



TUGAS AKHIR - MN 184802

**Analisis Hambatan Pada *Dimple Surfaced Hull*
Menggunakan CFD**

**Ariel Krisna Boediman
NRP 0411154000048**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS HAMBATAN PADA *DIMPLE SURFACED HULL*
MENGUNAKAN CFD**

**Ariel Krisna Boediman
NRP 0411154000048**

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

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**



FINAL PROJECT - MN 184802

**RESISTANCE ANALYSIS OF DIMPLE SURFACED HULL
USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS**

**Ariel Krisna Boediman
NRP 0411154000048**

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

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS HAMBATAN PADA *DIMPLE SURFACED HULL* MENGUNAKAN CFD

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

ARIEL KRISNA BOEDIMAN
NRP 0411154000048

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing

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

Mengetahui,
Kepala Departemen Teknik Perkapalan



Ir. Wasis Dwi Aryan, M.Sc., Ph.D.
NIP 1965102101198903 1 001

SURABAYA, 19 JULI 2019

LEMBAR REVISI

ANALISIS HAMBATAN PADA *DIMPLE SURFACED HULL* MENGUNAKAN CFD

TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir
Tanggal 19 Juli 2019

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

Oleh:

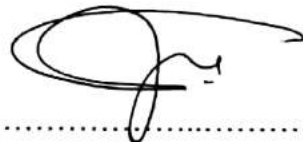
ARIEL KRISNA BOEDIMAN
NRP 0411154000048

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

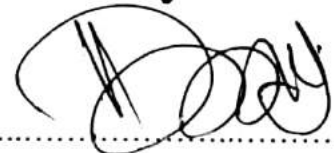
1. Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng.



2. Aries Sulisetyono, S.T., MA.Sc., Ph.D.



3. Dony Setyawan, S.T., M.Eng.



Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

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



SURABAYA, 19 JULI 2019

Dipersembahkan kepada keluarga dan teman-teman saya.

KATA PENGANTAR

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

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

1. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Balai Teknologi Hidrodinamika - BPPT atas bantuannya yang kooperatif dalam menyediakan data untuk pengerjaan Tugas Akhir ini
3. Seluruh Keluarga penulis yang telah memberikan dukungan tanpa henti.
4. Teman-teman seperjuangan tugas akhir hidrodinamika Rizki Alia dan Wizura Mahardika atas saran, masukan dan bantuan selama mengerjakan tugas akhir ini
5. Teman-teman P55 Samudraraksa atas dukungan dan bantuan selama masa perkuliahan
6. Pihak-pihak lain yang penulis tidak dapat sebutkan satu per satu

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

Surabaya, 19 Juli 2019

Ariel Krisna Boediman

ANALISIS HAMBATAN PADA *DIMPLE SURFACED HULL* MENGUNAKAN CFD

Nama Mahasiswa : Ariel Krisna Boediman
NRP : 0411154000048
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Pada penelitian ini, hambatan dari *dimple surfaced hull* dan potensinya untuk mengurangi hambatan dibandingkan model lambung konvensional telah dianalisis. Penelitian ini dilakukan dengan mempelajari aerodinamika pada bola golf. Bentuk benda seperti bola memiliki komponen hambatan tekanan yang cukup signifikan. Hambatan tekanan tersebut dapat dikurangi dengan menunda terjadinya *flow separation*. Dapat dimengerti bahwa permukaan berlekukan atau *dimple* pada bola golf memiliki fungsi untuk meningkatkan turbulensi pada *boundary layer* bola tersebut agar *flow separation* dapat tertunda, sehingga daerah *wake* pada belakang bola menjadi lebih kecil. Pada penelitian ini, dipercaya bahwa konsep tersebut dapat dimanfaatkan dan diterapkan untuk mengurangi hambatan pada kapal. Terdapat 4 model lambung kapal yang disimulasi pada penelitian ini, 1 lambung sesuai dengan bentuk aslinya dan 3 lambung percobaan yang dimodifikasi (*dimple surfaced hull*) dengan *dimple* dengan 3 ukuran *dimple* berbeda. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *computational fluid dynamics*. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, dapat diketahui bahwa *dimple surfaced hull* memiliki hambatan total yang lebih rendah dibandingkan model aslinya, dan penurunan hambatan tersebut lebih efektif pada kecepatan rendah. Walaupun demikian, penurunan hambatan yang terjadi tidak terlalu signifikan, dengan penurunan paling besar sebanyak 26.12% pada *dimple surfaced hull* di kecepatan 5 knot dengan ukuran rasio *dimple* terkecil diantara ketiga ukuran rasio yang diuji, dan penurunan paling kecil sebanyak 1.74% pada kecepatan 11 knot dengan ukuran rasio *dimple* terkecil.

Keywords: *Dimple, flow separation, ship resistance, CFD.*

RESISTANCE ANALYSIS OF DIMPLE SURFACED HULL USING COMPUTATIONAL FLUID

Author : Ariel Krisna Boediman
Student Number : 041154000048
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology
Supervisor : Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

In this research, the resistance of dimpled hull forms and their potential relevance in reducing the resistance of modern conventional hull forms has been investigated. This research has been undertaken while trying to understand the flight dynamics of a dimpled golf ball. Non-streamlined bodies, like spheres, have significant pressure drag due to flow separation. Pressure drag can be reduced through separation delay. It is understood that dimples are placed on a golf ball to trip the boundary layer from laminar to turbulent in order to delay flow separation. It is believed that the same concept can be adapted for use on a ship to decrease viscous resistance. Four ship models were simulated, a control (an unmodified model based on a real ship) and three experiment dimple surfaced hull models with three different dimple sizes. Simulation was done by using computational fluid dynamics software. Based on the simulations, it can be determined that dimple surfaced hulls have less resistance than its original model and works better on low speed. However, reduction of total resistance is not very significant. The most effective reduction was at 7 knot with the biggest dimple ratio among among the three, with a reduction of 26.12% of total resistance, while the least effective reduction was at 11 knot with the smallest dimple ratio which has only 1.74% reduction.

Keywords: *Dimple, flow separation, ship resistance, CFD.*

DAFTAR ISI

LEMBAR REVISI.....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
Bab I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Perumusan Masalah.....	1
I.3. Tujuan.....	2
I.4. Batasan Masalah.....	2
I.5. Manfaat.....	2
I.6. Hipotesis.....	2
Bab II STUDI LITERATUR	3
II.1. Dasar Teori.....	3
II.1.1. <i>Boundary Layer</i>	3
II.1.2. <i>Flow Separation</i>	5
II.1.3. Menunda Terjadinya <i>Flow Separation</i>	6
II.1.4. Komponen Gaya Hambatan Pada Lambung Kapal	7
II.1.5. <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	10
II.2. Tinjauan Pustaka	14
II.2.1. Perkembangan Bola Golf.....	14
II.2.2. Aerodinamika Bola Golf	16
II.2.3. Penerapan <i>Dimple</i> Pada Lambung Kapal	18
Bab III METODOLOGI	21
III.1. Studi Literatur	21
III.2. Pengumpulan Data	21
III.2.1. Data Kapal	21
III.2.2. Data Eksperimen Uji Tarik	22
III.3. Pemodelan 3D	23
III.4. Simulasi Pada Perangkat Lunak CFD	24
III.5. Penentuan Lokasi <i>Dimple</i>	32
III.6. Pemodelan <i>Dimple Surfaced Hull</i>	34
III.7. Bagan Alir	38
Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
IV.1. Hasil Simulasi CFD Pada Lambung Kapal Pengangkut Ikan 60GT	39
IV.2. Hasil Simulasi <i>Dimple Surfaced Hull</i>	42
IV.2.1. Perbandingan Secara Umum.....	42
IV.2.2. Pengaruh <i>Dimple</i> Terhadap Aliran	44
IV.2.3. Pengaruh Kecepatan Terhadap Pengurangan Hambatan Akibat <i>Dimple</i>	49
IV.2.4. Pengaruh Rasio <i>Dimple</i>	57

IV.2.5. Rangkuman Analisis	63
Bab V Kesimpulan dan saran	65
V.1. Umum.....	65
V.1.1. Kesimpulan.....	65
V.2. Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	67
LAMPIRAN	
Lampiran A – Perhitungan Radius Bilga	
Lampiran B – Kontur aliran simulasi lambung “Kapal Pengangkut Ikan 60GT”	
Lampiran C – Kontur aliran simulasi <i>dimple surfaced hull 1</i>	
Lampiran D – Kontur aliran simulasi <i>dimple surfaced hull 2</i>	
Lampiran E – Kontur aliran simulasi <i>dimple surfaced hull 3</i>	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1. Ilustrasi <i>boundary layer</i> pada bidang datar.....	4
Gambar II. 2 Ilustrasi terjadinya <i>adverse pressure gradient</i> yang menyebabkan terpisahnya aliran pada benda berlekuk. (Sumber: Hill, 1992).....	6
Gambar II. 3. Ilustrasi <i>wake</i> dan <i>wave pattern</i> yang terjadi pada lambung kapal (Sumber: Molland, Turnock, & Hudson, 2011)	7
Gambar II. 4. <i>Body-fitted mesh</i> pada domain aliran sebuah <i>airfoil</i> . (Sumber: Hirsch,2007) ...	11
Gambar II. 5. Perbandingan hasil visual (a) pengujian eksperimen dengan (b) visualisasi hasil simulasi CFD. (Sumber: Hirsch, 2007)	13
Gambar II. 6 Perbandingan hasil visualisasi CFD dengan model turbulensi yang berbeda terhadap aliran pada bola golf (Sumber: Hart, 2016)	14
Gambar II. 7. Bola golf <i>featherie</i> yang populer digunakan untuk permainan golf pada abad ke-17 (Sumber: simpsonsgolfshop.co.uk)	15
Gambar II. 8. Bola <i>guttie</i> yang diproduksi dengan permukaan <i>raised ridges</i> (Sumber: Martin, 1968).....	15
Gambar II. 9. Paten pola <i>dimple</i> yang dipatenkan oleh William Taylor (Sumber: Martin,1968)	16
Gambar II. 10. Perbandingan antara <i>drag coefficient</i> dengan kecepatan (Sumber: F. Alam, 2010).....	17
Gambar II. 11 Perbandingan antara <i>drag coefficient</i> dengan <i>Re</i> (Sumber: F. Alam, 2010)....	17
Gambar II. 12. Hasil Percobaan perbandingan <i>Cd</i> antara bola dengan variasi <i>dimple</i> dengan bola tanpa <i>dimple</i> (Sumber:Choi, 2006).....	18
Gambar II. 13. Perbandingan hasil CFD bola permukaan mulus dengan bola golf (Sumber: Itami, 2018)	18
Gambar II. 14. Kapal model Donnelly (2010) yang telah dicetak dengan <i>dimple</i> pada bagian buritan kapal (Sumber: Donnelly, 2010)	19
Gambar III. 1. <i>Body Plan</i> Kapal Pengangkut Ikan 60 GT.....	21
Gambar III. 2. <i>Sheer Plan</i> Kapal Pengangkut Ikan 60 GT.....	22
Gambar III. 3. <i>Half Breadth Plan</i> Kapal Pengangkut Ikan 60 GT.....	22
Gambar III. 4 Proses penyesuaian <i>waterline</i> pada perangkat lunak <i>3D modeler</i>	24
Gambar III. 5. Model 3D Kapal Pengangkut Ikan 60GT	24
Gambar III. 6. Ilustrasi kondisi batas yang digunakan untuk pengujian CFD	25
Gambar III. 7. Domain Komputasi Pada Perangkat Lunak CFD	25
Gambar III. 8. Bentuk <i>mesh</i> tetrahedral dan segitiga pada metode <i>unstructured mesh</i>	26
Gambar III. 9. Hasil <i>Meshing</i> dengan metode <i>body of influence</i> pada perangkat lunak CFD .26	26
Gambar III. 10. Perbandingan <i>mesh</i> dengan jumlah (a) 138ribu elemen dengan <i>mesh</i> berjumlah (b) 2,3 juta elemen.....	27
Gambar III. 11. Kurva <i>Grid Independence</i>	28
Gambar III. 12. Grafik konvergensi untuk <i>mesh</i> dengan jumlah elemen 137,5 ribu selesai setelah melewati proses 402 iterasi.	31
Gambar III. 13. Grafik konvergensi untuk <i>mesh</i> dengan jumlah elemen 2,3 juta selesai setelah melewati proses 479 iterasi.....	31
Gambar III. 14. Kontur kecepatan air pada 7 knot	32

Gambar III. 15 Perbedaan warna pada buritan kapal akibat <i>flow separation</i>	33
Gambar III. 16. Penentuan lokasi <i>dimple</i> dengan analisis indikasi <i>flow separation</i> menggunakan (a) kontur kecepatan air, (b) vektor kecepatan air.....	34
Gambar III. 17. Ilustrasi ukuran <i>dimple 1</i>	36
Gambar III. 18. (a) Model <i>dimple surfaced hull</i> ukuran 2 tampak samping, (b) Model <i>dimple surfaced hull</i> ukuran 3 tampak bawah.....	37
Gambar III. 19. <i>Face sizing</i> pada permukaan <i>dimple</i>	37
Gambar III. 20. Bagan alir metodologi pengerjaan	38
Gambar IV. 1. Grafik perbandingan hambatan total	40
Gambar IV. 2. Vektor kecepatan air (11 knot) dari sumbu $-Z$ 1.5m	40
Gambar IV. 3. Kontur kecepatan air (11 knot) dari sumbu $-Z$ 1.5m	41
Gambar IV. 4. Bidang <i>free surface</i> pada kecepatan 11 knot.....	42
Gambar IV. 5. Grafik perbandingan persentase penurunan hambatan ketiga <i>dimple surfaced hull</i> terhadap model lambung asli.....	43
Gambar IV. 6 Perbandingan kontur vektor kecepatan pada model (a) lambung kapal tanpa <i>dimple</i> dengan model (b) <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 9 knot.....	45
Gambar IV. 7. Perbandingan vektor kecepatan aliran (a) model lambung tanpa <i>dimple</i> dengan (b) model <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 9 knot	46
Gambar IV. 8 Kontur tegangan geser pada lambung tanpa <i>dimple</i> kecepatan 5 knot.....	47
Gambar IV. 9 Kontur tegangan geser <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 5 knot	48
Gambar IV. 10 Grafik perbandingan distribusi tegangan geser pada permukaan lambung kapal tanpa <i>dimple</i> dengan <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 5 knot	49
Gambar IV. 11 <i>Wave pattern</i> pada kecepatan (a) 5 knot, (b) 7 knot, (c) 9 knot, (d) 11 knot pada model lambung tanpa <i>dimple</i>	50
Gambar IV. 12. Perbandingan vector kecepatan aliran pada (a) kecepatan 5 knot dan (b) pada kecepatan 11 knot pada <i>dimple surfaced hull 2</i>	51
Gambar IV. 13. Perbandingan <i>wake region</i> menggunakan vektor aliran dengan <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 5 knot	52
Gambar IV. 14. Perbandingan <i>wake region</i> menggunakan vektor aliran pada (a) model lambung kapal tanpa <i>dimple</i> dengan (b) <i>dimple surfaced hull 2</i> pada kecepatan 11 knot	53
Gambar IV. 15 Kontur tegangan geser pada (a) model lambung tanpa <i>dimple</i> dengan (b) <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 11 knot.....	54
Gambar IV. 16 Kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada (a) model lambung tanpa <i>dimple</i> dan (b) <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 11 knot.....	55
Gambar IV. 17 Kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada (a) model lambung tanpa <i>dimple</i> dan (b) <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 5 knot.....	56
Gambar IV. 18. Perbandingan vektor kecepatan aliran pada (a) model <i>dimple surfaced hull 1</i> dengan (b) <i>dimple surfaced hull 3</i> pada kecepatan 5 knot.	58
Gambar IV. 19 Kontur tegangan geser (a) DSH 1 dan (b) DSH 3 pada kecepatan 5 knot.	59
Gambar IV. 20 Kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 5 knot.....	60
Gambar IV. 21 Kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada <i>dimple surfaced hull 1</i> pada kecepatan 5 knot.....	61
Gambar IV. 22. Perbandingan vektor kecepatan antara <i>dimple surfaced hull 2 & 3</i> pada kecepatan 9 knot yang memiliki perbedaan nilai hambatan yang tidak signifikan.....	63

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Kriteria <i>dimple</i> oleh William Taylor	19
Tabel III. 1 Ukuran utama Kapal Pengangkut Ikan 60 GT	22
Tabel III. 2. Hasil eksperimen uji tarik Kapal Pengangkut Ikan 60GT oleh Balai Teknologi Hidrodinamika, BPPT.	23
Tabel III. 3. Hasil <i>grid independence</i> pada model lambung kapal.....	27
Tabel III. 4. Input Bahasa Pemrograman CEL	29
Tabel III. 5. Ukuran 3 variasi <i>dimple</i>	35
Tabel IV. 1. Hasil Hambatan Simulasi CFD	3939
Tabel IV. 2. Perbandingan penurunan hambatan <i>Dimple Surfaced Hull</i> terhadap model lambung tanpa <i>dimple</i>	433

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang Masalah

Perhatian ekstra terhadap lingkungan bukan lagi menjadi hal yang baru. Brynolf (2014) menjelaskan bahwa usaha yang sedang dilakukan oleh seluruh dunia untuk mengurangi emisi sulfur oksida, nitrogen oksida dan gas rumah kaca agar memenuhi persyaratan dan regulasi pada masa mendatang untuk mengurangi dampak buruk pada lingkungan akan membutuhkan perubahan besar pada propulsi kapal. Selain mengganti bahan bakar, penelitian terus dilakukan untuk mengurangi hambatan pada lambung kapal.

Berbeda dengan kapal, bola golf telah mengalami perkembangan pada desain permukaannya semenjak awal abad ke 20. Para pemain pada saat itu menyadari bahwa bola lama dengan permukaan yang tidak mulus dapat melaju lebih jauh dibandingkan bola baru yang masih memiliki permukaan yang mulus. Hal ini berkembang seiring perkembangan teknologi hingga pada akhirnya desain bola golf memiliki lekukan-lekukan (*dimple*) pada permukaannya.

Menurut penelitian Donnelly (2010) konsep tersebut dapat diterapkan pada kapal untuk mengurangi hambatan dengan memanfaatkan *boundary layer* turbulen yang dihasilkan oleh permukaan berlekukan (*dimple surfaced*). Hasil percobaan Donnelly menunjukkan bahwa permukaan berlekukan dapat mengurangi hambatan pada model kapal yang diuji, namun hasil percobaan tersebut belum dapat dipastikan kebenarannya akibat terdapat *error* yang cukup signifikan. Hal ini menjadi pendorong untuk penelitian lebih lanjut terhadap tingkat pengaruh permukaan berlekukan pada kapal yang akan diteliti pada tugas akhir ini.

I.2. Perumusan Masalah

- Apa pengaruh *dimple surfaced hull* terhadap aliran dan hambatan total kapal?
- Rasio lekukan permukaan (*dimple ratio*) manakah yang dapat menghasilkan hambatan total paling kecil?
- Pada kecepatan berapakah hambatan total mengalami penurunan paling signifikan?

I.3. Tujuan

- Mengetahui efek *dimple* terhadap aliran pada permukaan lambung kapal dan hambatan total kapal.
- Mencari tahu pengaruh rasio lekukan permukaan (*dimple ratio*) terhadap *hambatan total* pada *dimple surfaced hull*
- Mencari tahu pengaruh *dimple* terhadap penurunan hambatan pada *dimple surfaced hull*

I.4. Batasan Masalah

- Rasio lekukan permukaan (*dimple ratio*) yang akan diuji adalah sebanyak 3 variasi dengan posisi tetap
- Model lambung yang akan diuji merupakan lambung “Kapal Pengangkut Ikan 60 GT”
- Pengujian akan dilakukan pada 4 kecepatan berbeda
- Analisis hambatan dilakukan secara numerik menggunakan *computational fluid dynamic software*

I.5. Manfaat

Dengan dilakukannya tugas akhir ini, diharapkan dapat membantu mendapatkan dan mengembangkan solusi-solusi pengurangan hambatan kapal

I.6. Hipotesis

Dapat dipahami bahwa permukaan berlekukan pada bola golf bertujuan untuk meningkatkan performa bola tersebut dengan mengurangi hambatan tekanan. Hipotesis dari tugas akhir ini adalah bahwa konsep yang serupa dapat diterapkan pada lambung kapal sehingga hambatan pada kapal dapat berkurang. Hal ini didasari oleh beberapa fakta, diantaranya adalah bahwa bentuk lambung kapal memungkinkan untuk terjadinya *flow separation* dan permukaan berlekukan dapat menunda terjadinya perpisahan tersebut untuk mengurangi *form drag* sehingga dapat mengurangi hambatan total kapal.

BAB II

STUDI LITERATUR

II.1. Dasar Teori

Tugas akhir ini membahas konsep yang berdasar pada desain permukaan bola golf moderen. Desain permukaan bola golf yang telah dibuat oleh William Taylor pada saat itu didukung oleh hipotesa Ludwig Prandtl pada 1905 mengenai *boundary layer*, yaitu lapisan fluida yang berada pada permukaan benda yang dialiri fluida, dimana lapisan tersebut sangat berpengaruh pada gaya yang terjadi pada benda walaupun memiliki ketebalan yang sangat tipis (Vendall, 2012). Dengan adanya lekukan pada permukaan bola golf (*dimple*), *boundary layer* pada permukaan bola tersebut akan bertransisi dengan cepat dari bentuk aliran laminar menjadi aliran turbulen, sehingga menghasilkan daerah *wake* yang lebih kecil dan meningkatkan performa bola golf tersebut (Donnelly, 2010). Pada bab ini, penulis akan membahas lebih lanjut mengenai teori-teori tersebut serta beberapa tinjauan pustaka yang menjadi landasan ilmiah pengerjaan tugas akhir ini.

II.1.1. Boundary Layer

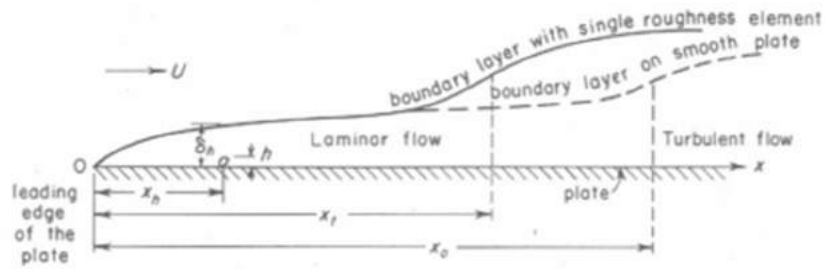
Performa bola golf yang meningkat akibat adanya *dimples* merupakan pengaruh dari *flow separation* yang tertunda akibat terciptanya *boundary layer* turbulen. *Boundary layer* sendiri bisa digambarkan sebagai lapisan fluida yang sangat tipis yang berada pada permukaan benda yang dialiri fluida, dimana lapisan tersebut sangat berpengaruh pada gaya yang terjadi pada benda (Vendall, 2012). Karakteristik dari *boundary layer* yang ada akan mempengaruhi *drag* yang dialami benda tersebut. Vendall menjelaskan bahwa *boundary layer* yang laminar memiliki struktur garis alur yang paralel terhadap satu sama lain, sedangkan *boundary layer* turbulen terjadi saat *boundary layer* laminar tidak stabil, menimbulkan pertukaran momentum yang besar hingga akhirnya menciptakan tegangan geser yang lebih besar pada permukaan benda, meningkatkan *drag* yang dialami benda.

Hal tersebut sesuai dengan apa yang dijelaskan oleh Duncan (1918) bahwa *boundary layer* turbulen pada umumnya memiliki karakteristik yang jauh berbeda dengan aliran laminar yang

berujung dengan mean velocity gradient $\partial u/\partial y$ yang lebih besar. Berhubung frictional stress τ_y dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad [1]$$

Dimana μ adalah koefisien viskositas, maka dapat disimpulkan bahwa *frictional stress* yang dimiliki aliran turbulen lebih besar.



Gambar II. 1. Ilustrasi *Boundary Layer* pada Bidang Datar

(Sumber: Pai, 1957)

Dari gambar di atas, dapat terlihat bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara *boundary layer* laminar dan turbulen. Ketebalan lapisan ini dapat diprediksi dengan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Solusi dari persamaan tersebut merupakan persamaan yang kompleks dan sulit untuk diselesaikan karena sifatnya yang non-linear dengan 3 dimensi berbeda tanpa adanya solusi eksplisit untuk tekanan (Donnelly, 2010). Walaupun demikian, persamaan ini dapat disederhanakan dengan menghilangkan elemen-elemen yang tidak relevan untuk kasus tertentu sehingga dapat diselesaikan dengan lebih mudah. Persamaan Navier-Stokes dapat diekspresikan sebagai berikut (Kundu & Cohen, 2008):

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + u_3 \frac{\partial u_1}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + v \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_3^2} \right), \quad [2]$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + u_3 \frac{\partial u_2}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + v \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial x_3^2} \right), \quad [3]$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_3}{\partial x_2} + u_3 \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_3} + v \left(\frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_3^2} \right) + g_3 \quad [4]$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan dalam beberapa kasus, diantaranya yaitu sebagai berikut sebagai berikut (Veldman, 2012):

- 1) Jika aliran dianggap 2 dimensional : u_3 dan x_3 tidak diperhitungkan
- 2) Jika aliran *free stream* dianggap aliran *steady*: $\frac{\partial}{\partial t} = 0$
- 3) Jika aliran merupakan aliran *incompressible*: $\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0$

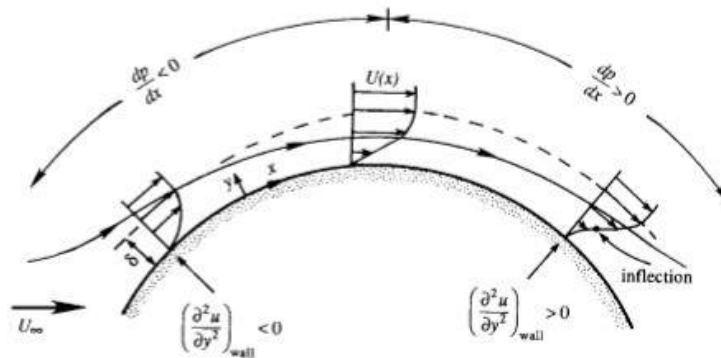
Dari persamaan Navier-Stokes [2], [3] dan [4], dapat disimpulkan bahwa karakteristik dari *boundary layer* turbulen memiliki *frictional stress* yang lebih besar. Namun, hal tersebut dapat mengurangi *form drag* yang dialami pada benda dengan menunda terjadinya *flow separation*, yang akan dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya.

II.1.2. Flow Separation

Flow separation merupakan fenomena dimana aliran pada permukaan benda terpisah dan bersatu dengan aliran utama, dimana terpisahnya aliran terjadi pada saat gaya pada permukaan sama dengan 0 akibat adanya adverse pressure gradient (Kundu & Cohen, 2008).

