pada pemodelan, metode

pendekatan yang digunakan adalah *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS). RANS merupakan metode pemodelan turbulensi yang paling sering digunakan dan menjadi dasar dari analisis CFD secara praktis (Zikanov, 2019). Perhitungan CFD memanfaatkan metode RANS untuk menyelesaikan bidang aliran viskositas (Suastika et al., 2017). Teknik CFD ini sangat berguna dan dapat diaplikasikan pada bidang industri dan non industri. Cara kerja dari CFD ini dalam penyelesaian permasalahan aliran fluida adalah dengan algoritma numerik, di mana kode dari CFD ini terdiri atas tiga elemen utama yaitu pre-processor, solver, dan post-processor (Versteeg, H.K., & Malalasekera, 2007).

- Pre-Processor

  Pre-processor terdiri atas input masalah aliran ke program CFD melalui antarmuka yang mudah digunakan dan transformasi selanjutnya dari input ini menjadi bentuk yang cocok untuk digunakan oleh solver. Aktivitas pengguna pada tahap pre-processing meliputi:

1. Mendefinisikan geometri yang akan diteliti dan komputasi domain.
2. Pembuatan *grid* yakni membagi domain menjadi sub-domain: grid atau mesh dari elemen-elemen yang lebih kecil (*cell*).
3. Menentukan fenomena fisik dan kimia pada pemodelan.
4. Mendefinisikan sifat fluida.
5. Menentukan kondisi batas yang sesuai pada elemen – elemen yang bersinggungan dengan domain.

Solusi untuk permasalahan aliran (kecepatan, tekanan, suhu dan sebagainya) didefinisikan dalam tiap titik pada setiap elemen *cell*-nya. Keakuratan dari hasil CFD tergantung dari jumlah *cell* yang ada pada grid, di mana semakin banyak jumlah *cell* maka akan semakin akurat hasil dari simulasi CFD, namun hal ini mempunyai konsekuensi bahwa waktu yang dibutuhkan untuk melakukan komputasi akan semakin lama. *Mesh* yang optimum seringkali merupakan mesh yang tidak seragam. *Mesh* yang tidak seragam yaitu *mesh* yang halus pada geometri yang memiliki perubahan bentuk yang besar dan kasar pada geometri yang memiliki perubahan bentuk yang kecil. Program-program CFD pada saat ini telah menggunakan kode-kode yang memiliki kemampuan *self-adaptive meshing*. Dengan adanya program ini, proses meshing dapat otomatis memberikan jenis mesh yang halus dan kasar sesuai perubahan geometri yang terjadi pada model (Versteeg, H.K., & Malalasekera, 2007).

• Solver

Secara garis besar, algoritma numerik dari *solver* terdiri atas pekerjaan sebagai berikut (Versteeg, H.K., & Malalasekera, 2007):

1. Memperkirakan variabel yang tidak diketahui pada aliran dengan fungsi sederhana.
2. Diskretisasi, yaitu dengan mengkonversi hasil dari perkiraan variabel fungsi sederhana menjadi fungsi persamaan aliran utama menjadi sistem persamaan aljabar.
3. Penyelesaian persamaan aljabar dengan metode iteratif.

Terdapat empat teknik dasar dalam CFD yaitu *Boundary Element Method* (BEM), *Finite Element Method* (FEM), *Finite Difference Method* (FDM), dan *Finite Volume Method* (FVM) (Bertram, 2000).

1. Boundary Element Method (BEM)

   BEM digunakan untuk aliran-aliran potensial. BEM sering digunakan pada kapal, salah satunya permasalahan hambatan gelombang. BEM juga disebut dengan metode panel (*panel method*). Metode panel membagi permukaan kapal dalam beberapa elemen (panel). Tiap elemen secara otomatis memenuhi persamaan *Laplace*. BEM kurang cocok digunakan untuk permasalahan dengan kondisi batas yang memerlukan penurunan potensial yang lebih tinggi. Akan tetapi, BEM memiliki akurasi yang tinggi untuk aliran-aliran *lift*. BEM tidak dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS) atau persamaan *Euler*.
2. Finite Element Method (FEM)

   FEM menjadi sangat penting untuk analisis struktural. Dalam bidang hidrodinamika kapal, FEM memiliki banyak peran. Tidak seperti di analisis struktural, fungsi elementer tidak dapat digunakan sebagai fungsi berat untuk menentukan berat residual pada metode Galerkin. Hal ini mengurangi kebagusan dari metode FEM.
3. Finite Difference Method (FDM)

   FDM sama seperti FEM, yakni membagi domain fluida. Turunan dari persamaan persamaan dalam domain didekati dengan beda hingga. Kesalahan pembagian elemen (diskritisasi) dapat menyebabkan tidak terpenuhinya persamaan konservasi massa atau momentum.
4. Finite Volume Method (FVM)

   FVM juga membagi domain fluida menjadi beberapa elemen seperti FDM. Akan tetapi, FVM mengintegralkan persamaan konservasi massa dan momentum pada

tiap elemen sebelum variabel-variabel studi diperkirakan pada tiap titik tengah elemen. Hal ini memastikan sifat kekonservasian tidak berubah karena error pada permukaan elemen. FVM umumnya digunakan pada aplikasi-aplikasi CFD yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan *Reynold Averaged Navier Stokes* (RANS)

• Post-Processor

Pada tahapan Post-Processor, hasil perhitungan dari simulasi CFD yang telah dilakukan di tahap solver ditampilkan dalam bentuk gambar, grafik, atau animasi dengan pola tertentu. Data visualisasi tersebut meliputi.

1. Domain geometri dan grid.
2. Plot vektor.
3. Plot garis dan kontur.
4. Plot permukaan 2-dimensi dan 3-dimensi.
5. Memperlihatkan warna pada output.

Setelah *grid* dibuat, kondisi batas perlu diterapkan. Tekanan, kecepatan, aliran massa, dan besaran skalar seperti suhu dapat ditentukan pada inlet. Untuk suhu, laju geser dinding atau *fluks* panas dapat terjadi pada *wall* sedangkan untuk pemisahan tekanan atau laju aliran dapat diperbaiki pada *outlet*. Properti pengangkutan material komponen seperti kerapatan, viskositas, dan kapasitas panas perlu ditentukan sebagai konstan atau dipilih dari database. Hal ini bisa berupa fungsi suhu, tekanan, atau variabel keadaan lainnya. Fluida dapat dimodelkan menjadi fluida yang dapat dimampatkan atau tidak dapat dimampatkan sedangkan viskositas fluida dapat berupa Newtonian atau non-Newtonian, menggunakan hukum daya, Herschel-Bulkley, Carreau, atau model viskoelastik. Dalam aplikasi transfer massa atau panas, difusi biner dan sifat termal perlu didefinisikan juga (Bakker, 2001).

Penentuan form factor dengan simulasi CFD dapat dilakukan dengan mencari nilai hambatan total (R_T) full viscous dan koefisien hambatan gesek dari pelat datar (C_F). Pemodelan full viscous merupakan pemodelan dengan definisi bahwa bagian kapal dibawah garis air yang dilakukan untuk mendapatkan hambatan kekentalan dari model kapal (Gibson & Utama, 2016). Nilai koefisien hambatan gesek dapat dilakukan dari simulasi CFD pelat datar dengan memanfaatkan persamaan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) dengan model turbulensi yang digunakan adalah k-epsilon (Date & Turnock, 1999).

2.1.3 Kekasaran Permukaan

Pada umumnya, kekasaran diukur menggunakan parameter *roughness length scale*, yaitu *roughness height* (k_s), yang diasumsikan sebagai ketinggian butiran amplas *(sandpaper roughness height)*. Nilai k_s yang semakin tinggi melambangkan permukaan yang semakin kasar. Hal ini tercermin pada amplas, 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.

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 & 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 defisit 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 (2.10) berikut:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa}\ln(y^+) + B - \Delta U^+ \qquad \textbf{(2.10)}$$

di mana:

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

κ = konstanta Von Kármán (=0.41)

y^+ = jarak non dimensi *cell* pertama dari dinding permukaan model (yu_τ/v), di mana y jarak kekasaran ke dinding dengan satuan meter, u_τ merepresentasikan *shear velocity*, dan v merepresentasikan viskositas kinematik fluida)

B = *constant log-law intercept*

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

Roughness function tidak selalu dalam bentuk *smooth walls*, namun ada perbedaan untuk *roughness function* untuk bentuk *rough walls*, di mana ΔU^+ nya tidak sama dengan 0, persamaan tersebut disebutkan oleh Ligrani & Moffat (1986) sebagai berikut:

$$\Delta U^+ = C - B + \frac{1}{\kappa}\, lnk_s{}^+ \qquad \textbf{(2.11)}$$

Jadi ΔU^+, adalah selisih antara *log-wall* dari profil kecepatan rata -rata *rough walls*. Pada persamaan (2.11) terbukti bahwa pergeseran profil kecepatan dari *smooth law walls* bergantung

pada B dan k_s^+ .

Saat memodelkan kekasaran permukaan, fungsi dindingnya adalah dimodifikasi karena pergeseran di bawah *log-wall* dari profil kecepatan yang disebabkan oleh kekasaran. Oleh karena itu, fungsi konstan kekasaran diuraikan oleh persamaan (2.12).

$$B = (C + \frac{1}{\kappa}\ln k_s{}^+)(1 - \sin(\frac{\pi g}{2})) + 8.5\sin(\frac{\pi g}{2}) \quad \textbf{(2.12)}$$

di mana:

C = konstanta (=5.1)

$k_s{}^+ = \frac{k_s U_\tau}{\nu}$, di mana k_s adalah ketinggian kekasaran dalam meter

g = mewakili 3 kekasaran pada persamaan (2.13), (2.14), dan (2.15)

$$g = \frac{\ln\left(k_s{}^+ / k_{s,smooth}{}^+\right)}{\ln\left(k_{s,rough}{}^+ / k_{s,smooth}{}^+\right)} \qquad k_{s,smooth}{}^+ < k_s{}^+ < k_{s,rough}{}^+ \quad \textbf{(2.13)}$$

$$g = 1 \qquad k_s{}^+ > k_{s,rough}{}^+ \quad \textbf{(2.14)}$$

$$g = 0 \qquad k_s{}^+ < k_{s,smooth}{}^+ \quad \textbf{(2.15)}$$

Karakteristik geometri menentukan nilai dari dari $k_{s,smooth}{}^+$ dan $k_{s,rough}{}^+$, yang berturut-turut setara dengan 2.25 dan 90. Nilai-nilai tersebut diusulkan oleh Ligrani & Moffat (1986), di mana nilai – nilai tersebut diimplementasikan pada perhitungan numerik. Pada penelitian ini lambung kapal diuji dengan tiga variasi 81.25 μm, 325.00 μm, dan 568.75 μm, yang merepresentasikan lambung yang dipenuhi *fouling* secara realistis (Monty et al., 2016).

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 (2.16) adalah persamaan untuk menentukan besarnya nilai ks^+.

$$k_s{}^+ = \frac{k_s U_\tau}{\nu} \quad \textbf{(2.16)}$$

di mana:

$k_s{}^+$ = *Roughness Reynolds Number*

k_s = *Roughness height (µm)*

ν = Viskositas kinematis fluida ($Ns.m^2$)

U_τ = *Friction velocity*

dan

$$U_\tau = U_\infty \sqrt{\frac{C_F}{2}} \quad \textbf{(2.17)}$$

di mana

U_∞ = *Freestream velocity* (m/s)

C_F = Koefisien hambatan gesek

Berdasarkan penelitian Ligrani & Moffat (1986), terdapat tiga kekasaran permukaan yaitu:

- *Hydrodynamically smooth:*

  $k_s^+ \leq 2.25$ **(2.18)**

- *Transitional:*

  $2.25 < k_s^+ \leq 90$ **(2.19)**

- *Fully rough:*

  $k_s^+ > 90$ **(2.20)**

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.

Berikutnya sebagai validasi kekasaran Granville (1978) mengusulkan prosedur penskalaan *Similarity Law* untuk memprediksi efek kekasaran tertentu pada hambatan gesek dari sembarang benda yang ditutupi dengan kekasaran yang sama, dengan memanfaatkan fungsi kekasaran (ΔU^+) yang diperoleh secara eksperimental dari permukaan tersebut. Satu – satunya asumsi nyata dari metode ini adalah bahwa kesamaan lapisan luar berlaku dalam profil kecepatan rata – rata untuk lapisan batas dinding halus dan dinding kasar (Demirel et al., 2017). *Similarity Law* diformulasikan dalam persamaan (2.21) sebagai berikut:

$$C_{F,rough} = \frac{0.075}{(Log_{10}(Re) - shifting - 2)^2} \quad \textbf{(2.21)}$$

di mana shifting diformulasikan pada persamaan (2.22):

$$Shifting = \Delta U^+ \frac{\kappa}{\ln(10)} \quad \textbf{(2.22)}$$

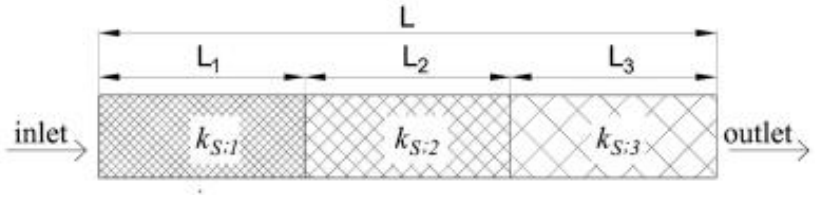
2.2 Tinjauan Pustaka

2.2.1 Karakteristik dari Gesekan Kulit Akibat Kekasaran Tak-Homogen

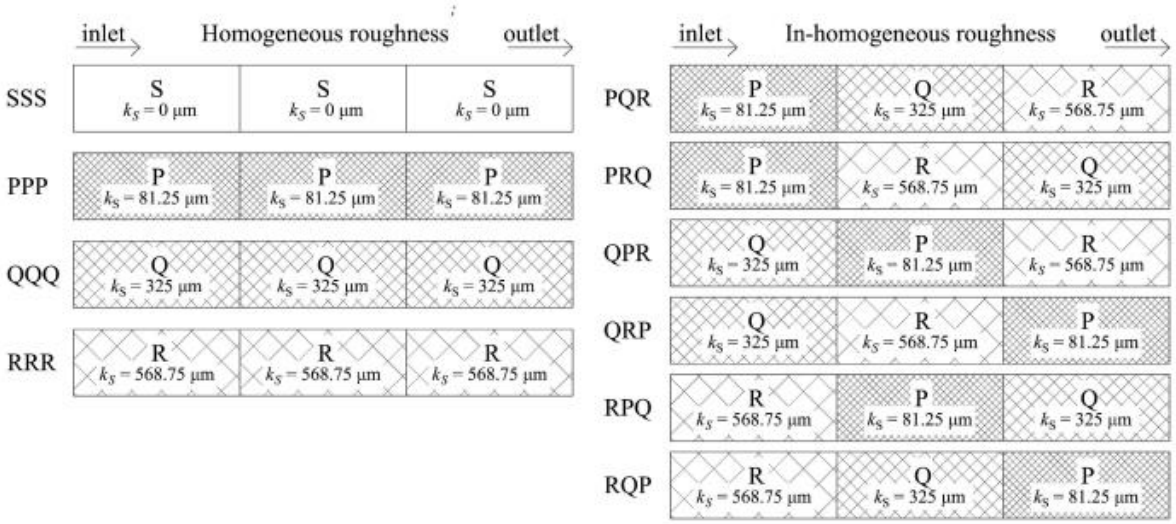
Suastika et al. (2021) melakukan penelitian pelat datar dengan kekasaran tak-homogen di arah memanjang dan membandingkannya dengan kekasaran homogen. Empat kekasaran permukaan dengan nilai k_s berbeda yang dipertimbangkan dalam penelitian ini, yaitu dinding halus (S), tinggi kekasaran kecil (P), tinggi kekasaran sedang (Q) dan tinggi kekasaran tinggi (R) (lihat Tabel 2.1 untuk rincian). Semua tiga kombinasi dari kekasaran P, Q dan R dianggap membentuk dinding kasar baik homogen maupun tidak homogen aliran lapisan batas turbulen. Misalnya, kombinasi tiga permukaan PPP, QQQ atau RRR membentuk homogen kekasaran sedangkan kombinasi PQR, PRQ, QPR, dll membentuk kekasaran yang tidak homogen. Nilai k_s ini adalah dipilih secara khusus sehingga rata-rata tinggi tiga k_s berbeda P (81.25 μm), Q (325.00 μm) dan R (568.75 μm) akan memberikan tinggi rata-rata Q, yaitu (81.25 μm + 325.00 μm + 568.75 μm) / 3 = 325.00 μm. Urutan susunan kekasaran dalam pola kekasaran aliran yang tidak homogen memainkan peran kunci dalam menghasilkan gesekan kulit secara keseluruhan dengan nilai yang meningkat dalam urutan berikut: PQR < PRQ < QPR < QRP < RPQ < RQP. Hukum kesamaan berlaku untuk permukaan kasar yang homogen dan tidak homogen. Nilai *ks* yang dipilih juga dirancang untuk mensimulasikan berbagai tahap pertumbuhan *biofouling* lambung kapal, yang berkisar dari lendir ringan (Schultz, 2007) pengapuran kecil (Monty et al., 2016). Kemudian untuk visualisasi dari plat datarnya dapat dilihat pada gambar 2.6 dan gambar 2.7.

Tabel 2. 1 Notasi untuk segmen pelat dengan tinggi kekasaran yang sesuai
(Sumber: Suastika et al., 2021)

Notation	S	P	Q	R
Sand-grain roughness height k_s [μm]	0.00	81.25	325.00	568.75



Gambar 2. 6 Aliran fluid pada kombinasi dari 3 segmen pelat
(Sumber: Suastika et al., 2021)



Gambar 2. 7 Kombinasi dari tiga segmen pelat pada simulasi permukaan kasar yang homogen dan tidak homogen
(Sumber: Suastika et al., 2021).

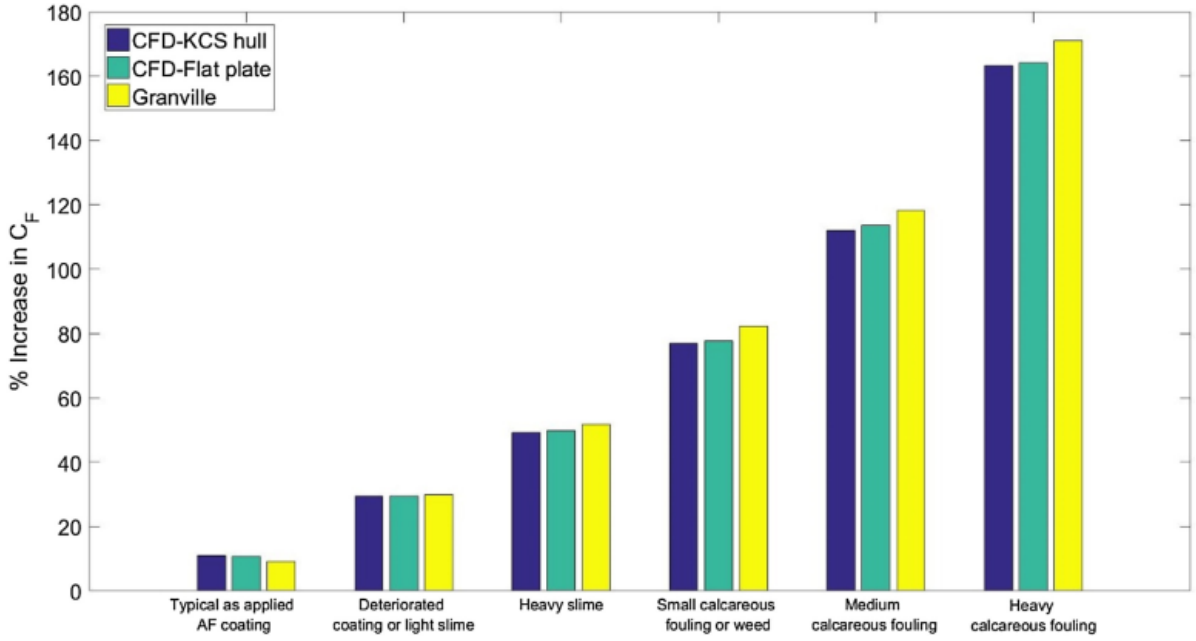
Perubahan kekasaran di dekat tepi depan pelat memiliki efek yang jauh lebih signifikan pada koefisien gesekan kulit C_F secara keseluruhan daripada perubahan ini di dekat trailing *edge*. Secara praktis, membatasi (membersihkan) *biofouling* dari haluan kapal adalah keuntungan terbesar dan harus diprioritaskan.

2.2.2 Memprediksi Efek Biofouling pada Hambatan Kapal Menggunakan CFD

Demirel et al. (2017) dalam makalah ini mengusulkan model RANS *unsteady* berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang memungkinkan prediksi efek pelapisan kapal dan *biofouling* pada resistansi kapal dan menyajikan simulasi CFD dari efek kekasaran pada resistansi dan daya efektif KRISO 3D skala penuh lambung Kapal Kontainer (KCS). Dalam penelitian ini, karena metode yang digunakan adalah CFD, meskipun penerapannya *impossible* namun dapat dimodifikasi bagian dindingnya dengan *software* CFD, yakni dengan cara memodifikasi koefisien fungsi dinding (konstanta lapisan *log-wall*). Meskipun demikian, metode ini tidak mencerminkan efek kekasaran pada resistensi gesekan dan tidak menghitung efek ini secara dinamis karena keterbatasan variasi kekasaran dibandingkan dengan kekasaran bawaan seperti pelepasan *cat coating* dan *biofouling.*

Awalnya, model fungsi kekasaran yang mewakili lapisan tipikal dan kondisi pengotoran yang berbeda dikembangkan dengan menggunakan fungsi kekasaran yang diberikan dalam literatur. Model ini kemudian digunakan dalam fungsi dinding perangkat lunak CFD dan efek tipikal sebagai pelapis yang diterapkan dan kondisi pengotoran yang berbeda pada

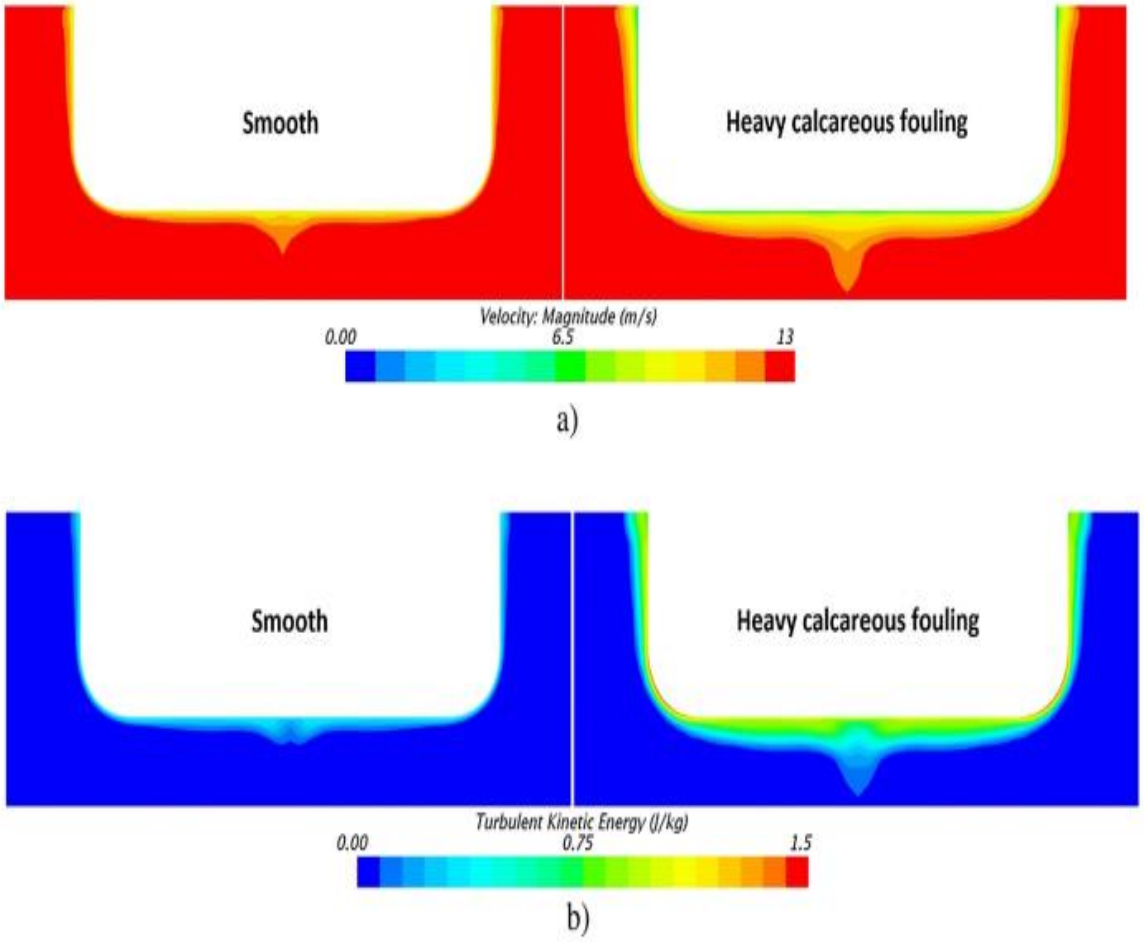
ketahanan gesekan pelat datar yang mewakili KCS diprediksi untuk kecepatan desain 24 knot dan penguapan lambat. kecepatan 19 knot menggunakan model CFD yang diusulkan. Efek kekasaran dari kondisi tersebut pada komponen resistansi dan daya efektif model KCS 3D skala penuh kemudian diprediksi pada kecepatan yang sama. Nilai hambatan gesekan yang dihasilkan dari penelitian ini kemudian dibandingkan satu sama lain dan dengan hasil yang diperoleh dengan menggunakan analisis hukum kesamaan. Peningkatan daya efektif lambung KCS skala penuh diperkirakan sebesar 18.1% untuk lapisan yang rusak atau sedikit kotor ringan karena lapisan yang sangat kotor diprediksi sebesar 38% pada kecepatan kapal 24 knot. Selain itu, diamati bahwa hambatan gelombang dan sistem gelombang secara signifikan dipengaruhi oleh kekasaran lambung kapal dan karena viskositas. Dibawah ini merupakan perbandingan peningkatan C_F dari kekasaran paling ringan, sampai dengan kekasaran paling berat



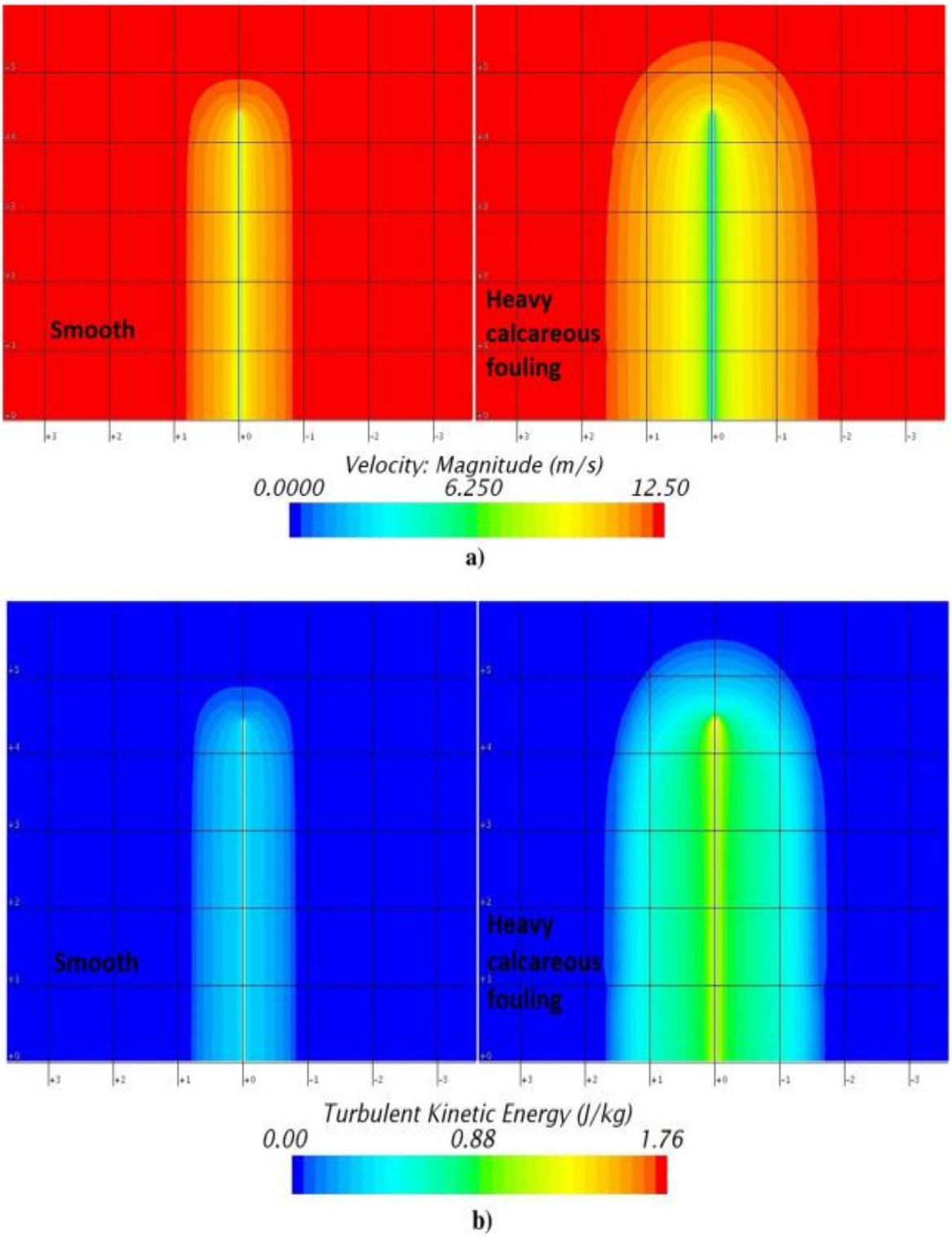
Gambar 2. 8 Perbandingan peningkatan persentase *friction coefficient* antara permukaan kapal asli, slime kecil, slime berat, sedikit berkapur, berkapur, dan berkapur berat (Sumber: Demirel et al., 2017).

Kontur kecepatan dan energi kinetik turbulen dalam kondisi pengotoran berkapur halus dan berat ditunjukkan pada Gambar 2.9 untuk lambung kapal KCS dan pada Gambar 2.10 untuk pelat datar. Gambar 2.11 menunjukkan penampang kontur kecepatan aksial pada x/L = 0.25, 0.5, 0.75, menggambarkan lapisan batas lambung KCS dalam kondisi pengotoran berkapur halus dan berat. Seperti yang dapat dilihat dari Gambar. 2.9–2.11, energi kinetik turbulen meningkat dengan kekasaran permukaan sedangkan besaran kecepatan dan kecepatan aksial menurun dengan adanya kekasaran pada permukaan lambung. Hal ini sesuai dengan fakta

bahwa kekasaran permukaan menyebabkan peningkatan turbulensi, yang berarti bahwa tegangan turbulen dan tegangan geser dinding meningkat dan pada akhirnya, kecepatan pada lapisan batas turbulen menurun (Schultz & Swain, 2000). Juga harus dipertimbangkan bahwa penurunan profil kecepatan memanifestasikan dirinya sebagai peningkatan resistensi gesekan (Demirel et al., 2014). Sebagai bukti visual, dari Gambar 2.11, adanya fouling berat pada lambung KCS menyebabkan peningkatan ketebalan lapisan batas, yang didefinisikan sebagai jarak antara dinding dan titik di mana besarnya kecepatan aksial aliran mencapai proporsi 0,99 dari kecepatan aliran bebas, yaitu U = 0,99 V, dibandingkan dengan KCS yang bebas dari kekotoran.



Gambar 2. 9 a) Kecepatan dan b) Kontur Energi Kinetik Turbulen di bagian tengah lambung KCS untuk kondisi pengotoran berkapur yang halus dan berat (V = 24 knot)
(Sumber: Demirel et al., 2017)



Gambar 2. 10 a) Kecepatan dan b) Kontur Energi Kinetik Turbulen di bagian tengah pelat datar yang mewakili lambung KCS untuk kondisi pengotoran berkapur halus dan berat (V=24 knot) (jarak kisi dalam meter).
(Sumber: Demirel et al., 2017)

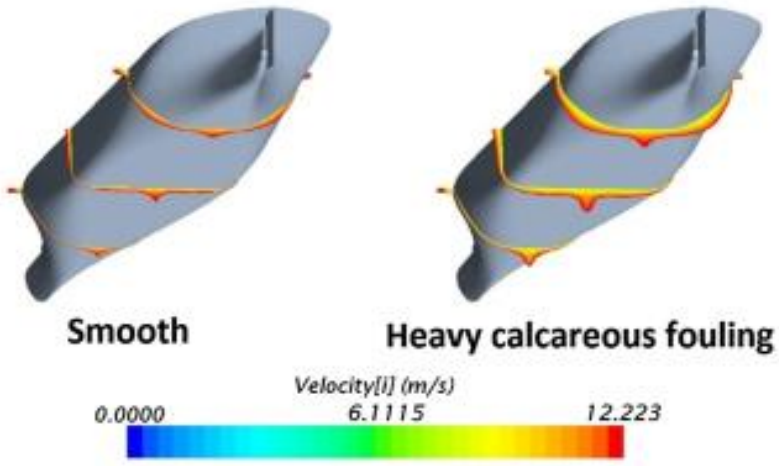


Fig. 22. Cross sections coloured with axial velocity limited to U = 0.99 V depicting the boundary layer (V = 24 knots).

Gambar 2. 11 Penampang melintang diwarnai dengan kecepatan aksial terbatas pada U = 0.99 V menggambarkan lapisan batas (V = 24 knot)
(Sumber: Demirel et al., 2017)

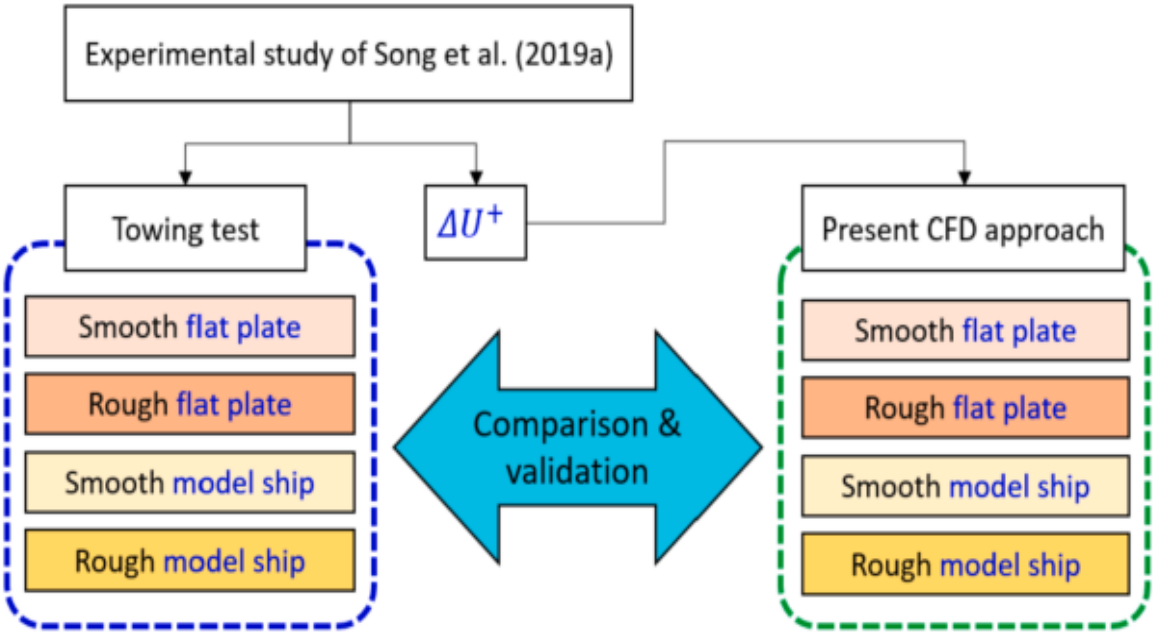
2.2.3 Validasi Pendekatan CFD untuk Efek Kekasaran Pemodelan Resistensi Kapal

(Song et al., 2020) dalam penelitian ini mengungkapkan bahwa kekasaran lambung kapal muncul dari berbagai sebab seperti korosi, kegagalan *marine coating,* dan pertumbuhan *biofouling* (Demirel et al., 2017; Tezdogan & Demirel, 2013). Akibatnya adalah kehilangan kecepatan kapal pada daya konstan atau peningkatan konsumsi daya pada kecepatan konstan (Townsin, 2003). Pada dasarnya baik melalui perspektif ekonomi dan lingkungan, memprediksi efek dari kekasaran lambung sangat penting untuk penjadwalan yang lebih baik dalam pelaksanaan *dry-docking* serta pilihan yang baik untuk pembaharuan *marine coatings*

Analisis hukum *boundary similarity law* yang diusulkan oleh Granville (1978) telah banyak digunakan untuk memprediksi efek kekasaran pada tahanan gesek kapal. Manfaat menggunakan metode ini adalah bahwa setelah fungsi kekasaran, ΔU^+, permukaan diketahui, gesekan kulit dengan kekasaran yang sama dapat diekstrapolasi untuk pelat datar dengan panjang dan kecepatan yang berubah-ubah. Baru-baru ini, Song et al. (2019) menunjukkan validitas dari penggunaan metode ini untuk memprediksi efek kekasaran pada tahanan kapal, dengan melakukan serangkaian uji tarik pelat datar dan model kapal dalam kondisi permukaan halus dan kasar.

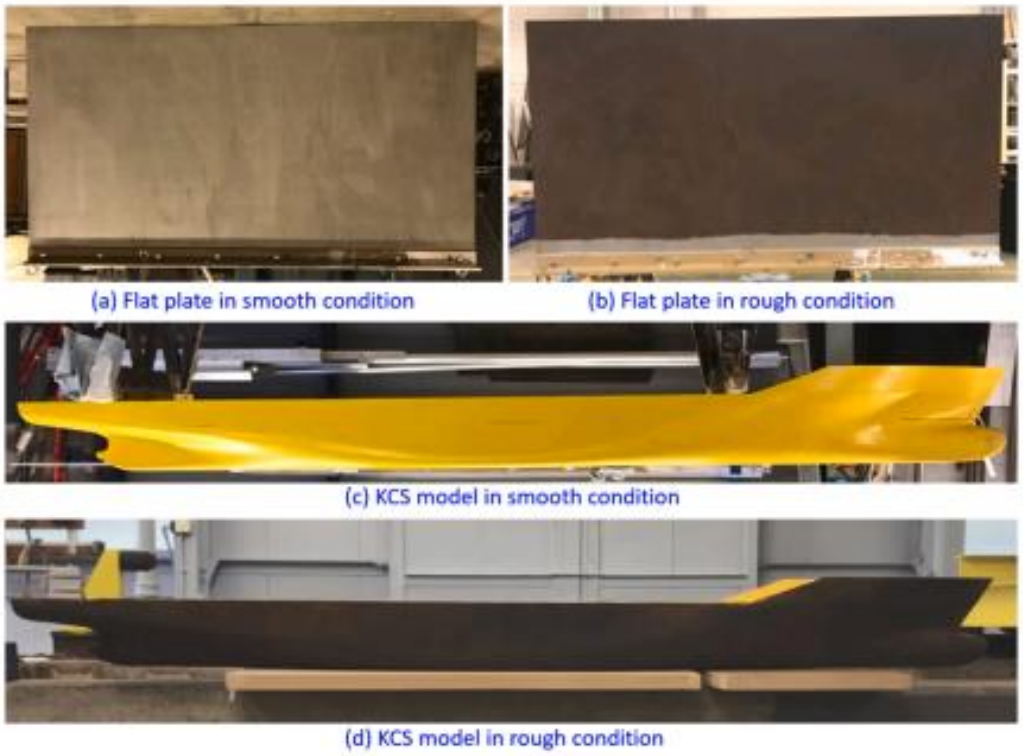
Meskipun beberapa penelitian memvalidasi pendekatan CFD mereka dengan membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen (Demirel et al., 2014; Song et al., 2019), validasi hanya dilakukan terhadap uji penarik pelat datar, yang tidak memiliki gradien

tekanan. Artinya, validasi ini hanya berlaku untuk tahanan gesek, dan dengan demikian tidak dapat menjamin validitasnya untuk komponen tahanan lain yang berasal dari bentuk 3D lambung kapal. Oleh karena itu, validitas pendekatan CFD untuk lambung 3D masih harus dibuktikan. Sejauh pengetahuan penulis, tidak ada studi khusus untuk memvalidasi pemodelan CFD dari kekasaran lambung terhadap uji model kapal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengembangkan model CFD untuk memprediksi pengaruh kekasaran lambung kapal dan melakukan studi validasi dengan membandingkan dengan data eksperimen model kapal dengan permukaan kasar.



Gambar 2. 12 Ilustrasi skema metodologi antara Towing Test dan penerapan CFD (Sumber: Song et al., 2020)

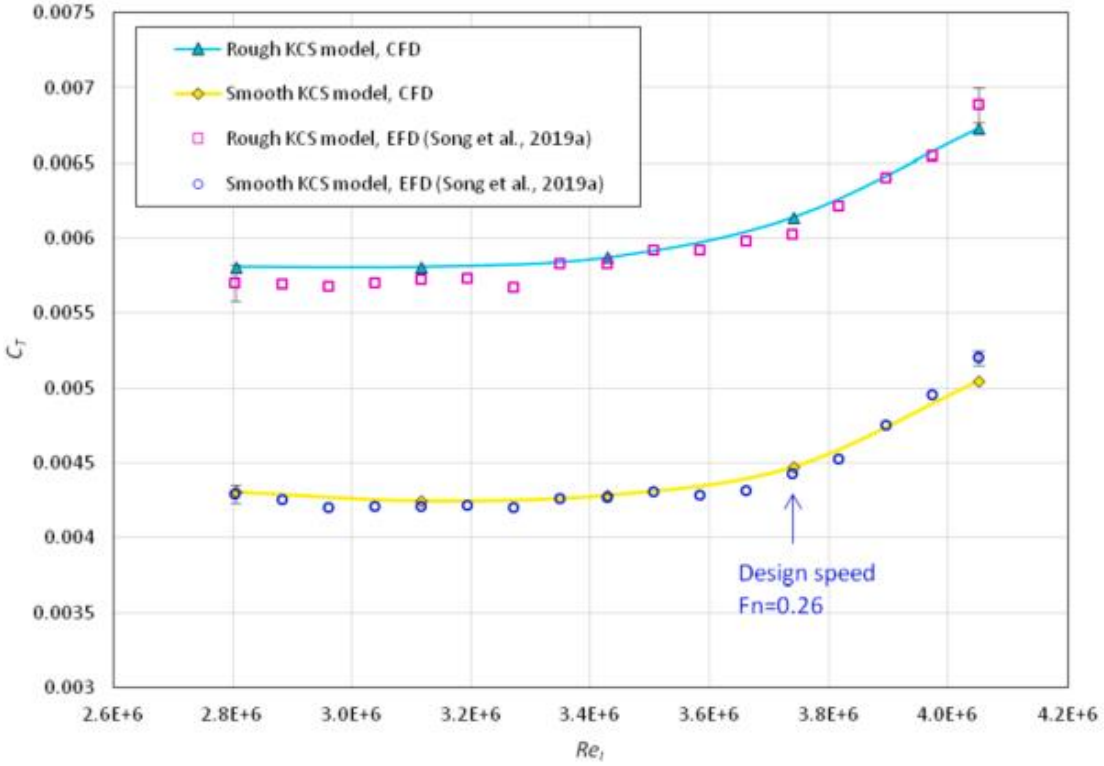
Sebuah ilustrasi skema dari studi saat ini ditunjukkan pada Gambar. 2.12. Dalam studi ini, model CFD dikembangkan untuk mensimulasikan tes penarik yang dilakukan dalam penelitian sebelumnya (Song et al., 2019a), yang melibatkan tes penarik pelat datar dan model kapal KCS dalam kondisi permukaan yang halus dan kasar (Gambar. 2.13). Untuk mewakili kekasaran permukaan dari permukaan butiran pasir, model fungsi kekasaran digunakan dalam fungsi dinding model CFD. Hasil simulasi pelat datar dan model kapal pada kondisi permukaan halus dan kasar kemudian dibandingkan dengan data eksperimen untuk menunjukkan validitas pendekatan CFD untuk memprediksi pengaruh kekasaran lambung kapal terhadap tahanan kapal.



Gambar 2. 13 Plat Datar dan Model KRISO *Container Ship*
(Sumber: Song et al., 2019a)

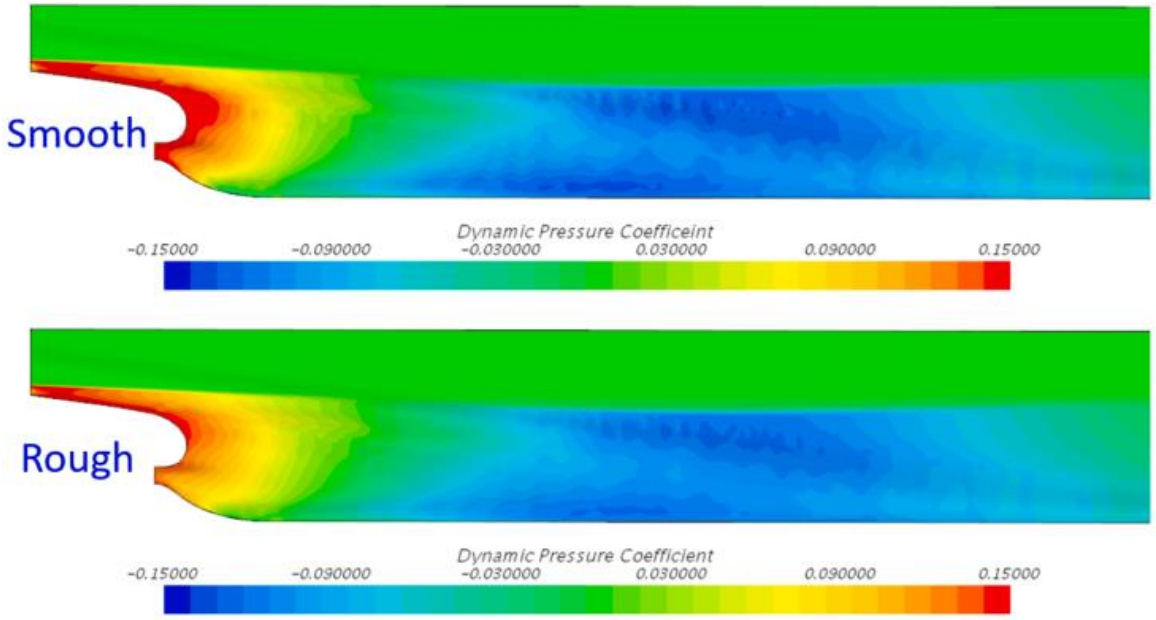
Meskipun penggunaan pendekatan fungsi dinding yang dimodifikasi divalidasi terhadap uji penarik pelat datar, tidak menjamin validitas penggunaan metode ini untuk memprediksi efek kekasaran pada ketahanan kapal dari lambung 3D. Oleh karena itu, bagian ini menyajikan perbandingan antara pendekatan CFD dan hasil eksperimen uji tarik kapal model KCS pada kondisi permukaan halus dan kasar (Song et al., 2019a).

Gambar 2.11 menunjukkan perbandingan nilai C_T kapal model KCS yang diprediksi dari simulasi CFD saat ini dan hasil eksperimen (Song et al., 2021). Simulasi CFD dilakukan pada rentang kecepatan 1.07-1.54 m/s, yang sesuai dengan rentang kecepatan skala penuh 18-26 knot dengan interval 2 knot. Bilangan *Reynolds* yang sesuai adalah ReL = 2.8-4.1× 10^6, sedangkan bilangan Froude adalah Fn 0.195-0.282. Dalam kondisi permukaan halus dan kasar, nilai C_T yang diprediksi dari simulasi CFD sangat sesuai dengan nilai C_T eksperimental. Oleh karena itu, disarankan bahwa pendekatan fungsi dinding yang dimodifikasi dapat secara akurat memprediksi efek kekasaran lambung kapal terhadap hambatan total kapal, yang mencakup efek 3D.



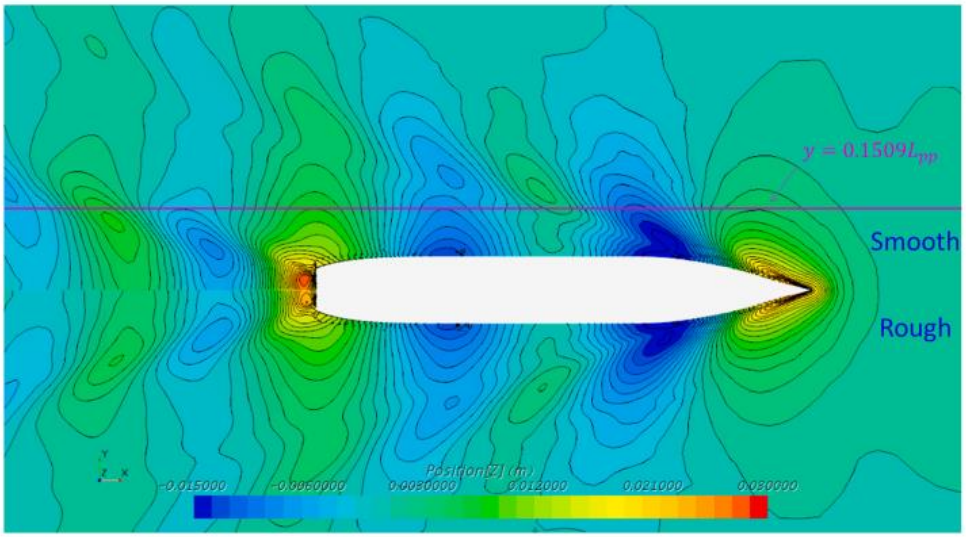
Gambar 2. 14 *Total coefficient* dari model kapal KCS dalam kondisi permukaan halus dan kasar, diprediksi dari simulasi CFD dan data eksperimen Song

(Sumber: Song et al., 2021)



Gambar 2. 15 Distribusi tekanan pada KRISO *Container Ship*

(Sumber: Song et al., 2020).



Gambar 2. 16 Pola gelombang disekitar KRISO *Container Ship*
(Sumber: Song et al., 2020)

Pengaruh kekasaran lambung pada karakteristik aliran di sekitar lambung juga diperiksa. Dengan membandingkan medan kecepatan di sekitar model KCS dalam kondisi mulus dan kasar, aliran yang melambat dan medan bangun yang diperbesar di hilir buritan, serta peningkatan ketebalan lapisan batas. Ditemukan bahwa kekasaran lambung mengurangi pemulihan tekanan di buritan, yang mengarah pada peningkatan resistensi tekanan viskos. Elevasi gelombang yang lebih kecil karena kekasaran lambung kapal juga dicatat, yang terkait erat dengan hambatan pembuatan gelombang yang lebih kecil untuk kasus kasar.

