



TUGAS AKHIR (ME43300)

**KAJIAN NUMERIK PENGARUH *VORTEX GENERATOR*
FINS DAN *WAKE EQUALIZING DUCT* PADA KAPAL
KONTAINER 913 TEUS**

Tegar Nanindra Pangestu
NRP. 0322040050

DOSEN PEMBIMBING
BURNIADI MOBALLA, S.T., M.Sc., Ph.D.
Ir. SYAFIUDDIN, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PERMESINAN KAPAL
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026



PPNS POLITEKNIK
PERKAPALAN
NEGERI SURABAYA

TUGAS AKHIR (ME43300)

**KAJIAN NUMERIK PENGARUH *VORTEX GENERATOR*
FINS DAN *WAKE EQUALIZING DUCT* PADA KAPAL
KONTAINER 913 TEUS**

Tegar Nanindra Pangestu
NRP. 0322040050

DOSEN PEMBIMBING
BURNIADI MOBALLA, S.T., M.Sc., Ph.D.
Ir. SYAFIUDDIN, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI D4 TEKNIK PERMESINAN KAPAL
JURUSAN TEKNIK PERMESINAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA
2026

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**KAJIAN NUMERIK PENGARUH *VORTEX GENERATOR FINS* DAN
WAKE EQUALIZING DUCT PADA KAPAL KONTAINER 913 TEUS**

Disusun Oleh:
Tegar Nanindra Pangestu
0322040050

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal
Jurusan Teknik Permesinan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 7 Juli 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

1. Ir. Syafiuddin, S.T., M.T.
2. Burniadi Moballa, S.T., M.Sc., Ph.D.
3. Dr. Eng. Muh. Anis Mustaghfirin, S.T., M.T.
4. Niki Veranda Agil Permadi, S.Tr.T., M.Sc.

NIDN/NUPTK

(0013108705)
(0011097908)
(0005087206)
(1758776677130172)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Dosen Pembimbing

1. Burniadi Moballa, S.T., M.Sc., Ph.D.
2. Ir. Syafiuddin, S.T., M.T.

NIDN

(0011097908)
(0013108705)

Tanda Tangan

(.....)
(.....)

Menyetujui
Ketua Jurusan,

Mengetahui
Koordinator Program Studi,


Dr. Purwanto Setiawan, S.T., M.T.
NIP.197708192005011001


Dr. Agung Purwana, S.T., M.T.
NIP.19761125005011003

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Tegar Nanindra Pangestu

NRP. : 0322040050

Jurusan/Prodi : Teknik Permesinan Kapal/D4 – Teknik Permesinan Kapal

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa:

Tugas Akhir yang akan saya kerjakan dengan judul:

Kajian Numerik Pengaruh *Vortex Generator Fins* dan *Wake Equalizing Duct* Pada Kapal Kontainer 913 TEUs.

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut, maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 14 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,




(Tegar Nanindra Pangestu)

NRP. 0322040050

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas kasih, berkat dan penyertaan-Nya yang selalu nyata bagi penulis sehingga dapat menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir ini dengan judul **“Kajian Numerik Pengaruh *Vortex Generator Fins* dan *Wake Equalizing Duct* Pada Kapal Kontainer 913 TEUs”** sesuai dengan harapan penulis.

Tugas Akhir ini dilaksanakan dan disusun untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan sebagai Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T.) pada Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Oleh karena itu, sebagai penghargaan dari penulis kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga yang selalu mendukung yaitu ayah, ibu, paman dan kedua adik penulis yang turut memberikan bantuan baik moril maupun materil dan menjadi motivasi penulis untuk menyelesaikan studi di PPNS ini.
2. Bapak Burniadi Moballa, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, arahan dan pencerahan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Syafiuddin, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah bersedia pula membimbing, mengarahkan dan memberikan pencerahan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Rachmad Tri Soelistijono, S.T., M.T. selaku Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
5. Bapak Dr. Ir. Priyo Agus Setiawan, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
6. Bapak Dr. Agung Purwana, S.T., M.T. selaku Koordinator Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
7. Ibu Lely Pramesti, S.T., M.T. selaku Koordinator Tugas Akhir Program Studi D4-Teknik Permesinan Kapal yang telah bekerja keras mengarahkan seluruh mahasiswa peserta Tugas Akhir dari awal sampai akhir.

8. Seluruh jajaran Bapak/Ibu dosen pengajar, *staff* dan tenaga pendidik di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan pelajaran moral kepada penulis selama menempuh studi.
9. Rektivianto Yoewono, selaku vokalis *The S.I.G.I.T* dalam menghadapi persiapan proposal TA lewat memberikan semangat dan menemani penulis mengerjakan proposalnya dari karya lagunya yaitu "*Black Amplifier*".
10. Personil Morfem, yang melalui lagu "Rayakan Pemenang" mengajarkan bahwa penulis yang dulu dipandang sebelah mata dan dianggap aneh bisa membuktikan diri lewat kerja keras dan konsistensi. Semangat itu menjadi motivasi bagi penulis untuk terus melangkah meski sempat diragukan, hingga akhirnya mampu menuntaskan Tugas Akhir ini.
11. Teman seperbimbingan yaitu Isma Rizki Riadi yang bersama-sama mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir dengan penulis.
12. Keluarga Besar *Marine Engineering 2022* yang selalu membantu, mendukung, dan berjuang bersama-sama selama menempuh studi di Jurusan Teknik Permesinan Kapal.
13. Pihak-pihak lainnya yang terkait dan tidak dapat disebutkan satu persatu yang membantu penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis sangat menerima dan terbuka untuk menerima kritik dan saran yang membangun terkait Laporan Tugas Akhir ini sebagai bentuk perbaikan untuk mengembangkan penelitian yang akan dilakukan. Harapan penulis adalah Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi kepada rekan-rekan sekalian, pembaca dan tentunya untuk pengembangan teknologi kemaritiman yang ada.

Surabaya, 14 Agustus 2026



Tegar Nanindra Pangestu

KAJIAN NUMERIK PENGARUH *VORTEX GENERATOR FINS* DAN *WAKE EQUALIZING DUCT* PADA KAPAL KONTAINER 913 TEUS

Tegar Nanindra Pangestu

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pemasangan *Vortex Generator Fins* (VGF) dan *Wake Equalizing Duct* (WED) terhadap karakteristik aliran di buritan kapal, hambatan kapal, serta efisiensi propulsi pada kapal kontainer 913 TEUs menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Model kapal dibuat menggunakan perangkat lunak permodelan tiga dimensi, kemudian dilakukan proses *meshing* dan simulasi numerik menggunakan OpenFOAM. Sebelum analisis utama dilakukan, simulasi divalidasi melalui uji *grid independence* dengan tiga variasi ukuran *mesh*, yaitu *coarse*, *medium*, dan *fine*. Analisis dilakukan terhadap distribusi *wake*, kontur *skin friction coefficient*, *streamline*, hambatan kapal, serta parameter efisiensi propulsi berupa *Quasi-Propulsive Coefficient* (η_D). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai hambatan *bare hull* hasil simulasi memiliki deviasi sebesar 2,38–3,86% terhadap data acuan sehingga model numerik dinilai cukup valid. Pemasangan VGF mampu memperbaiki pola aliran di buritan dengan menunda terjadinya separasi aliran sehingga distribusi *wake* menuju *propeller* menjadi lebih merata. Kombinasi VGF dan WED memberikan peningkatan efisiensi propulsi dibandingkan penggunaan WED saja. Berdasarkan hasil simulasi, konfigurasi V3 menghasilkan performa terbaik dengan nilai *Quasi-Propulsive Coefficient* sebesar sekitar 0.551. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kombinasi VGF dan WED mampu meningkatkan kualitas aliran di buritan kapal dan memberikan peningkatan efisiensi propulsi pada kapal kontainer 913 TEUs.

Kata kunci: *Computational Fluid Dynamics*, *Vortex Generator Fins*, *Wake Equalizing Duct*, *meshing*, Hambatan Kapal, Efisiensi Propulsi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF VORTEX GENERATOR FINS AND WAKE EQUALIZING DUCT ON A 913 TEU CONTAINER SHIP

Tegar Nanindra Pangestu

ABSTRACT

This study aims to investigate the effects of *Vortex Generator Fins (VGF)* and a *Wake Equalizing Duct (WED)* on the stern flow characteristics, Ship resistance, and propulsion efficiency of a 913 TEU container Ship using Computational Fluid Dynamics (CFD). The Ship geometry was developed using three-dimensional Modeling software, followed by mesh generation and numerical simulations using *OpenFOAM*. Prior to the main analysis, a grid independence study was conducted using coarse, medium, and fine mesh configurations to validate the numerical model. The analysis focused on wake distribution, skin friction coefficient contours, streamlines, Ship resistance, and propulsion performance represented by the *Quasi-Propulsive Coefficient (η_D)*. The simulation results show that the bare-hull resistance agrees well with the reference data, exhibiting deviations of only 2,38–3,86% indicating satisfactory numerical accuracy. The installation of VGF improves the stern flow by delaying flow separation and producing a more uniform wake distribution toward the propeller. Furthermore, the combination of VGF and WED provides better propulsion performance than the WED alone. Among all tested configurations, V3 demonstrates the best overall performance with a *Quasi-Propulsive Coefficient* of approximately 0.551. It can be concluded that the combined application of VGF and WED effectively improves stern flow characteristics and enhances the propulsion efficiency of the 913 TEU container Ship.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Vortex Generator Fins, Wake Equalizing Duct, Meshing, Ship Resistance, Propulsion Efficiency.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT	v
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT.....	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat Penelitian Tugas Akhir	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Studi Pendahuluan.....	7
2.2 <i>Vortex Generator Fins</i> (VGF)	13
2.3 <i>Wake Equalizing Duct</i> (WED)	15
2.4 Bilangan <i>Reynolds</i>	15
2.5 Koefisien Tahanan Gesek	16
2.6 Koefisien Tahanan Viskos.....	16
2.7 Tahanan Gesek	17
2.8 Tahanan Viskos.....	17
2.9 Tahanan Gelombang	18
2.10 Tahanan Total	18
2.11 Karakteristik <i>Propeller</i> dan <i>Inflow</i>	19
2.12 <i>Wake Fraction</i> , <i>Thrust Deduction</i> , dan Efisiensi Lambung.....	20
2.13 Efisiensi <i>Behind Hull</i>	21
2.14 <i>Quasi Propulsive Coefficient</i> (QPC)	21
2.15 Persamaan Dasar dan Model CFD	22
2.15.1 Persamaan RANS	22
2.15.2 Persamaan <i>Volume of Fluid</i> (VOF).....	23

2.15.3	Model Turbulensi (<i>Standard k-ϵ</i>)	24
2.16	<i>Software</i> Desain dan Simulasi.....	25
2.16.1	AutoCAD	25
2.16.2	Maxsurf	25
2.16.3	SolidWorks	25
2.16.4	OpenFOAM.....	25
2.16.5	ParaView	26
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		27
3.1	Diagram Alir Penelitian	27
3.2	Identifikasi Awal.....	28
3.2.1	Identifikasi dan Perumusan Masalah	28
3.2.2	Penetapan Tujuan.....	28
3.3	Pengumpulan Data.....	28
3.4	Pemilihan Model Numerik.....	29
3.5	Pembuatan Model 3D	29
3.6	Domain Fluida, <i>Pre-processor</i> dan <i>Meshing</i>	29
3.7	<i>Setup</i> Simulasi.....	30
3.8	Validasi Model Dengan Hasil <i>Open-Water Test</i>	31
3.9	Studi Parameter	31
3.10	Evaluasi Hasil Simulasi	32
3.11	Kesimpulan dan Saran	32
3.12	<i>Timeline</i> Penelitian	33
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		35
4.1	Data Kapal dan Referensi Uji model.....	35
4.2	Permodelan <i>Vortex Generator Fins</i> (VGF).....	36
4.3	Validasi Model Numerik.....	38
4.3.1	Pembentukan <i>Domain</i>	38
4.3.2	Pembuatan <i>Mesh</i>	39
4.3.3	Hasil Validasi Pada <i>Bare Hull</i>	41
4.4	Studi Parameter	43
4.4.1	Penambahan VGF	43
4.4.2	Perhitungan Nilai <i>n</i>	50
4.4.3	Perhitungan Koefisien <i>Thrust</i>	52
4.4.4	Perhitungan Koefisien <i>Torque</i>	54
4.4.5	Perhitungan Efisiensi <i>Behind</i>	56

4.4.6	Perhitungan Efisiensi Lambung	58
4.4.7	Perhitungan QPC (<i>Quasi-Propulsive Coefficient</i>).....	60
4.4.8	Analisis Performa <i>Propeller</i> Pada Lambung Dengan VGF	62
4.4.9	Analisis Performa <i>Propeller</i> Pada Lambung Dengan WED & VGF 64	
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		67
5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran	68
DAFTAR PUSTAKA		69
LAMPIRAN		71
BIOGRAFI PENULIS		119

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Separasi yang masih terjadi meskipun WED dipasang.....	2
Gambar 2.1 <i>Container ship with appendages</i>	7
Gambar 2.2 <i>Axisymmetric body geometry showing boattail configuration and geometric parameters</i>	8
Gambar 2.3 <i>Vortex Generator Fins (VGF)</i>	14
Gambar 2.4 Bentuk eksposur VGF pada buritan kapal	14
Gambar 2.5 <i>Wake Equalizing Duct (WED)</i>	15
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	28
Gambar 4.1 <i>Modelling hull</i>	35
Gambar 4.2 Konfigurasi pemasangan VGF-V4 pada model 3D (SolidWorks) (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4.....	38
Gambar 4.3 Pembuatan <i>Domain</i>	39
Gambar 4.4 <i>Meshing</i> (a) tampak atas, (b) <i>appendages</i> , (c) tampak depan, (d) tampak belakang	40
Gambar 4.5 Detail <i>meshing</i> pada permukaan VGF di buritan kapal (ParaView)..	41
Gambar 4.6 Grafik <i>hull R_V (resistance viscous)</i> (a) <i>course</i> , (b) <i>medium</i> , (c) <i>fine</i> .	43
Gambar 4.7 Perbandingan R_T <i>bare hull</i> + VGF CFD dan R_T <i>bare hull</i> + VGF + WED CFD antar variasi <i>mesh</i> terhadap acuan R_T tervalidasi (ITTC/CSSRC).....	47
Gambar 4.8 Kontur C_F <i>magnitude</i> dan <i>streamline hull (course)</i>	48
Gambar 4.9 Kontur C_F <i>magnitude</i> dan <i>streamline</i> (a)–(d) : VGF : V1-V4.....	48
Gambar 4.10 Kontur C_F <i>magnitude</i> dan <i>streamline</i> (a)–(d) : VGF + WED : V1-V4	49
Gambar 4.11 Kontur C_F <i>magnitude</i> dan <i>streamline</i> (a)–(d) : VGF + Prop : V1-V4	49
Gambar 4.12 Kontur C_F <i>magnitude</i> dan <i>streamline</i> (a)–(d) : VGF + WED + Prop : V1-V4.....	50
Gambar 4.13 Kontur UX pola aliran pada kondisi <i>hull</i> + VGF + <i>propeller</i> (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4	63
Gambar 4.14 Kontur UX pola aliran pada kondisi <i>hull</i> + VGF + WED + <i>propeller</i> (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4.....	65
Gambar 4.15 Konfigurasi nilai n (rad/s).....	66
Gambar 4.16 Konfigurasi nilai η_D	66

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	10
Tabel 3.1 <i>Device specifications</i>	30
Tabel 3.2 Format Tabel Validasi Hasil Simulasi	31
Tabel 3.3 <i>Timeline</i>	33
Tabel 4.1 Variasi konfigurasi pemasangan VGF yang diuji	37
Tabel 4.2 Variasi <i>blockmesh</i>	39
Tabel 4.3 Perbandingan R_V <i>bare hull</i> CFD terhadap R_V model <i>test</i> CSSRC – kondisi kapal + VGF (tanpa WED dan <i>propeller</i>)	41
Tabel 4.4 Perbandingan R_T <i>bare hull</i> + VGF CFD terhadap R_T model <i>test</i> CSSRC	44
Tabel 4.5 Perbandingan R_T <i>bare hull</i> + VGF CFD + WED terhadap R_T model <i>test</i> CSSRC	44
Tabel 4.6 Data utama perhitungan tahanan pada sarat desain	44
Tabel 4.7 Perhitungan <i>form factor</i> (k) dengan beberapa metode empiris	46
Tabel 4.8 T_{prop} dan R_T model CFD – kondisi VGF + <i>propeller</i> (tanpa WED)	62
Tabel 4.9 Tabel pola aliran pada kondisi <i>hull</i> + VGF + <i>propeller</i>	63
Tabel 4.10 T_{prop} dan R_T model CFD – kondisi VGF + WED + <i>propeller</i>	64
Tabel 4.11 Tabel pola aliran pada kondisi <i>hull</i> + VGF + WED + <i>propeller</i>	65

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Strategi IMO (*International Maritime Organization*) tahun 2023 mengenai pengurangan emisi GHG (*Greenhouse Gas*) dari kapal (MEPC.377(80)) menyebutkan bahwa pada tahun 2018 pelayaran internasional menyumbang sekitar 2,89% emisi GHG global yang berasal dari aktivitas manusia, dan tanpa kebijakan tambahan porsi ini diperkirakan dapat meningkat hingga sekitar 90–130% dari level 2008 pada tahun 2050. Untuk membalik tren tersebut, IMO menargetkan penurunan intensitas karbon (CO₂ per kerja angkut) sekurang-kurangnya 40% pada 2030 dibandingkan tahun 2008, bersamaan dengan penurunan emisi tahunan Total sedikitnya 20% (dengan upaya menuju 30%) pada 2030 dan 70% (dengan upaya menuju 80%) pada 2040 relatif terhadap tahun 2008. Strategi ini juga menetapkan bahwa pada 2030 sedikitnya 5% energi yang digunakan pelayaran internasional harus berasal dari teknologi, bahan bakar, dan sumber energi dengan emisi nol atau mendekati nol, dengan ambisi untuk menaikkannya menuju 10%, serta bahwa emisi GRK dari pelayaran internasional harus mencapai kondisi *net-zero* sekitar tahun 2050 (15, 2023; Zanne *et al.*, 2025).

Pelaksanaan strategi tersebut dituangkan dalam MARPOL Annex VI yang mengatur efisiensi energi kapal baru maupun kapal yang sudah beroperasi (*existing Ships*). Indeks seperti EEXI (*Energy Efficiency existing Ship Index*) digunakan untuk menghitung efisiensi energi kapal *existing* yang telah dicapai, dimana mencerminkan efisiensi "teknis" atau "desain" kapal. Kapal dengan kinerja kurang baik perlu melakukan perbaikan agar tetap diperbolehkan beroperasi dan tidak terbebani kewajiban finansial tambahan. Bagi kapal *existing*, langkah perbaikan ini tidak selalu harus berupa penggantian mesin utama yang mahal; pengaturan operasi, perbaikan cara berlayar, dan pemasangan *Energy Saving Devices* (ESD) menjadi pilihan yang lebih realistis (Rongcai *et al.*, 2022)

Dalam praktiknya, upaya pemasangan *Energy Saving Devices* (ESD) seperti *Wake Equalizing Duct* (WED) saja pada kapal kontainer 913 TEUs belum

memberikan hasil optimal seperti pada Gambar 1.1 dibawah. Pengamatan operasional menunjukkan konsumsi bahan bakar kapal masih tinggi dan, yang lebih bermasalah, kecepatan kapal tidak naik meski RPM mesin ditingkatkan. Ini menandakan bahwa aliran buritan kapal masih terganggu, padahal WED sudah dipasang. Akibatnya, efisiensi propulsi kapal belum mencapai potensi maksimalnya, padahal hal ini kritis untuk memenuhi target EEXI dan standar emisi IMO yang semakin ketat.



Gambar 1.1 Separasi yang masih terjadi meskipun WED dipasang

Pada analisis yang sudah dilakukan, penyebab utamanya adalah separasi aliran masih terjadi di buritan meskipun WED terpasang. Separasi ini terjadi ketika aliran tidak lagi mengikuti permukaan lambung dan "terlepas" dari dinding, menciptakan zona aliran balik yang menurunkan efisiensi. Secara visual, garis aliran hilang sebelum mencapai *propeller* atau tanda klasik separasi. Fenomena ini meningkatkan tahanan gesekan, menghasilkan distribusi kecepatan tidak seragam di depan *propeller*, dan akhirnya menurunkan efisiensi lambung. WED mampu meratakan puncak *wake*, tapi tidak cukup untuk mengatasi separasi ini.

Untuk mengatasi keterbatasan WED tersebut, penelitian sebelumnya telah mengembangkan *Vortex Generator Fins* (VGF) sebagai perangkat pengendali aliran. VGF adalah sirip-sirip kecil yang membangkitkan vorteks untuk mencampur aliran lambat di dekat dinding dengan aliran cepat di atasnya. Yang dimana hasilnya, separasi tertunda, aliran lebih stabil, dan kecepatan menuju *propeller* meningkat. Namun, ada penelitian tentang VGF umumnya dilakukan secara terpisah dengan WED, seperti milik Heinke & Hellwig-Rieck, (2011) pada kapal kontainer desain baru, ada juga yang meneliti VGF saja pada kapal *bulker* atau

tanker, seperti Dymarski & Kraskowski, (2011). Kombinasi WED dan VGF secara detail pada kapal kontainer *existing* khususnya belum ada riset yang fokus pada kapal 913 TEUs dengan WED terpasang yang kemudian ditambah VGF untuk mengatasi separasi aliran yang masih terjadi.

Mengingat kapal 913 TEUs ini masih punya *problem* separasi meski WED dipasang, dan bukti ilmiah menunjukkan VGF bisa membantu, riset ini sangat *urgent*. Terlebih lagi, target IMO untuk penurunan emisi 40% pada 2030 dan *net-zero* pada 2050 membuat solusi retrofit murah seperti VGF menjadi pilihan strategis bagi operator kapal *existing*. Penelitian ini bertujuan menemukan konfigurasi VGF optimal untuk kapal kontainer 913 TEUs ini, sehingga dapat mengatasi separasi, memperbaiki *wake*, menurunkan tahanan, dan meningkatkan efisiensi. Hasil ini diharapkan tidak hanya membantu kapal ini, tetapi juga menjadi panduan bagi retrofit kapal-kapal sejenis di industri maritim.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, dalam penelitian ini diidentifikasi beberapa masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana model yang memenuhi kriteria validasi dan *grid independence*?
2. Bagaimana pola aliran fluida sebelum adanya pemasangan *Vortex Generator Fins*?
3. Bagaimana pola aliran fluida sesudah adanya pemasangan *Vortex Generator Fins*?
4. Bagaimana pengaruh pemasangan *Vortex Generator Fins* terhadap kinerja *propeller*?
5. Bagaimana pengaruh pemasangan *Vortex Generator Fins* terhadap nilai koefisien tahanan?
6. Bagaimana pola aliran fluida dengan adanya *Wake Equalizing Duct*?

1.3 Tujuan

Adapun yang ingin dicapai dari penelitian proyek Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

- 1 Menentukan model simulasi yang tervalidasi dan memenuhi kriteria *grid independence*.
- 2 Mengetahui pola aliran fluida sebelum pemasangan *Vortex Generator Fins*.

- 3 Mengetahui pola aliran fluida sesudah pemasangan *Vortex Generator Fins*.
- 4 Mengetahui pengaruh *Vortex Generator Fins* terhadap kinerja *propeller*.
- 5 Mengetahui pengaruh *Vortex Generator Fins* terhadap koefisien tahanan kapal.
- 6 Mengetahui pola aliran fluida di buritan kapal dengan pemasangan *Wake Equalizing Duct*.

1.4 Manfaat Penelitian Tugas Akhir

Adapun kontribusi yang dapat dicapai dari penelitian proyek Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagi Pembaca
Memberikan pemahaman yang lebih mudah tentang cara kerja dan pengaruh VGF terhadap aliran di buritan serta efisiensi propulsi kapal.
2. Bagi Mahasiswa
Menjadi rujukan singkat bagi mahasiswa yang ingin mempelajari penerapan ESD pada kapal niaga sebagai bahan Tugas Akhir atau penelitian lanjutan.
3. Bagi Instansi
Menambah bahan ajar dan contoh studi numerik terkini di bidang propulsi dan efisiensi energi kapal yang dapat dimanfaatkan dalam perkuliahan maupun praktikum.
4. Bagi Perusahaan
Memberikan gambaran awal mengenai potensi retrofit VGF untuk menghemat bahan bakar dan membantu memenuhi ketentuan efisiensi energi dan penurunan emisi GHG yang berlaku.

1.5 Batasan Masalah

Pada batasan masalah yang digunakan sebagai arah pada penelitian proyek Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian hanya membahas satu kapal kontainer *existing* 913 TEUs yang sudah terpasang WED, bukan jenis atau ukuran kapal lainnya.
2. Konfigurasi yang dibandingkan dibatasi pada dua kondisi, yaitu dengan VGF saja, dan dengan penambahan WED.
3. Masalah yang dikaji hanya seputar aliran di buritan, yaitu pola aliran, distribusi *wake*, separasi aliran, dan kaitannya dengan efisiensi lambung.

4. Analisis kinerja *propeller* dilakukan dalam kondisi uji *open-water test* dengan aliran *propeller* dimodelkan menggunakan pendekatan *Multiple Reference Frame* (MRF).
5. Kondisi operasi yang dianalisis adalah aliran *steady* pada kecepatan jelajah tertentu, jadi efek gelombang, angin, dan manuver tidak ikut dibahas.
6. Fluida diasumsikan air laut dengan sifat konstan, sehingga pengaruh perubahan temperatur, salinitas, dan lingkungan diabaikan.
7. Simulasi dilakukan tanpa permodelan gelombang (*no wave*), yaitu pada kondisi air tenang (*calm water*) tanpa permukaan bebas udara-air (lambung dimodelkan *fully submerged/double-body*), sehingga hambatan gelombang (*wave-making resistance*) dan pengaruh gelombang laut terhadap aliran serta kinerja *propeller* tidak termasuk dalam lingkup penelitian ini.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

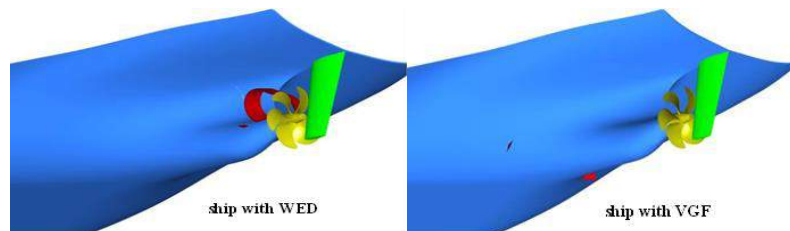
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Pendahulu

Pada bagian ini dibahas beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penggunaan *Energy Saving Device* (ESD) di daerah buritan kapal, khususnya *Vortex Generator Fins* (VGF), yang dianalisis menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) maupun uji model.