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0} = 0 \quad [5]$$

Seperti dijelaskan diatas, terpisahnya aliran sangat dipengaruhi oleh *adverse pressure gradient*. *Adverse pressure gradient* sendiri terjadi karena bentuk permukaan yang tidak lurus atau berlekuk. Pada Gambar II. 2, aliran yang bergerak keatas akan memusat, sehingga mengalami kenaikan kecepatan serta penurunan tekanan, sehingga pada titik puncak benda tersebut tekanan berada pada titik paling rendah. Saat aliran bergerak kebawah, aliran akan menyimpang sehingga mengalami penurunan kecepatan dan kenaikan tekanan. Hal ini menyebabkan aliran yang menempel dengan permukaan berbalik arah, yang menyebabkan adanya wilayah aliran terbalik yang berujung kepada *flow separation* (Kundu & Cohen, 2008).



Gambar II. 2 Ilustrasi Terjadinya *Adverse Pressure Gradient* Yang Menyebabkan Terpisahnya Aliran pada Benda Berlekuk.

(Sumber: Hill, 1992)

Flow separation sangat berpengaruh dengan form *drag* yang dialami oleh benda, Schlitling (1979) menjelaskan bahwa *flow separation* akan menghasilkan vortex-vortex yang tidak stabil yang menimbulkan adanya *pressure/form drag*. Schlitling menambahkan bahwa menunda terpisahnya aliran atau *flow separation* dapat mengurangi vortex yang dihasilkan oleh benda, yang berarti berkurangnya *pressure drag*.

II.1.3. Menunda Terjadinya *Flow Separation*

Terdapat beberapa cara untuk menunda terjadinya *flow separation* untuk mendapatkan *drag* yang lebih kecil. Tugas akhir ini akan berfokus kepada menunda terjadinya *flow separation* dengan cara mengimplementasi *dimples* atau lekukan pada permukaan kapal. Juniper (2015) menjelaskan bahwa terdapat beberapa cara yang dapat dilakukan untuk menunda terjadinya *flow separation*, diantaranya yaitu:

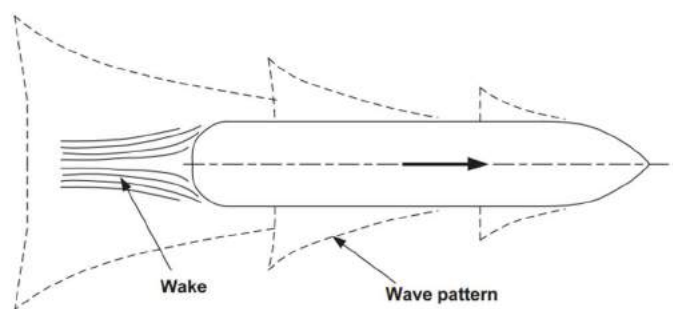
1. Menginjeksi udara bermomentum tinggi kedalam *boundary layer*. Hal ini berfungsi dengan baik dan merupakan ide dibalik slat yang terdapat pada sayap pesawat terbang untuk operasi dengan *angle of attack* yang tinggi
2. Menguras lapisan fluida berkecepatan rendah pada bagian bawah *boundary layer* dengan menghisapnya menggunakan lubang pada benda. Hal ini berfungsi dengan cukup baik, tetapi terkadang akan membutuhkan tenaga yang lebih banyak.
3. Memicu turbulensi pada *boundary layer* dengan menambah kekasaran pada permukaan benda. Hal ini sangatlah berkaitan dengan bola golf, sebagaimana

permukaan bola golf didesain dengan *dimple* atau lekukan pada permukaannya untuk mengurangi *drag* dengan menunda *flow separation* yang terjadi. Poin inilah yang akan dianalisis pada tugas akhir ini.

Juniper menjelaskan bahwa turbulensi pada *boundary layer* meningkatkan transportasi momentum dari aliran bebas yang pada akhirnya menunda *flow separation*. Hal ini juga dijelaskan oleh Hill (1992), dimana Hill menjelaskan bahwa lapisan turbulen memiliki momentum dan tegangan geser yang lebih besar, dan itulah yang menghambat aliran untuk terpisah. Konsep tersebut diimplementasikan oleh Donnelly (2010) dengan melakukan percobaan model kapal dengan permukaan berlekukan (*dimpled*), yang menghasilkan hambatan lebih rendah pada kecepatan tertentu.

II.1.4. Komponen Gaya Hambatan Pada Lambung Kapal

Dalam Bergeraknya kapal pada air, terjadi beberapa hal yang menyebabkan laju kapal terhambat. Gerakan kapal pada air akan memicu adanya pola gelombang yang terus bergerak bersama kapal serta menciptakan aliran turbulen pada sebagian panjang kapal yang pada akhirnya meninggalkan daerah jaluran ombak di belakang kapal, atau kerap disebut *wake*, yang menyerap energi kapal tersebut seperti yang diilustrasikan pada Gambar II. 3,. Energi hambatan yang terjadi pada lambung kapal menjadi faktor yang penting untuk diestimasi agar dapat mengetahui kebutuhan propulsi kapal yang efektif dan efisien (Molland, Turnock, & Hudson, 2011).



Gambar II. 3. Ilustrasi *Wake* Dan *Wave Pattern* Yang Terjadi pada Lambung Kapal

(Sumber: Molland, Turnock, & Hudson, 2011)

Menurut Lewis (1998), besarnya gaya hambatan total merupakan jumlah dari semua komponen gaya hambat (tahanan) yang bekerja pada kapal, antara lain:

1) Hambatan Kekentalan (*Viscous Resistance*)

Hambatan kekentalan terjadi karena adanya faktor kekentalan pada fluida (air), serta karena gelombang yang muncul akibat pergerakan kapal. Menghitung hambatan kekentalan membutuhkan komponen-komponen seperti bilangan Rn (*Reynold number*) untuk mendapatkan koefisien gesek menggunakan rumus ITTC 1957 dan *form factor of bare hull* ($1 + k_1$). Rumus *viscous resistance* (Rv) dapat diekspresikan sebagai berikut (Lewis, 1988):

$$Rv = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot C_{FO} (1 + k_1) S \quad [6]$$

Dimana:

ρ = masa jenis air (1025 kg/m^3)

V = kecepatan dinas (m/s)

C_{FO} = koefisien gesek

v = *kinematic viscosity*

$1+k_1$ = *form factor bare hull*

2) Hambatan Gesek (*Fricition Resistance*)

Berbeda dengan hambatan kekentalan, hambatan gesek terjadi murni karena adanya efek kekentalan yang terjadi. Hal tersebut mengakibatkan adanya gesekan yang terjadi antara molekul fluida dan nilainya dipengaruhi oleh viskositas, kecepatan kapal dan luas permukaan basah., sesuai pada persamaan berikut:

$$Rf = \frac{1}{2} \rho \cdot C_F \cdot S \cdot V^2 \quad [7]$$

Dimana:

ρ = masa jenis fluida

V = kecepatan dinas (m/s)

C_F = koefisien gesek

3) *Appendages Resistance*

Appendages resistance merupakan komponen hambatan kapal yang diakibatkan oleh bentuk badan kapal yang tercelup dalam air, mengingat lambung kapal tidak sepenuhnya mulus tanpa penambahan tonjolan lain seperti *bilge keel*, *bulbous bow*, dan sebagainya. Perhitungan komponen hambatan ini membutuhkan luas total (S_{tot}) dari penambahan luas permukaan basah lambung kapal (S) ditambah luas tonjolan-tonjolan yang ada (S_{app}), sehingga dapat diekspresikan sebagai persamaan berikut (Lewis, 1988):

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot C_{FO} \cdot S_{tot} (1 + k) \quad [8]$$

4) *Wave Making Resistance*

Hambatan gelombang merupakan komponen hambatan yang sangat dipengaruhi oleh kecepatan kapal, karena kecepatan kapal sangat berpengaruh terhadap bentuk gelombang yang muncul. Gelombang yang terjadi merupakan akibat gerakan titik tekanan tunggal yang bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan air, menimbulkan sejumlah gelombang yang bergabung membentuk suatu pola yang khas. Pola ini terdiri dari sistem (sejumlah) gelombang melintang (*transverse waves*) dan sistem gelombang divergen yang menyebar dari titik tersebut. Jarak antara satu gelombang melintang dengan gelombang melintang berikutnya sangat tergantung pada kecepatan gerakan titik itu sendiri (Harvald, 1992). Rumus untuk menghitung hambatan gelombang dapat diekspresikan sebagai berikut (Lewis, 1988):

$$\frac{R_W}{W} = C_1 C_2 C_3 e^{m_1 F n^d} + m_2 \cos(\lambda F n^{-2}) \quad [9]$$

II.1.5. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan suatu keilmuan dimana dengan bantuan komputer digital, dapat menghasilkan prediksi kuantitatif dari fenomena aliran fluida berdasarkan hukum kekekalan masa, momentum, dan energi. Prediksi ini dihasilkan dengan kondisi-kondisi yang telah terdefinisi dalam nilai-nilai variabel aliran, seperti tekanan, kecepatan aliran, atau suhu pada area tertentu dan untuk waktu yg ditentukan. Hal ini juga dapat memprediksi sifat dari aliran tersebut, seperti sifat laju aliran atau gaya hidrodinamika yang bekerja terhadap suatu benda yang ada pada aliran tersebut (Kundu & Cohen, 2008).

Hukum kekekalan (*conservation laws*) menjadi dasar perhitungan pada simulasi *computational fluid dynamics*, dimana persamaan hukum kekekalan seperti persamaan Euler dan Navier-Stokes yang tertulis pada persamaan [2], [3] dan [4] dapat diwakilkan dengan persamaan integral sebagai berikut (Lomax, Pulliam, & Zingg, 1999):

$$\int_{V(t_2)} Q dV - \int_{V(t_1)} Q dV + \int_{t_1}^{t_2} \oint_{S(t)} \mathbf{n} \cdot \mathbf{F} dS dt = \int_{t_1}^{t_2} \int_{V(t)} P dV dt \quad [10]$$

Pada persamaan diatas, Q adalah vektor yang terdiri dari variabel yang terkonservasi seperti masa, momentum dan energi, per unit volume. Persamaan tersebut adalah pernyataan konservasi dari elemen-elemen persamaan pada ruang hingga dengan volume $V(t)$ dan luas permukaan $S(t)$ terhadap interval waktu yang terbatas $t_1 - t_2$. Pada kasus 2 dimensi, daerah dari ruang atau *cell* merupakan luas $A(t)$ yang dibatasi oleh kontur tertutup $C(t)$. Vektor \mathbf{n} merupakan unit vektor yang memiliki arah tegak lurus terhadap permukaan, F merupakan suatu set vektor atau tensor yang terdiri dari aliran dari Q per unit luasan per unit waktu, dan P adalah laju produksi Q per unit volume per unit waktu.

Sebagai persamaan yang mendeskripsikan konservasi masa, momentum dan energi, persamaan Navier-Stokes dapat menggambarkan aliran konvektif dan difusif. Aspek dari fenomena konvektif yang berkaitan dengan sistem persamaan berpasangan seperti persamaan Euler merupakan hal penting dalam perkembangan metode numerik dan kondisi batas. Untuk itu, sistem hiperbolik linear dari persamaan diferensial parsial merupakan hal fundamental pada *computational fluid dynamics*.

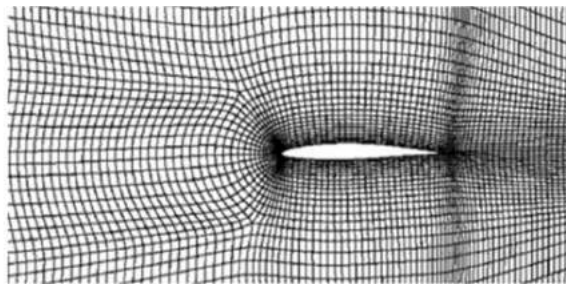
Dalam suatu simulasi CFD, terdapat 5 fase berkelanjutan yang terdiri dari fase model matematis, fase diskritisasi, fase pengaturan skema numerik, fase solusi numerik dan pemrosesan secara grafis. Berikut adalah penjelasan dari setiap fase di atas (Hirsch, 2007):

1) Pendefinisian Model Matematis

Langkah awal yang harus dilakukan adalah untuk mendefinisikan dan mengerti aspek fisika dari apa yang akan disimulasikan. Harus diingat bahwa pemahaman yang baik terhadap sifat fisik dan batasan dari model merupakan hal yang sangat penting untuk keberhasilan simulasi. Kebanyakan dari munculnya perbedaan antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi CFD bukan karena kesalahan pada proses eksperimen maupun pada proses penyelesaian numerik, tetapi kesalahan ada pada pemodelan teoritis yang dilakukan untuk simulasi CFD tidak sesuai dengan kondisi fisika aslinya. Karena itu, dengan pengecualian atas *Direct Numerical Simulation (DNS)* dari persamaan Navier-Stokes, diperlukan adanya pendefinisian asumsi serta simplifikasi model yang sesuai.

2) Proses Diskritisasi

Tahap ini merupakan tahap yang sangat signifikan pada proses simulasi CFD. Mengingat komputer digital hanya dapat mengenal bilangan, model matematis dan geometri yang dimiliki pun harus diubah menjadi bilangan. Proses inilah yang dinamakan proses diskritisasi. Perlakuan pertama adalah pendiskritisasi ruang, termasuk geometri dan bagian solid yang ada pada daerah aliran. Permukaan atau bagian solid pada geometri didapat dari perangkat lunak CAD (*computer aided drawing*) dimana hal tersebut dapat dimulai proses penyebaran poin-poin pada domain aliran dan pada permukaan geometri solid. Keseluruhan poin-poin yang tersebar, yang menggantikan kontinuitas dari ruang yang sesungguhnya dengan poin yang berjumlah hingga inilah yang dinamakan *grid* atau *mesh*. Pada umumnya proses pembuatan *mesh* merupakan proses yang kompleks sehingga membutuhkan perangkat khusus untuk melakukannya. Gambar II. 4 merupakan contoh hasil *structured mesh* dengan metode *body fitted* dimana alur *mesh* mengikuti bentuk permukaan benda di dalam aliran bebas.



Gambar II. 4. *Body-Fitted Mesh* pada Domain Aliran Sebuah *Airfoil*.

(Sumber: Hirsch,2007)

3) Menjalankan Fase Analisis

Setelah proses diskritisasi, nilai kumpulan hubungan aljabar antara titik *mesh* yang berdekatan didapat, dengan setiap titik memiliki satu hubungan. Hubungan ini dinamakan skema numerik (*numerical scheme*). Skema numerik harus memenuhi beberapa syarat dan kondisi supaya diterima dan kemudian perlu dianalisis untuk memastikan tingkat akurasi. Fase analisis ini merupakan fase yang kritis, dimana fase ini dapat membantu memilih skema yang paling sesuai untuk aplikasi yang dipertimbangkan sementara mencoba untuk mengurangi kesalahan numerik.

4) Menjalankan Fase Resolusi Numerik

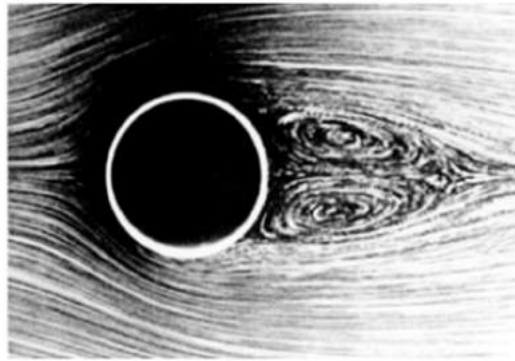
Tahap terakhir dari proses diskritisasi CFD adalah menyelesaikan skema numerik untuk mendapatkan nilai titik *mesh* dari variabel aliran utama. Algoritma solusi yang dibutuhkan bergantung pada permasalahan yang disimulasi, seperti apakah permasalahan tersebut merupakan masalah transien (bergantung pada waktu) atau aliran tenang. Hal ini memerlukan beberapa teknik berbeda, yaitu antara penyelesaian persamaan diferensial terhadap waktu atau penyelesaian sistem aljabar. Untuk simulasi transien, perhatian khusus perlu diberikan terhadap integrasi waktu. Pada kasus tertentu, seperti pada kasus aliran pada pesawat terbang, memerlukan *grid* sekitar 50 juta agar perhitungan dapat dianggap akurat.

Pada tahap ini perlu disadari bahwa pada akhir tahap diskritisasi, semua skema numerik akan menjadi sistem persamaan aljabar. Sistem tersebut kemudian akan diselesaikan melewati tahap iterasi yang berulang-ulang hingga akhirnya mencapai tahap konvergensi.

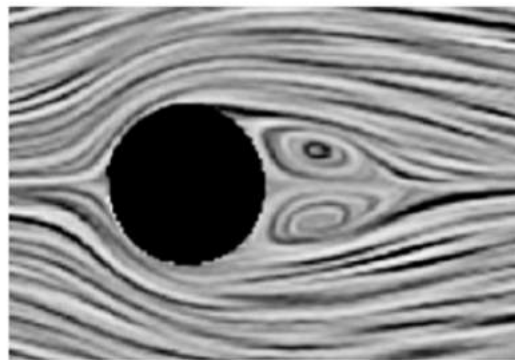
5) Visualisasi Hasil

Setelah solusi dari simulasi didapat, angka-angka dari hasil iterasi tersebut harus dianalisis untuk mengerti sifat aliran yang terjadi pada simulasi. Hal ini tentunya hanya memungkinkan dengan bantuan sistem visualisasi yang baik, dimana sistem tersebut dapat menyediakan berbagai macam fitur agar dapat mempelajari hasil secara kuantitatif maupun kualitatif. Fitur-fitur visualisasi meliputi kontur tekanan, vektor kecepatan, aliran dalam bentuk *streamline*, animasi, dan sebagainya. Hirsch (2007) menambahkan bahwa hal ini memungkinkan untuk melihat fenomena yang terjadi pada benda dengan akurat sebelum suatu benda dibuat atau dibangun. Visualisasi dari simulasi CFD telah

terbukti dapat memprediksi fenomena aliran dengan baik, seperti pada Gambar II.5 dimana simulasi CFD dapat memvisualisasikan aliran yang memiliki persamaan yang cukup akurat jika dibandingkan dengan aliran yang terjadi pada pengujian eksperimental pada suatu bola (Hirsch, 2007).



(a)



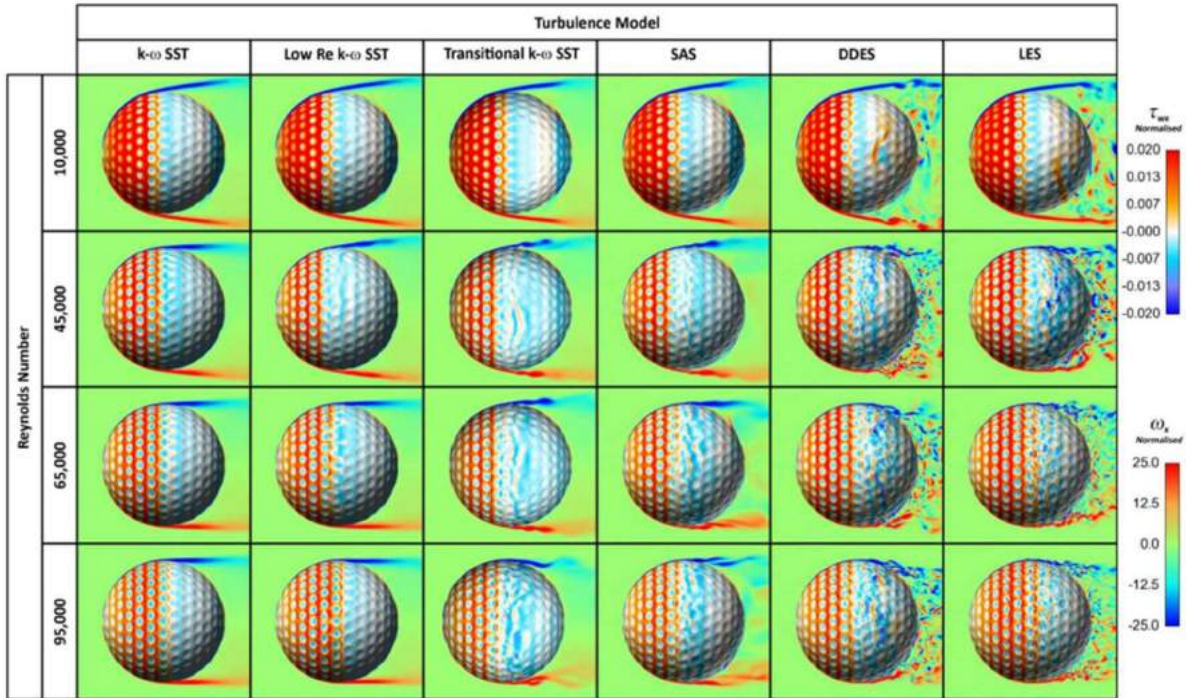
(b)

Gambar II. 5. Perbandingan Hasil Visual (A) Pengujian Eksperimen Dengan (B) Visualisasi Hasil Simulasi CFD.

(Sumber: Hirsch, 2007)

Visualisasi pada perangkat lunak CFD juga dipengaruhi dengan model turbulensi yang digunakan untuk menjalankan simulasi. Hart (2016) membuktikan hal tersebut dengan melakukan simulasi aliran terhadap bola golf dengan menggunakan berbagai macam model turbulensi, yaitu $k-\omega$ shear stress transport (SST), Low Re $k-\omega$ SST, Transition SST, Scale Adaptive Simulation (SAS), Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) dan Large Eddy Simulation (LES). Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar II. 6 dimana hasil visualisasi simulasi yang dihasilkan memiliki perbedaan yang cukup signifikan terhadap

masing-masing model turbulensi, dimana model LES dapat menghasilkan visual dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi, walaupun membutuhkan daya computer yang lebih besar dibandingkan model turbulensi lainnya (Hart, 2016).



Gambar II. 6 Perbandingan Hasil Visualisasi CFD dengan Model Turbulensi Yang Berbeda Terhadap Aliran pada Bola Golf
(Sumber: Hart, 2016)

II.2. Tinjauan Pustaka

II.2.1. Perkembangan Bola Golf

Bentuk bola golf yang semua orang ketahui saat ini pada awalnya tidaklah demikian. Pada mulanya, permainan golf moderen berawal dari Skotlandia dengan pengaruh permainan-permainan serupa seperti kolf atau kolven dari Belanda. Permainan ini sudah ada sejak tahun 1400, walaupun hanya populer untuk kalangan kerajaan dan bangsawan. Pada saat itu, bola yang paling populer digunakan untuk bermain bernama *fethearie*, yaitu bola yang terbuat dari kulit yang diisi bulu angsa. Pembuat bola pada masa itu berlomba-lomba untuk membuat *featherie* yang paling sempurna dari sisi kebulatannya dan halusnnya permukaan, dengan asumsi semakin halus permukaan *featherie* yang dibuat, maka semakin jauh bola tersebut dapat terbang. Bola *featherie* tercatat pertama kali hadir pada abad ke-17, dengan Belanda sebagai produsen terbaik produk tersebut. Walaupun populer, bola *featherie* memiliki kelemahan

dimana bola tersebut tidak dapat dimainkan saat kondisi lapangan basah, sebab bola *featherie* dapat menyerap air dan kelembaban dengan mudah. Hal ini mendorong produsen serta para pemain untuk mencari solusi bola yang lebih baik (Kavas, 2016).



Gambar II. 7. Bola Golf *Featherie* Yang Populer Digunakan untuk Permainan Golf Pada Abad Ke-17

(Sumber: simpsonsgolfshop.co.uk)

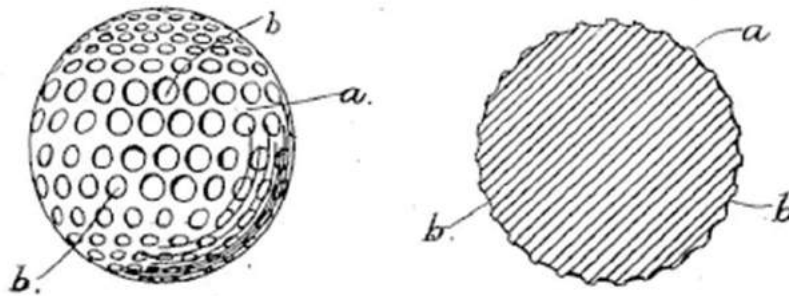
Martin (1968) menjelaskan bahwa solusi tersebut akhirnya ditemukan oleh Rob Paterson pada tahun 1846, dengan bola temuannya yang dinamakan *guttie*. *Guttie* merupakan bola yang terbuat dari getah perca, dimana bola tersebut memiliki ketahanan terhadap cuaca yang jauh lebih baik serta memiliki performa yang bagus. Namun, seiring berjalannya waktu, pemain-pemain golf pada saat itu mulai menyadari bahwa bola *guttie* yang sudah lama dipakai, dengan permukaan yang sudah tidak mulus lagi, dapat melaju lebih jauh dibandingkan saat bola tersebut masih baru. Pada tahun 1860, bola *guttie* mulai diproduksi dengan permukaan yang memiliki *raised ridges* seperti yang dapat terlihat pada Gambar II.8 (Martin, 1968).



Gambar II. 8. Bola *Guttie* yang Diproduksi dengan Permukaan *Raised Ridges*

(Sumber: Martin, 1968)

Perkembangan tidak berhenti disitu. Melihat adanya permukaan yang tidak rata pada bola golf, William Taylor mengembangkan permukaan bola yang terdiri dari indentasi-indentasi kecil. Pada tahun 1908, William Taylor mendapatkan hak paten atas pola *dimple* pada permukaan bola yang ia ciptakan. Produsen bola golf pada saat itu mulai mengimplementasikan pola *dimple* yang diciptakan Taylor, dan hasilnya bola-bola tersebut semua dapat melaju lebih baik dari bola-bola sebelumnya (Kavas, 2016).

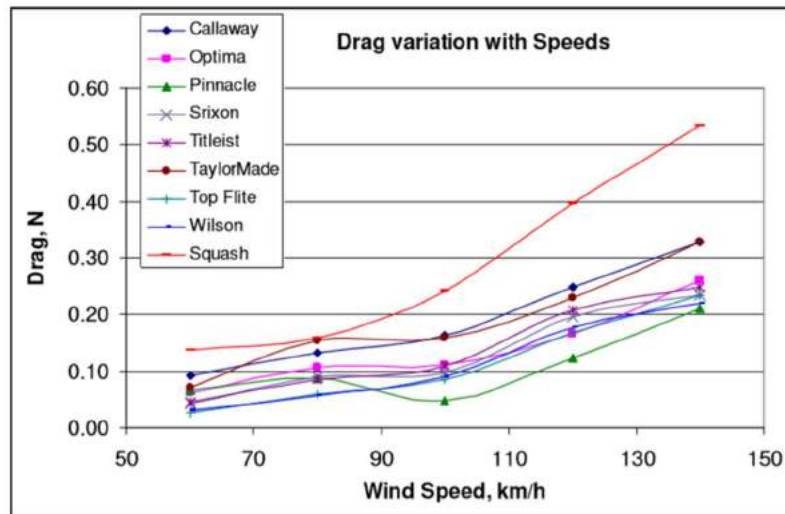


Gambar II. 9. Paten Pola *Dimple* Yang Dipatenkan oleh William Taylor
(Sumber: Martin,1968)

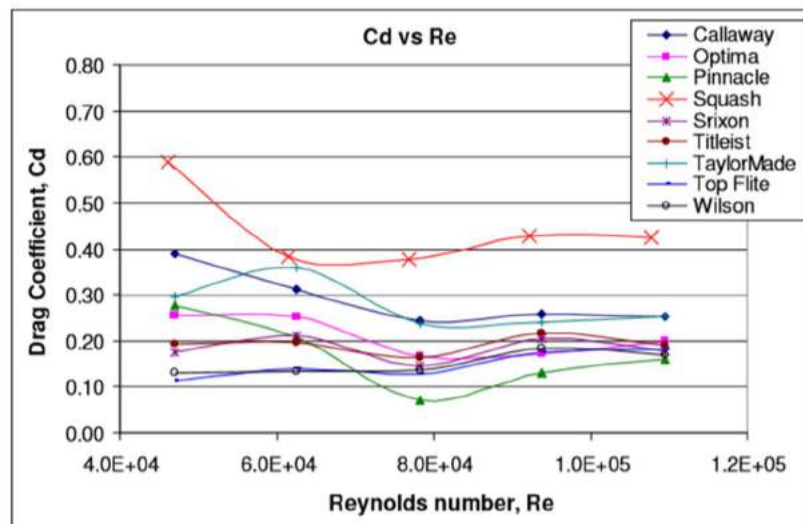
Pola *dimple* yang diimplementasikan pada bola golf pada awal abad ke 20 menjadi standard bola golf modern hingga saat ini. Adanya *dimple* pada permukaan bola memungkinkan bola untuk melaju lebih jauh dari sebelumnya. Fenomena ini dapat dijelaskan dengan hukum mekanika fluida dimana terdapat aliran turbulen akibat adanya *dimple* yang bekerja pada bola sehingga meringankan hambatan yang bekerja melawan bola (F. Alam, 2010).