Studi ini telah memberikan validasi eksperimental pertama dari pendekatan CFD untuk memprediksi pengaruh kekasaran lambung kapal terhadap tahanan total kapal dengan membandingkan simulasi dengan model uji towing kapal. Selain pengaruh kekasaran lambung, ada beberapa penelitian yang memprediksi pengaruh kekasaran sudu pada kinerja baling-baling menggunakan pendekatan CFD yang sama, namun pendekatan ini belum divalidasi secara eksperimental untuk baling-baling. Oleh karena itu, masa depan potongan pekerjaan mungkin termasuk studi validasi simulasi CFD untuk memprediksi efek kekasaran pada baling-baling.

Halaman ini sengaja dikosongkan

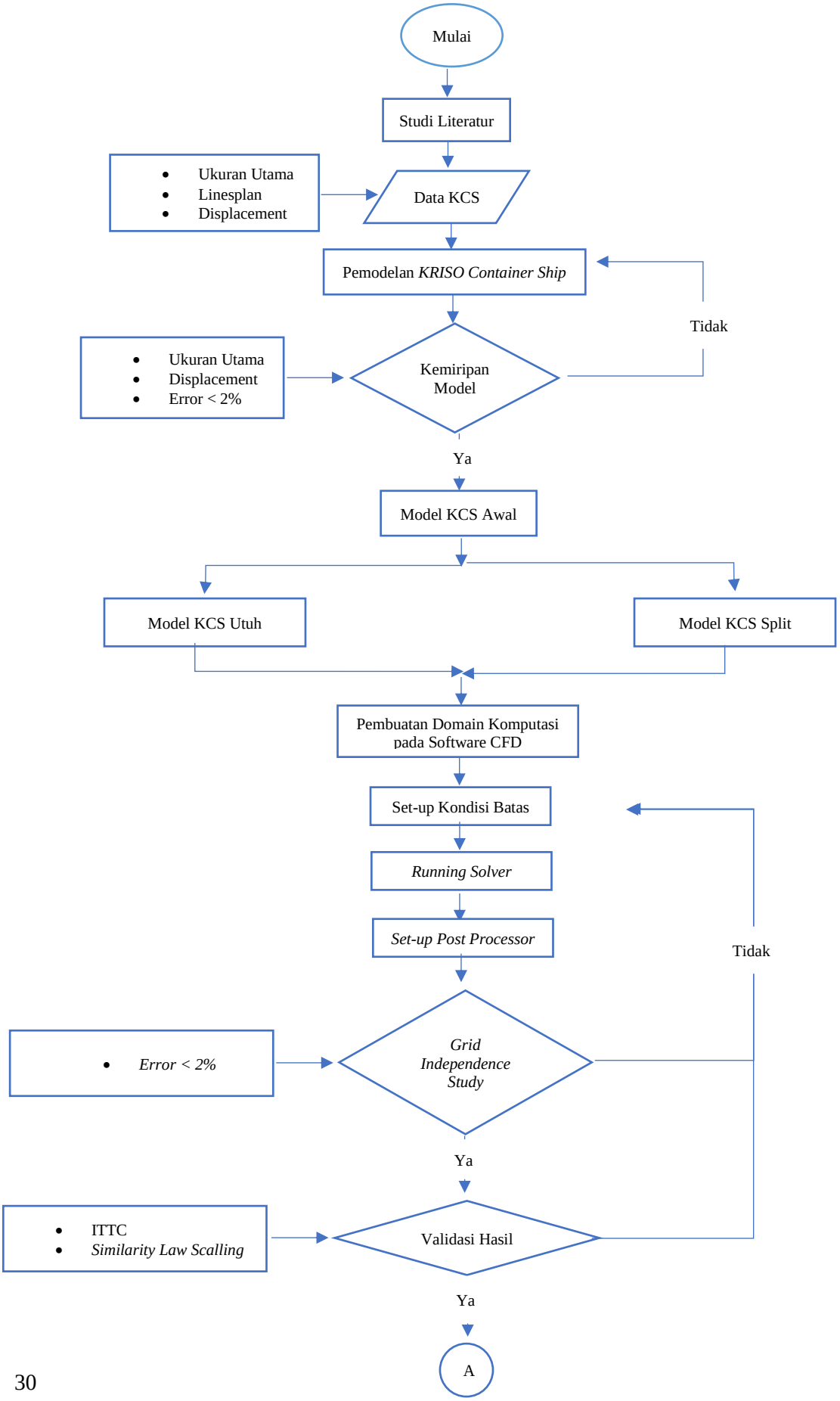
BAB 3
METODOLOGI

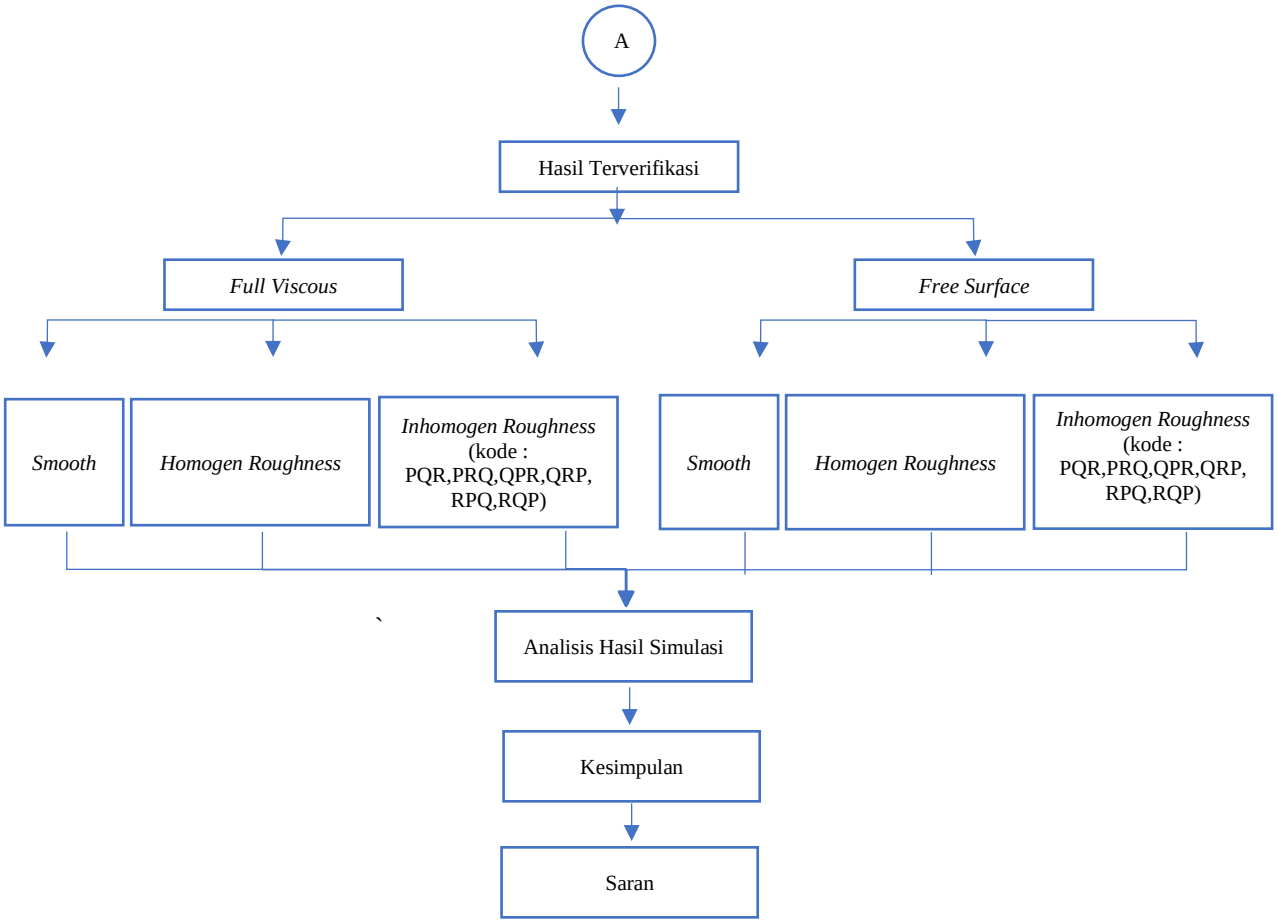
3.1 Gambaran Umum Metodologi

Untuk merespons pertanyaan yang ada pada rumusan masalah, Penulis melakukan studi literatur terhadap beberapa buku, jurnal, laporan studi dan beberapa sumber lainnya. Hasil dari studi literatur ini dituliskan pada BAB 2 berupa dasar teori dan tinjauan pustaka. Studi menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) sebagai alat bantu dalam melakukan simulasi Kapal *KRISO Container Ship* dengan simulasi *Full Viscous* maupun *Free Surface*. Penggunaan Computational Fluid Dynamics (CFD) dapat membantu mengurangi penggunaan model uji fisik, akan tetapi penggunaan Computational Fluid Dynamics (CFD) harus didukung oleh perangkat komputer yang cukup memadai agar proses komputasi dapat berjalan dengan baik.

Proses pengerjaan studi ini menggunakan metode diagram alir. Diagram alir menggambarkan langkah – langkah dan keputusan untuk melakukan sebuah proses dari Tugas Akhir ini, setiap langkah digambarkan dalam bentuk diagram dan dihubungkan dengan garis atau arah panah. Dengan penggunaan diagram alir, alur dari Tugas Akhir ini akan lebih jelas, ringkas dan mengurangi kemungkinan dari adanya salah penasfsiran. Penggunaan diagram alir juga memudahkan untuk menghubungkan suatu hal yang bersifat prinsip dengan yang bersifat teknis.

Prosedur pengerjaan studi ini ditunjukkan dengan diagram alir studi secara skematis pada Gambar 3. 1. Dapat dilihat bahwa dari diagram alir, studi dibagi menjadi tiga kegiatan besar yaitu pembuatan model, simulasi CFD dan yang terakhir analisis hasil dari simulasi dan pengambilan kesimpulan. Pengerjaan studi diawali dengan proses studi literatur yang bertujuan untuk medapatkan referensi terkait dari studi serta pembuatan model uji untuk simulasi numerik dan diakhiri dengan pembuatan laporan penelitian setelah proses analisis dari hasil simulasi selesai.


Mulai
Studi Literatur
Ukuran Utama
Linesplan
Displacement
Data KCS
Pemodelan *KRISO Container Ship*
Tidak
Ukuran Utama
Displacement
Error < 2%
Kemiripan Model
Ya
Model KCS Awal
Model KCS Utuh
Model KCS Split
Pembuatan Domain Komputasi pada Software CFD
Set-up Kondisi Batas
Running Solver
Set-up Post Processor
Tidak
Error < 2%
Grid Independence Study
Ya
ITTC
Similarity Law Scalling
Validasi Hasil
Ya
A



Gambar 3. 1 Bagian Alir Pengerjaan Tugas Akhir

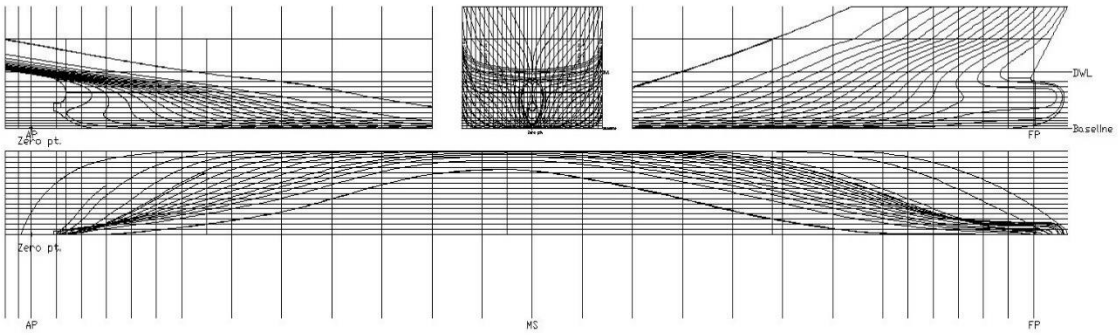
3.2 Tahap Pengerjaan

3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Tahapan pertama dari proses pengerjaan Tugas Akhir ini adalah dilakukannya studi literatur dan pengumpulan data penunjang yang dibutuhkan. Studi literatur dilakukan untuk memahami materi dan teori dari berbagai referensi penelitian terkait yang telah dilakukan seperti buku, jurnal, *paper*, tesis, dan laporan yang telah dipublikasikan. Untuk pengumpulan data seperti data kapal yang diuji pada Tugas Akhir ini didapatkan dari Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO). Dari hasil modifikasi data yang didapat yaitu data dari *body plan*, *sheer plan* dan *half-breadth plan* yang merepresntasikan bentuk dari KRISO *Container Ship* itu sendiri, dapat dilihat pada Gambar 3.2. Kemudian, data berikutnya yang didapat adalah data ukuran utama KRISO Container Ship yang dapat dilihat pada tabel:

Tabel 3. 1 Ukuran utama KRISO *Container Ship*

No.	Ukuran Utama	
1.	*Length Between Perpendicullar (Lpp)*	230.00 m
2.	*Length on Waterline(Lwl)*	232.50 m
3.	*Beam at Waterline(Bwl)*	32.20 m
4.	*Depth (D)*	19.00 m
5.	*Design draft (T)*	10.8 m
6.	*Displacement (Δ)*	52030 m^3
7.	*S w/o rudder*	9530 m^2
8.	*Block coefficient* (C_B)	0.651
9.	C_M	0.985
10.	*Longitudinal Centre of Bouyency (LCB)* (%)	-1.48



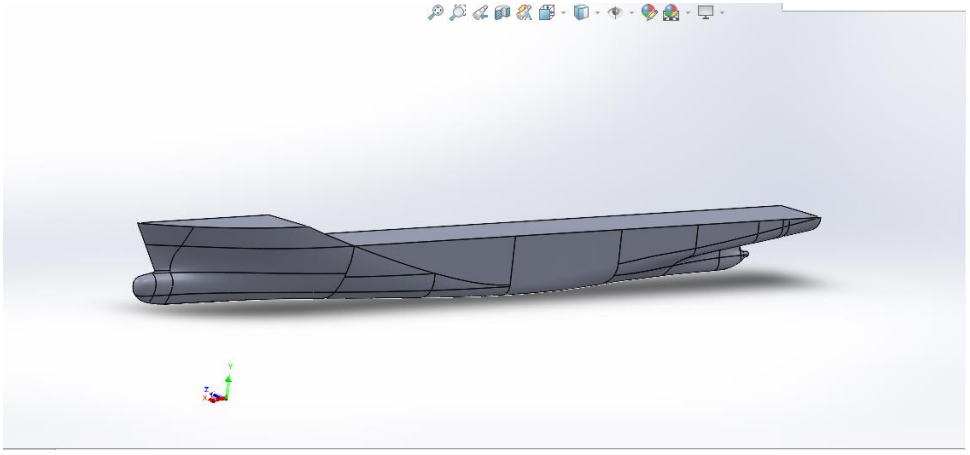
Gambar 3. 2 Linesplan KRISO *Container Ship*

3.2.2 Pemodelan Geometri KRISO *Container Ship*

Dalam Tugas Akhir ini model kapal KRISO *Container Ship* didapatkan dari Website resmi Simman 2008 untuk dijadikan sebagai objek analisis dengan simulasi CFD. Model kapal KRISO *Container Ship* ini masih perlu diolah geometrinya untuk keperluan Tugas Akhir penulis yaitu membagi objek KCS menjadi 3 bagian untuk *running* kondisi tak-homogen. Pengolahan Geometri lebih lanjut seperti pembagian objek menjadi setengah bagian dan split objek dilakukan dengan bantuan software 3D yaitu *Solidworks*.

a) Model 3D *KRISO Container Ship* utuh

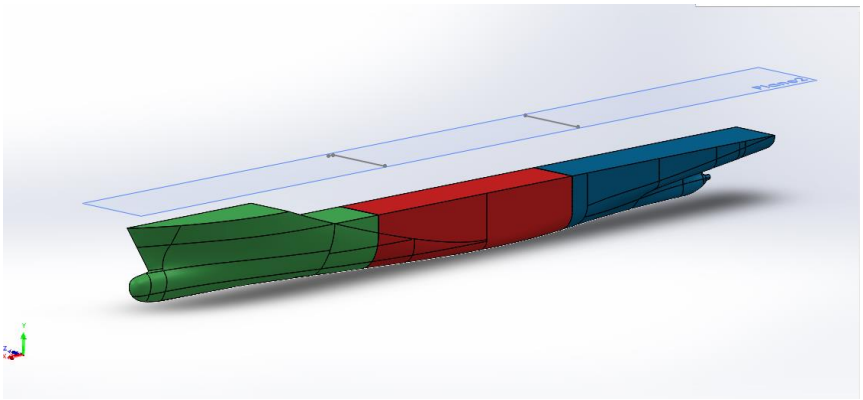
Pada dasarnya sebelum melakukan runningan tak-homogen penulis terlebih dahulu mensimulasikan pada lambung halus dan lambung dengan kekasaran homogen. Model halus berguna sebagai acuan dalam mengukur pertambahan kekasaran total pada kekasaran homogen maupun tak-homogen, sedangkan kekasaran homogen sendiri berguna sebagai pembanding dengan kekasaran tak-homogen, seberapa besar perbandingan pertambahan kekasaran dari kedua jenis kekasaran tersebut. Model geometri kapal *KRISO Container Ship* yang telah diolah menggunakan software *Solidworks* dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3. 3 Model 3D Geometri KRISO *Container Ship*

b) Model 3D *KRISO Container Ship* yang sudah di *split*

Software *Solidworks* dapat dilihat pada Gambar 3.2. Tujuan dari *split* sendiri adalah agar lambung kapal dapat dibagi menjadi 3 kombinasi dengan tingkat kekasaran yang berbeda yakni dibagian stern, *parelel middle-body, dan bow*. Tujuannya adalah untuk melihat seberapa besar kekasaran berpengaruh terhadap bagian lambung kapal. Pembagian kekasaran diolah menggunakan menggunakan aplikasi *Solidworks* sebagai berikut

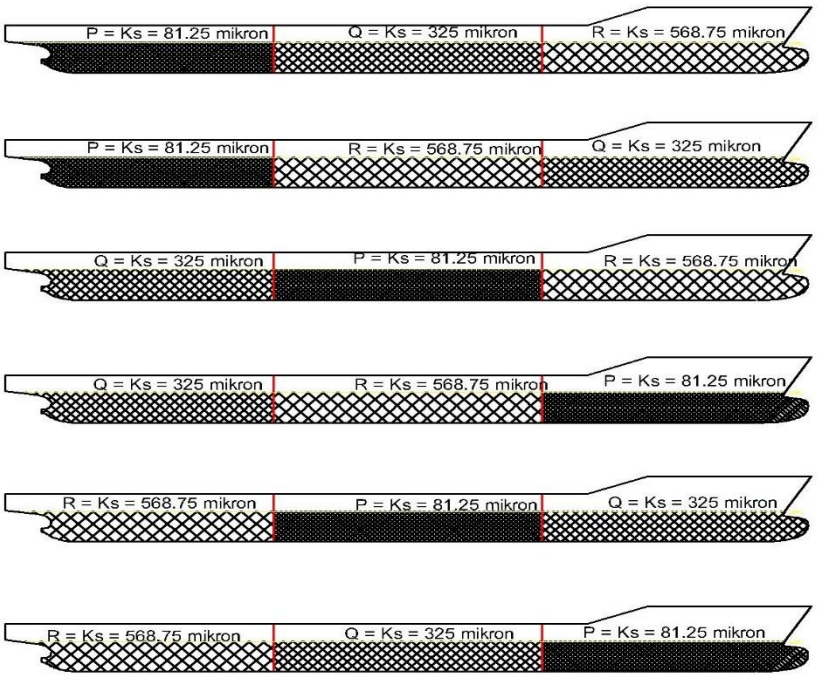


Gambar 3. 4 Model 3D Geometri KRISO *Container Ship* yang Sudah di Split

Untuk memotong kapal menjadi 3 bagian yaitu menampilkan *section plane* pada bagian depan kapal, kemudian membagi *section* tersebut secara memanjang dengan ukuran sama yaitu LPP/3. Secara otomatis, kapal akan terbagi memanjang secara keseluruhan sesuai dengan ukuran yang ditentukan. Dengan demikian kapal dapat diproses untuk dilakukan *running* kedalam aplikasi *NUMECA FINE*^{TM}*/Marine*.

c) Tahap Simulasi KRISO Container Ship Dengan Numeca

Sebelum dilakukan proses simulasi, akan dilakukan pemetaan terhadap rencana simulasi, yakni akan dibuat masing kekasaran akan disusun 3 jenis kekasaran yakni kekasaran dengan kode P = 81.25 µm, Q = 325 µm, R = 568.75 µm. Kekasaran itu akan dibuat menjadi 6 variasi yakni PQR, PRQ, QPR, QRP, RPQ , dan RQP. Semua kekasaran itu akan dilakukan simulasi baik dalam simulasi *full viscous* maupun *free surface*. Dibawah ini terdapat ilustrasi variasi kekasaran tak-homogen pada KRISO *Container Ship* (KCS) yang akan disimulasikan.



Gambar 3. 5 Ilustrasi variasi kekasaran tak-homogen pada KRISO *Container Ship* (KCS)

3.2.3 Penentuan *Meshing*

Proses *meshing* merupakan proses yang sangat penting dalam penentuan kualitas dari hasil simulasi CFD. Sebuah model geometri akan dapat dibaca dan dianalisis oleh program CFD apabila geometri tersebut dibagi menjadi beberapa elemen yang lebih kecil. Elemen - elemen yang tersusun dan bertransformasi inilah yang disebut dengan *mesh* atau *grid*. Secara umum, keakurasian dari perhitungan numerik dipengaruhi oleh banyaknya *mesh* penyusun geometri tersebut, namun semakin banyak *mesh* yang tersusun maka secara otomatis waktu dan memori yang dibutuhkan untuk melakukan komputasi akan semakin lama dan sebaliknya.

Dalam simulasi CFD, sering dijumpai beberapa tipe *mesh* diantaranya adalah tetrahedron, hexahedron, pyramid, dan lain-lain. Pada dasarnya, bentuk hexahedron merupakan bentuk *mesh* yang paling ideal dan sering digunakan karena mempunyai bentuk yang cenderung teratur, namun tentunya setiap bentuk *mesh* ini mempunyai kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Jumlah elemen *mesh* yang banyak tentunya akan menghasilkan nilai simulasi CFD yang mendekati sebenarnya atau optimum. Diperlukan independensi *grid* yang baik apabila sebuah simulasi CFD dapat dikatakan optimum. Menurut Anderson, J. D., & Wendt (1995) *grid independence* dapat dikatakan optimum apabila jumlah elemen hasil output kurang dari 2% dari jumlah elemen sebelumnya.

3.2.4 Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD)

Ketika domain geometri dan proses *meshing* telah dilakukan, maka tahapan berikutnya adalah menjalankan simulasi CFD. Tujuan dari simulasi CFD pada Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui nilai koefisien gesek (C_F) dan nilai koefisian hambatan total (C_T) dari *KRISO Container Ship*. Output yang dihasilkan dari simulasi CFD *KCS* adalah nilai hambatan *drag* kapal (R_T), sehingga perhitungan nilai C_F dan C_T berturut-turut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.1) dan (3.2) berikut:

$$C_F = \frac{R_F}{0.5\rho S V^2} \quad (3.1)$$

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho S V^2} \quad (3.2)$$

3.2.5 Validasi Hasil Simulasi CFD

Setelah proses simulasi CFD dilakukan, tahapan selanjutnya adalah memastikan bahwa hasil dari konfigurasi simulasi CFD tersebut benar. Salah satu cara validasi adalah dengan menghitung C_F dengan menggunakan rumus ITTC yaitu $C_F = 0.075/(\log Re - 2)^2$ di mana dari perhitungan tersebut diperoleh toleransi sekurang – kurangnya 5% dari hasil CFD terhadap nilai

C_F yang dihitung menggunakan rumus ITTC. Untuk perhitungan hasil validasi hasil simulasi CFD menggunakan rumus ITTC, masing – masing untuk *full viscous* akan dihitung pada bab 4.4.1 yakni tentang "Perhitungan Koefisien Gesekan *Full Viscous* dengan Rumus Empirik" dan untuk *free surface* akan dihitung pada bab 5.4.1 yakni tentang "Perhitungan Koefisien Gesekan Free Surface dengan Rumus Empirik".

3.2.6 Analisis Hasil dan Pembahasan

Hasil dari simulasi CFD yang sudah divalidasi kemudian dianalisis untuk mengetahui nilai C_F dan C_T dari *KRISO Container Ship*. Tahapan selanjutnya adalah mencari tahu karakteristik dari variasi 6 kekasaran dari 3 kombinasi kekasaran tak-homogen pada lambung kapal dan hubungannya terhadap kekasaran homogen serta hubungannya terhadap lambung halus. Selain itu, faktor-faktor eksternal yang mempengaruhi output juga akan dibahas dalam Tugas Akhir ini.

3.2.7 Kesimpulan

Tahapan terakhir dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah kesimpulan. Dari kesimpulan ini diharapkan nantinya akan menjawab rumusan masalah yang telah disusun sebelumnya sebagai output dari tugas akhir ini. Selain itu, diperlukan juga saran untuk Tugas Akhir ini agar kedepannya dapat berkembang dan menjadi lebih baik lagi. Saran diharapkan berguna sebagai rekomendasi keberlanjutan pengembangan untuk Tugas Akhir, Tesis, maupun Disertasi selanjutnya.

BAB 4
SIMULASI CFD KRISO CONTAINER SHIP *FULL VISCOUS*

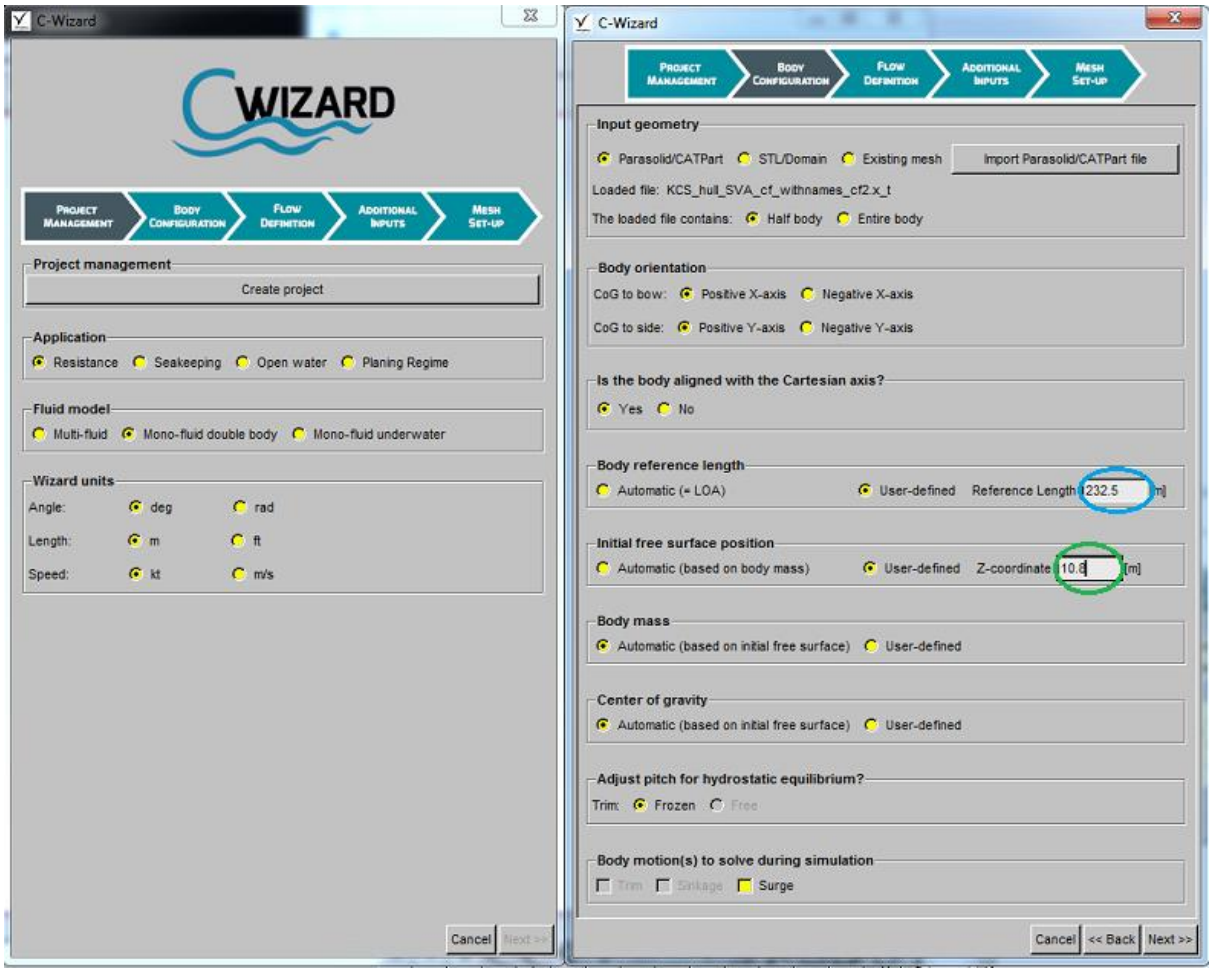
4.1 Pembuatan Meshing dari 3D Model Kapal

Pembuatan *meshing* dari 3D model kapal KRISO *Container Ship* dilakukan pada *software* NUMECA FINE^{TM}/Marine versi 8.2. Pada *software* ini juga akan dilakukan proses simulasi pada 3D model kapal tersebut. Sebelum 3D model kapal dapat dilakukan simulasi pada *software* NUMECA FINE^{TM}/Marine, format file dari 3D model kapal yang sebelumnya sudah dieksekusi di *Solidworks* harus diubah ke format *parasolid* terlebih dahulu, karena format file inilah yang dapat dibaca oleh *software* NUMECA FINE^{TM}/Marine sehingga dapat dilakukan proses simulasi.

4.1.1 Import 3D Model Kapal "KRISO Container Ship" ke NUMECA FINE^{TM}/Marine beserta pembuatan Domain Kapal

Model yang sudah dibuat sebelumnya lalu di *import* ke *software* NUMECA FINE^{TM}/Marine dengan menggunakan *tools C-Wizard* yang sudah disediakan oleh *software* tersebut. Untuk pengaplikasian terhadap simulasi ini menggunakan hambatan yang umum dipakai pada pengujian untuk model fluid yang digunakan adalah *mono-fluid double body* dan untuk kapal dengan satuan yang digunakan adalah *degree* untuk sudut, meter untuk Panjang, dan knot untuk kecepatan. Setelah itu dapat dibuat *creat project* untuk membuat calon file project NUMECA FINE^{TM}/Marine tersebut.

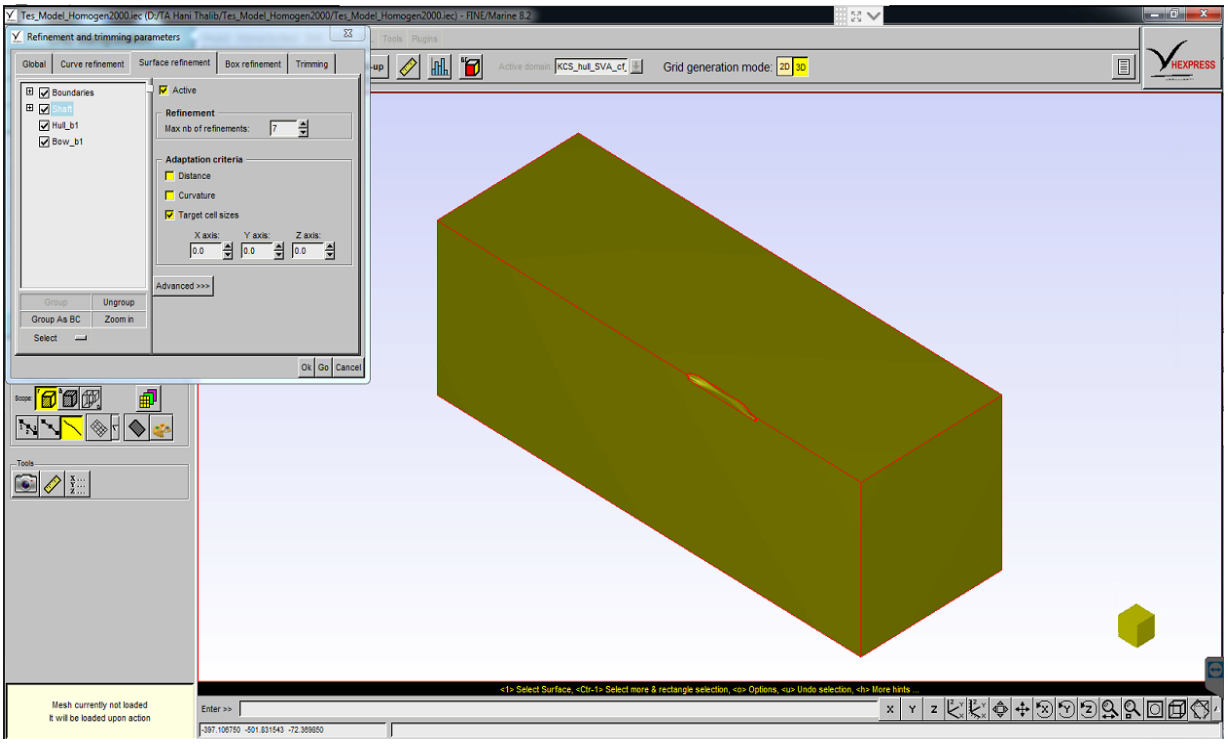
Setup C-Wizard yang digunakan pada model *KRISO Container Ship* baik yang lambung halus maupun lambung dengan kekasaran homogen/tak-homogen, keduanya menggunakan *setup C-Wizard* yang sama. *Setup C-Wizard* yang secara drastisdapat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *setup* simulasi CFD melalui proses automasi. Dengan fitur C-Wizard, pengguna tidak perlu berlama-lama menghabiskan waktu untuk mengatur parameter numerik. Dengan hanya melakukan input fisik, pengguna software menerima definisi lengkap dari simulasi yang diperlukan, termasuk aspek numeriknya. S*etup C-Wizard* yang dimaksud dijelaskan pada keterangan dibawah ini.



Gambar 4. 1 *Setting C-Wizard* dan *import* 3D model kapal

Selanjutnya dapat dimasukkan data pendukung lainnya seperti kecepatan kapal, panjang kapal, serta *initial* yang akan dilakukan simulasi serta massa jenis fluida yang akan digunakan. Setelah itu, dilakukan pembuatan domain dari kapal di mana ukuran domain tersebut dapat ditentukan sendiri agar domain yang dihasilkan tidaklah terlalu besar yang nantinya akan berpengaruh terhadap jumlah *mesh* yang akan dibuat agar tidak terlalu besar, sehingga proses simulasi pun akan dapat berjalan lebih cepat. Untuk ukuran domain karena kapal dalam simulasi *full visocus* (tercelup semua) yang diperlukan hanya ke arah bawah, samping, depan, dan belakang saja, yakni :

1. 1 kali LOA ke arah bawah kapal
2. 1 kali LOA ke arah samping kapal
3. 1 kali LOA ke arah depan kapal
4. 2 kali LOA ke arah belakang kapal



Gambar 4. 2 Ukuran domain untuk simulasi

Setelah *setting* untuk *C-Wizard* sudah dilakukan, dapat dilakukan ke tahap selanjutnya yakni pembuatan *mesh* dari 3D model tersebut dengan menekan tombol *start mesh set-up.*

4.1.2 Setup Meshing 3D Model Kapal KRISO Container Ship di NUMECA FINE^{TM}/Marine

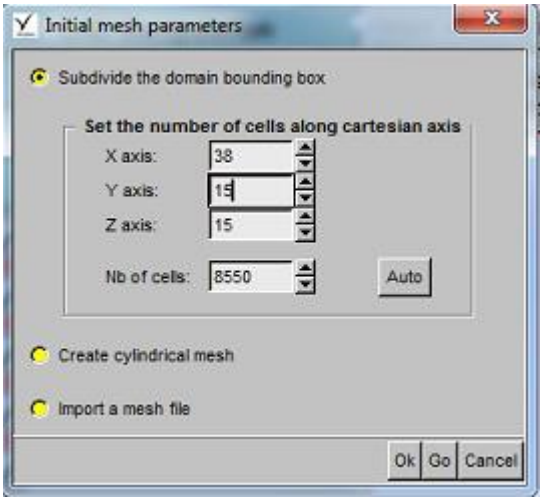
Pembuatan *meshing* dilakukan pada *software* HEXPRESS yang juga merupakan bagian dari *software* NUMECA FINETM/Marine yang berguna untuk pembuatan *meshing* beserta manipulasi domain dari 3D model kapal. Pembuatan *meshing* pada *software* ini terdapat 5 tahap yakni *initial mesh, adapt to geometry, snap to geometry, optimize,* dan *viscous layers.*

Gambar 4. 3 Tahap-tahap *meshing* pada *Software* HEXPRESS

berikut penjelasan dan *setting* dari masing-masing tahap tersebut:

a. Initial mesh

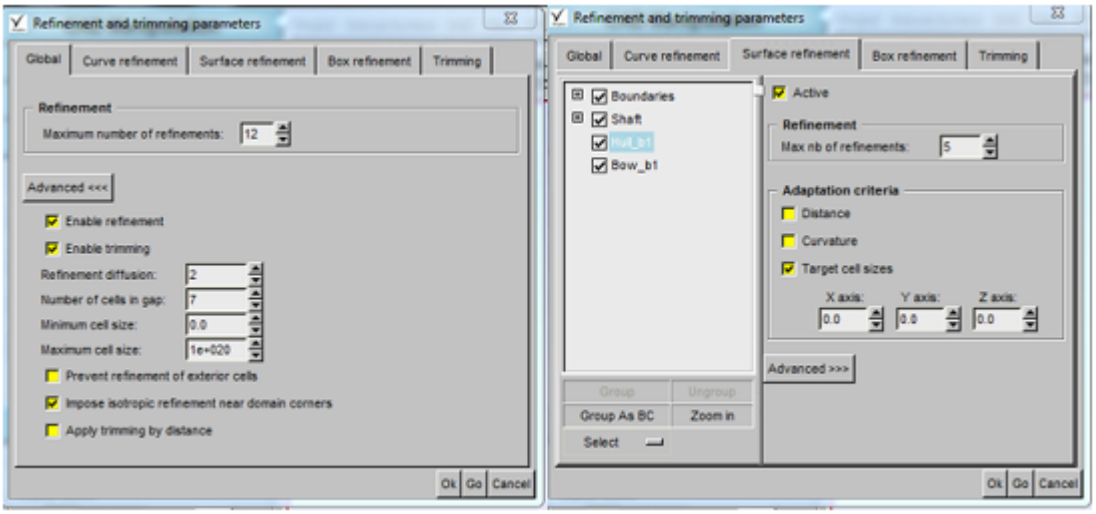
Merupakan tahap awal dalam proes *meshing* pada *software* HEXPRESS, di mana pada tahap ini *software* akan secara otomatis membuat *structured mesh* untuk memenuhi *domain* yang sudah dibuat tersebut sehingga ukuran *cell* pada setiap sisinya berukuran sama. *Setting* yang digunakan untuk *initial mesh* ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. 4 *Setting* yang digunakan pada *Initial Mesh*

b. Adapt to Geometry

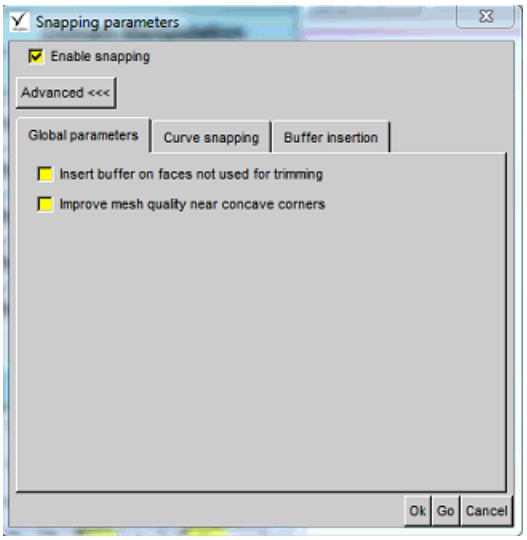
Pada tahap ini, *software* HEXPRESS akan secara otomatis memperkecil ukuran *cells* yang berada di sekitar 3D model kapal, sehingga jumlah *cells* pada bagian tersebut pun akan semakin banyak agar hasil simulasi dapat menjadi lebih akurat, *setting mesh* yang digunakan pada tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. 5 *Setting* yang digunakan pada *Adapt to Geometry*

c. *Snap to Geometry*

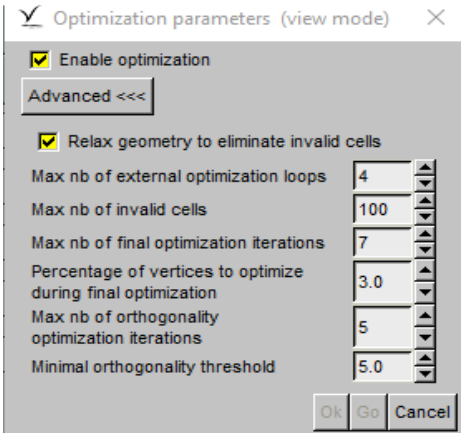
Pada tahap ini, *mesh* yang sudah hampir menyerupai bentuk 3D model selanjutnya di-*snap* agar bentuknya benar -benar sesuai dengan bentuk 3D model kapal, sehingga pada tahap ini, *cells* tidak lagi berbentuk kubus dan sudah menyesuaikan bentuk kapal, berikut adalah *setting mesh* yang digunakan pada tahap ini.



Gambar 4. 6 *Setting* yang digunakan pada *Snap to Geometry*

d. *Optimize*

Pada tahap ini, *mesh* yang sudah menyesuaikan bentuk kapal, selanjutnya di optimalkan lagi, sehingga *cells* yang dihasilkan memiliki kualitas yang tinggi dan tidak ada kecacatan *cells.* Kecacatan *cell* yang dimaksud adalah antara lain *negative cell*, *concave cell*, dan terakhir adalah *twisted cell.* Apabila ketiga kecatatan *cell* tersebut masih terdapat pada hasil *mesh* 3D model kapal, maka proses *meshing* harus diulang dari awal dengan menggunakan *setting mesh* yang berbeda sehingga cacat *cell* tersebut dapat dihilangkan. *Setting* yang digunakan pada tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut.

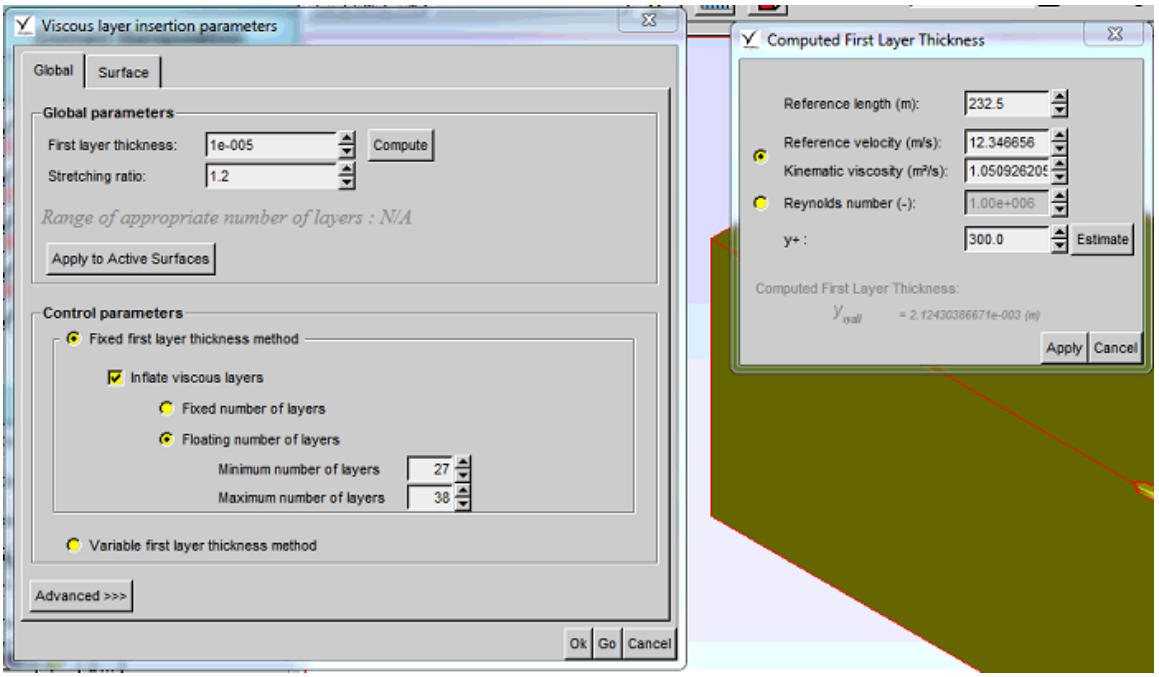


Gambar 4. 7 *Setting* yang digunakan pada *Optimize*

e. Viscous Layers

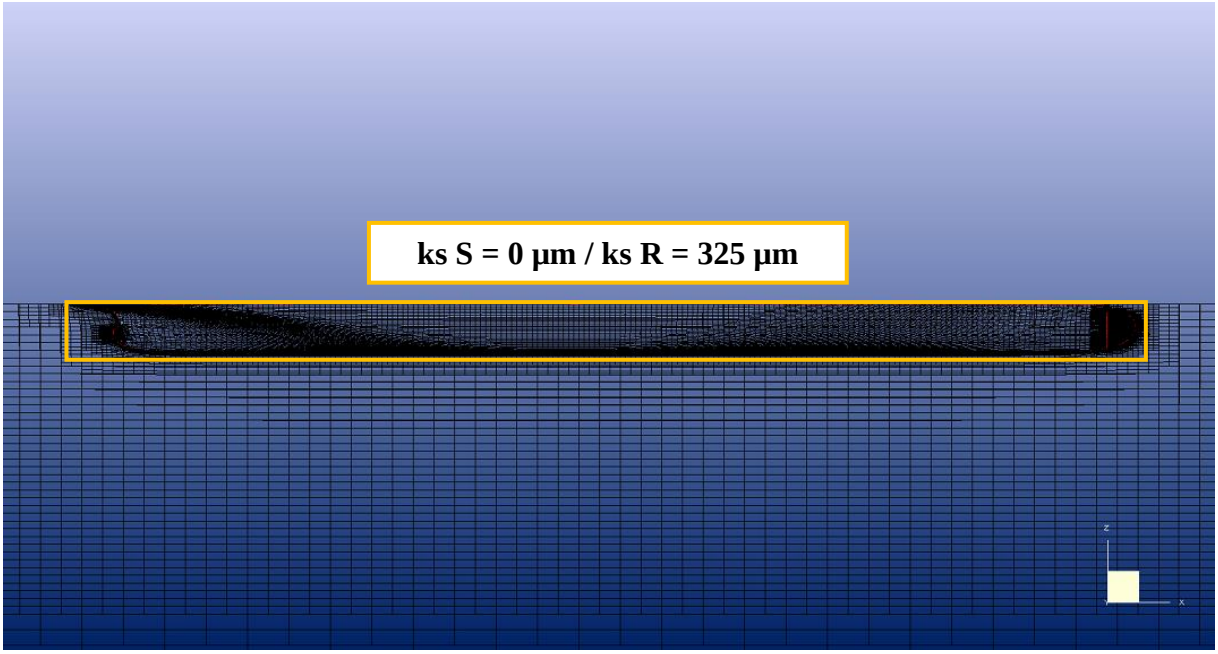
Ini merupakan tahap terakhir pada proses *meshing* dengan *software* HEXPRESS, pada tahap ini adalah untuk menambahkan *viscous layers* pada 3D model kapal yang akan disimulasi, di mana *viscous layers* ini berfungsi untuk mendapatkan karakeristik serta hasil aliran yang lebih akurat pada *body* yang disimulasi.

Untuk nilai *fisrt layer thickness* didapatkan dari perhitungan yang dilakukan oleh *software* dengan memasukkan beberapa parameter yakni, *reference length* yang merupakan LOA kapal, lalu *reference velocity* yang merupakan kecepatan kapal, dan *kinematic viscosity* dari fluida yang digunakan untuk simulasi. Dan untuk nilai y+ dapat diestimasi secara otomatis oleh *software* HEXPRESS. Berikut *setting* secara lengkapnya dapat dilihat pada gambar berikut ini.

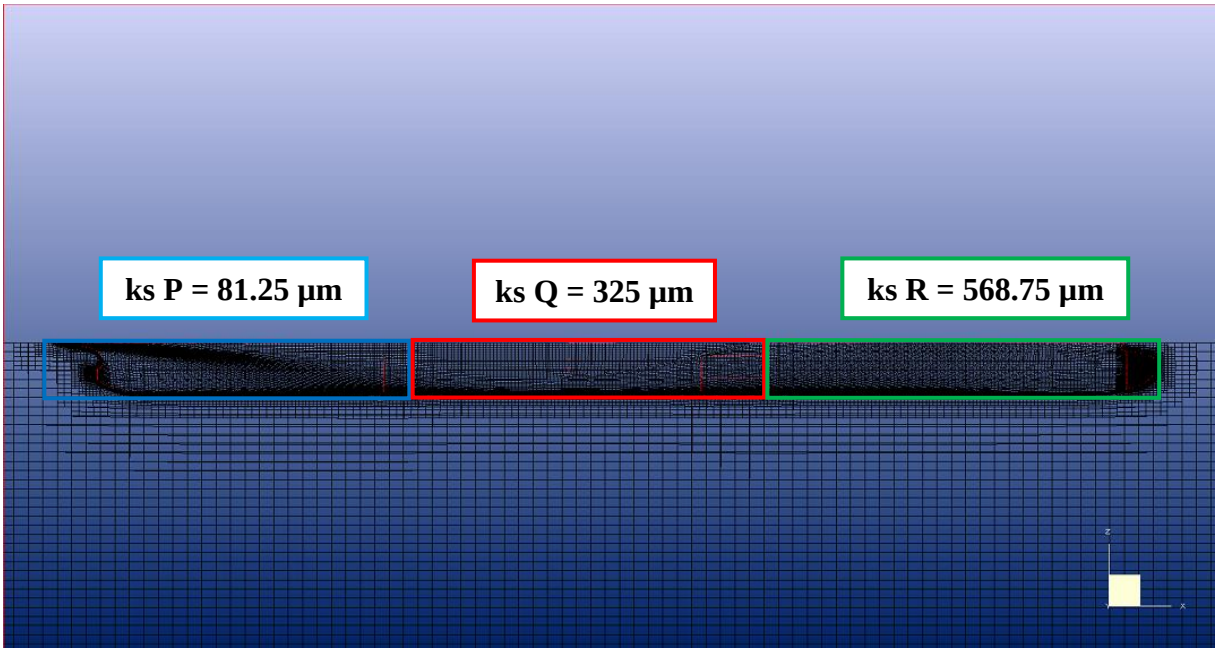


Gambar 4. 8 *Settings* yang digunakan pada *Viscous Layers*

Sama halnya seperti *setup C-Wizard*, untuk *setting mesh* yang digunakan baik pada model *KCS* lambung halus maupun lambung kasar keduanya menggunakan *setting mesh* yang sama agar hasil simulasi yang dilakukan dapat saling dibandingkan. Berikut adalah gambar hasil dari *mesh* untuk 3D model dengan lambung halus dan 3D model kapal dengan lambung kasar.