Heinke & Hellwig-Rieck, (2011) melakukan investigasi efek skala pada kapal kontainer yang dilengkapi *Wake Equalizing Duct* (WED) *Schneekluth* dan *Vortex Generator Fins* (VGF) seperti Gambar 2.1, dengan membandingkan hasil uji model fisik dan perhitungan skala penuh menggunakan CFD berbasis RANS. Studi tersebut menunjukkan bahwa pemasangan WED dan VGF mampu meratakan distribusi *wake* di bidang *propeller*, mengurangi puncak *wake* di bagian atas *disk*, menurunkan *effective wake fraction* dan *thrust deduction*, serta mengurangi kavitasi dan fluktuasi tekanan di buritan.



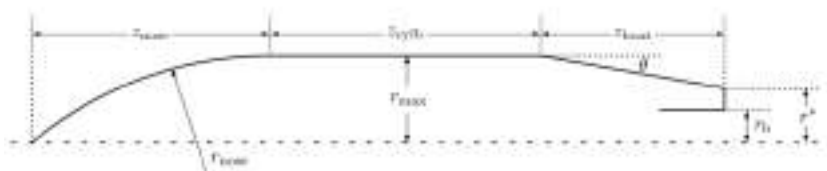
Gambar 2.1 *Container ship with appendages*
(Heinke & Hellwig-Rieck, 2011)

Kelompok studi lain menyoroti sisi desain dan parameter VGF, di mana Ahmed *et al.*, (2014) meneliti *low-profile vortex generators* pada lambung model DTMB 5415 dan melaporkan bahwa konfigurasi dengan tinggi sekitar 10–20% ketebalan *boundary layer* lokal dan jarak *trailing edge* tertentu dari awal zona tekanan tinggi dapat menurunkan komponen tekanan viskos tanpa peningkatan friksi yang besar. Konfigurasi di luar rentang tersebut justru meningkatkan tahanan Total, sehingga rasio h/δ dan parameter $\Delta X_{VG}/h$ menjadi parameter utama dalam desain VGF. Reduksi tahanan viskos mencapai 2–3% untuk beberapa konfigurasi,

namun konfigurasi di luar rentang tersebut justru meningkatkan tahanan Total , menunjukkan sensitivitas tinggi hasil terhadap parameter desain VGF.

Dymarski & Kraskowski, (2011) menggunakan *Vortex Generator Fins* berbentuk trapezoidal yang dipasang pada skeg kapal niaga besar, seperti *car carrier* dan *bulk carrier*, untuk membentuk ulang aliran di buritan dan meningkatkan kecepatan *inflow* menuju *propeller*. Melalui kombinasi simulasi CFD dan uji eksperimen, mereka menunjukkan bahwa VGF dapat menghilangkan zona kecepatan rendah yang tidak diinginkan dan menaikkan kecepatan aksial rata-rata di bidang *propeller* lebih dari 10–13%, yang secara teoritis berpotensi menurunkan daya propulsi yang dibutuhkan. Di sisi lain, keberadaan *fin* itu sendiri menambah tahanan lambung sekitar 0,4–3%, sehingga keuntungan bersih tidak otomatis besar dan harus dinilai dari keseimbangan antara perbaikan *wake* dan tambahan tahanan tersebut, terutama ketika VGF akan diterapkan pada kapal *existing*.

Sejalan dengan itu, Mirzaei & Arabi, (2005) memberikan perspektif dari sisi geometri buritan dengan mengoptimasi *drag* pada *axisymmetric afterbody* dengan *base bleed* menggunakan persamaan *Navier–Stokes* kompresibel dan model turbulensi $k-\epsilon$. *Drag Total* diuraikan menjadi *wave drag*, *skin friction drag*, dan *base drag*, kemudian sudut *boattail* dioptimasi dengan metode *Golden Section* untuk mendapatkan *drag* minimum pada *mach* 3 dan Re sekitar $6,5 \times 10^6$, dengan deviasi hasil numerik terhadap eksperimen kurang dari 1%. Studi ini menunjukkan bahwa perubahan geometri buritan *axisymmetric* secara sistematis dapat menurunkan *drag*, dan menjadi landasan konsep ketika merancang bentuk buritan dan perangkat pengendali aliran di sekitar *propeller*, contoh pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 *Axisymmetric body geometry showing boattail configuration and geometric parameters*

(Mirzaei & Arabi, 2005)

Studi eksperimental *vortex generator* untuk aplikasi hidrolis, terutama pada aliran yang merepresentasikan *inlet water jet* dan komponen sistem propulsi kapal. Tiga bentuk VG (*simple delta*, *wheeler low-profile*, dan *dome*) dibandingkan untuk melihat pengaruh geometri terhadap pola vorteks, karakteristik kavitasi, dan potensi erosi di sekitarnya. Hasilnya menegaskan bahwa desain VG hidrodinamik adalah kompromi antara peningkatan *mixing*, tambahan *drag*, dan risiko kavitasi erosif, sehingga pemilihan bentuk dan sudut serang harus sangat hati-hati (Environment & Press, 1995).

Seiring meningkatnya tuntutan dekarbonisasi, Mogilevsky, (2023) menyajikan model evaluasi tahanan kapal yang menggabungkan data uji model, perhitungan numerik, dan basis data *sea state* ERA5 untuk memprediksi tahanan tambahan dan memvalidasinya dengan hasil *sea trial*. Dalam konteks *vortex generator*, tesis ini merangkum studi-studi yang menunjukkan bahwa VG berpotensi menurunkan komponen *form factor* hingga mendekati 30% dari Total tahanan, sehingga diusulkan sebagai salah satu alat retrofit untuk mendukung dekarbonisasi, meskipun ukuran, bentuk, dan posisinya masih perlu dioptimasi lewat CFD dan uji model .

Konfigurasi *wedge vortex generator* pada *body axisymmetric* di *towing tank* dan CFD untuk melihat pengaruhnya terhadap *drag viskos*. Konfigurasi *wedge* VG dengan tinggi sekitar 25–30% ketebalan *boundary layer* lokal memberikan reduksi tahanan viskos sekitar 7,9% pada kecepatan 1,4 m/s, kemudian hasil tersebut diskalakan ke *bulk carrier* penuh menggunakan pendekatan *Holtrop–Mennen* untuk mengestimasi penghematan tahanan dan energi di rute operasi aktual. Studi ini menegaskan pentingnya penentuan geometri *wedge* VG dan rasio tinggi terhadap *boundary layer* dalam upaya reduksi *drag*, serta membuka peluang kajian lebih lanjut terhadap *wake fraction*, *thrust deduction*, kavitasi, dan vibrasi pada kondisi *self-propelled* (Kimmeth, 2025).

Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu pada Tabel 2.1 yang bisa mendukung untuk referensi Tugas Akhir:

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti / Tahun	Variabel Bebas	Variabel Terikat	Hasil	Gap Research
1.	Heinke & Hellwig-Rieck, (2011)	Konfigurasi apendase buritan (tanpa apendase, WED, WED + VGF <i>Schneekluth</i>) dan skala pengujian (model vs penuh) memakai CFD RANS SST dan uji model <i>towing tank</i> .	Distribusi <i>wake</i> , <i>effective wake fraction</i> , <i>thrust deduction</i> , serta koefisien tahanan-propulsi kapal (C_V , C_T) pada kondisi model dan penuh.	Kapal kontainer WED + VGF <i>Schneekluth</i> , CFD RANS SST dan uji model: VGF meratakan distribusi <i>wake</i> , turunkan <i>effective wake fraction</i> & <i>thrust deduction</i> .	Belum mengkaji kapal kontainer <i>existing</i> sekitar 913 TEUs dan belum menguji konfigurasi VGF spesifik untuk peningkatan efisiensi lambung kapal <i>existing</i> .
2.	Ahmed <i>et al.</i> , (2014)	<i>Low-profile</i> VGF tipe <i>delta</i> dan <i>slots</i> pada lambung DTMB 5415; tinggi sirip (0,1–0,2 tebal <i>boundary layer</i>) dan jarak terhadap zona tekanan tinggi.	koefisien tahanan gesek (C_F), koefisien tahanan tekanan viskos (C_{PV}), dan koefisien tahanan viskos Total (C_V).	<i>Low-profile</i> VGF pada lambung DTMB 5415, tinggi 10–20% <i>boundary layer</i> : Reduksi tekanan viskos, <i>viscous resistance</i> turun hingga 2–3%.	Belum diterapkan pada kapal kontainer niaga, belum dikombinasikan dengan WED, dan belum mengevaluasi langsung efisiensi lambung atau kebutuhan daya propulsi kapal <i>existing</i> .
3.	Dymarski & Kraskowski, (2011)	Konfigurasi <i>fins</i> trapezoidal (jumlah, ukuran,	Distribusi kecepatan aksial di	VGF trapezoidal di skeg kapal	Belum menilai secara rinci neraca antara

		sudut serang) sebagai VGF di skeg kapal niaga, diuji dengan CFD dan eksperimen.	<i>disk propeller</i> dan estimasi daya propulsi, yang berkaitan dengan kontribusi C_V terhadap koefisien tahanan Total (C_T) kapal.	niaga, CFD & eksperimen Kecepatan aksial rata-rata <i>disk propeller</i> naik >10%, potensi penurunan daya propulsi.	kenaikan tahanan lambung dan penurunan beban propulsi pada kapal kontainer <i>existing</i> dengan berbagai konfigurasi VGF.
4.	Mirzaei & Arabi, (2005)	Sudut <i>boattail</i> pada <i>axisymmetric body</i> serta ada/tidaknya <i>base bleed</i> , disimulasikan dengan CFD <i>Navier–Stokes</i> kompresibel + $k-\epsilon$, $Mach\ 3$, $Re = 6,5 \times 10^6$.	Total <i>drag</i> yang terurai menjadi koefisien tahanan gesek (C_F), koefisien tahanan gelombang (C_W), dan <i>base drag</i> , membentuk koefisien tahanan Total (C_T).	Menentukan sudut <i>boattail optimum</i> ($=7,9^\circ$ tanpa <i>base bleed</i> , $=6,2^\circ$ dengan <i>base bleed</i>) yang meminimalkan Total <i>drag</i> dengan deviasi numerik <1% terhadap eksperimen.	Fokus pada proyektil supersonik <i>axisymmetric</i> di udara, bukan aliran 3D viskos di buritan kapal kontainer dengan WED penambahan VGF pada rezim kecepatan rendah.

5.	Environment & Press, (1995)	Geometri VG (<i>simple delta, Wheeler low-profile, dome</i>) pada <i>water tunnel</i> untuk aplikasi <i>water jet inlet</i> .	Pola vorteks, <i>mixing</i> , dan potensi <i>cavitation</i> (belum dinyatakan sebagai koefisien C_F , C_V , C_W , C_T numerik).	Geometri VG sangat memengaruhi pola vorteks, <i>mixing</i> , dan kavitasi; <i>Wheeler</i> VG memberi <i>mixing</i> kuat dan mengangkat inti <i>vorteks</i> dari permukaan, tetapi sensitif terhadap perubahan sudut serang dan berpotensi memicu kavitasi erosif.	Tidak mengkaji VGF terintegrasi di buritan kapal kontainer dengan WED dan tidak menghubungkan efek VG dengan tahanan Total atau efisiensi lambung.
6.	Mogilevsky, (2023)	Kondisi <i>sea state</i> (data ERA5), tipe kapal, dan ukuran/bentuk/posisi <i>vortex generator</i> untuk reduksi <i>form factor</i> .	Tahanan Total kapal (<i>calm water</i> + <i>added resistance</i>) yang mencakup koefisien tahanan gesek (C_F) dan gelombang (C_W), dengan	model mampu memprediksi tahanan dan <i>added resistance</i> dengan baik dibanding <i>sea trial</i> ; secara teoritis VG diproyeksikan dapat menurunkan komponen tahanan <i>form factor</i> hingga mendekati	Tidak mensimulasikan aliran buritan detail kapal dengan WED penambahan VGF, dan tidak menghitung distribusi <i>wake</i> serta koefisien tahanan kapal kontainer <i>existing</i> berbasis CFD RANS tervalidasi <i>sea trial</i> .

			potensi reduksi hingga 30% dari koefisien tahanan Total (C_F).	30% dari Total tahanan.	
7.	Kimmeth, (2025)	Tinggi <i>wedge vortex generator</i> (25–30% tebal <i>boundary layer</i>) pada <i>body axisymmetric</i> , kecepatan model, dan <i>scaling</i> ke <i>bulk carrier</i> memakai Holtrop–Mennen.	koefisien tahanan gesek (C_F), form factor, reduksi tahanan viskos (%), dan estimasi tahanan Total (C_t) serta penghematan energi pada <i>bulk carrier</i> .	Konfigurasi <i>wedge VG</i> dengan tinggi =25–30% ketebalan <i>boundary layer</i> mengurangi <i>drag</i> viskos =7,9% pada 1,4 m/s; hasil diskalakan untuk mengestimasi penghematan tahanan dan energi pada operasi <i>bulk carrier</i> .	Fokus pada <i>body axisymmetric</i> dan <i>bulk carrier</i> tanpa WED; belum mengkaji kapal dengan WED penambahan VGF di buritan kapal kontainer <i>existing</i> dan belum mengaitkan langsung perubahan <i>wake</i> & separasi dengan efisiensi lambung.

Kajian-kajian tersebut menjadi landasan ilmiah dalam merumuskan konfigurasi VGF pada kapal kontainer yang diteliti, sekaligus membantu mengidentifikasi celah penelitian yang belum banyak dibahas, terutama terkait validasi terhadap data *sea trial* dan kaitannya dengan target efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca.

2.2 *Vortex Generator Fins* (VGF)

Vortex Generator Fins (VGF) adalah sirip kecil yang dipasang pada sudut tertentu terhadap garis aliran di permukaan skeg atau buritan untuk membangkitkan

vorteks streamwise yang menempel pada permukaan. *Vorteks* ini mencampur aliran lambat di dekat dinding dengan aliran cepat di luar *boundary layer*, sehingga dapat menunda separasi, mengubah bentuk *wake*, dan meratakan *inflow* ke *propeller*, berikut yang ditampilkan pada Gambar 2.3 (Ahmed *et al.*, 2014; Dymarski & Kraskowski, 2011; Saydam *et al.*, 2018).



Gambar 2.3 *Vortex Generator Fins* (VGF)
(Saydam *et al.*, 2018)

Sebagai tambahan referensi mengenai bentuk fisik VGF pada kapal uji, Gambar 2.4 berikut menunjukkan geometri sirip VGF yang terekspos pada bagian buritan/skeg kapal referensi, yang menjadi dasar perhitungan estimasi volume dan kebutuhan material pada studi terdahulu.

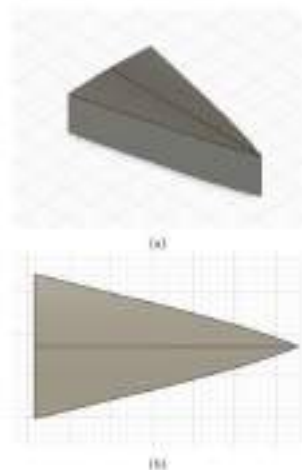


Figure 2.2: Actual exposed amount of VGF on hull 2

Gambar 2.4 Bentuk eksposur VGF pada buritan kapal
(Kimmeth, 2025)

2.3 *Wake Equalizing Duct (WED)*

Wake Equalizing Duct Schneekluth merupakan *duct* berbentuk sayap yang dipasang di depan *propeller* untuk mempercepat aliran di zona *wake peak* dan meratakan distribusi kecepatan di bidang *propeller*, berikut yang ditampilkan pada Gambar 2.5 (Heinke & Hellwig-Rieck, 2011).



Gambar 2.5 *Wake Equalizing Duct (WED)*

(De Jong, 2011)

2.4 *Bilangan Reynolds*

Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara gaya inersia dan gaya viskos pada aliran fluida. Nilai *Reynolds* digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik aliran yang terjadi pada permukaan lambung kapal. Dalam hidrodinamika kapal, nilai *Reynolds* menjadi parameter utama yang menentukan besarnya koefisien tahanan gesek berdasarkan rekomendasi ITTC.

Secara fisik, semakin besar nilai *Reynolds* maka pengaruh gaya viskos akan semakin kecil dibandingkan gaya inersia sehingga aliran cenderung turbulen. Pada kapal niaga modern, nilai *Reynolds* umumnya berada pada orde 10^8 hingga 10^9 .

Persamaan *Reynolds Number* dituliskan sebagai berikut:

$$R_e = \frac{V_S LWL}{\nu} \quad (2.1)$$

Keterangan:

R_e : *Reynolds Number*

V_s : Kecepatan kapal

LWL : Panjang garis air kapal

ν : Viskositas kinematik air

Dalam penelitian ini, nilai *Reynolds* digunakan sebagai parameter awal untuk menentukan nilai koefisien tahanan gesek kapal berdasarkan metode ITTC-1957 *Correlation Line*.

2.5 Koefisien Tahanan Gesek

Koefisien tahanan gesek merupakan parameter yang menunjukkan besarnya tahanan akibat interaksi langsung antara aliran fluida dan permukaan lambung kapal. Tahanan ini muncul akibat adanya tegangan geser yang bekerja pada lapisan batas (*boundary layer*) di sepanjang lambung.

Menurut ITTC, koefisien tahanan gesek dihitung menggunakan ITTC-1957 *Correlation Line*.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log^{10} R_e - 2)^2} \quad (2.2)$$

Keterangan:

C_F : Koefisien tahanan gesek

R_e : *Reynolds Number*

Persamaan ini digunakan karena telah menjadi standar internasional dalam prediksi tahanan kapal dan digunakan oleh hampir seluruh *towing tank* dunia.

2.6 Koefisien Tahanan Viskos

Koefisien tahanan viskos merupakan gabungan antara tahanan gesek dan tahanan tekanan viskos akibat bentuk lambung.

$$C_V = (1 + k) C_F \quad (2.3)$$

Form factor merupakan faktor koreksi yang digunakan untuk memperhitungkan pengaruh bentuk lambung terhadap tahanan viskos. Pada kondisi nyata, tahanan viskos tidak hanya berasal dari gesekan permukaan tetapi juga akibat distribusi tekanan yang dipengaruhi bentuk lambung.

Form factor dinyatakan melalui hubungan:

$$k = 0.028 + 3.30 \left[\frac{S}{LWL^2} \sqrt{C_B \frac{B}{LWL}} \right] \quad (2.4)$$

Keterangan:

C_V : Koefisien tahanan viskos

C_F : Koefisien tahanan gesek

k : *Form factor*

LWL : Panjang garis air kapal

S : WSA

C_B : Koefisien blok

B : Lebar

Koefisien ini digunakan untuk menghitung tahanan viskos kapal yang menjadi dasar analisis pengaruh pemasangan VGF terhadap performa hidrodinamika lambung. Nilai *form factor* dapat diperoleh menggunakan metode Grigson atau metode empiris lainnya.

2.7 Tahanan Gesek

Tahanan gesek merupakan komponen tahanan yang timbul akibat gesekan antara air dan permukaan lambung kapal.

$$R_F = \frac{1}{2} \times \rho \times V_S^2 \times S \times C_F \quad (2.5)$$

Keterangan:

R_F : Tahanan gesek

ρ : Massa jenis fluida

S : Luas permukaan basah kapal

V_S : Kecepatan kapal

C_F : Koefisien tahanan gesek

Besarnya tahanan gesek dipengaruhi oleh luas permukaan basah dan kecepatan kapal.

2.8 Tahanan Viskos

Tahanan viskos merupakan tahanan yang terdiri dari tahanan gesek dan tahanan tekanan akibat bentuk lambung.

$$R_V = \frac{1}{2} \times \rho \times V_S^2 \times S \times C_V \quad (2.6)$$

Keterangan:

R_V : Tahanan viskos

ρ : Massa jenis fluida

S : Luas permukaan basah kapal

V_S : Kecepatan kapal

C_V : Koefisien tahanan viskos

Besarnya tahanan gesek dipengaruhi oleh luas permukaan basah dan kecepatan kapal.

2.9 Tahanan Gelombang

Tahanan gelombang merupakan tahanan yang timbul akibat pembentukan sistem gelombang di sekitar lambung kapal.

$$R_W = R_T - R_V \quad (2.7)$$

Keterangan:

R_W : Tahanan gelombang

R_T : Tahanan total

R_V : Tahanan viskos

Pada penelitian ini komponen tahanan gelombang tidak dianalisis secara langsung karena model menggunakan pendekatan *double-body*.

2.10 Tahanan Total

Tahanan total merupakan jumlah seluruh tahanan yang bekerja pada kapal saat bergerak di dalam fluida.

$$R_T = R_F + R_P + R_W \quad (2.8)$$

atau,

$$R_T = R_V + R_W \quad (2.9)$$

Keterangan:

R_T : Tahanan total kapal (N)

R_F : Tahanan gesek (N)

R_p : Tahanan tekanan viskos (N)

R_v : Tahanan viskos (N)

R_w : Tahanan gelombang (N)

Tahanan total digunakan untuk menentukan kebutuhan daya propulsi kapal.

2.11 Karakteristik *Propeller* dan *Inflow*

Komite teknis ITTC (*International Towing Tank Conference*) telah mengembangkan berbagai prosedur yang menjadi acuan internasional dalam pengujian dan analisis performa kapal, termasuk uji tahanan model, uji propulsi, dan penentuan korelasi antara hasil uji model dan kapal penuh. Dalam konteks propulsi, ITTC menyediakan panduan untuk perhitungan koefisien gaya dorong K_T , koefisien torsi K_Q , dan koefisien *advance* J , beserta cara menghubungkannya dengan hasil uji *open-water* dan data *Engine Propeller Matching* (EPM) (ITTC, 2017; Nabilah, 2024).

Koefisien-koefisien ini didefinisikan sebagai:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2.10)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (2.11)$$

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (2.12)$$

Keterangan:

K_T : Koefisien gaya dorong *propeller*

K_Q : Koefisien torsi *propeller*

J : Koefisien *advancing propeller*

V_a : Kecepatan *advancing*

D : Diameter *propeller*

n : Putaran *propeller*

T : *Thrust propeller*

Q : *Torque propeller*

ρ : Densitas fluida

η_0 : *Propeller efficiency open-water*

Efisiensi *propeller* pada uji *open-water* dinyatakan sebagai:

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi} \quad (2.13)$$

Thrust dan *torque* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_{prop} = K_T \rho n^2 D^4 \quad (2.14)$$

$$Q_{prop} = K_Q \rho n^2 D^5 \quad (2.15)$$

yang menunjukkan perbandingan antara daya efektif dan daya poros pada berbagai kondisi operasi. Dalam kondisi terpasang di belakang kapal, *inflow* yang tidak seragam menyebabkan nilai *thrust*, torsi, dan efisiensi berbeda dari kondisi *open-water* sehingga perlu dikaitkan dengan karakteristik *wake* di buritan (Heinke & Hellwig-Rieck, 2011; Nabilah, 2024).

2.12 *Wake Fraction, Thrust Deduction, dan Efisiensi Lambung*

Wake di buritan didefinisikan sebagai penurunan kecepatan aliran rata-rata di bidang *propeller* dibanding kecepatan kapal di jauh depan. Secara klasik, *wake fraction* dinyatakan sebagai:

$$w = 1 - \frac{V_a}{V_s} \quad (2.16)$$

keterangan:

w : *Wake fraction*

V_s : Kecepatan kapal

V_a : Kecepatan *advancing*

t : *Thrust deduction fraction*

R_T : Tahanan total kapal

T : *Thrust propeller*

η_H : *Hull efficiency*

dengan V_s kecepatan kapal dan V_a kecepatan *advance* di bidang *propeller*. *thrust deduction* menggambarkan tambahan gaya yang harus dihasilkan *propeller* karena interaksinya dengan lambung dan ditulis sebagai:

$$t = 1 - \frac{R_T}{T} \quad (2.17)$$

dengan R_T tahanan Total kapal dan (T) *thrust propeller* (Heinke & Hellwig-Rieck, 2011).

Efisiensi lambung η_H kemudian dirumuskan sebagai:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w} \quad (2.18)$$

yang menunjukkan pengaruh interaksi lambung *propeller* terhadap efisiensi propulsi. Perangkat ESD seperti WED dan VGF bekerja dengan mengubah distribusi *wake* dan pola tekanan di buritan, sehingga memodifikasi w , t , dan akhirnya η_H , yang pada gilirannya mempengaruhi kebutuhan daya untuk kecepatan tertentu (Heinke & Hellwig-Rieck, 2011; Martinas & Cupsa, 2015).

2.13 Efisiensi *Behind Hull*

Efisiensi *behind hull* merupakan efisiensi *propeller* saat bekerja di belakang lambung kapal.

$$\eta_B = \eta_0 \times \eta_R \quad (2.19)$$

Keterangan:

η_B : *Behind Hull Efficiency*

η_0 : *Open Water Efficiency*

η_R : *Relative Rotative Efficiency*

Nilai η_B digunakan pada Bab 4 untuk membandingkan pengaruh konfigurasi VGF dan WED terhadap performa *propeller*.

2.14 *Quasi Propulsive Coefficient (QPC)*

Quasi Propulsive Coefficient merupakan parameter yang menggambarkan efisiensi propulsi kapal secara keseluruhan.

$$QPC = \eta_H \times \eta_B \quad (2.20)$$

Keterangan:

QPC : *Quasi Propulsive Coefficient*

η_H : *Hull Efficiency*

η_B : *Behind Hull Efficiency*

Semakin besar nilai QPC maka semakin efisien sistem propulsi kapal dalam mengubah daya mesin menjadi gaya dorong efektif.