II.2.2. Aerodinamika Bola Golf

Performa dari permukaan berlekukan (*dimple*) telah dibuktikan oleh banyak pihak dengan berbagai macam jenis percobaan. Alam (2010) menjalankan eksperimen *wind tunnel* dimana terdapat berbagai jenis bola golf serta bola squash yang memiliki permukaan mulus. Hasil dari eksperimen tersebut dapat dilihat pada Gambar II. 10 dan Gambar II. 11 dimana hasil eksperimen menunjukkan perbedaan yang signifikan pada bola golf dengan bola squash yang tidak memiliki *dimple* pada permukaannya dari segi *drag* yang dialami pada kecepatan 50-150 km/jam.



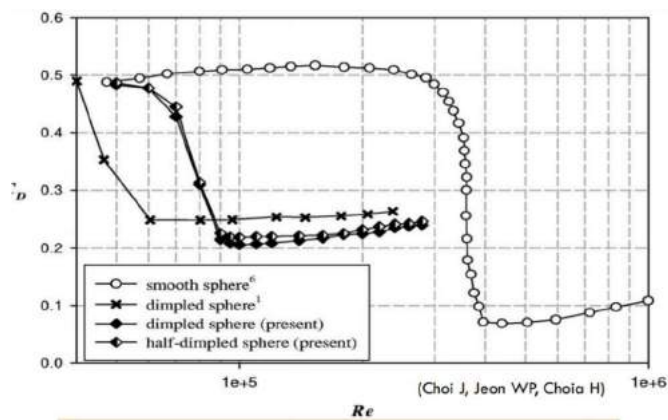
Gambar II. 10. Perbandingan Antara *Drag Coefficient* dengan Kecepatan
(Sumber: F. Alam, 2010)



Gambar II. 11 Perbandingan Antara *Drag Coefficient* dengan *Re*
(Sumber: F. Alam, 2010)

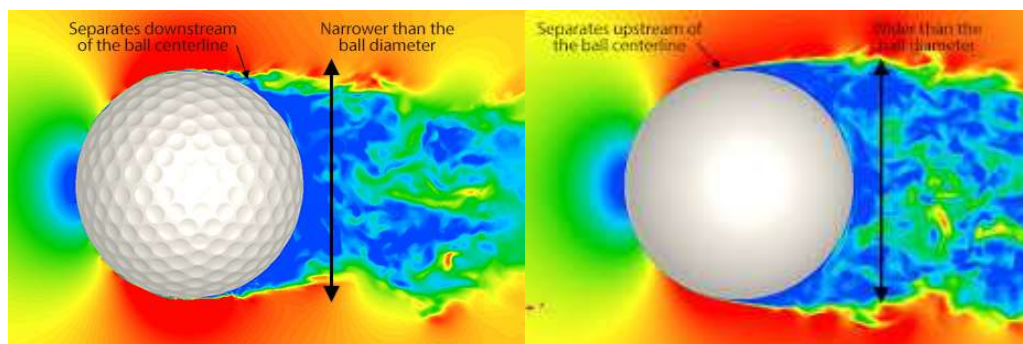
Pada grafik di atas, bola dengan *dimple* terlihat memiliki nilai *Cd* yang lebih rendah pada semua kecepatan yang diuji. Namun, di luar kecepatan uji tersebut, performa bola golf tidak selalu lebih baik dibandingkan bola dengan permukaan mulus. Menurut Hart (2016) bola golf akan mengalami penurunan *Cd* secara drastis saat berada pada kondisi $55,000 < Re < 65000$. Di bawah kondisi tersebut, *Cd* pada kedua jenis bola cenderung sama dan jika jauh melebihi kondisi tersebut maka performa bola mulus akan lebih baik dari bola golf. Hal ini

menunjukkan bahwa penerapan *dimple* pada *bluff body* tidak selalu efektif pada setiap kondisi kecepatan, seperti yang dapat ditunjukkan oleh Choi (2006) pada Gambar II. 12.



Gambar II. 12. Hasil Percobaan Perbandingan C_d Antara Bola dengan Variasi *Dimple* dengan Bola Tanpa *Dimple*
(Sumber:Choi, 2006)

Percobaan ini pun telah banyak dicoba oleh banyak pihak dengan menggunakan CFD agar dapat melihat dengan jelas fenomena aliran yang terjadi pada bola golf pada Re dimana bola golf dapat mengalami penurunan C_d . Hasil dari percobaan CFD oleh Takao Itami dapat dilihat pada Gambar II. 13 dimana hasil simulasi CFD dapat memvisualisasikan dengan jelas efek dari *dimple* terhadap aliran hingga aliran tersebut mengalami *flow separation* yang tertunda sehingga memiliki area *wake* yang lebih kecil.



Gambar II. 13. Perbandingan Hasil CFD Bola Permukaan Mulus dengan Bola Golf
(Sumber: Itami, 2018)

II.2.3. Penerapan *Dimple* Pada Lambung Kapal

Berbeda dengan bola golf, kapal bukan merupakan benda yang memiliki *bluff body*, sehingga hambatan yang dialami oleh kapal sebagian besar merupakan *skin friction*. Walaupun demikian, kapal tetap memiliki *pressure drag* dimana menurunkan *pressure drag* tentu

memerlukan cara yang berbeda dengan mengurangi hambatan gesek. Donnelly (2010) melakukan uji eksperimen pada kapal dengan *dimple* untuk menguji apakah konsep pengurangan *form drag* yang berhasil diterapkan pada bola golf dapat diterapkan kepada kapal.

Tabel II. 1 Kriteria *Dimple* oleh William Taylor

Diameter bola mm (in)	Persentase cakupan permukaan	Diameter bola, mm (in) [% diameter bola]	Kedalaman <i>dimple</i> , mm (in) [% of diameter <i>dimple</i>]
41.15 (1.62)	25%-75%	2.29-3.81 (.09-.15) [5.56%-9.26%]	>0.356 (.014") [9.33%-15.56%]
42.67 (1.68)	25%-75%	2.29-3.81 (.09-.15) [5.36%-8.93%]	>0.356 (.014") [9.33%-15.56%]

Tabel di atas merupakan kriteria standard pembuatan bola golf yang dipatenkan oleh William Taylor pada tahun 1908. Semenjak penemuan ini semua bola golf diproduksi dengan *dimples* pada permukaannya seperti yang dibuat oleh William Taylor.

Pada eksperimennya, Donnelly (2010) mengikuti kriteria *dimples* yang dibuat oleh Taylor dan menerapkannya pada kapal model yang dibuatnya. Donnelly menetapkan diameter *dimples* sebesar 7.4% dari radius bilga, serta kedalaman *dimples* 11% dari diameter *dimple* itu sendiri.



Gambar II. 14. Kapal Model Donnelly (2010) yang Telah Dicitak dengan *Dimple* pada Bagian Buritan Kapal
(Sumber: Donnelly, 2010)

Pada percobaannya, *dimple* diletakkan pada bagian buritan dengan dasaran bahwa bagian haluan kapal akan lebih baik jika dibiarkan karena peletakan *dimple* pada bagian haluan

hanya akan menyebabkan turbulensi yang tidak perlu, sehingga akan dengan mudah menambah hambatan yang dialami kapal. Bentuk haluan kapal yang berlekuk diasumsikan akan menciptakan ketidakstabilan dan *flow separation* pada kapal, sehingga *dimple* diletakkan pada bagian buritan untuk menunda *flow separation* yang akan terjadi.

Menurut Donnelly, hasil dari percobaannya tidak dapat disimpulkan sebagai berhasil maupun gagal, sebab *error* yang terjadi saat pengujian begitu besar sehingga beberapa data hasil eksperimen tidak dapat dianggap valid. Percobaan ini menghasilkan data hambatan kapal dengan *dimple* yang lebih kecil sampai dengan -27.08% dan lebih besar sampai dengan +13.23% dibandingkan dengan lambung berpermukaan mulus, walaupun data tersebut tidak dapat dianggap valid sepenuhnya.

BAB III METODOLOGI

III.1. Studi Literatur

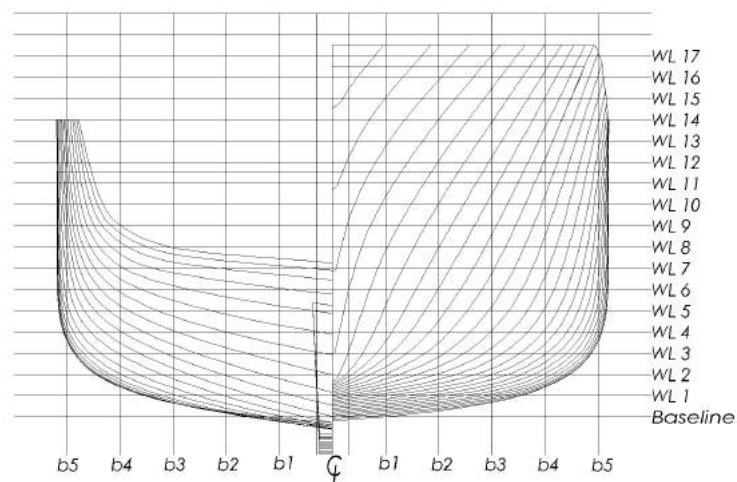
Studi literatur pada penelitian ini dilakukan untuk mengumpulkan berbagai referensi yang dibutuhkan dalam proses analisis kekuatan lambung kapal. Studi literatur terbagi kedalam dua bagian, yaitu dasar teori dan tinjauan pustaka. Dasar teori berisikan pengertian dan acuan dari variabel yang digunakan dalam tugas akhir ini, sedangkan tinjauan pustaka digunakan untuk memperoleh pengalaman dari penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya. Hal ini dapat berupa metode serta langkah penyelesaian masalah dan informasi yang dibutuhkan.

III.2. Pengumpulan Data

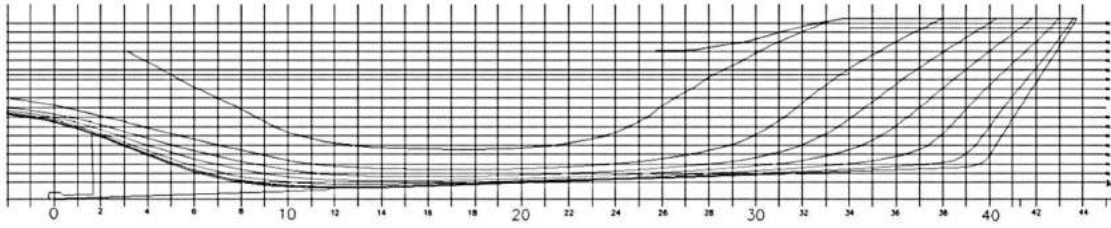
Pengumpulan data pada penelitian ini berupa data kapal yang akan dianalisis berkaitan dengan rumusan masalah dan tujuan. Data yang diperlukan meliputi ukuran utama, *lines plan*, serta data hambatan hasil uji eksperimen. Data-data tersebut digunakan untuk pemodelan 3D kapal seta pengujian kapal dengan menggunakan CFD.

III.2.1. Data Kapal

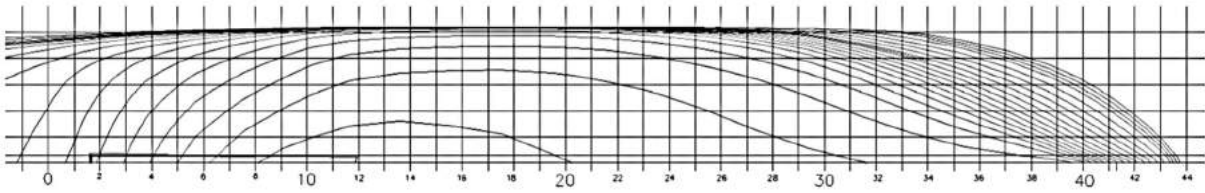
Data kapal yang digunakan untuk pengujian didapatkan dari Balai Teknologi Hidrodinamika, BPPT. Kapal yang didapat berupa kapal *displacement* pengangkut ikan 60 GT. Berikut adalah ukuran utama kapal beserta renca garis kapal.



Gambar III. 1. *Body Plan* Kapal Pengangkut Ikan 60 GT



Gambar III. 2. *Sheer Plan* Kapal Pengangkut Ikan 60 GT



Gambar III. 3. *Half Breadth Plan* Kapal Pengangkut Ikan 60 GT

Tabel III. 1 Ukuran utama Kapal Pengangkut Ikan 60 GT

Ukuran Utama	
Lpp	20.65 m
Loa	23.20m
Lwl	21.98m
B	5.2m
T	1.6m
H	2.3m

III.2.2. Data Eksperimen Uji Tarik

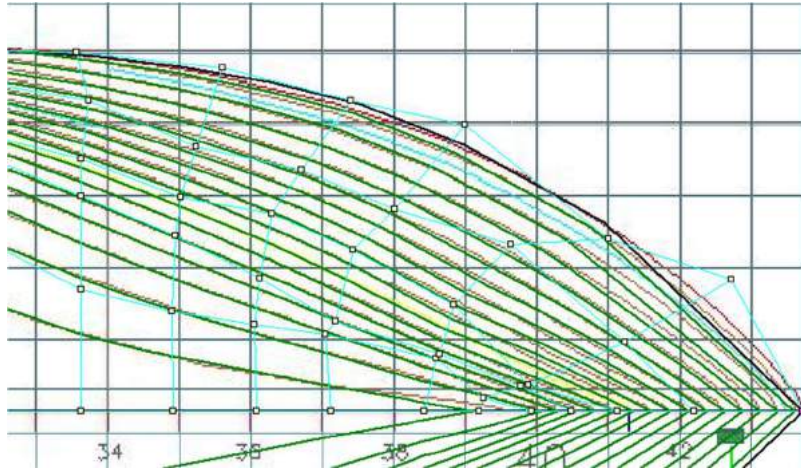
Kapal ini telah melewati eksperimen uji tarik yang dilakukan laboratorium Balai Teknologi Hidrodinamika, BPPT. Data ini nantinya akan digunakan untuk memvalidasi hasil percobaan CFD, dengan margin error 5%. Hasil dari percobaan tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel III. 2. Hasil Eksperimen Uji Tarik Kapal Pengangkut Ikan 60GT oleh Balai Teknologi Hidrodinamika, BPPT.

VS	VM	RS	PE
KNOTS	M/S	KN	KW
5.0	0.955	1.7	4.5
5.5	1.051	2.2	6.1
6.0	1.146	2.6	8.2
6.5	1.242	3.3	10.9
7.0	1.337	4.0	14.4
7.5	1.433	5.0	19.2
8.0	1.528	6.5	26.6
8.5	1.624	8.3	36.2
9.0	1.720	10.2	47.2
9.5	1.815	12.4	60.4
10.0	1.911	15.0	77.3
10.5	2.006	18.2	98.2
11.0	2.102	21.9	124.0

III.3. Pemodelan 3D

Model 3D dibuat dengan rencana garis yang tersedia menggunakan perangkat lunak Maxsurf Modeler. Gambar dari rencana garis (*body plan*, *sheer plan* dan *half breadth plan*) dimasukkan ke dalam perangkat lunak sebagai *background* dan disamakan titik nol serta skalanya untuk menjadi acuan model. Pemodelan dilakukan pertama kali dengan menggunakan referensi model 3D kapal yang telah disediakan oleh perangkat lunak. Ukuran model referensi tersebut diubah menjadi sesuai dengan ukuran utama kapal yang akan diuji dengan menggunakan fitur *parametric transformation* dimana perangkat lunak dapat menyesuaikan ukuran kapal dengan parameter ukuran utama dan menggunakan satu variabel bebas seperti *displacement*. Model 3D tersebut kemudian disamakan jumlah dan jarak setiap *station*, *water line* dan *buttock line*, sesuai dengan *linesplan* dari data yang telah didapat. Setelah memiliki jumlah garis yang sama, dilakukan modifikasi terhadap setiap *station*, *water line* dan *buttock line* model 3D sampai rencana garis pada model 3D sesuai dengan rencana garis data kapal sesungguhnya. Proses penyesuaian *waterline* dapat dilihat pada Gambar III. 4.



Gambar III. 4 Proses Penyesuaian *Waterline* pada Perangkat Lunak *3D Modeler*

Proses tersebut kemudian dilanjutkan dengan mengekspor hasil rencana garis yang sudah sesuai tersebut menjadi format 3D dengan format ekstensi IGES. Hasil model 3D inilah yang kemudian digunakan untuk simulasi CFD. Model 3D kapal dapat dilihat pada Gambar III.5

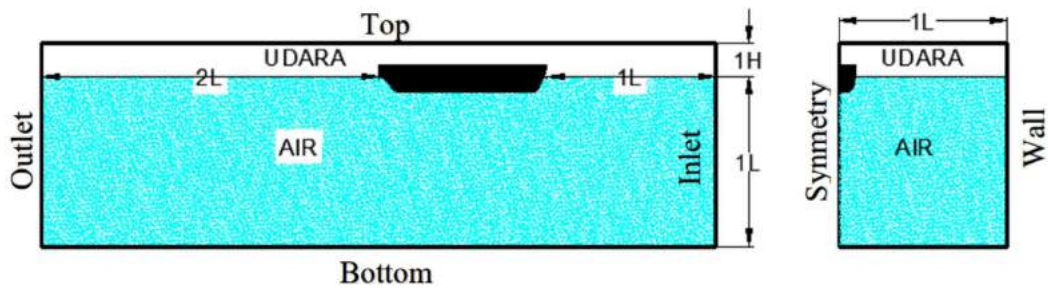


Gambar III. 5. Model 3D Kapal Pengangkut Ikan 60GT

III.4. Simulasi Pada Perangkat Lunak CFD

1) Pemodelan Domain Komputasi (*Computational Domain*)

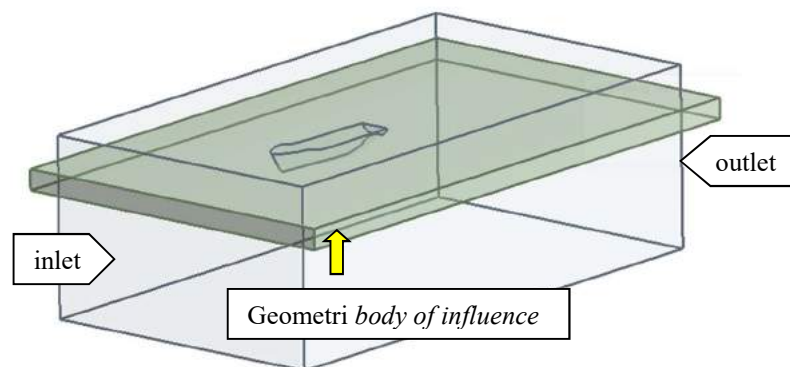
Pengujian pada perangkat lunak CFD dimulai dengan memodelkan domain komputasi kapal tersebut. Konsep dari pemodelan domain komputasi ini adalah menjadikan seluruh isi domain komputasi sebagai objek solid dengan kapal didalamnya sebagai ruang kosong, karena pada pengaturan simulasi ini, aliran akan melaju pada objek yang dianggap solid. Kondisi batas yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar III. 6. Ilustrasi Kondisi Batas yang Digunakan Untuk Pengujian CFD

(Sumber: Dhana, 2018)

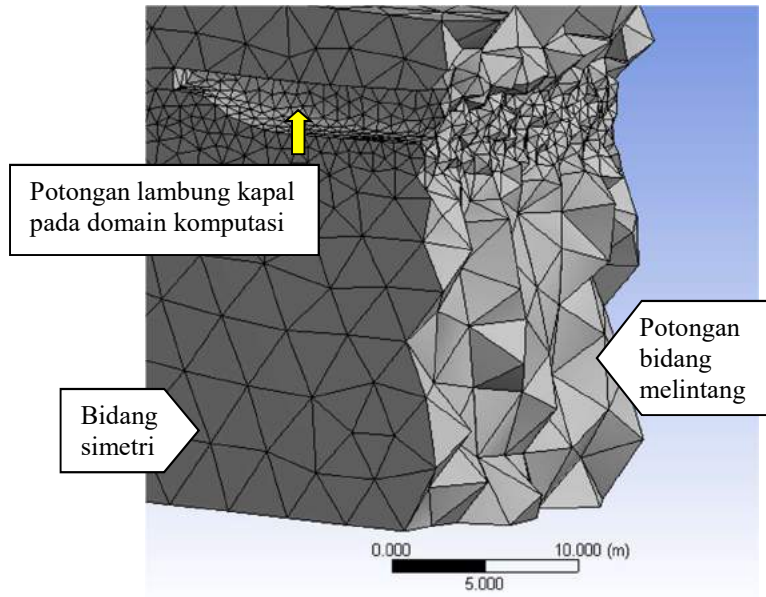
Domain komputasi dibuat dengan panjang $4xL_{pp}$ atau sepanjang 82.6m, tinggi 22.95m dan lebar 41.3m sebelum diimplementasikan bidang simetri (ITTC, 2014). Untuk meningkatkan akurasi simulasi pada daerah sarat, maka geometri *body of influence* dibentuk dengan tinggi $2xT$ atau setinggi 3.2m (1.6m di atas sarat, 1.6m dibawah sarat) dan memiliki lebar dan panjang sesuai komputasi domain. Untuk mengurangi waktu simulasi, seluruh geometri komputasi domain dibagi dua secara memanjang dengan fitur *symmetry*. Gambar III.7 merupakan geometri domain komputasi yang telah dibagi menjadi 2 secara memanjang dengan fitur *symmetry* dan telah disiapkan geometri *body of influence* untuk meningkatkan akurasi pada daerah sarat.



Gambar III. 7. Domain Komputasi pada Perangkat Lunak CFD

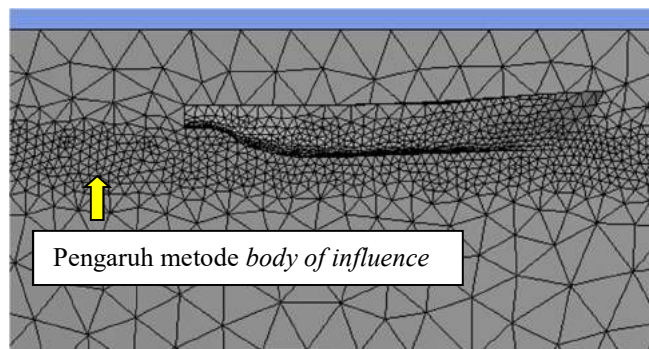
2) Meshing

Jenis *meshing* yang digunakan pada analisis ini adalah *unstructured mesh*. Jenis mesh ini dipilih karena proses meshingnya lebih mudah dan lebih cepat. Elemen yang terbentuk dari *meshing* ini terdiri dari bentuk segitiga pada bidang 2 dimensi dan tetrahedral pada ruang 3 dimensi.



Gambar III. 8. Bentuk *Mesh* Tetrahedral dan Segitiga pada Metode *Unstructured Mesh*

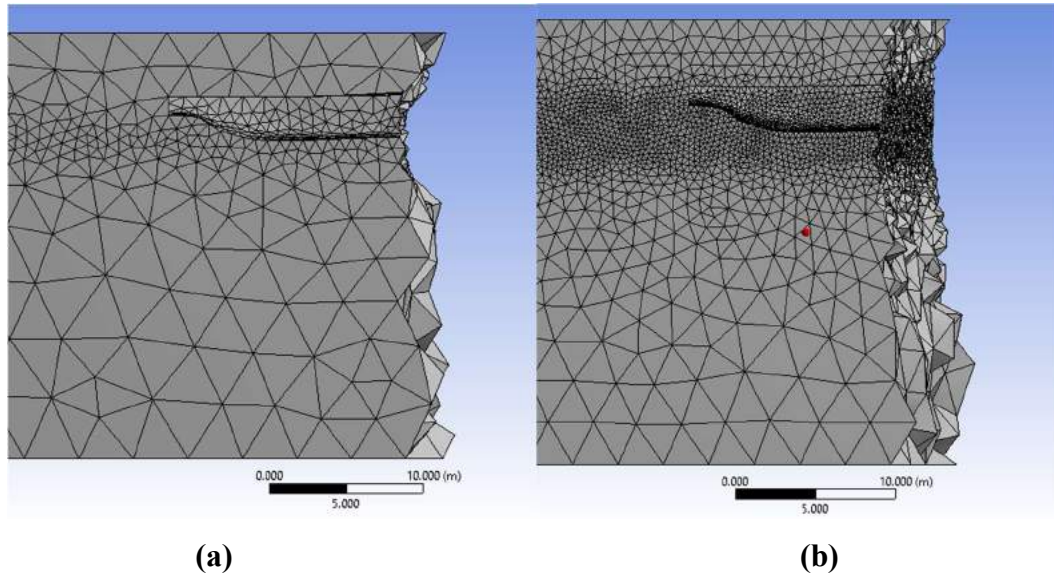
Gambar III. 8 menunjukkan potongan bidang melintang *mesh* pada domain komputasi untuk memperlihatkan bentuk elemen *mesh* di dalam domain aliran. Untuk meningkatkan akurasi pada area sarat, *meshing* pada area yang bersinggungan dengan geometri *body of influence* dirapatkan dengan besar elemen minimal sebesar 0.33m dengan *growth rate* 1.2x hingga mencapai ukuran maksimal pada domain komputasi sebesar 42.8m. Pengaruh dari metode *body of influence* pada daerah sarat dapat dilihat pada Gambar III. 9.