Gambar 4. 9 Hasil *mesh* 3D model KCS lambung halus/kasar homogen



Gambar 4. 10 Hasil *mesh* 3D model KCS lambung kasar Tak-homogen PQR

4.2 Grid Independent untuk Simulasi KRISO Container Ship Full Viscous

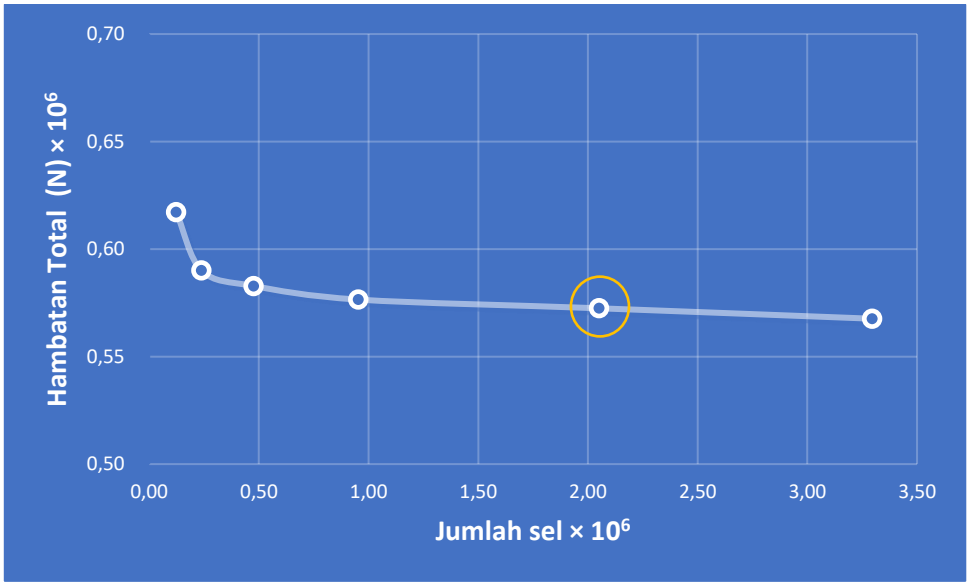
Grid Independent berkaitan dengan tingkat keakurasian atau bahkan tingkat rasionalitas dari suatu hasil perhitungan numerik. *Grid independent* adalah hal yang sangat penting dalam

perhitungan simulasi numerik. Hasil perhitunggan terjadi perubahan yang sangat sedikit bersama dengan bertambahnya nilai kerapatan *mesh* dalam simulasi yang dilakukan. *Grid independent* dapat secara langsung mempengaruhi hasil perhitungan numerik.

Pada simulasi ini yang ingin diketahui adalah besarnya nilai hambatan total yang dihasilkan oleh model *KCS* ketika sedang bergerak dengan kecepatan 24 knot. Dengan seiring bertambahnya jumlah *cell*, maka nilai hambatan total kapal juga akan semakin berkurang. Sehingga perlu didapatkan nilai pengurangan hambatan yang paling optimum pada jumlah *cell* tertentu. Nilai hambatan dibandingkan setiap kelipatan 2 kali jumlah *cell* dari simulasi yang sebelumnya, ketika dengan penambahan jumlah *cell* dan pengurangan hambatan yang terjadi kurang dari 2%, maka dapat disimpulkan bahwa pada jumlah *cell* tersebutlah yang merupakan *grid independent* simulasi *full viscous* dari simulasi 3D model kapal *"KRISO Container Ship"* ini. Berikut disajikan tabel beserta grafik nilai hambatan total kapal seiring bertambahnya jumlah *cell*, dengan jumlah *cell* awal berada pada sekitar 0.12×10^6 *cell* dengan jumlah *cell* maksimal berada pada sekitar 3.29×10^6 *cell* di mana nilai *grid independent* didapatkan pada sekitar 2.05×10^6 *cell*. Pengujian *grid independent* dilakukan dengan simulasi lambung halus.

Tabel 4. 1 *Grid Independent* simulasi KCS *full viscous*

Simulasi	Jumlah Sel	Nilai Hambatan (N)	Penurunan
1	0.12×10^6	0.61×10^6	-
2	0.23×10^6	0.58×10^6	4.41%
3	0.47×10^6	0.58×10^6	1.22%
4	0.95×10^6	0.57×10^6	1.08%
5	2.05×10^6	0.57×10^6	0.70%
6	3.29×10^6	0.56×10^6	0.85%

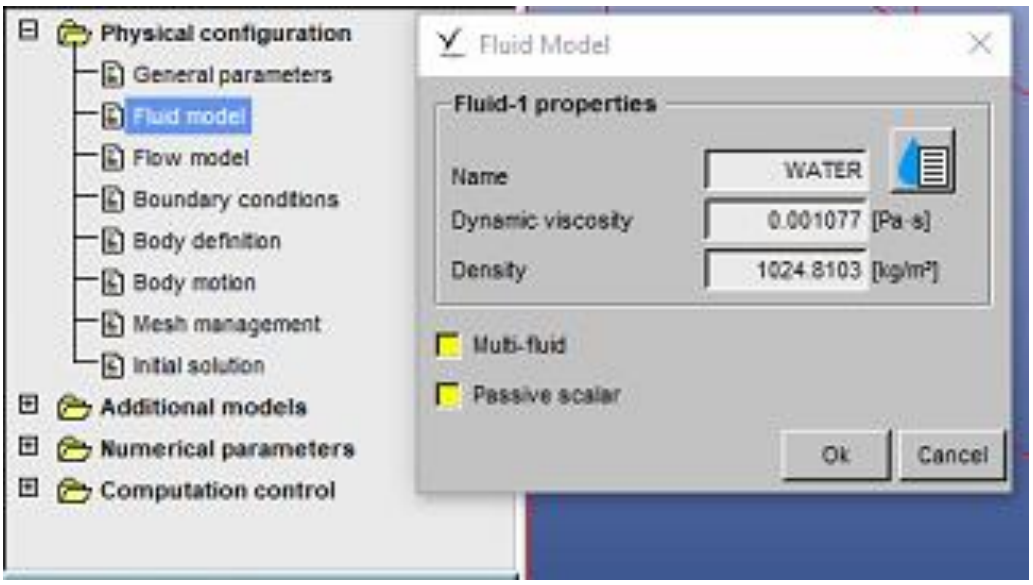


Gambar 4. 11 *Grid Independent full viscous* simulasi KRISO *Container Ship*

4.3 *Setup Solver* untuk Simulasi 3D Model Kapal KCS Full Viscous

Setelah *meshing* 3D model kapal selesai dilakukan pada *software* HEXPRESS, selanjutnya adalah untuk *setup solver* pada *software NUMECA FINE*^{TM}*/Marine* sehingga nantinya dari 3D model tersebut dapat dilakukan prose simulasi. *Setup solver* dimulai dari *Physical Configuration* di mana *setup* pada konfigurasi ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk *general parameter*, *time configuration* yang digunakan adalah *unsteady*
2. Untuk *fluid model* yang digunakan adalah air sepenuhnya untuk .

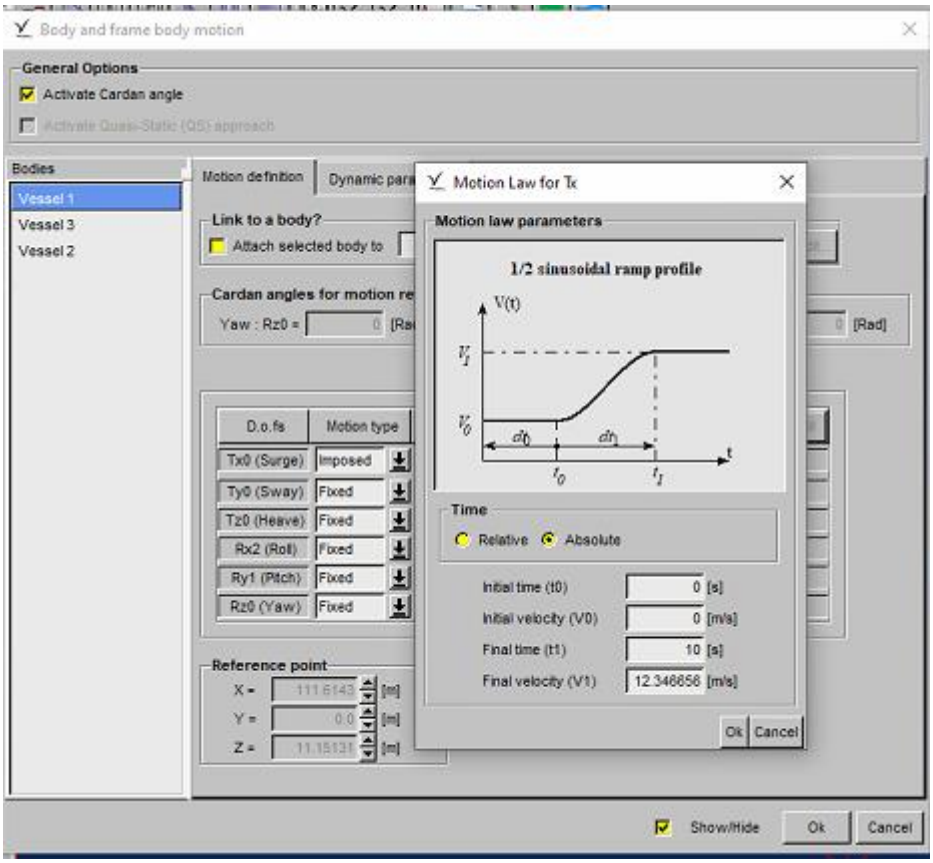


Gambar 4. 12 *Fluid Properties* yang digunakan untuk simulasi

Hal ini dikarenakan simulasi yang dilakukan adalah pada *mono-fluid*, di mana data air yang digunakan berasal dari data yang dimiliki pada *software NUMECA FINE^{TM}/Marine* dan dipilih air laut pada suhu 20° Celcius.

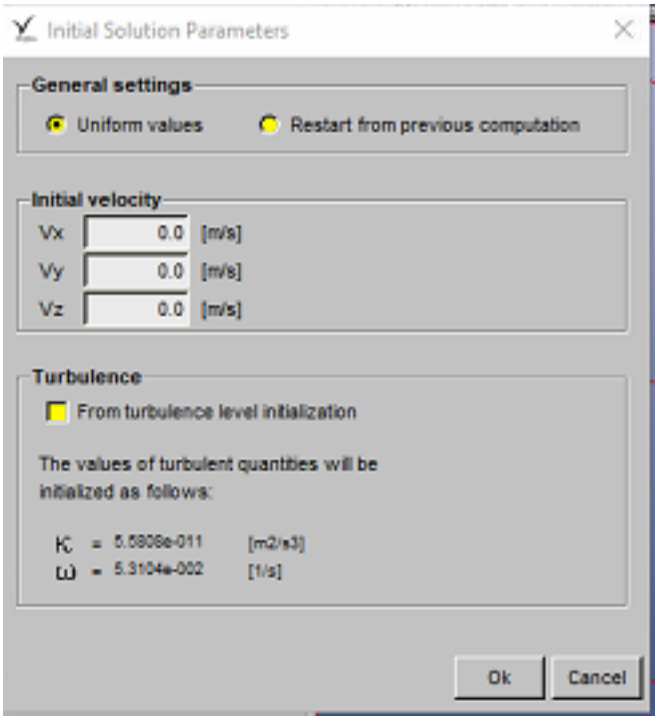
3. Untuk *flow model* yang digunakan adalah k-omega SST
4. Untuk *boundary condition*, pada kapal digunakan *wall-function*
5. Pada *body motion*, *setup solver* yang perlu diatur, yakni *motion definition*. Untuk *motion definition* perlu untuk diatur *motion law parameters*-nya yakni menyesuikan *final velocity* dengan kecepatan kapal yang akan diuji dan *final time* yang merupakan waktu di mana kapal akan mencapai *final velocity* tersebut.

   Perlu diketahui, bahwa untuk simulasi tak-homogen terdapat 3 *vessel*. Sehingga masing-masing *vessel* perlu diatur *motion law* nya dan perlu dipastikan pula bahwa kapal berjalan dalam kondisi *fixed* tanpa adanya *degree of freedom* karena jenis kapalnya adalah *displacement* yang peruntukannya adalah untuk container, berbeda dengan kapal tipe *planning* yang peruntukannya adalah untuk kapal cepat yang mudah *trim*.



Gambar 4. 13 *Setup Solver* pada *Body Motion*

6. Untuk *initial solution* dan *mesh management* menggunakan *setup default* dari *software*, dan untuk *interface position z* menyesuaikan dengan sarat kapal.

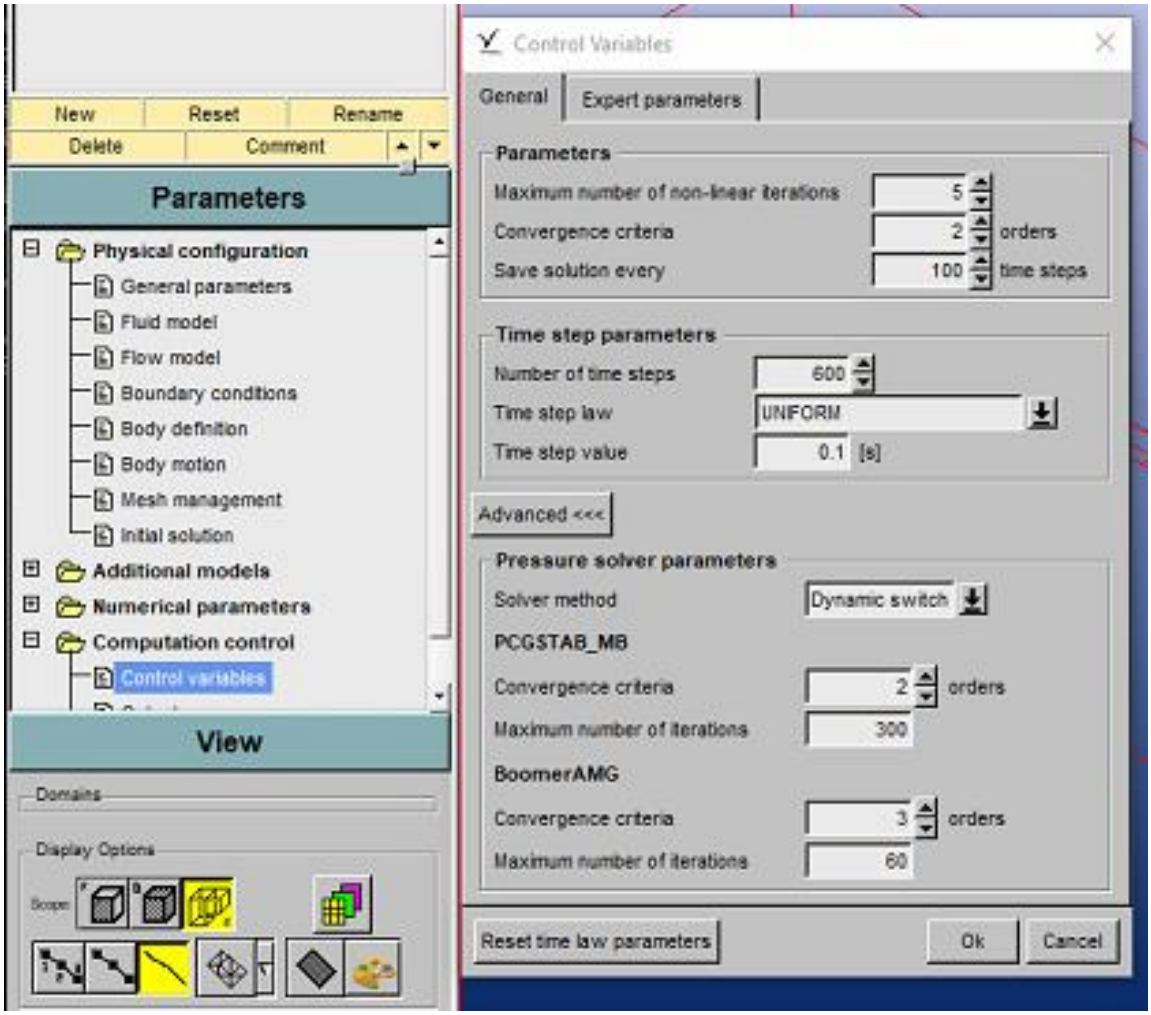


Gambar 4. 14 *Setup Solver* untuk *Initial Solution Parameters*

Untuk *setup solver* pada *additional models* dan *numerical parameters* dibiarkan *default* dan ditentukan oleh *software Fine/Marine.* Sehingga dilanjutkan *setup solver* pada *computation control* tepatnya pada *control variables. Setup* yang dilakukan pada *control variables* adalah untuk menentukan jumlah *time steps* yang didasarkan pada *time step value.*

Time step value sendiri adalah waktu yang ditempuh kapal selama simulasi berlangsung untuk setiap *time step* yang dilewati. Sehingga jumlah *time steps* bisa didapatkan dari pembagian antara *final time* dengan *time step value* dan hasil itulah yang menjadi angka untuk diisi pada *number of time steps.*Dengan demikian, semakin tinggi kecepatan kapal model yang disimulasikan maka akansemakin tinggi pula nilai *final time*-nya dan akan semakin banyak juga jumlah dari *time step* simulasi tersebut. Dan *setup* untuk *number of time steps* tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.

Time step value pada kondisi *full viscous* dipilih dalam waktu 1 menit atau 600 *time steps.* Waktu 1 menit sudah cukup bagi kondisi *full viscous* untuk mencapai kondisi konvergen atau sudah menuju satu nilai tertentu. Kondisi *mono-fluid* juga mempengaruhi kecepatan pencapaian nilai konvergensi dan mengurangi kemungkinan terjadinya osilasi pada grafik.



Gambar 4. 15 *Setup* pada *Computational Control*

Setelah seluruh *setting mesh* dan *setup solver* selesai dilakukan, selanjutnya dapat dilakukan proses simulasi 3D model kapal dengan menekan tombol *start solver* yang terdapat pada *bar* di bagian atas dari *interface Fine/Marine*. Untuk *setup solver* baik pada 3D model *full viscous* maupun pada 3D model kapal dengan *free surface* keduanya menggunakan *setup solver* yang sama.

4.4 Validasi Hasil Simulasi Kapal KRISO *Container Ship full viscous*

Setelah proses simulasi CFD dilakukan, tahapan selanjutnya adalah memastikan bahwa hasil dari konfigurasi simulasi CFD tersebut benar, yakni dengan cara validasi. Validasi dilakukan pada hasil simulasi dari kapal KRISO *Container Ship* simulasi *full viscous* dengan cara membandingkan hasil koefisien hambatan gesek kapal yang didapatkan dari perhitungan ITTC $C_F = 0.075/(\log Re - 2)^2$ dengan toleransi sekurang – kurangnya 5% dari nilai C_F hasil CFD.

4.4.1 Perhitungan Koefisien Gesekan *Full Viscous* dengan Rumus Empirik

Kapal *KRISO Container Ship* merupakan kapal tipe *displacement*, sehingga untuk pendekatan perhitungan terhadap hambatan kapal dapat menggunakan perhitungan metode empiris yaitu dengan perhitungan C_F Rumus ITTC 1957. Perhitungan dengan ITTC ini akan dibandingkan dengan perhitungan C_F dengan R_F hasil simulasi agar perhitunganya mudah diterima. Tahap validasi hambatan dengan perhitungan ITTC adalah sebagai berikut:

1. Re (*Reynold Number*)

   Reynold number diformulasikan sebagai berikut:

   $Re = \frac{VL}{v}$ ..... (4.1)

   di mana:

   V = Kecepatan (m/s)

   L = Panjang (m)

   v = Viskositas Kinematik Fluida (m^2/s)

2. C_F (Koefisien Gesek) ITTC 1957

   Koefisien gesek adalah komponen hambatan yang disebabkan oleh gesekan lambung kapal dengan air laut. C_F ITTC 1957 diformulasikan sebagai berikut:

   $CF = 0.075/\ (\log Re - 2)^{\ 2}$ ..... (4.2)

3. C_F (Koefisien Gesek)

   C_F diformulasikan sebagai berikut:

   $CF = R_F/$

   $\frac{1}{2}\rho SV^2$ ..... (4.3)

   di mana:

   R_F = Hambatan gesek (N)

   ρ = Massa Jenis (kg/m^3)

   S = Luas Permukaan Basah (m^2)

   V = Kecepatan Kapal (m/s)

Dari perhitungan Koefisien Gesek dengan menggunakan ITTC dan Koefisien Gesek hasil Simulasi, didapatkan hasil sebagai berikut:

Perhitungan Reynold Number:

$$Re = \frac{VL}{v}$$

$$Re = \frac{12.347 \times 232.5}{1.05 \times 10^{-6}} = 2.7318 \times 10^{9}$$

Tabel 4. 2 Perhitungan *friction coefficient* menggunakan rumus empirik simulasi *full viscous*

Perhitungan C_F dengan Validasi ITTC	**Perhitungan C_F Hasil Simulasi *Full Viscous***
$\mathbf{C_F = 0.075/(\log Re - 2)^2}$	$C_F = R_F / \frac{1}{2}\rho S V^2$
$\mathbf{C_F = 0.075/(\log_{10}(2.73 \times 10^9) - 2)^2}$	$C_F = \frac{1.05 \times 10^6}{0.5 \times 1024.81 \times 9544.1 \times 12.347^2}$
$\mathbf{C_F = 1.356 \times 10^{-3}}$	$C_F = 1.406 \times 10^{-3}$
Pebedaan *full viscous* = $\frac{((1.406 \times 10^{-3}) - (1.356 \times 10^{-3})}{1.356 \times 10^{-3}} = \mathbf{3.66\%}$	

Dari perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa perbedaan Koefisien Gesek *full viscous* antara hasil simulasi dan perhitungan ITTC adalah valid.

BAB 5
SIMULASI CFD KRISO CONTAINER SHIP *FREE SURFACE*

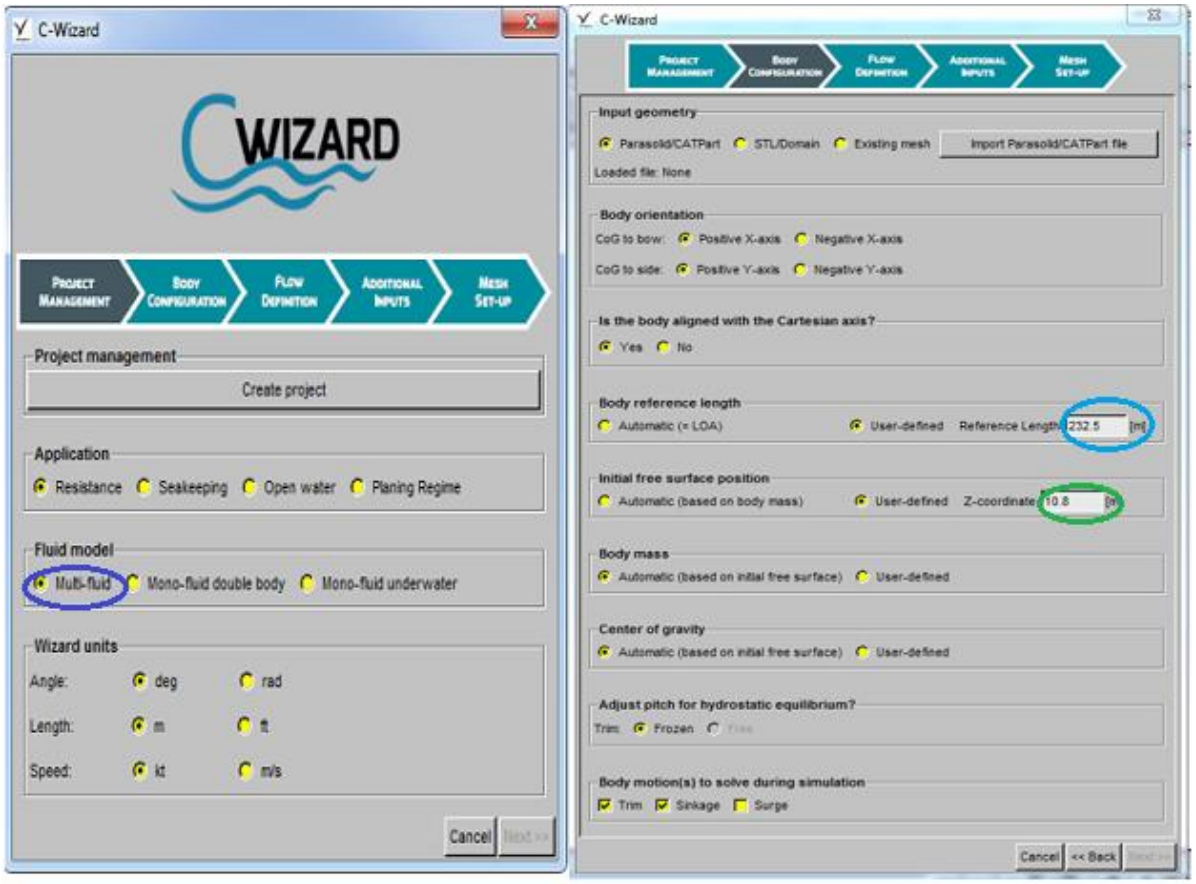
5.1 Pembuatan Meshing dari 3D Model Kapal

Sama seperti pada simulasi *full viscous,* pembuatan *meshing* dari 3D model kapal "*KRISO Container Ship"* dilakukan pada *software* NUMECA FINETM/Marine versi 8.2. Pada *software* ini juga akan dilakukan proses simulasi pada 3D model kapal tersebut. Sebelum 3D model kapal dapat dilakukan simulasi pada *software* NUMECA FINETM/Marine, format file dari 3D model kapal yang sebelumnya sudah dieksekusi di *Solidworks* harus diubah ke format *parasolid* terlebih dahulu, karena format file inilah yang dapat dibaca oleh *software* NUMECA FINETM/Marine sehingga dapat dilakukan proses simulasi.

5.1.1 Import 3D Model Kapal "KRISO Container Ship" ke NUMECA FINE^{TM}/Marine beserta pembuatan Domain Kapal

Model yang sudah dibuat sebelumnya lalu di *import* ke *software* NUMECA FINETM/Marine dengan menggunakan *tools C-Wizard* yang sudah disediakan oleh *software* tersebut. Untuk pengaplikasian terhadap simulasi ini menggunakan hambatan yang umum dipakai pada pengujian untuk model fluid yang digunakan adalah *multi-fluid* yang dalam hal ini fluida yang digunakan untuk dibawah sarat adalah air laut dan untuk diatas sarat adalah udara, kemudian untuk kapal dengan satuan yang digunakan adalah *degree* untuk sudut, meter untuk Panjang, dan knot untuk kecepatan. Setelah itu dapat dibuat *creat project* untuk membuat calon file project NUMECA FINE^{TM}/Marine tersebut.

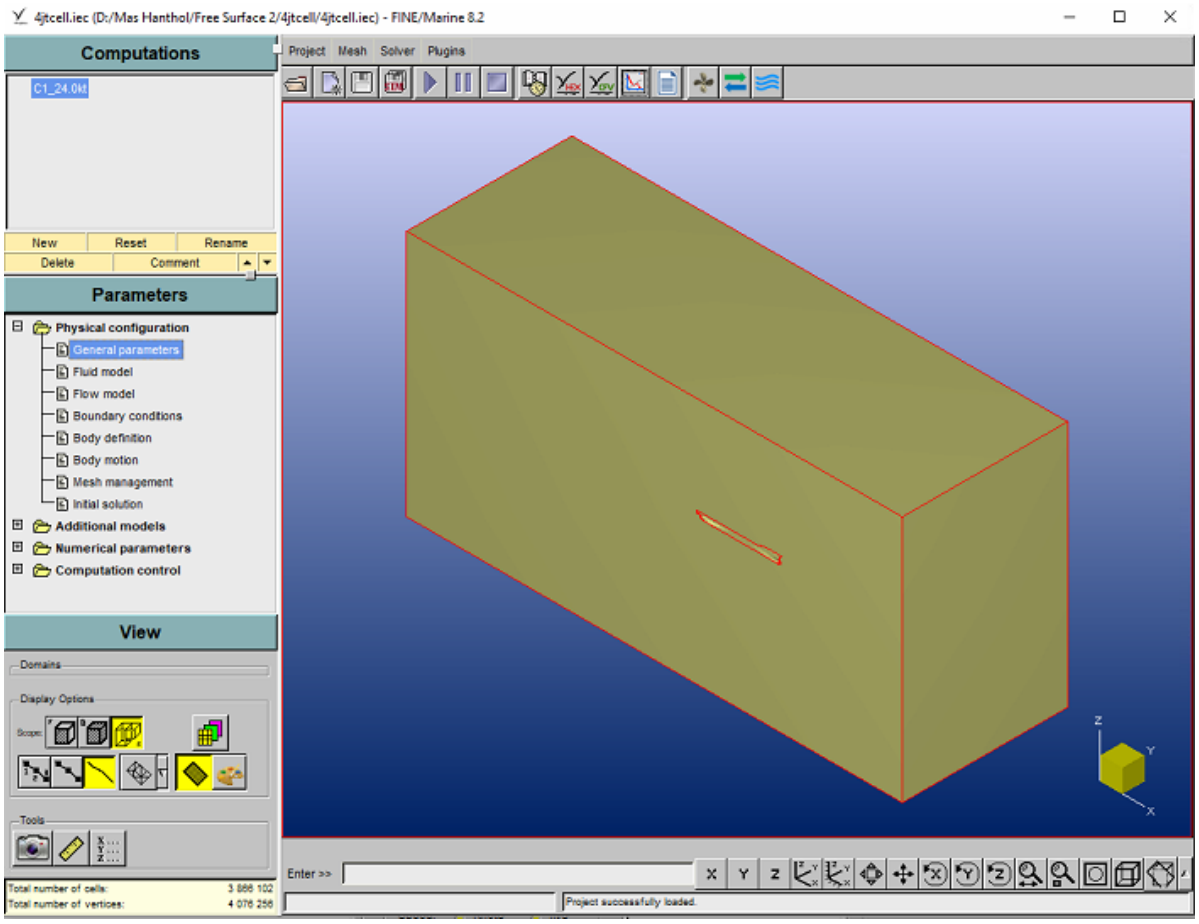
Setup C-Wizard yang digunakan pada model *KRISO Container Ship* baik yang lambung halus maupun lambung dengan kekasaran homogen/tak-homogen, keduanya menggunakan *setup C-Wizard* yang sama. *Setup C-Wizard* yang secara drastisdapat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *setup* simulasi CFD melalui proses automasi. Dengan fitur C-Wizard, pengguna tidak perlu berlama-lama menghabiskan waktu untuk mengatur parameter numerik. Dengan hanya melakukan input fisik, pengguna software menerima definisi lengkap dari simulasi yang diperlukan, termasuk aspek numeriknya. S*etup C-Wizard* yang dimaksud dijelaskan pada keterangan dibawah ini.



Gambar 5. 1 *Setting C-Wizard* dan *Import* 3D model kapal

Selanjutnya dapat dimasukkan data pendukung lainnya seperti kecepatan kapal, panjang kapal, serta *initial* yang akan dilakukan simulasi serta massa jenis fluida yang akan digunakan. Setelah itu, dilakukan pembuatan domain dari kapal di mana ukuran domain tersebut dapat ditentukan sendiri agar domain yang dihasilkan tidaklah terlalu besar yang nantinya akan berpengaruh terhadap jumlah *mesh* yang akan dibuat agar tidak terlalu besar, sehingga proses simulasi pun akan dapat berjalan lebih cepat. Untuk ukuran domain karena kapal dalam simulasi *free surface* yang diperlukan hanya ke arah bawah, samping, depan, dan belakang saja, yakni:

1. 1 kali LOA ke arah bawah kapal
2. 1 kali LOA ke arah samping kapal
3. 1 kali LOA ke arah depan kapal
4. 2 kali LOA ke arah belakang kapal
5. 0.5 kali LOA ke arah atas kapal



Gambar 5. 2 Ukuran domain untuk simulasi

Setelah *setting* untuk *C-Wizard* sudah dilakukan, dapat dilakukan ke tahap selanjutnya yakni pembuatan *mesh* dari 3D model tersebut dengan menekan tombol *start mesh set-up.*

5.1.2 Setup Meshing 3D Model Kapal "KRISO Container Ship" di NUMECA FINE^{TM}/Marine

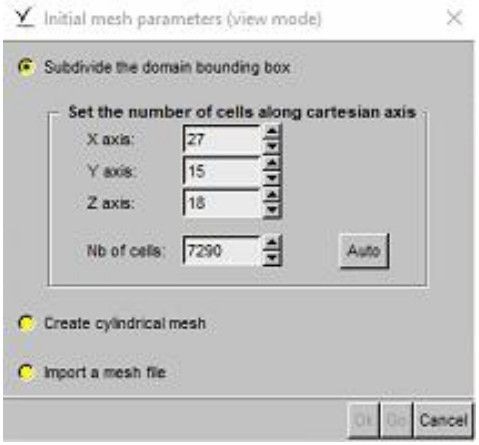
Pembuatan *meshing* dilakukan pada *software* HEXPRESS yang juga merupakan bagian dari *software* NUMECA FINETM/Marine yang berguna untuk pembuatan *meshing* beserta manipulasi domain dari 3D model kapal. Pembuatan *meshing* pada *software* ini terdapat 5 tahap yakni *initial mesh, adapt to geometry, snap to geometry, optimize,* dan *viscous layers.*

Gambar 5. 3 Tahap-tahap *meshing* pada *Software* HEXPRESS

berikut penjelasan dan *setting* dari masing-masing tahap tersebut:

a. Initial mesh

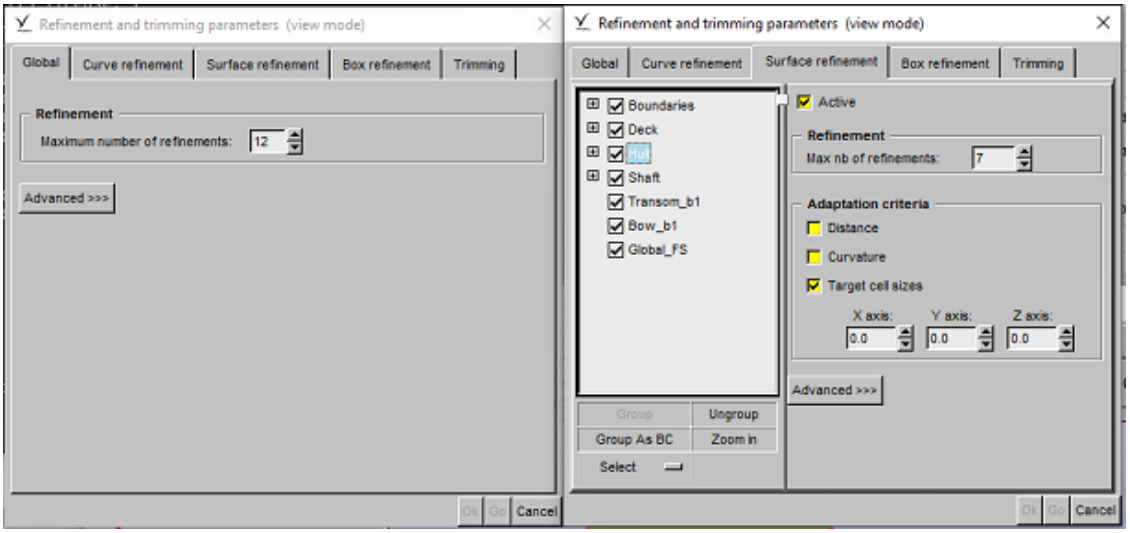
Merupakan tahap awal dalam proes *meshing* pada *software* HEXPRESS, di mana pada tahap ini *software* akan secara otomatis membuat *structured mesh* untuk memenuhi *domain* yang sudah dibuat tersebut sehingga ukuran *cell* pada setiap sisinya berukuran sama. *Setting* yang digunakan untuk *initial mesh* ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5. 4 *Settings* yang sigunakan pada *Initial Mesh*

b. Adapt to Geometry

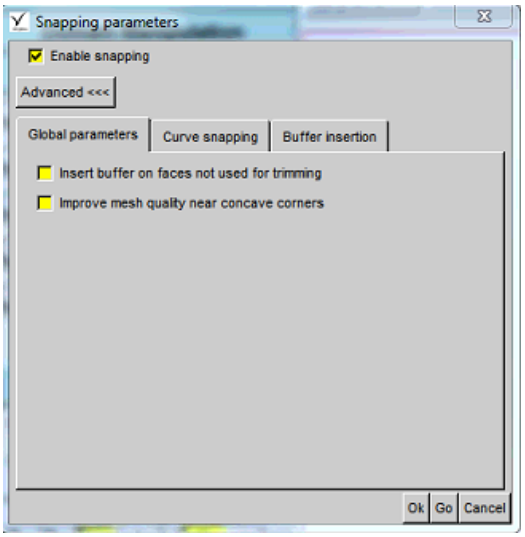
Pada tahap ini, *software* HEXPRESS akan secara otomatis memperkecil ukuran *cells* yang berada di sekitar 3D model kapal, sehingga jumlah *cells* pada bagian tersebut pun akan semakin banyak agar hasil simulasi dapat menjadi lebih akurat, *setting mesh* yang digunakan pada tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5. 5 *Setting* yang digunakan pada *Adapt to Geometry*

c. *Snap to Geometry*

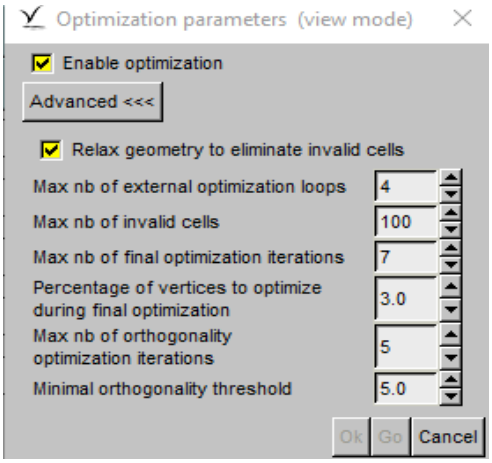
Pada tahap ini, *mesh* yang sudah hampir menyerupai bentuk 3D model selanjutnya di-*snap* agar bentuknya benar -benar sesuai dengan bentuk 3D model kapal, sehingga pada tahap ini, *cells* tidak lagi berbentuk kubus dan sudah menyesuaikan bentuk kapal, berikut adalah *setting mesh* yang digunakan pada tahap ini.



Gambar 5. 6 *Setting* yang digunakan pada *Snap to Geometry*

d. *Optimize*

Pada tahap ini, *mesh* yang sudah menyesuaikan bentuk kapal, selanjutnya di optimalkan lagi, sehingga *cells* yang dihasilkan memiliki kualitas yang tinggi dan tidak ada kecacatan *cells.* Kecacatan *cell* yang dimaksud adalah antara lain *negative cell, concave cell,* dan terakhir adalah *twisted cell.* Apabila ketiga kecatatan *cell* tersebut masih terdapat pada hasil *mesh* 3D model kapal, maka proses *meshing* harus diulang dari awal dengan menggunakan *setting mesh* yang berbeda sehingga cacat *cell* tersebut dapat dihilangkan. *Setting* yang digunakan pada tahap ini dapat dilihat pada gambar berikut.

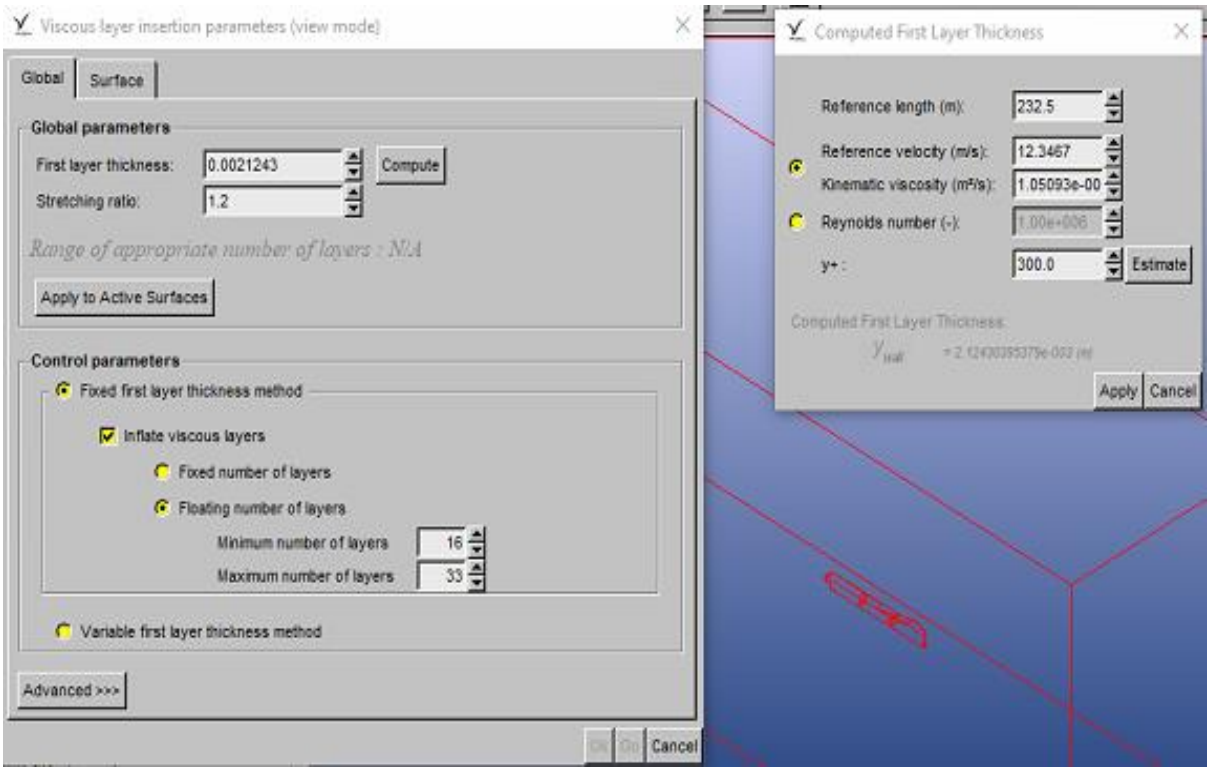


Gambar 5. 7 *Setting* yang digunakan pada *Optimize*

e. Viscous Layers

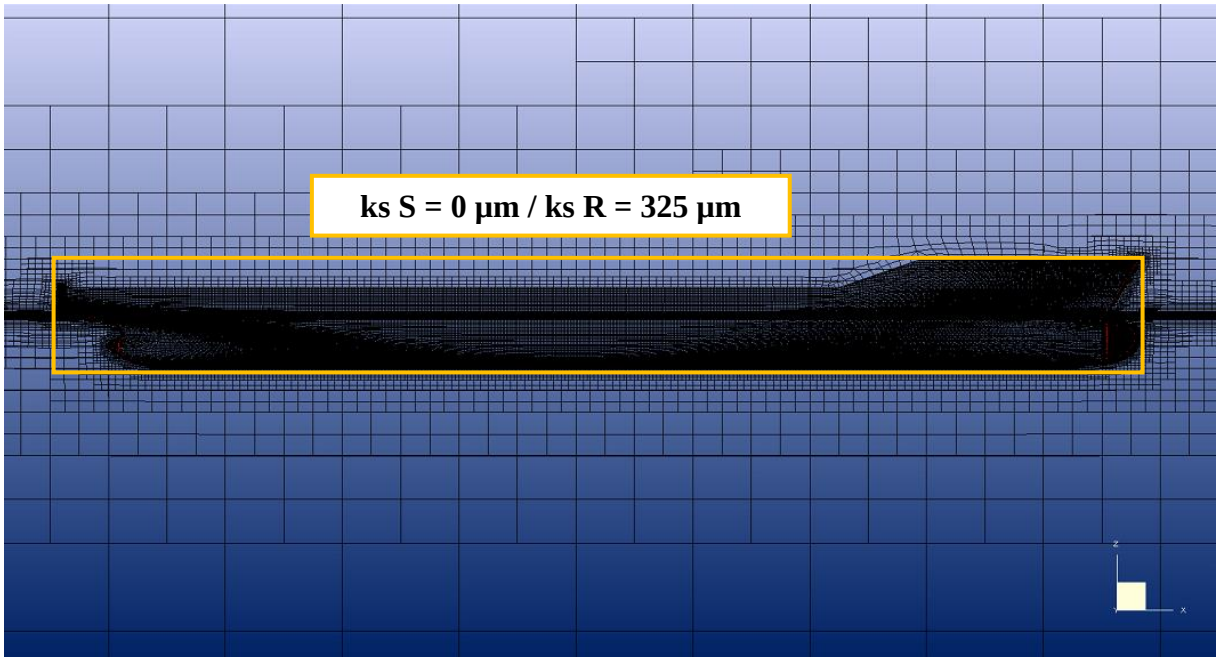
Ini merupakan tahap terakhir pada proses *meshing* dengan *software* HEXPRESS, pada tahap ini adalah untuk menambahkan *viscous layers* pada 3D model kapal yang akan disimulasi, di mana *viscous layers* ini berfungsi untuk mendapatkan karakeristik serta hasil aliran yang lebih akurat pada *body* yang disimulasi.

Untuk nilai *first layer thickness* didapatkan dari perhitungan yang dilakukan oleh *software* dengan memasukkan beberapa parameter yakni, *reference length* yang merupakan LOA kapal, lalu *reference velocity* yang merupakan kecepatan kapal, dan *kinematic viscosity* dari fluida yang digunakan untuk simulasi. Dan untuk nilai y+ dapat diestimasi secara otomatis oleh *software* HEXPRESS. Berikut *setting* secara lengkapnya dapat dilihat pada gambar berikut ini.

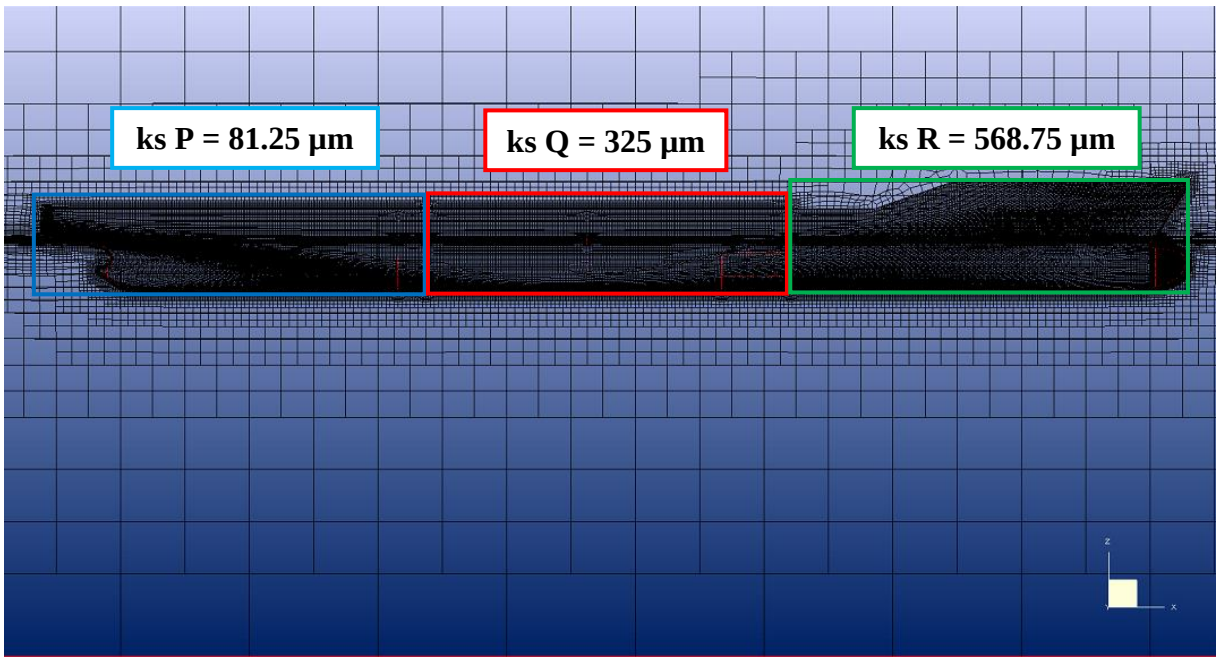


Gambar 5. 8 *Setting* yang digunakan pada *Viscous Layers*

Sama halnya seperti *setup C-Wizard*, untuk *setting mesh* yang digunakan baik pada model *KCS* lambung halus maupun lambung kasar keduanya menggunakan *setting mesh* yang sama agar hasil simulasi yang dilakukan dapat saling dibandingkan. Berikut adalah gambar hasil dari *mesh* untuk 3D model dengan lambung halus dan 3D model kapal dengan lambung kasar.



Gambar 5. 9 Hasil *Mesh* 3D model KCS dengan lambung halus/kasar homogen



Gambar 5. 10 Hasil *Mesh* 3D model KCS dengan lambung kasar tak-homogen PQR

5.2 Grid Independent untuk Simulasi KRISO *Container Ship Free Surface*

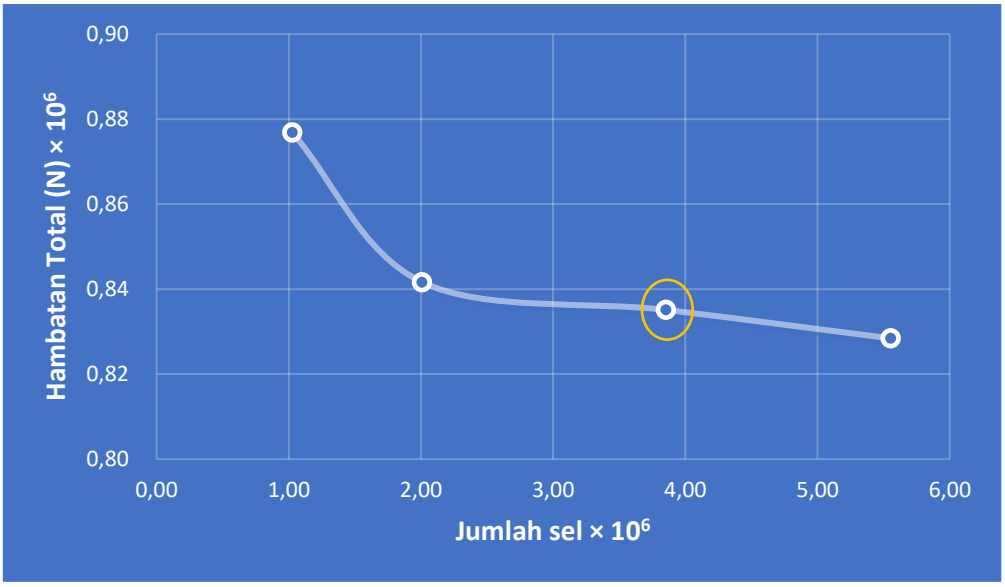
Sama dengan *Grid Independent* simulasi *full viscous, Grid Independent free surface* berkaitan dengan tingkat keakurasian atau bahkan tingkat rasionalitas dari suatu hasil perhitungan numerik. *Grid independent* atau *Grid Convergence Index (CGI)* adalah estimasi yang sangat penting dalam menentukan ketidakpastian spasial (Ugrid) dan temporal (UΔt)

(Celik, 2008). Hasil perhitungan terjadi perubahan yang sangat sedikit bersama dengan bertambahnya nilai kerapatan *mesh* dalam suatu simulasi yang dilakukan. *Grid independent* dapat secara langsung mempengaruhi hasil perhitungan numerik.