2.15 Persamaan Dasar dan Model CFD

Aliran di sekitar lambung kapal dan perangkat *Wake Equalizing Duct* serta *Vortex Generator Fins* dimodelkan sebagai aliran turbulen tak termampatkan tiga dimensi yang diselesaikan menggunakan pendekatan *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) dengan metode *Volume of Fluid* (VOF) untuk merepresentasikan permukaan bebas. model turbulensi yang digunakan adalah standard $k-\varepsilon$ untuk menutup suku tegangan *Reynolds* akibat fluktuasi turbulen (Ahmed *et al.*, 2014).

2.15.1 Persamaan RANS

Untuk fluida tak termampatkan dengan densitas konstan ρ , persamaan kontinuitas dalam koordinat kartesius dituliskan sebagai:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.21)$$

dengan u_i komponen kecepatan pada arah x_i ($i = 1,2,3$) yang masing-masing merepresentasikan arah memanjang, melintang, dan vertikal terhadap kapal.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2.22)$$

di mana p adalah tekanan statis, μ viskositas dinamik fluida, sedangkan $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ merupakan tegangan *reynolds* yang memodelkan pengaruh fluktuasi kecepatan turbulen.

Dengan hipotesis *Boussinesq*, tegangan *reynolds* dituliskan sebagai:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.23)$$

di mana μ_t adalah viskositas turbulen, k energi turbulen, dan δ_{ij} *delta Kronecker* (Ahmed *et al.*, 2014).

Keterangan:

- u_i : Vektor kecepatan rata-rata pada arah x_i
 ρ : Densitas fluida
 p : Tekanan rata-rata
 μ : Viskositas dinamis fluida
 $-\overline{\rho u'_i u'_j}$: Tensor tegangan *reynolds* (tensor kecepatan fluktuatif)

2.15.2 Persamaan *Volume of Fluid* (VOF)

Antarmuka antara air dan udara pada permukaan bebas dimodelkan menggunakan metode *Volume of Fluid* (VOF) dengan fungsi fraksi volume α yang menyatakan porsi volume sel yang terisi oleh air. Nilai $\alpha = 1$ merepresentasikan sel yang sepenuhnya berisi air, $\alpha = 0$ sel yang sepenuhnya berisi udara, sedangkan $0 < \alpha < 1$ menggambarkan sel yang memuat antarmuka.

Transport fraksi volume α diatur oleh persamaan:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = 0 \quad (2.24)$$

dengan sifat fluida efektif dalam setiap sel diperoleh dari pencampuran berbasis α , misalnya densitas $\rho = \alpha \rho_{\text{air}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{udara}}$ dan viskositas $\mu = \alpha \mu_{\text{air}} + (1 - \alpha) \mu_{\text{udara}}$ sesuai kebutuhan permodelan. Dengan pendekatan ini, deformasi permukaan bebas akibat aliran di sekitar lambung, WED, dan VGF dapat diwakili secara eksplisit dalam domain komputasi (Ahmed *et al.*, 2014).

Perlu ditegaskan bahwa simulasi pada penelitian ini dilakukan dalam kondisi lambung tercelup penuh (*fully submerged/double-body*), yaitu satu fasa (air saja) tanpa permukaan bebas udara-air, sebagaimana tercermin pada domain dan *boundary condition* (tidak terdapat *patch atmosphere/free surface*). Dengan demikian, persamaan VOF pada (sub-bab 2.6.2) di atas berlaku untuk kasus umum lambung yang memotong permukaan air (*free-surface flow*) dan dicantumkan sebagai dasar teori metode VOF secara umum; untuk kondisi *fully submerged* pada penelitian ini, fraksi volume air bernilai $\alpha = 1$ di seluruh domain sehingga sifat fluida efektif kembali menjadi sifat air murni ($\rho = \rho_{\text{air}}$, $\mu = \mu_{\text{air}}$), dan persamaan transport α pada (2.13) tidak lagi berperan aktif karena tidak ada antarmuka yang

perlu ditangkap. model VOF pada penelitian ini dengan kata lain direduksi menjadi model satu fasa (*single-phase, incompressible* RANS) yang konsisten dengan pendekatan *double-body* yang lazim digunakan pada studi tahanan dan *wake* tanpa pengaruh gelombang permukaan.

2.15.3 Model Turbulensi (*Standard k-ε*)

Untuk menutup sistem persamaan RANS digunakan model turbulensi *standard k-ε* sebagaimana diaplikasikan oleh Ahmed *et al.*, (2014), pada studi *low profile vortex generators* pada lambung DTMB 5415. model ini memperkenalkan dua variabel tambahan, yakni energi turbulen k dan laju disipasi energi turbulen ε , yang diatur melalui persamaan transport berikut.

Persamaan transport energi turbulen k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.25)$$

Persamaan transport laju disipasi ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.26)$$

Viskositas turbulen μ_t didefinisikan sebagai:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.27)$$

Konstanta model *standard k-ε* yang digunakan:

$$C_\mu = 0,09$$

$$C_{1\varepsilon} = 1,44$$

$$C_{2\varepsilon} = 1,92$$

$$\sigma_k = 1,0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,3$$

yang merupakan nilai standar dan sejalan dengan parameter yang digunakan (Ahmed *et al.*, 2014).

Keterangan:

k : Energi kinetik turbulen

ε : Laju disipasi energi turbulen

μ_t : Viskositas turbulen

G_k : Laju produksi energi turbulen akibat gradien kecepatan rata-rata

C_μ : Konstanta model viskositas turbulen

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$: Konstanta model k - ε

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$: Bilangan prandtl turbulen untuk k dan ε

2.16 Software Desain dan Simulasi

2.16.1 AutoCAD

AutoCAD digunakan sebagai langkah awal untuk membuat gambar teknik dalam bentuk 2D maupun 3D. Gambar ini biasanya berisi bentuk dasar objek yang akan dianalisis, seperti garis bentuk, tampak samping, tampak atas, maupun detail bagian tertentu sebagai acuan permodelan lebih lanjut (Nabilah, 2024).

2.16.2 Maxsurf

Maxsurf dimanfaatkan untuk memodelkan bentuk lambung kapal secara lebih spesifik dan melakukan analisis dasar, misalnya hidrostatik atau karakteristik garis air. Dari *software* ini diperoleh data geometri yang rapi dan konsisten sehingga mudah diteruskan ke tahap permodelan 3D dan analisis berikutnya.

2.16.3 SolidWorks

SolidWorks berperan sebagai *software* permodelan 3D yang menyatukan berbagai komponen dalam satu model tiga dimensi yang utuh. Dengan SolidWorks, bentuk objek dapat dibuat lebih realistis dan detail sehingga siap diekspor ke tahap pembuatan domain fluida dan *meshing*.

2.16.4 OpenFOAM

OpenFOAM digunakan sebagai perangkat lunak CFD untuk melakukan simulasi aliran fluida secara numerik. Di dalamnya, persamaan dasar aliran diselesaikan menggunakan berbagai *solver* sehingga pengguna dapat mempelajari pola aliran, distribusi tekanan, dan fenomena lain yang terjadi di sekitar objek yang dikaji (Nabilah, 2024).

2.16.5 ParaView

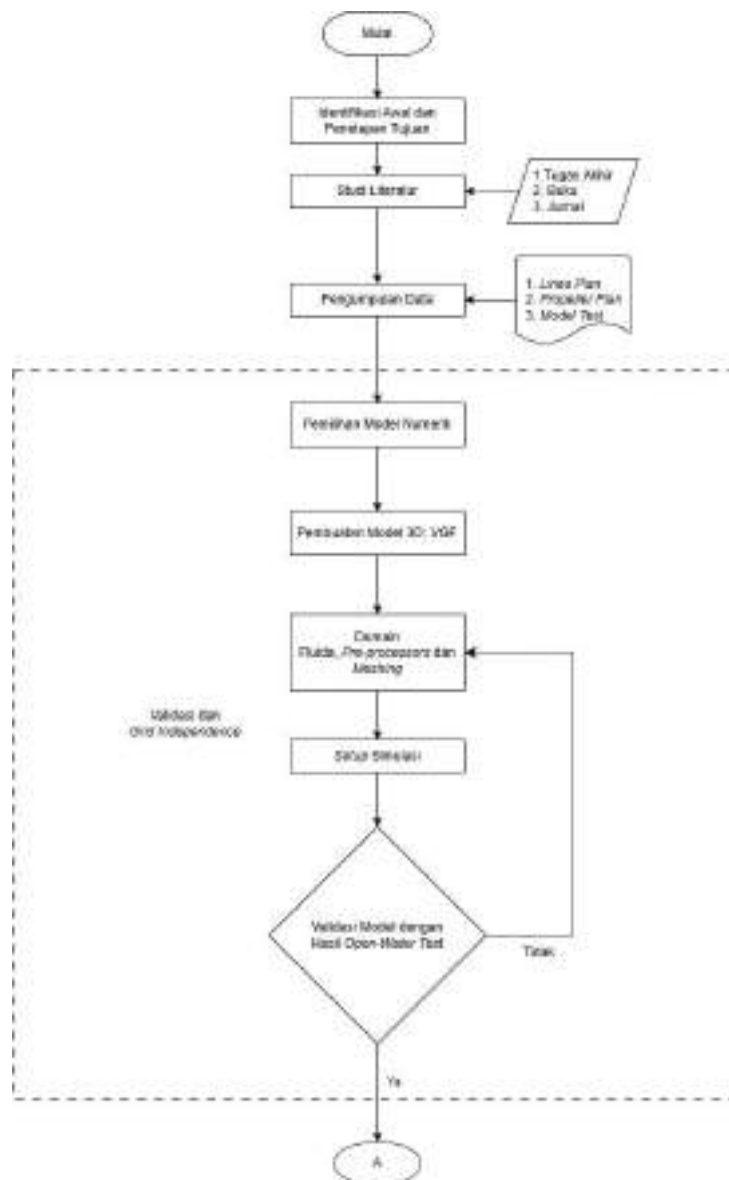
ParaView dimanfaatkan sebagai alat bantu untuk membaca dan menampilkan hasil simulasi yang dihasilkan oleh OpenFOAM atau *software* CFD lainnya. Melalui ParaView, data numerik dapat divisualisasikan dalam bentuk gambar, kontur, dan grafik sehingga hasil analisis menjadi lebih mudah dipahami dan diinterpretasikan (Nabilah, 2024)

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian pada Tugas Akhir ini mengikuti beberapa tahapan yang saling berurutan. Diagram alir penelitian disusun untuk memberikan gambaran yang runtut mengenai langkah-langkah penelitian, mulai dari identifikasi masalah sampai pada penarikan kesimpulan dan penyusunan saran. Pada tahapan pelaksanaan penelitian Tugas Akhir ini dapat digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Identifikasi Awal

Tahap ini merupakan langkah awal yang penting karena menjadi dasar arah penelitian selanjutnya. Pada tahap identifikasi awal, peneliti menajamkan masalah, menyusun tujuan, dan mengumpulkan referensi yang relevan.

3.2.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Langkah pertama adalah mengidentifikasi masalah yang akan dikaji, kemudian merumuskannya secara jelas dalam bentuk pertanyaan penelitian. Rumusan masalah ini akan menjadi acuan dalam penyusunan tujuan, batasan, serta metode yang digunakan.

3.2.2 Penetapan Tujuan

Setelah masalah dirumuskan, tahap berikutnya adalah menetapkan tujuan penelitian. Tujuan ini disusun untuk menjawab rumusan masalah dan menjelaskan hasil apa yang ingin dicapai dari penelitian yang dilakukan.

3.3 Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh seluruh data yang dibutuhkan sebagai dasar permodelan dan simulasi. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Data utama kapal (*length overall, length between perpendiculars, breadth, height, draft*) dll.
- Data geometri lambung kapal (*lines plan*).
- Data spesifikasi VGF.
- Data spesifikasi WED.

- Data *propeller plan*.
- Data *powering performance model test*.
- Data penelitian terdahulu yang relevan dengan topik *Energy Saving Device* untuk propulsi kapal.

Sebagian besar data tersebut diperoleh sebagai data sekunder dari jurnal, buku, laporan teknis, dan hasil penelitian sebelumnya.

3.4 Pemilihan Model Numerik

Aliran di sekitar buritan kapal dengan WED penambahan VGF merupakan aliran tiga dimensi tak termampatkan yang dipengaruhi kuat oleh viskositas dan turbulensi, terutama di daerah *boundary layer* dan *wake*. Untuk menggambarkan perilaku aliran tersebut secara efisien, penelitian ini menggunakan pendekatan persamaan *Navier–Stokes* rata-rata (RANS) yang banyak dipakai pada kajian numerik kapal niaga dan perangkat penghemat energi karena mampu memberikan keseimbangan antara ketelitian dan kebutuhan komputasi.

3.5 Pembuatan Model 3D

Pada tahap ini disusun model geometri dan model komputasi yang akan digunakan dalam simulasi numerik. Penyusunan model dilakukan dari permodelan variasi VGF lalu digabungkan dengan model 3D *hull* dan WED yang sudah ada hingga penyiapan *mesh* dan *setup* simulasi.

3.6 Domain Fluida, *Pre-processor* dan *Meshing*

Model geometri lambung, WED, dan VGF kemudian diimpor ke perangkat lunak pra-proses untuk membentuk domain fluida dan menyusun *mesh*. Dalam tahap ini didefinisikan kondisi batas, misalnya:

- *Inlet* sebagai bidang masuk aliran dengan kecepatan yang mewakili kecepatan operasi kapal.
 - *Outlet* sebagai bidang keluaran aliran.
 - Permukaan dinding (*wall*) yang merepresentasikan permukaan lambung, WED, dan VGF dengan kondisi tanpa *slip*.
 - Bidang simetri, jika digunakan, untuk mengurangi ukuran domain komputasi.
- meshing* dilakukan dengan membagi domain fluida menjadi elemen-elemen kecil atau dengan menggunakan pendekatan *Multiple Reference Frame* (MRF), yang dilakukan pada area yang penting, antara lain di sekitar permukaan lambung bagian

buritan, di sekitar WED dan VGF, serta di daerah *wake*, sehingga perubahan pola aliran akibat variasi konfigurasi ESD dapat ditangkap dengan cukup detail. Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan computer dengan spesifikasi seperti pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 *Device specifications*

Komponen	Tipe	Jumlah
CPU	AMD Ryzen Threadripper PRO 7975X 32 core	1
Mainboard	ASRock WRX 90 WS Evo	1
RAM	Micron DDR5 ECC 64GB RDIMM	8
Main Storage	Samsung SSD 1TB	1
Additional Storage	Seagate Ironwolf HDD 6TB	1
PSU	1000 Watt 80+ Gold	1
CPU Cooling	Deepcool LT720	1
VGA	Radeon RX 6600 8GB	1

3.7 *Setup Simulasi*

Setelah proses *domain* fluida, *pre-processor* dan *meshing* selesai, langkah berikutnya adalah menyusun setup simulasi yang akan digunakan untuk menghitung aliran di sekitar lambung, WED, dan VGF. Pengaturan ini mencakup pemilihan tipe *solver*, model turbulensi, kondisi batas, serta parameter numerik lain yang diperlukan agar proses perhitungan berjalan stabil dan hasilnya dapat dipercaya.

Kecepatan aliran pada sisi masuk (*inlet*) ditetapkan untuk mewakili kecepatan operasi yang ingin dikaji, sedangkan sifat fluida seperti densitas dan viskositas kinematik mengikuti kondisi air laut standar. Pada sisi keluar (*outlet*), digunakan kondisi yang memungkinkan aliran keluar secara bebas tanpa menimbulkan refleksi yang tidak diinginkan. Permukaan lambung, WED, dan VGF diperlakukan sebagai dinding (*wall*) tanpa *slip*, sementara bidang simetri digunakan bila diperlukan untuk mengurangi ukuran domain komputasi tanpa mengubah karakter aliran utama.

Model turbulensi dipilih agar sesuai dengan karakteristik aliran di sekitar buritan kapal dengan WED dan penambahan perangkat VGF, sehingga mampu menangkap perpaduan antara aliran utama, *boundary layer*, dan *vorteks* yang terbentuk di sekitar perangkat tersebut. Kriteria konvergensi kemudian ditetapkan berdasarkan perubahan residu persamaan dan kestabilan nilai-nilai global seperti tahanan total. Parameter utama yang dicatat dari setiap simulasi meliputi tahanan kapal, distribusi kecepatan di daerah buritan, peta *wake* pada bidang tertentu di belakang lambung, serta distribusi tekanan di sekitar WED dan VGF, karena besaran-besaran inilah yang menjadi dasar untuk menilai perubahan distribusi *wake* dan efisiensi lambung pada tiap konfigurasi yang diuji.

3.8 Validasi Model Dengan Hasil *Open-Water Test*

Sebelum model digunakan untuk simulasi skenario konfigurasi penuh, dilakukan proses validasi dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data referensi, seperti hasil uji *open-water* atau data eksperimen yang telah tersedia. Validasi ini mencakup perbandingan hasil uji tahanan (*resistance test*) antara metode CFD dan model *Test*, serta evaluasi tingkat kesalahan hingga diperoleh nilai *Error* yang berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Berikut adalah format Tabel 3.2 yang akan digunakan untuk validasi hasil simulasi:

Tabel 3.2 Format Tabel Validasi Hasil Simulasi

Variasi	Total Cells	Omega	R_V Ship Force CFD	T_{prop} CFD	Error (%)

3.9 Studi Parameter

Setelah model dinyatakan valid, dilakukan studi parameter dengan mensimulasikan beberapa variasi konfigurasi untuk mengevaluasi VGF terhadap aliran buritan, distribusi *wake*, tahanan, dan efisiensi lambung. Variasi tersebut meliputi:

1. Variasi konfigurasi ESD global:
 - Kapal dengan VGF saja

- Kapal dengan VGF dan *propeller*
- Kapal dengan VGF penambahan WED dan *propeller*

2. Variasi jumlah VGF (1, 2, 3)

Variasi disesuaikan setelah nilai aktual parameter penataan (sudut, jumlah baris, dan jarak antar VGF) tertentu relatif terhadap arah aliran dapat memberikan manfaat terbesar dalam menunda separasi dan memperbaiki *wake*, sementara sudut di luar rentang optimum berpotensi menambah tahanan, dengan mempertimbangkan beberapa aspek utama sebagai berikut:

- Ukuran
- Jumlah
- Lokasi Horizontal
- Lokasi Vertikal

3.10 Evaluasi Hasil Simulasi

Pada tahap ini, seluruh hasil simulasi dari berbagai konfigurasi ESD, baik kapal dengan WED saja maupun kapal dengan WED penambahan VGF pada berbagai variasi sudut dan posisi, dibaca dan dianalisis secara menyeluruh. Fokus utama evaluasi adalah melihat bagaimana perubahan konfigurasi tersebut memengaruhi nilai koefisien tahanan, distribusi kecepatan di daerah buritan, pola *wake* pada bidang *propeller*, serta parameter interaksi lambung dan *propeller* seperti *wake fraction*, *thrust deduction*, dan efisiensi lambung. Setiap konfigurasi dibandingkan terhadap kondisi acuan *baseline* sehingga dapat diidentifikasi konfigurasi mana yang memberikan penurunan tahanan, perbaikan distribusi *wake*, dan peningkatan efisiensi propulsi yang paling signifikan. Pola dan kecenderungan yang diperoleh pada tahap ini kemudian menjadi dasar dalam pemilihan konfigurasi VGF yang paling layak, sekaligus menjadi dasar dalam merumuskan kesimpulan dan saran di akhir penelitian.

3.11 Kesimpulan dan Saran

Tahap terakhir dalam metodologi ini adalah menyusun kesimpulan dan saran berdasarkan hasil evaluasi yang telah dilakukan. Kesimpulan mengacu langsung pada tujuan dan rumusan masalah, sehingga terlihat jelas apa saja yang berhasil terjawab.

Selain itu, disusun pula saran yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan penelitian berikutnya. Saran ini dapat berupa usulan perbaikan metode, penambahan variasi parameter, atau kajian lanjutan dengan pendekatan eksperimental maupun numerik yang lebih lengkap.

3.12 *Timeline Penelitian*

Timeline penelitian ini direncanakan berlangsung dari November 2025 sampai Juni 2026, dengan pembagian kegiatan per minggu, yakni pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 *Timeline*

Timeline Penelitian																																
Bulan	November				Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni			
Kegiatan	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Penentuan Topik Penelitian																																
Studi Literatur																																
Pengumpulan Data																																
Validasi Model																																
Domain Fluida, <i>Pre-processor</i> dan <i>Meshing</i>																																
Simulasi dan Validasi CFD																																
Pemodelan VGF																																
Simulasi Model VGF																																
Analisis Data dan Pembahasan																																
Kesimpulan dan Saran																																

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Kapal dan Referensi Uji model

Bab ini menyajikan hasil dan pembahasan penelitian secara bertahap, dimulai dari deskripsi geometri kapal *existing* yang menjadi objek penelitian, dilanjutkan dengan validasi model CFD menggunakan data uji model eksternal, analisis kondisi *baseline*, hingga evaluasi pengaruh penambahan *Vortex Generator Fins* (VGF) terhadap aliran, hambatan, dan kinerja propulsi.

Untuk keperluan validasi model CFD, digunakan data uji model yang diterbitkan oleh *China Ship Scientific Research Center* (CSSRC) dalam laporan nomor 160292 (*Merchant & Design*, 2016). Kapal referensi pada laporan tersebut merupakan kapal kontainer 900 TEUs yang juga dilengkapi WED, dengan geometri lambung yang sangat mirip dengan kapal *existing* 913 TEUs yang diteliti.

Pengujian dilakukan pada dua kondisi sarat, yaitu sarat desain ($TF/TA = 5.60/5.60$ m) dan sarat *ballast* ($TF/TA = 2.45/4.55$ m). Skala model yang digunakan adalah 1:16,9966 dengan model kapal berbahan kayu bernomor SM1554-1 sepanjang 7,8251 m. model *propeller* berbahan aluminium bernomor S209G memiliki diameter 0,22357 m. Uji hambatan dan uji propulsi diri dilaksanakan di kolam tarik air dalam sepanjang 474 m, lebar 14 m, kedalaman 7 m, sementara uji *open-water propeller* dilakukan di kolam tarik bertekanan rendah. Berikut ini Pada Gambar 4.1 adalah *modelling* kapal dengan *software* SolidWorks yang digunakan untuk simulasi CFD.



Gambar 4.1 *Modelling hull*

4.2 Permodelan *Vortex Generator Fins* (VGF)

VGF dimodelkan dengan memperhatikan jumlah *fins*, ukuran, dan sudut pemasangan yang direncanakan. VGF dapat dipasang di buritan kapal atau dikombinasikan dengan WED, dengan berbagai konfigurasi seperti simetris atau asimetris.

Ukuran VGF ditentukan melalui perhitungan skala geometri (*VG scaling*) yang mengacu pada model MIT Kimmeth, (2025) dan disesuaikan dengan geometri model kapal referensi CSSRC SM1554-1 yang digunakan untuk validasi. Tebal *boundary layer* pada model diperoleh dengan persamaan,

$$\delta_s = \delta_m \times \lambda^{\frac{4}{5}} \times \lambda^{-\frac{1}{5}} \quad (4.1)$$

sedangkan koefisien gesek diperoleh dengan persamaan,

$$C_{F_s} = C_{F_m} \times \lambda^{\frac{1}{5}} \times \lambda U^{\frac{1}{5}} \quad (4.2)$$

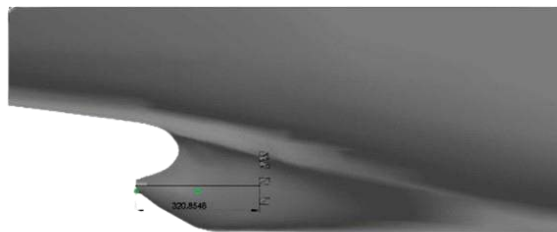
dengan λ sebagai faktor skala panjang (LPP_{CSSRC}/LPP_{MIT}) dan λ_U sebagai faktor skala kecepatan (U_{CSSRC}/U_{MIT}). Dimensi VGF (tinggi, panjang, lebar) kemudian diskalakan mengikuti faktor skala geometri $SF = \delta_{CSSRC}/\delta_{MIT}$.

Sebagai pembanding, rentang tinggi VGF yang direkomendasikan literatur berkisar 25-30% dari tebal *boundary layer* ($h = 0,25 \delta$ hingga $0,30 \delta$), yaitu 28,41 - 34,09 mm untuk model CSSRC. Tinggi VGF hasil skala langsung dari model MIT (27,43 mm) berada sedikit di bawah batas bawah rentang tersebut, sehingga akan dipertimbangkan penyesuaian pada tahap permodelan 3D agar tetap berada dalam rentang yang direkomendasikan. Jumlah VGF per sisi ditetapkan tetap sebanyak 15 buah, mengikuti hasil perhitungan rasio jumlah ($n_{ratio} = 0,974$) yang dibulatkan. Berdasarkan dimensi dasar tersebut, disusun tiga variasi konfigurasi pemasangan VGF pada model 3D (SolidWorks) yang akan disimulasikan dan dibandingkan performanya. Ketiga variasi menggunakan dimensi unit VGF yang sama, namun berbeda pada parameter penataan seperti sudut pemasangan, jumlah baris, dan jarak antar VGF di sepanjang buritan. Agar pembeda antar variasi lebih mudah dikenali, ketiga variasi tersebut selanjutnya diberi nama representatif berdasarkan tingkat kompleksitas penataannya, yaitu VGF-V1, VGF-V2, VGF-V3 dan VGF-V4

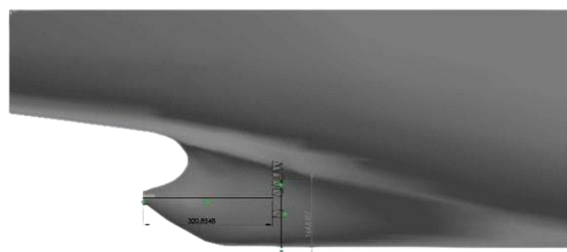
penamaan ini bersifat sementara (*placeholder*) dan akan disesuaikan setelah nilai aktual parameter penataan (sudut, jumlah, dan jarak antar VGF) pada Tabel 4.1 dilengkapi. Format perbandingan variasi disajikan pada Tabel 4.1 dan juga Gambar 4.2 konfigurasi pemasangan VGF berikut.