Gambar III. 9. Hasil *Meshing* dengan Metode *Body Of Influence* pada Perangkat Lunak CFD

Sebelum mendokumentasikan hasil output final dari simulasi, ukuran *meshing* pada model harus dipastikan tidak lagi memiliki pengaruh terhadap besarnya nilai output simulasi. Hal ini dilakukan dengan membuat *meshing* yang dimulai dari jumlah elemen sebanyak 137,500 dan terus ditingkatkan sejumlah 2 kali lipat hingga mencapai *grid independence* pada jumlah elemen 4,6 juta. Model dianggap mencapai *grid independence* saat hasil nilai output

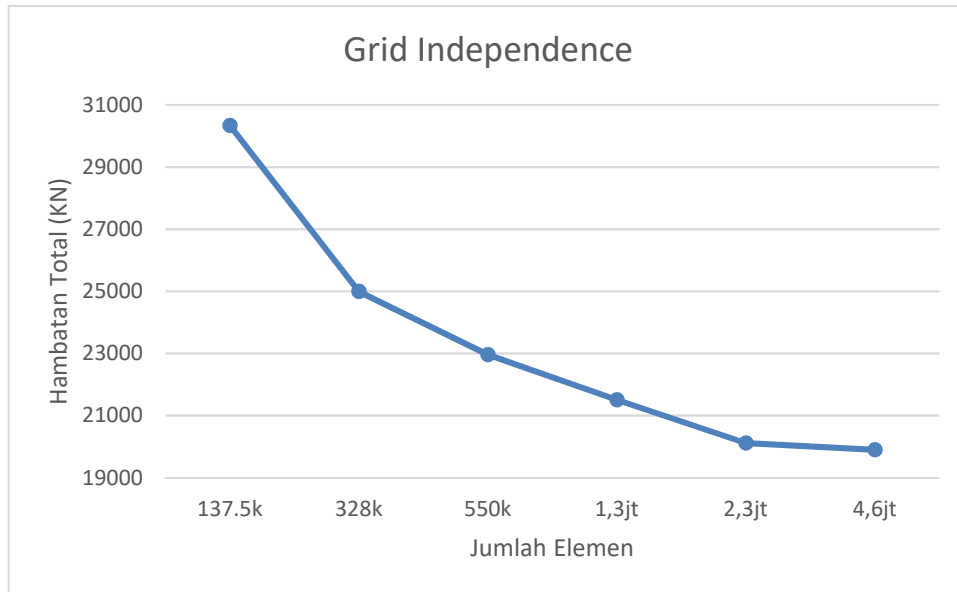
simulasi hanya berbeda selisih dibawah 2% dengan model *meshing* yang memiliki elemen berjumlah 2 kali lipat dengannya. Hal ini dicapai pada *mesh* yang memiliki 2,3 juta elemen, dengan selisih hasil nilai hambatan antara model dengan jumlah elemen 4,6 juta sebesar 1,11%. Perbedaan besar elemen pada *mesh* yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar III. 10.



Gambar III. 10. Perbandingan *Mesh* dengan Jumlah (A) 138ribu Elemen dengan *Mesh* Berjumlah (B) 2,3 Juta Elemen

Tabel III. 3. Hasil *Grid Independence* pada Model Lambung Kapal

Jumlah elemen	Drag (KN)	% terhadap hasil sebelumnya
138,387	30,372.97	14.97758
328,763	25,823.83	7.53078
551,530	23,879.1	5.926509
1,334,843	22,463.9	6.072408
2,348,984	21,099.8	1.113209
4,609,428	20,864.92	-



Gambar III. 11. Kurva *Grid Independence*

Model yang sudah melewati tahap *meshing* kemudian diberi penandaan untuk setiap bidang domain komputasi yang nantinya akan diberi pengaturan kondisi batas pada *pre-solver setup*. Penamaan bidang tersebut dilakukan pada bidang *inlet*, *outlet*, *opening*, *bottom*, *wall*, dan bidang *symmetry*.

3) *Pre-Solver Setup*

Pada tahap ini dilakukan segala pengaturan simulasi mulai dari kondisi batas, model turbulensi, kondisi buoyancy, pengaturan fluida sampai pengaturan *solver*.

a. Pengaturan CEL (*CFX Expression Language*)

CEL merupakan bahasa pemrograman yang digunakan untuk mendefinisikan kondisi aliran tertentu. Pada tugas akhir ini, CEL digunakan untuk mendefinisikan kondisi aliran *multiphase* dimana terdapat 2 aliran dengan material berbeda, yaitu air dan udara. CEL digunakan untuk mendefinisikan sarat air pada hulu dan hilir, densitas aliran, fraksi volume aliran, dan distribusi tekanan. Pengaturan CEL pada simulasi CFD tugas akhir ini dapat dilihat pada Tabel III.4 (ANSYS Inc, 2013).

Tabel III. 4. Input Bahasa Pemrograman CEL

Expression	Definisi	Fungsi
DenH	(DenWater-DenRef)	Selisih masa jenis material
DenRef	1.185 [kg m ⁻³]	Masa jenis udara
DenWater	1025 [kg m ⁻³]	Masa jenis air
DownH	1.6 [m]	Tinggi <i>free surface</i> hilir
DownPres	DenH*g*DownVFWater *(DownH-Z)	Distribusi tekanan hilir
DownVFWater	1-DownVFAir	Fraksi volume air pada hilir
DownVFAir	Step((z-DownH)/1[m])	Fraksi volume udara pada hilir
UpH	1.6 [m]	Tinggi <i>free surface</i> hulu
UpPres	DenH*g*UpVFWater*(UpH-z)	Distribusi tekanan hulu
UpVFAir	Step((z-UpH)/1[m])	Fraksi volume udara pada hulu
UpVFWater	1-UpVFAir	Fraksi volume air pada hulu

b. Pengaturan Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Terdapat 7 kondisi batas yang terdiri dari domain aliran, inlet, outlet, wall, bottom, hull, dan symmetry. Pengaturan kondisi batas pada domain aliran mencakup model fluida, model buoyancy dan model turbulensi. Pada model fluida, material fluida diatur menjadi 2 fluida, yaitu udara pada suhu ruang dan air yang keduanya dianggap fluida mengalir. Kedua fluida tersebut diatur dengan model *standard free surface*. Pada model buoyancy, gravitasi diatur untuk bekerja sesuai dimensi dan sumbu arah pada model, yaitu sebesar -9.81m/s² pada sumbu Z. Model turbulensi yang dipilih untuk simulasi ini adalah *Shear Stress Transport*. Model ini dipilih karena *shear stress transport* merupakan model turbulensi berdasarkan model *k- ω* , dimana model ini memiliki *automatic wall treatment* sehingga dapat beradaptasi pada sifat aliran dengan lebih mudah. *Shear stress transport* juga menghitung tegangan geser yang terjadi karena turbulensi dengan cukup baik sehingga dapat memprediksi *flow separation* dengan akurat (ANSYS Inc, 2009).

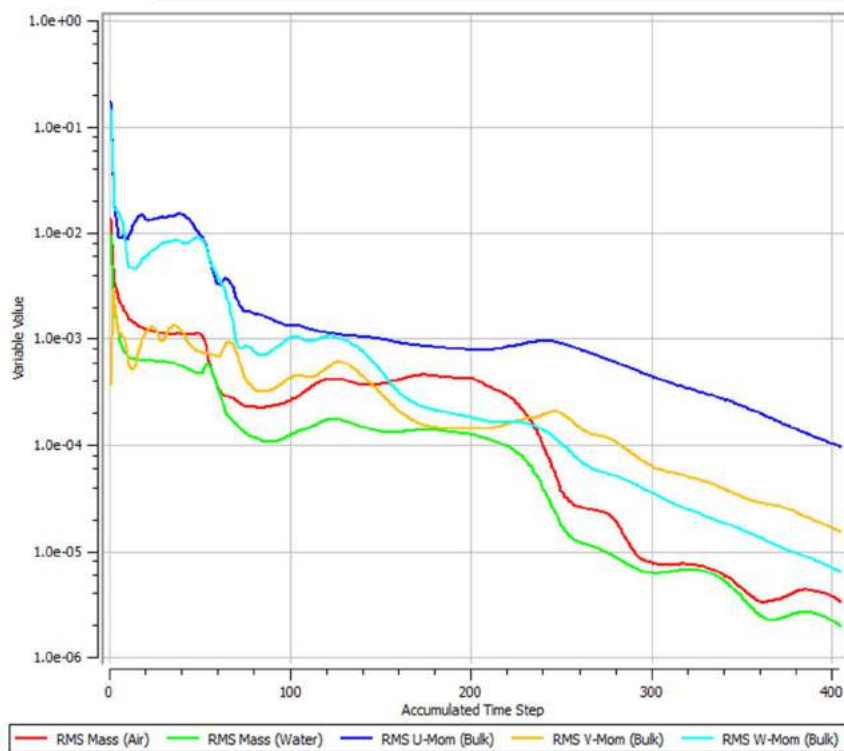
Pada kondisi batas inlet, dilakukan pengaturan terhadap kecepatan aliran, tingkat turbulensi pada awal aliran serta fraksi volume fluida. Kecepatan aliran diatur sesuai dengan

kecepatan mana yang akan disimulasi. Pada tugas akhir ini, kecepatan yang diuji adalah kecepatan 5 knot, 7 knot, 9 knot dan 11 knot. Tingkat turbulensi pada inlet diatur pada tingkat medium (5%), dimana pilihan tersebut merupakan pilihan terbaik jika tidak ada data mengenai tingkat turbulensi tersebut (ANSYS Inc, 2009).

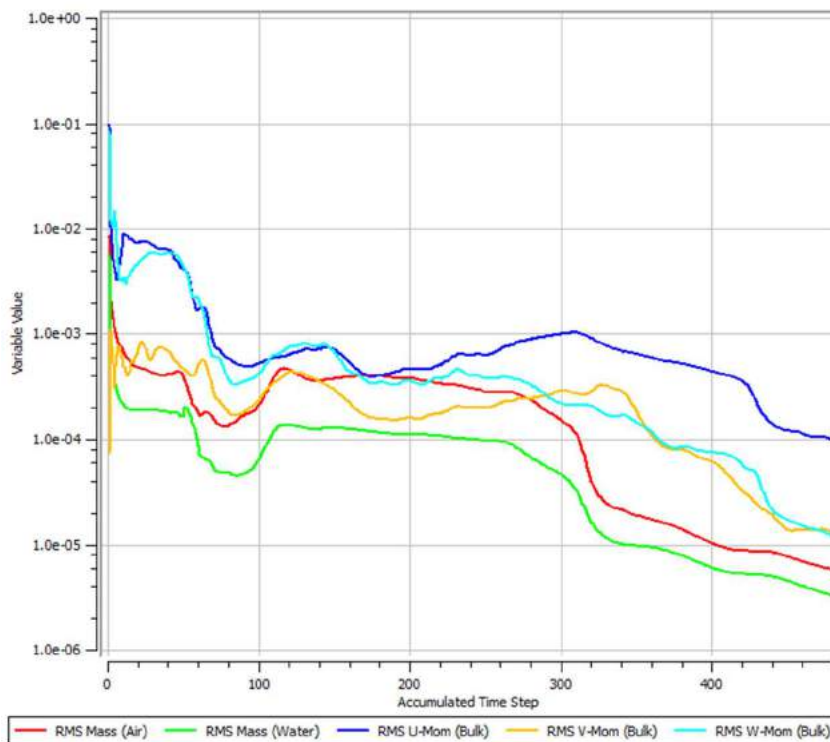
Pada kondisi batas outlet, dilakukan pengaturan masa dan momentum yang terjadi pada aliran hilir. Pengaturan tekanan statis dengan nilai DownPres yang ada pada Tabel III.4, dipilih sebagaimana pada simulasi ini distribusi tekanan hilir telah dinyatakan pada CEL tersebut. Kondisi batas wall dan bottom pada simulasi ini dianggap sebagai dinding dengan sifat *free slip*, sehingga kondisi batas ini tidak mengganggu aliran yang terjadi pada domain. Kondisi batas pada opening diatur untuk hanya memiliki udara sebagai aliran yang terjadi pada bidang tersebut tanpa tingkat turbulensi.

c. Pengaturan *Solver*

Pada simulasi ini, pengaturan *solver* diatur dengan metode konvergensi RMS dengan maksimal iterasi 1000. Proses konvergensi dilakukan untuk meminimalisir error yang dapat terjadi pada perhitungan simulasi. Semakin kecil tingkat konvergensi maka semakin kecil pula tingkat error yang dapat terjadi. Mengingat keterbatasan waktu dan spesifikasi computer yang digunakan, tingkat konvergensi diatur pada pengaturan standard yaitu 10^{-4} . Jumlah iterasi yang diperlukan untuk menyelesaikan simulasi bergantung pada pengaturan dan jumlah elemen *mesh* model. Semakin banyak elemen yang ada maka semakin banyak pula iterasi yang diperlukan untuk menyelesaikan simulasi tersebut. Waktu untuk menyelesaikan satu iterasi pun bertambah lama dengan banyaknya jumlah elemen. Untuk *mesh* dengan jumlah elemen 137,5 ribu, simulasi selesai pada iterasi 403 dengan waktu penyelesaian selama 1 jam 3 menit. Sementara, untuk *mesh* dengan jumlah elemen 2,3 juta selesai pada iterasi 479 dalam waktu 9 jam 16 menit. Lama waktu penyelesaian pada simulasi-simulasi selanjutnya diperpendek dengan menerapkan sistem *platform local parallel* dengan 12 partisi pada CPU sehingga proses konvergensi *mesh* berjumlah 2,3 juta elemen dapat selesai dalam waktu 3-5 jam.



Gambar III. 12. Grafik Konvergensi untuk *Mesh* dengan Jumlah Elemen 137,5 Ribu Selesai Setelah Melewati Proses 402 Iterasi.

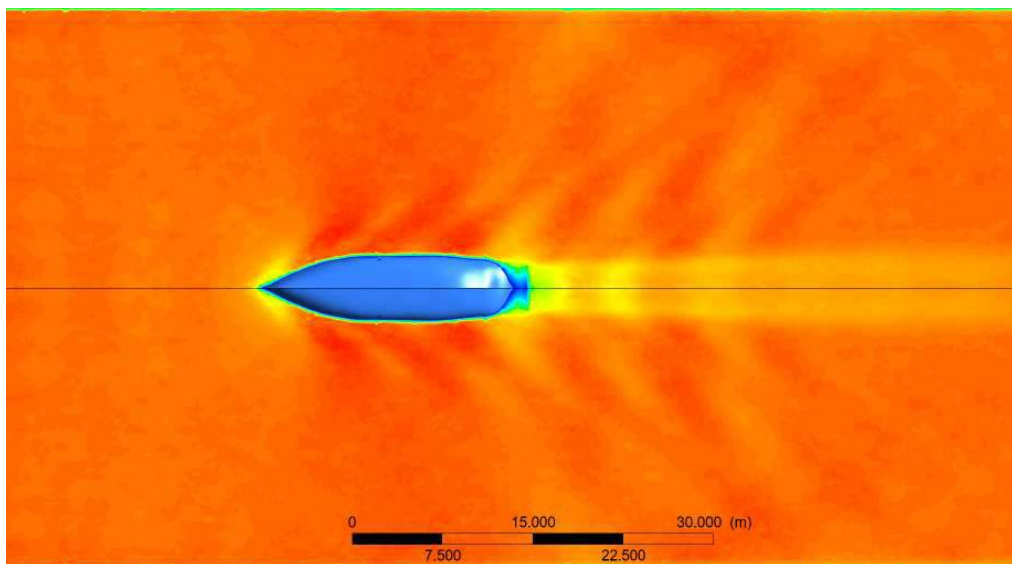


Gambar III. 13. Grafik Konvergensi Untuk *Mesh* dengan Jumlah Elemen 2,3 Juta Selesai Setelah Melewati Proses 479 Iterasi.

4) *Post Processor*

Tahap *Post Processor* merupakan tahap dimana hasil dari simulasi CFD dapat dilihat secara visual dengan berbagai kontur, vector dan fungsi perhitungan yang bervariasi. Pada tahap ini, dilakukan analisa terhadap simulasi serta memvalidasi hasil hambatan total dengan hasil uji eksperimen pada *towing tank* yang telah dilakukan sebelumnya.

Hasil hambatan dapat dilihat dengan menggunakan fitur *function calculator* yang dapat menghitung gaya yang terjadi terhadap lambung akibat fluida . Pada tahap inilah aliran fluida pada lambung kapal dianalisis untuk menentukan lokasi penempatan *dimple* pada lambung. Analisis visual dilakukan dengan menggunakan kontur kecepatan air, dimana pada kontur ini warna-warna berbeda akan menunjukkan kecepatan air yang berbeda. Sesuai pada keterangan warna pada Gambar III. 14, warna yang lebih kuning dalam gambar tersebut yang juga menggambarkan *wave pattern* mengindikasikan kecepatan yang lebih rendah.



Gambar III. 14. Kontur Kecepatan Air pada 7 Knot

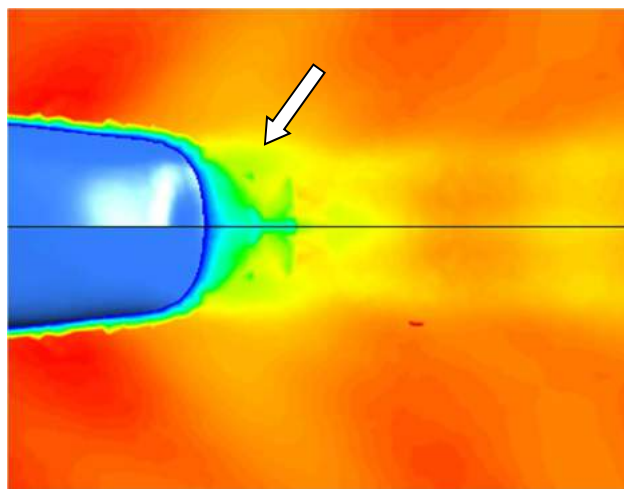
Selain kontur kecepatan, *post processor* pada perangkat lunak CFD juga digunakan untuk menampilkan kontur tekanan, *free surface*, vektor kecepatan, kontur tegangan geser pada lambung kapal serta kontur *turbulence kinetic energy* untuk analisis perbandingan dengan hasil simulasi model *dimple surfaced hull*.

III.5. Penentuan Lokasi *Dimple*

Dari kontur kecepatan air pada Gambar III. 14, posisi *dimple* ditentukan dengan melihat titik dimana aliran pada sekitar lambung kapal mulai mengalami *flow separation*. Proses ini dilakukan dengan kontur 2 dimensi pada sumbu XY. Untuk itu, proses ini perlu dilakukan

beberapa kali dengan nilai Z yang berbeda mulai dari sarat hingga lunas kapal agar dapat mengetahui titik *flow separation* pada setiap ketinggian, sehingga pada proses ini bidang XY memanjang diposisikan pada setiap jarak 0.1m dari sarat hingga lunas kapal.

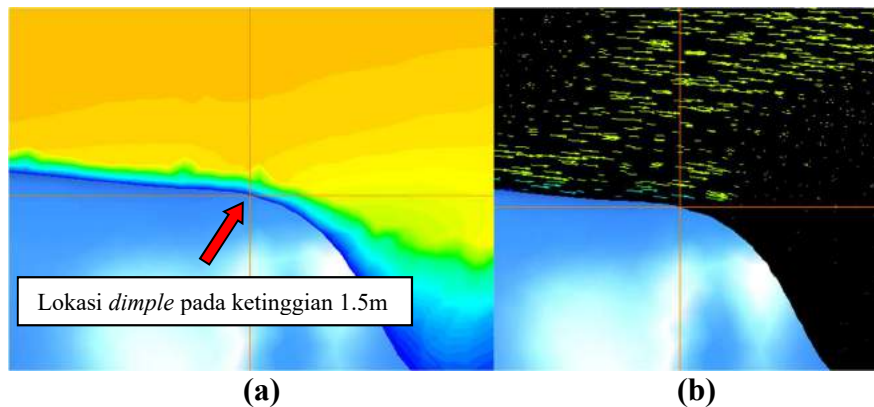
Flow separation dapat diindikasikan dengan adanya perubahan kecepatan yang terjadi pada sekitar lambung kapal, hal ini diakibatkan oleh adanya *adverse pressure gradient* yang memicu perubahan arah aliran pada permukaan hingga akhirnya mengalami *flow separation*. Indikasi *flow separation* dapat dilihat dengan menggunakan kontur kecepatan aliran, dimana kontur tersebut dapat menampilkan perubahan kecepatan pada aliran dengan warna yang berbeda seperti pada Gambar III. 15.



Gambar III. 15 Perbedaan Warna pada Buritan Kapal akibat *Flow Separation*

Warna hijau dan biru yang ada pada buritan kapal pada Gambar III. 15 merupakan boundary layer permukaan kapal beserta bagian transom yang menyentuh air. Sementara warna kuning pada buritan kapal yang ada pada Gambar III. 15 mengindikasikan kecepatan yang lebih rendah dibandingkan aliran bebas. Hal tersebut mengindikasikan *wake region* yang terjadi dibelakang kapal akibat adanya *flow separation*. Lokasi *dimple* ditentukan berdasarkan letak pada permukaan kapal sebelum warna yang mengindikasikan kecepatan lebih rendah tersebut mulai muncul. Jika *dimple* diletakkan pada posisi dimana sudah terjadi *flow separation*, maka penambahan *dimple* tidak akan bermanfaat karena *dimple* diletakkan dengan tujuan utama agar *flow separation* dapat tertunda dan mengurangi *wake region*. Penempatan *dimple* setelah terjadinya *flow separation* hanya akan menambah turbulensi yang terjadi tanpa mengurangi *wake region*, sehingga akan berujung pada penambahan hambatan total (Donnelly, 2010). Penentuan lokasi *dimple* dilakukan pada setiap ketinggian 0.1m dimulai dari sarat (1.6m) dan terus kebawah untuk menentukan lokasi *dimple* pada setiap ketinggian tersebut. Penentuan

lokasi *dimple* pada ketinggian 1.5m (0.1m di bawah sarat) menggunakan kontur aliran kecepatan dan vektor kecepatan aliran dapat dilihat pada Gambar III. 16.



Gambar III. 16. Penentuan Lokasi *Dimple* dengan Analisis Indikasi *Flow Separation* Menggunakan (A) Kontur Kecepatan Air, (B) Vektor Kecepatan Air.

Gambar III. 16 (a) merupakan kontur visual kecepatan aliran pada perpotongan bidang XY dengan ketinggian 1.5m (0.1m dibawah sarat) dan (b) vektor kecepatan air pada bidang yang sama. Gambar tersebut merupakan bagian buritan kapal yang ditampilkan dari jarak dekat agar dapat melihat indikasi *flow separation* dengan lebih jelas. Pada kontur kecepatan aliran, warna biru dan hijau yang ada pada sekitar lambung kapal mengindikasikan *boundary layer* dengan kecepatan yang jauh lebih rendah dibandingkan kecepatan aliran bebas. Sementara, warna kuning yang menjauh dan membesar menuju *downstream* mengindikasikan aliran yang memiliki kecepatan lebih rendah, karena pada posisi tersebut aliran mulai lepas dari permukaan lambung dan menciptakan *wake region* seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya.

Posisi tersebut dikonfirmasi dengan vektor aliran pada Gambar III. 16 (b) dimana vektor aliran dapat menunjukkan sifat aliran yang terjadi pada bidang. Tidak adanya arah panah vektor menunjukkan bahwa aliran tidak lagi memiliki arah yang sejajar dengan aliran bebas pada bidang, sehingga mengindikasikan bahwa daerah tersebut merupakan *wake region* yang terjadi akibat *flow separation*.

III.6. Pemodelan *Dimple Surfaced Hull*

Setelah didapat lokasi *dimple* pada buritan kapal, ukuran *dimple* dihitung. Ukuran *dimple* pada simulasi ini mengacu pada percobaan Donnelly (2010) dimana ukuran *dimple*

merupakan fungsi radius bilga, seperti yang sudah dijelaskan pada subbab II.2.3. Radius bilga didapatkan dengan melakukan perhitungan sebagai berikut (Watson, 1998):

$$R = \sqrt{\frac{B \cdot T \cdot (1 - C_m) - F(B/2 - K/2)}{2\{(1 - \pi/4) - F/(B - K)\}}} \quad [11]$$

Dimana:

B = Lebar kapal

T = Sarat kapal

C_m = Koefisien Midship

F = *rise of floor*

K = lebar lunas kapal

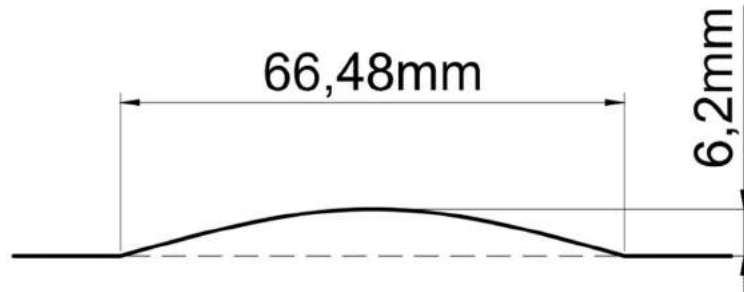
Perhitungan di atas ditulis secara lebih rinci pada Lampiran A: Perhitungan Radius Bilga, dimana perhitungan ini menghasilkan radius bilga kapal sebesar 1.196m. Dengan didapatnya nilai radius bilga, maka ukuran *dimple* dapat dihitung. Pada tugas akhir ini, dilakukan simulasi terhadap 3 variasi ukuran *dimple* yang mengacu pada Tabel II. 1 Kriteria *Dimple* oleh William Taylor. Ukuran diameter *dimple* yang diuji adalah ukuran dengan rasio persentase terkecil (5.56% dari radius bilga), rasio persentase terbesar (9.26% dari radius bilga) dan persentase yang diuji oleh Donnelly (2010) pada eksperimennya (7.4% dari radius bilga). Besar kedalaman dari *dimple* tersebut merupakan fungsi dari diameter, sehingga didapatkan 3 variasi ukuran *dimple* sebagai berikut:

Tabel III. 5. Ukuran 3 Variasi *Dimple*

Variasi <i>dimple</i>	Radius Bilga (m)	<i>Dimple Diameter</i>		<i>Dimple Depth</i>	
		R%	Diameter (cm)	D%	Depth (cm)
		5.56% - 9.26% Radius Bilga		9.33% - 15.56% <i>dimple diameter</i>	
1	1.196	5.56	6.648	9.33	0.620
2	1.196	7.40	8.848	11	0.973
3	1.196	9.26	11.072	15.56	1.723

Tiga varian ukuran *dimple* tersebut diterapkan pada model lambung Kapal Pengangkut Ikan 60 GT, yang kemudian akan disebut sebagai DSH 1,2 dan 3 (*Dimple Surfaced Hull* 1, 2 dan 3) sesuai dengan ukuran *dimple* masing-masing yang ada pada Tabel III. 5, dimana DSH 1 mengacu pada model lambung kapal yang memiliki variasi ukuran *dimple* 1 atau ukuran *dimple* paling kecil, dan seterusnya untuk menyederhanakan penulisan. Ilustrasi bentuk *dimple* yang

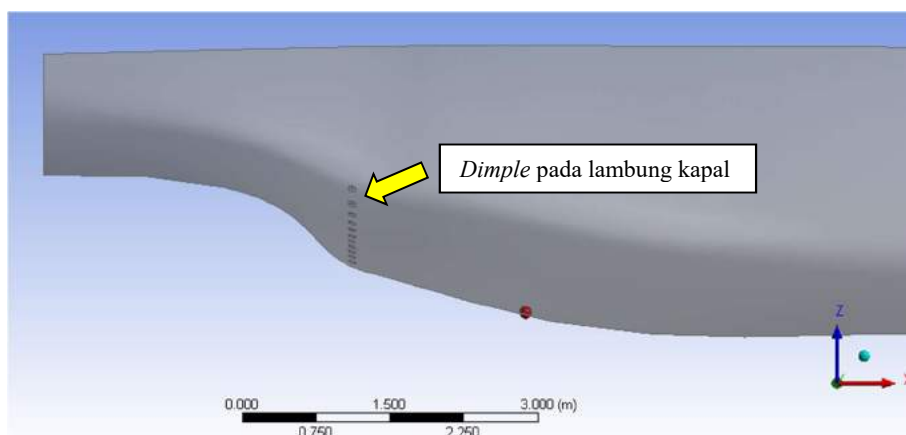
akan diterapkan pada model 3D lambung kapal merupakan bentuk yang memiliki fungsi diameter dan kedalaman yang dapat dilihat pada Gambar III. 17.