Pada simulasi ini yang ingin diketahui adalah besarnya nilai hambatan total yang dihasilkan oleh model *KCS* ketika sedang bergerak dengan kecepatan 24 knot. Dengan seiring bertambahnya jumlah *cells*, maka nilai hambatan total kapal juga akan semakin berkurang. Sehingga perlu didapatkan nilai pengurangan hambatan yang paling optimum pada jumlah *cell* tertentu. Nilai hambatan dibandingkan setiap kelipatan 2 kali jumlah *cell* dari simulasi yang sebelumnya, ketika dengan penambahan jumlah *cell* dan pengurangan hambatan yang terjadi kurang dari 2%, maka dapat disimpulkan bahwa pada jumlah *cell* tersebutlah yang merupakan *grid independent* simulasi *free surface* dari simulasi 3D model kapal *"KRISO Container Ship"* ini. Berikut disajikan tabel beserta grafik nilai hambatan kapal seiring bertambahnya jumlah *cell*, dengan jumlah *cell* awal berada pada sekitar 1.03×10^6 *cell* dengan jumlah *cell* maksimal berada pada sekitar 5.56×10^6 *cell* di mana nilai *grid independent* didapatkan pada sekitar 3.86×10^6 *cell*. Pengujian *grid independent* dilakukan dengan simulasi lambung halus.

Tabel 5. 1 *Grid Independent free surface*

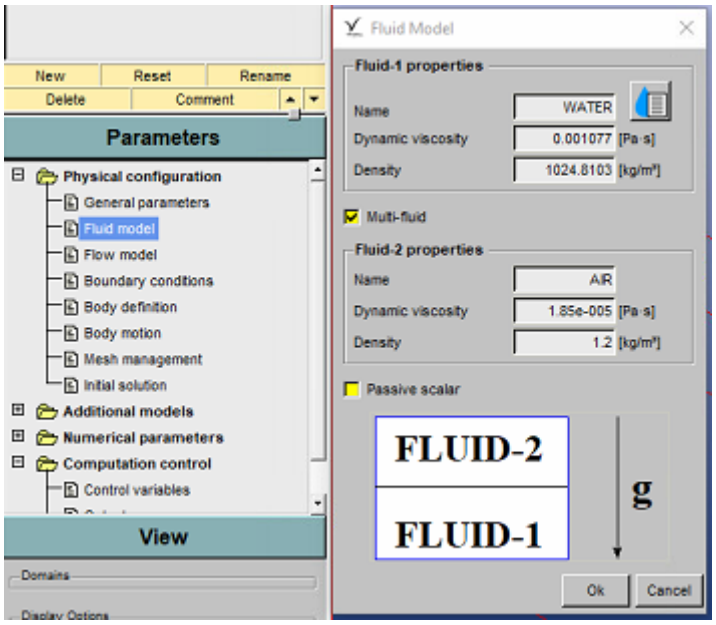
Simulasi	Jumlah Sel	Nilai Hambatan (N)	Penurunan
1	1.03×10^6	0.87×10^6	-
2	2.01×10^6	0.84×10^6	4.01%
3	3.86×10^6	0.84×10^6	0.77%
4	5.56×10^6	0.83×10^6	0.80%



Gambar 5. 11 *Grid Independent free surface* simulasi KRISO *Container Ship*

5.3 Setup Solver untuk Simulasi 3D Model Kapal KCS *free surface*

Untuk *setup* pada simulasi *free surface* sepenuhnya sama dengan simulasi *full viscous*, hanya saja perbedaannya terletak pada *fluid flow* yakni pada air dan udara.



Gambar 5. 12 *Fluid Properties* yang digunakan untuk simulasi

5.4 Validasi Hasil Simulasi Kapal *KRISO Container Ship Free Surface*

Setelah proses simulasi CFD dilakukan, tahapan selanjutnya adalah memastikan bahwa hasil dari konfigurasi simulasi CFD tersebut benar, yakni dengan cara validasi. Validasi

dilakukan pada hasil simulasi dari kapal KRISO *Container Ship* simulasi *free surface* dengan cara membandingkan hasil koefisien hambatan gesek kapal yang didapatkan dari perhitungan ITTC $C_F = 0.075/\ (\log Re - 2)^{\ 2}$ dengan toleransi sekurang – kurangnya 5% dari hasil CFD.

5.4.1 Perhitungan Koefisien Gesekan *Free Surface* dengan Rumus Empirik

Kapal KRISO *Container Ship* merupakan kapal tipe *displacement*, sehingga untuk pendekatan perhitungan terhadap hambatan kapal dapat menggunakan perhitungan metode empiris yaitu dengan perhitungan C_F Rumus ITTC 1957. Perhitungan dengan ITTC ini akan dibandingkan dengan perhitungan C_F dengan R_F hasil simulasi agar perhitunganya mudah diterima. Tahap validasi hambatan dengan perhitungan ITTC adalah sebagai berikut:

Perhitungan Reynold Number:

$$Re = \frac{VL}{v}$$

$$Re = \frac{12.347 \times 232.5}{1.05\ \times\ 10^{-6}} = 2.7318\ \times\ 10^{9}$$

Tabel 5. 2 Perhitungan *Friction Coefficient* dengan rumus empirik ITTC

Perhitungan C_F dengan Validasi ITTC	**Perhitungan C_F Hasil Simulasi *Free Surface***
$\mathbf{C_F = 0.075/\ (\log Re - 2)^{\ 2}}$	$C_F = R_F/\ \frac{1}{2}\rho S V^2$
$\mathbf{C_F = 0.075/(\log_{10}(2.73\ \times\ 10^9) - 2)^{\ 2}}$	$C_F = \frac{1.09\ \times\ 10^{-6}}{0.5 \times 1024.81 \times 9935.757178 \times 12.347^2}$
$\mathbf{C_F = 1.356\ \times 10^{-3}}$	$C_F = 1.399\ \times\ 10^{-3}$
Perbedaan *free surface* = $\frac{((1.399\times10^{-3})-(1.356\times10^{-3}))}{(1.356\times10^{-3})} = \mathbf{3.16\%}$	

Dari perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwa perbedaan koefisien gesek Full Viscous antara hasil simulasi dan perhitungan ITTC adalah valid.

5.4.2 Validasi Hasil C_T Simulasi Kapal KRISO Container Ship *Free Surface* Dengan Data Pembanding Lainnya

Selain dibandingkan dengan C_F hasil perhitungan empirik ITTC 1957 validasi juga dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi CFD ke hasil simulasi CFD yang dilakukan oleh (Dogrul et al., 2020) pada jurnal yang berjudul *Scale Effect On Ship Resistance Componen and Form Factor* serta hasil eksperimen yang dilakukan oleh (Kim et al., 2001) yang berjudul

Measurement of Flows Around Modern Commercial Ship Models .

Tabel 5. 3 Perbandingan nilai *Friction Coefficient* KCS yang diperoleh dari CFD saat ini dan dengan sumber lain

Metode	C_T	Perbedaan Relatif
CFD Saat Ini	2.150×10^{-3}	
CFD (Dogrul et al., 2020)	2.113×10^{-3}	1.75%
EFD ekstrapolasi (W. J. Kim et al., 2001)	2.084×10^{-3}	3.16%

Dapat dilihat pada tabel 5.2 bahwa perbandingan nilai C_T kapal *KRISO Container Ship* memiliki nilai perbandingan relatif terbesar yakni 3.16% dengan demikian hasil simulasi CFD tersebut dapat dikatakan valid.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 6
HASIL DAN PEMBAHASAN

6.1 Pengolahan Data dan Validasi

Kapal KCS memiliki pengaruh terhadap tekanan yang diterimanya. Bentuk tersebut kemudian menimbulkan gaya searah dan gaya gesek. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh dari proses perhitungan numerik ini yaitu *drag*, terdiri atas *hambatan gesek* dan hambatan tekanan. Jika persamaan ini dijabarkan antara hambatan gesek dan tekanan, persamaan (2.1) tersebut menjadi :

$$\mathrm{R}_T = \mathrm{R}_P + \mathrm{R}_F \qquad \textbf{(6.1)}$$

Setelah didapatkan nilai hambatan gesek, maka koefisien gesek *(*C_F) dapat dihitung dengan persamaan (2.9). Nilai koefisien gesek yang didapat pada simulasi KRISO *Container Ship* kemudian dibandingkan dengan nilai koefisien gesek menggunakan persamaan (2.7) yakni persamaan *correlation line* dari ITTC. Selisih perbedaan tersebut dihitung menggunakan cara berikut :

$$\frac{C_{F_{CFD}} - C_{F_{ITTC}}}{C_{F_{ITTC}}} \times 100\% \qquad \textbf{(6.2)}$$

Persamaan (6.2) juga dapat digunakan untuk mencari selisih perbedaan untuk hasil simulasi homogen *roughness* maupun tak-homogen *roughness* dengan KRISO *Container Ship,* sehingga:

$$\Delta C_F = \frac{C_{F_{roughCFD}} - C_{F_{smoothCFD}}}{C_{F_{smoothCFD}}} \times 100\% \qquad \textbf{(6.3)}$$

Nilai *skin friction coefficient* yang didapat pada simulasi KRISO *Container Ship* juga harus divalidasi menggunakan Granville *Similarity law methods.* Formula ini di diuraikan pada persamaan (2.21). Dengan perbedaan kekasaran yang tidak lebih dari 7% (Demirel et al., 2017). Formula ini akan dicocokkan dengan homogen *roughness* dengan ketinggian kekasaran sebesar 325 µm untuk mencari tahu seberapa besar nilai perbedaannya. Sehingga persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\Delta C_F = \frac{C_{F_{roughCFD}} - C_{F_{roughGranville}}}{C_{F_{roughGranville}}} \times 100\% \qquad \textbf{(6.4)}$$

Untuk Perhitungan nilai $C_{FroughGranville}$ juga dapat dicari selisih persentase perbedaannya

dengan nilai $C_{F_{ITTC}}$ juga dapat dicari perbedaannya dengan persamaan berikut:

$$\Delta C_F = \frac{C_{F_{roughGranville}} - C_{F_{ITTC}}}{C_{F_{ITTC}}} \times 100\% \quad \textbf{(6.5)}$$

6.2 Validasi Simulasi Kekasaran KRISO Container Ship dengan Metode Granville

Sebelum menghitung menggunakan Rumus Granville, ada beberapa bagian dari rumus tersebut yang perlu dihitung. Diantaranya adalah *Reynolds Number* dan *Shifting*. *Shifting* sendiri memiliki *roughness function* ΔU^+ dan κ (konstanta Von Karman senilai 0.41). Didalam *roughness function* sendiri terdapat k_s^+ yang mengandung nilai k_s sebagai ketinggian kekasaran, U_τ sebagai *friction velocity*, dan v sebagai viskositas kinematis fluida.

6.2.1 Perhitungan Koefisien Gesekan *Full Viscous* dengan Rumus Granville

Pada simulasi *full viscous* ini mula – mula adalah menghitung nilai *friction velocity* U_τ dengan persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$U_\tau = U_\infty \sqrt{\frac{C_F}{2}}$$

- Berdasarkan Tabel 6.1 diketahui C_F hasil simulasi adalah 2.18×10^{-3}
- U_∞ sebesar 12.3467m/s, maka:

$$U\tau = 12.35 \sqrt{\frac{2.18 \times 10^{-3}}{2}} = 0.40\ m/s$$

Setelah diketahui nilai $U\tau$, langkah selanjutnya adalah mencari nilai k_s^+ dengan persamaan (2.16) yang diuraikan sebagai berikut:

$$k_s{}^+ = \frac{k_s U_\tau}{v}$$

- Diketahui nilai k_s yang ditentukan sebesar 325 µm atau 3.25×10^{-4} m
- v sebesar 1.0508×10^{-6} Ns.m^2, maka

$$k_s{}^+ = \frac{(3.25 \times 10^{-4}) \times 0.40}{1.05 \times 10^{-6}} = 126{,}06$$

Setelah diketahui nilai k_s^+, selanjutnya adalah mencari nilai *roughness function* $(\Delta U^+) = f(k_s^+)$ dengan persamaan (2.11) berikut:

$$\Delta U^+ = C - B + \frac{1}{\kappa} \ln (k_s{}^+)$$

- Diketahui C = 5.1
- κ = konstanta Von Kármán (=0.41)

- Nilai B adalah *constant log law intercept* dengan persamaan (2.12) sebagai berikut:

$$B = (C + \frac{1}{\kappa}\ln ks^{+})(1 - \sin(\frac{\pi g}{2})) + 8.5\sin(\frac{\pi g}{2})$$

$$B = (8.5 + \frac{1}{0.41}\ln(126.06))(1 - \sin(\frac{\pi 1}{2})) + 8.5\sin\left(\frac{\pi 1}{2}\right) = 8.5$$

Sebagaimana yang disebutkan pada persamaan (2.14), bahwa nilai g adalah sama dengan 1, hal ini dikarenakan nilai k_s^+ yang diatas nilai $k_{s,rough}^+$ yakni sebesar 126.06 sedangkan nilai $k_{s,rough}^+$ sendiri hanya sebesar 90. Sehingga praktis nilai B yang dipengaruhi g adalah 8.5, maka nilai ΔU^+ adalah:

$$\Delta U^+ = 5.1 - 8.5 + \frac{1}{0.41}\ln(126.06) = 8.397$$

Berikutnya adalah nilai Shifting sesuai dengan persamaan (2.22), nilai dari shifting adalah:

$$Shifting = \Delta U^+ \frac{\kappa}{\ln(10)}$$

$$Shifting = 8.40\frac{0.41}{\ln(10)} = 1.50$$

Kemudian untuk nilai *Reynolds Number* diambil dari persamaan (2.8) adalah sebagai berikut:

$$R_e = \frac{VL}{\nu}$$

$$R_e = \frac{12.35 \times 232.5}{1.05 \times 10^{-6}} = 2.73 \times 10^9$$

- Diketahui nilai kecepatan KCS adalah 12.3467 m/s
- Panjang LWL KCS adalah 232.5 m

Terakhir untuk perhitungan C_F Granville diambil dari persamaan (2.21), yakni:

$$C_{F,rough} = \frac{0.075}{(Log_{10}(Re) - shifting - 2)^2}$$

$$C_{F,rough} = \frac{0.075}{(Log_{10}(2.73 \times 10^9) - 1.5 - 2)^2} = 2.12 \times 10^{-3}$$

Selanjutnya adalah menentukan perbedaan antara $C_{F,roughCFD}$ dengan $C_{F,roughGranville}$. Apakah sesuai dengan rekomendasi oleh Penelitian Demirel et al. (2017) yakni maksimal sebesar 7%. Perhitungan perbedaan sesuai dengan persamaan (6.4), adalah sebagai berikut:

$$\Delta C_F = \frac{C_{F_{roughCFD}} - C_{F_{roughGranville}}}{C_{F_{roughGranville}}} \times 100\%$$

$$\Delta C_F = \frac{(2.18 \times 10^{-3}) - (2.12 \times 10^{-3})}{(2.12 \times 10^{-3})} \times 100\% = \mathbf{2.59}\%$$

Maka dari itu, validasi kekasaran $C_{F,roughCFD}$ adalah memenuhi rumus dari $C_{F,roughGranville}$ sebesar 2.6%.

Terakhir adalah Mencari perbedaan antara nilai $C_{FroughGranville}$ dengan C_{FITTC} yang diketahui nilainya pada sub bab (4.4.1) sebesar 0.001356 dengan persamaan (6.5) sebagai berikut:

$$\Delta C_F = \frac{2.13 \times 10^{-3} - 1.36 \times 10^{-3}}{1.36 \times 10^{-3}} \times 100\% = \mathbf{56.7}\%$$

6.2.2 Perhitungan Koefisien Gesekan *Free Surface* dengan Rumus Granville

Pada simulasi *free surface* ini mula – mula adalah menghitung nilai *friction velocity* U_τ dengan persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$U_\tau = U_\infty \sqrt{\frac{C_F}{2}}$$

- Berdasarkan Tabel 6.2 diketahui C_F hasil simulasi adalah 2.19×10^{-3}
- U_∞ sebesar 12.3467m/s, maka:

$$U\tau = 12.35 \sqrt{\frac{2.19 \times 10^{-3}}{2}} = 0.40\ m/s$$

Setelah diketahui nilai $U\tau$, langkah selanjutnya adalah mencari nilai k_s^+ dengan persamaan (2.16) yang diuraikan sebagai berikut:

$$k_s{}^+ = \frac{k_s U_\tau}{v}$$

- Diketahui nilai k_s yang ditentukan sebesar 325 µm atau 3.25×10^{-3}m
- v sebesar 1.05×10^{-6} Ns.m^2, maka

$$k_s{}^+ = \frac{(3.25 \times 10^{-4}) \times 0.41}{(1.05 \times 10^{-6})} = 126{,}49$$

Setelah diketahui nilai k_s^+, selanjutnya adalah mencari nilai *roughness function* $(\Delta U^+) = f(k_s^+)$ dengan persamaan (2.11) berikut:

$$\Delta U^+ = C - B + \frac{1}{\kappa} \ln (k_s{}^+)$$

- Diketahui C = 5.1

- κ = konstanta Von Kármán (=0.41)
- Nilai B adalah *constant log law intercept* dengan persamaan (2.12) sebagai berikut:

$$B = (C + \frac{1}{\kappa}\ln ks^{+})(1 - \sin(\frac{\pi g}{2})) + 8.5\sin(\frac{\pi g}{2})$$

$$B = (8.5 + \frac{1}{0.41}\ln(126{,}49))(1 - \sin(\frac{\pi 1}{2})) + 8.5\sin\left(\frac{\pi 1}{2}\right) = 8.5$$

Sebagaimana yang disebutkan pada persamaan (2.14), bahwa nilai g adalah sama dengan 1, hal ini dikarenakan nilai k_s^+ yang diatas nilai $k_{s,rough}^+$ yakni sebesar 126,49 sedangkan nilai $k_{s,rough}^+$ sendiri hanya sebesar 90. Sehingga praktis nilai B yang dipengaruhi g adalah 8.5, maka nilai ΔU^+ adalah:

$$\Delta U^+ = 5.1 - 8.5 + \frac{1}{0.41}\ln(126{,}49) = 8.405$$

Berikutnya adalah nilai Shifting sesuai dengan persamaan (2.22), nilai dari shifting adalah:

$$Shifting = \Delta U^+ \frac{\kappa}{\ln(10)}$$

$$Shifting = 8.41\frac{0.41}{\ln(10)} = 1.5$$

Kemudian untuk nilai *Reynolds Number* diambil dari persamaan (2.8) adalah sebagai berikut:

$$R_e = \frac{VL}{\nu}$$

$$R_e = \frac{12.35 \times 232.5}{1.05 \times 10^{-6}} = 2.71 \times 10^{-9}$$

- Diketahui nilai kecepatan KCS adalah 12.3467 m/s
- Panjang LWL KCS adalah 232.5 m

Terakhir untuk perhitungan C_F Granville diambil dari persamaan (2.21), yakni :

$$C_{F,rough} = \frac{0.075}{(Log_{10}(Re) - shifting - 2)^2}$$

$$C_{F,rough} = \frac{0.075}{(Log_{10}(2.71 \times 10^{-9}) - 1.5 - 2)^2} = 2.13 \times 10^{-3}$$

Selanjutnya adalah menentukan perbedaan antara $C_{F,roughCFD}$ dengan $C_{F,roughGranville}$. Apakah sesuai dengan rekomendasi oleh (Demirel et al., 2017) yakni maksimal sebesar 7%. Perhitungan perbedaan sesuai dengan persamaan (6.4), yakni adalah sebagai berikut:

$$\Delta C_F = \frac{C_{F_{roughCFD}} - C_{F_{roughGranville}}}{C_{F_{roughGranville}}} \times 100\%$$

$$\Delta C_F = \frac{(2.19 \times 10^{-3}) - (2.13 \times 10^{-3})}{(2.13 \times 10^{-3})} \times 100\% = 3.23\%$$

Maka dari itu, validasi kekasaran $C_{F,roughCFD}$ adalah memenuhi rumus dari $C_{F,roughGranville}$ sebesar 3.2%.

Terakhir adalah Mencari perbedaan antara nilai $C_{FroughGranville}$ dengan C_{FITTC} yang diketahui nilainya pada sub bab (5.4.1) sebesar 0.001356 dengan persamaan (6.5) sebagai berikut:

$$\Delta C_F = \frac{(2.126 \times 10^{-3}) - (1.356 \times 10^{-3})}{(1.356 \times 10^{-3})} \times 100\% = 56.7\%$$

6.3 Hambatan Kapal Hasil Simulasi CFD untuk Setiap Variasi Ketinggian Kekasaran

Aliran lapisan batas turbulen lambung kasar merupakan fenomena fisik kompleks yang menghasilkan peningkatan gesekan *drag* lebih dari 30% dibandingkan dengan lambung halus. Karena kekasaran permukaan lambung kasar yang dikotori dengan *biofouling* atau jenis ketidaksempurnaan lambung lainnya sering ditemukan tidak homogen, penting untuk mempertimbangkan kekasaran tidak homogen selain kekasaran homogen (Suastika et al., 2021). Penelitian ini terdapat kekasaran homogen (QQQ) dan kekasaran tidak homogen, efek ketidahomogenan kekasaran pada hambatan gesek kulit diselidiki dengan memodelkan pola kekasaran tak-homogen dengan cara yang disederhanakan menggunakan perubahan langkah pada ketinggian yang dilambangkan dengan P, Q, dan R. Masing – masing akan dikombinasikan menjadi 3 kekasaran dan akan divariasikan menjadi 6 varian, yaitu RPQ, QPR, RQP, PQR, QRP, PRQ.

Simulasi CFD kapal *KRISO Container Ship* pada setiap kekasaran dilakukan pada *software* NUMECA *FINE*^{TM}*/Marine.* Simulasi tersebut didapatkan nilai hambatan kapal yang akan dibandingkan dalam simulasi *full viscous* dan *free surface.* Pada simulasi keduanya akan dibandingkan antara lambung halus, kasar homogen, maupun tak-homogen dengan 3 jenis kekasaran yaitu P = 81.25 µm, Q = 325 µm, R = 568.75 µm, di mana kode yang terletak paling kiri adalah *bow,* kode tengah adalah parallel middle body, sedangkan kode paling kanan adalah *stern.* Berikut disajikan tabel nilai hambatan kapal dalam simulasi *full viscous* dan *free surface*:

Tabel 6. 1 Nilai Hambatan KCS *full viscous* pada berbagai variasi

Simulasi	$R_P \times 10^6$	$R_F \times 10^6$	$R_T \times 10^6$	$C_F \times 10^{-3}$	$C_T \times 10^{-3}$
Smooth	0.097	1.048	1.145	1.406	1.536
QQQ	0.140	1.625	1.765	2.180	2.368
RPQ	0.136	1.538	1.674	2.062	2.246
QPR	0.140	1.539	1.678	2.064	2.251
RQP	0.131	1.571	1.702	2.107	2.283
PQR	0.141	1.577	1.719	2.116	2.305
QRP	0.132	1.588	1.720	2.130	2.307
PRQ	0.139	1.593	1.731	2.136	2.323

Tabel 6. 2 Nilai Hambatan KCS *free surface* pada berbagai variasi

Simulasi	$R_P \times 10^6$	$R_F \times 10^6$	$R_T \times 10^6$	$C_F \times 10^{-3}$	$C_T \times 10^{-3}$
Smooth	0.580	1.086	1.670	1.399	2.152
QQQ	0.556	1.636	2.192	2.194	2.940
RPQ	0.562	1.576	2.138	2.114	2.863
QPR	0.556	1.578	2.134	2.117	2.860
RQP	0.545	1.602	2.147	2.149	2.880
PQR	0.546	1.604	2.150	2.151	2.883
QRP	0.540	1.615	2.155	2.166	2.891
PRQ	0.542	1.616	2.158	2.168	2.895

Dari Tabel 6.1 dan 6.2, persentase peningkatan nilai ΔC_F dari lambung halus menuju lambung kasar secara homogen baik dalam simulasi *full viscous* maupun *free surface* masing - masing dihitung menggunakan rumus (6.3) sebagai berikut:

$$\Delta C_{FViscous} = \frac{(2.180 \times 10^{-3}) - (1.406 \times 10^{-3})}{(1.406 \times 10^{-3})} \times 100\% = 55\%$$

$$\Delta C_{FSurface} = \frac{(2.194 \times 10^{-3}) - (1.399 \times 10^{-3})}{(1.399 \times 10^{-3})} \times 100\% = 56.8\%$$

Jadi untuk peningkatan ΔC_F *full viscous* dan *free surface* masing – masing adalah 55% dan 56.8%.

Pada dasarnya, urutan susunan pola kekasaran aliran tidak homogen memainkan peran kunci dalam koefisien gesekan lambung keseluruhan yang dihasilkan oleh C_F. Ditemukan

bahwa C_F pada KCS simulasi *full viscous* meningkat dengan urutan sebagai berikut: RPQ < QPR < RQP < PQR < QRP < PRQ. Hasil selanjutnya untuk KCS simulasi *free surface* dapat diprediksi dengan formasi yang sama yakni RPQ < QPR < RQP < PQR < QRP < PRQ semua urutan diatas baik simulasi *full viscous* maupun *free surface* selalu lebih kecil dari kasus QQQ yang homogen. Perubahan kekasaran pada bagian *parallel middle body* memiliki efek yang sangat signifikan untuk koefisien gesekkan C_F secara keseluruhan pada kapal KRISO *Container Ship*. Hal ini tertera pada urutan kekasaran baik dalam simulasi *full viscous* maupun *free surface*, yakni 2 urutan kekasaran terkecil pada bagian *parallel middle body* memiliki kode P sedangkan 2 urutan terbesar pada bagian yang sama memiliki kode R. Penyebab dari besarnya efek kekasaran pada bagian *parallel middle body* adalah karena pada bagian tersebut memiliki WSA paling luas yakni sebesar 3819.414 m^2, sedangkan bagian *stern* dan *bow* secara berurutan luasnya adalah 3252.252 m^2 dan 2797.859 m^2. Secara praktis, membersihkan atau mencegah *biofouling* pada bagian terluas berupa *parallel middle body* adalah keutamaan yang harus dikerjakan.

Validasi dari nilai koefisien gesek (C_F) pada lambung homogen baik dalam simulasi *full viscous* maupun dalam *free surface* ditunjukkan bersama – sama pada sub bab (6.2.1) dan (6.2.2). Hasil simulasi yang diperoleh dengan kedua metode *Computational Fluid dynamics* dalam penelitian ini sesuai dengan metode Granville (1978), dengan perbedaan kurang dari 7% (Demirel et al., 2017), yakni perbedaan masing – masing adalah 2.6% dan 3.2%. Hal ini menunjukkan bahwa model KCS dengan metode CFD saat ini merupakan teknik yang cocok untuk memprediksi efek kekasaran pada ketahanan gesekan pada kapal KCS baik dalam simulasi *full viscous* maupun *free surface*. Validasi juga dilakukan pada lambung halus dengan menggunakan C_F ITTC 1957 yang masing-masing divalidasi pada sub bab (4.4.1) untuk simulasi *full viscous* dan sub bab (5.4.1) untuk *free surface.* Adapun validasi *full viscous* dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 6. 3 Perbandingan nilai C_F pada simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada metode Granville (1978)).

Simulasi Kekasaran (ks[μm])	**$C_F \times 10^3$**		**D (%)**
	CFD-KCS hull	**Granville**	
	Hasil CFD		
0	1.406	1.356	3.66%
325	2.180	2.125	2.59%

Adapun validasi dalam simulasi *free surface* adalah sebagai berikut:

Tabel 6. 4 Perbandingan nilai C_F pada simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada metode Granville (1978)).

Simulasi Kekasaran (ks[μm])	$C_F \times 10^3$		D (%)
	CFD-KCS hull	Granville	
	Hasil CFD		
0	1.399	1.356	3.16%
325	2.194	2.126	3.23%

Peningkatan koefisien gesek (C_F) juga dapat diprediksi menggunakan Hukum Persamaan Granville (1978). Ditunjukkan pada Tabel 6.5 dan Tabel 6.6 bahwa peningkatan *(*C_F*)* adalah sebagai berikut:

Tabel 6. 5 Perbandingan nilai $\%\Delta C_F$ CFD-KCS *hull* dan Granville (1978) pada simulasi *full viscous*

Simulasi Kekasaran (ks[μm])	$\%\Delta C_F$	
	CFD-KCS hull	Granville
0	-	-
325	55%	56.7%

Tabel 6. 6 Perbandingan nilai $\%\Delta C_F$ CFD-KCS *hull* dan Granville (1978) pada simulasi *free surface*

Simulasi Kekasaran (ks[μm])	$\%\Delta C_F$	
	CFD-KCS hull	Granville
0	-	-
325	56.8%	56.7%

Penelitian simulasi KCS dalam kondisi *full viscous* maupun *free surface* dibawah ini dibandingkan dengan penelitian pelat datar Suastika et al. (2021). Walaupun nilai pelat datar pada penelitian tersebut tidak representatif terhadap KCS karena panjangnya tidak seragam, namun panjang pelat datar tersebut mendekati panjang KCS yakni sebesar 240 m, sedangkan LOA dari KCS sendiri adalah sebesar 232.5 m. Tabel 6.7 dan 6.8 berikut menjelaskan perbandingan nilai C_F dalam kondisi halus (S = 0 μm), kondisi kasar homogen (Q = 325 μm), dan kondisi kasar tak-homogen berbagai variasi di arah memanjang.

Tabel 6. 7 Perbandingan nilai C_F KCS pada simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan nilai C_F Pelat Datar oleh Suastika et al. (2021) dengan *Reynolds Number* 2.23×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Suastika et al. (2021))

Simulasi Kekasaran (ks[μm])	**$C_F \times 10^3$**		**D (%)**
	CFD-KCS hull	**(Suastika et al., 2021)**	
0	1.406	1.410	-0.28%
325	2.180	2.117	2.98%
RPQ	2.062	2.047	0.73%
QPR	2.064	2.036	1.38%
RQP	2.107	2.047	2.93%
PQR	2.116	2.017	4.91%
QRP	2.130	2.038	4.51%
PRQ	2.136	2.020	5.74%

Tabel 6. 8 Perbandingan nilai C_F KCS pada simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan nilai C_F Pelat Datar oleh Suastika et al. (2021) dengan *Reynolds Number* 2.23×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Suastika et al. (2021))

Simulasi Kekasaran (ks[μm])	**$C_F \times 10^3$**		**D (%)**
	CFD-KCS hull	**(Suastika et al., 2021)**	
0	1.399	1.410	-0.78%
325	2.194	2.117	3.64%
RPQ	2.114	2.047	3.27%
QPR	2.117	2.036	3.98%
RQP	2.149	2.047	4.98%
PQR	2.151	2.017	6.64%
QRP	2.166	2.038	6.28%
PRQ	2.168	2.020	7.33%

Perbedaan nilai C_F simulasi KCS yang didasarkan pada C_F pelat datar penelitian Suastika et al. (2021) diatas tidak signifikan. Lambung halus simulasi *full viscous* memiliki nilai perbedaan sebesar -0.28% sedangkan simulasi *free surface* memiliki perbedaan -0.78%. Lambung kasar simulasi *full viscous* memiliki nilai perbedaan sebesar 2.98% sedangkan simulasi *free surface* memiliki nilai perbedaan sebesar 3.63%. Secara praktis perbedaan nilai

C_F lambung halus dibawah 1% dan perbedaan nilai C_F lambung kasar homogen antara 2% - 4%.

Perbedaan mencolok mulai terlihat pada kekasaran tak-homogen, yaitu pada kekasaran PRQ pada lambung KCS dan pada pelat datar dengan perbedaan sebesar 5.74% untuk simulasi *full viscous* dan 7.33% untuk simulasi *free surface*. Perbedaan besar juga terjadi pada urutan kekasaran tak-homogen pada lambung KCS dan pelat datar, jika kedua kekasaran masing-masing diurutkan nilai C_F nya dari kecil ke besar maka untuk KCS menghasilkan urutan RPQ < QPR < RQP < PQR < QRP < PRQ, sedangkan untuk pelat datar menghasilkan urutan PQR < PRQ < QPR < QRP < RPQ < RQP. Perbedaan – perbedaan ini terjadi karena pada KCS kekasaran tak-homogen luas segmen satu dengan lainnya berbeda, pada segmen *parallel middle body* WSA nya adalah 3819.414 m^2, merupakan segmen dengan luas terbesar dibandingkan *stern* dan *bow* yang masing – masing luasnya adalah 3252.252 m^2 dan 2797.859 m^2. Sehingga menjadi logis jika nilai C_F terbesar adalah PRQ, dengan R (568.75 µm) terletak pada *parallel middle body* yang memiliki kekasaran terbesar dibandingkan segmen lainnya. Berbeda halnya dengan penelitian yang dilakukan oleh Suastika et al. (2021), dimana nilai C_F terbesar adalah RQP karena penelitian tersebut mengaplikasikan kekasaran tak-homogen pada pelat datar dengan luas tiap segmen sama.

Penelitian simulasi KCS dalam kondisi *full viscous* maupun *free surface* juga dibandingkan dengan penelitian KCS yang dikerjakan oleh Demirel et al. (2017). Perbandingan pada tabel adalah perbandingan simulasi yang dilakukan penulis dan penelitian Demirel et al. (2017), dimana perbandingan utama adalah kondisi lambung halus karena penelitian ini tidak mensimulasikan kekasaran dengan ketinggian 325 µm seperti yang dilakukan oleh penulis, namun dibawah kekasaran halus akan ditampilkan kekasaran dari penelitian Demirel et al. (2017) sebagai perbandingan penunjang terhadap kekasaran terhadap 325 µm.

Tabel 6. 9 Perbandingan nilai C_F KCS lambung halus hasil simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017))

Simulasi Lambung halus (ks[0 µm])	**$C_F \times 10^3$**	**D (%)**
CFD-KCS hull	1.406	-
KCS (Demirel et al., 2017)	1.421	-1.06%
Plat Datar (Demirel et al., 2017)	1.351	4.07%

Tabel 6. 10 Perbandingan nilai C_F KCS lambung halus hasil simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017))

Simulasi Kekasaran (ks[0 µm])	**$C_F \times 10^3$**	**D (%)**
CFD-KCS hull	1.399	-
KCS (Demirel et al., 2017)	1.421	-1.55%
Plat Datar (Demirel et al., 2017)	1.351	3.55%

Tabel 6. 11 Perbandingan nilai Form Factor lambung halus hasil simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017))

Simulasi Lambung halus (ks[0 µm])	**Form Factor**	**D (%)**
CFD-KCS hull	1.040	-
KCS (Demirel et al., 2017)	1.051	-1%

Tabel 6. 12 Perbandingan nilai C_F KCS lambung kasar homogen hasil simulasi *full viscous* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017))

Simulasi Kekasaran (ks[µm])	**$C_F \times 10^3$**	**D (%)**
KCS 325 µm	2.180	-
KCS 300 µm	2.120	2.83%

Tabel 6. 13 Perbandingan nilai C_F KCS lambung kasar homogen hasil simulasi *free surface* dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 dan oleh Demirel et al. (2017) dengan *Reynolds Number* 2.89×10^9 (Perbedaan, D (%) didasarkan pada penelitian Demirel et al. (2017))

Simulasi Kekasaran (ks[µm])	**$C_F \times 10^3$**	**D (%)**
KCS 325 µm	2.194	-
KCS 300 µm	2.120	3.49%

Nilai perbandingan C_F CFD-KCS hasil simulasi dengan C_F KCS penelitian Demirel et al. (2017) kondisi lambung halus masing – masing dibawah 5%. Pada C_F CFD-KCS hasil simulasi menghasilkan nilai sebesar 1.406 untuk kondisi *full viscous* dan 1.399 untuk kondisi *free surface*, sedangkan pada C_F KCS penelitian Demirel et al. (2017) meghasilkan nilai sebesar 1.421. Secara praktis nilai C_F CFD-KCS dibandingkan dengan KCS penelitian tersebut

menghasilkan perbedaan berkisar 1% - 1.5%. Perbedaan tipis juga terlihat jika dibandingkan dengan kekasaran C_F KCS 300 µm penelitian Demirel et al. (2017), yaitu sebesar 3% - 3.5%. Studi ini juga menghitung nilai *form factor* dengan cara membagi C_F KCS dan C_F plat datar representatif KCS oleh Demirel et al. (2017), hasil perbandingan nilai *form factor* CFD-KCS juga dibandingkan dengan KCS penelitian Demirel et al. (2017) pada tabel 6.11. Persentase selisih *form factor* pada tabel tersebut adalah sebesar -1% didasarkan pada penelitian tersebut.

Peningkatan persentase hambatan total KCS simulasi lambung kasar terhadap lambung halus terjadi secara signifikan pada simulasi *full viscous* maupun *free surface*. Dalam kedua simulasi, hambatan homogen berupa kode QQQ selalu menempati peningkatan persentase hambatan total yang paling besar daripada hambatan total tak-homogen lainnya. Tabel 6.13 dan tabel 6.14 menunjukkan peningkatan persentase hambatan total KCS pada simulasi *full viscous* dan *free surface*:

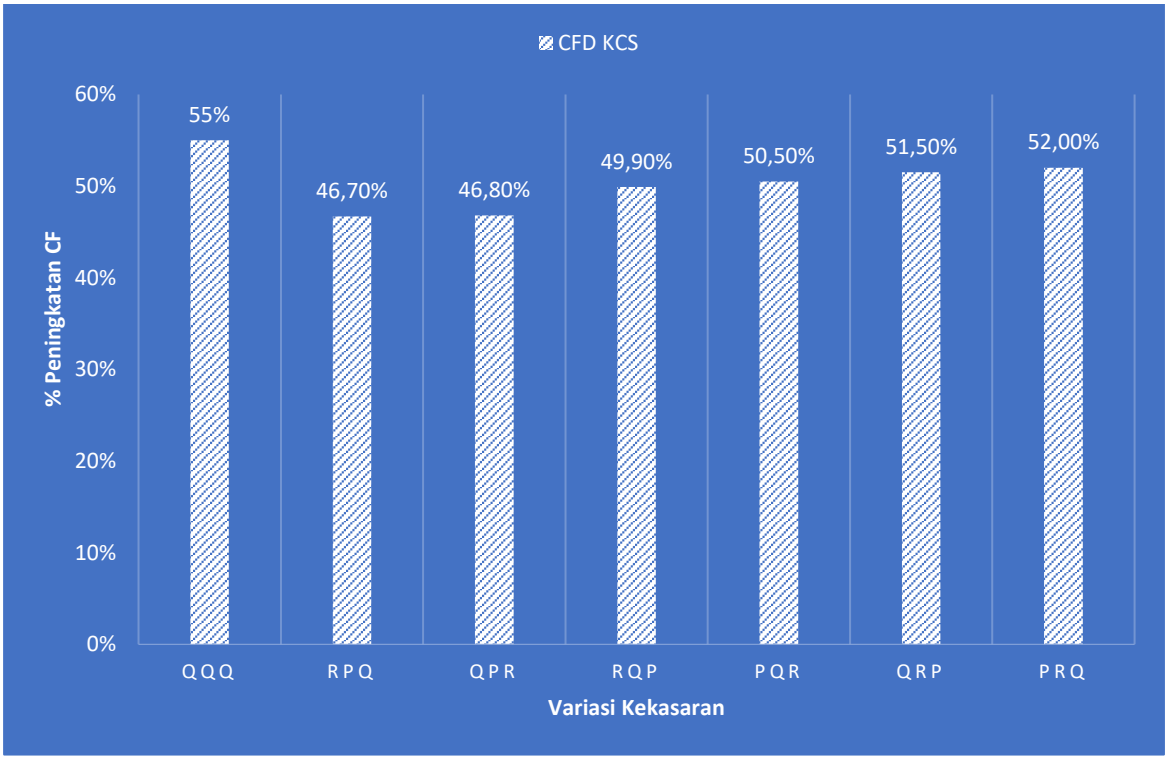
Tabel 6. 14 Perbandingan %ΔC_F KCS pada lambung kasar homogen dan tak-homogen dalam simulasi *full viscous*

Deskripsi Simulasi	%ΔC_F CFD-KCS *Full Viscous*
Permukaan Lambung Halus	-
Permukaan Lambung QQQ	55.0%
Permukaan Lambung RPQ	46.7%
Permukaan Lambung QPR	46.8%
Permukaan Lambung RQP	49.9%
Permukaan Lambung PQR	50.5%
Permukaan Lambung QRP	51.5%
Permukaan Lambung PRQ	52.0%

Tabel 6. 15 Perbandingan %ΔC_F KCS pada lambung kasar homogen dan tak-homogen dalam simulasi *free surface*

Deskripsi Simulasi	%ΔC_F CFD-KCS *Free Surface*
Permukaan Lambung Halus	-
Permukaan Lambung QQQ	56.8%
Permukaan Lambung RPQ	51.1%
Permukaan Lambung QPR	51.3%
Permukaan Lambung RQP	53.6%
Permukaan Lambung PQR	53.8%
Permukaan Lambung QRP	54.8%
Permukaan Lambung PRQ	55.0%

Jika persentase *full viscous* maupun *free surface* diatas diperhatikan, memang pada kekasaran homogen QQQ (Q = 325 µm), pasti memiliki persentase peningkatan C_F tertinggi namun jika diperhatikan kedua simulasi diatas secara seksama, terutama dibagian kekasaran inhomogen. Maka dapat diketahui bahwa urutan kekasaran tak-homogen akan sangat berpengaruh terhadap salah satunya adalah hambatan gesek pada kapal yang dalam penelitian ini adalah KCS sebagai objek peneltitiannya. Sebagai contoh dalam simulasi *full viscous* dan *free surface* pertambahan persentase C_F dengan kekasaran RPQ berturut – turut memiliki pertambahan kekasaran sebesar 46.7% dan 51.1%, sedangkan kekasaran PRQ dalam simulasi *full viscous* dan *free surface* berturut – turut memiliki pertambahan kekasaran sebesar 52% dan 55%. Perbandingan persentase disempurnakan secara grafis pada Gambar 6.1 dan Gambar 6.2. Berikut dibawah ini adalah pertambahan secara grafis $\%\Delta C_F$ KCS pada lambung kasar homogen dan tak-homogen dalam simulasi *full viscous*:

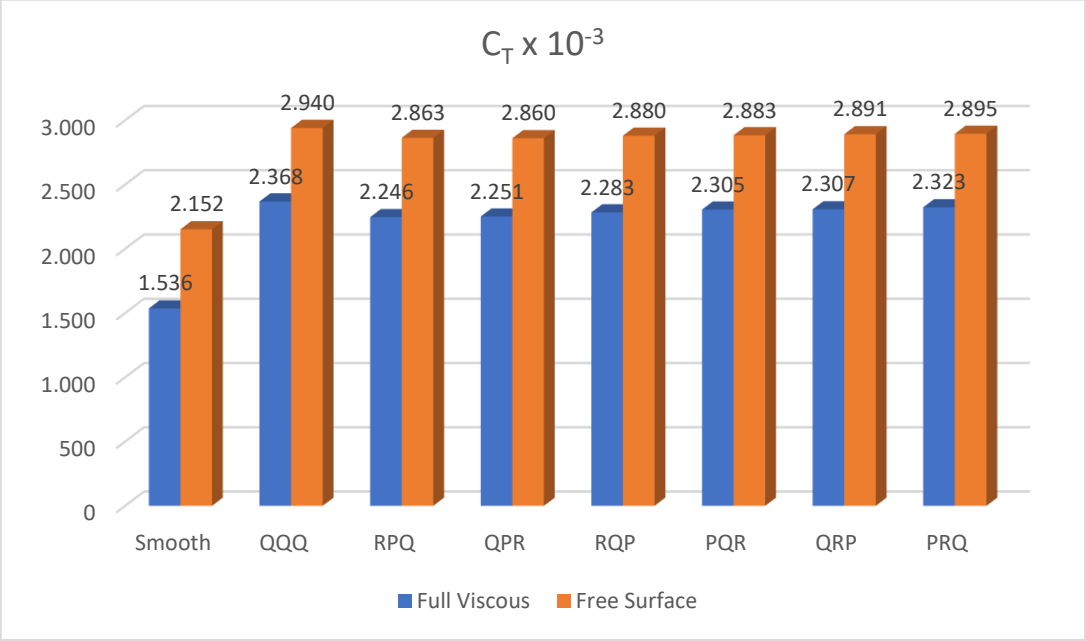


Gambar 6. 1 Pertambahan persentase nilai $\%C_F$ dalam simulasi *full viscous*

Dibawah ini adalah pertambahan secara grafis $\%\Delta C_F$ pada lambung kasar homogen dan tak-homogen dalam simulasi *free surface:*

Gambar 6. 2 Pertambahan persentase nilai %C_F dalam simulasi *free surface*

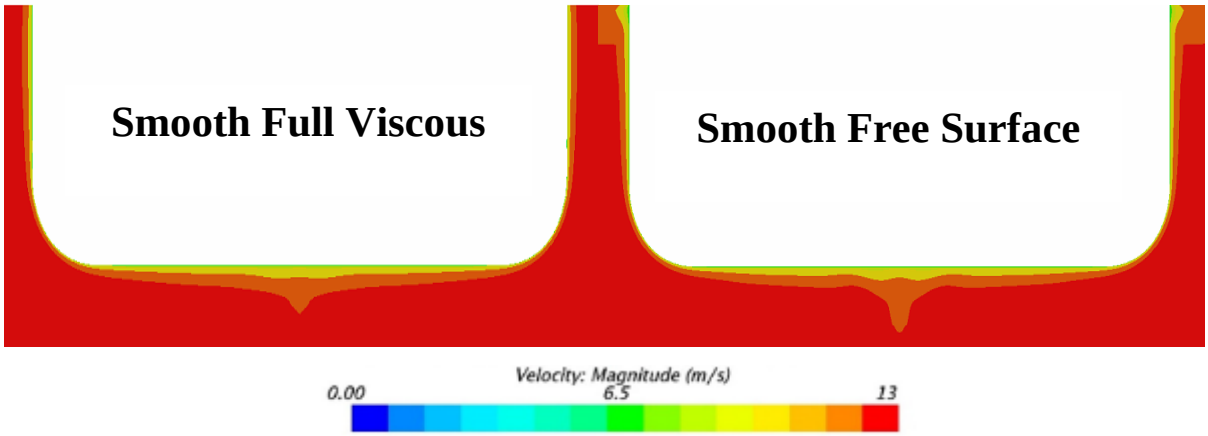
Dibawah ini adalah perbandingan secara grafis antara KCS simulasi *full viscous dan free surface*:



Gambar 6. 3 Perbandingan nilai *Coefficient Total* antara *full viscous* dan *free surface*

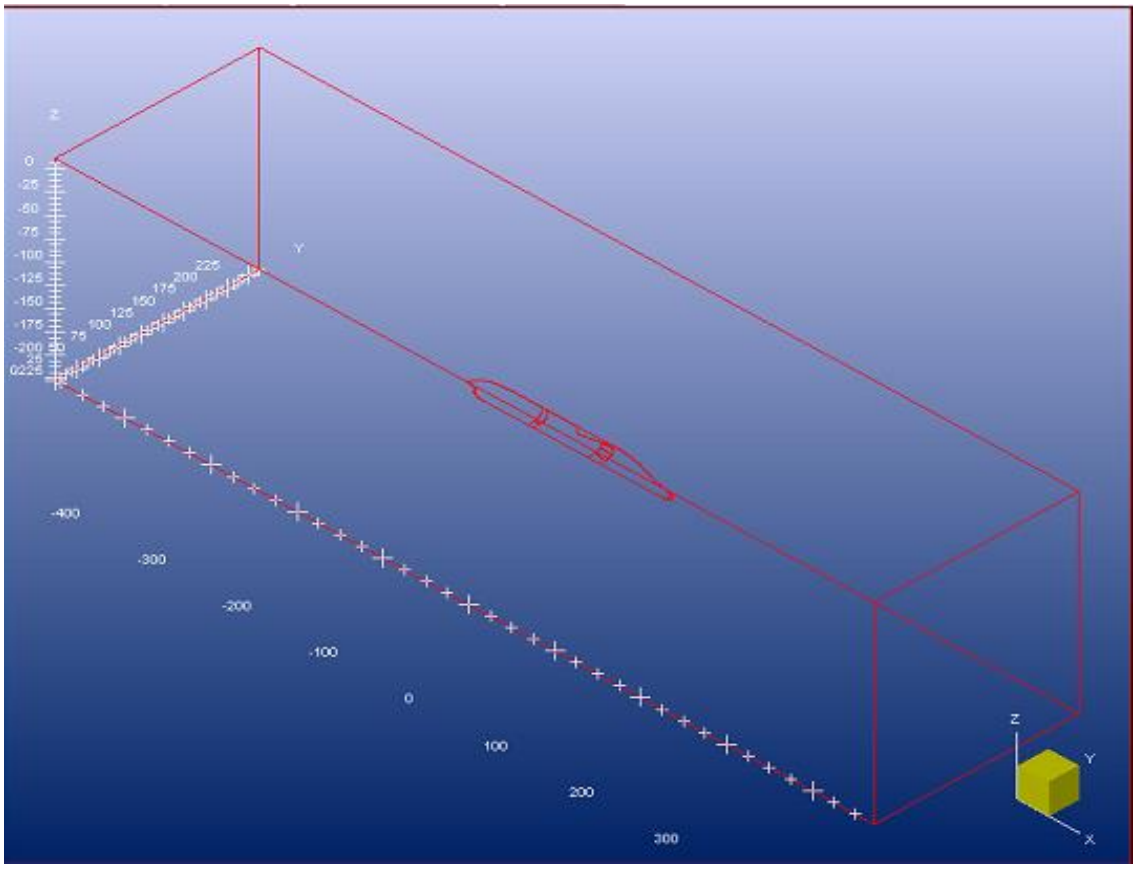
Jika diperhatikan diatas dapat dilihat bahwa perbandingan nilai C_T dari KCS simulasi *full viscous* dan *free surface* terdapat perbedaan yang sangat mencolok. Hal ini disebabkan oleh pada *free surface* yang memperhatikan pengaruh gelombang, sehingga terjadi peningkatan Hambatan *Pressure* yang berakibat pada peningkatan C_T. Peningkatan C_T berakibat pada penurunan *Magnitude of Relative Velocity*. Peningkatan resistensi gesekkan pada dasarnya akan menurunkan profil kecepatan (Demirel et al., 2014). Berikut merupakan manifestasi dari

Magnitude of Relatice Velocity:

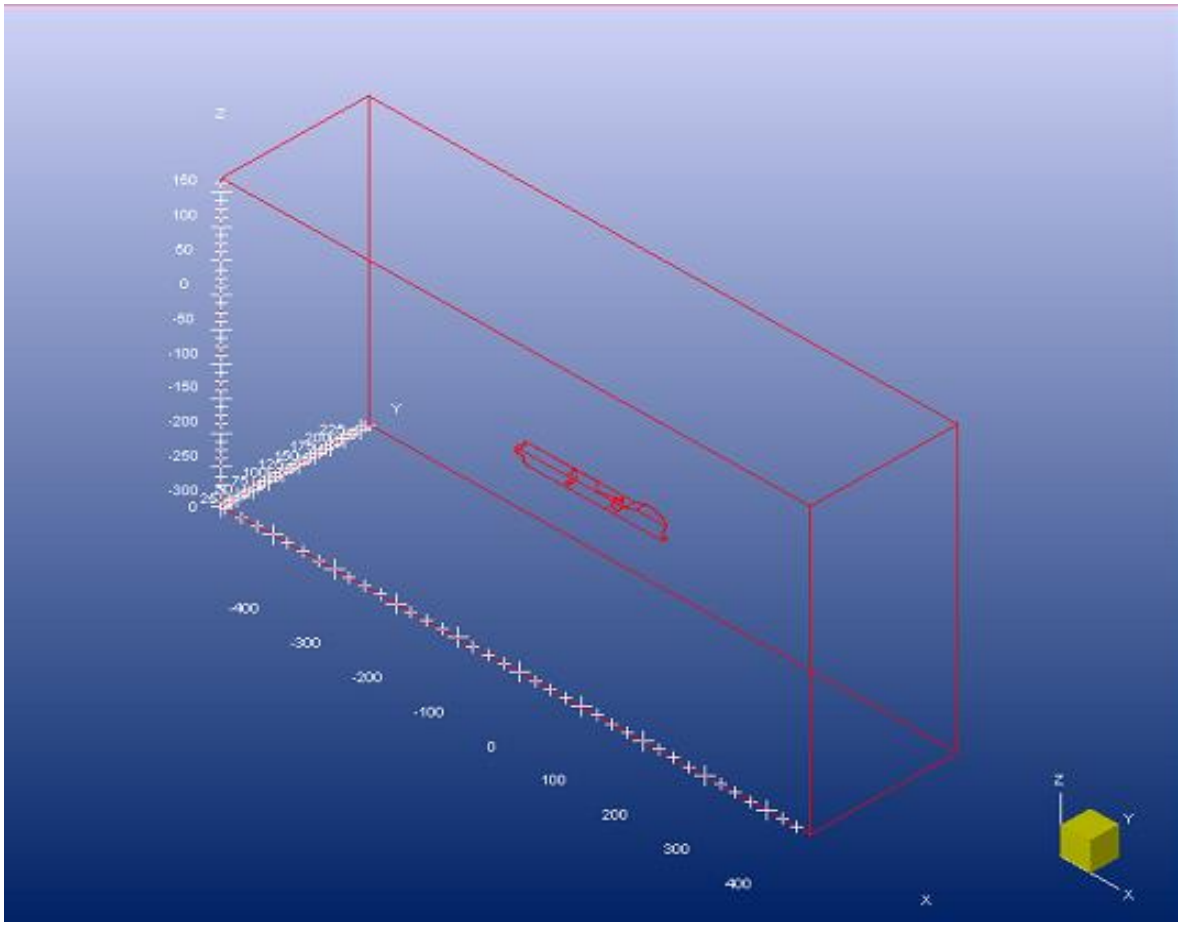


Gambar 6. 4 Perbandingan visualisasi *relative velocity* pada midship kapal KCS simulasi *full viscous* dan *free surface*

Sebelum masuk lebih dalam ke pembahasan terhadap visualisasi yang didapatkan dari hasil simulasi, dapat dilihat koordinat absolut pada Gambar 6.5 dan Gambar 6.6 berikut ini.