Tabel 4.1 Variasi konfigurasi pemasangan VGF yang diuji

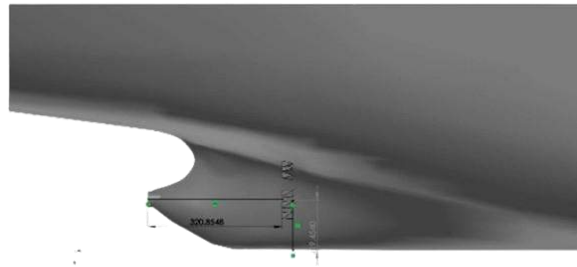
Parameter	VGF-V1	VGF-V2	VGF-V3	VGF-V4
Tinggi VGF, h (mm)	27,43	27,43	27,43	27,43
Panjang VGF, L (mm)	109,72	109,72	109,72	109,72
Lebar VGF, w (mm)	66,62	66,62	66,62	66,62
Jumlah	5 SB/PS	6 (atas) SB/PS	6 (bawah) SB/PS	7 SB/PS



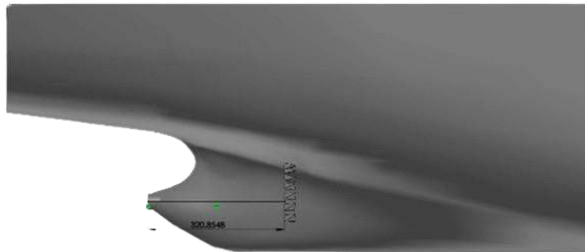
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.2 Konfigurasi pemasangan VGF-V4 pada model 3D (SolidWorks) (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4

4.3 Validasi Model Numerik

Sebelum studi parametrik dilakukan, model CFD yang telah dibuat perlu divalidasi terhadap data eksperimental yang tersedia. Proses validasi ini bertujuan memastikan bahwa pendekatan numerik, pemilihan model turbulensi, kondisi batas, dan kualitas *mesh* yang digunakan mampu merepresentasikan fenomena aliran secara memadai. Dalam penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi R_V *bare hull* CFD terhadap data R_V model *Test CSSRC*, khususnya data uji *open-water propeller* dan uji hambatan (*resistance test*) (Merchant & Design, 2016).

4.3.1 Pembentukan Domain

Pembuatan *domain* menggunakan *blockmesh* dalam OpenFOAM merupakan langkah krusial pada tahap pra-pemrosesan, di mana ruang komputasi didefinisikan melalui koordinat titik-titik (*vertices*) sebagai batas fisik simulasi melalui

file *blockmeshDict*. Proses ini mengubah ruang kontinu menjadi domain diskrit yang siap diolah *solver*, sehingga akurasi simulasi sangat ditentukan oleh ketepatan pendefinisian batas domain dan distribusi sel pada tahap awal. Pada penelitian ini domain diibaratkan seperti lautan yang di batasi, karena keterbatasan komputasi. Pembuatan *blockmesh* dibuat seragam terutama pada sisi yang saling terhubung agar *mesh* menjadi *conformal* (menyatu dengan baik), menghindari distorsi sel, serta menjaga stabilitas dan akurasi perhitungan CFD. Pada Gambar 4.3 sebelah kiri ukuran sel pada setiap sisi tidak sama yang dapat menghasilkan kualitas *mesh* yang buruk.



Gambar 4.3 Pembuatan *Domain*

Pada penelitian ini ukuran *blockmesh* dibuat mengikuti aturan ITTC (*International Towing Tank Conference*) dengan batas hulu $1 \times \text{LPP}$ dari haluan, batas hilir $2 \times \text{LPP}$ dari buritan, $1 \times \text{LPP}$ dari bidang simetri (kanan kiri kapal) dan $1 \times \text{LPP}$ dari Keel (bagian bawah kapal). Didapatkan ukuran domain sebagai berikut: $P = 30$, $L = 15$, $T = 9$. Kemudian dilakukan variasi *blockmesh* dengan membagi jumlah *cell* pada masing-masing sisi, variasi *blockmesh* dapat di lihat pada Tabel 4.2 berikut:

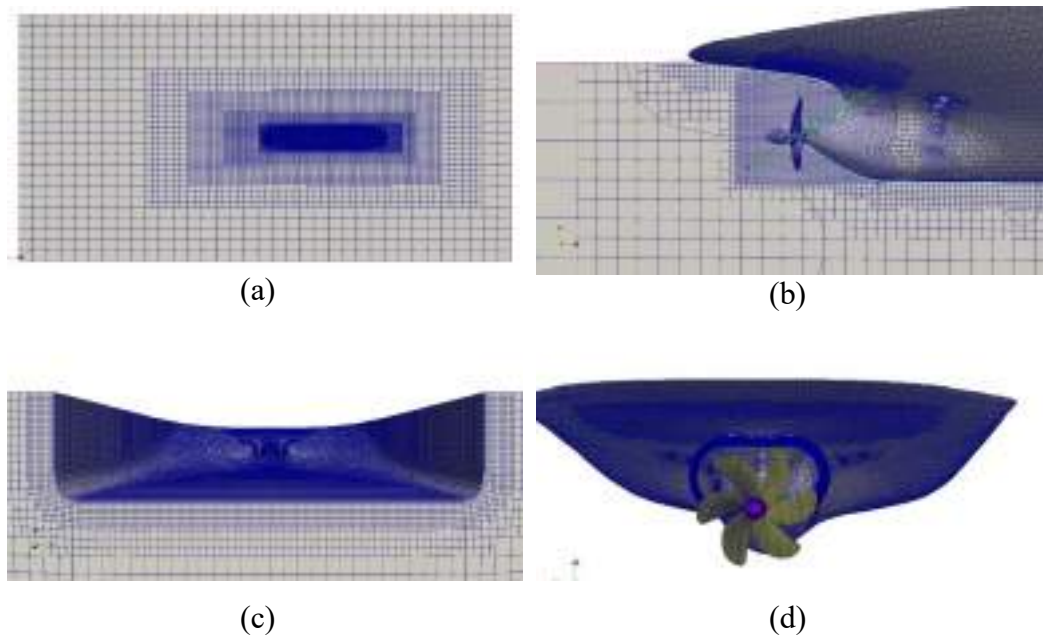
Tabel 4.2 Variasi *blockmesh*

<i>Mesh</i>	X	Y	Z	Total <i>Mesh</i>
Course	35	23	10	1287872
Medium	38	25	11	1543121
Fine	42	28	12	2104842

4.3.2 Pembuatan *Mesh*

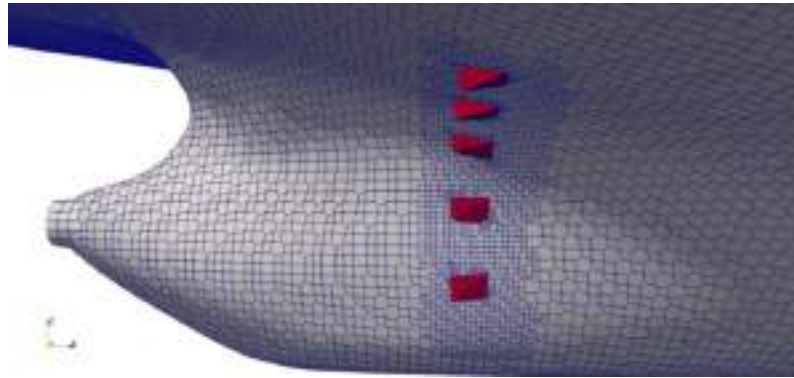
Pada penelitian ini *snappyHexmesh-overwrite* di gunakan untuk proses *meshing* di OpenFOAM, proses *meshing* menjadi tahapan yang mutlak diperlukan. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan metode CFD yang tidak dapat memecahkan

persamaan aliran fluida secara langsung pada ruang kontinu. Sebagai solusinya, domain fisik harus dipecah menjadi ribuan atau jutaan elemen kecil yang disebut *mesh*, sehingga persamaan-persamaan aliran dapat didiskretisasi dan dihitung secara numerik. Lebih lanjut, keberadaan *mesh* memungkinkan perhitungan variabel-variabel seperti kecepatan, tekanan, dan turbulensi pada setiap sel. Hal tersebut dapat meningkatkan akurasi prediksi, terutama pada area-area yang kritis seperti di area dinding lambung kapal terutama pada area buritan. Posisi *mesh* dan jumlah *mesh* juga dapat mempengaruhi hasil simulasi, semakin banyak jumlah *mesh* yang di gunakan, maka semakin baik pula hasilnya. Namun jumlah *mesh* yang terlalu banyak dapat memberatkan sistem komputasi. Hasil *meshing* dapat di lihat pada Gambar 4.4 berikut:



Gambar 4.4 *Meshing* (a) tampak atas, (b) *appendages*, (c) tampak depan, (d) tampak belakang

Detail kerapatan *mesh* di sekitar permukaan VGF pada buritan kapal ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut. *Refinement* lokal diterapkan pada seluruh permukaan VGF (ditandai warna merah) agar lapisan batas dan *vortex* yang terbentuk di sekitar sirip dapat ditangkap dengan baik oleh *solver*.



Gambar 4.5 Detail *meshing* pada permukaan VGF di buritan kapal (ParaView)

4.3.3 Hasil Validasi Pada *Bare Hull*

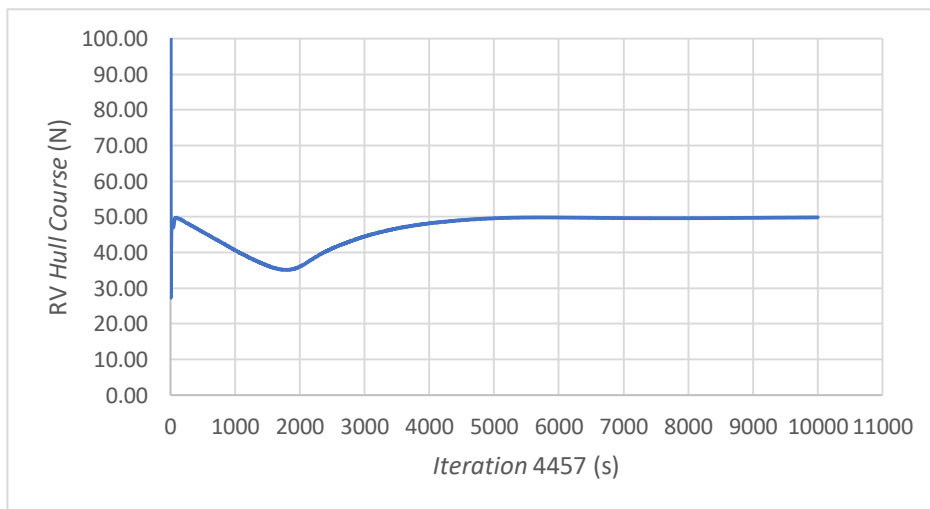
Validasi *grid independent* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi berubah secara signifikan ketika *mesh* diperhalus. Yang berarti solusi yang diperoleh sudah tidak bergantung pada ukuran atau jumlah *grid* (*mesh*), dengan menggunakan beberapa tingkatan *mesh* seperti kasar, sedang, dan halus pada kondisi *steady state* (gaya tidak berubah karna waktu). Validasi *grid independent* juga dilakukan dengan membandingkan langsung gaya tahanan viskos (R_V) hasil simulasi CFD kondisi *bare hull* pada ketiga variasi *mesh* (*course*, *medium*, *fine*) terhadap nilai R_V acuan tervalidasi ($R_V = 50,9$ N, metode ITTC 1957). Perbandingan ini menjadi bagian dari proses validasi performa *propeller* pada lambung dengan VGF dan performa *propeller* pada lambung dengan WED & VGF, yaitu memastikan bahwa penghalusan *mesh* (*grid*) tidak menggeser hasil simulasi menjauh dari data acuan yang telah divalidasi. Ringkasan perbandingan disajikan pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Perbandingan R_V *bare hull* CFD terhadap R_V model *test* CSSRC – kondisi kapal + VGF (tanpa WED dan *propeller*)

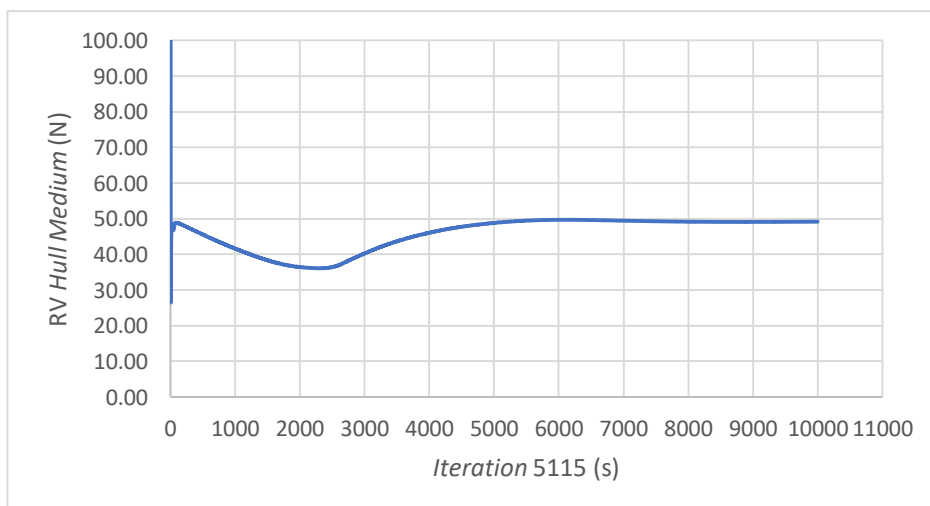
<i>Mesh</i>	Total Cells	R_V Bare Hull CFD	R_V Model Test CSSRC	Error (%)
<i>Course</i>	1287872	49.7	50.90	2.38
<i>Medium</i>	1543121	49.3	50.90	3.11
<i>Fine</i>	2104842	48.9	50.90	3.86

Dari Tabel 4.5 terlihat bahwa R_V *bare-hull* CFD menurun secara konsisten seiring penghalusan *mesh*, dari 49,7 N (*course*) menjadi 49,3 N (*medium*) dan 48,9

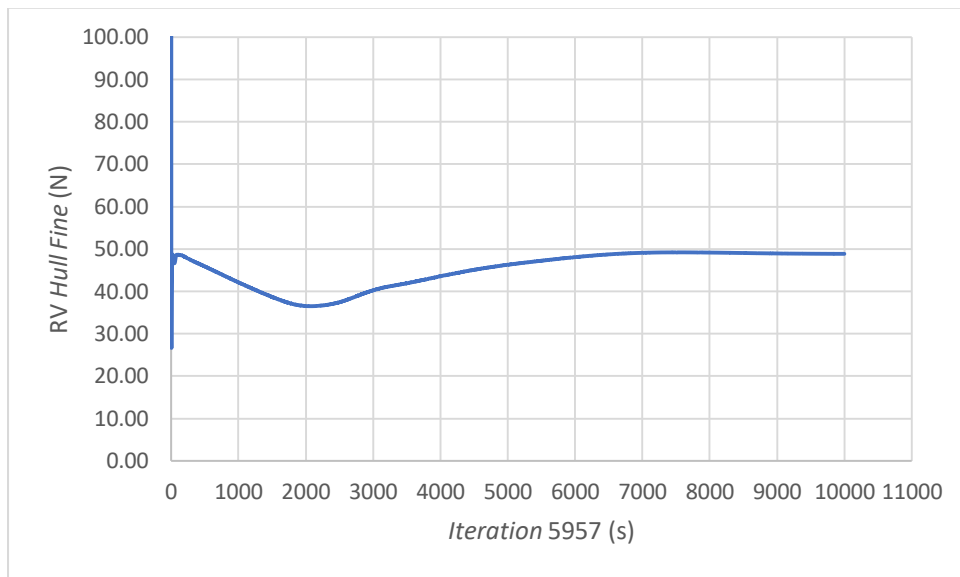
N (*fine*), sehingga deviasi terhadap acuan R_V tervalidasi (50,90 N) justru sedikit membesar dari 2,38% (*course*), 3,11% (*medium*), menjadi 3,86% (*fine*). Selisih terhadap acuan R_V model *test CSSRC* kemungkinan besar bukan disebabkan oleh kekasaran *mesh*, melainkan oleh faktor numerik lain, misalnya pemilihan model turbulensi atau kondisi batas, yang akan dikaji lebih lanjut pada tahap penyempurnaan model. Pada Gambar 4.6 adalah grafik dari iterasi R_V *hull (course)*, R_V *hull (medium)*, menjadi R_V *hull (fine)*, hingga mencapai nilai yang konvergen.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 Grafik $hull R_V$ (resistance viscous) (a) *course*, (b) *medium*, (c) *fine*

4.4 Studi Parameter

Penambahan VGF pada lambung kapal di satu sisi dapat memperbaiki aliran dan mengurangi *form drag*, namun di sisi lain VGF itu sendiri menambah luasan permukaan basah sehingga berpotensi meningkatkan *frictional resistance*. Analisis ini bertujuan mengevaluasi keseimbangan antara kedua efek tersebut pada setiap konfigurasi VGF yang diuji.

koefisien tahanan total C_T diuraikan menjadi komponen friksi C_F dan komponen residual C_R . Pengaruh VGF terhadap masing-masing komponen diamati pada rentang kecepatan 9–13 knot. Konfigurasi VGF yang ideal adalah yang mampu menurunkan C_R (melalui pengurangan separasi dan *form drag*) melebihi kenaikan C_F akibat tambahan luasan VGF, sehingga C_T total menurun.

4.4.1 Penambahan VGF

Penelitian ini akan mengkuantifikasi besaran perubahan serupa pada kapal kontainer 913 TEUs dengan WED, menggunakan data perbandingan antara kondisi *baseline* dan kondisi WED + VGF. Data hasil simulasi CFD kondisi kapal + VGF (tanpa WED) untuk keempat konfigurasi yang diuji dengan konfigurasi VGF-V1, VGF-V2, VGF-V3, VGF-V4 dibandingkan terhadap nilai tahanan acuan $R_T = 53.294$ N, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Perbandingan R_T bare hull + VGF CFD terhadap R_T model test CSSRC

Variasi	Total Cells	R_T Bare Hull + VGF CFD	R_T Model Test CSSRC	Error (%)
Hull + VGF V1	1295473	52.472	53.294	1.543
Hull + VGF V2	1295561	52.614	53.294	1.275
Hull + VGF V3	1295716	52.658	53.294	1.192
Hull + VGF V4	1295990	52.867	53.294	0.802

Data hasil simulasi CFD kondisi kapal + VGF + WED untuk keempat konfigurasi yang diuji dengan konfigurasi VGF-V1, VGF-V2, VGF-V3, VGF-V4 dibandingkan terhadap nilai tahanan acuan $R_T = 53.294$ N, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Perbandingan R_T bare hull + VGF CFD + WED terhadap R_T model test CSSRC

Variasi	Total Cells	R_T Bare Hull + VGF CFD + WED	R_T Model Test CSSRC	Error (%)
Hull + VGF V1 + WED	1358571	52.674	53.294	1.164
Hull + VGF V2 + WED	1358604	52.723	53.294	1.071
Hull + VGF V3 + WED	1358811	52.762	53.294	0.998
Hull + VGF V4 + WED	1359085	52.892	53.294	0.754

Sebelum simulasi CFD dijalankan, dilakukan terlebih dahulu perhitungan parameter tahanan dasar (*reynolds number*, koefisien gesek, dan *form factor*) menggunakan data geometri model dan kapal penuh pada sarat desain. Data utama yang digunakan disajikan pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Data utama perhitungan tahanan pada sarat desain

Parameter	Model	Full Scale	Satuan
Lwl	7,9839	135,70	m

B	1,3238	22,50	m
T	0,3295	5,60	m
CB	0,844	-	-
CP	0,847	-	-
S (luas permukaan basah)	14,038	4.055,43	m ²
L_{mids}	67,773	-	m
%LCB	0,01744	-	-
LPP	7,8251	133,00	m
V (kecepatan)	1,373	11	m/s (knot)
Fr	0,155	0,155	-
ρ (massa jenis air)	998,369	1.026,42	kg/m ³
ν (viskositas kinematik)	$1,0232 \times 10^{-6}$	$1,1907 \times 10^{-6}$	m ² /s
R_W (resistance wave) *MaxSurf	2.391	0.180964	N

Berdasarkan data tersebut, diperoleh *reynolds number* model,

$$R_e = 1,0713 \times 10^7$$

koefisien gesek dengan formula ITTC 1957,

mencari nilai C_F :

$$C_F = 0,075 / (\log_{10} R_e - 2)^2$$

$$C_F = 0,075 / (\log_{10} 1,0713 \times 10^7 - 2)^2$$

$$C_F = 0,0029644$$

koefisien tahanan viskos $C_V = 0.00385$, dan gaya tahanan viskos model $R_V = 50,90$ n,

mencari nilai C_V :

$$C_V = C_F \times 10^{-3} (1 + k)$$

$$C_V = 0,0029644 \times 10^{-3} (1 + 0,2999)$$

$$C_V = 0.003853$$

mencari nilai R_V :

$$R_V = \frac{1}{2} \times \rho \times V_S^2 \times S \times C_V$$

$$R_V = \frac{1}{2} \times 998,369 \times 1,373^2 \times 14,038 \times 0.003853$$

$$R_V = 50,903$$

mencari nilai R_F :

$$R_F = \frac{1}{2} \times \rho \times V_S^2 \times S \times C_F$$

$$R_F = \frac{1}{2} \times 998,369 \times 1,373^2 \times 14,038 \times 0,0029644$$

$$R_F = 39.16$$

mencari nilai R_T :

$$R_T = R_V + R_W$$

$$R_T = R_V + R_W$$

$$R_T = 50,903 + 2.391$$

$$R_T = 53.294$$

Nilai R_T ini digunakan sebagai acuan (referensi CSSRC) pada tahap validasi hasil CFD.

Form factor (k) turut dihitung menggunakan beberapa metode pendekatan empiris untuk keperluan ekstrapolasi tahanan, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.7 berikut:

Tabel 4.7 Perhitungan *form factor* (k) dengan beberapa metode empiris

Metode	k (Model)	k (Full Scale)
Watanabe	0,2014	0,2013

Conn & Ferguson	0,3662	0,3662
Grigson	0,2999	0,2999
Holtrop regression*	0,3401	0,3401
Wright	0,3117	0,3117
Couser <i>et al.</i> (round bilge monohull)	0,3882	0,3882

Metode Grigson dipilih sebagai nilai k representatif ($k = 0,2999$) karena hasilnya konsisten dengan rentang nilai dari metode-metode lain dan umum digunakan pada studi tahanan kapal niaga sejenis.

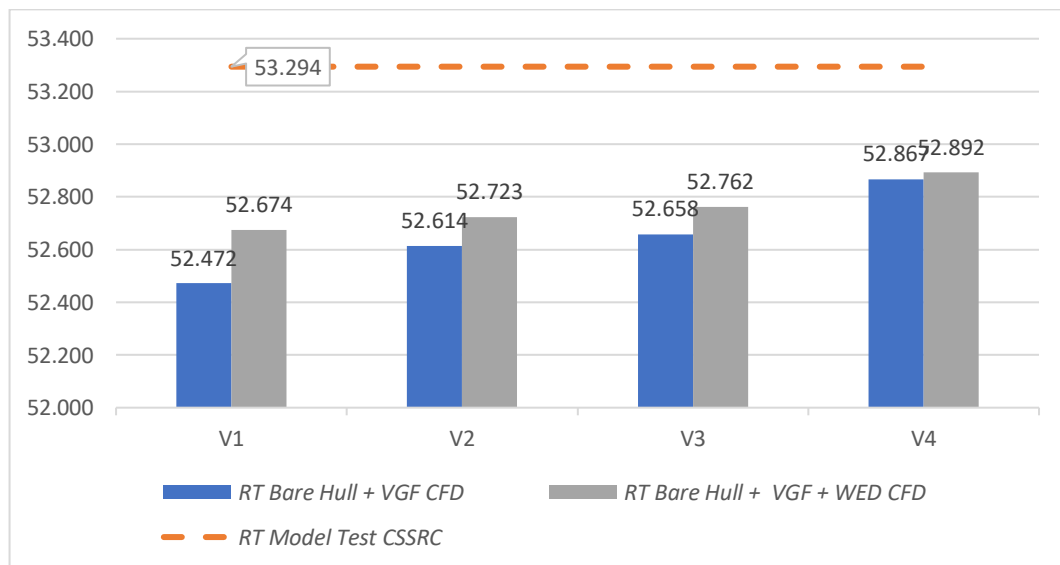
Mencari nilai k :

$$k = 0.028 + 3.30 \left[\frac{S}{L^2} \sqrt{C_B \frac{B}{L}} \right]$$

$$k = 0.028 + 3.30 \left[\frac{14,038}{7,9839^2} \sqrt{0,844 \frac{1,3238}{7,9839}} \right]$$

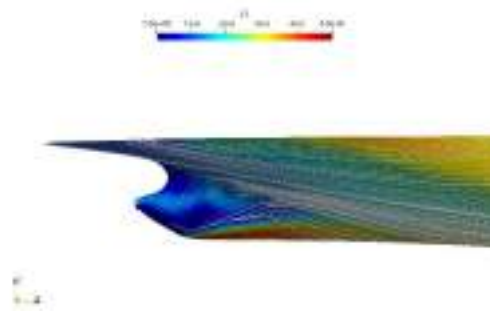
$$k = 0,2999$$

Perbandingan visual ketiga variasi terhadap garis acuan R_T tervalidasi disajikan pada Gambar 4.7 berikut.