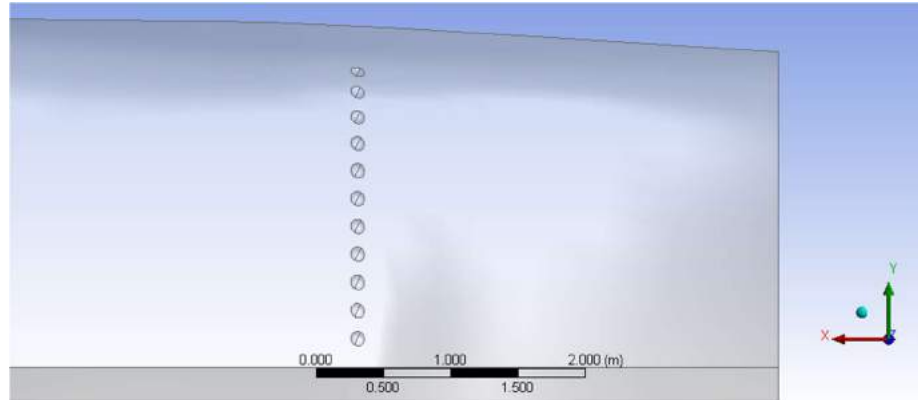
Gambar III. 17. Ilustrasi Ukuran *Dimple 1*

Bentuk *dimple* yang akan diterapkan pada model kapal dapat dilihat pada Gambar III. 17 dimana bentuk *dimple* bukan merupakan bentuk setengah lingkaran yang sempurna tetapi memiliki kedalaman dan radius yang berbeda, dimana diameter *dimple* merupakan fungsi radius bilga dan kedalaman *dimple* tersebut merupakan fungsi persentase dari diameter *dimple* itu sendiri.

Dimple dibuat pada model kapal dengan menggunakan perangkat lunak 3D modeller, dimana pada perangkat lunak tersebut *dimple* diletakkan pada permukaan lambung kapal sesuai dengan posisi yang sudah ditentukan dan dengan ukuran rasio yang sudah dibuat sesuai ukuran pada Tabel III. 5.



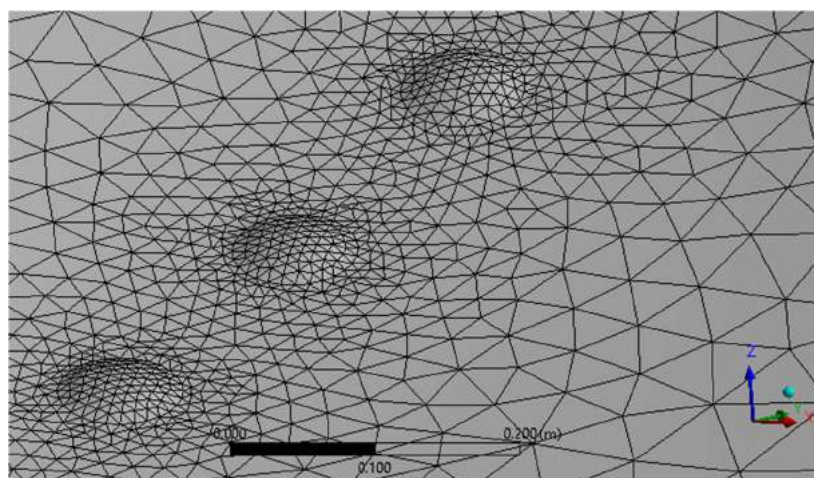
(a)



(b)

Gambar III. 18. (a) Model *Dimple Surfaced Hull* Ukuran 2 Tampak Samping, (B) Model *Dimple Surfaced Hull* Ukuran 3 Tampak Bawah.

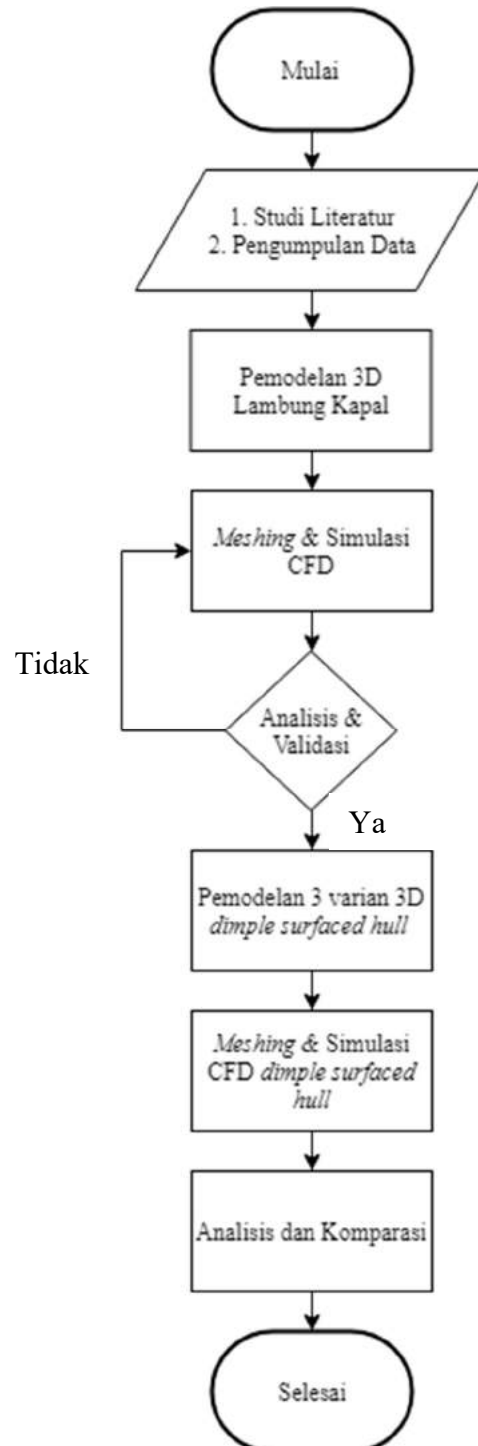
Dimple dibuat pada model lambung kapal 3D sesuai dengan posisi *dimple* yang telah ditentukan sebelumnya. Pada Gambar III. 18 dapat terlihat model 3D *dimple surfaced hull* dengan *dimple* yang terletak pada buritan kapal, sesuai dengan titik yang telah ditentukan. Model 3D kemudian diimport kedalam perangkat lunak CFD untuk dilakukan simulasi. Proses pengaturan model *dimple surfaced hull* pada CFD sama dengan proses pengaturan CFD yang dilakukan pada model lambung tanpa *dimple* pada subbab III.4. Hal yang berbeda dalam proses ini adalah pada proses *meshing* yang dapat dilihat pada Gambar III. 19 dimana model *dimple surfaced hull* memiliki *dimple* yang perlu diberi pengaturan *face sizing* dengan ukuran yang cukup kecil agar bentuk nya tidak berubah. *Meshing* yang dihasilkan pada permukaan *dimple* memiliki ukuran elemen paling kecil sebesar 5mm dengan *growth rate* 1.2.



Gambar III. 19. *Face Sizing* pada Permukaan *Dimple*

III.7. Bagan Alir

Prosedur metodologi yang dijalankan pada tugas akhir ini dapat disederhanakan dan digambarkan dengan bagan alir yang dapat dilihat pada Gambar III. 20.



Gambar III. 20. Bagan Alir Metodologi Pengerjaan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1. Hasil Simulasi CFD Pada Lambung Kapal Pengangkut Ikan 60GT

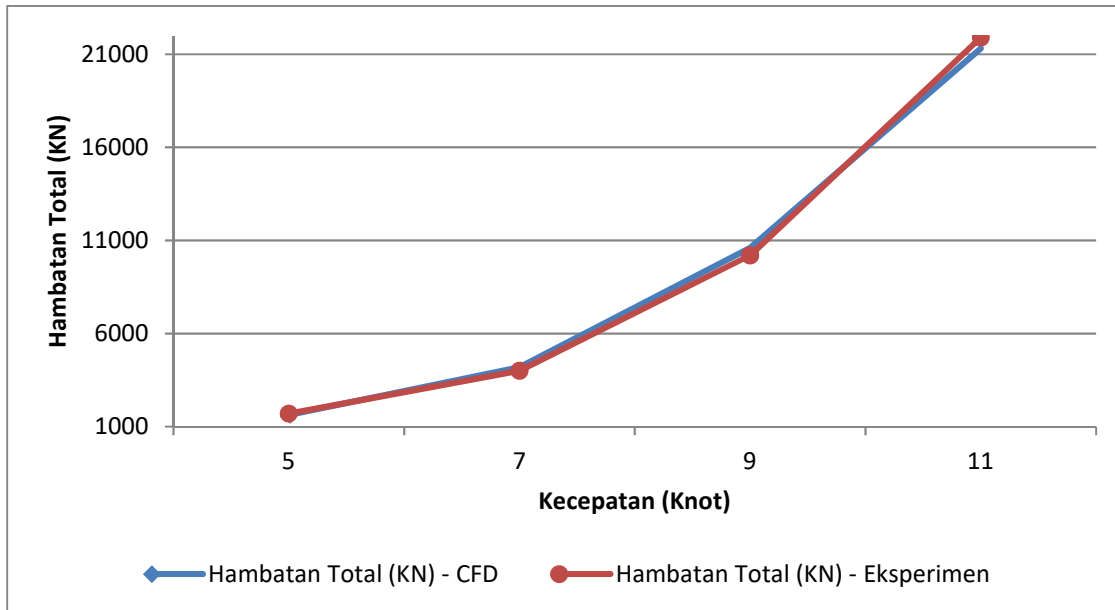
Simulasi CFD pada perangkat lunak akan menghasilkan nilai hambatan total lambung kapal. Berikut adalah nilai hambatan total lambung kapal hasil simulasi CFD: yang dibandingkan dengan nilai hambatan total hasil uji tarik pada kecepatan 5, 7, 9 dan 11 knot.

Tabel IV. 1. Hasil Hambatan Simulasi CFD

Speed (Knot)	Fr	Re (10 ⁷)	<i>Smooth Hull</i>		
			Drag (KN) - CFD	Drag (KN) – Eksperimen oleh BTH-BPPT	Selisih (%)
5	0.18	5.31	1,781	1,700	4.7%
7	0.25	7.43	3,829	4,000	4.3%
9	0.33	9.56	10,602	10,200	3.9%
11	0.40	11.68	21,099	21,900	3.7%

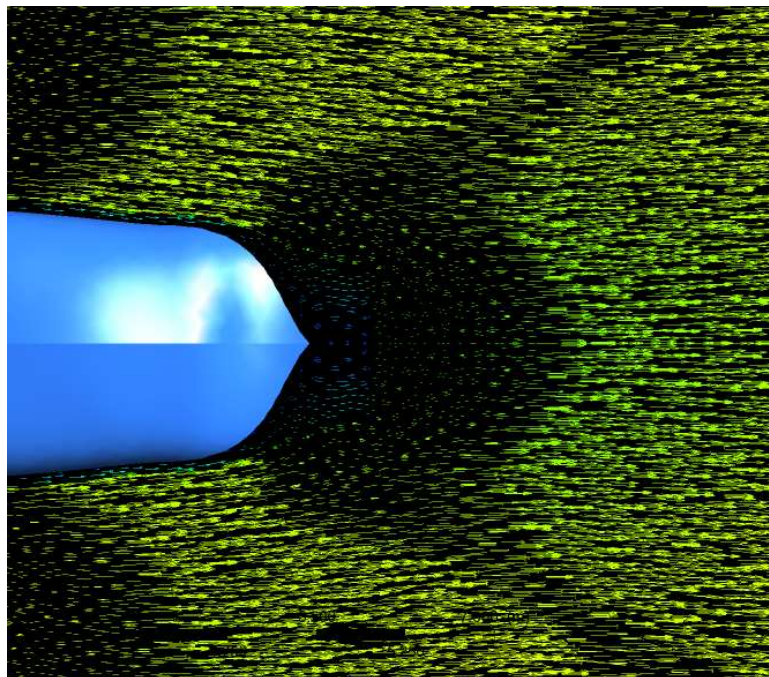
Hasil hambatan simulasi CFD dapat dilihat pada Tabel IV. 1 dimana hasil hambatan simulasi CFD dibandingkan dengan hasil hambatan eksperimen uji tarik yang telah dilakukan oleh Balai Teknologi Hidrodinamika- BPPT. Hambatan hasil simulasi CFD memiliki nilai hambatan dengan perbedaan paling besar sebanyak 4.7% dari nilai hambatan eksperimen uji tarik.

Perbedaan hasil hambatan CFD dengan eksperimen ini diakibatkan karena adanya beberapa variabel yang memiliki ketidakpastian seperti perbedaan intensitas turbulensi yang digunakan pada simulasi CFD mengingat tidak adanya data intensitas turbulensi yang digunakan pada saat eksperimen uji tarik. Perbedaan hasil hambatan oleh simulasi CFD dan eksperimen dapat dilihat pada Gambar IV. 1, dimana pada grafik tersebut terlihat bahwa perbedaan nilai hambatan yang dihasilkan kedua metode tidak memiliki perbedaan yang jauh.



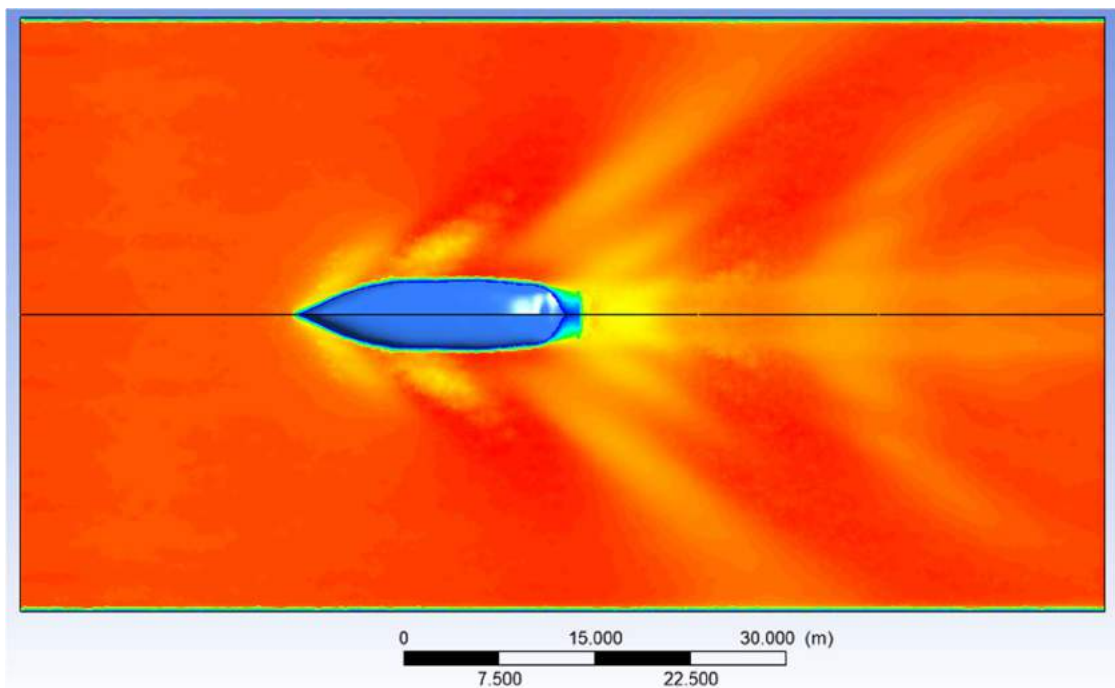
Gambar IV. 1. Grafik Perbandingan Hambatan Total

Simulasi pada perangkat lunak CFD ini memungkinkan untuk memvisualisasikan aliran yang terjadi terhadap lambung. Hasil visual ini nantinya akan dibandingkan dengan hasil visual aliran simulasi model *dimple surfaced hull* dengan variasi *dimple* sesuai Tabel III. 5. Pada tugas akhir ini, visualisasi difokuskan pada kontur kecepatan aliran dan vektor aliran untuk membandingkan karakteristik aliran yang terjadi pada masing-masing model kapal.



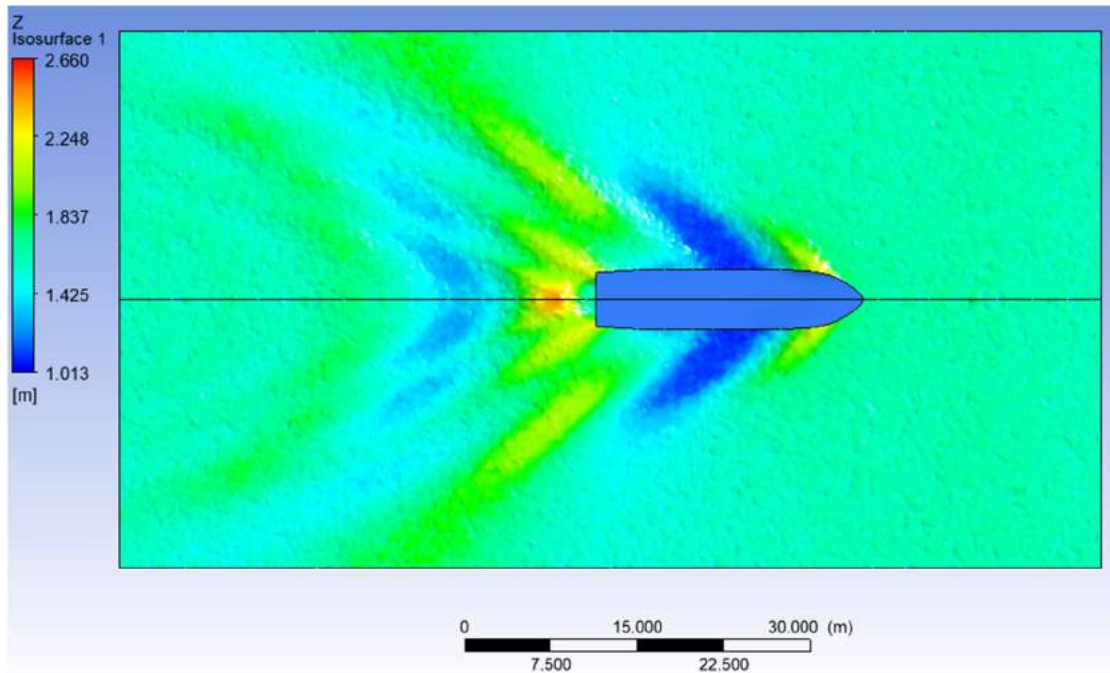
Gambar IV. 2. Vektor Kecepatan Air (11 Knot) dari Sumbu -Z 1.5m

Vektor kecepatan aliran pada Gambar IV. 2 menunjukkan arah aliran pada bidang yang memotong secara memanjang. Vektor kecepatan aliran pada bidang akan menggambarkan aliran yang sejajar dengan bidang potong tersebut, sehingga kekosongan arah panah vektor menggambarkan adanya perubahan arah aliran atau kecepatan. Hal tersebut dapat berarti adanya gelombang yang tercipta (*hull induced wave pattern*) atau *wake region* yang terjadi pada aliran tersebut. Karakteristik aliran dapat lebih diperjelas dengan melihat kontur kecepatan aliran pada bidang potong yang sama, dimana adanya *wave pattern* akan mengakibatkan perubahan kecepatan yang lebih rendah yang dapat divisualisasikan dengan baik oleh kontur kecepatan aliran.



Gambar IV. 3. Kontur Kecepatan Air (11 Knot) dari Sumbu $-Z$ 1.5m

Kontur kecepatan aliran pada Gambar IV. 3 merupakan kontur kecepatan aliran pada potongan bidang melintang yang dilihat dari sisi bawah kapal. Pada kontur tersebut dapat terlihat perbedaan kecepatan pada *wave pattern* yang terjadi, dimana *wave pattern* tersebut memiliki warna yang berbeda yang mengindikasikan bahwa *wave pattern* yang diciptakan memiliki kecepatan yang lebih rendah sesuai dengan keterangan kecepatan yang terdapat pada sisi kiri gambar. Untuk mengetahui ketinggian gelombang yang diciptakan, digunakan fitur *isosurface* dimana fitur tersebut dapat menampilkan *free surface* atau bidang dengan bentuk dan posisi yang sesuai dengan permukaan air yang dapat dilihat pada Gambar IV. 4.



Gambar IV. 4. Bidang *Free Surface* pada Kecepatan 11 Knot

Bidang *free surface* pada Gambar IV. 4 merupakan bidang permukaan air pada kecepatan 11 knot yang dibuat dengan fitur *isosurface* dilihat dari sisi atas kapal. Tinggi gelombang yang tercipta dapat diketahui dengan memperhatikan warna pada gelombang, dimana warna tersebut mengindikasikan ketinggian sesuai dengan keterangan jarak yang ada pada sisi kiri gambar.

IV.2. Hasil Simulasi *Dimple Surfaced Hull*

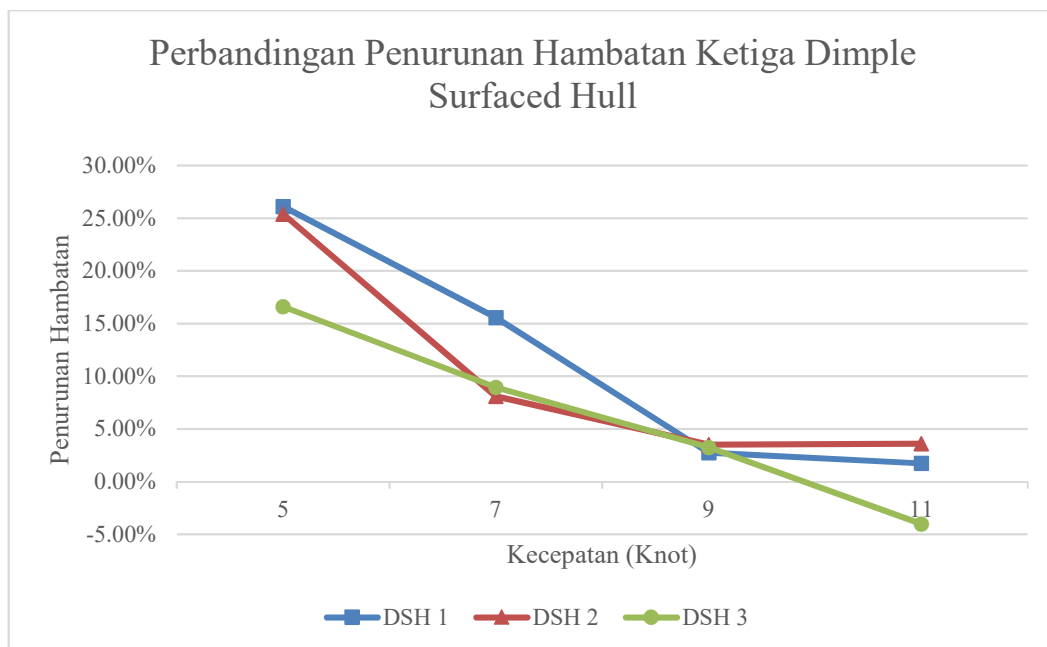
IV.2.1. Perbandingan Secara Umum

Pada tahap ini, nilai hambatan total hasil simulasi model *dimple surfaced hull* dengan tiga variasi ukuran dibandingkan dengan nilai hambatan total lambung kapal tanpa *dimple* yang sudah disimulasikan sebelumnya. Hasil hambatan dari simulasi *dimple surfaced hull* memenuhi hipotesis bahwa hambatan total kapal dapat berkurang, walaupun tidak pada semua kondisi yang diuji. Nilai hambatan hasil simulasi *dimple surfaced hull* ditampilkan pada Tabel IV.2, dimana pemberian warna hijau menandakan penurunan hambatan terbesar sementara warna merah menandakan terjadinya kenaikan nilai hambatan total.

Tabel IV. 2. Perbandingan Penurunan Hambatan *Dimple Surfaced Hull* Terhadap Model Lambung Tanpa *Dimple*

Speed (Knot)	Fr	Re (10 ⁷)	DSH1		DSH2		DSH3	
			Drag (KN)	Selisih (%)	Drag (KN)	Selisih (%)	Drag (KN)	Selisih (%)
5	0.18	5.31	1,316	-26.12%	1,329	-25.39%	1,485	-16.60%
7	0.25	7.43	3,233	-15.56%	3,519	-8.09%	3,486	-8.94%
9	0.33	9.56	10,311	-2.75%	10,230	-3.51%	10,258	-3.25%
11	0.40	11.68	20,733	-1.74%	20,340	-3.60%	21,946	+4.01%

Nilai hambatan total hasil simulasi CFD pada model *dimple surfaced hull* 1, 2 dan 3 (DSH 1, 2 dan 3) dapat dilihat pada Tabel IV. 2, dimana pada tabel tersebut nilai hambatan yang dihasilkan ditampilkan bersama selisihnya terhadap nilai hambatan lambung tanpa *dimple*. Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa penurunan hambatan oleh *dimple* memiliki dampak paling besar pada kecepatan 5 knot pada model *dimple surfaced hull 1*. Model *dimple surfaced hull* lainnya juga menghasilkan penurunan hambatan yang cukup efektif pada kecepatan 5 dan 7 knot dibandingkan pada kecepatan 9 dan 11 knot. Hal ini dapat terlihat lebih jelas jika dituangkan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar IV. 5.