Gambar 6. 5 Posisi koordinat absolut pada simulasi *full viscous*



Gambar 6. 6 Posisi koordinat absolut pada simulasi *Free Surface*

Dari kedua gambar diatas, dapat dilihat bahwa koordinat absolut berada pada pengamat diluar kapal yang dilakukan proses simulasi, sehingga untuk besaran – besaran yang didapatkan dari hasil simulasi, nilai besaran tersebut mengacu pada koordinat absolut yang berada pada pengamat diluar kapal ini. Untuk koordinat y pada Simulasi *free surface* bernilai negatif dan positif, dikarenakan kapal akan disimulasikan pada simulasi multi-fluid yaitu air dan udara, berbeda dengan simulasi *full viscous* yang nilai y nya hanya bernilai negatif karena simulasi mono-fluid.

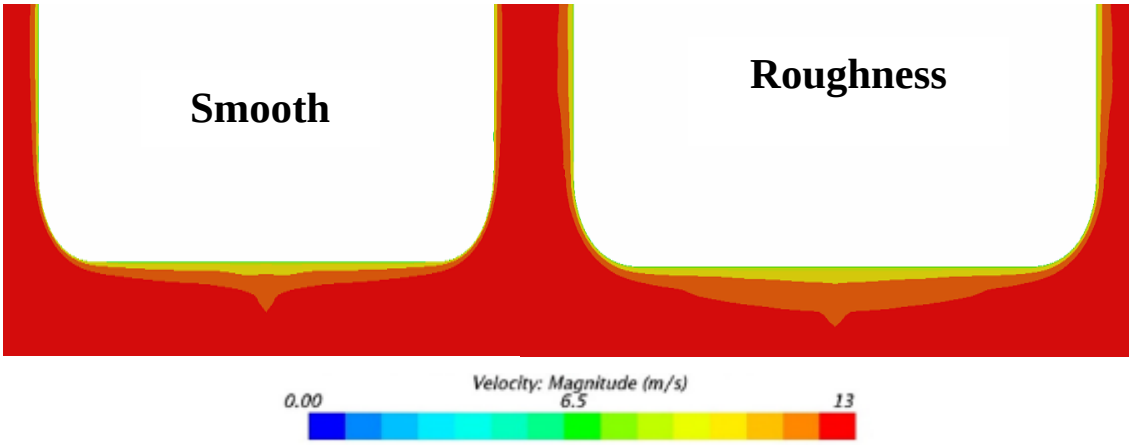
6.4 Perbandingan Hambatan Kapal Simulasi Full Viscous untuk Setiap Variasi Kekasaran

Dapat dilihat pada tabel 6.1 bahwa dari ke 6 variasi kekasaran, memiliki hasil nilai hambatan yang berbeda – beda, hal ini tidak lepas dari peran ketinggian kekasaran pada partisi lambung kapal, dan yang terpenting bentuk bagian *parallel middle body* memberikan peran besar terhadap nilai hambatan kapal.

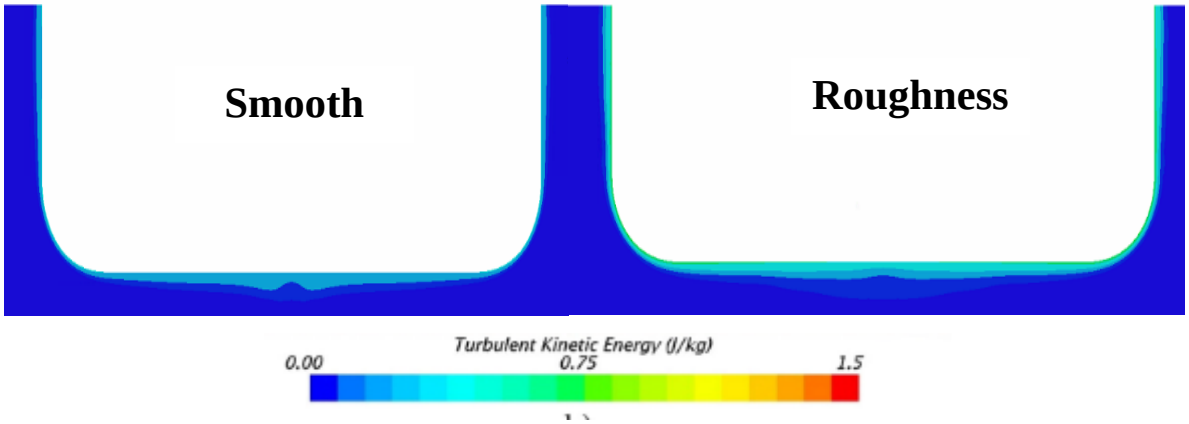
Sebagai contoh pada kekasaran PRQ, di mana P sebagai *Bow*, R sebagai *Parallel Middle-Body*, serta Q sebagai stern. Ketinggian hambatan gesek adalah 1.59×10^6 N sedangkan

pada kekasaran RPQ, di mana P bertindak sebagai *Parallel Middle Body* ketinggian hambatan gesek hanya sebesar 1.54 × 10^6 N atau menurun sebesar 3.4 % dari PRQ, dan berkurang pula sebesar 3.37% jika PRQ dipasangkan dengan QPR yakni dengan hambatan gesek sebesar 1.54 × 10^6 N.

Sebelum menganalisa lebih jauh mengenai perbedaan kekasaran pada simulasi *full viscous*, bagian yang perlu diketahui adalah kontur *Magnitude of Relative Velocity* dan *Turbulent Kinetic Energy* dalam simulasi *full viscous* dan *free surface.* Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh kekasaran terhadap kecepatan relatif dan tegangan tubulen dan tegangan geser terutama dibagian Midship Kapal. Pada bagian KCS akan ditampilkan pula penampang kontur kecepatan aksial pada bagian tertentu yakni x/L = 0.25 untuk bagian *bow*, x/L = 0.5 untuk bagian *parallel middle body*, dan x/L = 0.75 untuk bagian *stern.* Tujuannya untuk menggambarkan lapisan batas lambung KCS dan dapat dengan mudah membandingkan kondisi dinding halus dan dinding kasar sesuai partisinya.

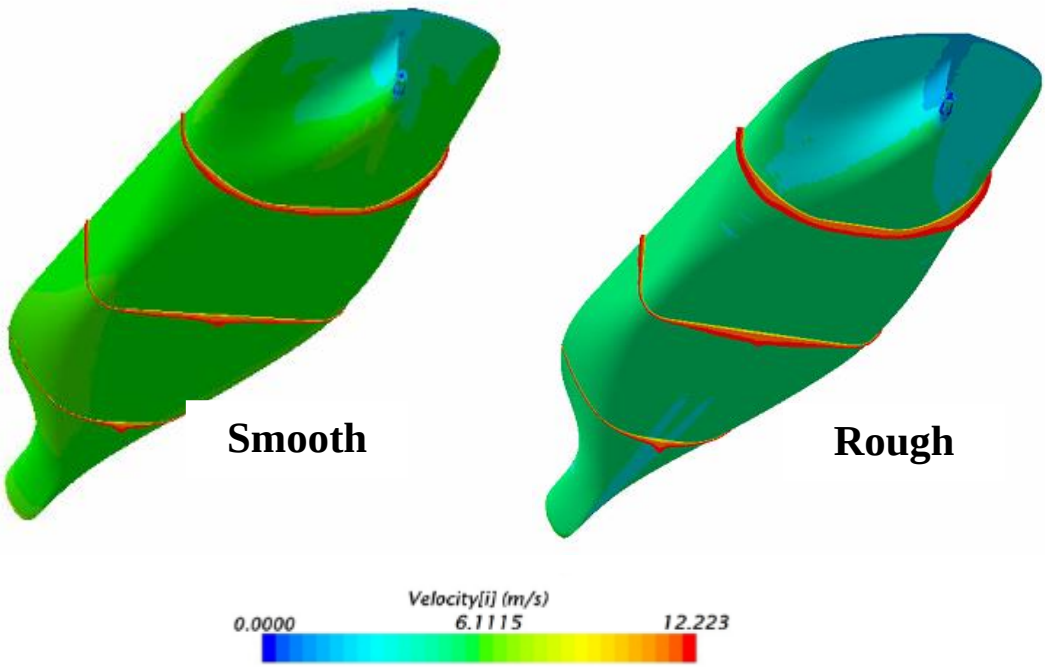


Gambar 6. 7 Visualisasi *Magnitude of Relative Velocity* pada *midhsip* kapal KCS



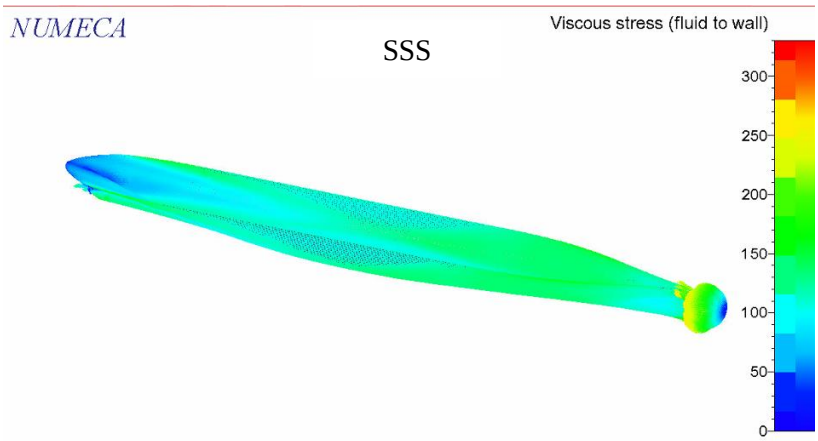
Gambar 6. 8 Visualisasi *Turbulent Kinetic Energy* pada *midship* kapal KCS

Seperti yang dilihat pada gambar 6.8, energi kinetik turbulen sedikit meningkat dengan kekasaran permukaan sedangkan pada gambar 6.7 besaran kecepatan dan kecepatan aksial menurun dengan adanya kekasaran pada permukaan lambung dan ditandai dengan adanya penebalan *boundary layer*. Hal ini menunjukkan bahwa kekasaran permukaan menyebabkan peningkatan turbulensi, yang berarti bahwa tegangan turbulen dan tegangan geser dinding meningkat dan pada akhirnya kecepatan lapisan batas tubulen menurun (Schultz & Swain, 2000). Juga harus dipertimbangkan bahwa penurunan profil kecepatan memanifestasikan dirinya sebagai peningkatan resistensi gesekkan (Demirel et al., 2014).

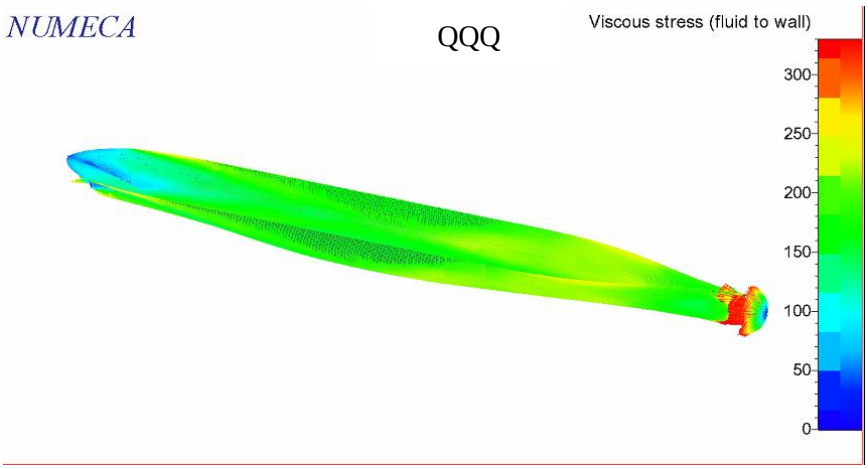


Gambar 6. 9 Persilangan Kecepatan Axial yang dimanifestasikan dengan warna

Seperti yang terlihat secara visual dari Gambar 6.9, adanya kekasaran seperti *fouling* pada lambung KCS misalkan. Menyebabkan peningkatan ketebalan lapisan batas (bagian yang didominasi warna merah) , baik pada segmen pada *stern, parallel middle body, maupun bow* yang didefinisikan sebagai jarak antara dinding lambung kapal sampai dengan titik tertentu. Semakin kasar permukaan lambung, nilai dari *velocity* semakin lambat dan lapisan batas akan semakin tebal dikarenakan lapisan batas semakin bervariasi kecepatannya. Sebagai contoh, lambung halus karena tidak ada kekasaran maka ketebalan lapisan batas menjadi tipis dan kecepatan cenderung stabil. Berbeda halnya dengan lambung kasar karena ada kekasaran dengan ketinggian tertentu, maka kecepatan akan cenderung melambat dan variasi dari *velocity* akan bertambah dengan berbagai lapisan.



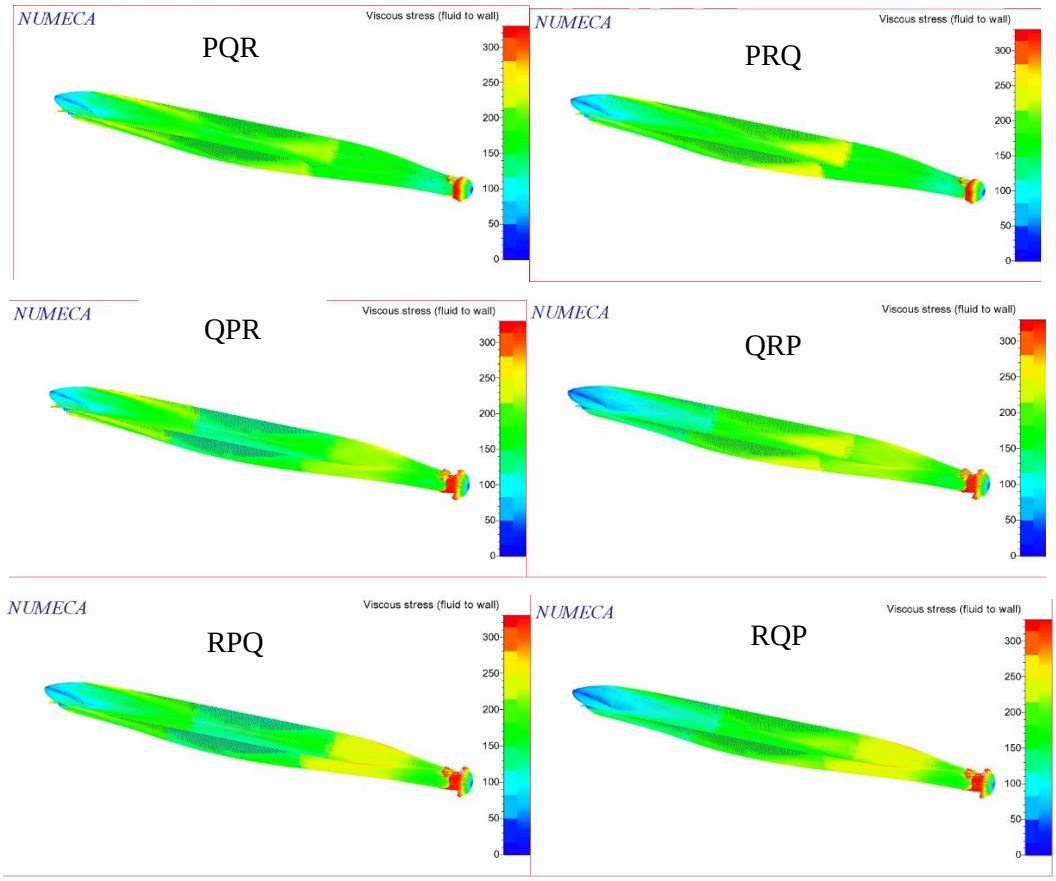
Gambar 6. 10 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung halus



Gambar 6. 11 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar homogen

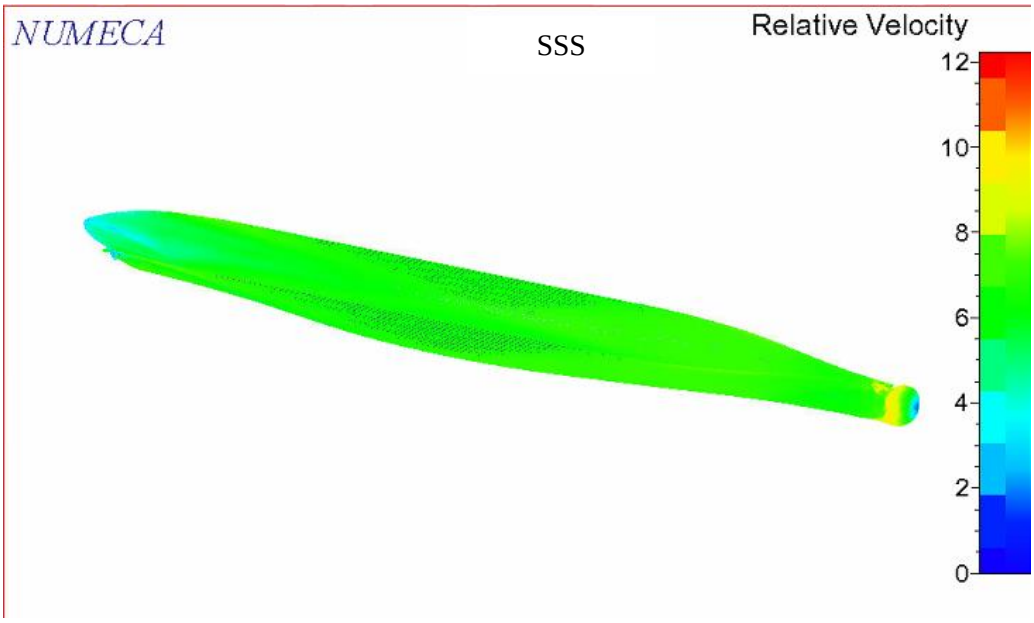
Gambar diatas (6.10) dan (6.11) adalah visualisasi dari *viscous stress* pada lambung KCS halus (SSS) dan lambung KCS kasar (QQQ) dengan ketinggian kekasaran 325 µm. Sepanjang lambung halus diwakili dengan warna biru muda dengan sedikit warna hijau muda, dan pada sepanjang lambung kasar diwakili dengan warna hijau muda dengan sedikit warna kuning. Warna biru muda pada lambung halus (SSS) menunjukkan nilai *viscous stress* pada sepanjang lambung kapal rata – rata adalah sebesar 100 Pascal dan didekat daerah haluan terdapat sedikit warna hijau muda yang berarti nilai *viscous stress* adalah sebesar 120 – 140 pascal, sedangkan peningkatan *viscous stress* terjadi secara drastis pada daerah *bulbous bow* yakni ditandai dengan warna kuning yang berarti memiliki nilai sebesar 200 – 280 pascal. Warna hijau muda pada lambung kasar (QQQ) menunjukkan nilai *viscous stress* pada sepanjang lambung kapal rata – rata adalah sebesar 160 – 210 pascal, sedangkan pada daerah dekat Haluan terdapat sedikit warna kuning yang berarti memiliki nilai sebesar 220 – 250 pascal, sedangkan

pada daerah *bulbous bow* memiliki nilai sebesar 280 – 330 pascal. Jika diperhatikan dari jenis *viscous stress* pada 2 kapal tersebut terdapat perbedaan tekanan secara drastis, hal ini menunjukkan kekasaran pada kapal sebesar 325 µm meningkatkan *viscous stress* secara drastis daripada lambung halus.

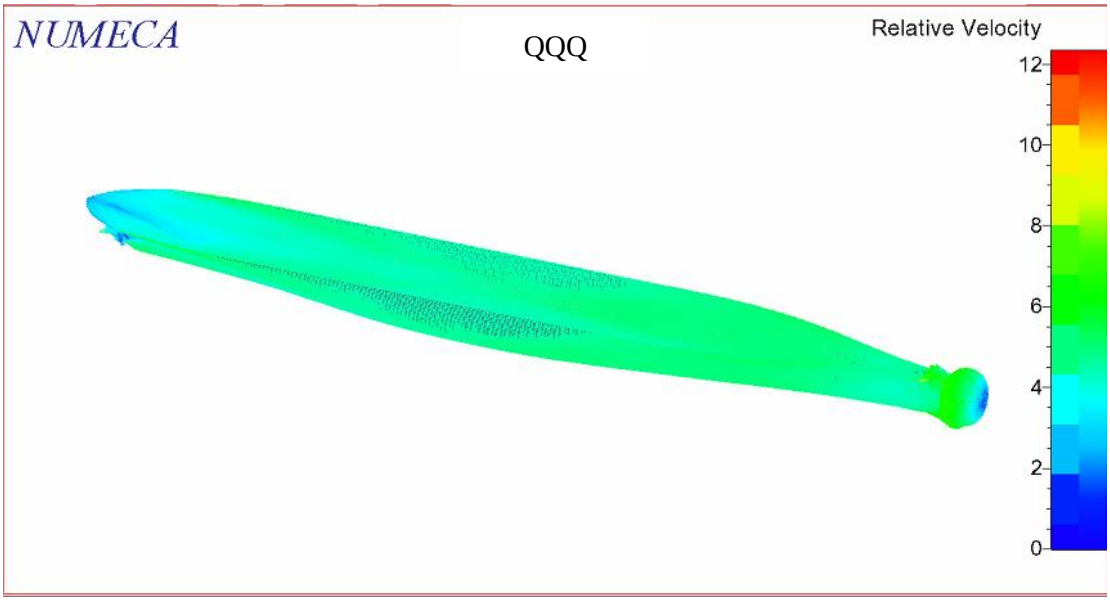


Gambar 6. 12 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar tak-homogen

Pada gambar diatas (6.13) dapat diketahui bahwa ketinggian kekasaran di setiap segmen mempengaruhi nilai distribusi *viscous stress* nya. Terutama dibagian *parallel middle body* terlihat sangat menonjol, kemudian yang kedua adalah bagian dibagian *bow*, dan yang terakhir adalah pada bagian *stern.* Jika diperhatikan secara seksama, simulasi KCS yang memiliki kekasaran terbesar (R = 568.75 µm) pada PMB ataupun Bow akan terlihat sangat jelas yakni berwarna kuning atau memiliki nilai *viscous stress* 250 – 280 Pascal sedangkan pada simulasi yang memiliki kekasaran terbesar (R = 568.75 µm) pada *stern* hanya mengindikasikan berwarna hijau muda atau memiliki *viscous stress* yang bernilai 200 – 220 Pascal, padahal memiliki kekasaran yang sama.



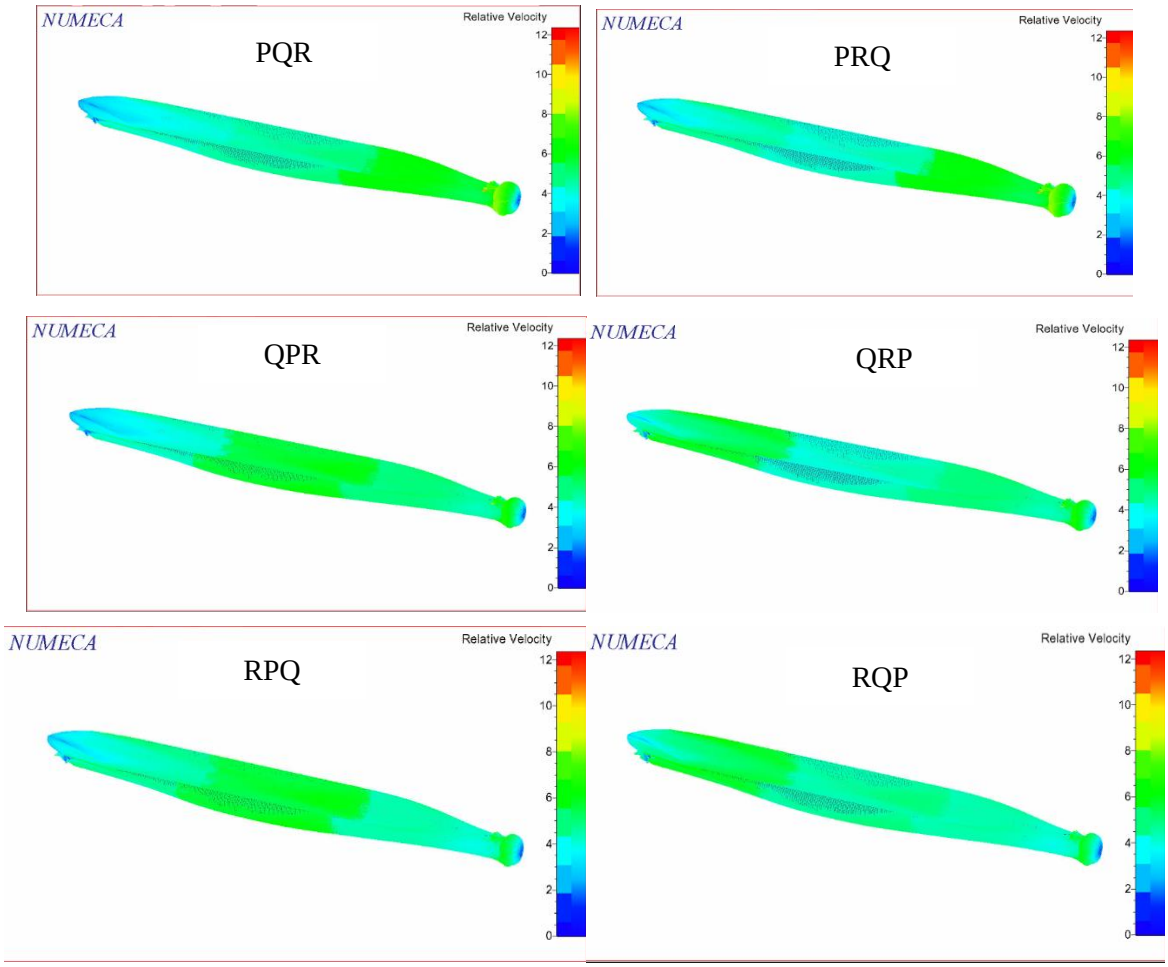
Gambar 6. 13 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung halus



Gambar 6. 14 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar homogen

Kemudian untuk *relative velocity* pada gambar 6.14 dan gambar 6.15 juga dapat dilihat disetiap partisi lambung *KCS*, walaupun semua simulasi ditetapkan kecepatannya 24 knots atau pada visualisasi sebesar 12.3467 m/s namun ketinggian kekasaran ternyata juga berpengaruh terhadap *relative velocity* secara signifikan antara lambung halus (SSS) dan lambung kasar (QQQ) dengan Q sebesar 325 µm. Sebagai contoh, pada lambung halus (SSS) nilai dari *relative velocity* disepanjang lambung kapal rata – rata adalah sebesar 6 – 7.5 m/s dan nilainya meningkat pada *bulbous bow* yakni sebesar 10 m/s sedangkan pada lambung kasar (QQQ) nilai

relative velocity disepanjang lambung kapal rata – rata hanya sebesar 4 – 5 m/s. Hal ini tentu menjadi perhatian bahwa kekasaran yang menyebabkan resistensi akan sangat mempengaruhi dari kecepatan itu sendiri (Demirel et al., 2017).



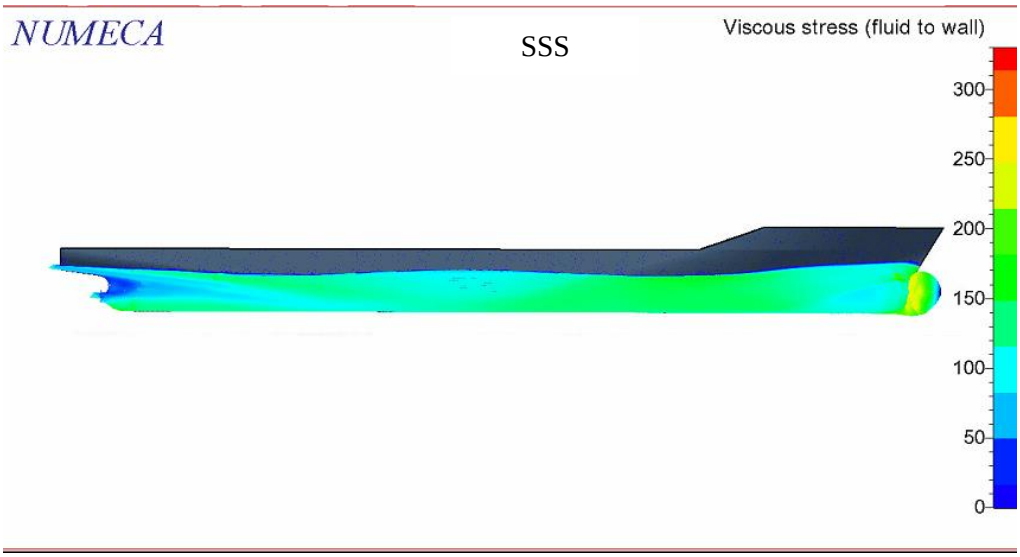
Gambar 6. 15 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar tak-homogen

Pada gambar diatas dapat diketahui bahwa ketinggian kekasaran disetiap segmen sangat mempengaruhi distribusi *relative velocity* nya. Terutama partisi lambung kapal dengan ketinggian kekasaran rendah (P = 81.25 µm) terlihat menonjol dengan nilai *relative velocity* yang cenderung tinggi dengan ditandai indikator warna hijau muda yaitu sebesar kurang lebih 6 – 7.5 m/s, berbeda dengan ketinggian kekasaran sedang (Q) dan kekasaran tinggi (R) yang sama – sama ditandai warna biru muda yaitu sebesar kurang lebih 4 m/s dan pada bagian yang memiliki kekasaran sebesar (Q=325 µm)

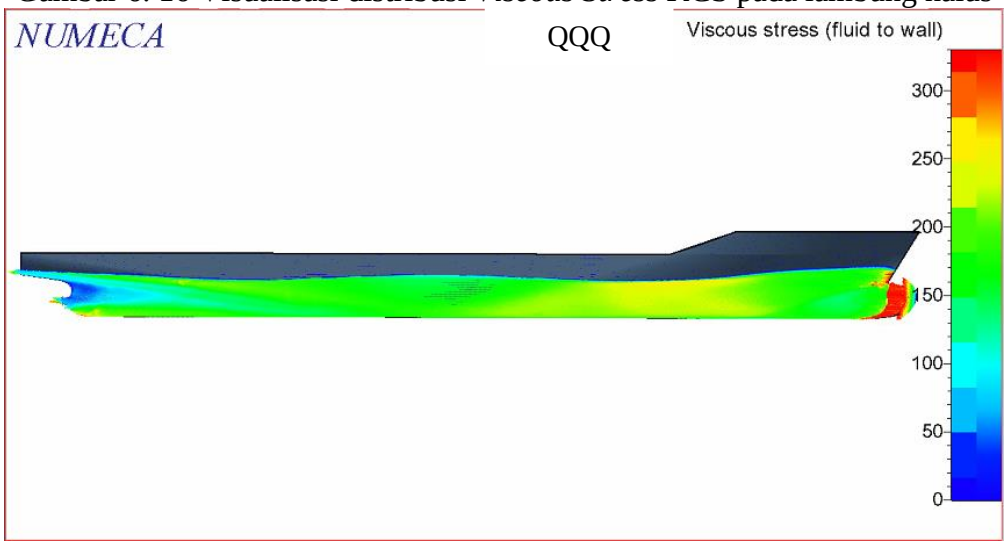
6.5 Perbandingan Hambatan Kapal Simulasi Free Surface untuk Setiap Variasi Kekasaran

Sama dengan simulasi *full viscous*, bahwa dari ke beberapa variasi kekasaran, memiliki

hasil nilai hambatan yang berbeda – beda, hal ini tidak lepas dari peran ketinggian kekasaran pada partisi lambung kapal, dan yang terpenting bentuk bagian *Parallel Middle Body* memberikan peran besar terhadap nilai hambatan kapal. Untuk simulasi *free surface* ini perbedaan nilai kekasaran pada PMB antara kekasaran rendah (P) dan kekasaran tinggi (Q) jauh lebih besar daripada perbedaan kekasaran PMB pada *full viscous.* Sama dengan simulasi *full viscous,* untuk nilai *viscous stress* pada *free surface* ini juga dipengaruhi oleh ketinggian kekasaran ditiap partisi KCS. Berikut merupakan visualisasi dari *viscous stress* baik pada lambung halus maupun lambung dengan kekasaran tak homogen.



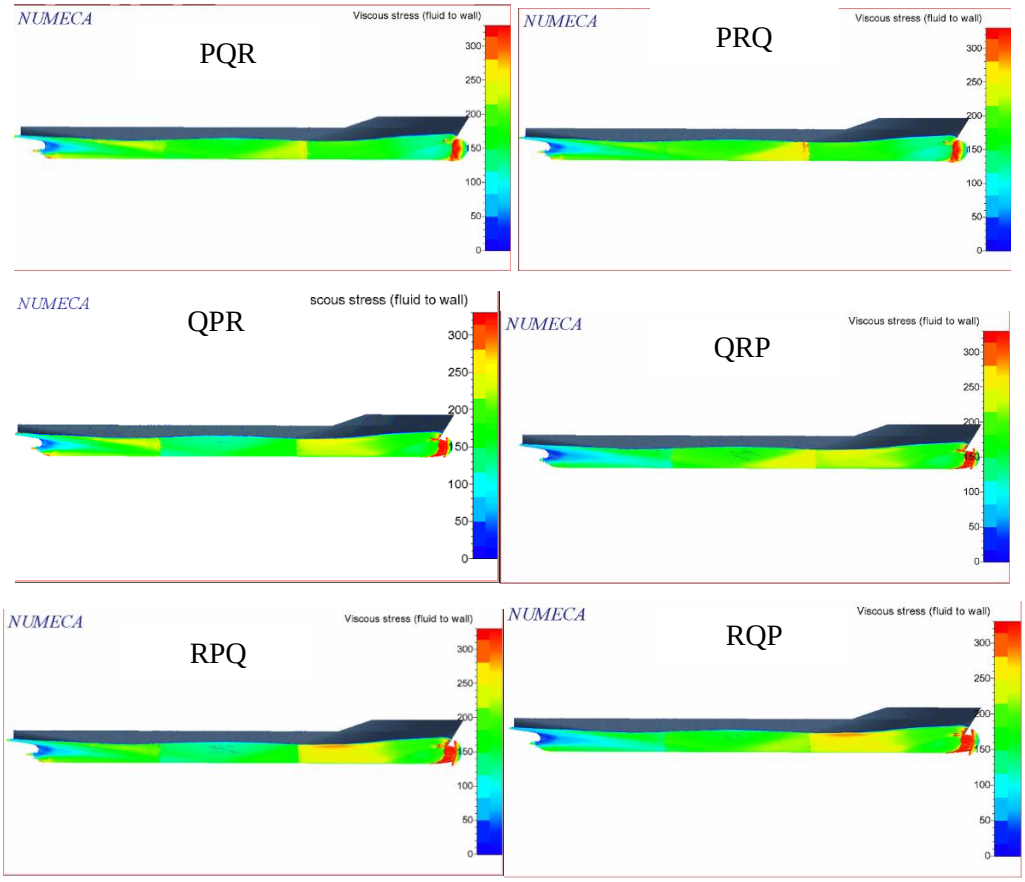
Gambar 6. 16 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung halus



Gambar 6. 17 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar homogen

Sama halnya dengan kekasaran *full viscous,* pada simulasi kekasaran *free surface,* kekasaran dengan kode QQQ (Q=325 μm) memiliki nilai *viscous stress* yang jauh lebih besar yakni rata – rata sebesar 200 Pascal, dan dibagian dekat haluan yang berwarna kuning memiliki

nilai *viscous stress* sebesar 220 – 250 Pascal sedangkan dibagian *stern* tidak terpengaruh kekasarannya.

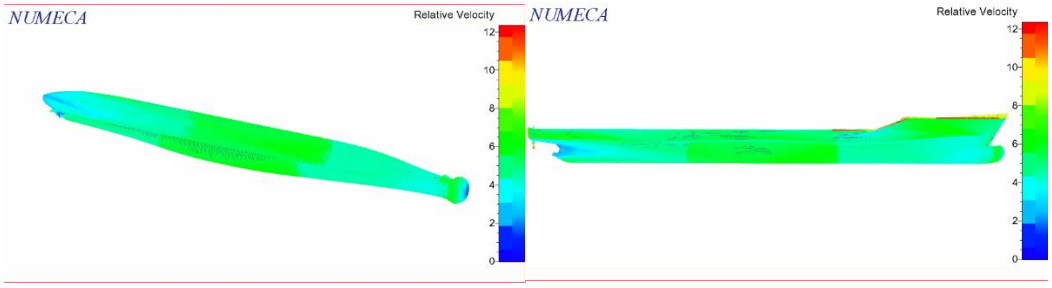


Gambar 6. 18 Visualisasi distribusi *Viscous Stress* KCS pada lambung kasar tak-homogen

Pada gambar diatas dapat diketahui bahwa ketinggian kekasaran di setiap segmen mempengaruhi nilai distribusi *viscous stress* nya. Terutama dibagian *parallel middle body* dan *Bow* terlihat lebih menonjol jika terdapat kekasaran dengan kode R (R=568.75 µm), yakni dengan indikasi berwarna kuning yang rata – rata bernilai sebesar 250 – 270 pascal, sedangkan bagian yang memiliki kekasaran Q (Q=325 µm) memiliki kekasaran berwarna hijau kekuning – kuning an yang rata – rata sebesar 220 – 240 pascal. Pada bagian kekasaran terkecil yang memiliki kekasaran sebesar P (81.25 µm) memiliki indikasi berwarna hijau kebiruan yang memiliki nilai *viscous stress* sebesar 120 – 150 pascal. Hal ini menunjukkan kekasaran memberikan efek signifikan pada *viscous stress* namun tidak begitu berpengaruh pada kekasaran kecil, yaitu dengan kode (P).

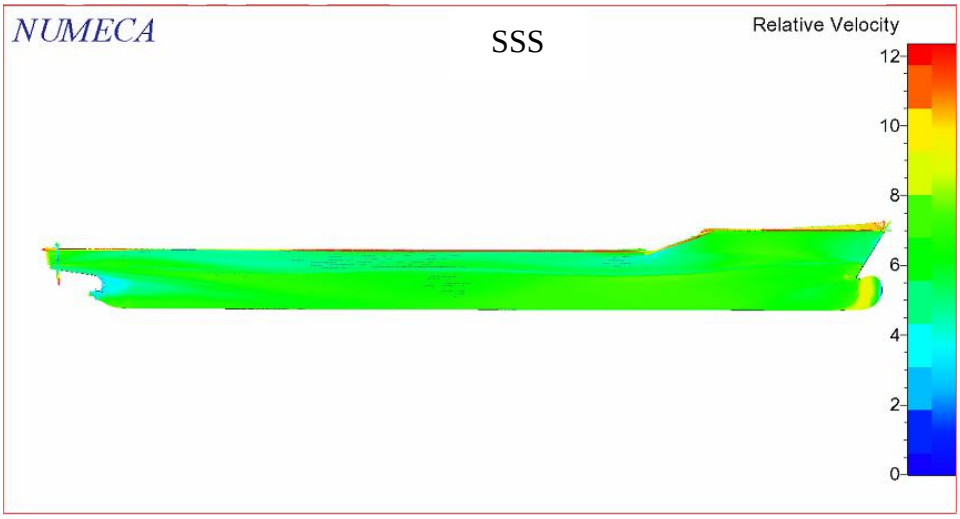
Jika ketinggian kekasaran dibandingkan dengan seksama antara simulasi *free surface* dan *full viscous*. Dengan asumsi variasi kekasaran adalah sama, maka dapat terlihat seperti gambar dibawah ini bahwa kekasaran dalam simulasi *full viscous* lebih terlokalisasi antar

segmen kekasaran dengan segmen lainnya, namun untuk kondisi nyata seperti *free surface* kekasaran pada satu segmen dapat sedikit merembet ke segmen lainnya, dan kekasaran yang merembet hampir selalu berasal dari *parallel middle body*. Berikut merupakan perbandingan visualisasi kekasaran RPQ dalam simulasi *full viscous* dan *free surface.*

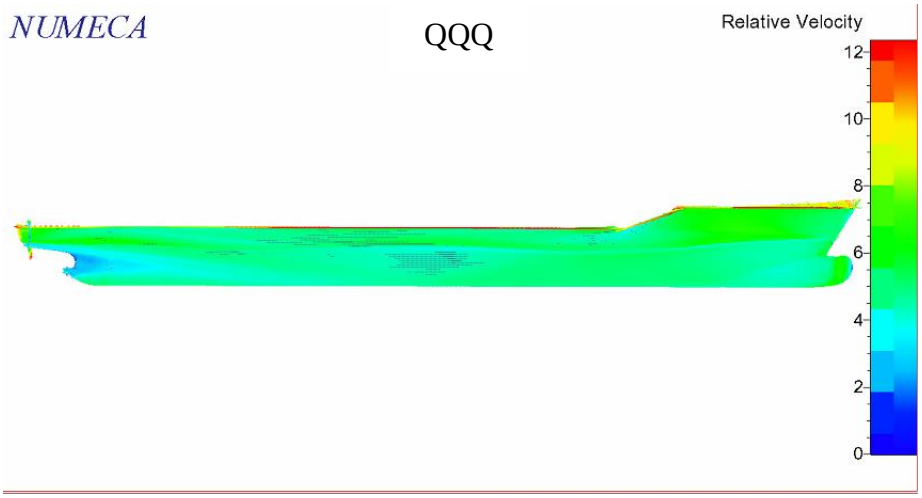


Gambar 6. 19 Perbandingan visualisasi kekasaran RPQ antara simulasi *full viscous* dan *free surface*

Untuk *relative velcocity* pun demikian, dari *full viscous* pun kita mengetahui bahwa ternyata ketinggian kekasaran pada tiap partisi lambung kapal pun juga mempengaruhi kecepatan di daerah tersebut. Pada simulasi *free surface* pun demikian, hanya saja distribusi kekasarannya tidak bisa terlokalisasi layaknya *full viscous*. Berikut ilustrasi *relative velocity* pada lambung halus maupun pada lambung kasar.

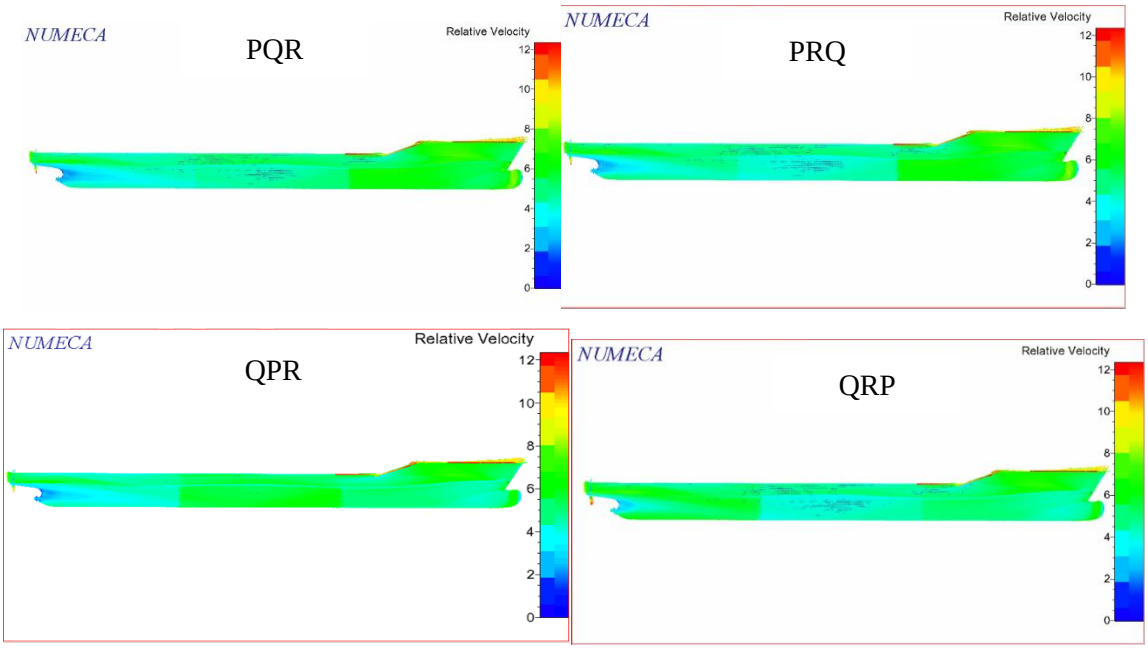


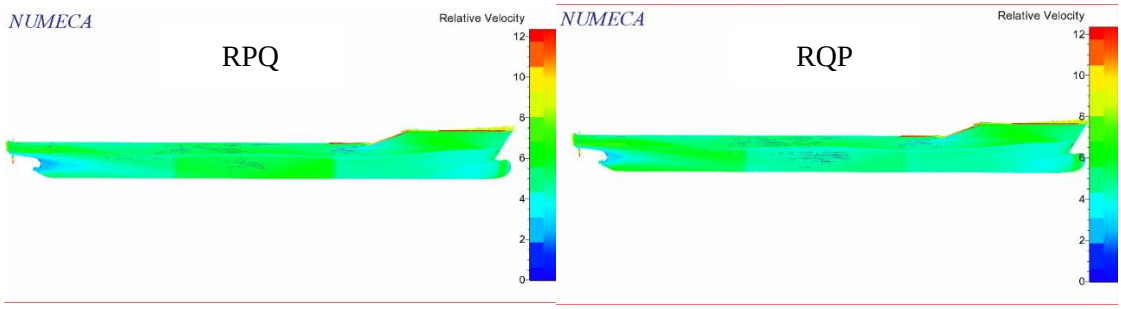
Gambar 6. 20 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung halus



Gambar 6. 21 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar

Sama dengan simulasi *full viscous, free surface* juga terjadi degradasi kecepatan antara KCS lambung halus (SSS) dan KCS lambung kasar (QQQ), di mana pada disepanjang lambung halus rata – rata adalah sebesar 6 – 7.5 m/s dan nilainya meningkat pada *bulbous bow* yakni sebesar 10 m/s sedangkan pada lambung kasar (QQQ) nilai *relative velocity* disepanjang lambung kapal rata – rata hanya sebesar 4 – 5 m/s. Kecuali pada area *forecastle deck* yang memiliki *relative velocity* sama pada kedua kekasaran.