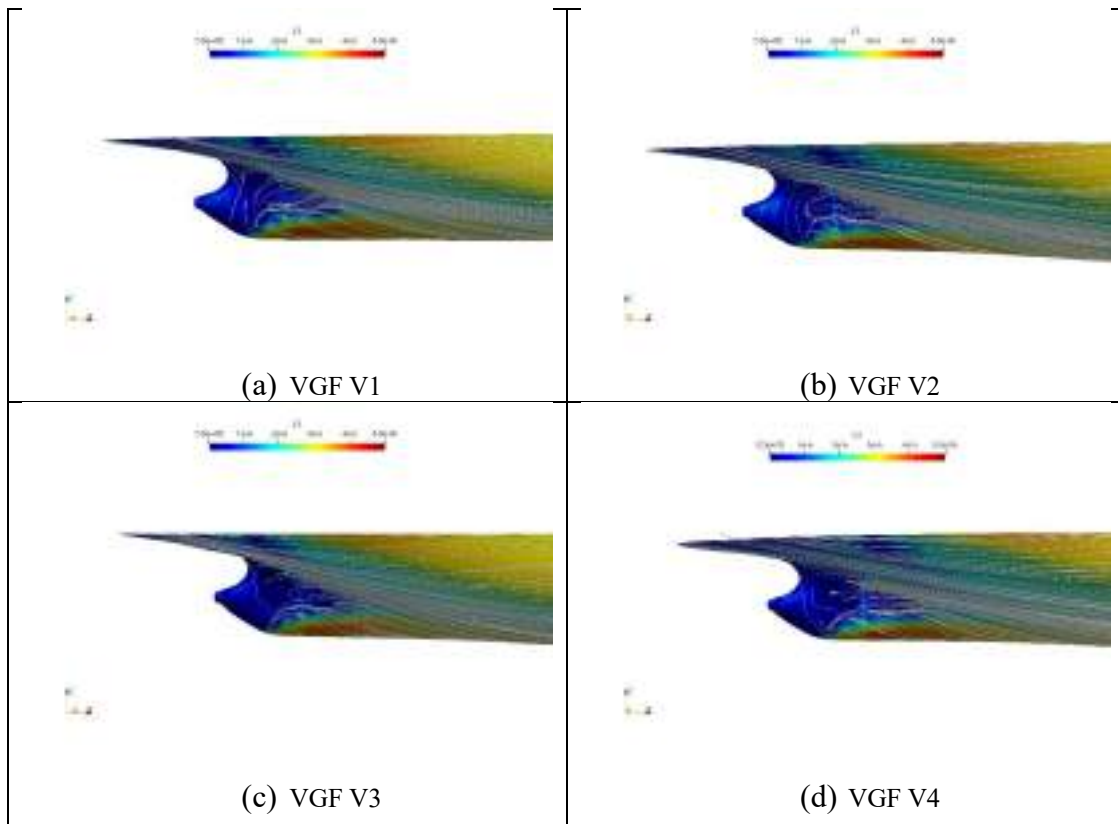


Gambar 4.7 Perbandingan R_T bare hull + VGF CFD dan R_T bare hull + VGF + WED CFD antar variasi mesh terhadap acuan R_T tervalidasi (ITTC/CSSRC)

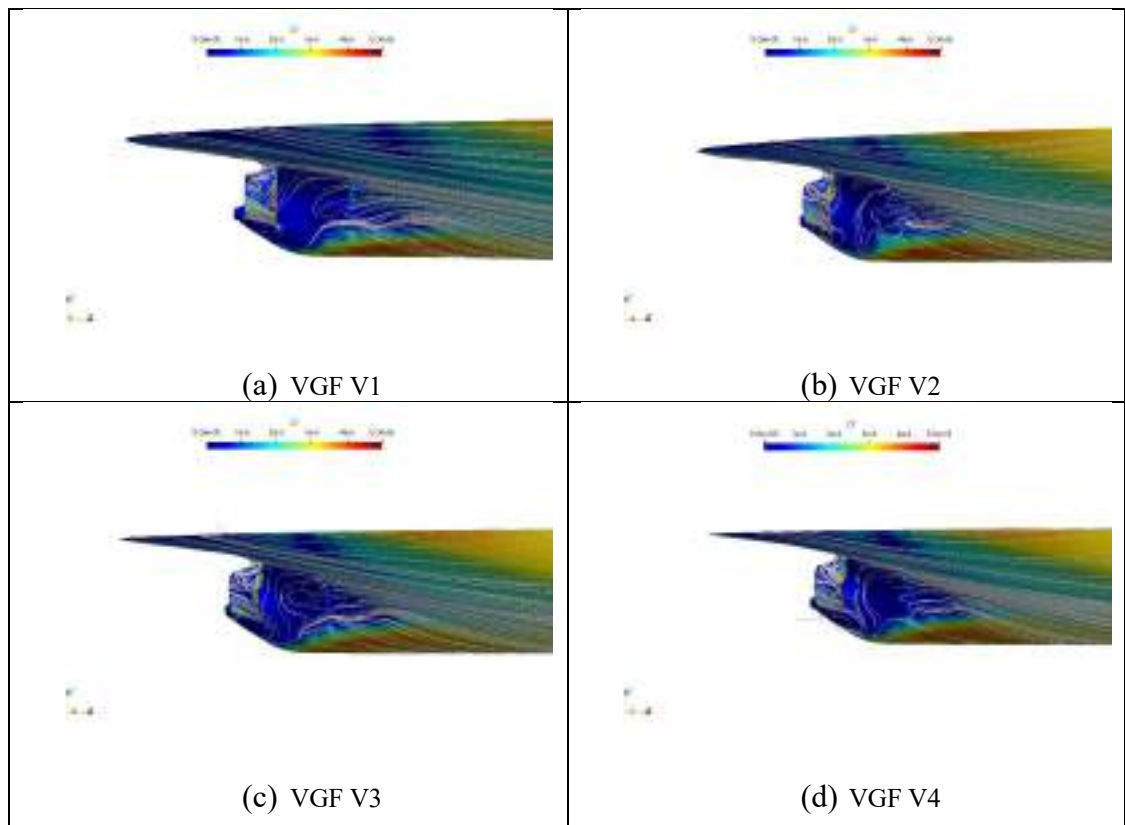
Sub-bab ini akan menyajikan hasil analisis pola aliran fluida di sekitar buritan kapal sebelum dan setelah penambahan VGF, berdasarkan hasil simulasi CFD. Analisis ini merupakan inti dari penelitian, karena perubahan pola aliran secara langsung menentukan perubahan distribusi *wake*, yang selanjutnya berpengaruh pada efisiensi propulsi. Berikut adalah kontur C_F magnitude dan *streamline hull* pada Gambar 4.8, Gambar 4.9, Gambar 4.10, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 dibawah.



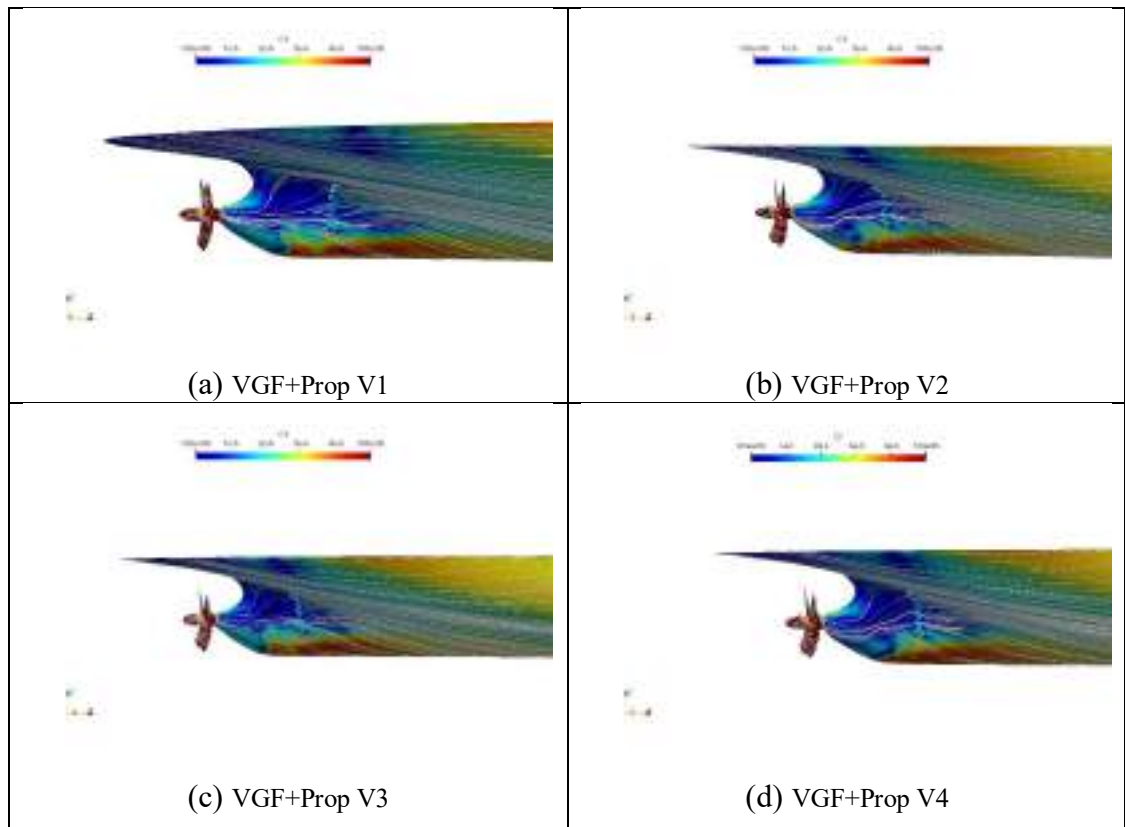
Gambar 4.8 Kontur C_F magnitude dan *streamline hull* (course)



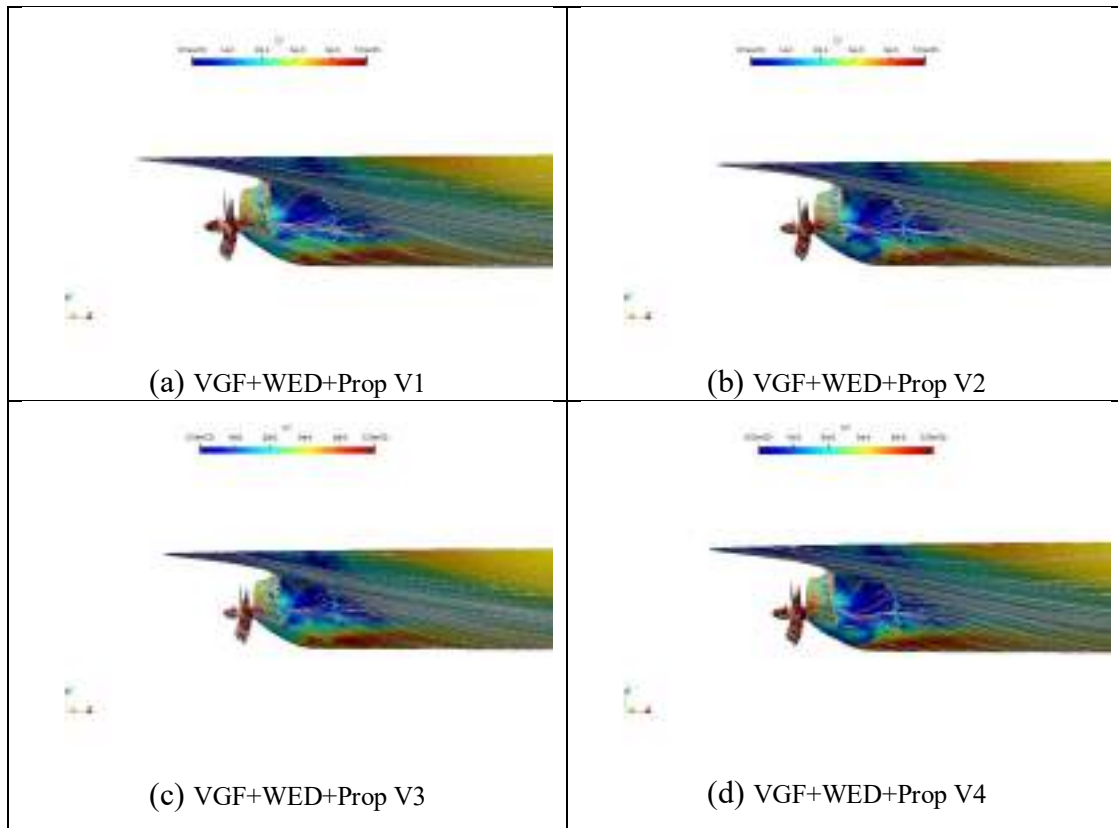
Gambar 4.9 Kontur C_F magnitude dan *streamline* (a)–(d) : VGF : V1-V4



Gambar 4.10 Kontur C_F magnitude dan *streamline* (a)–(d) : VGF + WED : V1-V4



Gambar 4.11 Kontur C_F magnitude dan *streamline* (a)–(d) : VGF + Prop : V1-V4



Gambar 4.12 Kontur C_f magnitude dan *streamline* (a)–(d) : VGF + WED + Prop : V1-V4

4.4.2 Perhitungan Nilai n

- a. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V1 + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{59}{2\pi}$$

$$n = 9.390$$

- b. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V2 + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{59}{2\pi}$$

$$n = 9.390$$

c. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V3 + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{59}{2\pi}$$

$$n = 9.390$$

d. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V4 + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{59.3}{2\pi}$$

$$n = 9.438$$

e. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V1 + WED + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{60.725}{2\pi}$$

$$n = 9.665$$

f. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V2 + WED + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{60.725}{2\pi}$$

$$n = 9.665$$

- g. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V3 + WED + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{60.725}{2\pi}$$

$$n = 9.665$$

- h. Perhitungan nilai n pada *hull* + VGF V4 + WED + *propeller*

$$n = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$n = \frac{60.725}{2\pi}$$

$$n = 9.665$$

4.4.3 Perhitungan Koefisien *Thrust*

Nilai *thrust* dapat digunakan untuk melakukan perhitungan nilai K_T menggunakan persamaan sebagai berikut:

- a. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V1 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{64.671}{998.369 (9.390)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.294$$

- b. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V2 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{64.921}{998.369 (9.390)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.295$$

- c. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V3 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{64.408}{998.369 (9.390)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.293$$

- d. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V4 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{65.658}{998.369 (9.438)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.296$$

- e. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V1 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{65.635}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.282$$

- f. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V2 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{66.078}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.284$$

g. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V3 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{65.591}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.282$$

h. Perhitungan koefisien *thrust* pada *hull* + VGF V4 + WED + *propeller*

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_T = \frac{66.124}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_T = 0.284$$

4.4.4 Perhitungan Koefisien *Torque*

Nilai *torque* dapat digunakan untuk melakukan perhitungan nilai K_Q menggunakan persamaan sebagai berikut:

a. Perhitungan koefisien *torque* pada *hull* + VGF V1 + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2344}{998.369 (9.390)^2 (0.22357)^5}$$

$$K_Q = 0.045$$

b. Perhitungan koefisien *torque* pada *hull* + VGF V2 + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2399}{998.369 (9.390)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_Q = 0.046$$

c. Perhitungan koefisien pada *hull* + VGF V3 + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2255}{998.369 (9.390)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_Q = 0.045$$

d. Perhitungan koefisien *torque* pada *hull* + VGF V4 + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2621}{998.369 (9.438)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_Q = 0.046$$

e. Perhitungan koefisien *torque* pada *hull* + VGF V1 + WED + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2813}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_Q = 0.044$$

f. Perhitungan koefisien *torque* pada *hull* + VGF V2 + WED + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2929}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_Q = 0.044$$

g. Perhitungan koefisien *torque* pada *hull* + VGF V3 + WED + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2855}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_Q = 0.044$$

h. Perhitungan koefisien *torque* pada *hull* + VGF V4 + WED + *propeller*

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

$$K_Q = \frac{2.2969}{998.369 (9.665)^2 (0.22357)^4}$$

$$K_Q = 0.044$$

4.4.5 Perhitungan Efisiensi *Behind*

Dari hasil perhitungan koefisien *thrust* dan koefisien *torque* dapat digunakan untuk menghitung nilai efisiensi dari setiap variasi kapal dengan penambahan WED. Sedangkan nilai J didapat dari $\frac{V_a}{nD}$, lalu nilai V_a dapat diketahui dengan membuat plane lingkaran sebesar radius *propeller* yang kemudian di integralkan di *software* ParaView. Detail perhitungan nilai V_a dapat dilihat pada lampiran.

a. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V1 + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.294}{0.045} \frac{0.526}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.542$$

b. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V2 + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.295}{0.046} \frac{0.525}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.542$$

c. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V3 + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.293}{0.045} \frac{0.523}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.538$$

d. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V4 + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.296}{0.046} \frac{0.523}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.540$$

e. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V1 + WED + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.282}{0.044} \frac{0.532}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.544$$

f. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V2 + WED + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.284}{0.044} \frac{0.530}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.544$$

g. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V3 + WED + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.282}{0.044} \frac{0.531}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.542$$

h. Perhitungan efisiensi *behind* pada *hull* + VGF V4 + WED + *propeller*

$$\eta_B = \frac{KT}{KQ} \frac{J}{2\pi}$$

$$\eta_B = \frac{0.284}{0.044} \frac{0.529}{2\pi}$$

$$\eta_B = 0.542$$

4.4.6 Perhitungan Efisiensi Lambung

a. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V1 + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.472 \times 1.373}{64.672 \times 1.105}$$

$$\eta_H = 1.000$$

b. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V2 + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.614 \times 1.373}{64.921 \times 1.103}$$

$$\eta_H = 1.009$$

c. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V3 + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.658 \times 1.373}{64.408 \times 1.098}$$

$$\eta_H = 1.023$$

d. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V4 + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.867 \times 1.373}{65.658 \times 1.103}$$

$$\eta_H = 1.003$$

e. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V1 + WED + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.674 \times 1.373}{65.635 \times 1.149}$$

$$\eta_H = 0.959$$

f. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V2 + WED + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.723 \times 1.373}{66.078 \times 1.146}$$

$$\eta_H = 0.956$$

g. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V3 + WED + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.762 \times 1.373}{65.591 \times 1.148}$$

$$\eta_H = 0.962$$

h. Perhitungan efisiensi lambung pada *hull* + VGF V4 + WED + *propeller*

$$\eta_H = \frac{R_T \times V_S}{T \times V_a}$$

$$\eta_H = \frac{52.892 \times 1.373}{66.124 \times 1.143}$$

$$\eta_H = 0.961$$

4.4.7 Perhitungan QPC (*Quasi-Propulsive Coefficient*)

Selanjutnya dilakukan perhitungan QPC untuk mengetahui variasi WED paling optimal. Penelitian berfokus pada efisiensi hidrodinamis dengan mengabaikan efisiensi mekanis. Nilai efisiensi lambung η_H didapat dari EHP/THP . Detail perhitungan dapat dilihat pada lampiran.

a. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V1 + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 1.000 \times 0.542$$

$$\eta_D = 0.542$$

b. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V2 + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 1.009 \times 0.525$$

$$\eta_D = 0.547$$

c. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V3 + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 1.023 \times 0.523$$

$$\eta_D = 0.551$$

d. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V4 + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 1.003 \times 0.523$$

$$\eta_D = 0.541$$

e. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V1 + WED + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 0.959 \times 0.532$$

$$\eta_D = 0.522$$

f. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V2 + WED + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 0.956 \times 0.530$$

$$\eta_D = 0.520$$

g. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V3 + WED + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 0.962 \times 0.531$$

$$\eta_D = 0.522$$

h. Perhitungan QPC pada *hull* + VGF V4 + WED + *propeller*

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_B$$

$$\eta_D = 0.961 \times 0.529$$

$$\eta_D = 0.521$$

4.4.8 Analisis Performa *Propeller* Pada Lambung Dengan VGF

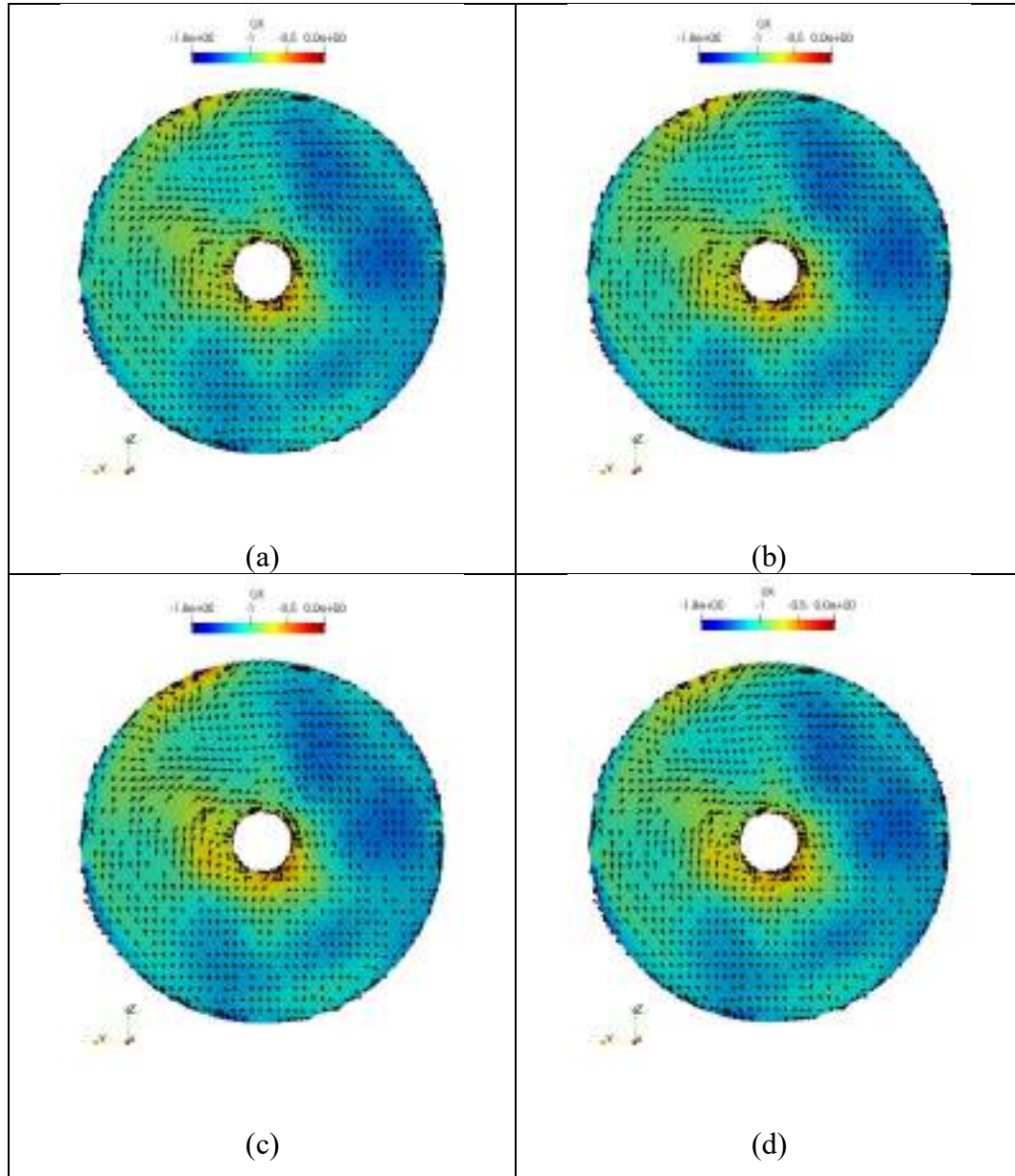
Simulasi *self-propulsion* untuk keempat konfigurasi VGF (V1, V2, V3, dan V4) telah diselesaikan pada kecepatan dinas ($V_M = 1,373$ m/s; $V_S = 11$ knot) untuk dua tahap permodelan, yaitu kondisi VGF + *propeller* (tanpa WED). Tabel 4.8 berikut menyajikan gaya dorong *propeller* (T_{prop} CFD) dan gaya tahanan model (R_T) hasil CFD, lalu pada Tabel 4.8 adalah pola aliran pada kondisi *hull* + VGF + *propeller*.

Tabel 4.8 T_{prop} dan R_T model CFD – kondisi VGF + *propeller* (tanpa WED)

Variasi	ω (Omega)	R_T CFD	T_{prop} CFD	Error (%)
<i>Hull</i> + VGF V1 + <i>Propeller</i>	59	64.105	64.672	-0.883
<i>Hull</i> + VGF V2 + <i>Propeller</i>	59	64.454	64.921	-0.726
<i>Hull</i> + VGF V3 + <i>Propeller</i>	59	64.333	64.408	-0.117

<i>Hull + VGF V4 + Propeller</i>	59.3	65.014	65.658	-0.989
----------------------------------	------	--------	--------	--------

Berikut ini adalah kontur UX untuk melihat bagaimana pola aliran pada Gambar 4.13 kondisi VGF + *propeller* (tanpa WED).