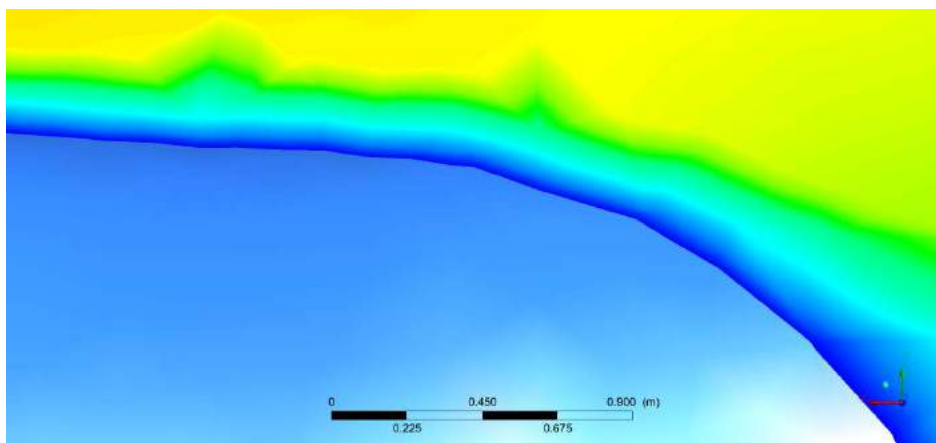


Gambar IV. 5. Grafik Perbandingan Persentase Penurunan Hambatan Ketiga *Dimple Surfaced Hull* Terhadap Model Lambung Asli

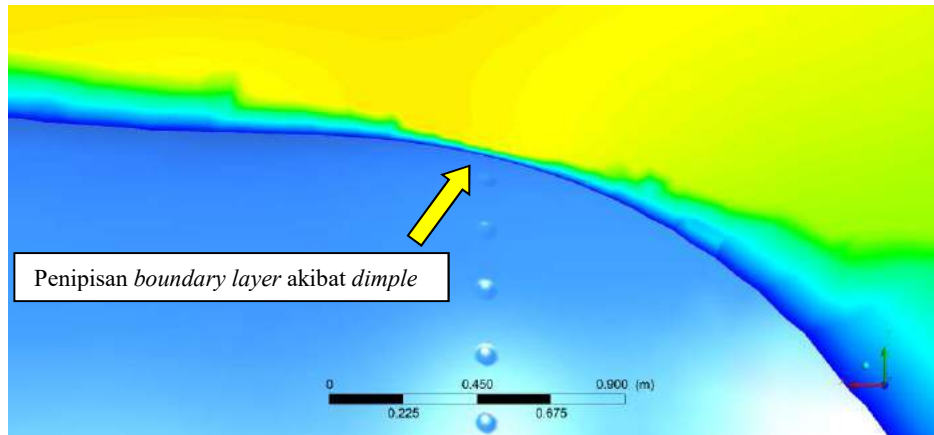
Dari grafik pada Gambar IV. 5, terlihat bahwa semakin besar nilai kecepatan, maka persentase penurunan hambatan yang terjadi semakin menurun pada semua model *dimple surfaced hull*. Hal ini membuktikan bahwa kecepatan merupakan faktor dominan yang dapat mempengaruhi efek *dimple* dalam menurunkan hambatan total kapal. Selain faktor kecepatan, grafik tersebut juga menunjukkan bahwa ukuran rasio *dimple* memiliki efek yang berbeda-beda pada masing-masing kecepatan. Untuk mengetahui pengaruh *dimple* terhadap aliran yang terjadi pada sekitar lambung kapal, dilakukan analisis visual pada perangkat lunak CFD dengan menggunakan kontur-kontur yang tersedia.

IV.2.2. Pengaruh *Dimple* Terhadap Aliran

Dampak terhadap aliran yang diakibatkan oleh adanya *dimple* pada permukaan lambung kapal dapat dilihat dengan visualisasi kontur kecepatan dan vektor aliran menggunakan *post processor* perangkat lunak CFD. Analisis visual pertama dilakukan dengan membandingkan kontur kecepatan aliran pada model lambung tanpa *dimple* dengan model *dimple surfaced hull*. Kontur kecepatan pada bidang potong memanjang dapat memperlihatkan aliran bebas, *wave pattern* serta *boundary layer* pada sekitar lambung kapal, dimana *boundary layer* akan terlihat dengan warna yang jauh berbeda dengan aliran bebas karena *boundary layer* memiliki perbedaan kecepatan yang sangat signifikan terhadap aliran bebas. Perbedaan pada kontur kecepatan antara model lambung tanpa *dimple* dengan model *dimple surfaced hull* terlihat paling jelas pada *boundary layer* pada daerah dimana *dimple* diletakkan. Perbedaan *boundary layer* dapat dilihat pada Gambar IV. 6, dimana *boundary layer* pada model *dimple surfaced hull* memiliki ketebalan yang jauh lebih tipis pada daerah di mana *dimple* diletakkan.



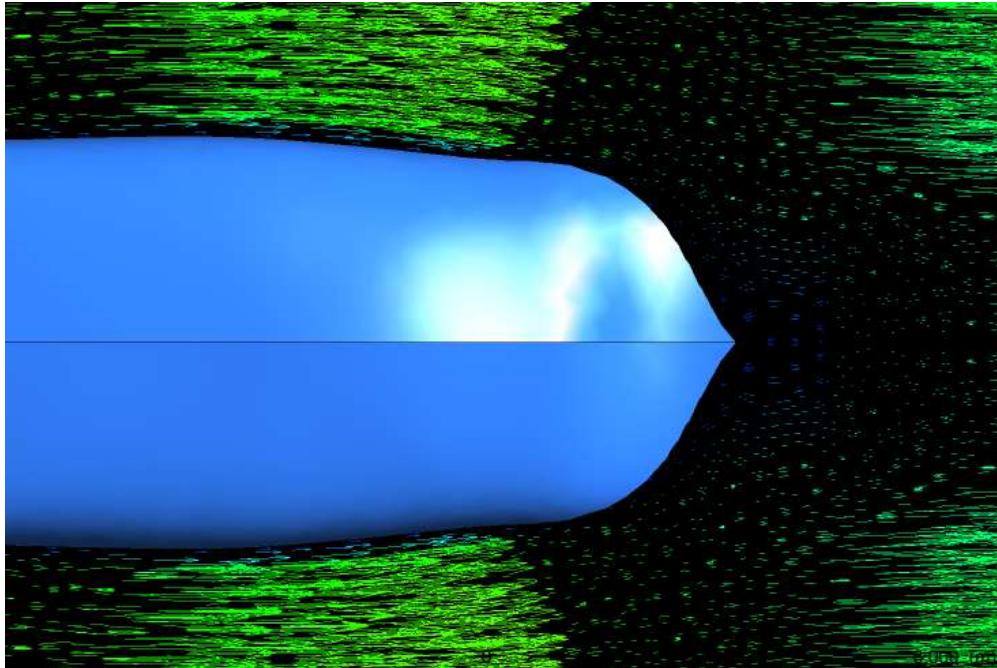
(a)



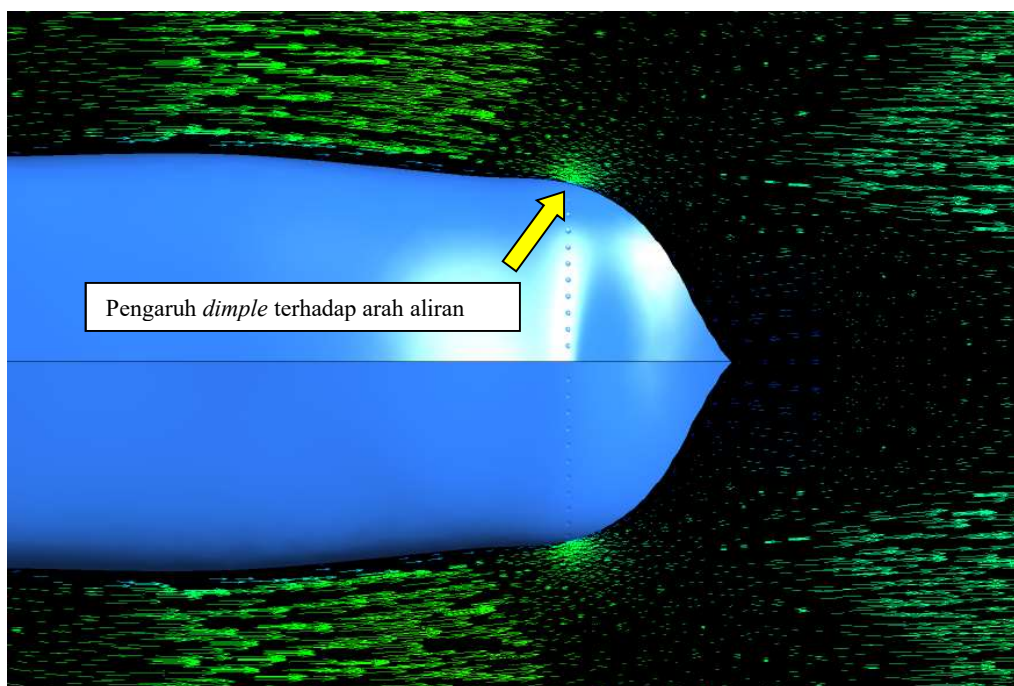
(b)

Gambar IV. 6 Perbandingan Kontur Vektor Kecepatan pada Model (A) Lambung Kapal Tanpa *Dimple* Dengan Model (B) *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 9 Knot.

Penipisan *boundary layer* yang terjadi akibat adanya *dimple* pada permukaan lambung ditampilkan pada Gambar IV. 6. Kontur kecepatan pada Gambar IV. 6 diambil pada bagian buritan kapal, di mana *dimple* diletakkan dan diperlihatkan dari jarak dekat. Kontur tersebut menunjukkan bahwa *dimple* sangat mempengaruhi aliran yang terjadi pada daerah sekitarnya, sehingga dapat terjadi penipisan *boundary layer* akibat aliran bebas yang terpengaruh oleh *dimple*. Akibat dari hal ini merupakan adanya penambahan tegangan geser yang terjadi pada permukaan lambung kapal. Bertambahnya tegangan geser pada permukaan akan berujung dengan bertambahnya hambatan gesek. Namun, hal tersebut juga menandakan bahwa aliran bergerak dengan arah yang lebih mendekati terhadap lambung kapal, sehingga dapat menunda *flow separation* dan berujung pada *wake region* yang lebih kecil. Untuk memastikan hal tersebut, aliran yang dipengaruhi *dimple* dapat dilihat dengan menggunakan vektor kecepatan aliran seperti pada Gambar IV. 7.



(a)



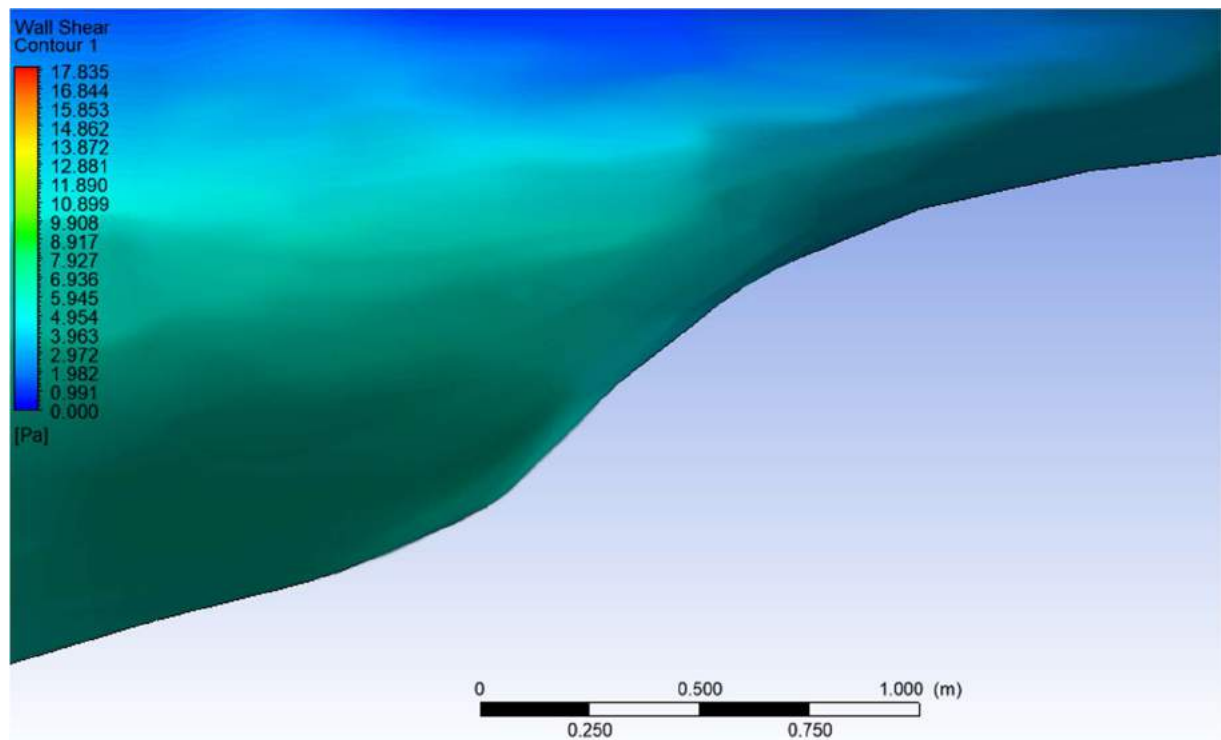
(b)

Gambar IV. 7. Perbandingan Vektor Kecepatan Aliran **(A)** Model Lambung Tanpa *Dimple* dengan **(B)** Model *Dimple Surfaced Hull 1* Pada Kecepatan 9 Knot

Vektor kecepatan aliran pada Gambar IV. 7 dapat menunjukkan bahwa pada daerah peletakkan *dimple*, pada **(b)** model *dimple surfaced hull 1* terdapat arah panah vektor pada daerah peletakkan *dimple* yang tidak dapat ditemukan pada vektor kecepatan **(a)** model

lambung tanpa *dimple*. Adanya arah panah pada daerah tersebut menunjukkan bahwa terdapat aliran bebas yang memiliki arah yang sejajar dengan bidang. Aliran bebas yang sejajar dengan bidang menunjukkan bahwa aliran tersebut bukanlah aliran yang terpengaruh oleh fluktuasi *wave pattern* ataupun *wake region*. Hal ini menunjukkan bahwa *dimple* memiliki kemampuan untuk mempengaruhi arah aliran bebas sehingga dapat menunda terjadinya *flow separation*, dimana dengan adanya penundaan *flow separation*, hambatan total dapat berkurang apabila pengurangan *form drag* lebih besar dari penambahan gaya gesek dan tegangan geser yang terjadi akibat adanya penambahan tegangan geser pada permukaan lambung kapal.

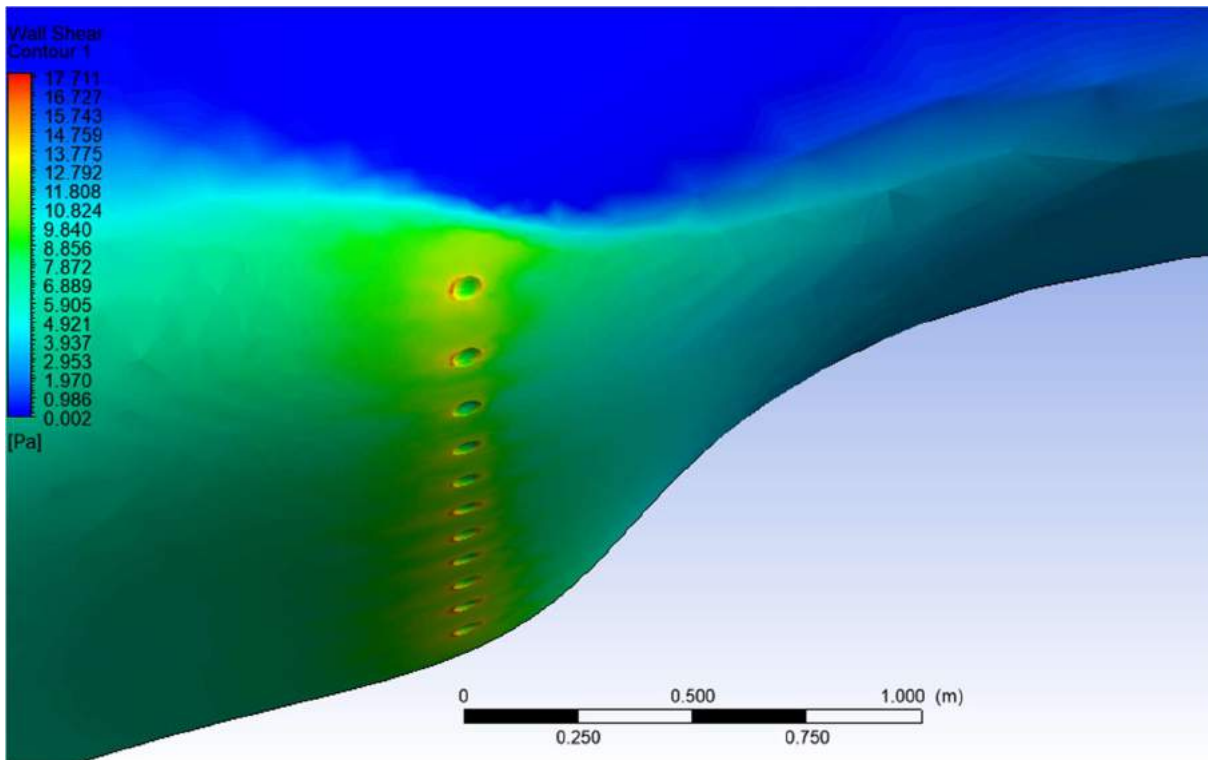
Tegangan geser yang terjadi pada permukaan lambung kapal dapat ditampilkan dengan menggunakan kontur *wall shear* yang tersedia pada perangkat lunak CFD. Dengan terpengaruhnya aliran bebas yang bergerak ke arah daerah *dimple*, daerah tersebut akan mengalami tegangan geser yang lebih besar dibandingkan pada daerah permukaan lain. Hal ini sesuai dengan apa yang ditunjukkan kontur *wall shear* atau tegangan geser permukaan yang ditampilkan pada Gambar IV. 8 dan Gambar IV.9.



Gambar IV. 8 Kontur Tegangan Geser pada Lambung Tanpa *Dimple* Kecepatan 5 Knot

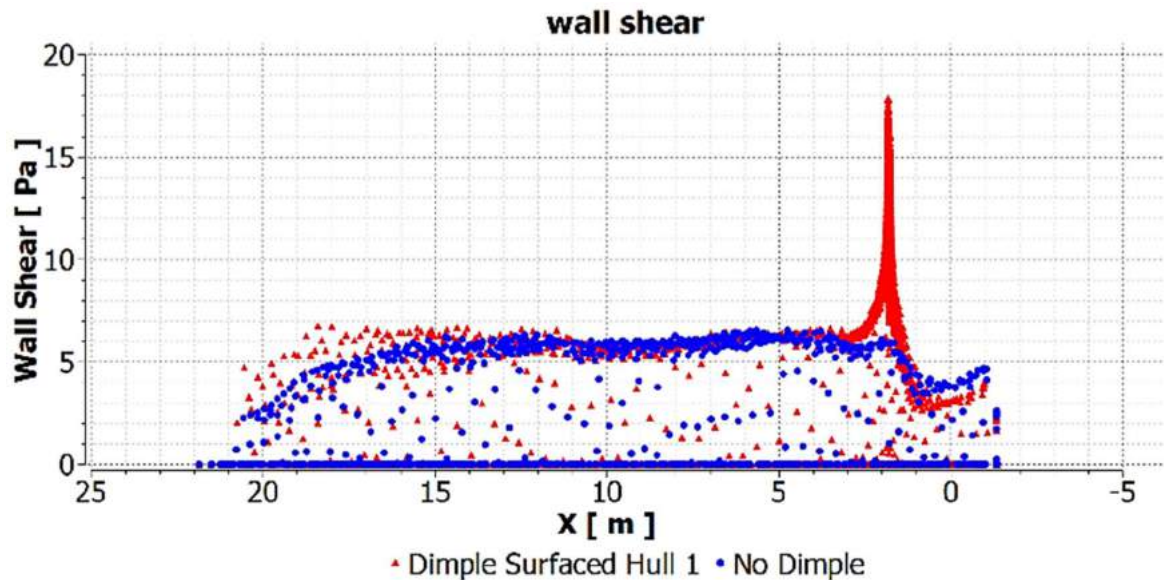
Pada kecepatan 5 knot, lambung model kapal tanpa *dimple* mengalami tegangan geser maksimal sebesar 6.53 Pa. Tegangan geser pada model tersebut tersebar merata sepanjang permukaan basah kapal. Berbeda halnya pada model *dimple surfaced hull*, tegangan geser pada

daerah *dimple* jauh lebih besar diantara seluruh tegangan geser pada permukaan basah. Pada model *dimple surfaced hull 1* di kecepatan 5 knot, tegangan geser pada daerah *dimple* hampir mencapai 3 kali lipat lebih besar, yaitu sebesar 17.711 Pa. Tegangan geser maksimal terjadi pada ujung-ujung diameter *dimple*, namun daerah lambung sekitar *dimple* juga mengalami tegangan geser yang lebih besar akibat aliran bebas yang mengarah lebih ke permukaan kapal pada daerah tersebut. Hal ini dapat dilihat pada Gambar IV. 9



Gambar IV. 9 Kontur Tegangan Geser *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 5 Knot

Kontur tegangan geser pada Gambar IV. 9 menjelaskan adanya tegangan geser yang lebih besar yang terjadi pada daerah sekitar *dimple*, dan memiliki nilai maksimal pada ujung-ujung *dimple*. Hal ini dapat ditampilkan dalam bentuk grafik distribusi tegangan geser-sumbu X seperti pada Gambar IV.10. Pada grafik tersebut, sumbu Y merupakan nilai tegangan geser sementara sumbu X merupakan nilai jarak pada sumbu X model kapal, dimana AP terletak pada titik 0 sumbu X tersebut. Dapat terlihat pada grafik tersebut bahwa tegangan geser mengalami kenaikan drastis pada posisi daerah peletakkan *dimple*.

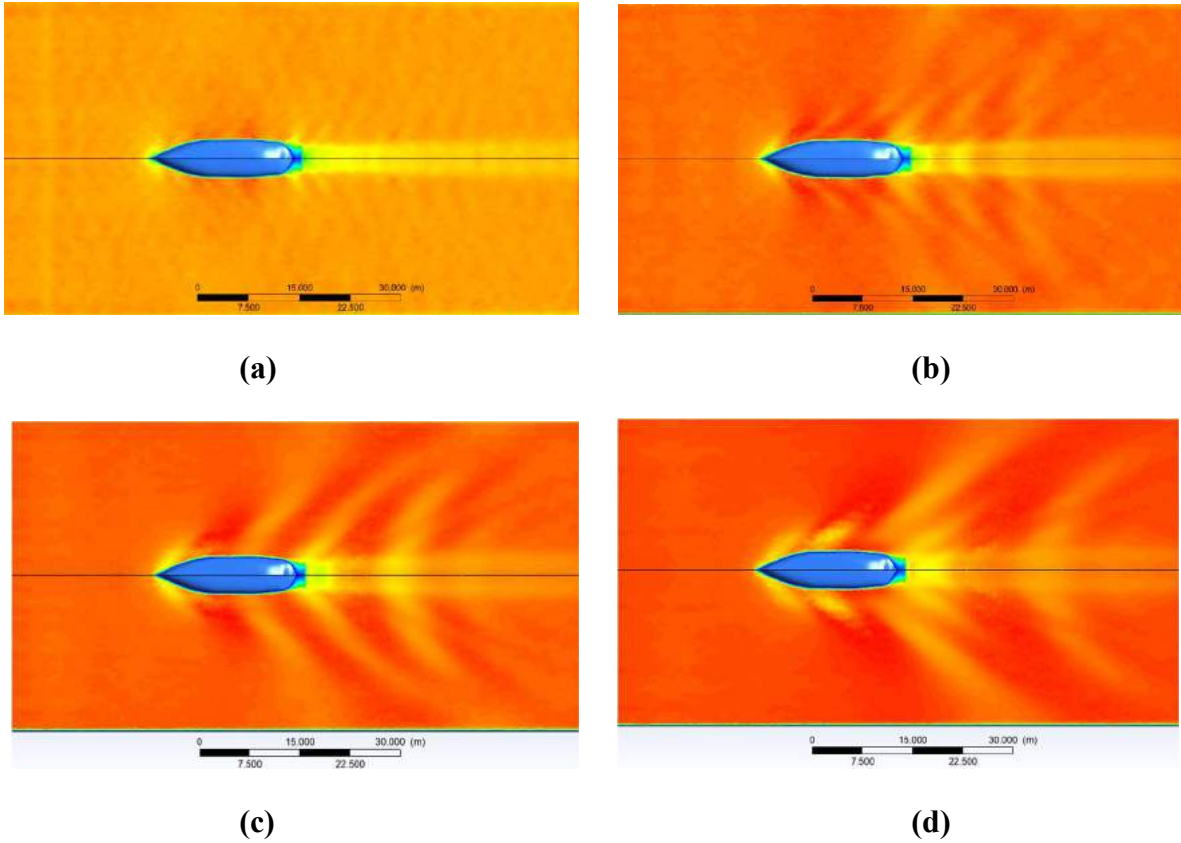


Gambar IV. 10 Grafik Perbandingan Distribusi Tegangan Geser pada Permukaan Lambung Kapal Tanpa *Dimple* dengan *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 5 Knot

Gambar IV. 10 merupakan grafik perbandingan tegangan geser pada permukaan lambung kapal, dimana tegangan geser lambung kapal tanpa *dimple* memiliki tegangan geser yang merata sepanjang permukaan lambung kapal. Sementara itu, tegangan geser pada permukaan *dimple surfaced hull 1* mengalami kenaikan drastis pada titik 1.8m, yang merupakan posisi horizontal *dimple* pada permukaan kapal.

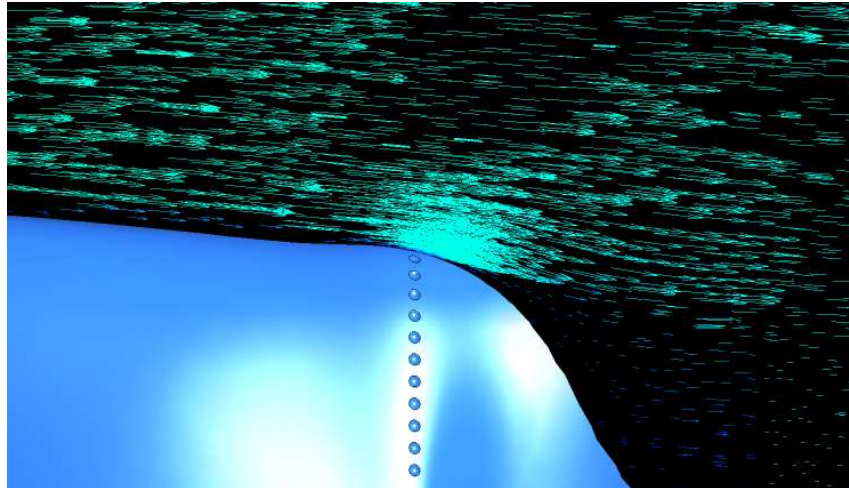
IV.2.3. Pengaruh Kecepatan Terhadap Pengurangan Hambatan Akibat *Dimple*

Pada model lambung tanpa *dimple*, kecepatan sangat mempengaruhi besar hambatan total, dimana hambatan total mengalami kenaikan yang sangat signifikan seiring dengan naiknya kecepatan. Namun, efektivitas *dimple* terhadap penurunan hambatan total menurun seiring naiknya kecepatan kapal. Untuk mengetahui mengapa *dimple* tidak efektif pada kecepatan yang lebih tinggi, dilakukan analisis visual dengan menggunakan kontur kecepatan dan vektor kecepatan aliran. Perbedaan yang paling jelas terlihat dari karakter aliran yang terjadi pada kecepatan berbeda merupakan *wave pattern* atau gelombang yang diciptakan akibat aliran terhadap lambung kapal.