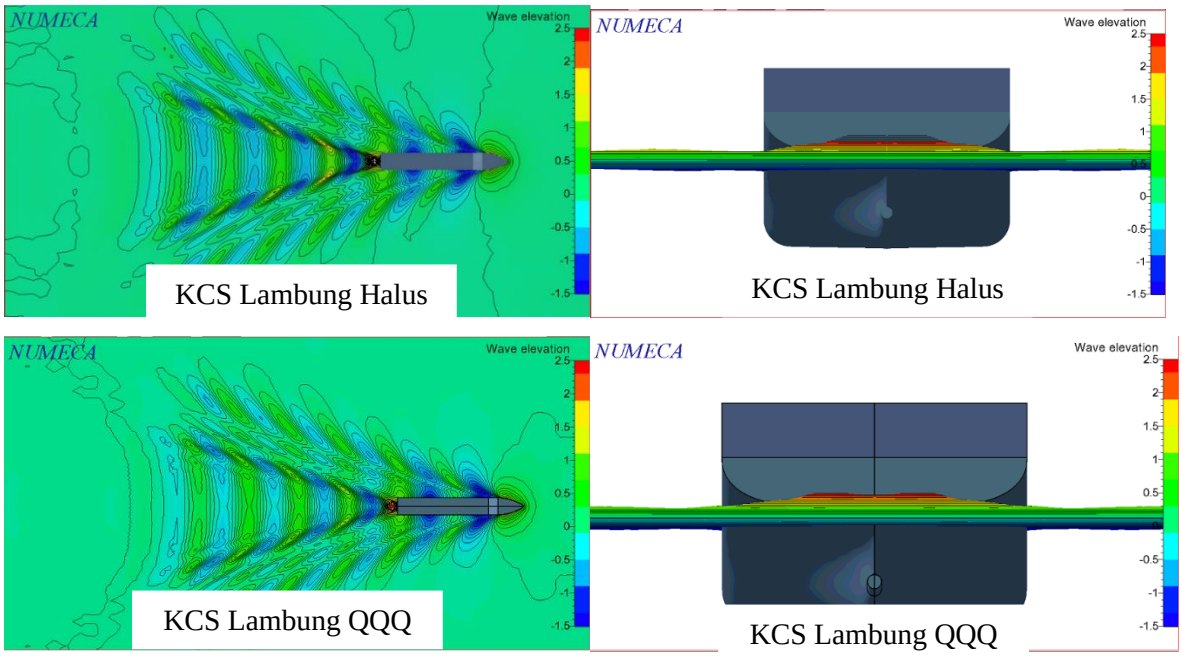


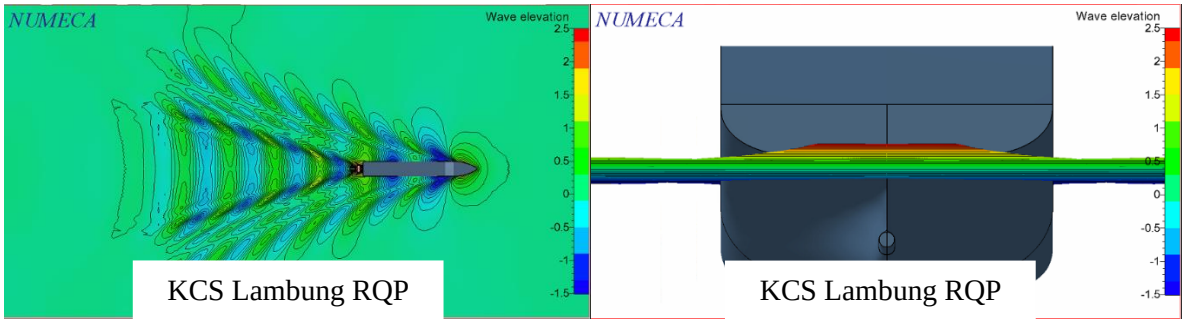
Gambar 6. 22 Visualisasi distribusi *Relative Velocity* KCS pada lambung kasar tak-homogen

Pada gambar diatas dapat diketahui bahwa ketinggian kekasaran disetiap segmen sangat mempengaruhi distribusi *relative velocity* nya. Terutama partisi lambung kapal dengan ketinggian kekasaran rendah (P = 81.25 µm) terlihat menonjol dengan nilai *relative velocity* yang cenderung tinggi dengan ditandai indikator warna hijau muda yaitu sebesar kurang lebih 6 – 7.5 m/s, berbeda dengan ketinggian kekasaran sedang (Q) dan kekasaran tinggi (R) yang sama – sama ditandai warna biru muda yaitu sebesar kurang lebih 4 m/s dan pada bagian yang memiliki kekasaran sebesar (Q = 325 µm).

6.6 Visualisasi Gelombang KRISO *Container Ship* Simulasi *Free Surface*

Pada Sub bab ini penulis akan menampilkan visualisasi gelombang pada KCS, baik dalam kondisi *smooth* maupun dalam kondisi *rough*. Untuk mengetahui seberapa besar gelombang yang dapat ditimbulkan oleh kapal KCS itu sendiri. Disini visualisasi yang ditampilkan antara KCS simulasi *smooth* dan simulasi *rough* homogen, dan tak-homogen tidak ada pebedaan yang berarti. Berikut merupakan gambar viusalisasi gelombang yang ditimbulkan oleh kapal KCS:

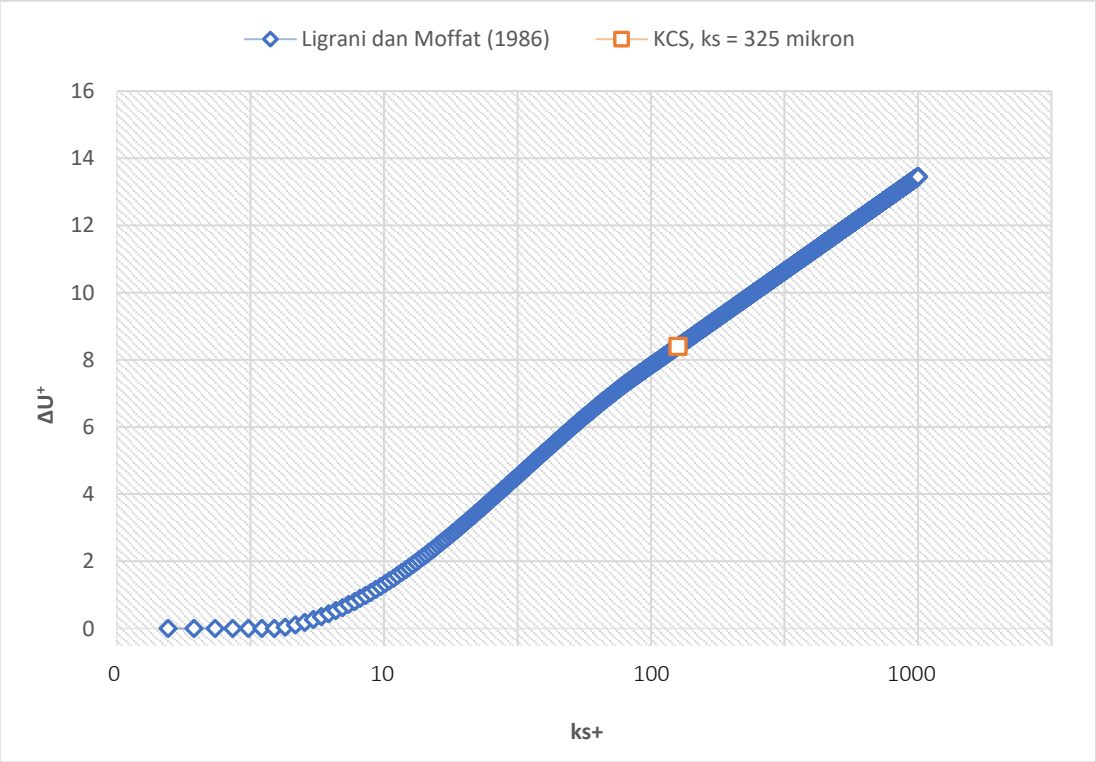




Gambar 6. 23 Visualisasi gelombang pada KCS dengan kecepatan 24 Knot

6.7 Profil Kecepatan Rata – Rata Simulasi *Full Viscous* dan *Free Surface*

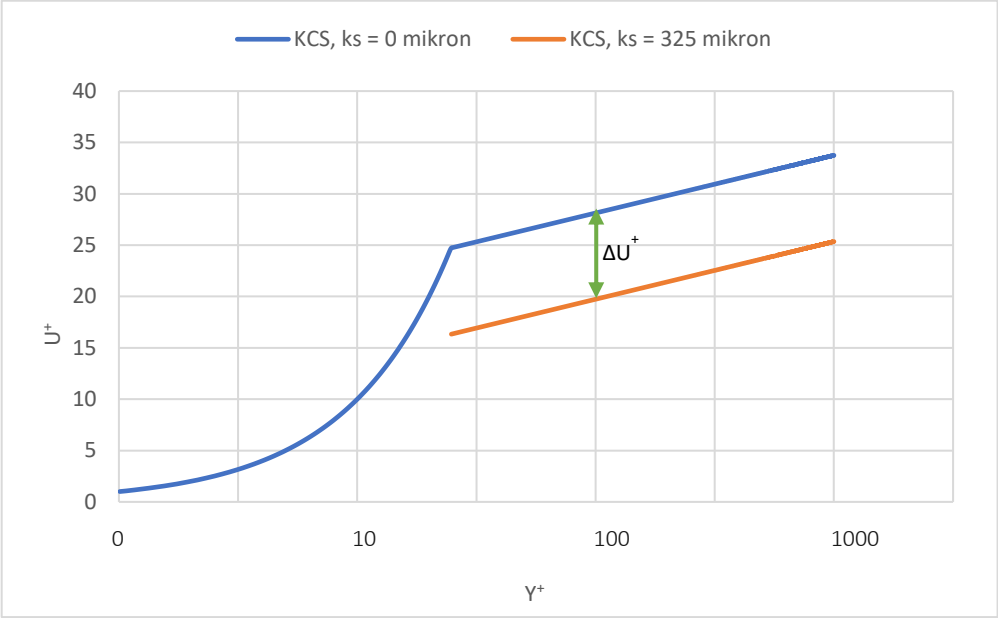
Sebagaimana yang divisualisasikan pada sub bab 6.6 mengenai kecepatan rata – rata. Kecepatan rata – rata yang terjadi disepanjang dinding KCS juga dapat diselidiki secara grafis melalui efek kekasaran permukaan dalam turunan plot kecepatan rata – rata melalui fungsi non-dimensi U^+ dan Y^+ . Y^+ merupakan jarak antara dinding dengan titik – titik tertentu, yang sederhananya disebut sebagai kekasaran itu sendiri, sedangkan U^+ merupakan kecepatan fluida dilokasi Y^+. Nilai U^+ dan Y^+ dapat diperoleh dari persamaan (2.10). Grafik profil kecepatan dapat dibuat dapat dibuat *wall function* standar untuk KCS permukaan halus dan untuk *wall function* yang dimodifikasi untuk KCS permukaan kasar berdasarkan pergeseran *log-wall*.



Gambar 6. 24 Fungsi kekasaran *full viscous* yang diajukan oleh Ligrani & Moffat (1986)

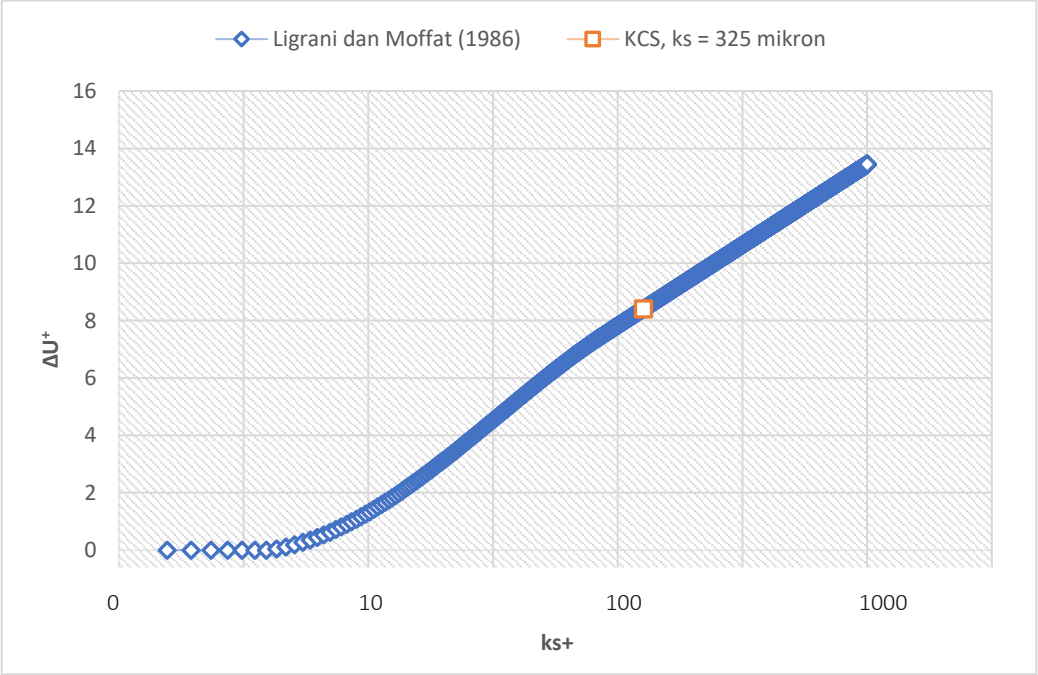
Fungsi kekasaran sendiri juga terepresentasi kedalam Profil Kecepatan Rata – Rata, di mana didalam kecepatan rata – rata tergambar secara grafis KCS lambung halus dan KCS

lambung kasar homogen yang dimodifikasi dengan ketinggian kekasaran 325 µm. Fungsi kekasaran itu adalah selisih antara KCS lambung halus dan KCS lambung kasar homogen yang dimodifikasi. Berikut penggambarannya secara grafis.



Gambar 6. 25 Profil kecepatan rata-rata permukaan halus dan pergeseran profil kecepatan permukaan kasar (325 µm) dalam simulasi *full viscous*.

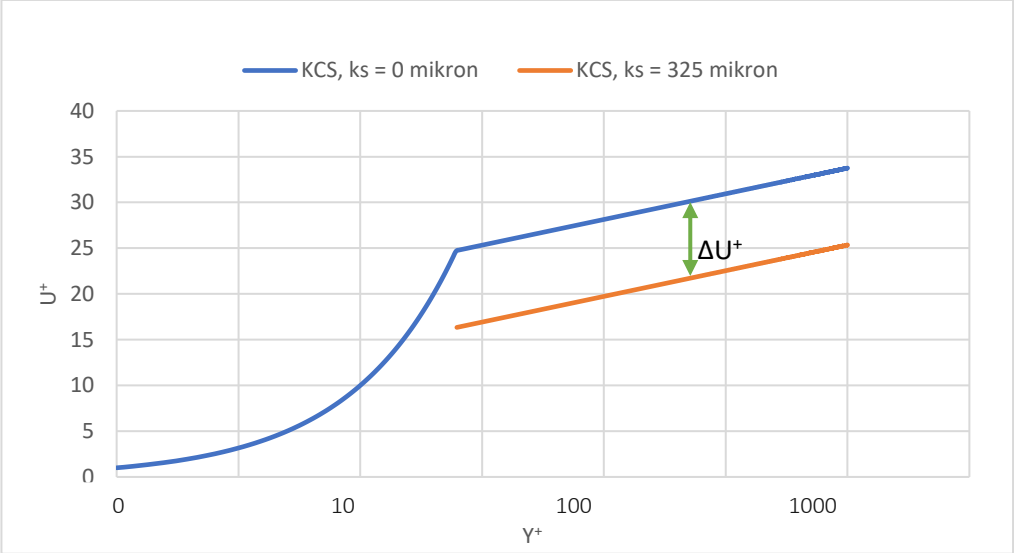
Fungsi Kekasaran dan Profil Kecepatan Rata – Rata pada simulasi *free surface* adalah sebagai berikut:



Gambar 6. 26 Fungsi Kekasaran *free surface* yang diajukan oleh Ligrani & Moffat (1986)

Sama dengan simulasi *full viscous*, pada *free surface* Fungsi Kekasaran sendiri juga terepresentasi kedalam Profil Kecepatan Rata – Rata, di mana didalam kecepatan rata – rata

tergambar secara grafis KCS lambung halus dan KCS lambung kasar homogen yang dimodifikasi kekasaran dengan ketinggian 325 µm. Fungsi kekasaran itu adalah selisih antara KCS lambung halus dan KCS lambung kasar homogen. Berikut penggambarannya secara grafis.



Gambar 6. 27 Profil Kecepatan rata-rata permukaan halus dan pergeseran profil kecepatan permukaan kasar (325 µm) dalam simulasi *free surface*.

Gambar 6.25 dan gambar 6.27 menunjukkan profil kecepatan rata – rata yang dibentuk dengan memodifikasi KCS lambung halus dengan menggunakan Fungsi Kekasaran yang diusulkan oleh Ligrani & Moffat (1986). Pergeseran KCS lambung kasar homogen kebawah mewakili akibat dari Profil Kecepatan pada permukaan kasar. Dapat dianalisis baik dalam KCS simulasi *full viscous* dan *free surface*, pergeseran Fungsi Kekasaran (ΔU^+) kebawah memiliki nilai yang hampir sama pada simulasi kekasaran yang sama yaitu 325 µm. Secara prinsip dapat diambil konklusi bahwa semakin jauh pergeseran ΔU^+ ke bawah dari dinding lambung halus, maka semakin lambat kecepatan fluida yang terjadi, yang mengakibatkan peningkatan *shear stress* pada dinding lambung yang berimplikasi pada peningkatan gesekan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 7
KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi menggunakan CFD yang telah divalidasi menggunakan ITTC 1957 dan *Similarity Law* Granville (1978), maka kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Kekasaran akan meningkatkan hambatan total kapal. Hambatan gesek kekasaran homogen QQQ (Q = 325 µm) dengan *Reynolds Number* 2.73×10^9 meningkat sebesar 55% jika dibandingkan dengan lambung halus pada simulasi *full viscous* sedangkan pada simulasi *free surface* hambatan gesek meningkatkan sebesar 56.8%.
2. Urutan kekasaran tak-homogen baik dalam simulasi *full viscous* maupun *free surface* secara praktis memiliki urutan RPQ < QPR < RQP < PQR < QRP < PRQ di mana pengaruh terbesar pada *parallel middle body* yakni sebesar 3819.414 m^2, pengaruh kedua pada *stern* yakni sebesar 3252.252 m^2 dan pengaruh terkecil pada *bow* yakni sebesar 2797.859 m^2. Kekasaran RPQ memiliki nilai hambatan gesek terendah untuk simulasi *full viscous* sebesar 2.062×10^{-3} dan untuk simulasi *free surface* sebesar 2.194×10^{-3} sedangkan untuk kekasaran PRQ memiliki nilai *friction coefficient* tertinggi yakni berturut – turut untuk simulasi *full viscous dan free surface* sebesar 2.136×10^{-3} dan 2.168×10^{-3}.

7.2 Saran

1. Ukuran luas antara *bow*, *PMB*, dan *stern* perlu disamakan untuk memudahkan intepretasi hasil.
2. Perlu dilakukan dengan eksperimen dengan formulasi kekasaran yang sama untuk memverifikasi hasil simulasi CFD, sehingga didapatkan hasil yang lebih valid.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Anderson, J. D., & Wendt, J. (1995). *Computational fluid dynamics (Vol. 206, p. 332).* McGraw-Hill.

Bakker, A. (2001). *Realize greater benefits from CFD.* Chemical engineering progress.

Bertram, V. (2000). *Practical Ship Hydrodynamics.* ButterworthHeinemann.

Bons, J. P. (2010). *A review of surface roughness effects in gas turbines*.

Celik, M. (2008). *Modeling Spatial and Spatio-temporal Co-occurrence Patterns*. *July*, 1–111.

Cengel, Y.A., Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications.* McGrach-Hill.

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* (p. 62 p).

Demirel, Y. K., Khorasanchi, M., Turan, O., Incecik, A., & Schultz, M. P. (2014). A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings. *Ocean Engineering*, *89*, 21–31. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.07.017

Demirel, Y. K., Turan, O., & Incecik, A. (2017). Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD. *Applied Ocean Research*, *62*(January), 100–118. https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.12.003

Deshmukh, D., & Samad, A. (2019). CFD-based analysis for finding critical wall roughness on centrifugal pump at design and off-design conditions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *41*(1). https://doi.org/10.1007/s40430-018-1557-y

Dogrul, A., Song, S., & Demirel, Y. K. (2020). Scale effect on ship resistance components and form factor. *Ocean Engineering*, *209*(April), 107428. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107428

Durbin, P. A., & Reif, B. A. P. (2010). Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows: Second Edition. In *Statistical Theory and Modeling for Turbulent Flows: Second Edition*. https://doi.org/10.1002/9780470972076

Forooghi, P., Weidenlener, A., Magagnato, F., Böhm, B., Kubach, H., Koch, T., & Frohnapfel, B. (2018). DNS of momentum and heat transfer over rough surfaces based

on realistic combustion chamber deposit geometries. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *69*(November 2017), 83–94. https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.12.002

Gibson, A., & Utama, I. K. A. P. (2016). Analisis Cfd Hambatan Lambung Kapal Trimaran Asimetris Flat Side Inside Dengan Variasi Jarak Antar Lambung Secara Membujur. *Jurnal Teknik ITS*, *5*(1), 1–6. https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i1.15830

Granville, P. S. (1978). *Similarity-law characterization methods for arbitrary hydrodynamic roughnesses*. 39. DTNSRDC 78-SPD-815-01

IMO, Smith, T. W. P., Jalkanen, J. P., Anderson, B. A., Corbett, J. J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keeffe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, C., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D. S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J. J., & Hoen, M., A. (2014). Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. *International Maritime Organization (IMO)*, 327. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0912-3

Kadivar, M., Tormey, D., & McGranaghan, G. (2021). A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories. *International Journal of Thermofluids*, *10*(March), 100077. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100077

Kim, T., Blois, G., Best, J. L., & Christensen, K. T. (2020). PIV measurements of turbulent flow overlying large, cubic- and hexagonally-packed hemisphere arrays. *Journal of Hydraulic Research*, *58*(2), 363–383. https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1581671

Kim, W. J., Van, S. H., & Kim, D. H. (2001). Measurement of flows around modern commercial ship models. *Experiments in Fluids*, *31*(5), 567–578. https://doi.org/10.1007/s003480100332

Lackenby, H. (1962). The thirty-fourth Thomas Lowe gray lecture: resistance of ships, with special reference to skin friction and hull surface condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, *176*(1), 981–1014.

Laufer, J. (1954). *Report 1174, NBS*.

Ligrani, B. P. M. (1986). *Structure of transitionally rough and fully rough turbulent boundary layers*. *162*, 69–98.

Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2017). Ship Resistance and Propulsion. In *Ship Resistance and Propulsion*. https://doi.org/10.1017/cbo9780511974113

Molland, A. F., & Utama, I. K. A. P. (2002). Experimental and numerical investigations into the drag characteristics of a pair of ellipsoids in close proximity. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, *216*(2), 107–115. https://doi.org/10.1243/147509002762224324

Molland, Anthony F. (2011). *The maritime engineering reference book: a guide to ship design, construction and operation*. Elsevier.

Monty, J. P., Dogan, E., Hanson, R., Scardino, A. J., Ganapathisubramani, B., & Hutchins, N. (2016). An assessment of the ship drag penalty arising from light calcareous tubeworm fouling. *Biofouling*, *32*(4), 451–464. https://doi.org/10.1080/08927014.2016.1148140

Onyshchenko, S., Shibaev, O., & Melnyk, O. (2019). Assessment of potential negative impact of the system of factors on the ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargoes. In *Transactions on Maritime Science* (Vol. 10, Issue 1). https://doi.org/10.7225/toms.v10.n01.009

Schultz, M. P. (2007). Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, *23*(5), 331–341. https://doi.org/10.1080/08927010701461974

Schultz, M. P., & Swain, G. W. (2000). The influence of biofilms on skin friction drag. *Biofouling*, *15*(1–3), 129–139. https://doi.org/10.1080/08927010009386304

Song, S., Dai, S., Demirel, Y. K., Atlar, M., Day, S., & Turan, O. (2021). Experimental and Theoretical Study of the Effect of Hull Roughness on Ship Resistance. *Journal of Ship Research*, *65*(01), 62–71. https://doi.org/10.5957/JOSR.07190040

Song, S., Demirel, Y. K., & Atlar, M. (2019). An investigation into the effect of biofouling on the ship hydrodynamic characteristics using CFD. *Ocean Engineering*, *175*(October 2018), 122–137. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.056

Song, S., Demirel, Y. K., Atlar, M., Dai, S., Day, S., & Turan, O. (2020). Validation of the CFD approach for modelling roughness effect on ship resistance. *Ocean Engineering*, *200*(February), 107029. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107029

Suastika, I. K., Hakim, M. L., Nugroho, B., Nasirudin, A., Utama, I. K. A. P., Monty, J. P., & Ganapathisubramani, B. (2021). Characteristics of drag due to streamwise inhomogeneous roughness. *Ocean Engineering*, *223*(May 2020), 108632. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108632

Suastika, K., Hidayat, A., & Riyadi, S. (2017). Effects of the application of a stern foil on ship resistance: A case study of an Orela crew boat. *International Journal of Technology*, *8*(7), 1266–1275. https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i7.691

Tezdogan, T., & Demirel, Y. K. (2013). An overview of marine corrosion protection with regards to cathodic protection and coatings. *RINA, Royal Institution of Naval Architects - International Conference on Marine Coatings*, *65*(2), 5–12. https://doi.org/10.3940/rina.coat.2013.04

Townsin, R. L. (2003). The Ship Hull Fouling Penalty. *Biofouling*, *19*(sup1), 9–15.

https://doi.org/10.1080/0892701031000088535

Van Manen, J. D., Van Ossanen, P., & Lewis, E. V. (1988). Principles of naval architecture, second revision, volume II: resistance, propulsion, and vibration. *Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New Jersey USA.*

Versteeg, H.K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. *Pearson Education*.

Walker, J. M., Flack, K. A., Lust, E. E., Schultz, M. P., & Luznik, L. (2014). Experimental and numerical studies of blade roughness and fouling on marine current turbine performance. *Renewable Energy*, *66*, 257–267. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.012

Zikanov, O. (2019). *Essential computational fluid dynamics.* John Wiley & Sons.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A *Simulation Time History of* KRISO *Container Ship Full Viscous Condition*

LAMPIRAN B *Simulation Time History of KRISO Container Ship Free Surface Condition*

LAMPIRAN C *Visualization of Relative Velocity Full Viscous Condition*

LAMPIRAN D *Visualization of Relative Velocity Free Surface Condition*

LAMPIRAN E *Visualization of Viscous Stress Full Viscous Condition*

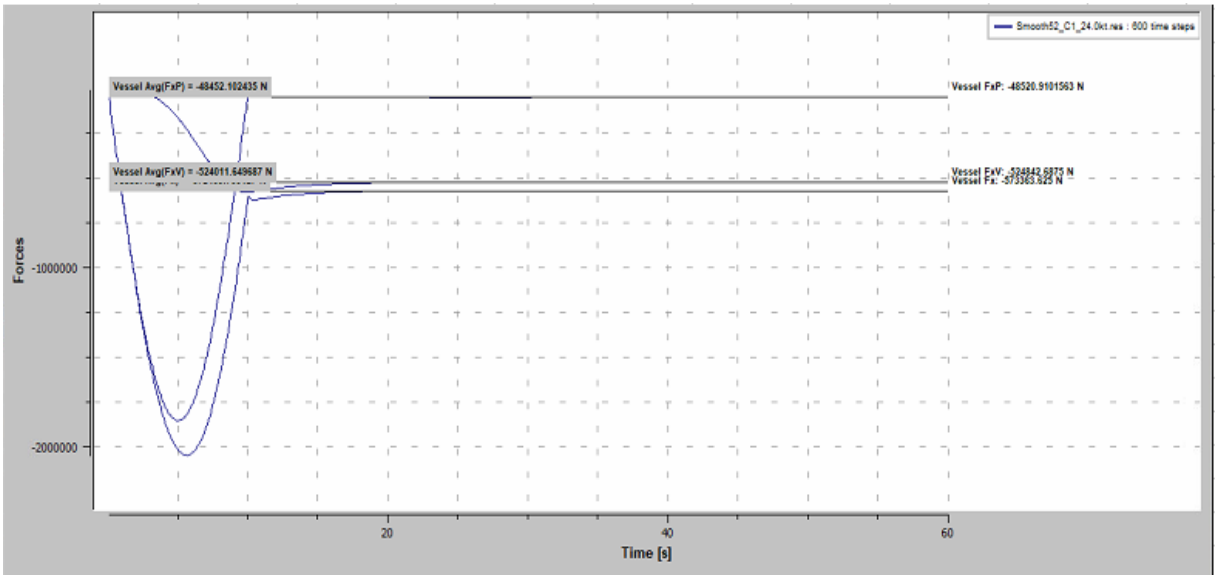
LAMPIRAN F *Visualization of Viscous Stress Free Surface Condition*

Halaman ini sengaja dikosongkan

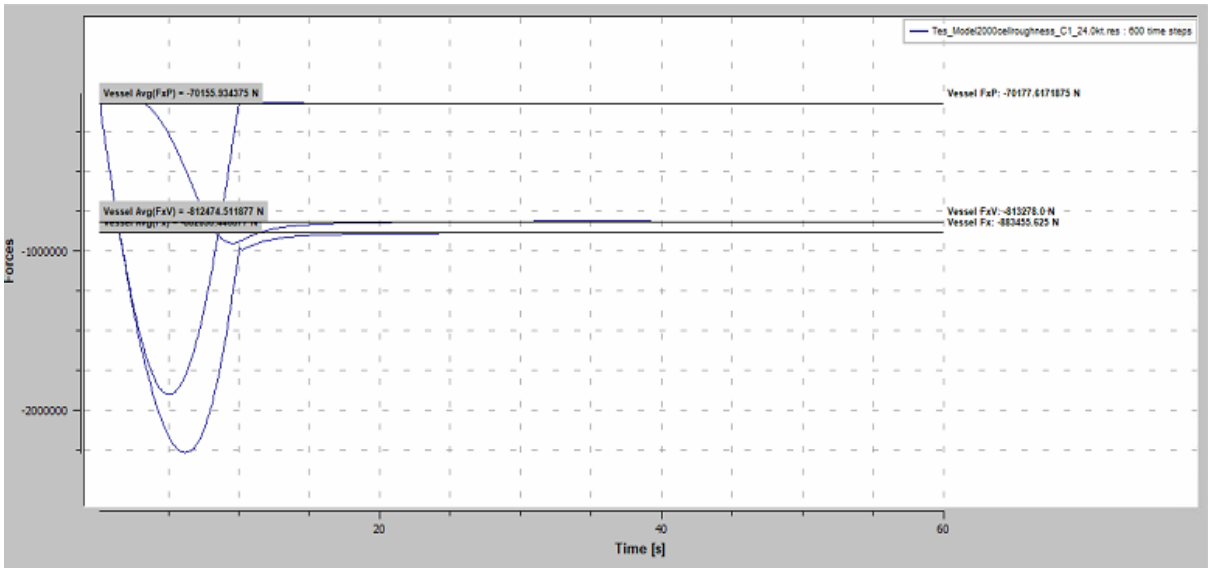
LAMPIRAN A *Simulation Time History of KRISO Container Ship Full Viscous Condition*

Catatan : Lampiran ini menjelaskan hasil simulasi dari *NUMECA FINE*^{TM}*/Marine* kapal KCS dengan kecepatan dinas 24 knot (*Reynolds Number* = 2.73 × 10^9) dalam kondisi *full viscous*. Grafik tersebut menampilkan FxP yang diartikan sebagai *Resistance Pressure*¸ FxV sebagai *Resistance Friction,* dan Fx sebagai *Resistance Total.* Simulasi dilakukan dengan *Final Time* 600 *times steps.*

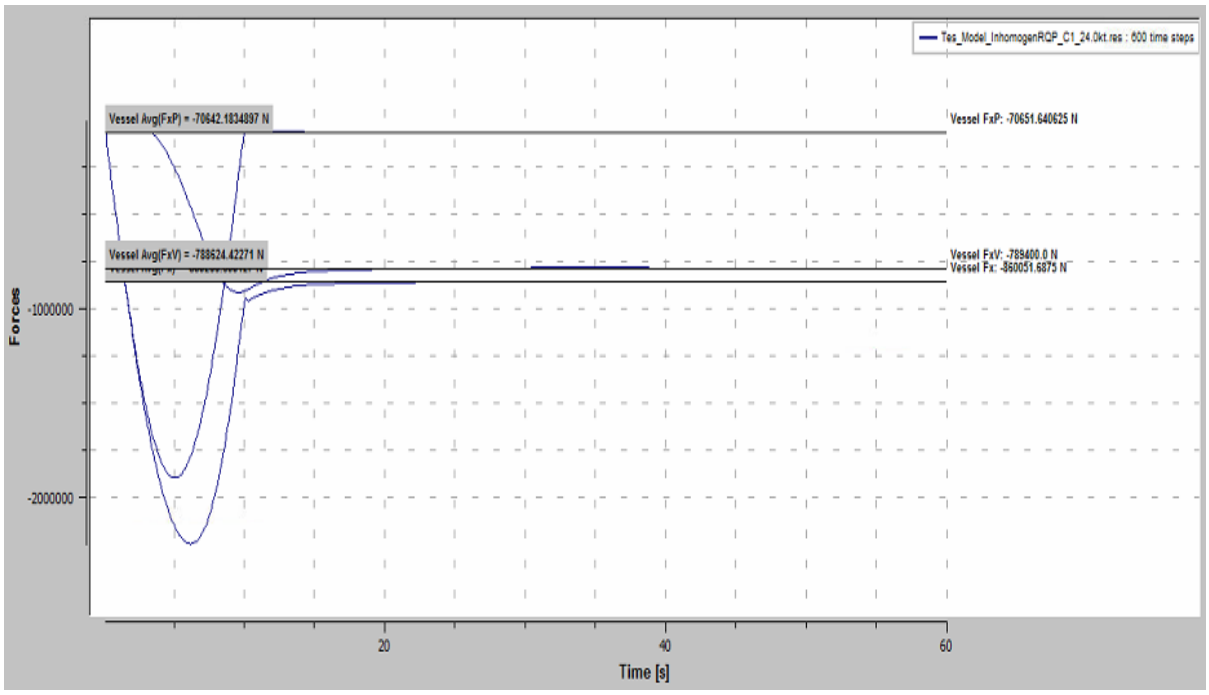
1. KRISO *Container Ship Smooth Condition* SSS (S = 0 µm)



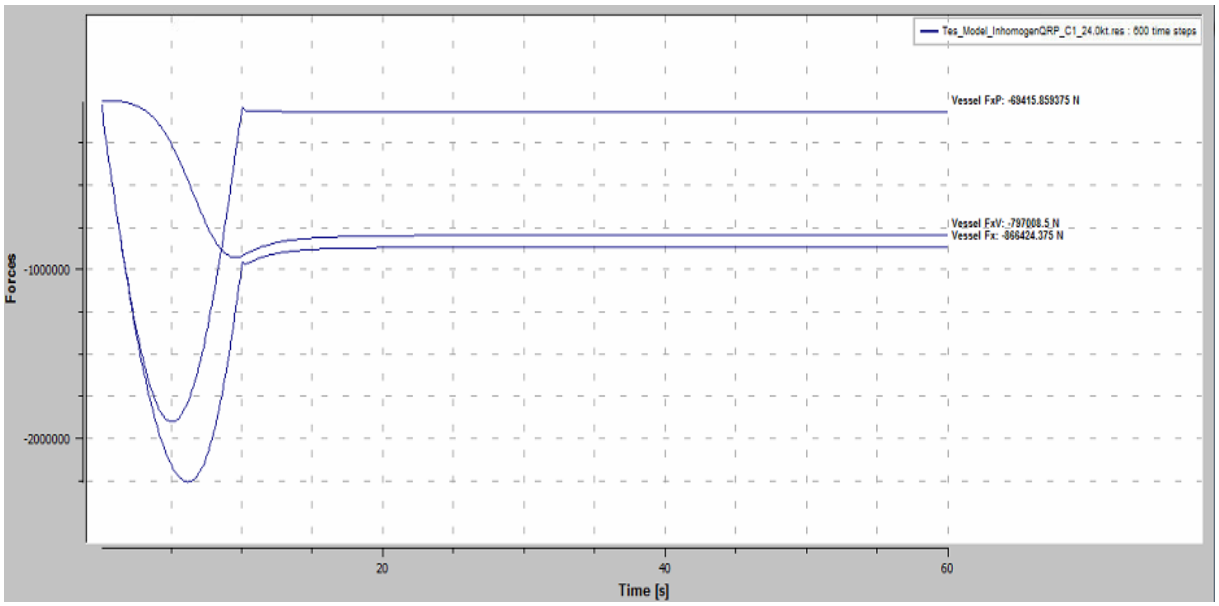
2. KRISO *Container Ship Rough* homogen*ous Condition* QQQ (Q = 325 µm)



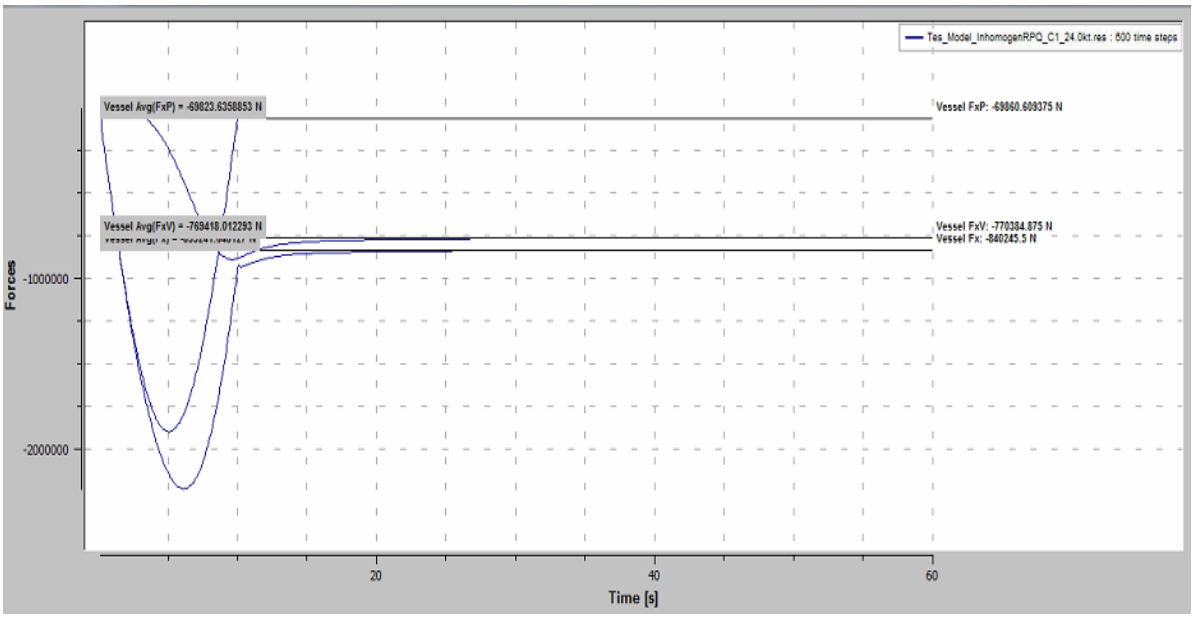
3. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* PQR



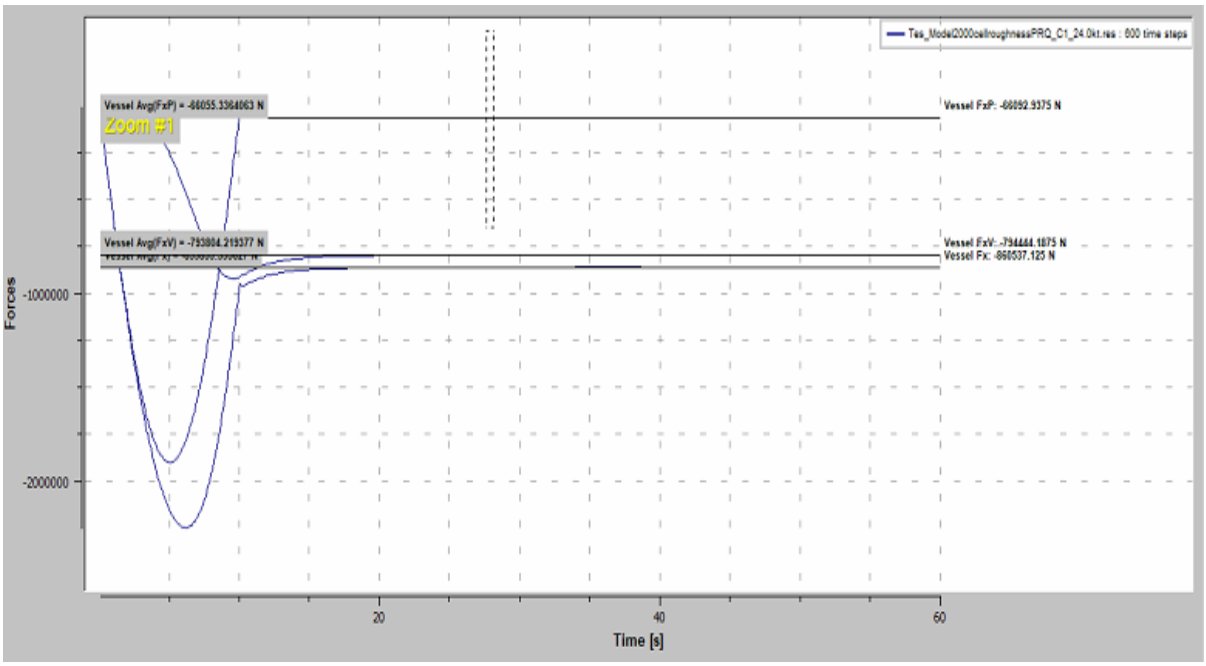
4. KRISO *Container Ship Rough Inhmogenous Condition* PRQ



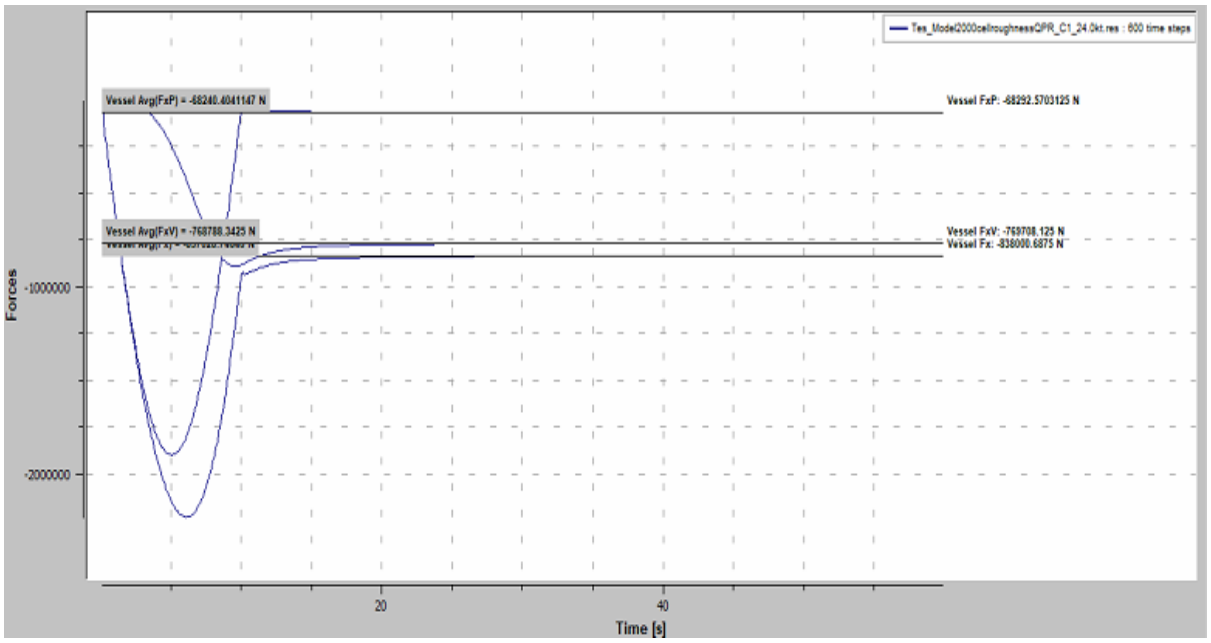
5. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* QPR



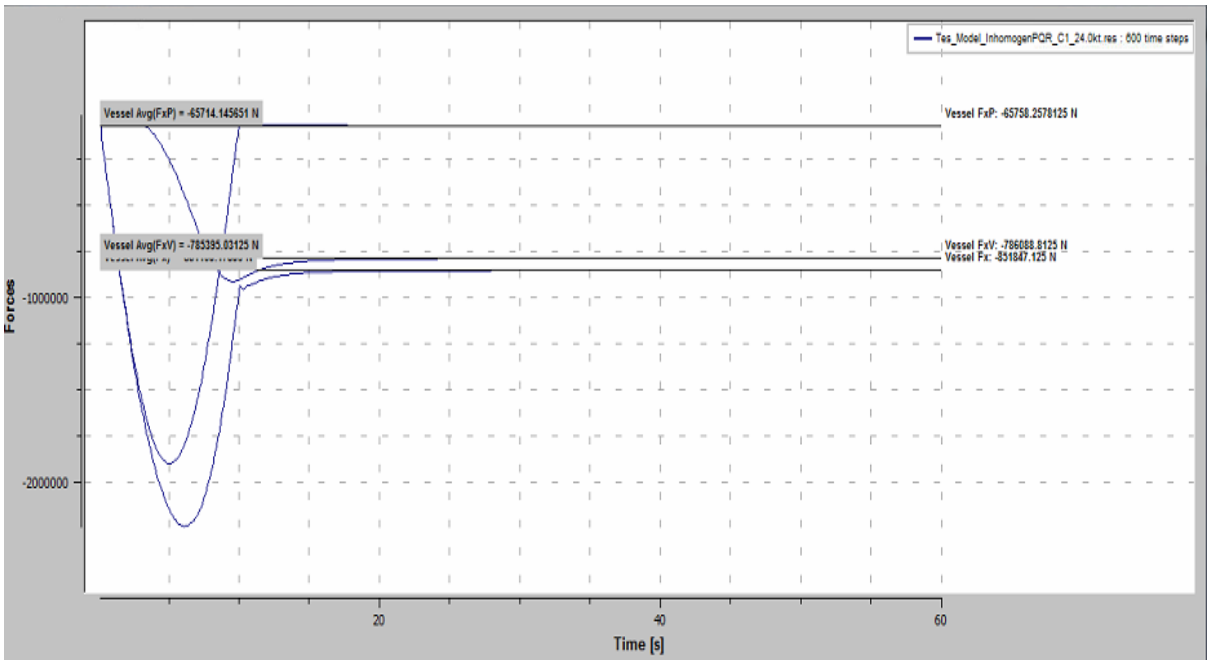
6. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* QRP



7. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* RPQ



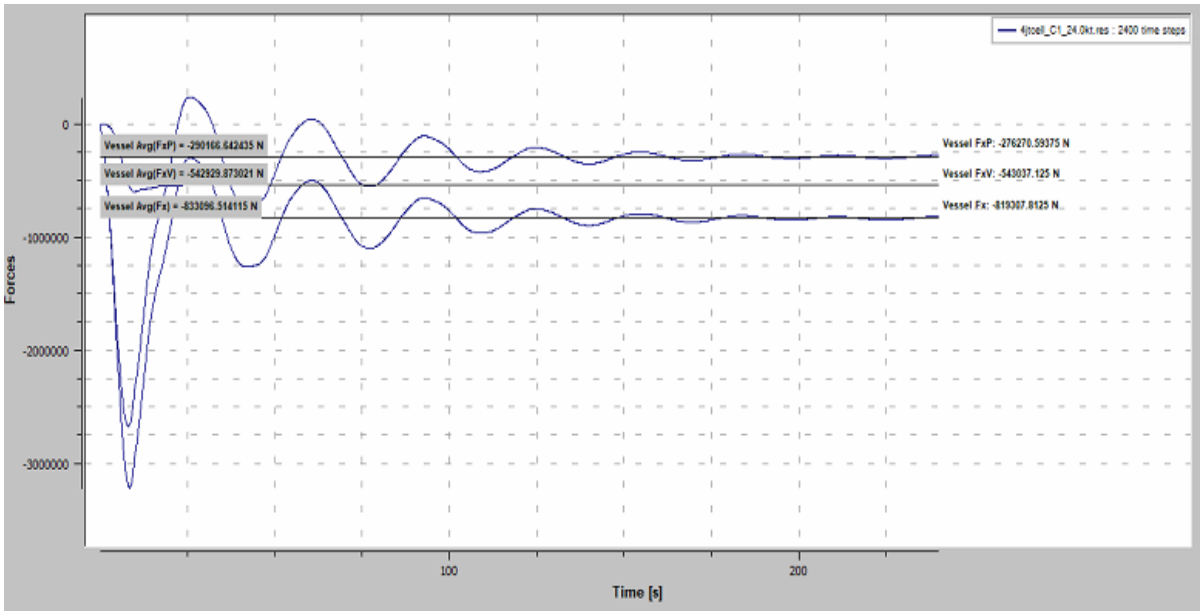
8. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* RQP



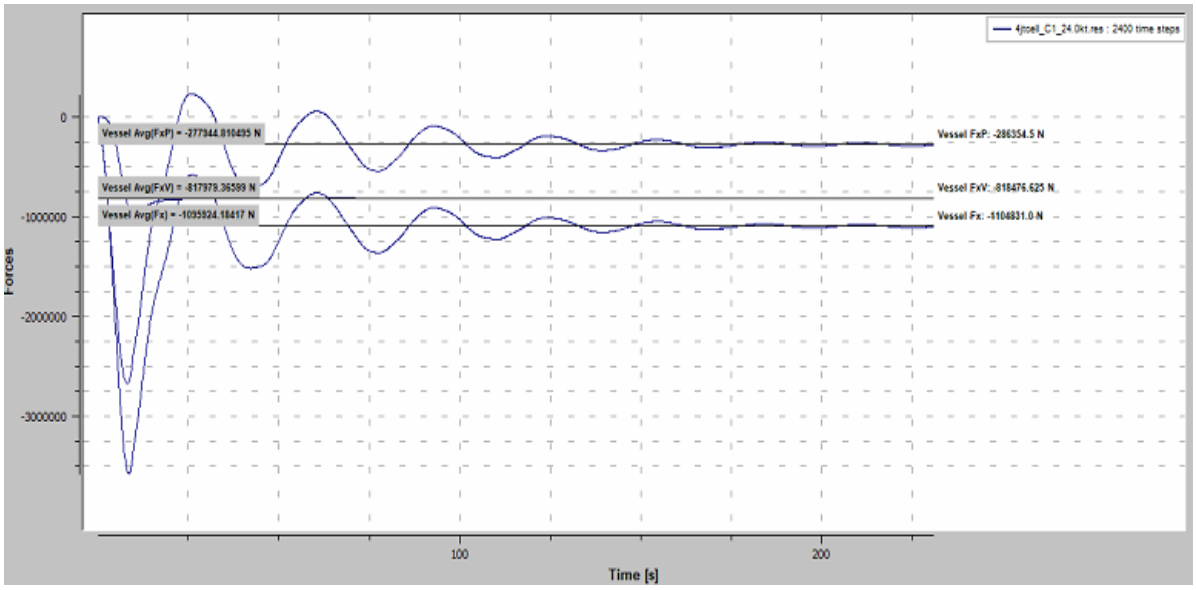
LAMPIRAN B *Simulation Time History of KRISO Container Ship Free Surface Condition*