Gambar 4.13 Kontur UX pola aliran pada kondisi *hull + VGF + propeller* (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4

Tabel 4.9 Tabel pola aliran pada kondisi *hull + VGF + propeller*

Variasi	n (rad/s)	K_T	K_Q	J	η_B	η_H	η_D
<i>Hull + VGF V1 + Propeller</i>	9.390	0.294	0.045	0.526	0.542	1.000	0.542
<i>Hull + VGF V2 + Propeller</i>	9.390	0.295	0.046	0.525	0.542	1.009	0.547
<i>Hull + VGF V3 + Propeller</i>	9.390	0.293	0.045	0.523	0.538	1.023	0.551

<i>Hull + VGF V4 + Propeller</i>	9.438	0.296	0.046	0.523	0.540	1.003	0.541
----------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

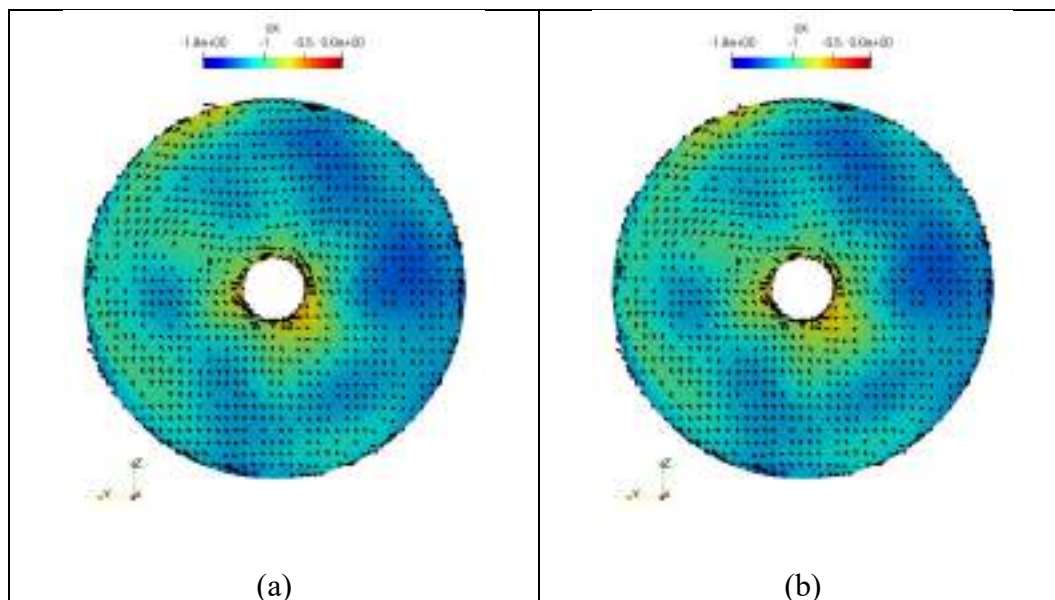
4.4.9 Analisis Performa *Propeller* Pada Lambung Dengan WED & VGF

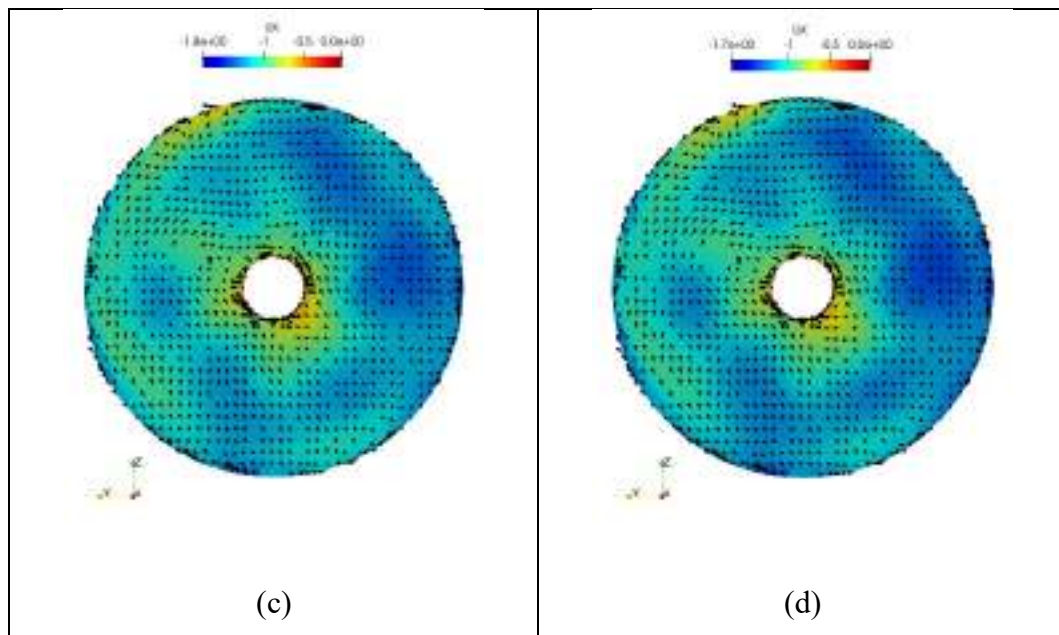
Simulasi *self-propulsion* untuk keempat konfigurasi VGF (V1, V2, V3, dan V4) telah diselesaikan pada kecepatan dinas ($V_M = 1,373$ m/s; $V_S = 11$ knot) untuk dua tahap permodelan, yaitu kondisi VGF + WED + *propeller*. Tabel 4.10 berikut menyajikan gaya dorong *propeller* (T_{prop} CFD) dan gaya tahanan model (R_T) hasil CFD, lalu pada Tabel 4.10 adalah pola aliran pada kondisi *hull + VGF + propeller*.

Tabel 4.10 T_{prop} dan R_T model CFD – kondisi VGF + WED + *propeller*

Variasi	ω (Omega)	R_T CFD	T_{prop} CFD	Error (%)
<i>Hull + VGF V1 + WED + Propeller</i>	60.725	65.950	65.635	0.478
<i>Hull + VGF V2 + WED + Propeller</i>	60.725	66.140	66.078	0.094
<i>Hull + VGF V3 + WED + Propeller</i>	60.725	65.970	65.591	0.576
<i>Hull + VGF V4 + WED + Propeller</i>	60.725	66.312	66.124	0.283

Berikut ini adalah kontur UX untuk melihat bagaimana pola aliran pada Gambar 4.14 kondisi VGF + WED + *propeller*.



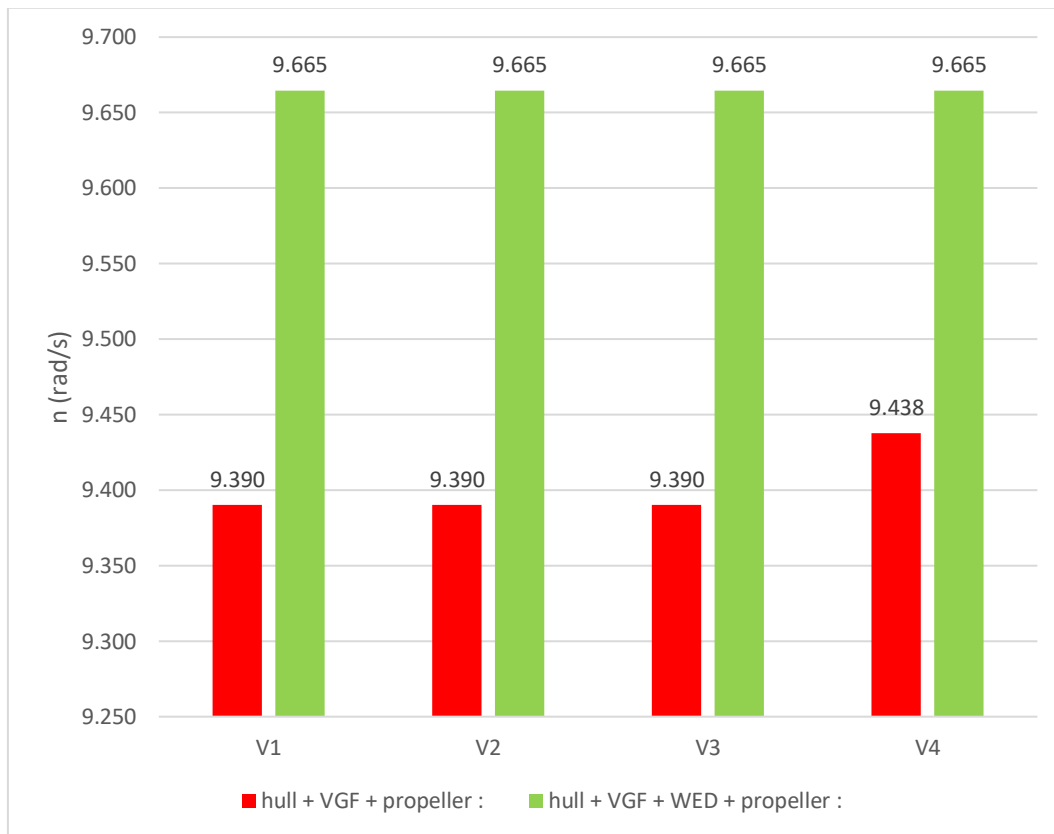


Gambar 4.14 Kontur UX pola aliran pada kondisi *hull* + VGF + WED + *propeller* (a) V1, (b) V2, (c) V3, (d) V4

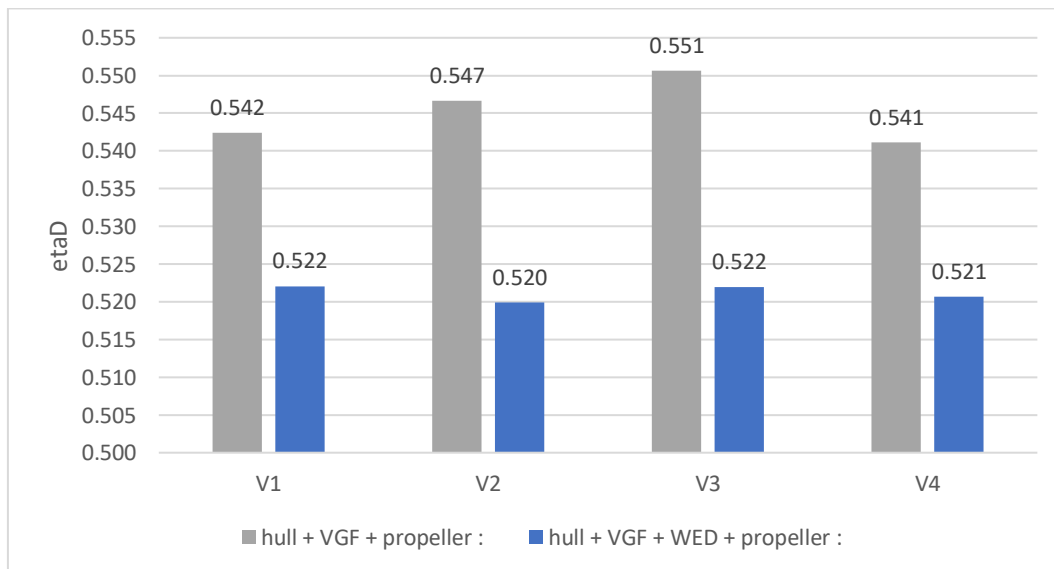
Tabel 4.11 Tabel pola aliran pada kondisi *hull* + VGF + WED + *propeller*

Variasi	n (rad/s)	K_T	K_Q	J	η_B	η_H	η_D
<i>Hull</i> + VGF V1 + WED + <i>Propeller</i>	9.665	0.282	0.044	0.532	0.544	0.959	0.522
<i>Hull</i> + VGF V2 + WED + <i>Propeller</i>	9.665	0.284	0.044	0.530	0.544	0.956	0.510
<i>Hull</i> + VGF V3 + WED + <i>Propeller</i>	9.665	0.282	0.044	0.531	0.542	0.962	0.522
<i>Hull</i> + VGF V4 + WED + <i>Propeller</i>	9.665	0.284	0.044	0.529	0.542	0.961	0.521

Dari Tabel 4.9 dan Tabel 4.11 diatas dibuat grafik antar konfigurasi nilai n (rad/s) dan η_D variasi *hull* + VGF (V1, V2, V3, V4) di Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 baik dengan WED maupun tidak.



Gambar 4.15 Konfigurasi nilai n (rad/s)



Gambar 4.16 Konfigurasi nilai η_D

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terhadap pengaruh pemasangan *Vortex Generator Fins* (VGF) dan *Wake Equalizing Duct* (WED) pada kapal kontainer 913 TEUs, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Model simulasi CFD yang dibangun telah tervalidasi dan memenuhi kriteria *grid independence*, ditunjukkan oleh deviasi R_V bare hull terhadap data referensi CSSRC yang relatif kecil (2,38–3,86%) pada tiga variasi *mesh* (*coarse, medium, fine*).
2. Sebelum pemasangan VGF, pola aliran di buritan kapal menunjukkan indikasi separasi aliran sehingga distribusi *wake* menuju *propeller* kurang merata.
3. Setelah pemasangan VGF, pola aliran di buritan membaik karena VGF mampu menunda terjadinya separasi aliran sehingga distribusi *wake* menuju *propeller* menjadi lebih merata.
4. Pemasangan VGF berpengaruh terhadap kinerja *propeller*, terlihat dari perubahan nilai K_T , K_Q , dan efisiensi *behind-hull* (η_B) pada tiap konfigurasi (V1–V4), dengan konfigurasi V3 memberikan performa terbaik (η_D tertinggi = 0,551 pada kondisi VGF tanpa WED).
5. Pemasangan VGF menurunkan koefisien tahanan total kapal (C_T), karena penurunan koefisien tahanan residu (C_R) akibat tertundanya separasi lebih besar dibanding kenaikan koefisien gesek (C_F) akibat tambahan jumlah variasi VGF, maka data *error* turun dari 1,543% (V1) menjadi 0,802% (V4).
6. Penambahan WED bersama VGF menghasilkan pola aliran di buritan yang lebih terarah menuju *propeller* dan memberikan efisiensi propulsi lebih baik dibandingkan penggunaan WED saja, dengan konfigurasi kombinasi VGF+WED terbaik pada V3.

7. Secara keseluruhan, kombinasi VGF dan WED terbukti mampu meningkatkan kualitas aliran di buritan kapal serta efisiensi propulsi pada kapal kontainer 913 TEUs, sesuai dengan tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa keterbatasan dan peluang pengembangan yang dapat menjadi bahan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Perlu dikaji lebih lanjut pemilihan model turbulensi dan kondisi batas untuk memperkecil deviasi hasil CFD terhadap data uji model, mengingat deviasi R_V justru sedikit membesar seiring penghalusan *mesh*.
2. Penelitian selanjutnya disarankan turut memperhitungkan efisiensi mekanis (tidak hanya efisiensi hidrodinamis) agar diperoleh nilai QPC yang lebih menyeluruh.
3. Perlu dilakukan variasi tambahan pada geometri, posisi, dan sudut pemasangan VGF maupun WED untuk memperoleh konfigurasi yang lebih optimal.
4. Disarankan dilakukan validasi eksperimental (model *test*) tambahan, khususnya untuk konfigurasi kombinasi VGF + WED, guna memperkuat akurasi hasil simulasi numerik.
5. Penelitian lanjutan dapat mengembangkan studi pada variasi kecepatan dinas atau kondisi operasional lain (misalnya kondisi *ballast*) untuk menguji konsistensi performa VGF dan WED.

DAFTAR PUSTAKA

- 15, A. (2023). *CO 2 emissions from ships*. 377(July), 1–17.
- Ahmed, Y. M., Elbatran, A. H., & Shabara, H. M. (2014). *Study of the Effect of Low Profile Vortex Generators on Ship Viscous Resistance. The Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace -Science and Engineering- (JOMase)*, 3(1), 8–14. <https://doi.org/10.36842/jomase.v3i1.519>
- De Jong, J. H. (2011). *A Framework for Energy Saving Device (ESD) Decision Making. International Conference on Ship Efficiency*.
- Dymarski, P., & Kraskowski, M. (2011). *Numerical and Experimental Investigation of the Possibility of Forming the Wake Flow of Large Ships by Using the Vortex Generators. Second International Symposium on Marine Propulsors, (June)*.
- Environment, B., & Press, W. I. T. (1995). *Transactions on the Built Environment vol 11*, © 1995 WIT Press, www.witpress.com, ISSN 1743-3509. 11.
- Heinke, H., & Hellwig-Rieck, K. (2011). *Investigation of Scale Effects on Ships with a Wake Equalizing Duct or with Vortex Generator Fins (Number June)*.
- ITTC. (2017). *ITTC – Recommended Procedures and Guidelines ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines Seakeeping Experiments ITTC – Recommended Procedures and Guidelines*.
- Kimmeth, J. (2025). *Wedged Vortex Generator Applications for Marine Vessels by*.
- Martinas, G., & Cupsa, O. (2015). *Numeric Wake Equalizing Duct Geometry Optimization for a Given Ship. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 9(2), 243–248. <https://doi.org/10.12716/1001.09.02.12>
- Merchant, S., & Design, S. (2016). *Container Ship with WED and Design Propeller*. (160292).
- Mirzaei, M., & Arabi, S. (2005). *Drag optimization for axisymmetric afterbodies with jet plume using computational fluid dynamics. ANZIAM Journal*, 46, 1069. <https://doi.org/10.21914/anziamj.v46i0.1007>

- Mogilevsky, I. (2023). *Shipping decarbonization through sea route optimization & Vortex generator resistance reduction*.
- Nabilah. (2024). Kajian Numerik Pengaruh Penambahan *Energy Saving Device* Jenis *Becker-Mewis Duct* pada Kinerja *Propeller*. *Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*.
- Rongcai, R. E. N., Guoxiong, W. U., & Ming, C. A. I. (2022). 2021 *Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto 2021 Revised MARPOL Annex VI (Resolution MEPC.328(76))*. (November).
- Saydam, A. Z., Gokcay, S., & Insel, M. (2018). CFD based vortex generator *Design and full-scale testing for wake non-uniformity reduction*. *Ocean Engineering*, 153(August 2017), 282–296.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.097>
- Zanne, M., Palčič, J., & Lakićević, M. (2025). *Trade-offs in Meeting the MARPOL Annex VI Requirements with the Focus on Costs*. *Transactions on Maritime Science*, 14(2), 1–10. <https://doi.org/10.7225/toms.v14.n02.s13>



LAMPIRAN

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Tabel Parameter Geometri Kapal *existing* 913 TEUs dan Referensi CSSRC (2016) model

Parameter	Kapal <i>existing</i> 913 TEUs (<i>Lines Plan</i> BKI)	Kapal Referensi CSSRC (2016) model
LBP (m)	133.00	7.8251
B (m)	22.50	1.3238
D (m)	10.20	–
T Desain (m)	5.80	0.3295
∇ (m ³)	14.420,9	14.419,8
CB (–)	0.8663	0.860
CM (–)	0.9992	0.996
CP (–)	0.8668	0.863
C_w (–)	0.8523	0.952
Jenis ESD	WED (<i>existing</i>)	WED + <i>propeller</i> S209G

Tabel Hasil Perhitungan Skala Geometri Vortex *Generator Fins* (*VG Scaling*)

Parameter	Simbol	Model MIT (Kimmeth, 2025)	Model CSSRC SM1554-1	Satuan
LPP	L	1,400	7,8251	m
Kecepatan	U	1,300	1,373	m/s
Viskositas kinematik	ν	$1,00 \times 10^{-6}$	$1,0232 \times 10^{-6}$	m ² /s
Faktor skala panjang	λ	1,000	5,5894	-
Faktor skala kecepatan	λ_U	1,000	1,0562	-
<i>Reynolds number</i>	Re	$1,820 \times 10^6$	$1,0500 \times 10^7$	-
$Re^{(1/5)}$	-	17,865	25,365	-
Tebal <i>boundary layer</i> (Pers. 2.9)	δ	0,029	0,1136	m
koefisien gesek (Pers. 2.12)	C_f	0,00413	0,005894	-

Faktor skala geometri	$SF = \frac{\delta CSSRC}{\delta MIT}$	1,000	3,9187	-
Tinggi VGF terskala	h_{VG}	7,00	27,43	mm
Panjang VGF terskala	L_{VG}	28,00	109,72	mm
Lebar VGF terskala	w_{VG}	17,00	66,62	mm
Luas permukaan VGF terskala	A_{VG}	298	4.576,2	mm ²
Jumlah VGF (per sisi)	n	15	15	buah

Data MaxSurf

	Item	Value	Units	Holtrop
1	LWL	7.975	m	7.975
2	Beam	1.324	m	1.324 (hig
3	Draft	0.33	m	0.33 (low)
4	Displaced volume	2.937	m^3	2.937
5	Wetted area	13.839	m^2	13.839
6	Prismatic coeff. (Cp)	0.847		0.847
7	Waterpl. area coeff. (C	0.935		0.935
8	1/2 angle of entrance	40.1	deg.	40.1
9	LCG from midships(+ve	0.21	m	0.21
10	Transom area	0	m^2	0
11	Transom wl beam	0	m	--
12	Transom draft	0	m	--
13	Max sectional area	0.435	m^2	--
14	Bulb transverse area	0.018	m^2	0.018
15	Bulb height from keel	0	m	0
16	Draft at FP	0.329	m	0.329
17	Deadrise at 50% LWL	0	deg.	--
18	Hard chine or Round bil	Round bilg		--
19				
20	Frontal Area	0	m^2	
21	Headwind	0	kn	
22	Drag Coefficient	0		
23	Air density	0.001	tonne/	
24	Appendage Area	0	m^2	
25	Nominal App. length	0	m	
26	Appendage Factor	1		
27				
28	Correlation allow.	0.0004		Calculate
29	Kinematic viscosity	0.0000011	m^2/s	
30	Water Density	1.026	tonne/	

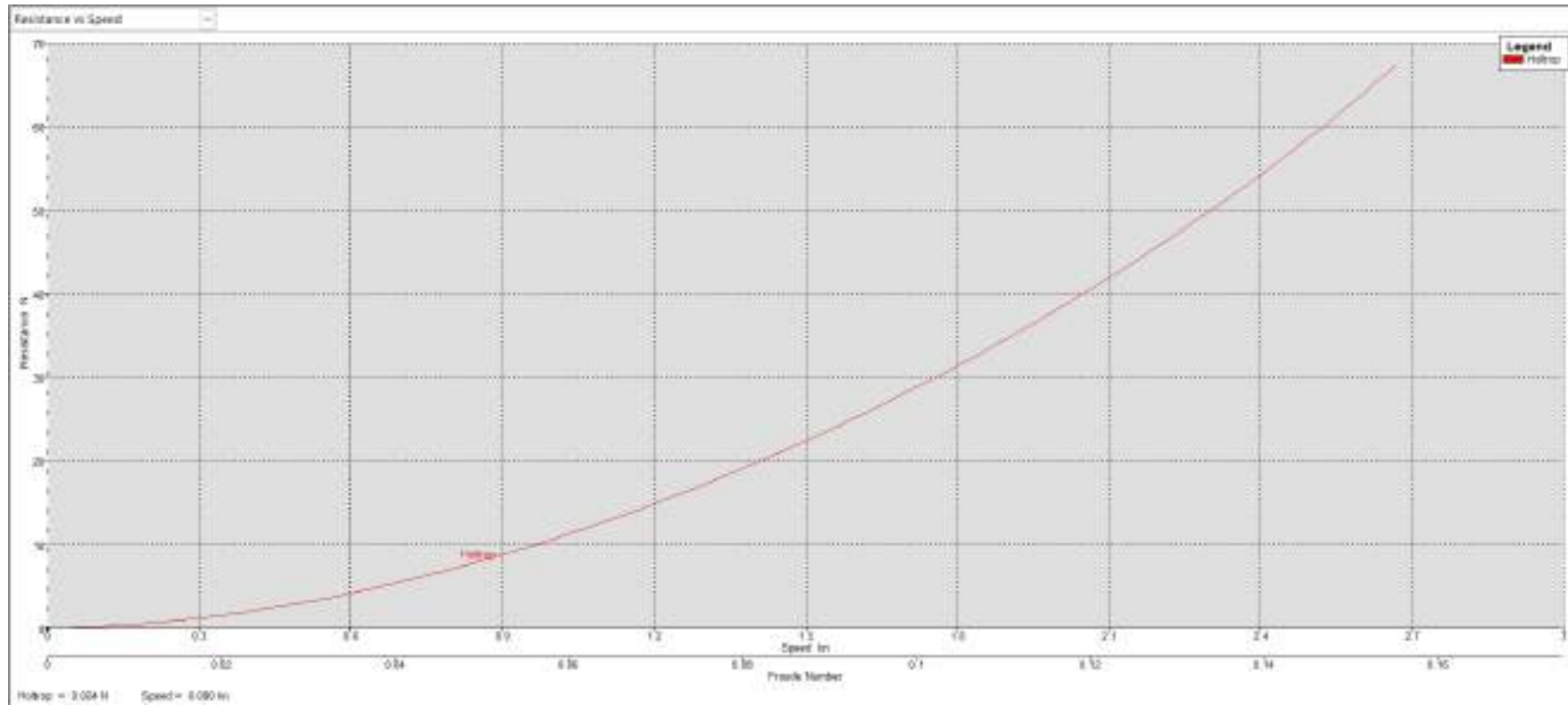
Tabel R_T Vs Speed MaxSurf

Speed	R_T
0.033363	0.023999
0.066725	0.080702

0.100088	0.165393
0.13345	0.276083
0.166813	0.411525
0.200175	0.570824
0.233538	0.753292
0.2669	0.958376
0.300263	1.185613
0.333625	1.434609
0.366988	1.705024
0.40035	1.996556
0.433713	2.308936
0.467075	2.641923
0.500438	2.995298
0.5338	3.368859
0.567163	3.762423
0.600525	4.175819
0.633888	4.608888
0.66725	5.061483
0.700613	5.533465
0.733975	6.024704
0.767338	6.535077
0.8007	7.064469
0.834063	7.61277
0.867425	8.179875
0.900788	8.765686
0.93415	9.370108
0.967513	9.993051
1.000875	10.63443
1.034238	11.29416
1.0676	11.97216
1.100963	12.66836
1.134325	13.38269
1.167688	14.11508
1.20105	14.86545
1.234413	15.63376
1.267775	16.41994
1.301138	17.22395
1.3345	18.04573
1.367863	18.88524
1.401225	19.74246
1.434588	20.61735
1.46795	21.5099
1.501313	22.42011
1.534675	23.34798

1.568038	24.29353
1.6014	25.2568
1.634763	26.23786
1.668125	27.23677
1.701488	28.25363
1.73485	29.28858
1.768213	30.34176
1.801575	31.41335
1.834938	32.50358
1.8683	33.61269
1.901663	34.74096
1.935025	35.88873
1.968388	37.05636
2.00175	38.24426
2.035113	39.4529
2.068475	40.68278
2.101838	41.93445
2.1352	43.20854
2.168563	44.50569
2.201925	45.82662
2.235288	47.17211
2.26865	48.54299
2.302013	49.94013
2.335375	51.36448
2.368738	52.81704
2.4021	54.29887
2.435463	55.81108
2.468825	57.35486
2.502188	58.93142
2.53555	60.54206
2.568913	62.18813
2.602275	63.87102
2.635638	65.59219
2.669	67.35313