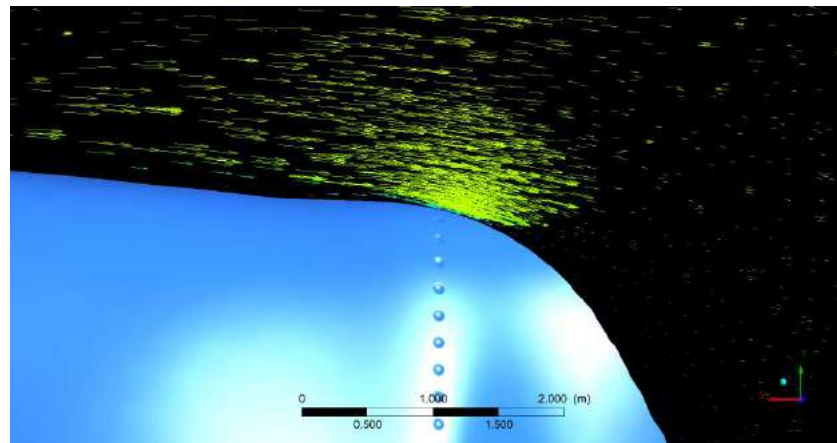


Gambar IV. 11 *Wave Pattern* pada Kecepatan (A) 5 Knot, (B) 7 Knot, (C) 9 Knot, (D) 11 Knot Pada Model Lambung Tanpa *Dimple*

Kontur pada Gambar IV. 11 menampilkan *wave pattern* pada masing-masing kecepatan yang memiliki karakter yang sangat berbeda. *Wave pattern* pada kecepatan 11 knot memiliki ketinggian gelombang yang lebih tinggi jika dibandingkan *wave pattern* pada kecepatan 5 knot. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa aliran yang terjadi pada sekitar lambung kapal pada kecepatan 5 knot lebih tenang dibandingkan aliran yang terjadi di sekitar lambung kapal pada kecepatan 11 knot, terhubung gelombang yang diciptakan pada kecepatan 11 knot memiliki ketinggian yang lebih tinggi, dan gelombang yang diciptakan bergerak dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan gerak lambung kapal (Molland, Turnock, & Hudson, 2011). Aliran pada sekitar lambung kapal terlihat jauh lebih terpengaruh pada kondisi tenang, sedangkan pada kecepatan 11 knot, pengaruh *dimple* terhadap aliran tidak terlihat terlalu efektif. Hal ini dapat dilihat dengan menggunakan vektor kecepatan aliran pada Gambar IV. 12.



(a)



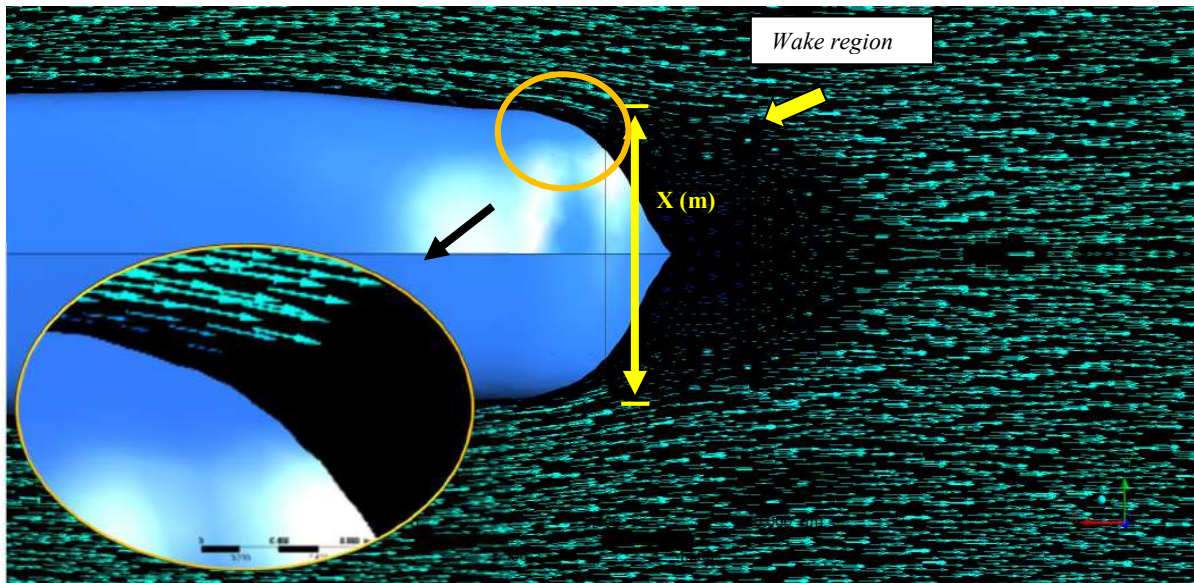
(b)

Gambar IV. 12. Perbandingan Vektor Kecepatan Aliran Pada (A) Kecepatan 5 Knot Dan (B) Pada Kecepatan 11 Knot Pada *Dimple Surfaced Hull 2*.

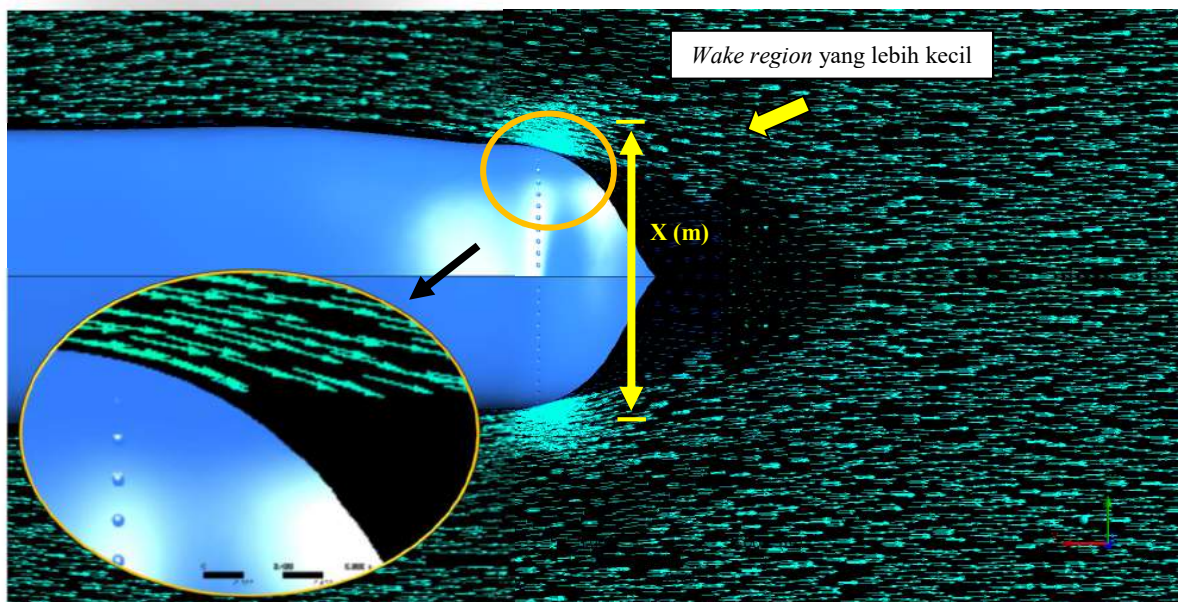
Seperti yang ditampilkan pada vektor kecepatan Gambar IV. 12, terlihat bahwa aliran air pada *dimple surfaced hull* dengan kecepatan 5 knot terjadi penundaan aliran yang lebih jauh menuju *downstream* dibandingkan pada kecepatan 11 knot.

Penundaan *flow separation* pada bagian buritan kapal akan mengakibatkan mengecilnya *wake region*, yang akan berujung pada berkurangnya hambatan total akibat pengurangan *form drag*. Pengaruh *dimple* pada pengurangan *form drag* sangat bergantung pada kecepatan aliran, dimana seperti yang dijelaskan pada subbab IV.2.3, *form drag* dapat berkurang apabila permukaan lambung kapal dapat memicu penundaan *flow separation*. Penundaan *flow separation* akibat *dimple* terbukti tidak efektif pada kecepatan yang lebih tinggi dan jauh lebih efektif pada kecepatan yang lebih rendah, sehingga pengurangan *wake region* akibat *dimple* juga akan lebih efektif pada kecepatan yang lebih rendah dengan aliran yang lebih tenang. Dari

seluruh simulasi *dimple surfaced hull*, pengurangan *wake region* terlihat paling jelas pada *dimple surfaced hull 1* yang mengalami penurunan hambatan total paling besar, yaitu sebesar 26.12%. Perbandingan *wake region* yang dihasilkan model lambung tanpa *dimple* dengan model *dimple surfaced hull 1* divisualisasikan dengan menggunakan vektor kecepatan aliran yang dapat dilihat pada Gambar IV. 13.



(a)

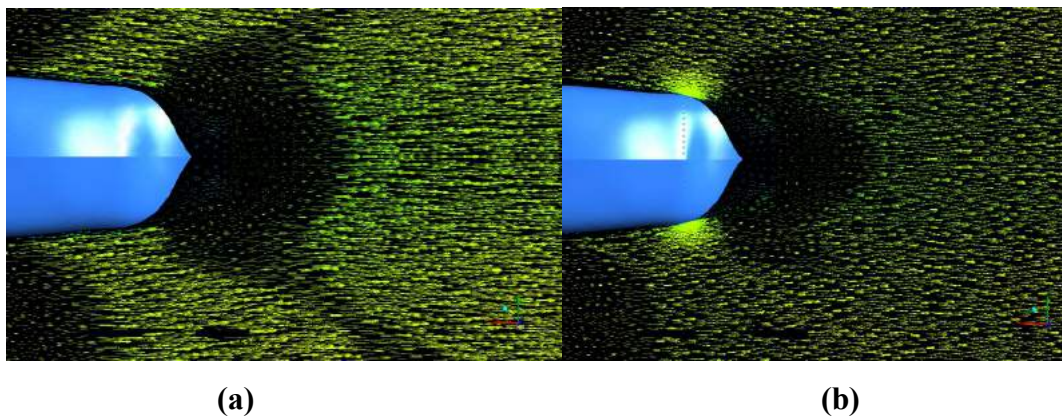


(b)

Gambar IV. 13. Perbandingan *Wake Region* Menggunakan Vektor Aliran dengan *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 5 Knot

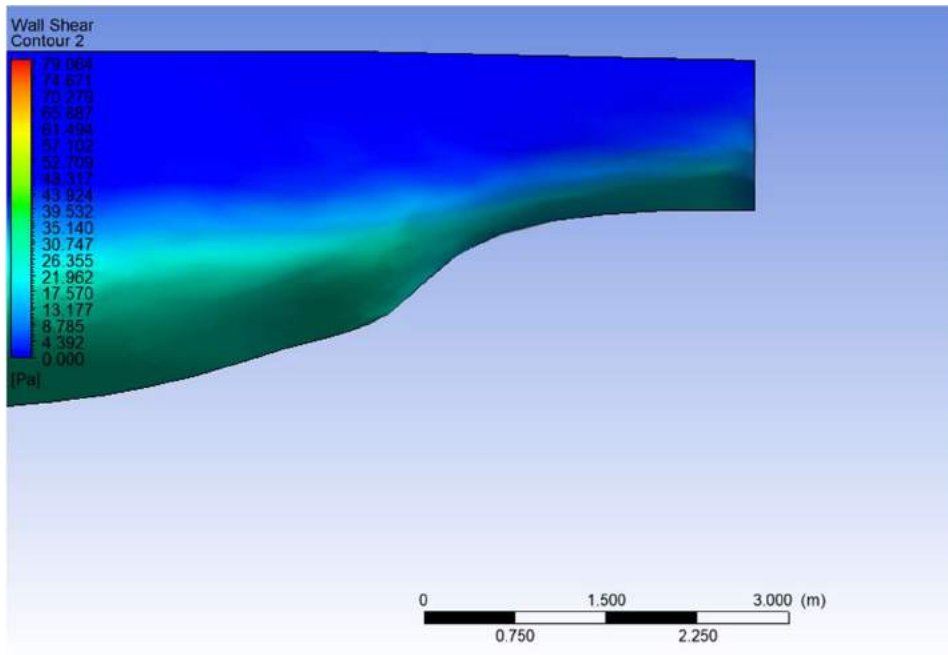
Vektor kecepatan aliran pada **(b)** model *dimple surfaced hull 1* menampilkan *wake region* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan **(a)** model lambung tanpa *dimple*. *Wake region* ditampilkan oleh ketidakberadaan vektor arah panah yang mengindikasikan perbedaan arah aliran yang terjadi pada daerah tersebut. Untuk memperjelas perbedaan ukuran *wake region*, garis pembanding dengan jarak yang sama (X meter pada Gambar IV. 13, mengacu pada lebar *wake region* model **(a)** lambung tanpa *dimple*) diletakkan pada masing-masing vektor kecepatan aliran, dan dapat dilihat bahwa perbedaan ukuran *wake region* yang dihasilkan cukup signifikan. Penurunan hambatan yang terjadi pada kasus ini memiliki konsep yang sangat serupa dengan konsep penurunan hambatan yang terjadi pada bola golf, dimana *wake area* dapat diperkecil sehingga mengurangi *form drag*, yang berujung dengan berkurangnya hambatan total sebesar 26.12%.

Namun, berkurangnya *wake region* tidak dapat terlihat dengan jelas pada kecepatan 9 dan 11 knot dimana penurunan hambatan yang terjadi jauh lebih kecil dibandingkan pada kecepatan 5 dan 7 knot. Hal ini divisualisasikan dengan vektor kecepatan aliran pada Gambar IV. 14.

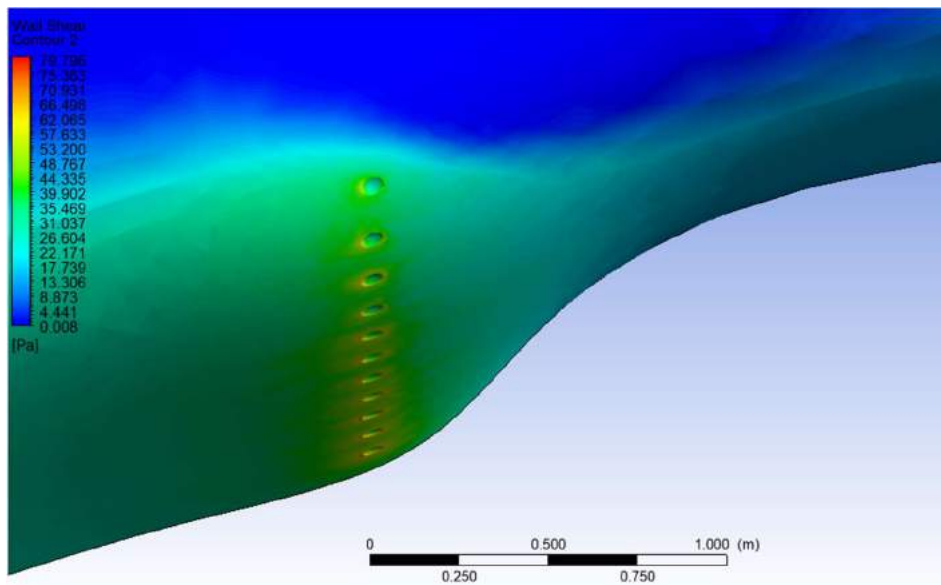


Gambar IV. 14. Perbandingan *Wake Region* Menggunakan Vektor Aliran pada **(A)** Model Lambung Kapal Tanpa *Dimple* dengan **(B)** *Dimple Surfaced Hull 2* pada Kecepatan 11 Knot

Pada simulasi *dimple surfaced hull 2* dengan kecepatan 11 knot yang dapat dilihat pada Gambar IV.14 **(b)**, terjadi penurunan hambatan yang tidak signifikan, yaitu sebesar 3.6%. Hal tersebut dapat dijelaskan oleh visual vektor di atas, dimana *wake region* yang terjadi pada **(a)** model lambung tanpa *dimple* dan **(b)** model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan tersebut tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Hal ini juga diikuti oleh kenaikan tegangan geser yang terjadi pada permukaan lambung kapal dimana kenaikan yang terjadi pada kecepatan 11 knot lebih signifikan dibandingkan kenaikan yang terjadi pada kecepatan 5 knot seperti yang ditampilkan pada Gambar IV. 15.



(a)

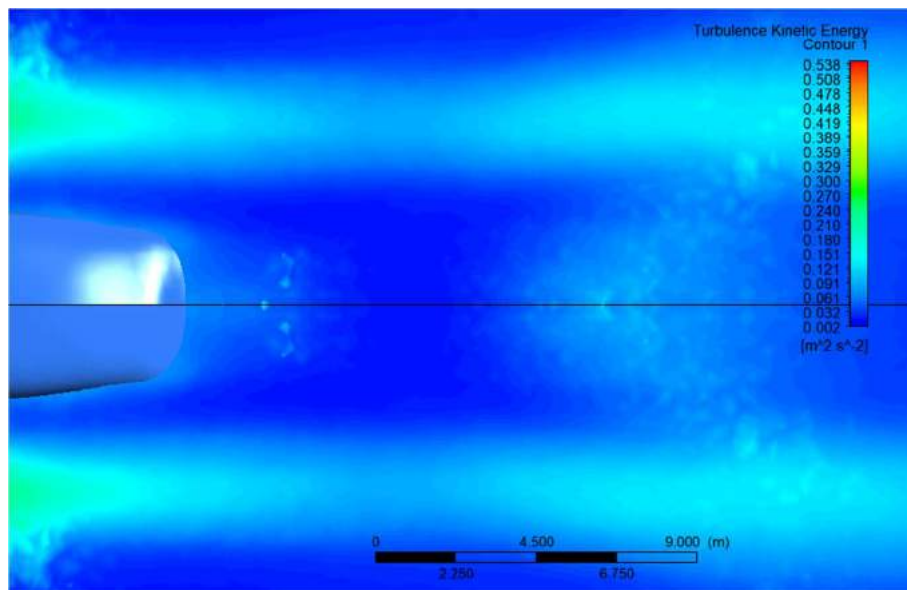


(b)

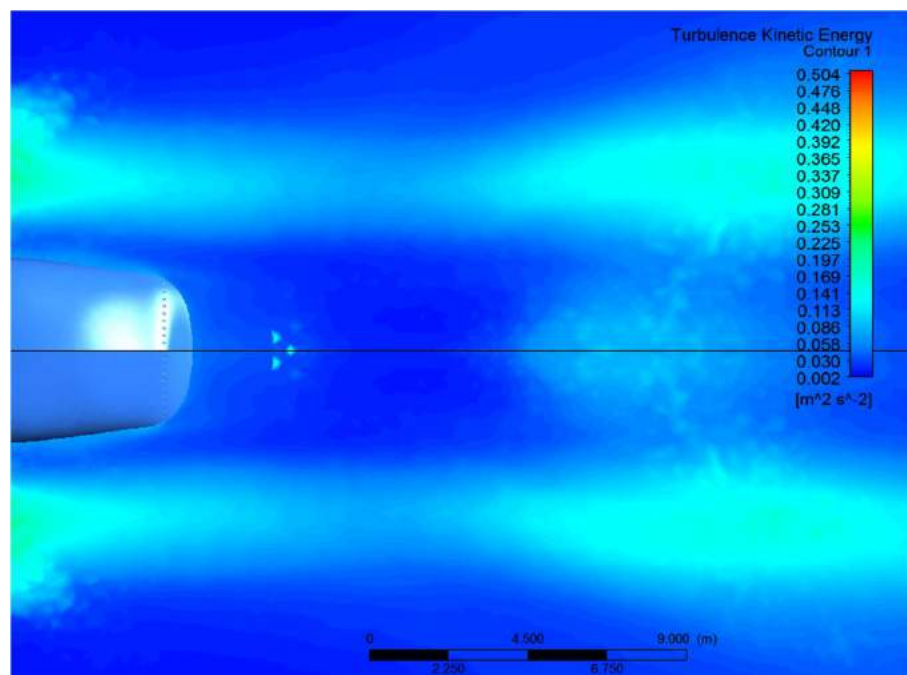
Gambar IV. 15 Kontur Tegangan Geser Pada (A) Model Lambung Tanpa *Dimple* dengan (B) *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 11 Knot

Pada kecepatan 5 knot, tegangan geser maksimal yang dialami oleh permukaan lambung kapal tanpa *dimple* tidak lebih dari 6.53 Pa. Namun, pada kecepatan 11 knot, tegangan geser maksimal pada model lambung yang sama jauh lebih besar, dengan nilai 27.486 Pa. Tegangan geser mengalami kenaikan sekitar 42.510 Pa pada *dimple surfaced hull 1*, nilai yang cukup signifikan jika dibandingkan dengan kenaikan yang dialami permukaan lambung kapal pada

kecepatan 5 knot dengan kenaikan 11.181 Pa. Hal ini menjadi salah satu faktor mengapa *dimple surfaced hull* pada kecepatan tinggi tidak efektif dalam menurunkan hambatan total, mengingat perbedaan *wake region* yang diciptakan oleh *dimple surfaced hull* pada kecepatan tinggi tidak signifikan. Perbandingan performa *dimple* terhadap kecepatan juga dapat divisualisasikan dengan kontur energi kinetik turbulensi seperti yang ditampilkan pada Gambar IV. 16.



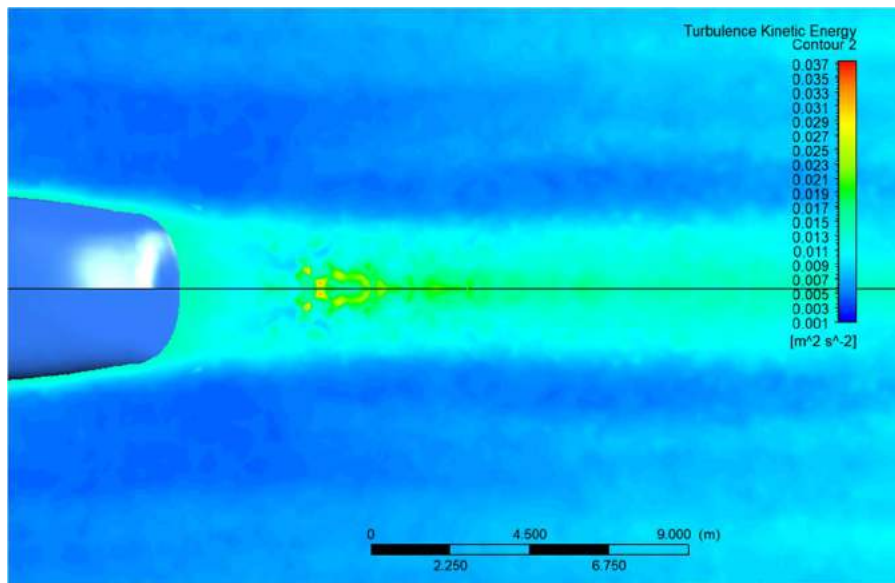
(a)



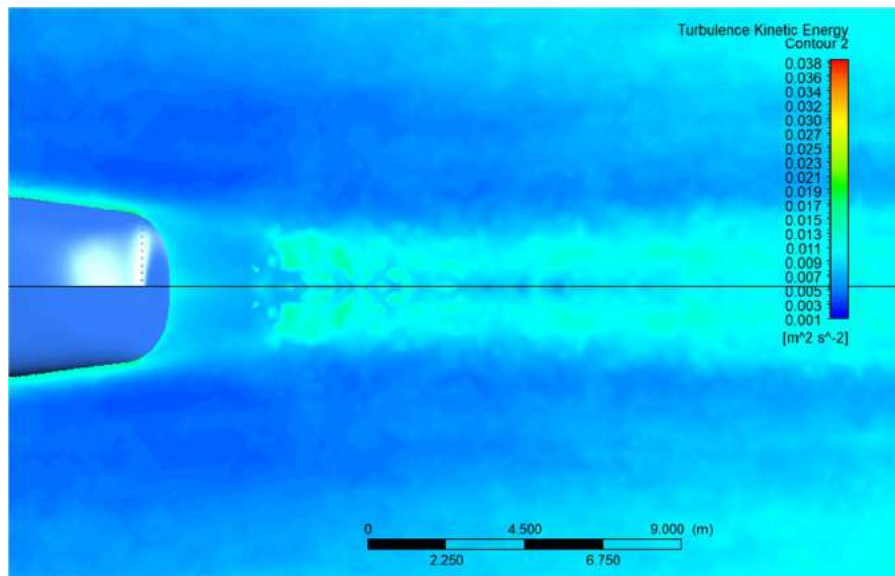
(b)

Gambar IV. 16 Kontur *Turbulent Kinetic Energy* pada (A) Model Lambung Tanpa *Dimple* dan (B) *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 11 Knot

Energi kinetik turbulen atau *turbulent kinetic energy* merupakan energi kinetik rata – rata (*mean kinetic energy*) per satuan massa yang berkaitan dengan pusaran (*eddies*) pada aliran turbulen. *Turbulent kinetic energy* tergantung pada *fluid shear* atau geseraan/gesekan yang terjadi antar fluida yang bergerak (Matic, 2012). Semakin besar nilai dan area dari *turbulent kinetic energy*, maka *fluid shear* yang terjadi akan semakin besar, sehingga berujung pada hambatan yang lebih besar. Pada Gambar IV. 16, terlihat bahwa perbedaan *turbulent kinetic energy* yang ada pada belakang kapal tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Namun, pada kecepatan 5 knot, perbedaan tersebut dapat terlihat dengan sangat jelas.



(a)



(b)

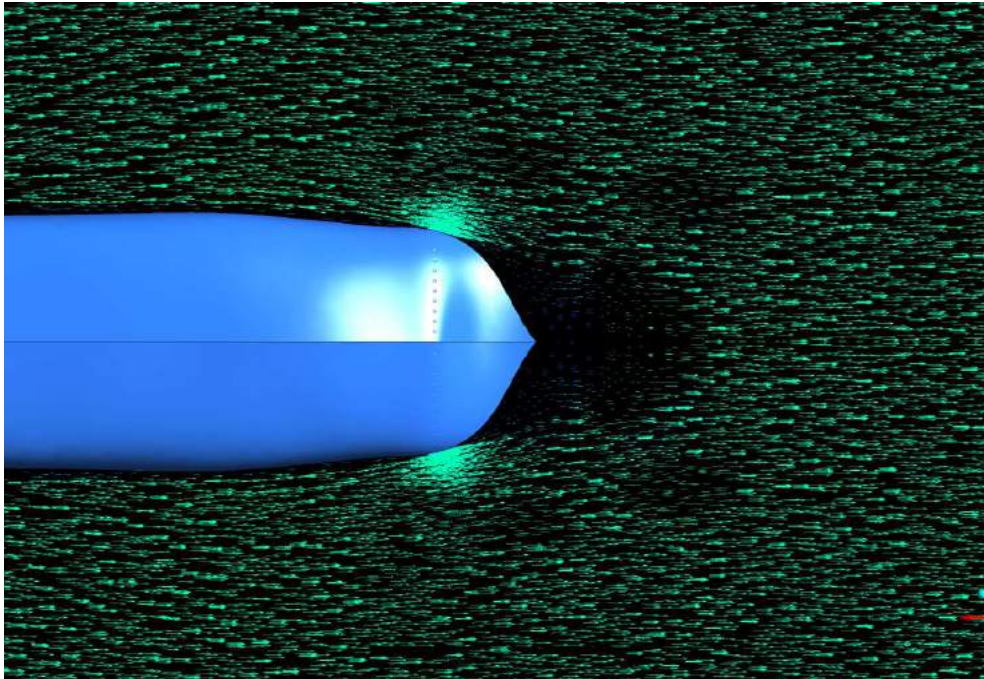
Gambar IV. 17 Kontur *Turbulent Kinetic Energy* pada (A) Model Lambung Tanpa *Dimple* dan (B) *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 5 Knot

Kontur *turbulent kinetic energy* yang ditampilkan pada Gambar IV. 17 menunjukkan perbedaan yang signifikan yang dialami oleh *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 5 knot. Penurunan *turbulent kinetic energy* pada *wake region* terlihat jauh lebih efektif pada kecepatan 5 knot. Hal ini menjelaskan mengapa penurunan hambatan oleh *dimple surfaced hull* pada kecepatan yang lebih rendah jauh lebih efektif dibandingkan pada kecepatan yang lebih tinggi.