Catatan : Lampiran ini menjelaskan hasil simulasi dari *NUMECA FINE*^{TM}*/Marine* kapal KCS dengan kecepatan dinas 24 knot (*Reynolds Number* = 2.73×10^9) dalam kondisi *free surface*. Grafik tersebut menampilkan FxP yang diartikan sebagai *Resistance Pressure*¸ FxV sebagai *Resistance Friction*, dan Fx sebagai *Resistance Total*. Simulasi dilakukan dengan *Final Time* 2400 *times steps.*

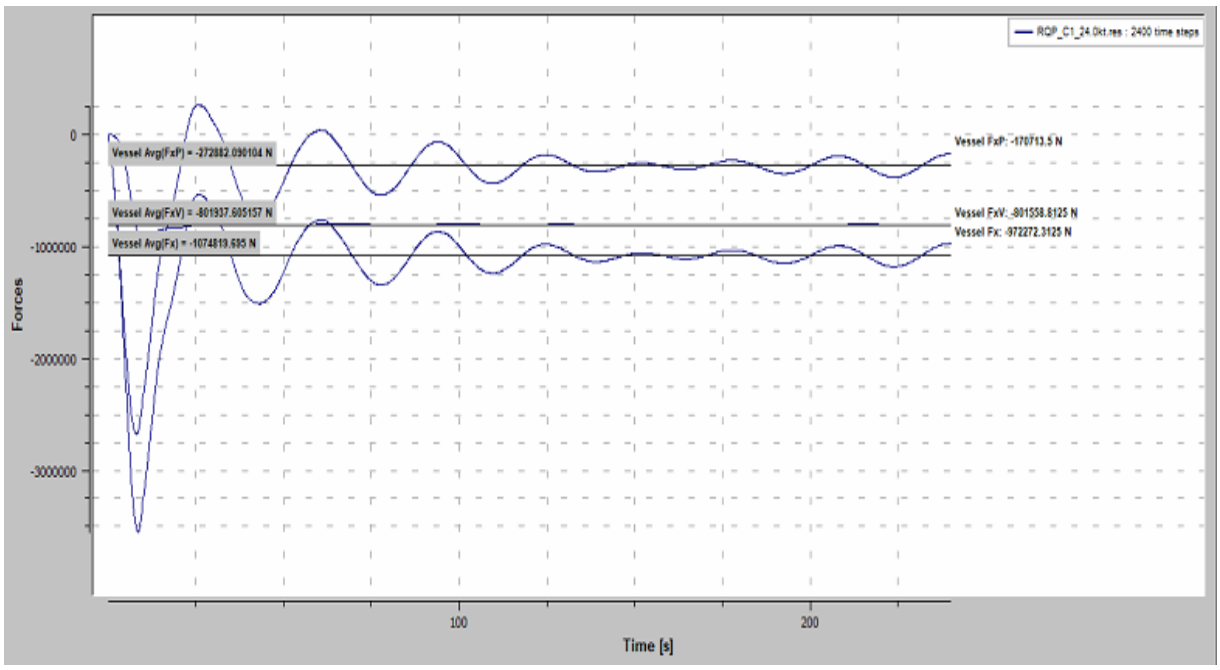
1. KRISO *Container Ship Smooth Condition* SSS (S = 0 µm)



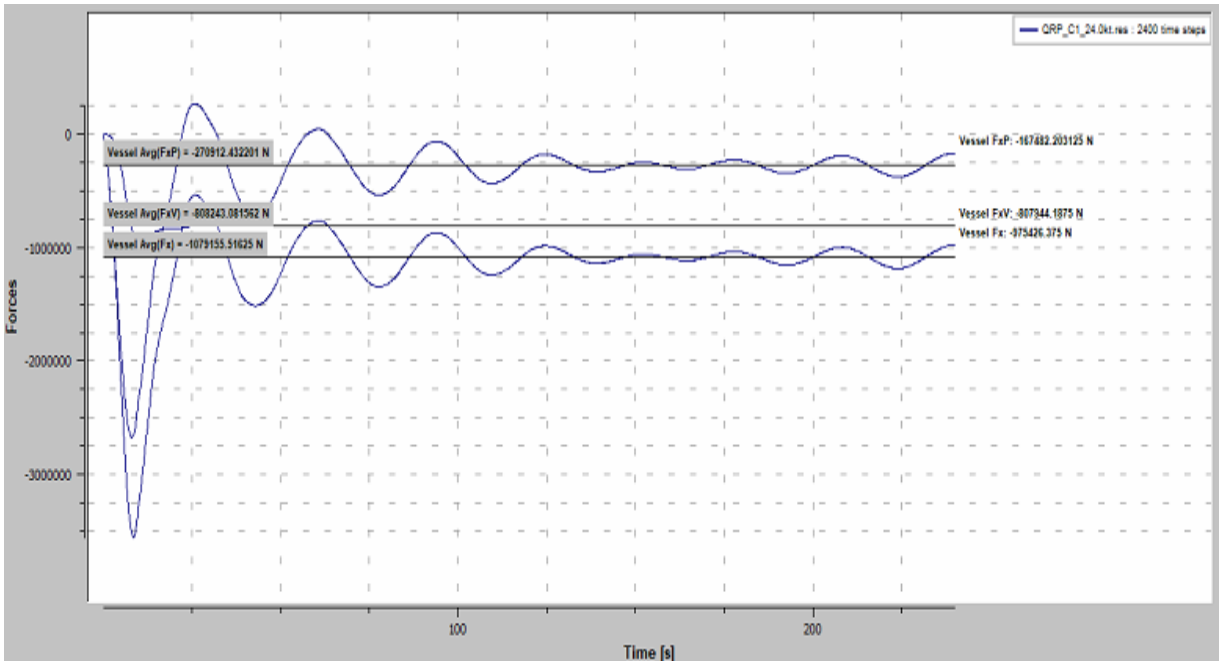
2. KRISO *Container Ship Rough* Homogen*ous Condition* QQQ (Q = 325 µm)



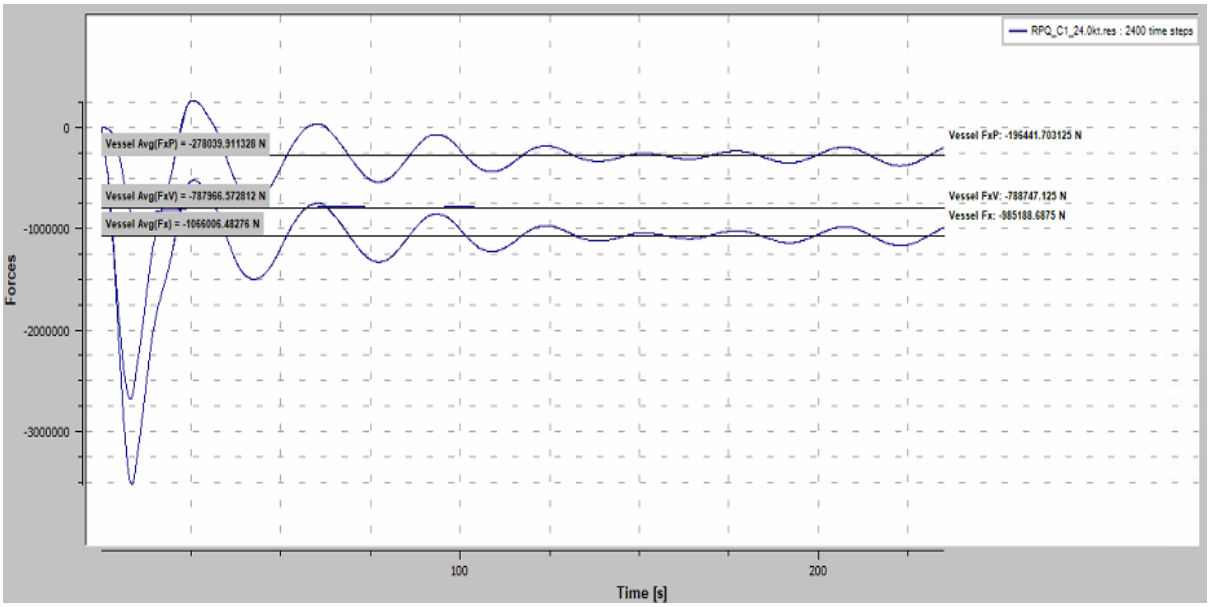
3. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* PQR



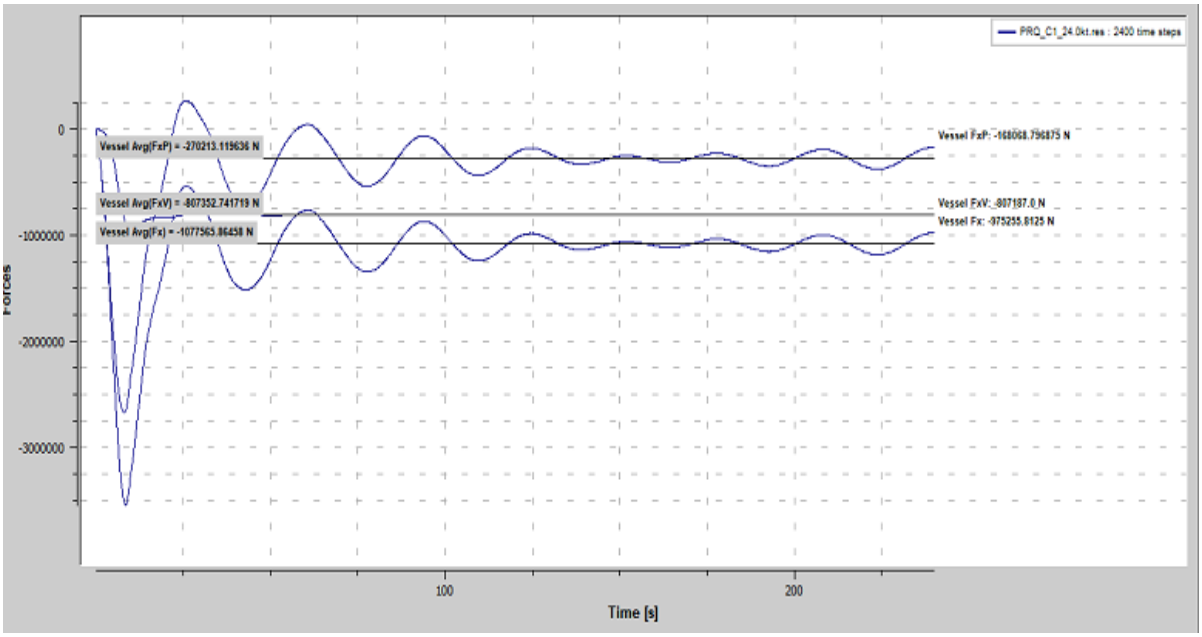
4. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* PRQ



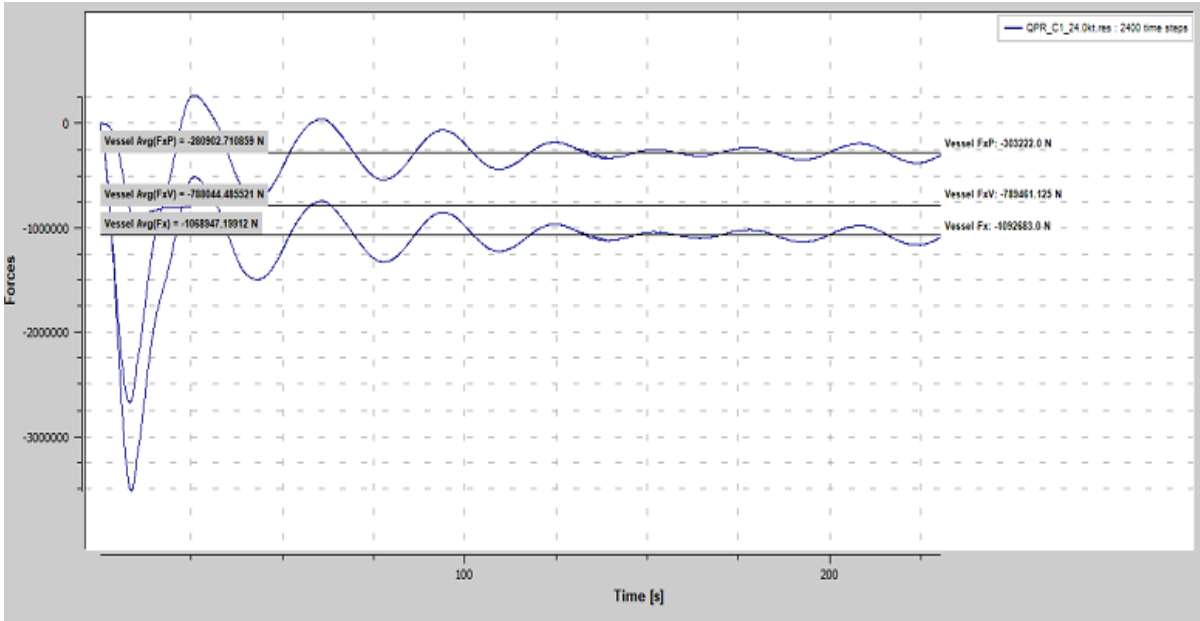
5. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* QPR



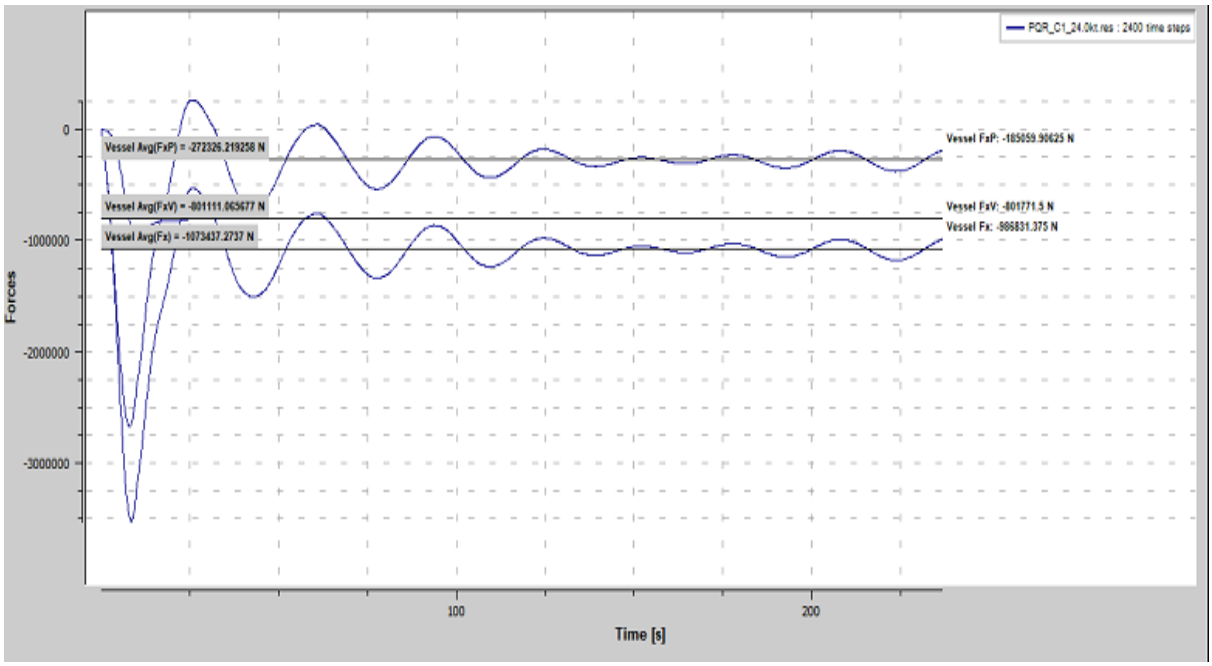
6. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Conditon* QRP



7. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* RPQ



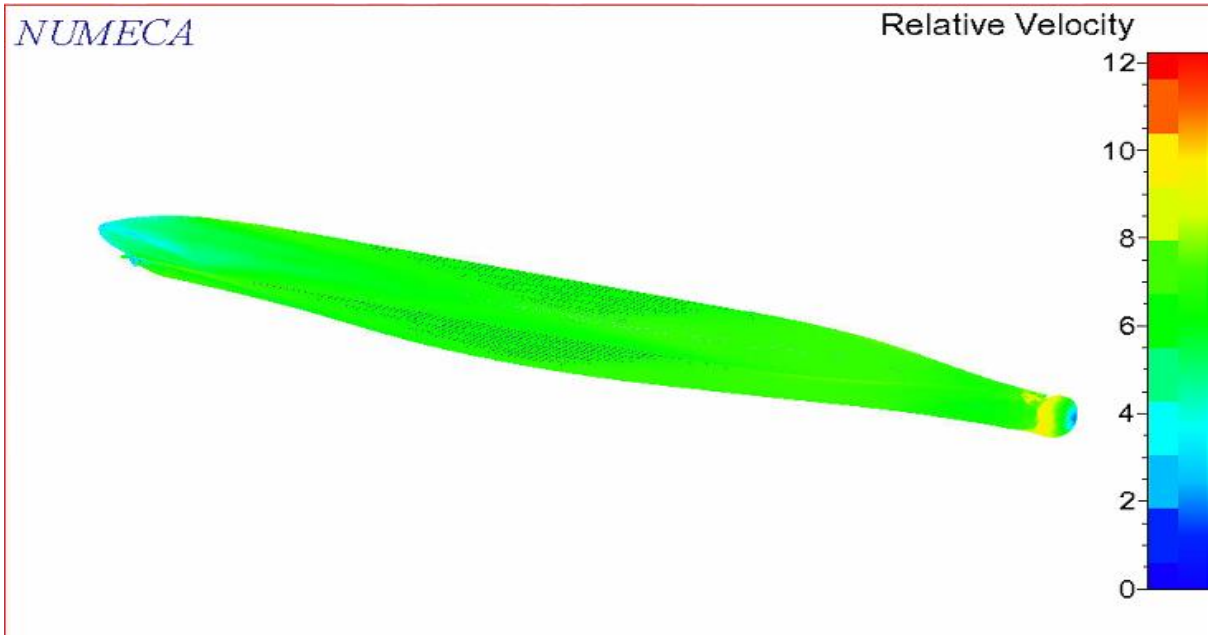
8. KRISO *Container Ship Rough* Tak-homogen*ous Condition* RQP



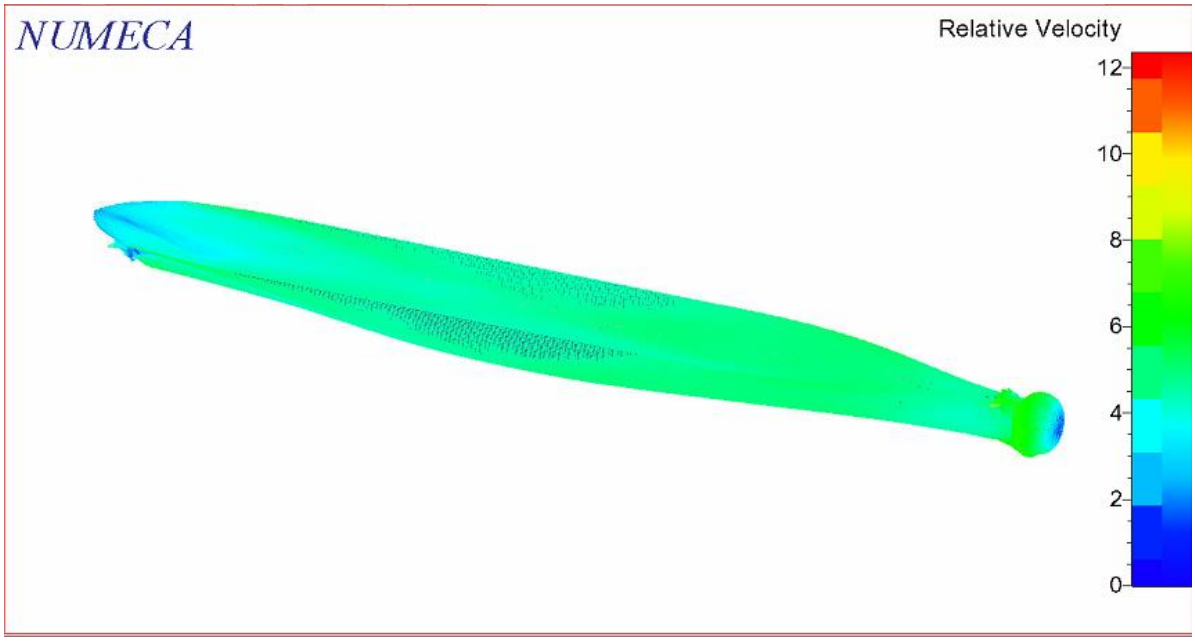
LAMPIRAN C *Visualization of Relative Velocity Full Viscous Condition*

Catatan : Lampiran ini menjelaskan hasil visualisasi *monitoring view* dari *Relative Velocity* kapal KCS dengan kecepatan dinas 24 knot (*Reynolds Number* = 2.73×10^9) dalam kondisi *full viscous*. Warna mengindikasikan sebagai kecepatan dinas yang tercapai sesuai dengan ketinggian kekasaran yang disimulasikan.

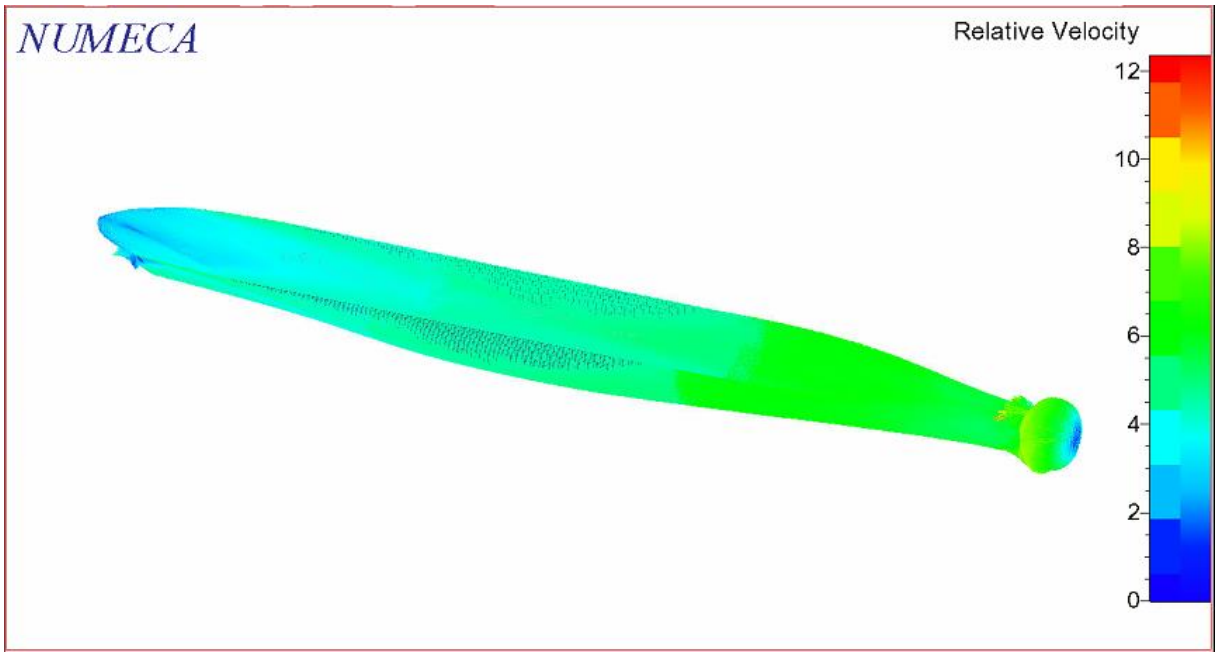
1. KRISO *Container Ship Smooth Condition* SSS (S = 0 µm)



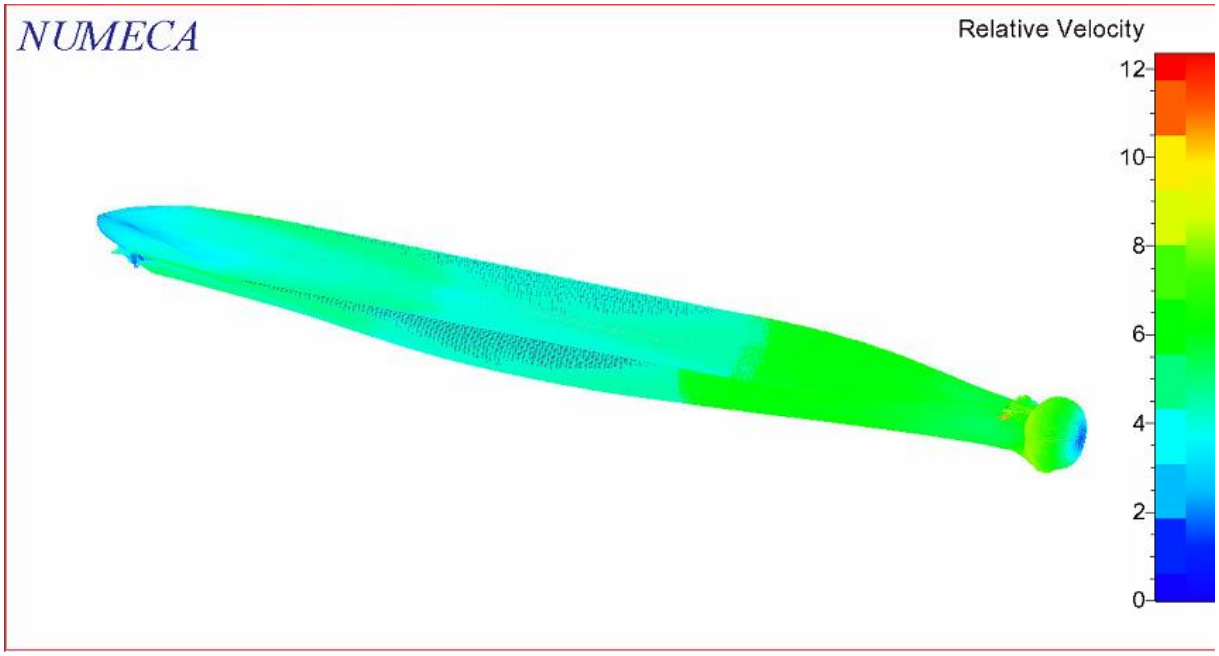
2. KRISO *Container Ship Rough Condition* QQQ (Q = 325 µm)



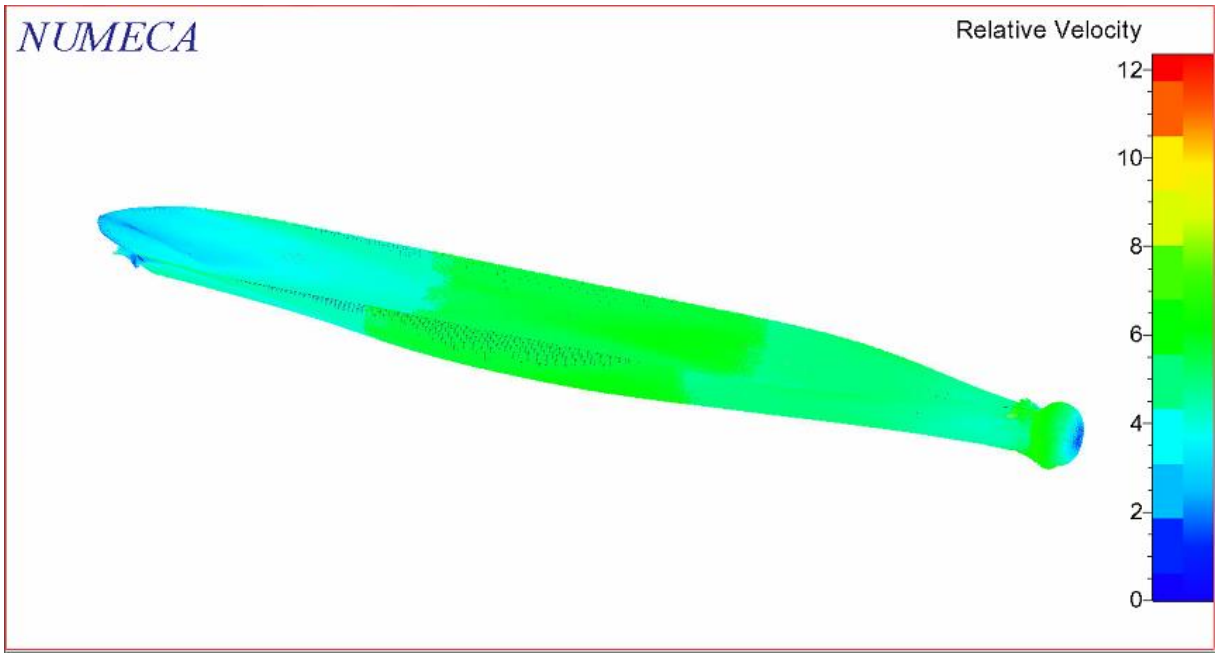
3. KRISO *Container Ship Rough Condition* PRQ



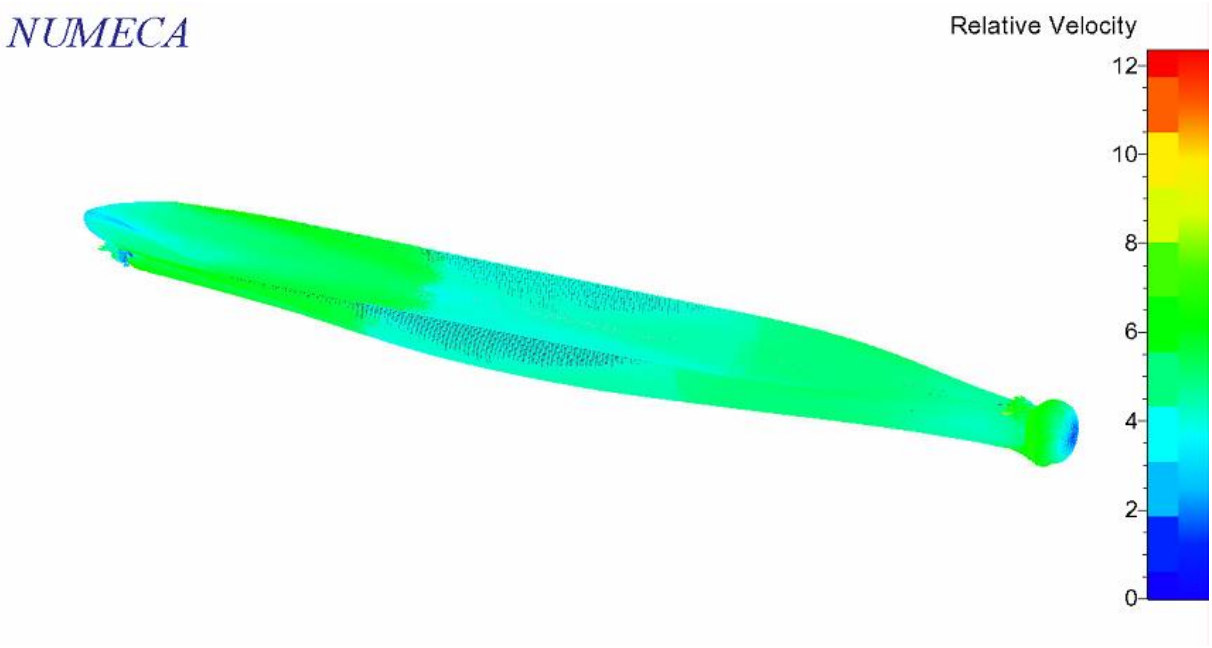
4. KRISO *Container Ship Rough Condition* PRQ



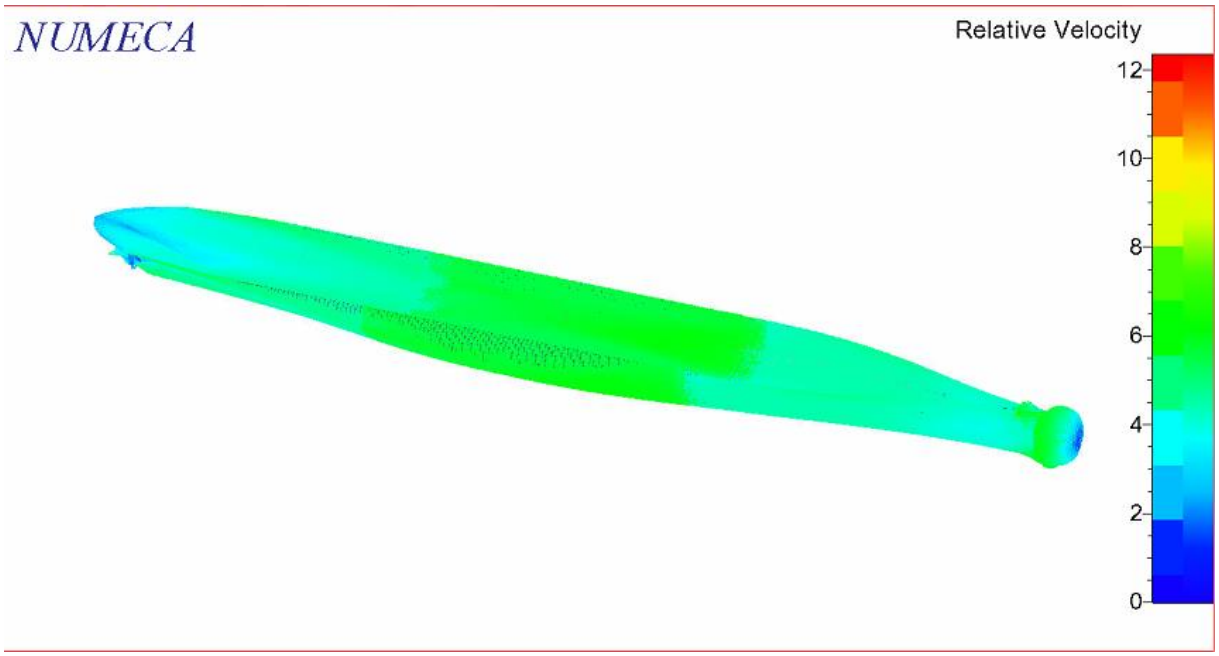
5. KRISO *Container Ship Rough Condition* QPR



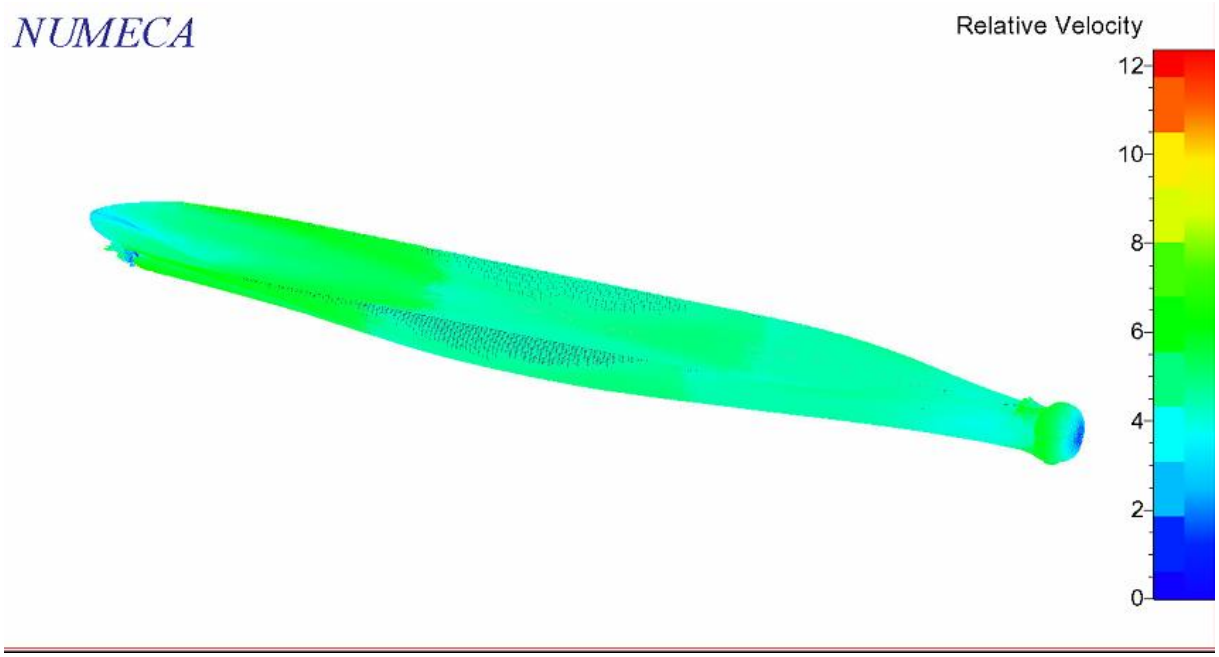
6. KRISO *Container Ship Rough Condition* QRP



7. KRISO *Container Ship Rough Condition* RPQ



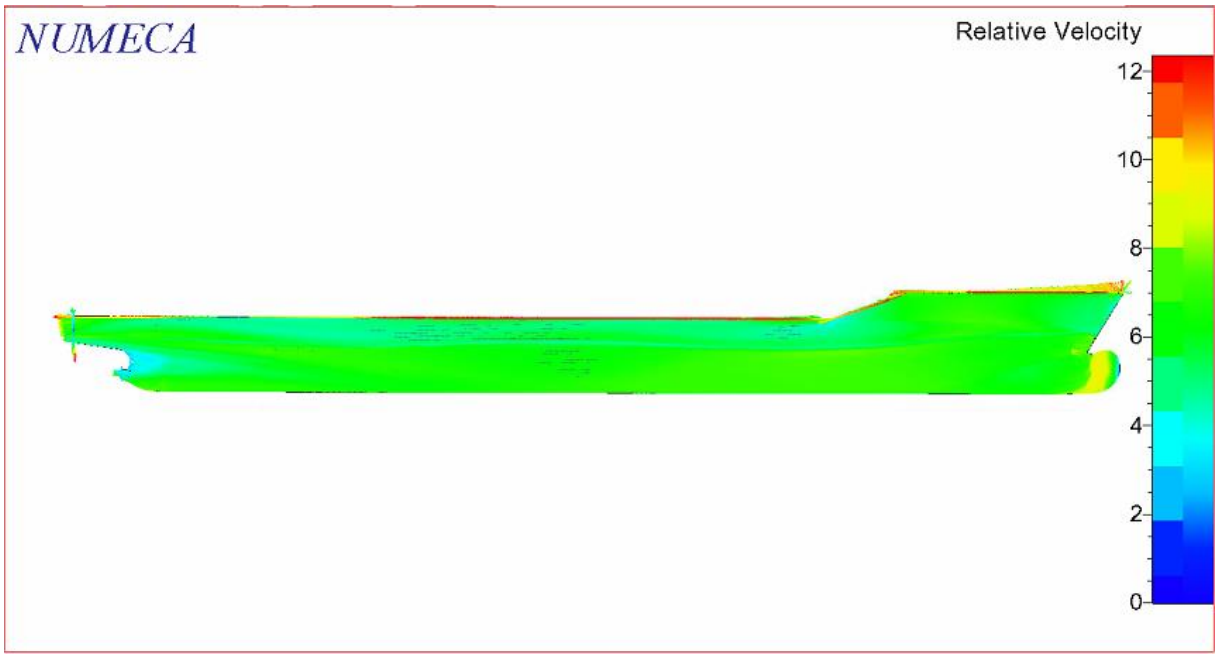
8. KRISO *Container Ship Rough Condition* RQP



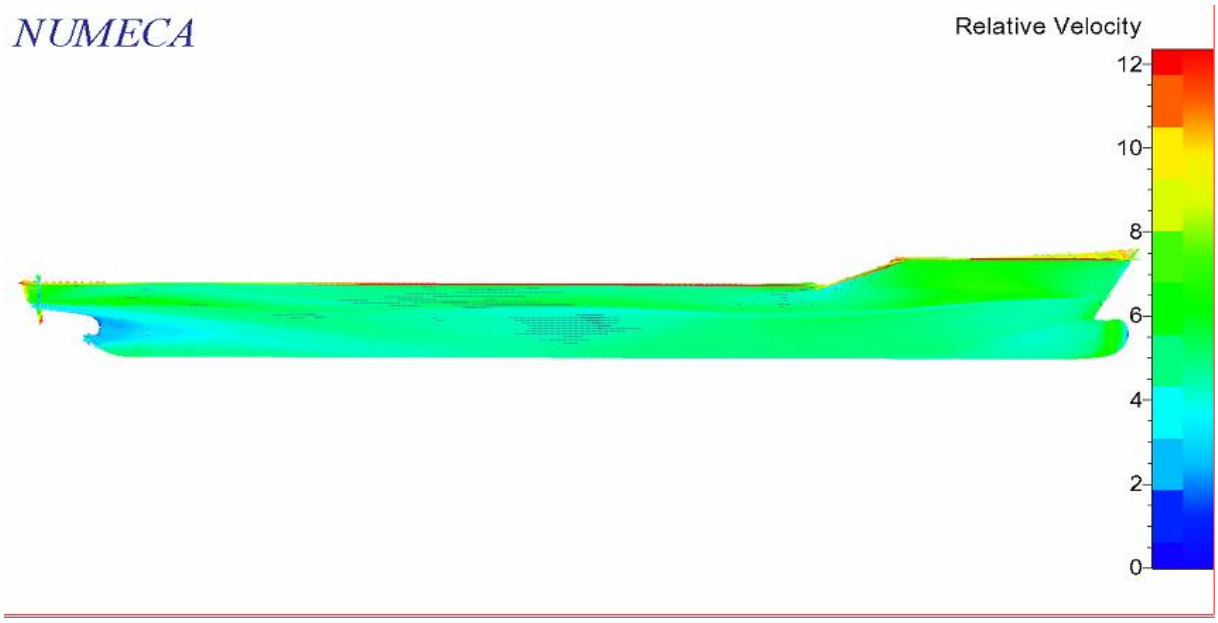
LAMPIRAN D *Visualization of Relative Velocity Free Surface Condition*

Catatan : Lampiran ini menjelaskan hasil visualisasi *monitoring view* dari *Relative Velocity* kapal KCS dengan kecepatan dinas 24 knot (*Reynolds Number* = 2.73×10^9) dalam kondisi *free surface*. Warna mengindikasikan sebagai kecepatan dinas yang tercapai sesuai dengan ketinggian kekasaran yang disimulasikan.

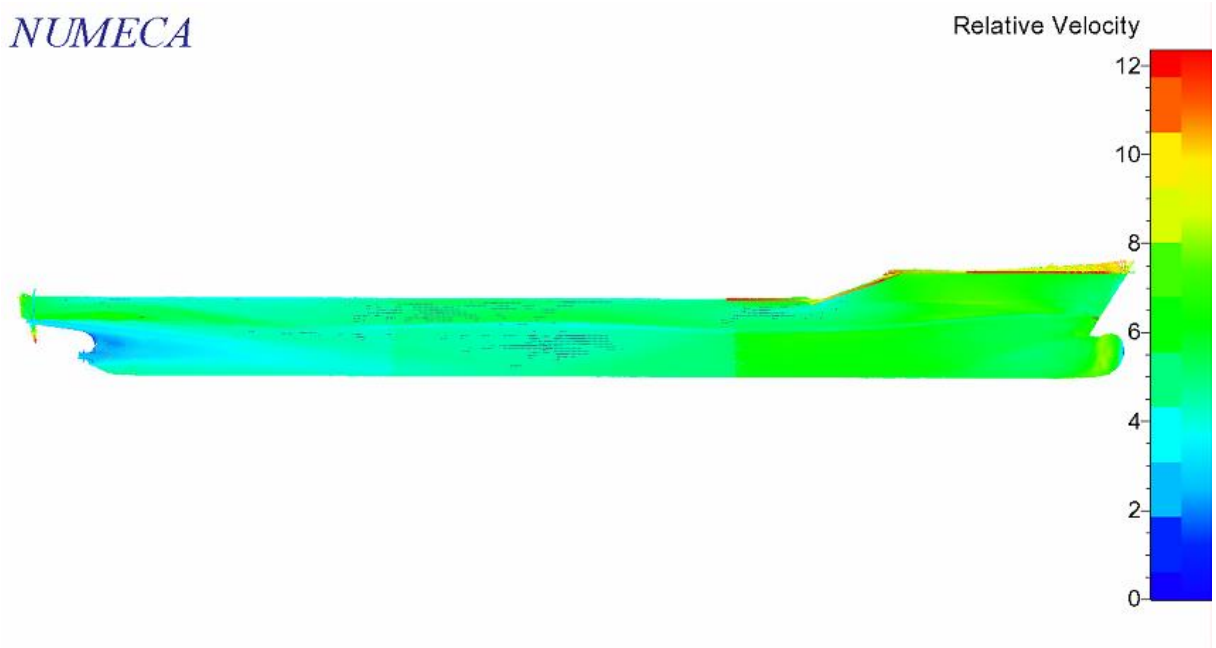
1. KRISO *Container Ship Smooth Condition* SSS (S = 0 µm)



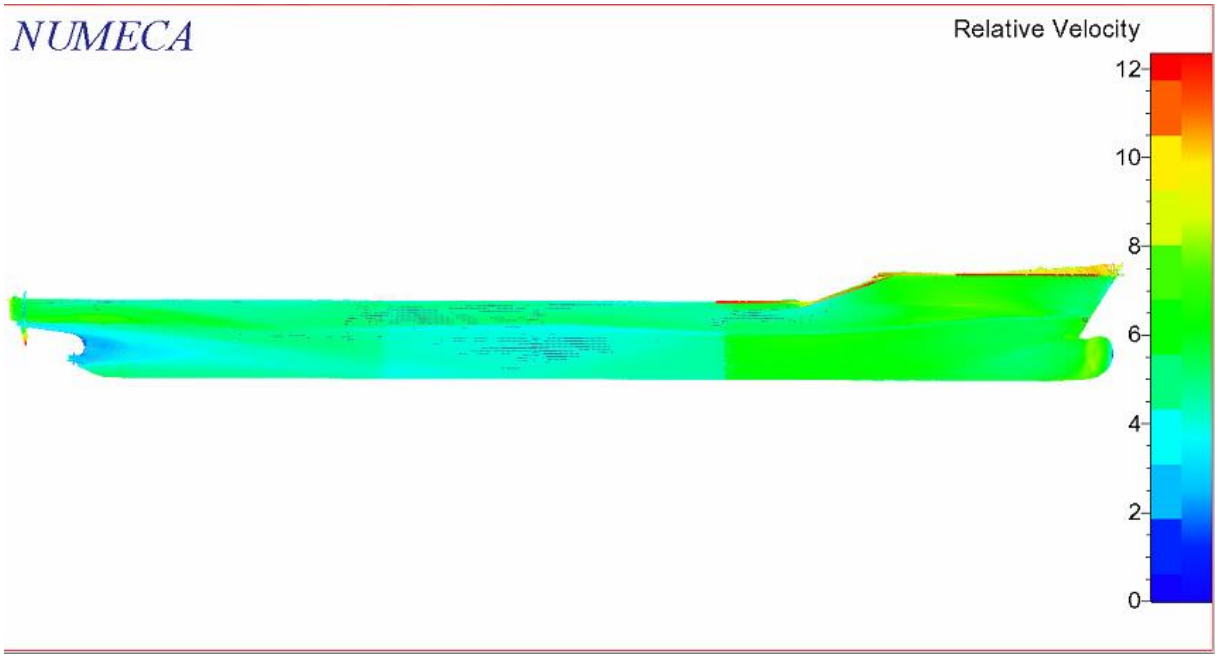
2. KRISO *Container Ship Rough Condition* QQQ (Q = 325 µm)



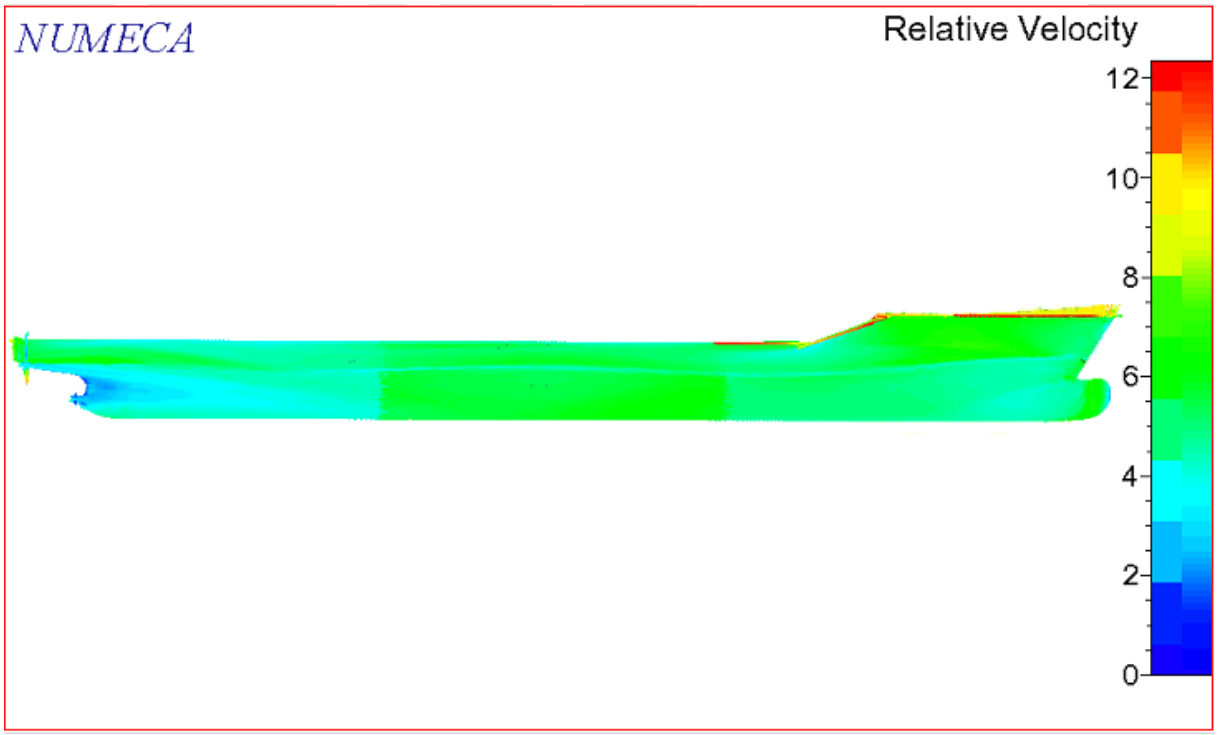
3. KRISO *Container Ship Rough Condition* PQR