Grafik R_T Vs *Speed* MaxSurf

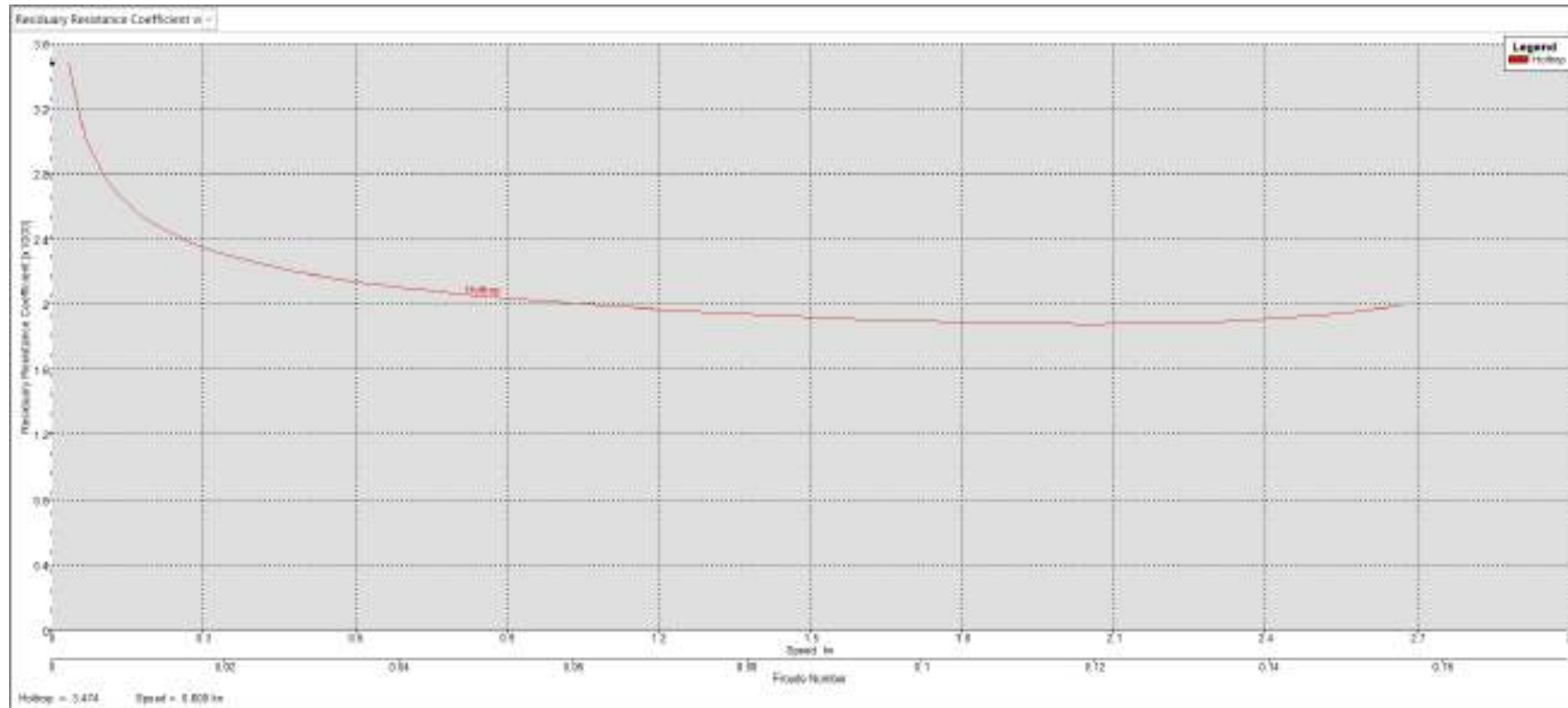


Tabel C_T Vs *Speed* MaxSurf

<i>Speed</i>	C_T	Model
0.033363	11.47681	1.15E-02
0.066725	9.648384	9.65E-03
0.100088	8.788347	8.79E-03
0.13345	8.251879	8.25E-03
0.166813	7.872063	7.87E-03
0.200175	7.582842	7.58E-03
0.233538	7.351905	7.35E-03
0.2669	7.161241	7.16E-03
0.300263	6.999875	7.00E-03
0.333625	6.860663	6.86E-03
0.366988	6.738723	6.74E-03
0.40035	6.630579	6.63E-03
0.433713	6.533677	6.53E-03
0.467075	6.446093	6.45E-03
0.500438	6.366342	6.37E-03
0.5338	6.293256	6.29E-03
0.567163	6.225902	6.23E-03
0.600525	6.163525	6.16E-03
0.633888	6.105503	6.11E-03
0.66725	6.051322	6.05E-03
0.700613	6.00055	6.00E-03
0.733975	5.952821	5.95E-03
0.767338	5.907824	5.91E-03
0.8007	5.865291	5.87E-03
0.834063	5.82499	5.82E-03
0.867425	5.78672	5.79E-03
0.900788	5.750305	5.75E-03
0.93415	5.715589	5.72E-03
0.967513	5.682437	5.68E-03
1.000875	5.650725	5.65E-03
1.034238	5.620345	5.62E-03
1.0676	5.591201	5.59E-03
1.100963	5.563205	5.56E-03
1.134325	5.53628	5.54E-03
1.167688	5.510355	5.51E-03
1.20105	5.485366	5.49E-03
1.234413	5.461255	5.46E-03
1.267775	5.437971	5.44E-03
1.301138	5.415468	5.42E-03
1.3345	5.393701	5.39E-03
1.367863	5.372635	5.37E-03

1.401225	5.352235	5.35E-03
1.434588	5.33247	5.33E-03
1.46795	5.313315	5.31E-03
1.501313	5.294746	5.29E-03
1.534675	5.276744	5.28E-03
1.568038	5.259293	5.26E-03
1.6014	5.242379	5.24E-03
1.634763	5.225991	5.23E-03
1.668125	5.210123	5.21E-03
1.701488	5.194771	5.19E-03
1.73485	5.179932	5.18E-03
1.768213	5.165608	5.17E-03
1.801575	5.151803	5.15E-03
1.834938	5.138523	5.14E-03
1.8683	5.125776	5.13E-03
1.901663	5.113574	5.11E-03
1.935025	5.10193	5.10E-03
1.968388	5.09086	5.09E-03
2.00175	5.08038	5.08E-03
2.035113	5.070511	5.07E-03
2.068475	5.061272	5.06E-03
2.101838	5.052687	5.05E-03
2.1352	5.044778	5.04E-03
2.168563	5.037572	5.04E-03
2.201925	5.031094	5.03E-03
2.235288	5.025372	5.03E-03
2.26865	5.020433	5.02E-03
2.302013	5.016305	5.02E-03
2.335375	5.013018	5.01E-03
2.368738	5.010601	5.01E-03
2.4021	5.009083	5.01E-03
2.435463	5.008494	5.01E-03
2.468825	5.008864	5.01E-03
2.502188	5.010221	5.01E-03
2.53555	5.012594	5.01E-03
2.568913	5.016012	5.02E-03
2.602275	5.020502	5.02E-03
2.635638	5.026092	5.03E-03
2.669	5.032807	5.03E-03

Grafik C_T Vs Speed MaxSurf

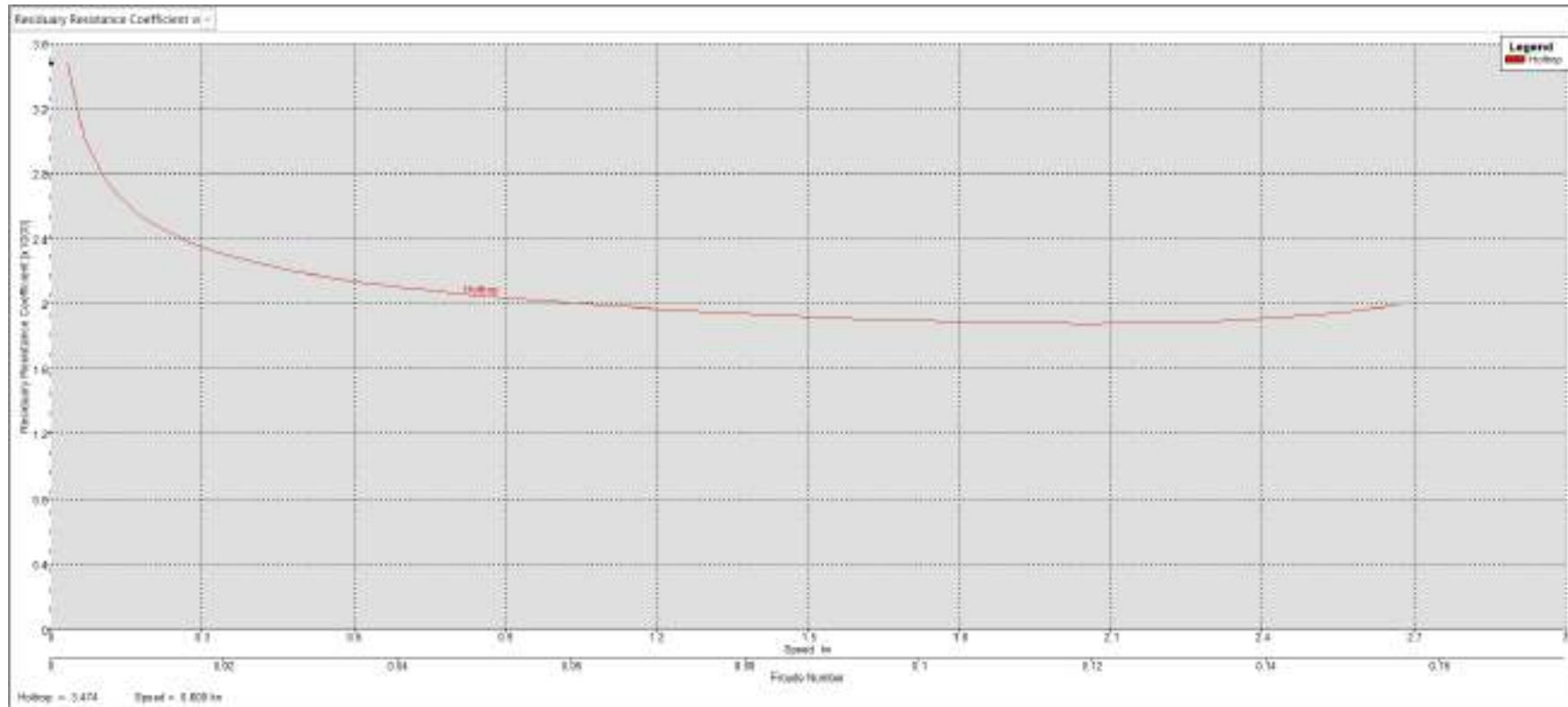


Tabel C_R Vs $Speed$ MaxSurf

$Speed$	C_R	Model
0.033363	3.474402	3.47E-03
0.066725	3.014705	3.01E-03
0.100088	2.798477	2.80E-03
0.13345	2.6636	2.66E-03
0.166813	2.568108	2.57E-03
0.200175	2.495393	2.50E-03
0.233538	2.437332	2.44E-03
0.2669	2.389396	2.39E-03
0.300263	2.348825	2.35E-03
0.333625	2.313825	2.31E-03
0.366988	2.283168	2.28E-03
0.40035	2.255978	2.26E-03
0.433713	2.231616	2.23E-03
0.467075	2.209596	2.21E-03
0.500438	2.189545	2.19E-03
0.5338	2.17117	2.17E-03
0.567163	2.154236	2.15E-03
0.600525	2.138553	2.14E-03
0.633888	2.123966	2.12E-03
0.66725	2.110344	2.11E-03
0.700613	2.097579	2.10E-03
0.733975	2.085579	2.09E-03
0.767338	2.074266	2.07E-03
0.8007	2.063572	2.06E-03
0.834063	2.05344	2.05E-03
0.867425	2.043818	2.04E-03
0.900788	2.034663	2.03E-03
0.93415	2.025935	2.03E-03
0.967513	2.0176	2.02E-03
1.000875	2.009627	2.01E-03
1.034238	2.00199	2.00E-03
1.0676	1.994663	1.99E-03
1.100963	1.987626	1.99E-03
1.134325	1.980859	1.98E-03
1.167688	1.974345	1.97E-03
1.20105	1.968068	1.97E-03
1.234413	1.962015	1.96E-03
1.267775	1.956174	1.96E-03
1.301138	1.950534	1.95E-03
1.3345	1.945088	1.95E-03
1.367863	1.939828	1.94E-03

1.401225	1.934748	1.93E-03
1.434588	1.929844	1.93E-03
1.46795	1.925115	1.93E-03
1.501313	1.92056	1.92E-03
1.534675	1.91618	1.92E-03
1.568038	1.911977	1.91E-03
1.6014	1.907957	1.91E-03
1.634763	1.904126	1.90E-03
1.668125	1.900492	1.90E-03
1.701488	1.897066	1.90E-03
1.73485	1.893859	1.89E-03
1.768213	1.890886	1.89E-03
1.801575	1.888162	1.89E-03
1.834938	1.885705	1.89E-03
1.8683	1.883535	1.88E-03
1.901663	1.881672	1.88E-03
1.935025	1.880139	1.88E-03
1.968388	1.878961	1.88E-03
2.00175	1.878163	1.88E-03
2.035113	1.877772	1.88E-03
2.068475	1.877817	1.88E-03
2.101838	1.878327	1.88E-03
2.1352	1.879333	1.88E-03
2.168563	1.880866	1.88E-03
2.201925	1.882959	1.88E-03
2.235288	1.885644	1.89E-03
2.26865	1.888955	1.89E-03
2.302013	1.892926	1.89E-03
2.335375	1.897589	1.90E-03
2.368738	1.902981	1.90E-03
2.4021	1.909133	1.91E-03
2.435463	1.916082	1.92E-03
2.468825	1.923858	1.92E-03
2.502188	1.932497	1.93E-03
2.53555	1.942031	1.94E-03
2.568913	1.952491	1.95E-03
2.602275	1.963908	1.96E-03
2.635638	1.976315	1.98E-03
2.669	1.989738	1.99E-03

Tabel C_R Vs Speed MaxSurf

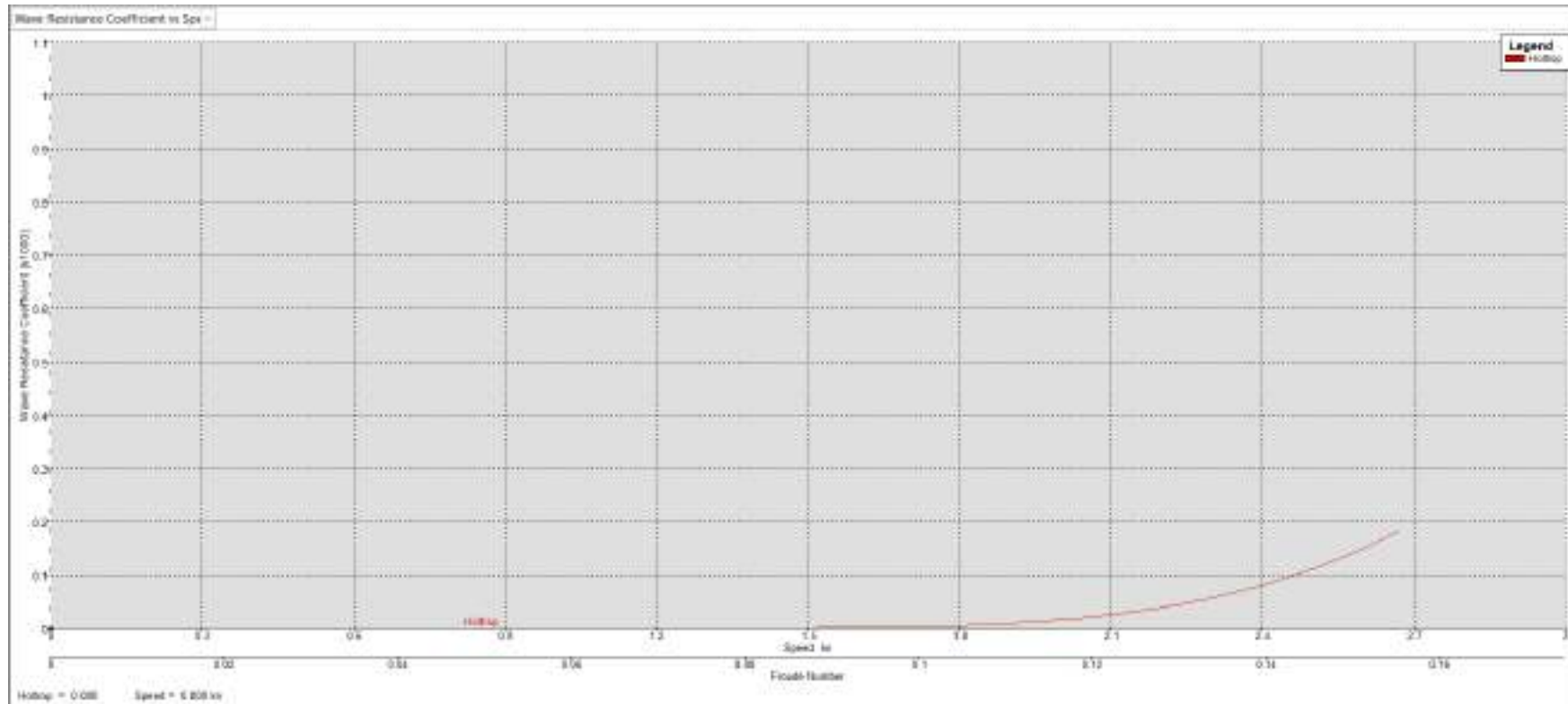


Tabel C_w Vs *Speed* MaxSurf

<i>Speed</i>	C_w	Model
0.033363	0	0.00E+00
0.066725	0	0.00E+00
0.100088	0	0.00E+00
0.13345	0	0.00E+00
0.166813	0	0.00E+00
0.200175	0	0.00E+00
0.233538	0	0.00E+00
0.2669	0	0.00E+00
0.300262	0	0.00E+00
0.333625	0	0.00E+00
0.366988	0	0.00E+00
0.40035	0	0.00E+00
0.433713	0	0.00E+00
0.467075	0	0.00E+00
0.500437	0	0.00E+00
0.5338	0	0.00E+00
0.567163	0	0.00E+00
0.600525	0	0.00E+00
0.633888	0	0.00E+00
0.66725	0	0.00E+00
0.700613	0	0.00E+00
0.733975	0	0.00E+00
0.767338	0	0.00E+00
0.8007	0	0.00E+00
0.834063	0	0.00E+00
0.867425	0	0.00E+00
0.900788	0	0.00E+00
0.93415	0	0.00E+00
0.967513	0	0.00E+00
1.000875	0.000001	1.00E-09
1.034238	0.000001	1.00E-09
1.0676	0.000002	2.00E-09
1.100963	0.000004	4.00E-09
1.134325	0.000008	8.00E-09
1.167688	0.000013	1.30E-08
1.20105	0.00002	2.00E-08
1.234413	0.000032	3.20E-08
1.267775	0.000049	4.90E-08
1.301138	0.000074	7.40E-08
1.3345	0.000108	1.08E-07
1.367863	0.000157	1.57E-07

1.401225	0.000222	2.22E-07
1.434588	0.00031	3.10E-07
1.46795	0.000426	4.26E-07
1.501313	0.000577	5.77E-07
1.534675	0.000772	7.72E-07
1.568038	0.001019	1.02E-06
1.6014	0.00133	1.33E-06
1.634763	0.001716	1.72E-06
1.668125	0.002191	2.19E-06
1.701488	0.00277	2.77E-06
1.73485	0.00347	3.47E-06
1.768213	0.004309	4.31E-06
1.801575	0.005307	5.31E-06
1.834938	0.006485	6.49E-06
1.8683	0.007867	7.87E-06
1.901663	0.009476	9.48E-06
1.935025	0.011339	1.13E-05
1.968388	0.013483	1.35E-05
2.00175	0.015937	1.59E-05
2.035112	0.018729	1.87E-05
2.068475	0.021892	2.19E-05
2.101838	0.025457	2.55E-05
2.1352	0.029457	2.95E-05
2.168563	0.033926	3.39E-05
2.201925	0.038897	3.89E-05
2.235288	0.044406	4.44E-05
2.26865	0.050488	5.05E-05
2.302013	0.057178	5.72E-05
2.335375	0.064512	6.45E-05
2.368737	0.072526	7.25E-05
2.4021	0.081255	8.13E-05
2.435463	0.090734	9.07E-05
2.468825	0.100999	1.01E-04
2.502188	0.112084	1.12E-04
2.53555	0.124022	1.24E-04
2.568913	0.136847	1.37E-04
2.602275	0.150592	1.51E-04
2.635638	0.165287	1.65E-04
2.669	0.180964	1.81E-04

Tabel C_w Vs *Speed* MaxSurf

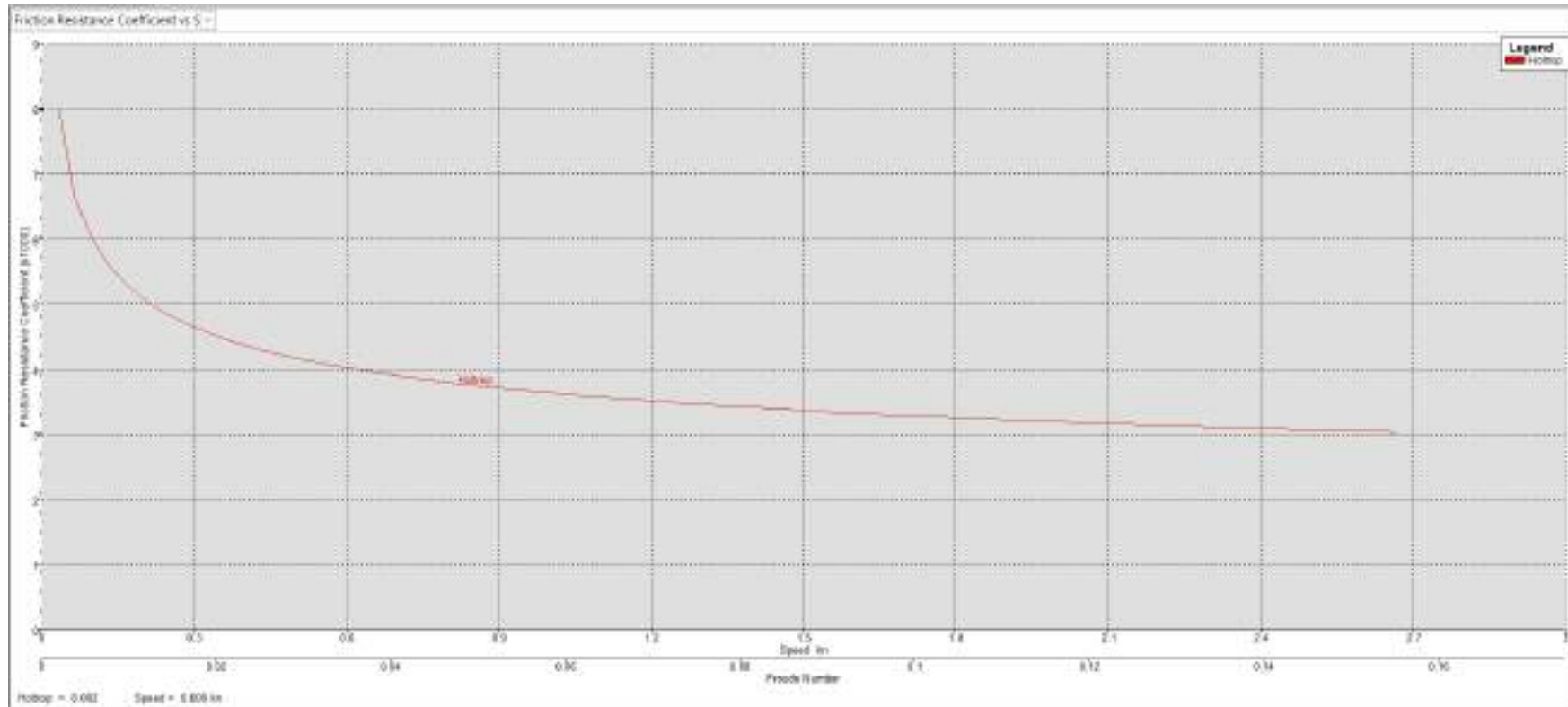


Tabel C_F Vs $Speed$ MaxSurf

$Speed$	C_F	Model
0.033363	8.00241	8.00E-03
0.066725	6.633679	6.63E-03
0.100088	5.989869	5.99E-03
0.13345	5.588279	5.59E-03
0.166813	5.303955	5.30E-03
0.200175	5.087449	5.09E-03
0.233538	4.914573	4.91E-03
0.2669	4.771845	4.77E-03
0.300263	4.651049	4.65E-03
0.333625	4.546838	4.55E-03
0.366988	4.455556	4.46E-03
0.40035	4.3746	4.37E-03
0.433713	4.302062	4.30E-03
0.467075	4.236498	4.24E-03
0.500438	4.176797	4.18E-03
0.5338	4.122086	4.12E-03
0.567163	4.071666	4.07E-03
0.600525	4.024972	4.02E-03
0.633888	3.981538	3.98E-03
0.66725	3.940979	3.94E-03
0.700613	3.902971	3.90E-03
0.733975	3.867242	3.87E-03
0.767338	3.833558	3.83E-03
0.8007	3.801718	3.80E-03
0.834063	3.77155	3.77E-03
0.867425	3.742902	3.74E-03
0.900788	3.715642	3.72E-03
0.93415	3.689655	3.69E-03
0.967513	3.664837	3.66E-03
1.000875	3.641097	3.64E-03
1.034238	3.618355	3.62E-03
1.0676	3.596538	3.60E-03
1.100963	3.575579	3.58E-03
1.134325	3.555421	3.56E-03
1.167688	3.53601	3.54E-03
1.20105	3.517298	3.52E-03
1.234413	3.49924	3.50E-03
1.267775	3.481798	3.48E-03
1.301138	3.464933	3.46E-03
1.3345	3.448614	3.45E-03
1.367863	3.432808	3.43E-03

1.401225	3.417487	3.42E-03
1.434588	3.402626	3.40E-03
1.46795	3.3882	3.39E-03
1.501313	3.374186	3.37E-03
1.534675	3.360565	3.36E-03
1.568038	3.347316	3.35E-03
1.6014	3.334422	3.33E-03
1.634763	3.321865	3.32E-03
1.668125	3.309631	3.31E-03
1.701488	3.297705	3.30E-03
1.73485	3.286073	3.29E-03
1.768213	3.274722	3.27E-03
1.801575	3.263641	3.26E-03
1.834938	3.252817	3.25E-03
1.8683	3.242241	3.24E-03
1.901663	3.231902	3.23E-03
1.935025	3.221791	3.22E-03
1.968388	3.211899	3.21E-03
2.00175	3.202218	3.20E-03
2.035113	3.192739	3.19E-03
2.068475	3.183456	3.18E-03
2.101838	3.17436	3.17E-03
2.1352	3.165446	3.17E-03
2.168563	3.156706	3.16E-03
2.201925	3.148135	3.15E-03
2.235288	3.139728	3.14E-03
2.26865	3.131477	3.13E-03
2.302013	3.123379	3.12E-03
2.335375	3.115429	3.12E-03
2.368738	3.10762	3.11E-03
2.4021	3.09995	3.10E-03
2.435463	3.092413	3.09E-03
2.468825	3.085005	3.09E-03
2.502188	3.077723	3.08E-03
2.53555	3.070563	3.07E-03
2.568913	3.063521	3.06E-03
2.602275	3.056593	3.06E-03
2.635638	3.049777	3.05E-03
2.669	3.043069	3.04E-03