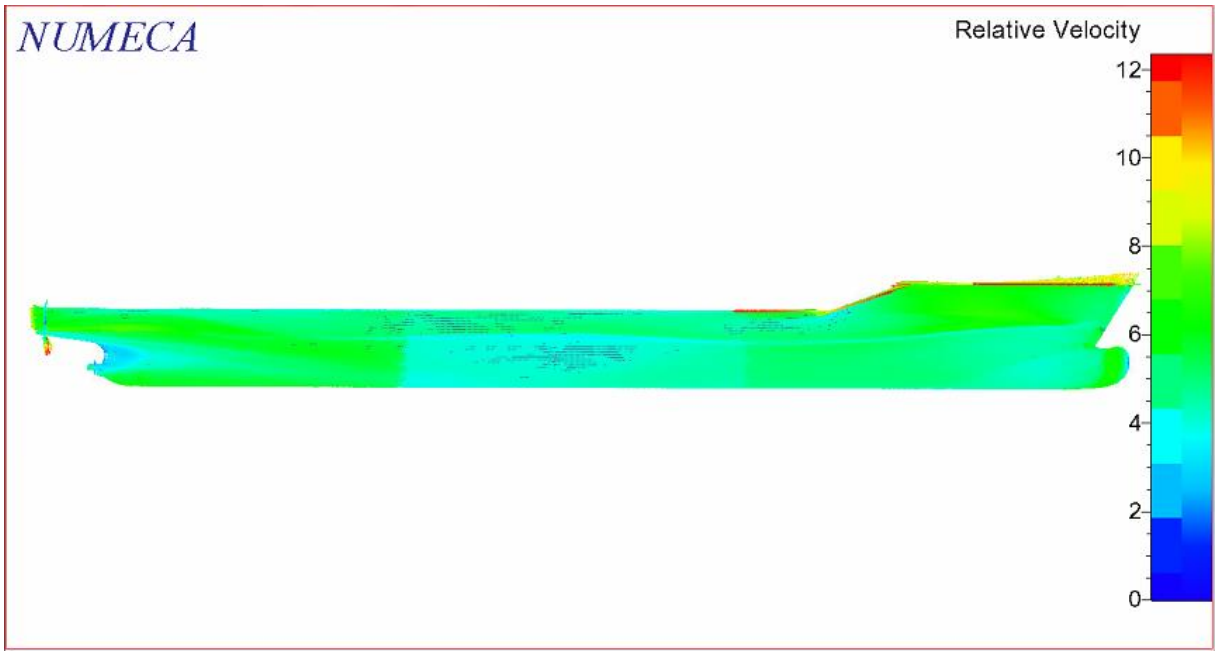
4. KRISO *Container Ship Rough Condition* PRQ



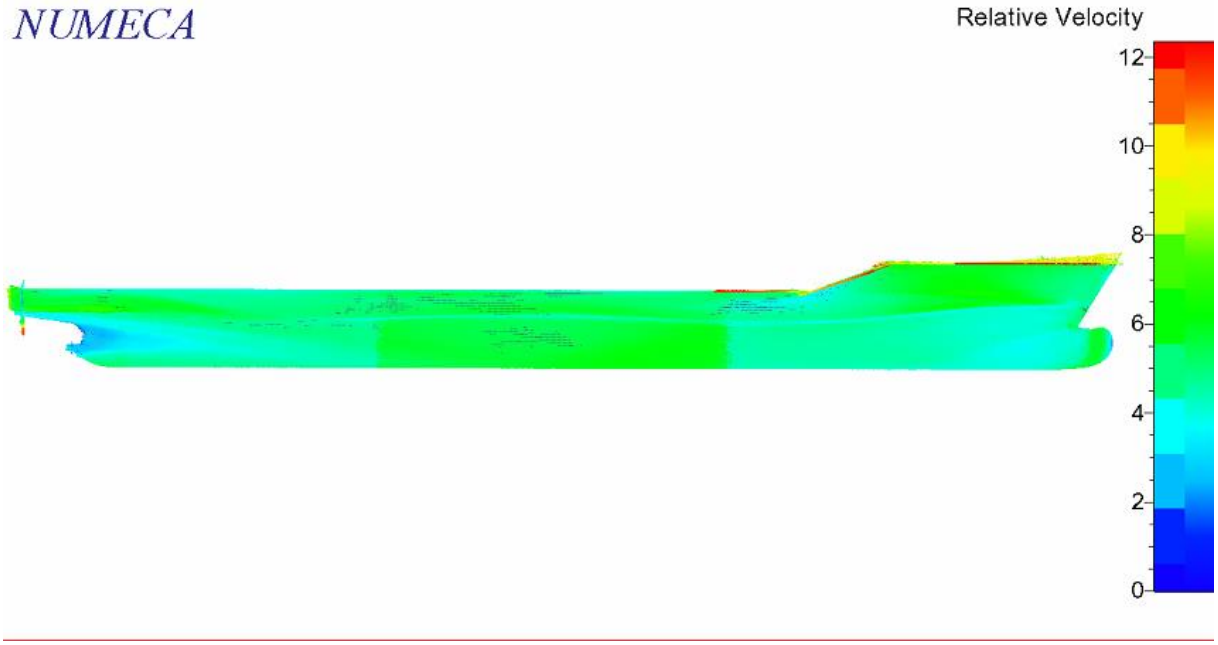
5. KRISO *Container Ship Rough Condition* QPR



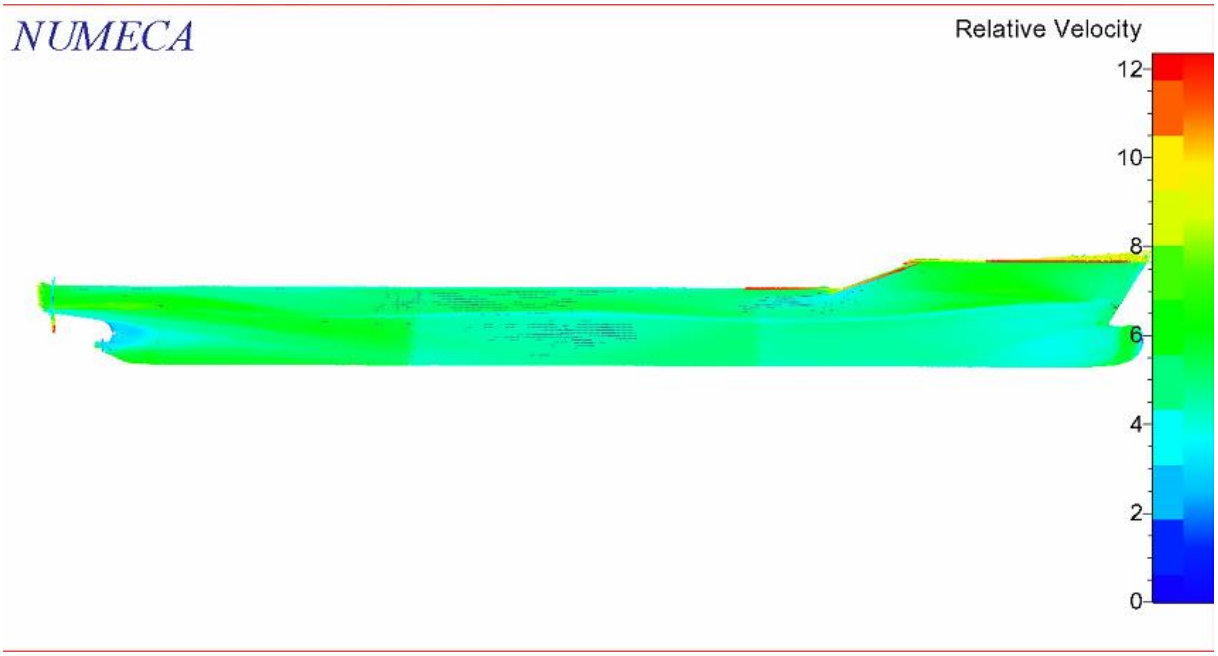
6. KRISO *Container Ship Rough Condition* QRP



7. KRISO *Container Ship Rough Condition* RPQ



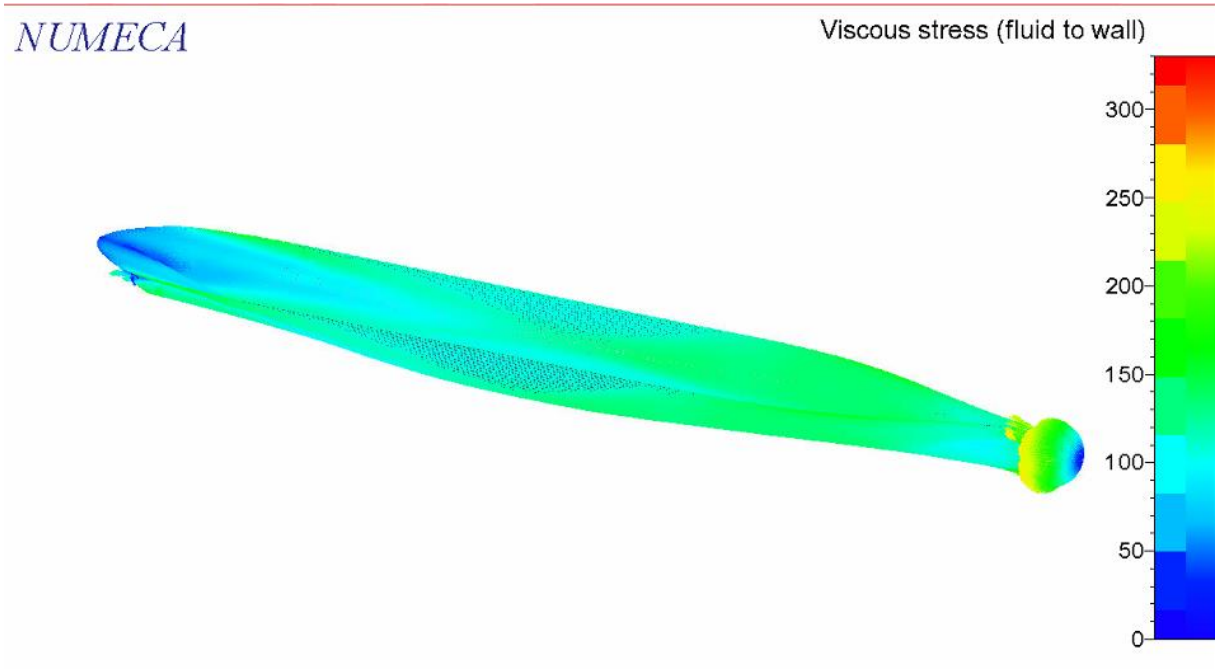
8. KRISO *Container Ship Rough Condition* RQP



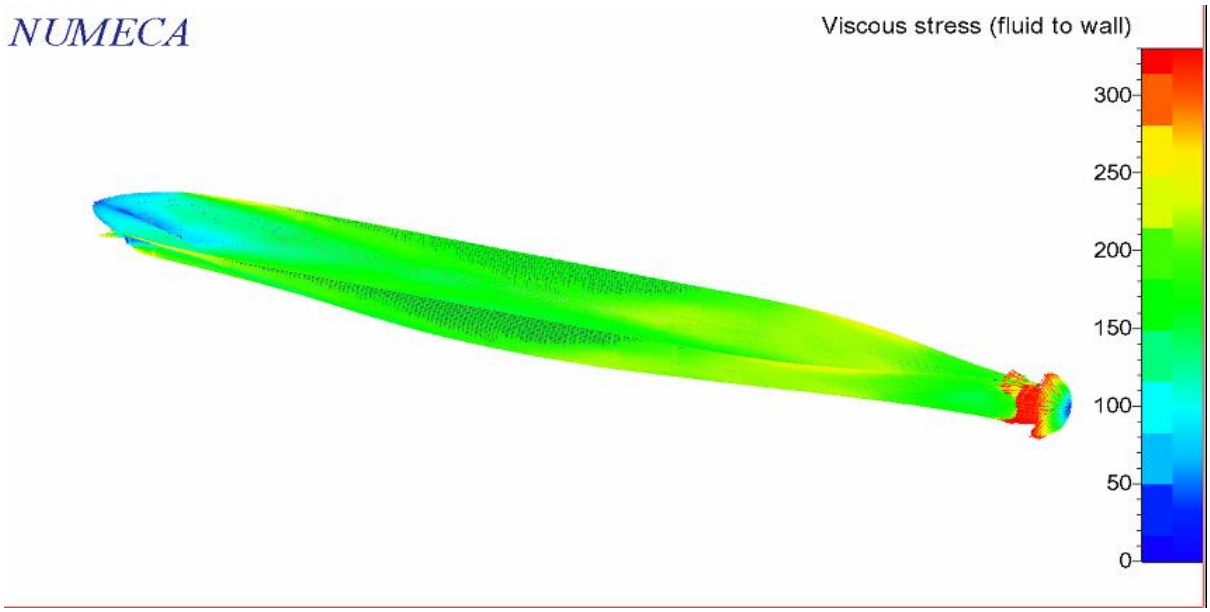
LAMPIRAN E *Visualization of Viscous Stress Full Viscous Condition*

Catatan : Lampiran ini menjelaskan hasil visualisasi *monitoring view* dari *Viscous Stress* kapal KCS dengan kecepatan dinas 24 knot (*Reynolds Number* = 2.73 × 10^9) dalam kondisi *full viscous*. Warna mengindikasikan sebagai ketercapaian tegangan sesuai dengan ketinggian kekasaran yang disimulasikan.

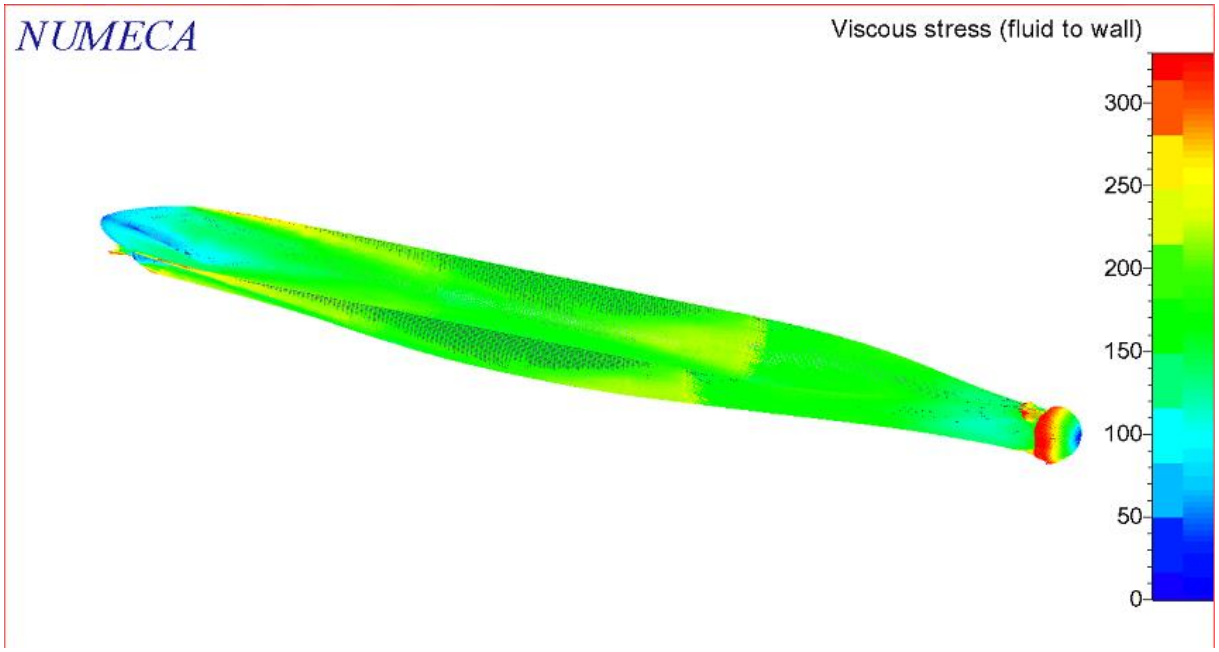
1. KRISO *Container Ship Smooth Condition* SSS (S = 0 µm)



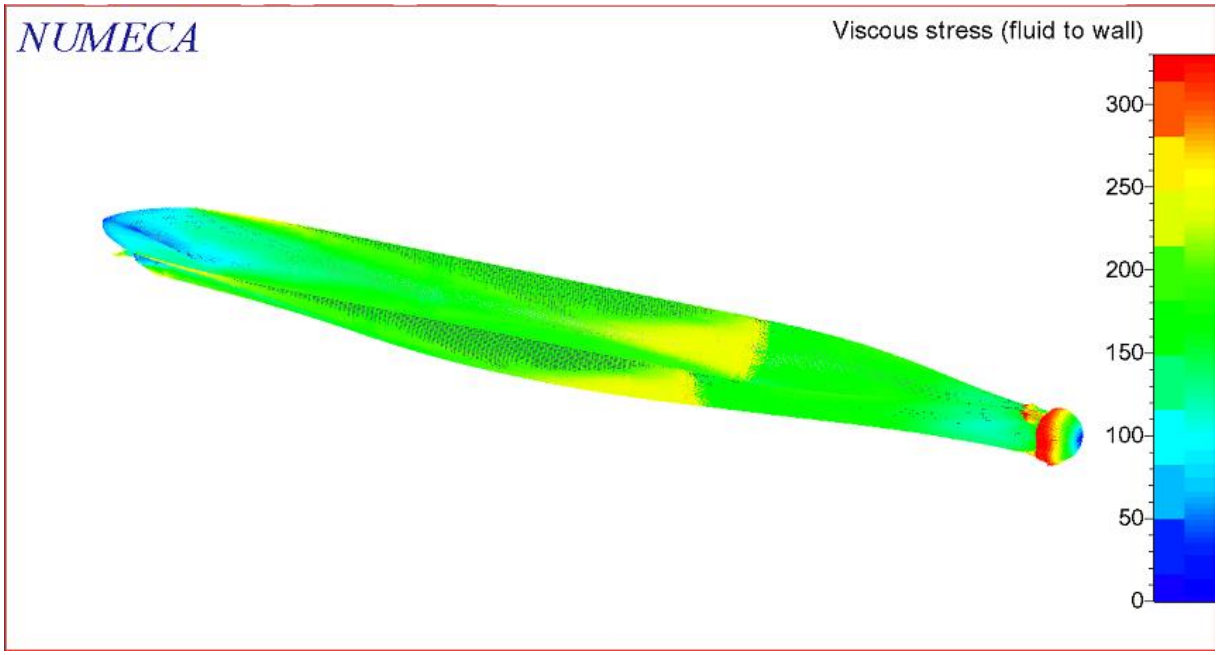
2. KRISO *Container Ship Rough Condition* QQQ (Q = 325 µm)



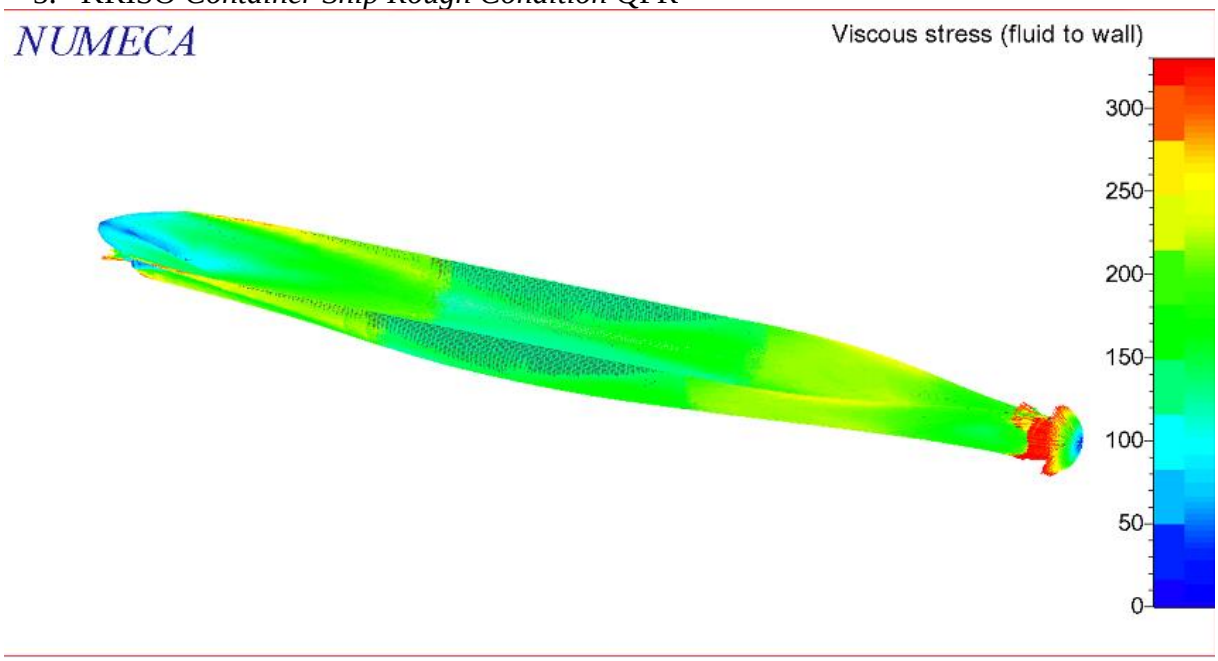
3. KRISO *Container Ship Rough Condition* PQR



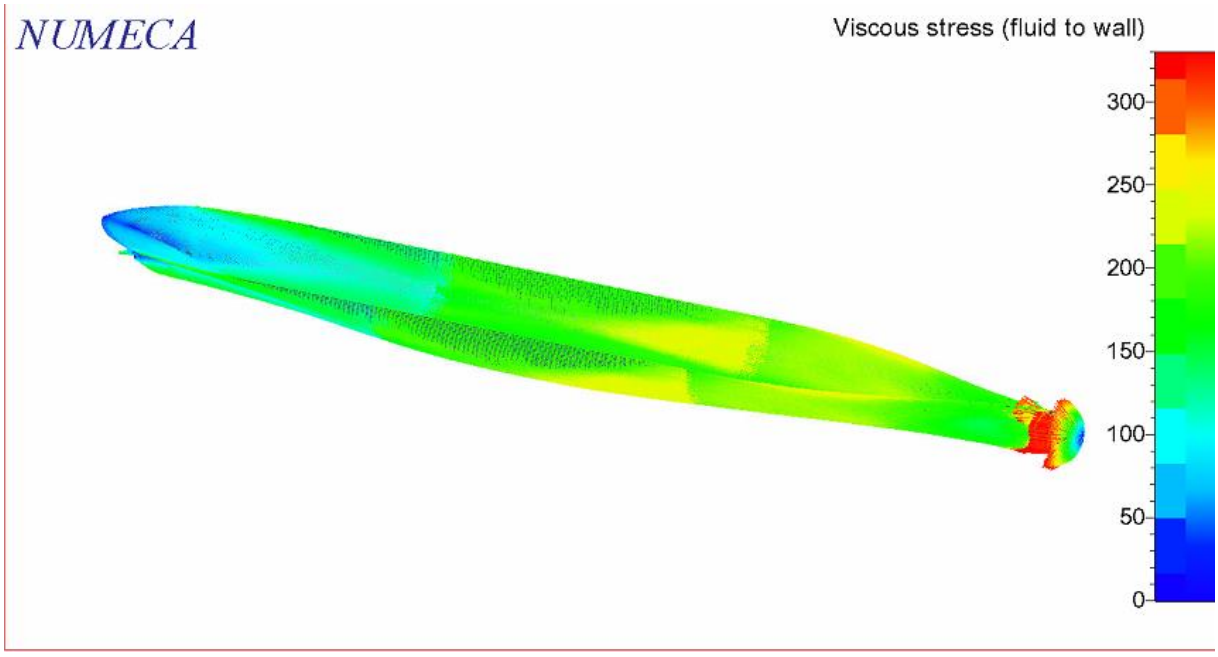
4. KRISO *Container Ship Rough Condition* PRQ



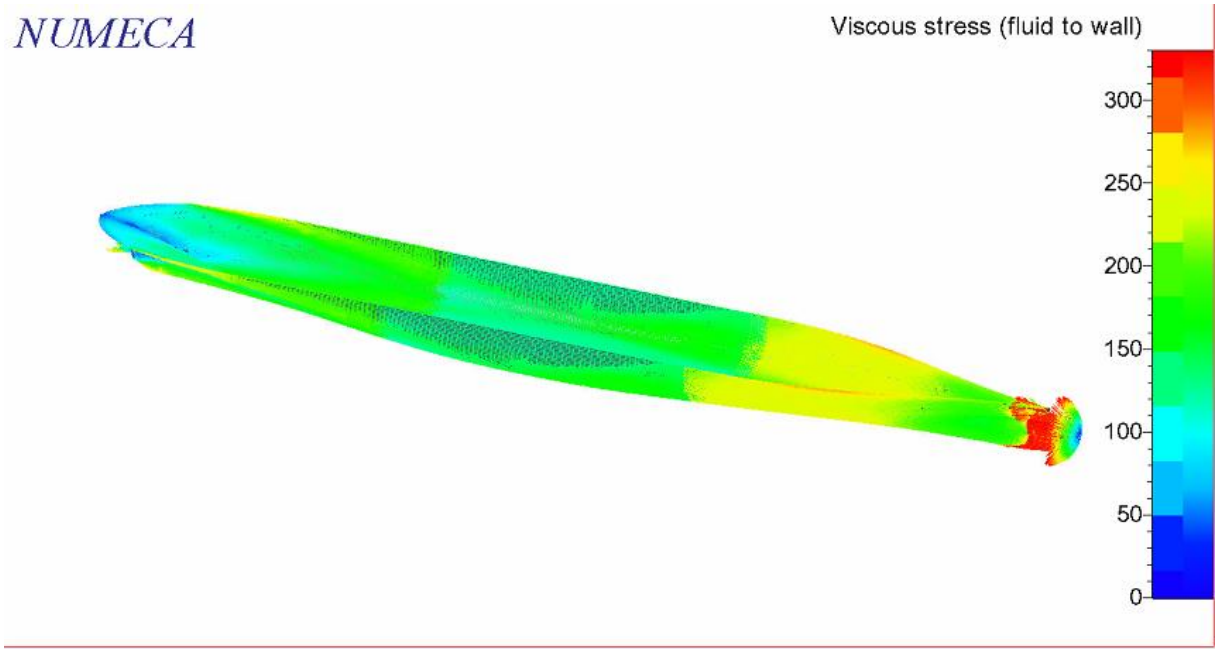
5. KRISO *Container Ship Rough Condition* QPR



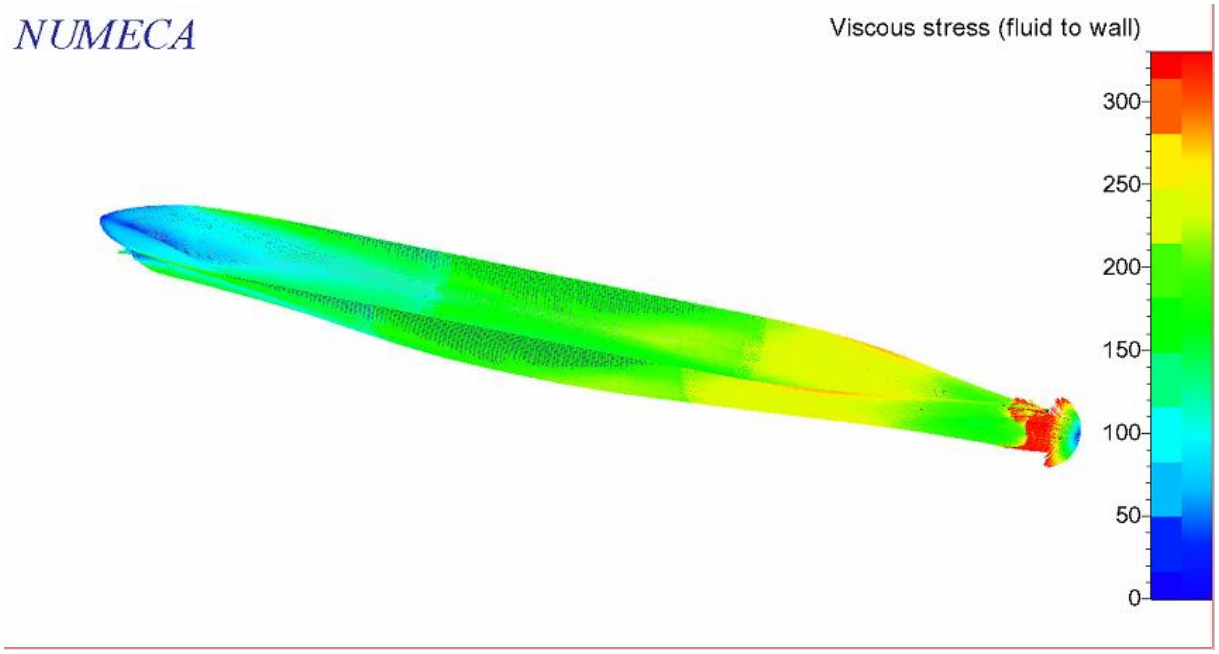
6. KRISO *Container Ship Rough Condition* QRP



7. KRISO *Container Ship Rough Condition* RPQ



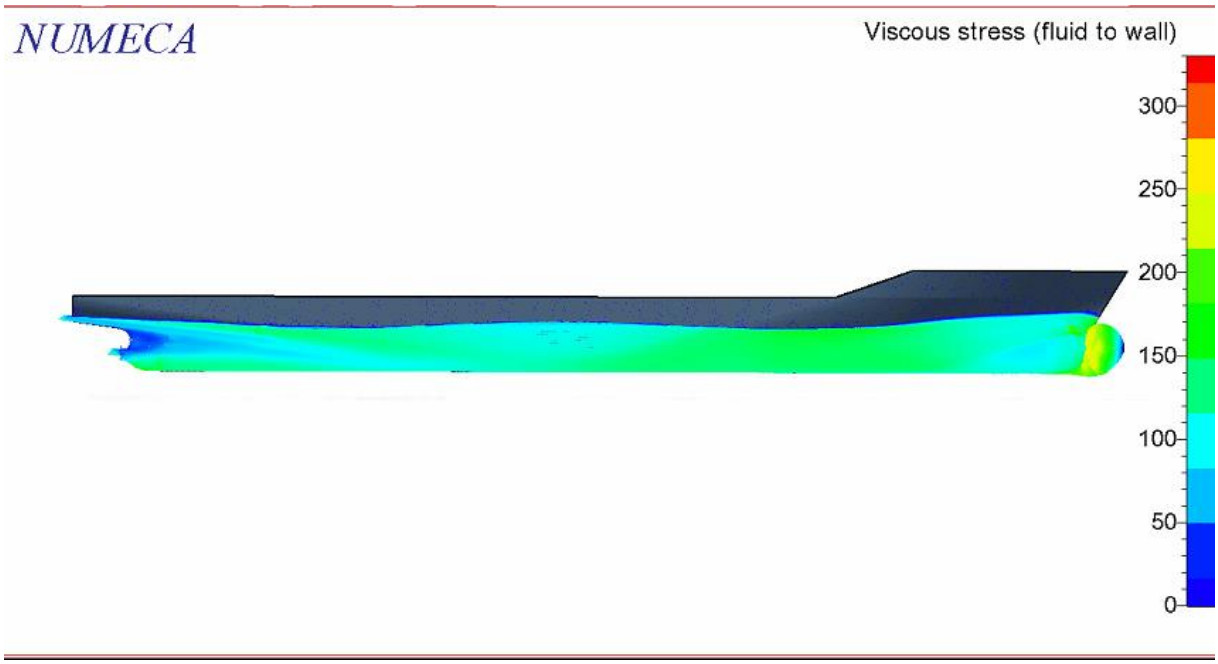
8. KRISO *Container Ship Rough Condition* RQP



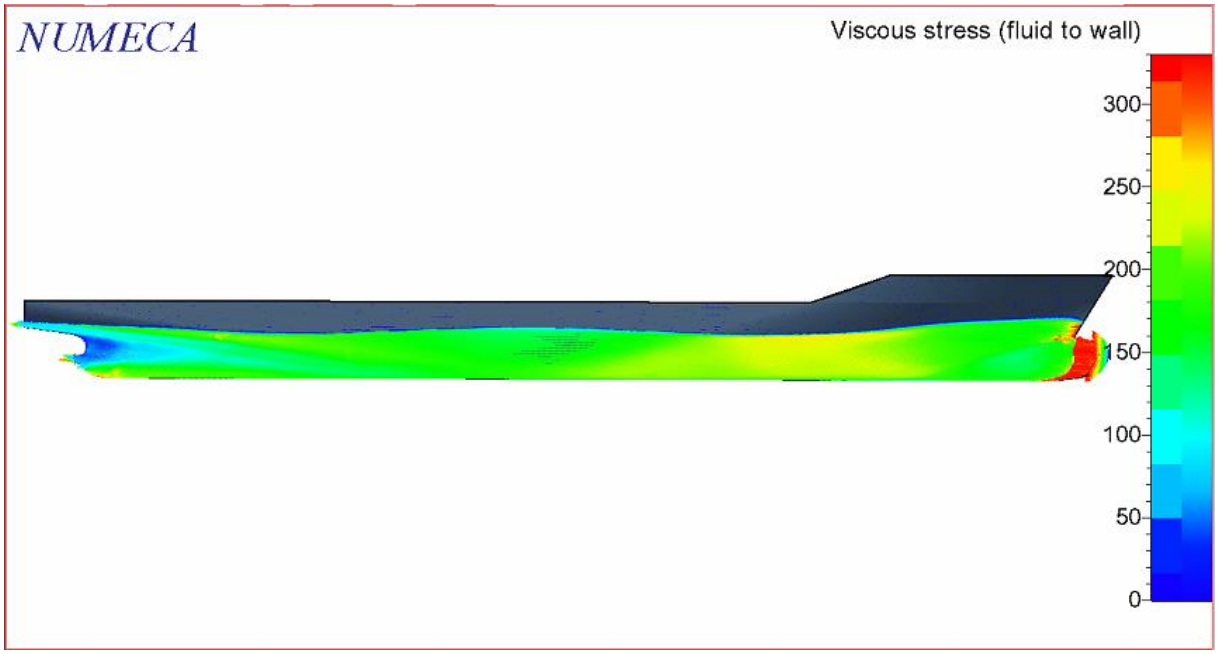
LAMPIRAN F *Visualization of Viscous Stress Free Surface Condition*

Catatan : Lampiran ini menjelaskan hasil visualisasi *monitoring view* dari *Viscous Stress* kapal KCS dengan kecepatan dinas 24 knot (*Reynolds Number* = 2.73×10^9) dalam kondisi *free surface*. Warna mengindikasikan sebagai ketercapaian tegangan sesuai dengan ketinggian kekasaran yang disimulasikan.

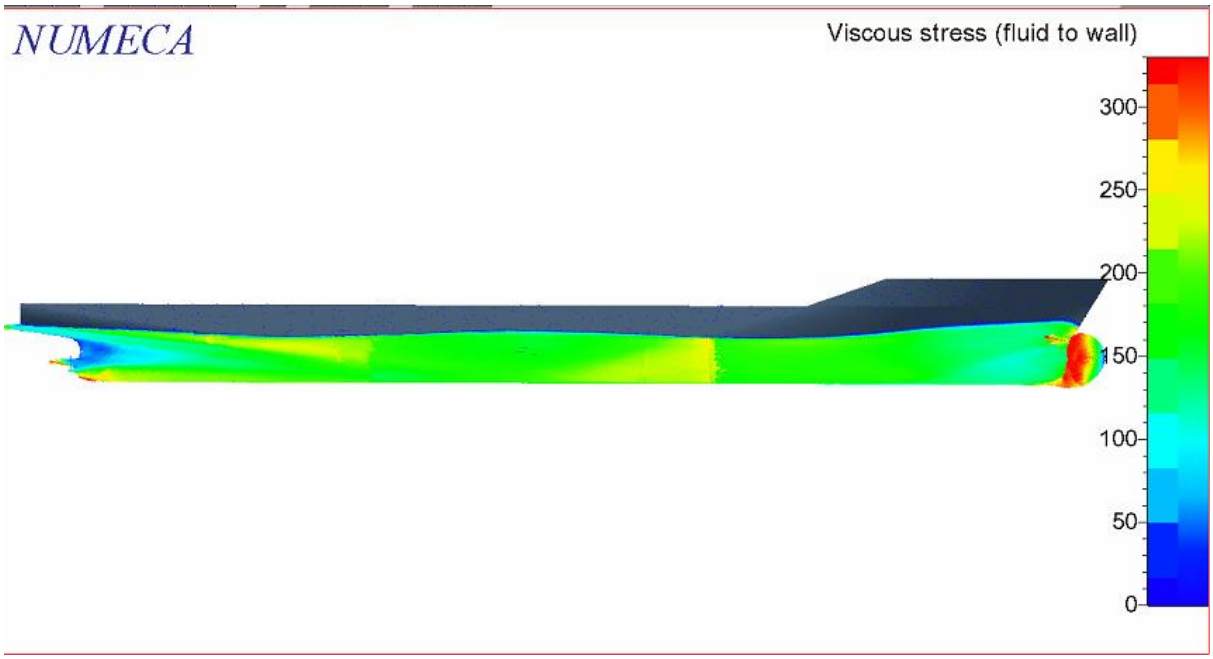
1. KRISO *Container Ship Smooth Condition* SSS (S = 0 µm)



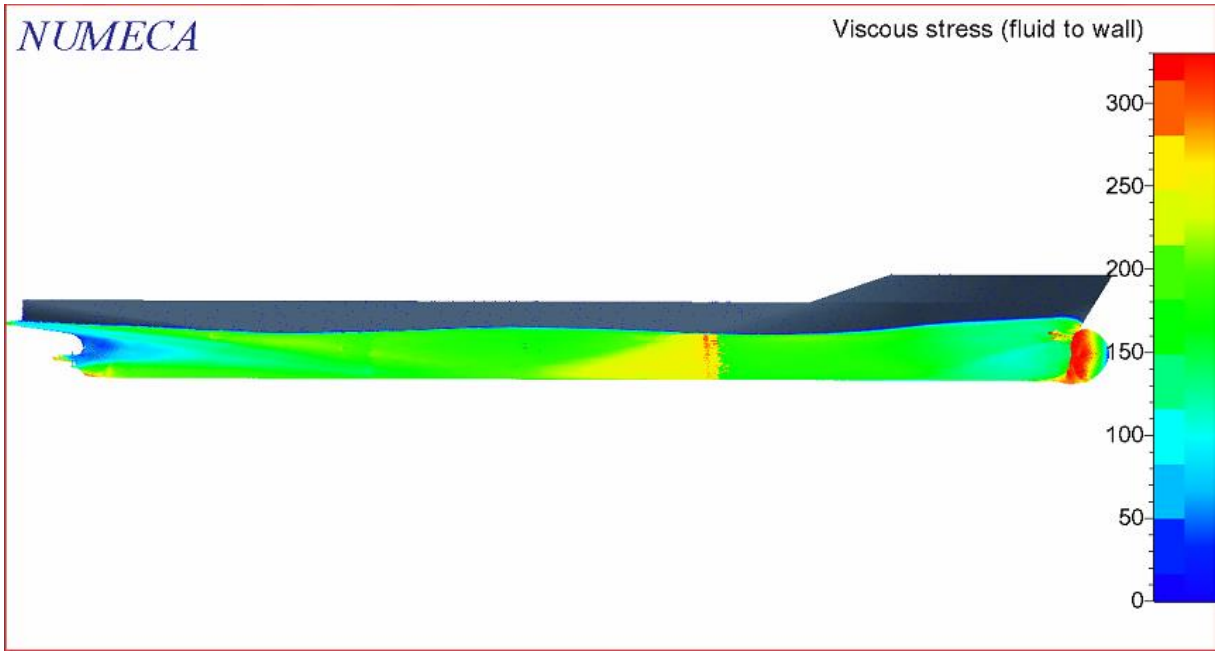
2. KRISO *Container Ship Rough Condition QQQ (Q = 325 µm)*



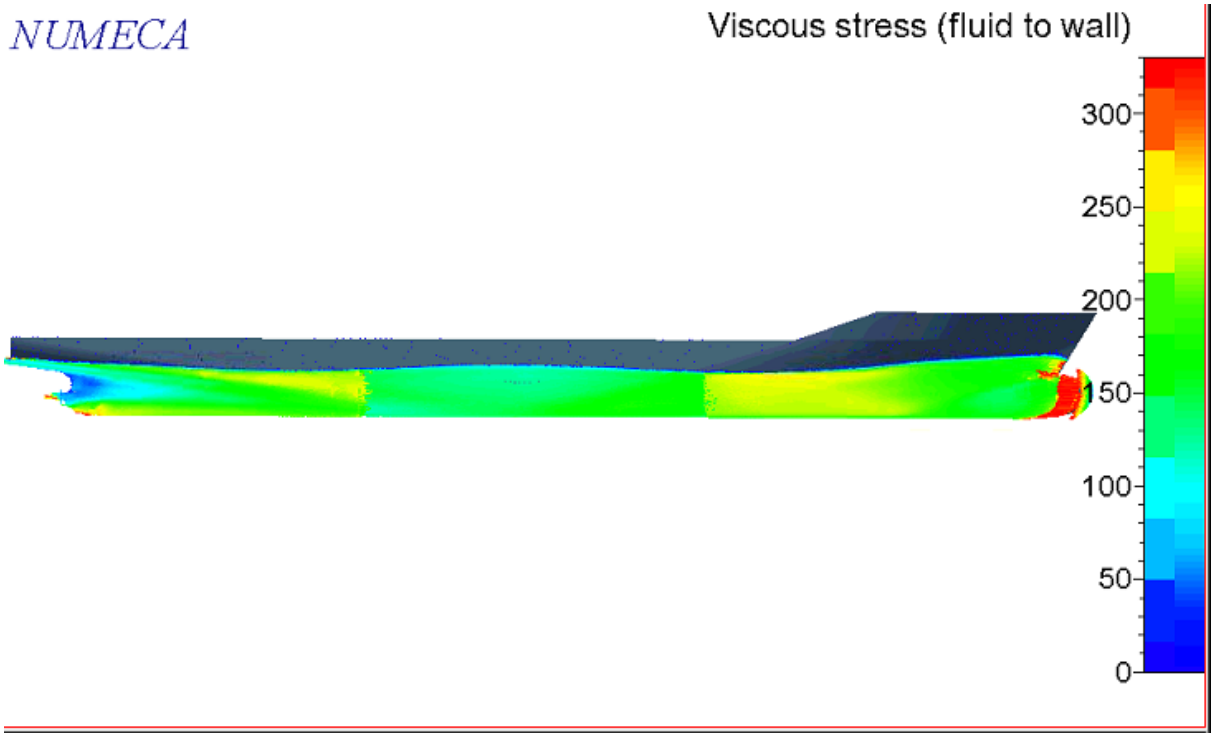
3. KRISO *Container Ship Rough Condition* PQR



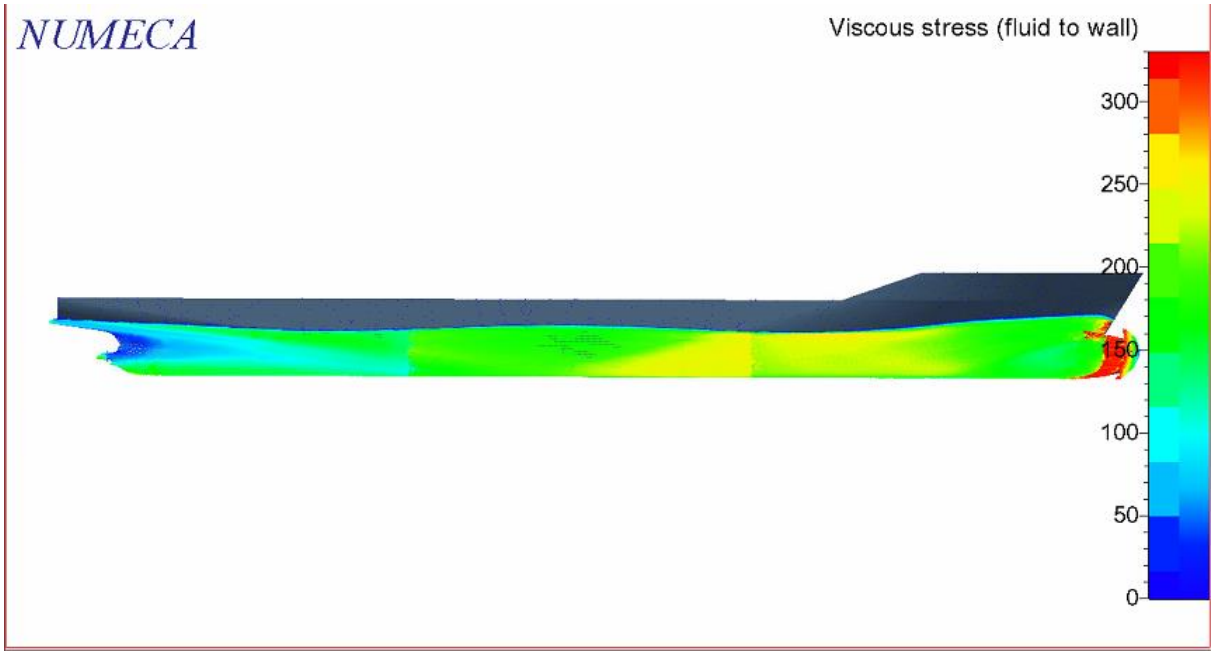
4. KRISO *Container Ship Rough Condition* PRQ



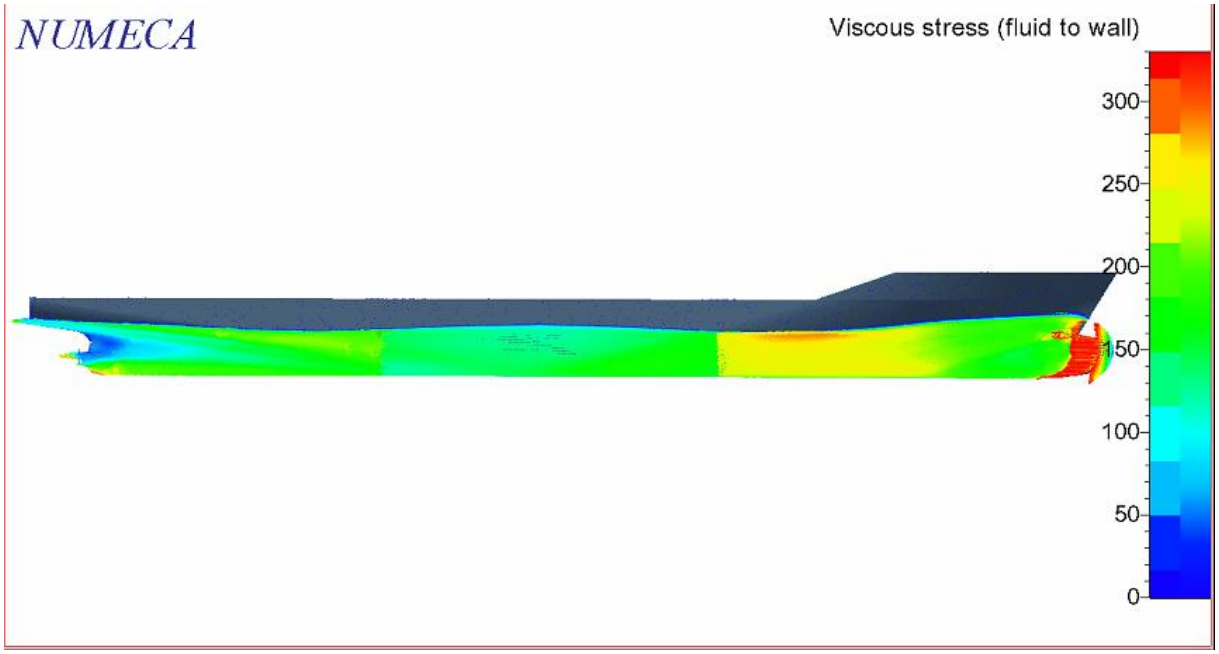
5. KRISO *Container Ship Rough Condition* QPR



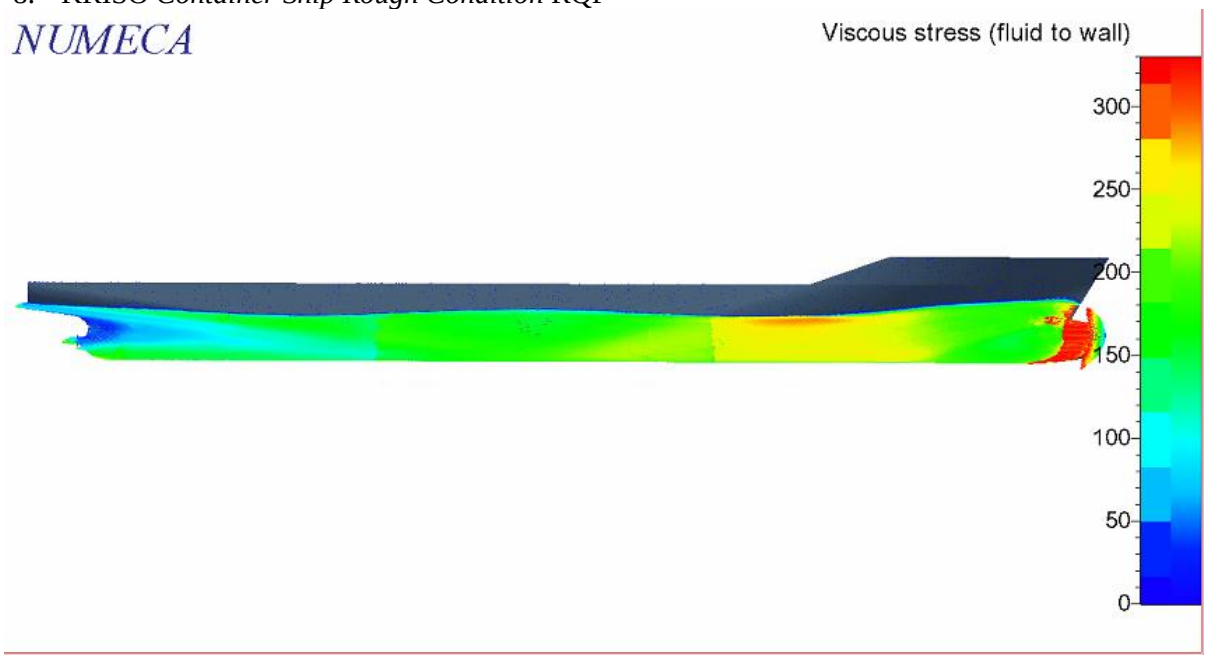
6. KRISO *Container Ship Rough Condition* QRP



7. KRISO *Container Ship Rough Condition* RPQ



8. KRISO *Container Ship Rough Condition* RQP



BIODATA PENULIS

Hani Thalib, itulah nama lengkap penulis. Dilahirkan di Pasuruan pada 13 Juli 1999 silam dari pasangan bapak dr. Abdul Hakim Thalib dan Ibu Tri Prihartini, Penulis merupakan anak pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Baitul Makmur, kemudian melanjutkan ke SDN Mulyoagung 3 dilanjutkan ke SDN Percobaan 2, SMPN 6 Malang dan SMAN 9 Malang. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS pada tahun 2017 melalui jalur SBMPTN tulis dengan paket IPC.

Di Departemen Teknik Perkapalan Penulis mengambil Bidang Studi Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS. Selain kuliah, dalam organisasi Penulis pernah menjadi staf Kastrat HIMATEKPAL periode 2018/2019, staf magang Kaderisasi JMMI periode 2018, middle JMMI periode 2019/2020, serta pernah menjadi Kepala Biro Kepemanduan BEM FTK ITS periode 2020. Penulis juga pernah mengikuti kepanitiaan seperti Pemangku Peradaban Gerigi 2019, staf Dialog Interaktif SAMPAN 2018 dan 2019, serta pernah menjadi Kelompok Pelaksana Pemungutan Suara Presiden BEM ITS periode 2018/2019.

Email: hanithalib9@gmail.com/hani.17041@mhs.its.ac.id

Halaman ini sengaja dikosongkan