Tabel C_F Vs Speed MaxSurf

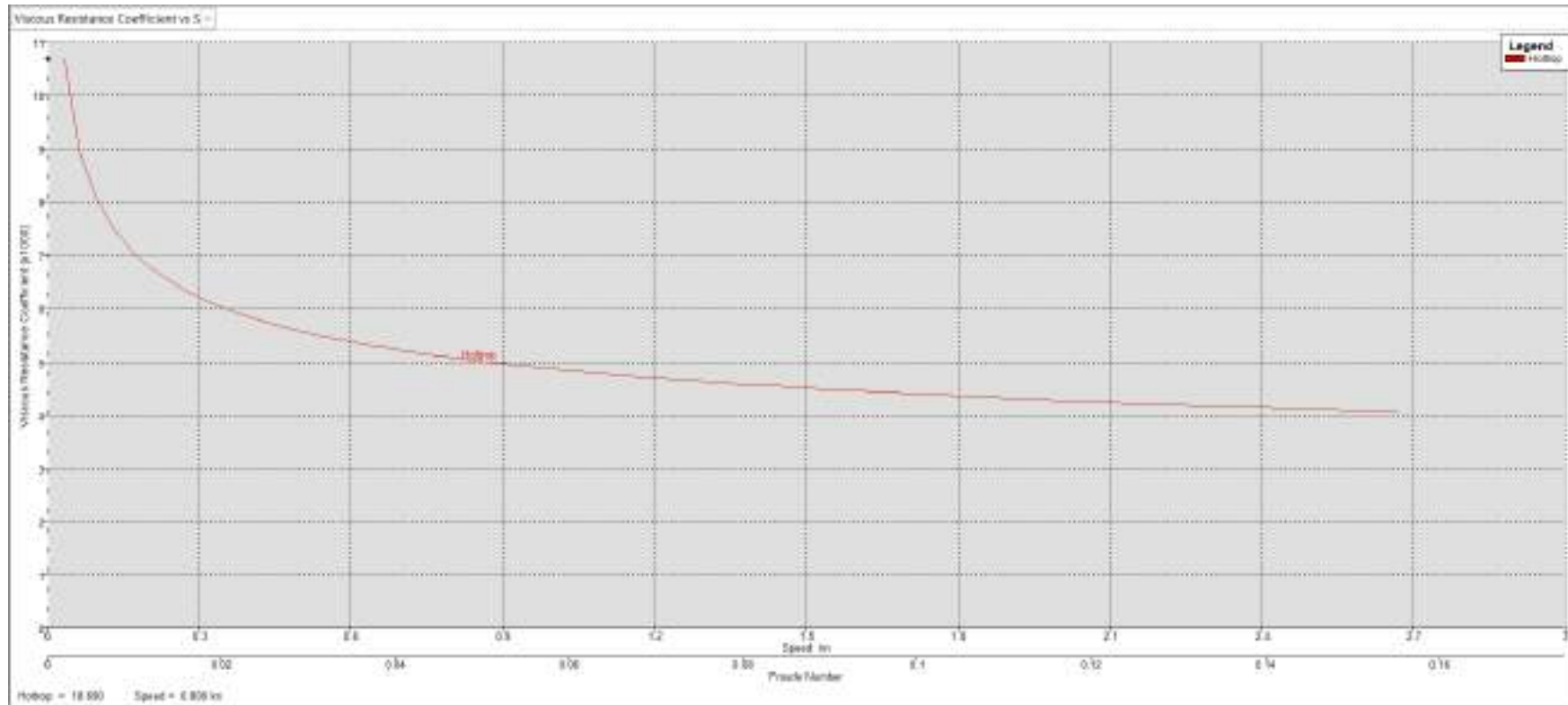


Tabel C_v Vs *Speed* MaxSurf

<i>Speed</i>	C_v	Model
0.033363	10.69007	1.07E-02
0.066725	8.861644	8.86E-03
0.100088	8.001607	8.00E-03
0.13345	7.46514	7.47E-03
0.166813	7.085323	7.09E-03
0.200175	6.796102	6.80E-03
0.233538	6.565165	6.57E-03
0.2669	6.374501	6.37E-03
0.300263	6.213135	6.21E-03
0.333625	6.073924	6.07E-03
0.366988	5.951984	5.95E-03
0.40035	5.843839	5.84E-03
0.433713	5.746938	5.75E-03
0.467075	5.659354	5.66E-03
0.500438	5.579602	5.58E-03
0.5338	5.506516	5.51E-03
0.567163	5.439162	5.44E-03
0.600525	5.376785	5.38E-03
0.633888	5.318763	5.32E-03
0.66725	5.264583	5.26E-03
0.700613	5.21381	5.21E-03
0.733975	5.166081	5.17E-03
0.767338	5.121084	5.12E-03
0.8007	5.078551	5.08E-03
0.834063	5.03825	5.04E-03
0.867425	4.99998	5.00E-03
0.900788	4.963565	4.96E-03
0.93415	4.92885	4.93E-03
0.967513	4.895696	4.90E-03
1.000875	4.863984	4.86E-03
1.034238	4.833604	4.83E-03
1.0676	4.804459	4.80E-03
1.100963	4.776461	4.78E-03
1.134325	4.749533	4.75E-03
1.167688	4.723603	4.72E-03
1.20105	4.698606	4.70E-03
1.234413	4.674483	4.67E-03
1.267775	4.651183	4.65E-03
1.301138	4.628654	4.63E-03
1.3345	4.606853	4.61E-03
1.367863	4.585739	4.59E-03

1.401225	4.565273	4.57E-03
1.434588	4.54542	4.55E-03
1.46795	4.526149	4.53E-03
1.501313	4.507429	4.51E-03
1.534675	4.489233	4.49E-03
1.568038	4.471534	4.47E-03
1.6014	4.454309	4.45E-03
1.634763	4.437536	4.44E-03
1.668125	4.421193	4.42E-03
1.701488	4.405261	4.41E-03
1.73485	4.389723	4.39E-03
1.768213	4.37456	4.37E-03
1.801575	4.359756	4.36E-03
1.834938	4.345297	4.35E-03
1.8683	4.331169	4.33E-03
1.901663	4.317358	4.32E-03
1.935025	4.303851	4.30E-03
1.968388	4.290637	4.29E-03
2.00175	4.277704	4.28E-03
2.035113	4.265042	4.27E-03
2.068475	4.25264	4.25E-03
2.101838	4.24049	4.24E-03
2.1352	4.228582	4.23E-03
2.168563	4.216907	4.22E-03
2.201925	4.205458	4.21E-03
2.235288	4.194226	4.19E-03
2.26865	4.183205	4.18E-03
2.302013	4.172387	4.17E-03
2.335375	4.161766	4.16E-03
2.368738	4.151335	4.15E-03
2.4021	4.141088	4.14E-03
2.435463	4.13102	4.13E-03
2.468825	4.121125	4.12E-03
2.502188	4.111397	4.11E-03
2.53555	4.101832	4.10E-03
2.568913	4.092425	4.09E-03
2.602275	4.083171	4.08E-03
2.635638	4.074065	4.07E-03
2.669	4.065104	4.07E-03

Tabel C_v Vs Speed MaxSurf



Boundary Condition

```

1  /*----- C++ -----*/
2  {
3      F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4      Operation   | Version: v2506
5      And         | Website: www.openfoam.com
6      Manipulation |
7  }
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         volScalarField;
13     object        k; // perhitungan turbulent kinetik energi
14 }
15 // *****
16
17 dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
18
19 internalField    uniform 0.00015;
20
21 boundaryField
22 {
23     inlet
24     {
25         type      fixedValue;
26         value      $internalField;
27     }
28
29     outlet
30     {
31         type      zeroGradient;
32     }
33
34     frontAndBack
35     {
36         type      symmetry;
37     }
38
39     lowerWall
40     {
41         type      symmetry;
42     }
43
44     upperWall
45     {
46         type      symmetry;
47     }
48
49     hull
50     {
51         type      kgWallFunction;
52         value      $internalField;
53     }
54
55     U0F
56     {
57         type      kgWallFunction;
58         value      $internalField;
59     }
60
61     V0FVec3
62     {
63         type      kgWallFunction;
64         value      $internalField;
65     }
66
67     WED
68     {

```

```

70         type      kgWallFunction;
71         value      $internalField;
72     }
73
74     propeller
75     {
76         type      kgWallFunction;
77         value      $internalField;
78     }
79
80     cap
81     {
82         type      kgWallFunction;
83         value      $internalField;
84     }
85 }
86
87 // *****
88

```

```

1  /*-----* C++ *-----*/
2  |-----|
3  | \ field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4  |  \ operation | Version: v2506 |
5  |   \ and | Website: www.openfoam.com |
6  |    \ Manipulation |-----|
7
8  FoamFile
9  {
10     version      2.6;
11     format        ascii;
12     class        volScalarField;
13     object        nut;
14 }
15 // *-----*
16
17 dimensions      [D 2 -1 0 0 0 0];
18
19 internalField    uniform 5e-07; // perhitungan dari turbulent viskositas
20
21 boundaryField
22 {
23
24     inlet
25     {
26         type      fixedValue;
27         value      $internalField;
28     }
29
30     outlet
31     {
32         type      zeroGradient;
33     }
34
35     frontAndBack
36     {
37         type      symmetry;
38     }
39
40     lowerWall
41     {
42         type      symmetry;
43     }
44
45     upperWall
46     {
47         type      symmetry;
48     }
49
50     hull
51     {
52         type      nutUSpaldingWallFunction;
53         value      $internalField;
54     }
55
56     vnf
57     {
58         type      nutUSpaldingWallFunction;
59         value      $internalField;
60     }
61
62     VGSVar3
63     {
64         type      nutUSpaldingWallFunction;
65         value      $internalField;
66     }
67
68     WED
69     {

```

```

70         type      nutHspeldingWallFunction;
71         value      $internalField;
72     }
73
74     propeller
75     {
76         type      nutHspeldingWallFunction;
77         value      $internalField;
78     }
79
80     cap
81     {
82         type      nutHspeldingWallFunction;
83         value      $internalField;
84     }
85 }
86
87
88 // *****
89

```

```

1  /*-----* C++ *-----*/
2  |-----|
3  | \ field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4  |  \ operation | Version: v2506 |
5  |   \ and | Website: www.openfoam.com |
6  |    \ Manipulation |-----|
7
8  FoamFile
9  {
10     version      2.6;
11     format        ascii;
12     class         volScalarField;
13     object        omega;
14 }
15 // *-----*
16
17 dimensions      [0 0 -1 0 0 0 0];
18
19 internalField   uniform 2;
20
21 boundaryField
22 {
23
24     inlet
25     {
26         type      fixedValue;
27         value      $internalField;
28     }
29
30     outlet
31     {
32         type      zeroGradient;
33     }
34
35     frontAndBack
36     {
37         type      symmetry;
38     }
39
40     lowerWall
41     {
42         type      symmetry;
43     }
44
45     upperWall
46     {
47         type      symmetry;
48     }
49
50     hull
51     {
52         type      omegaWallFunction;
53         value      $internalField;
54     }
55
56     v02
57     {
58         type      omegaWallFunction;
59         value      $internalField;
60     }
61
62     V05Var2
63     {
64         type      omegaWallFunction;
65         value      $internalField;
66     }
67
68     WED
69     {

```

```

70         type      omegaWellFunction;
71         value      $internalField;
72     }
73
74     propeller
75     {
76         type      omegaWellFunction;
77         value      $internalField;
78     }
79
80     cap
81     {
82         type      omegaWellFunction;
83         value      $internalField;
84     }
85 }
86
87
88 // *****
89

```



```

70     propeller
71     {
72         type          zeroGradient;
73     }
74
75     oep
76     {
77         type          zeroGradient;
78     }
79
80 }
81
82
83 // .....
84

```

```

1  /*-----* C++ *-----*/
2  |
3  | \ \ \ \ \ Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  | \ \ \ \ \ Operation | Version: v2506
5  | \ \ \ \ \ And | Website: www.openfoam.com
6  | \ \ \ \ \ Manipulation |
7  |-----|
8  FoamFile
9  {
10     version      2.6;
11     format        ascii;
12     class         volVectorField;
13     object        U;
14 }
15 // *-----*
16
17 Umean 1.373; // disesuaikan dengan fn
18 nUmean -1.373;
19
20 dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
21
22 internalField    uniform (0 0 0 0 0 0);
23
24 boundaryField
25 {
26
27     inlet
28     {
29         type      fixedValue;
30         value      $internalField;
31     }
32
33     outlet
34     {
35         type      zeroGradient; //boundary condition OpenFOAM
36     }
37
38     frontAndBack
39     {
40         type      symmetry;
41     }
42
43     lowerWall
44     {
45         type      symmetry;
46     }
47
48     upperWall
49     {
50         type      symmetry;
51     }
52
53     hull
54     {
55         type      noSlip;
56     }
57
58     VOF
59     {
60         type      noSlip;
61     }
62
63     VOFVar2
64     {
65         type      noSlip;
66     }
67
68     WED
69     {

```

```

70         type      noSlip;
71     }
72
73     propeller
74     {
75         type      noSlip;
76     }
77
78     cap
79     {
80         type      noSlip;
81     }
82 }
83
84
85
86 // .....
87

```

Transport Properties

```
1  /*-----* C++ *-----*/
2  |
3  | \ \ \ \ \ Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  | \ \ \ \ \ Operation | Version: v2506
5  | \ \ \ \ \ And | Website: www.openfoam.com
6  | \ \ \ \ \ Manipulation |
7  |
8  FoamFile
9  {
10     version      2.6;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     object       transportProperties;
14 }
15 // *****
16
17 transportModel Newtonian;
18
19 nu              1.002e-06; //viskositas kinematik air
20
21
22 // *****
23
```

104

```

1  /*-----*/
2  |
3  |      F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  |      O peration    | Version: v2506
5  |      A nd          | Website: www.openfoam.com
6  |      M anipulation  |
7  |-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     object        turbulenceProperties;
14 }
15 // .....
16
17 simulationType    RAS;
18
19 RAS
20 {
21     RASModel       kOmegaSST;
22
23     turbulence      on;
24
25     printCoeffs    on;
26 }
27
28 // .....
29
30

```

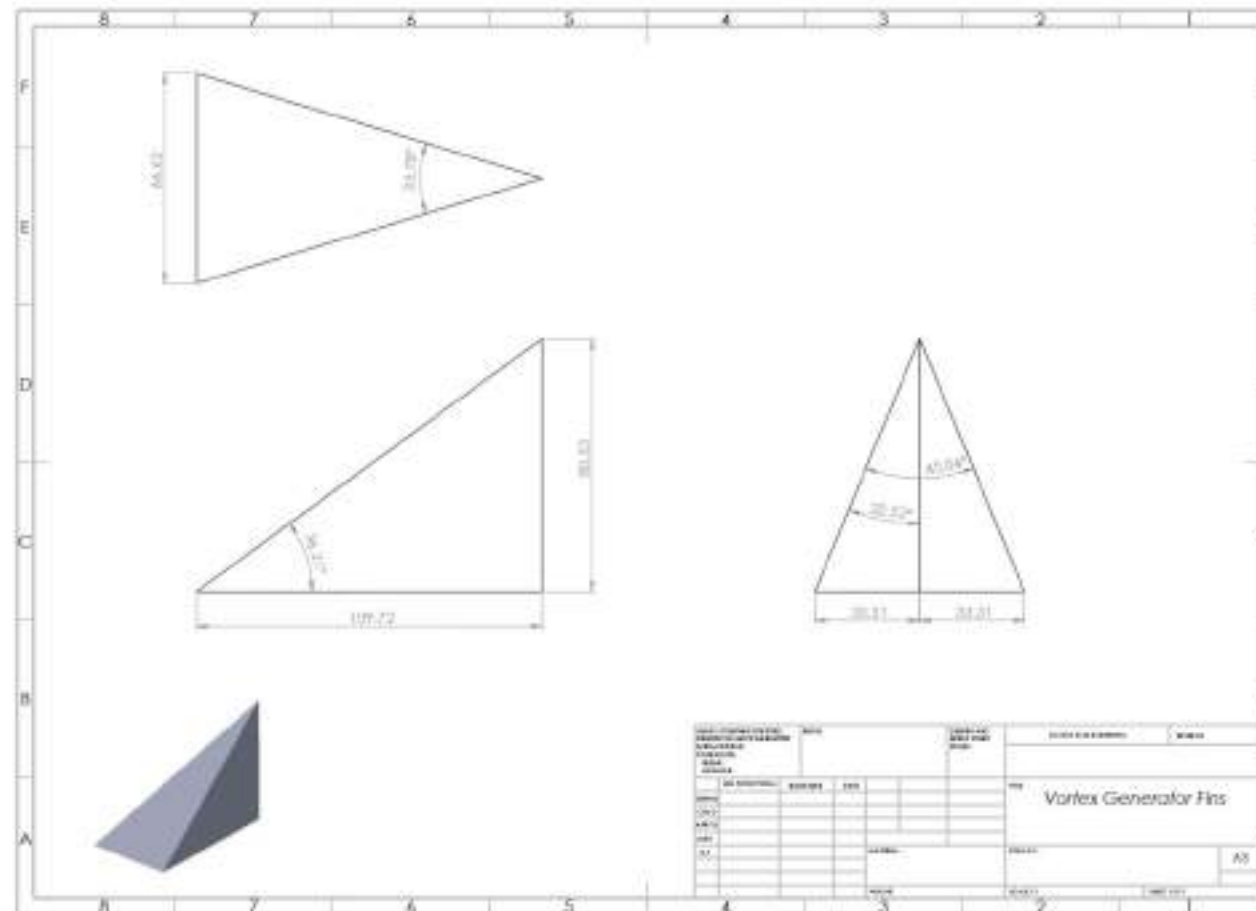
MRF Properties

```
1  /*-----* C++ *-----*/
2  |
3  | \   / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4  |  \ /   O peration   | Version: v2412
5  |   /    A nd         | Website: www.openfoam.com
6  |  / \   M anipulation |
7  |-----*-----*/
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     location      "constant";
14     object        MRFProperties;
15 }
16 // * * * * *
17
18 MRF
19 {
20     cellZone      rotatingZone;
21     active        yes;
22
23     origin        (0.153266 0 0.11355412);
24     axis          (1 0 0);
25     omega         60.725;
26
27     nonRotatingPatches
28     {
29         inlet
30         outlet
31         allSides
32     }
33 }
34 // * * * * *
```

106



VGf



CSSRC 900TEU Container Ship with WED and Design Propeller - I -

GENERAL

Client : Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute
 Ship Type : 900TEU Container Ship
 Report No. : 160202
 Report Title : Powering Performance Model Tests for a 900TEU Container Ship with WED and Design Propeller

MODEL

Ship Model No. : SM1534-1
 Scale Ratio : 1:16.9946
 Material : Wood
 LPP : 7.6251m
 Propeller Model No. : S2090
 Material : Aluminum alloy
 Diameter : 0.22357m
 ESD Model Type : Wake-equalized duct (WED)
 Material : ABS

TEST CONDITION

Kind of Tests	Remark
Open water test	18% & 19%
Resistance test	Design draught
Self propulsion test	Design draught
Resistance test	Ballast draught
Self propulsion test	Ballast draught

WRITTEN BY:

Zhang Sheng-li

June 10th, 2016

APPROVED BY:

Wu Bao-shan

July 6th, 2016

2. Ship Model

Based on the ship lines ^[1] provided by SDARI, CSSRC made a wooden ship model named SM1554-1 with a scale ratio of 16.9966, which was 7.8251 meters long between perpendiculars.

In order to simulate the turbulent flow around the ship model, one trip wire of 1.0mm diameter was fitted at station 19.

The ship model was equipped with rudder and wake-equalized duct (WED) during the resistance and self propulsion tests.

The principal dimensions of the ship and model are as follows:

Dimension	Symbol	Unit	Design		Ballast	
			Ship	Model	Ship	Model
Length between Perpendiculars	L_{BP}	m	133.0	7.8251	133.0	7.8251
Length on waterline	L_{WL}	m	135.7	7.9839	128.73	7.5739
Breadth	B	m	22.5	1.3238	22.5	1.3238
Draught (F.P.)	T_F	m	5.60	0.3295	2.45	0.1441
Draught (A.P.)	T_A	m	5.60	0.3295	4.55	0.2677
Draught (mid.)	T_M	m	5.60	0.3295	3.50	0.2059
Displacement volume (without rudder)	V_0	m ³	14412.0	2.9352	8589.5	1.7494
Displacement volume (with rudder)	V'	m ³	14419.8	2.9368	8596.3	1.7508
Wetted surface (without rudder and WED)	S_0	m ²	3997.0	13.8360	3335.0	11.5444
Wetted surface (with rudder and WED)	S	m ²	4062.8	14.0637	3400.8	11.7721
Block coefficient	C_B	-	0.8600		0.8201	
Midship section coefficient	C_{M1}	-	0.9960		0.9939	
Longitudinal prismatic coefficient	C_P	-	0.8633		0.8251	
Water plane area coefficient	C_{WL}	-	0.9522		0.9022	
Ratio of length and breadth	L_{BP}/B	-	5.9111		5.9111	
Ratio of breadth and Draught	B/T	-	4.0179		6.4286	
Longitudinal Center of Buoyancy*	L_{CB}	% L_{BP}	2.5737		-0.7827	

* Positive value when L_{CB} at fore part of midship.

[1] "900TEU ContainerShip Hull Line.dwg" received on September 22, 2012 by email.

3. Design Propeller Model

The design propeller model named S209G was used during the open water test and self propulsion tests. The main particulars of the propeller are as follows:

Scale ratio: 16.9946

Particulars	Symbol	Unit	Full Scale	Model Scale
No.	-	-	-	S209G
Diameter	D	m	3.80	0.22357
Chord length at 0.7R	$C_{0.7R}$	m	0.9794	0.05762
Maximum Thickness at 0.7R	$t_{0.7R}$	m	0.0471	0.00277
Number of Blades	Z	-	6	
Pitch Ratio at 0.7R	$P/D_{0.7R}$	-	0.88	
Disk Area Ratio	A_E/A_O	-	0.698	
Direction of Turning	-	-	Right-handed	

4. Test Program

Propeller model open water test was performed at 18r/s and 9r/s. Resistance and self-propulsion tests were performed at the design draught (5.60/5.60m) and ballast draught (2.45/4.55m).

The following table gives a list of all tests which have been carried out:

Kind of Tests	Draught (T_1/T_2)	Speed	Test Date
Open water	-	18.0r/s	2016.5.31
Open water	-	9.0r/s	2016.5.31
Resistance	5.60/5.60m	8.5~13.5kn	2016.6.2
Self Propulsion	5.60/5.60m	9.0~13.0kn	2016.6.2
Resistance	2.45/4.55m	8.5~14.0kn	2016.6.2
Self Propulsion	2.45/4.55m	9.0~14.0kn	2016.6.2

Table 3 Resistance Model Test Result [Design Draught]

Model Test in Deep Water Towing Tank				Ship Model Parameter		
Test date	2016.6.2	Model No.	SM1554-1	Length between Prop.	7.8251m	
Tank Water temp.	19.2℃	Length on Waterline	7.9839m	Draught(T_d/T_B)	0.5295/0.5297m	
Water Density	998.56kg/m ³	Wetted Surface Area	14.0637m ²	Displacement Volume	2.9352m ³	
Water Viscosity	1.0252×10^{-3} m ² /s	Appendages	Straddle			
Scale Ratio	16.9966					
Analysis Method	Prosser 2D					

V_s [kn]	V_B [m/s]	R_{tot} [N]	F_r	1000C _{tot}	1000C _{tot}	1000C _{tot}
8.5	1.001	30.19	0.120	3.823	3.101	0.721
9.0	1.123	33.92	0.127	3.832	3.070	0.762
9.5	1.185	37.78	0.134	3.830	3.041	0.789
10.0	1.268	41.86	0.141	3.830	3.014	0.816
10.5	1.310	46.12	0.148	3.836	2.989	0.848
11.0	1.373	51.28	0.155	3.877	2.965	0.913
11.5	1.455	57.33	0.162	3.900	2.942	1.024
12.0	1.497	64.87	0.169	4.122	2.921	1.206
12.5	1.560	74.17	0.178	4.555	2.900	1.455
13.0	1.622	84.43	0.183	4.571	2.881	1.690
13.5	1.684	95.82	0.190	4.811	2.862	1.948

Photographs



Photo 1 Ship Model Overview



Photo 2 Ship Model Bow View



Photo 3 Ship Model Stern View



Photo 4 WED Model Overview



Photo 5 Propeller Model Overview [S209G]



Photo 6 Bow Wave Pattern [11kn, Design Draught]



Photo 7 Bow Wave Pattern [12kn, Design Draught]



Photo 8 Bow Wave Pattern [12.5kn, Design Draught]



Photo 9 Bow Wave Pattern [12kn, Ballast Draught]



Photo 10 Bow Wave Pattern (13kn, Ballast Draught)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama Tegar Nanindra Pangestu yang dapat dipanggil Tegar merupakan anak kelahiran Kota Tuban pada tanggal 05 Mei 2003. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara, anak dari pasangan Alm. Bapak Amrin Thohari dan Ibu Kiswati Winarsih. Penulis mulai menempuh pendidikan formalnya di SD Negeri Sidomoro 1 Gresik, dilanjutkan ke jenjang SMP di SMP Negeri 4 Gresik pada tahun 2016 dan SMP Negeri 5 Tuban pada tahun 2017 dan selanjutnya ke SMA Negeri 1 Tuban pada tahun 2019. Lalu pada tahun 2022, penulis mulai menempuh pendidikan di perguruan tinggi pada Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) melalui jalur SMPPNS-Reguler pada tahun 2022 mengambil Program Studi D4 Teknik Permesinan Kapal dengan NRP 0322040050. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis mengikuti beberapa organisasi, yang membantu penulis menggali kemampuan, potensi diri dan pengembangan skill lainnya. Organisasi yang diikuti penulis seperti UKM *Maritime Challenge* dan Himpunan Mahasiswa *Marine Engineering*. Penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT (*Subhanahu wa ta'ala*), karena hanya oleh anugerah-Nya penulis dapat menyelesaikan studinya tepat waktu. Banyak suka dan duka selama penulis menempuh studi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dan penulis sangat terbuka dengan adanya kritik dan saran yang membangun supaya penulis dapat lebih baik ke depannya. Berikut disertakan pula email yang dapat dihubungi.

Email: ptegar427@gmail.com