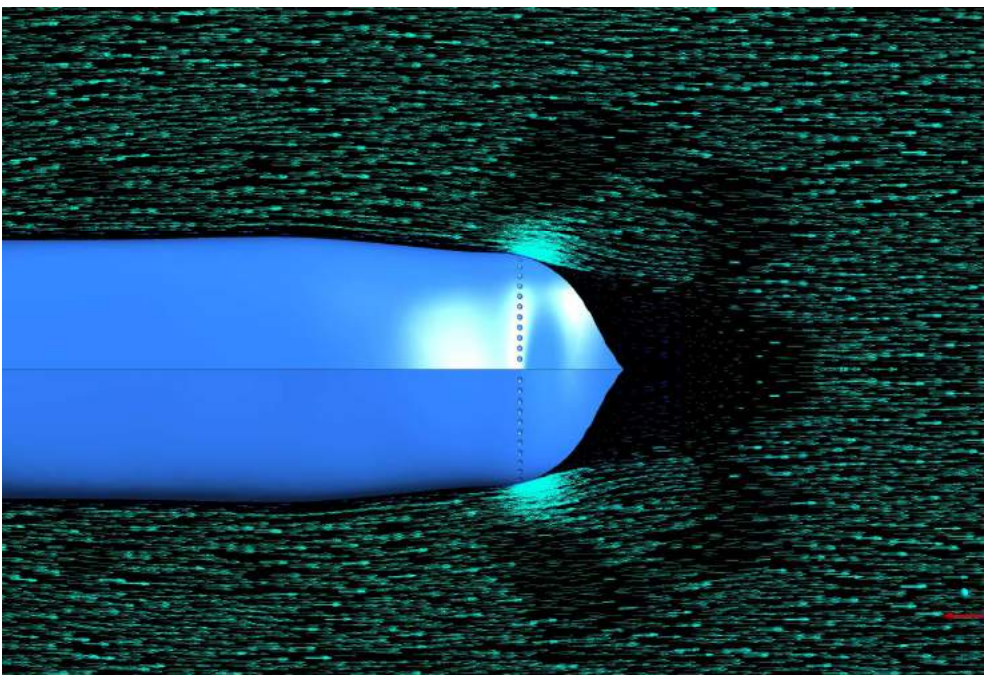
IV.2.4. Pengaruh Rasio *Dimple*

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel IV. 2, dapat dilihat bahwa pengaruh rasio *dimple* pada penurunan hambatan sulit untuk diprediksi. *Dimple surfaced hull 1*, dengan rasio ukuran *dimple* paling kecil, menghasilkan efek penurunan hambatan yang sangat berbeda pada masing-masing kecepatan. *Dimple surfaced hull 1* dapat menghasilkan penurunan hambatan yang sangat signifikan pada kecepatan 5 knot, sebesar 26.12%, dan 15.56% pada kecepatan 7 knot. Sementara, pada kecepatan 9 dan 11 knot, *dimple surfaced hull 1* justru memiliki efek yang berbeda, dengan menghasilkan penurunan yang paling tidak signifikan diantara ketiga rasio, yaitu sebesar 1.74% pada kecepatan 11 knot dan 2.75% pada kecepatan 9 knot.

Hal ini menunjukkan bahwa *dimple surfaced hull 1* dapat bekerja maksimal pada kecepatan rendah. Pada kecepatan 5 knot, *dimple surfaced hull 1* menghasilkan penurunan hambatan yang jauh lebih besar dibandingkan *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan yang sama. *Dimple surfaced hull 1* dapat menurunkan nilai hambatan total sebesar 26.12% sementara *dimple surfaced hull 3* hanya dapat menurunkan hambatan total sebesar 16.6%. Aliran yang terjadi pada kedua model tersebut dapat dilihat pada Gambar IV. 18 menggunakan vektor kecepatan aliran.



(a)

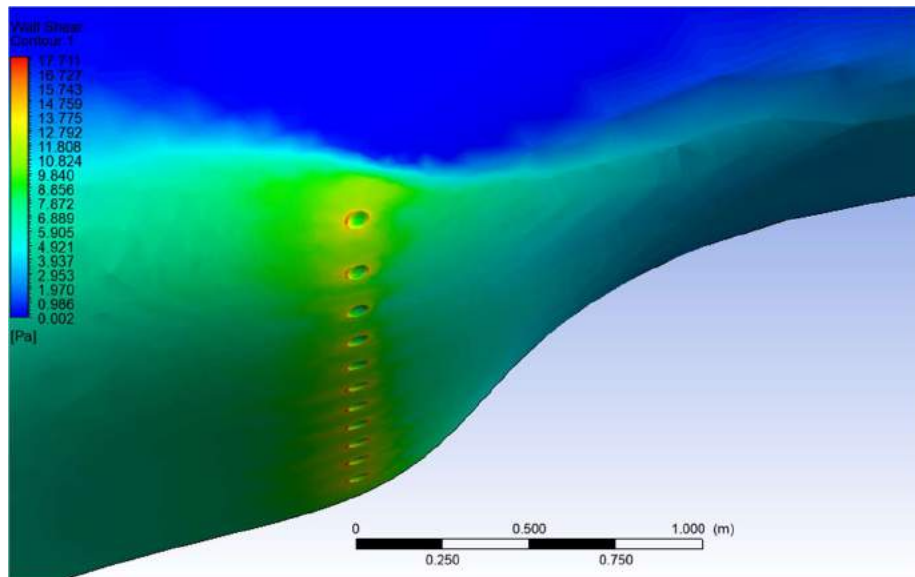


(b)

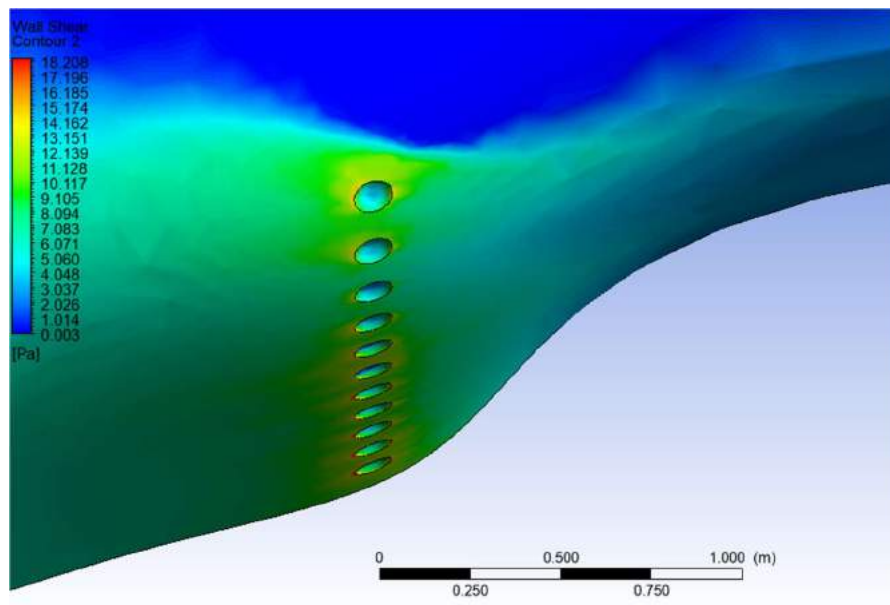
Gambar IV. 18. Perbandingan Vektor Kecepatan Aliran Pada (A) Model *Dimple Surfaced Hull 1* Dengan (B) *Dimple Surfaced Hull 3* Pada Kecepatan 5 Knot.

Vektor kecepatan pada Gambar IV. 18 menunjukkan perbedaan *wake region* pada aliran yang dihasilkan oleh (a) *dimple surface hull 1* dengan (b) *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 5 knot. Dapat terlihat bahwa pada aliran yang dihasilkan *dimple surfaced hull 3*, terdapat *wake*

region berlebih dibandingkan pada aliran yang dihasilkan oleh *dimple surfaced hull 1*, yang menunjukkan bahwa pada kecepatan tersebut, semakin kecil ukuran *dimple* maka penundaan *flow separation* dapat menjadi lebih stabil sehingga *wake region* yang tercipta dapat diperkecil secara maksimal. Jika ditinjau dari aspek tegangan geser, walaupun *dimple surfaced hull 3* mengalami tegangan geser maksimal yang lebih besar, perbedaan yang terjadi tidak signifikan. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar IV. 19.



(a)

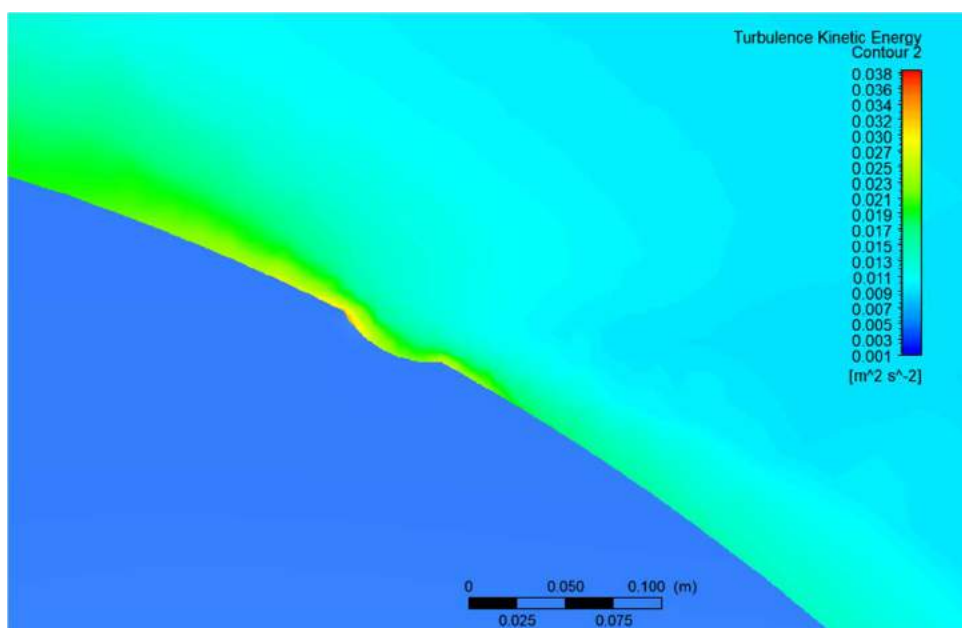


(b)

Gambar IV. 19 Kontur Tegangan Geser (A) *Dimple Surfaced Hull 1* dan (B) *Dimple Surfaced Hull 3* Pada Kecepatan 5 Knot.

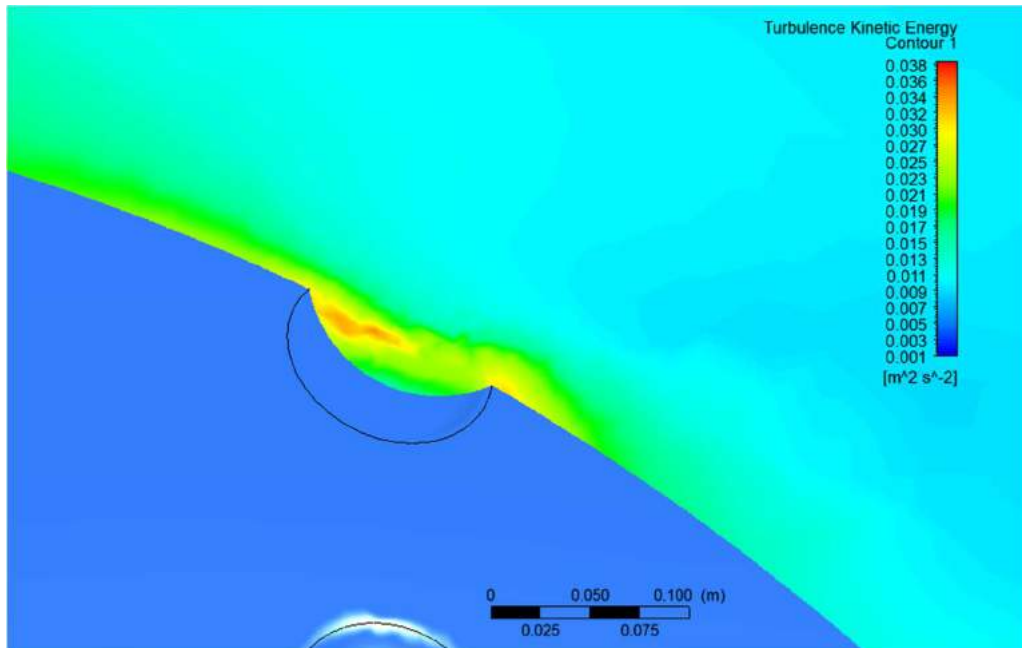
Dapat dilihat pada Gambar IV. 19 bahwa perbedaan tegangan geser maksimal yang dialami (a) *dimple surfaced hull* dan (b) *dimple surfaced hull 3* tidak memiliki perbedaan yang signifikan, yaitu hanya sebesar 1.503 Pa. Dengan tegangan geser serta rasio *dimple* yang lebih besar, *dimple surfaced hull 3* secara langsung mengalami hambatan gesek yang lebih besar dibandingkan *dimple surfaced hull 1* yang memiliki rasio *dimple* yang lebih kecil dalam aspek diameter dan kedalaman. Namun, terdapat satu hal yang cukup menarik perhatian pada kontur tegangan geser *dimple surfaced hull 3*, yaitu tegangan geser yang terjadi pada permukaan bagian cekung *dimple* lebih rendah daripada tegangan geser yang dialami daerah ujung diameter *dimple*. Jika dilihat pada *dimple surfaced hull 1*, tegangan geser yang terjadi pada *dimple* mengalami tegangan geser yang serupa dengan daerah sekitar ujung diameter *dimple*, yang direpresentasikan dengan warna yang serupa. Namun, tegangan geser pada *dimple* model DSH3 mengalami tegangan geser yang lebih rendah jika dilihat dari warna yang merepresentasikan tegangan geser tersebut.

Rendahnya tegangan geser tersebut menandakan adanya pengurangan gesekan aliran terhadap permukaan *dimple*. Berkurangnya gesekan pada permukaan *dimple* mengindikasikan adanya ketidakstabilan yang terjadi terhadap aliran pada lokasi tersebut, yang dapat menimbulkan turbulensi pada aliran. Hal ini menjadi faktor penyebab pengurangan hambatan pada *dimple surfaced hull 3* tidak lebih efektif dibandingkan *dimple surfaced hull 1*. Tingkat turbulensi tersebut dapat dilihat pada Gambar IV.20 dan Gambar IV.21.



Gambar IV. 20 Kontur *Turbulent Kinetic Energy* pada *Dimple Surfaced Hull 1* pada Kecepatan 5 Knot

Jika dilihat dari Gambar IV. 20, turbulensi yang terjadi pada ujung diameter *dimple* tetap mengalir pada permukaan *dimple*, berhubung kedalaman *dimple* pada model DSH 1 cenderung cetek. Kedalaman *dimple* model DSH 1 memiliki kedalaman yang paling kecil diantara ketiga model. Jika dibandingkan dengan apa yang terjadi pada aliran yang terjadi disekitar *dimple surfaced hull 3*, perbedaan yang cukup signifikan dapat terlihat.



Gambar IV. 21 Kontur *Turbulent Kinetic Energy* Pada *Dimple Surfaced Hull 1* Pada Kecepatan 5 Knot

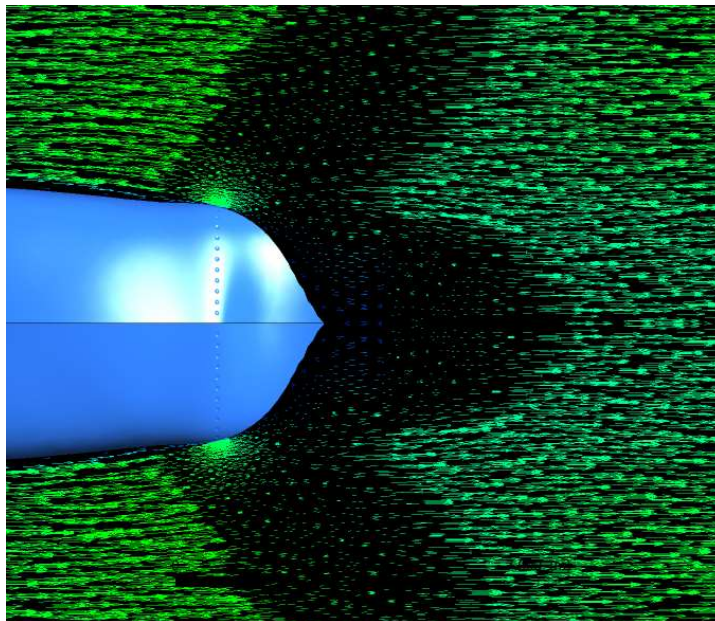
Terlihat dengan jelas pada kontur *turbulent kinetic energy* yang ditampilkan pada Gambar IV. 21 bahwa kedalaman *dimple* pada model *dimple surfaced hull 3* sangat berpengaruh terhadap aliran yang terjadi pada sekitar *dimple*, dimana kedalaman tersebut menjadi faktor utama penyebab terjadinya turbulensi yang tercipta pada daerah *dimple*. Turbulensi yang tercipta menyebabkan berkurangnya gesekan aliran terhadap permukaan *dimple*, namun turbulensi tersebut tetap berkontribusi terhadap hambatan total. Terciptanya turbulensi akibat kedalaman *dimple* yang terlalu dalam tersebut merupakan fenomena yang serupa dengan turbulensi yang tercipta saat fluida melewati *bluff body* dan menciptakan *wake*.

Berbeda halnya dengan *Dimple surfaced hull 1* yang merupakan model dengan penurunan hambatan yang paling efektif pada kecepatan 5 dan 7 knot, *dimple surfaced hull 2* merupakan model yang paling efektif pada kecepatan 9 and 11 knot, walaupun dampak penurunan hambatan yang dihasilkan tidak signifikan, yaitu sebesar 3.6% pada kecepatan 11 knot dan 3.51% pada kecepatan 9 knot. Namun, pada kecepatan 7 knot, *Dimple surfaced hull 2*

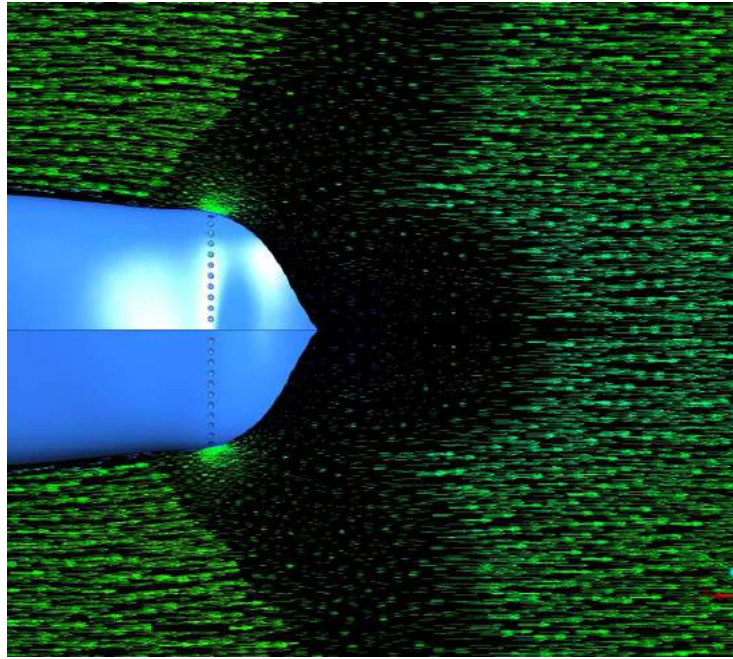
menghasilkan penurunan hambatan yang paling rendah diantara ketiga varian, yaitu sebesar 8.09%.

Kenaikan hambatan total terjadi pada *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 11 knot, dengan kenaikan nilai hambatan total sebesar 4.01%. *Dimple surfaced hull 3* merupakan satu-satunya model yang tidak memiliki penurunan hambatan yang paling efektif pada semua kecepatan uji, dan memiliki hasil paling tidak efektif pada kecepatan 5 dan 11 knot, sehingga secara keseluruhan *dimple surfaced hull 3* memiliki performa yang paling tidak efektif dibandingkan kedua varian *dimple* lainnya.

Penurunan nilai hambatan pada model *dimple surfaced hull* dengan kecepatan yang sama memiliki selisih yang berbeda-beda. Tidak semua model *dimple surfaced hull* menghasilkan penurunan yang signifikan dibandingkan model lainnya. Pada kecepatan 5 knot, hasil penurunan oleh *dimple surfaced hull 1 dan 2* hanya memiliki selisih sebesar 0.73%, sementara pada kecepatan 9 knot, *dimple surfaced hull 2 dan 3* memiliki selisih penurunan hambatan sebesar 0.26%.



(a)



(b)

Gambar IV. 22. Perbandingan vektor kecepatan antara *dimple surfaced hull 2 & 3* pada kecepatan 9 knot yang memiliki perbedaan nilai hambatan yang tidak signifikan

Jika dilihat dari aliran yang terjadi pada kedua model pada Gambar IV. 22, tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada aliran yang terjadi. Pada kasus-kasus seperti ini, rasio ukuran *dimple* hampir tidak memiliki pengaruh terhadap penurunan hambatan.

IV.2.5. Rangkuman Analisis

Setelah dilakukannya analisis terhadap simulasi CFD yang telah dilakukan terhadap *dimple surfaced hull*, hasil analysis dapat dirangkum menjadi poin-poin berikut:

- *Dimple* pada permukaan lambung kapal dapat mempengaruhi aliran yang mengarah lebih terhadap permukaan lambung pada area *dimple*, menyebabkan bertambahnya tegangan geser yang diikuti dengan mengecilnya *wake region* dan turunnya nilai *turbulent kinetic energy*.
- Tegangan geser yang dialami oleh permukaan *dimple* berbeda-beda sesuai dengan rasionya. Rasio *dimple* yang semakin dalam akan mengalami tegangan geser yang semakin kecil pada permukaan *dimple* tersebut walaupun hal ini diikuti dengan terciptanya turbulensi yang disebabkan oleh aliran yang mengalir melewati ujung *dimple* dan menjadi *wake* akibat kedalaman yang terlalu dalam.

Tegangan geser paling besar terjadi pada sekitar ujung diameter pada semua rasio *dimple*.

- *Dimple* dapat mempengaruhi aliran dengan lebih efektif pada kecepatan rendah dimana aliran yang terjadi pada sekitar lambung kapal lebih tenang. Hal ini digambarkan dengan tingginya gelombang yang terjadi pada kecepatan tinggi.
- Pengimplementasian *dimple* tidak dapat menurunkan hambatan pada setiap kondisi kapal, terutama pada kecepatan yang lebih tinggi, dimana pengimplementasian *dimple* justru dapat menyebabkan bertambahnya nilai hambatan total yang dialami lambung kapal.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. Umum

Bab ini berisi kesimpulan dari pengerjaan penelitian tugas akhir yang akan dijelaskan secara poin demi poin yang menjawab tujuan dan perumusan masalah dari pengerjaan tugas akhir serta berisikan saran dan pengembangan untuk penelitian mengenai penerapan *dimple* pada kapal agar dapat menghasilkan pekerjaan yang lebih baik lagi.

V.1.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi pada *dimple surfaced hull* menggunakan perangkat lunak CFD, didapatkan kesimpulan-kesimpulan sebagai berikut:

1. *Dimple Surfaced Hull* dapat mengurangi hambatan total dengan mempengaruhi arah aliran terhadap lambung kapal sehingga *flow separation* tertunda dan mengurangi *wake region*, serta dapat meningkatkan hambatan pada kecepatan tinggi.
 - a. Penurunan hambatan tertinggi sebesar 26.12% (465KN - 5 knot)
 - b. Penurunan hambatan terkecil sebesar 1.74% (366KN -11 knot)
 - c. Kenaikan hambatan total terjadi pada kecepatan 11 knot pada *dimple surfaced 3* sebesar 4.01%
2. Rasio *dimple* memiliki efek yang berbeda pada kecepatan yang berbeda. Kedalaman *dimple* juga mempengaruhi tegangan geser yang terjadi dimana rasio *dimple* yang lebih dalam akan memicu aliran yang lebih turbulen pada area *dimple*, namun hal tersebut menyebabkan tegangan geser pada permukaan *dimple* menjadi lebih rendah.
 - a. *Dimple surfaced hull 1* memiliki hasil yang signifikan pada kecepatan rendah dan tidak signifikan pada kecepatan tinggi
 - b. *Dimple surfaced hull 2* mengalami penurunan hambatan yang paling efektif pada kecepatan 9 dan 11 knot.

- c. *Dimple surfaced hull 3* merupakan model dengan penurunan hambatan terkecil pada kecepatan 5 dan 7 knot serta dapat menambah nilai hambatan pada 11 knot.
3. Penurunan hambatan total oleh *dimple surfaced hull* jauh lebih efektif pada kecepatan 5 & 7 knot dibandingkan pada kecepatan 9&11 knot. Pengaruh *dimple* terhadap aliran untuk menurunkan hambatan lebih efektif pada kecepatan rendah dimana aliran yang terjadi pada sekitar lambung kapal lebih tenang. Hal tersebut digambarkan dengan tingginya gelombang yang terjadi di sekitar lambung kapal pada kecepatan tinggi.

V.2. Saran

Dalam penelitian ini terdapat variabel-variabel yang tidak diperhitungkan sehingga terdapat saran untuk pengerjaan penelitian lebih lanjut sebagai berikut:

1. Perlunya dilakukan simulasi CFD dengan model turbulensi yang lebih akurat seperti Large Eddy Simulation untuk mendapatkan karakteristik aliran yang lebih akurat.
2. Perlunya dilakukan penelitian lanjut dengan variasi rasio *dimple* sehingga dapat diketahui rasio yang terbaik untuk kondisi tertentu.
3. Perlunya dilakukan uji eksperimental dengan model *dimple surfaced hull* agar dapat membandingkan hasil dan visualisasi simulasi numerik dengan hasil eksperimental.
4. Perlunya dilakukan analisa pada tipe kapal yang berbeda terutama pada kapal berkecepatan rendah agar efek pengurangan hambatan oleh adanya *dimple* pada permukaan dapat bekerja maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS Inc. (2009). Training Manual. *Introduction to CFX*. ANSYS Inc.
- ANSYS Inc. (2013). *ANSYS CFX Tutorials*. Canonsburg: SAS IP Inc.
- Dhana, F. R. (2018). Tesis. *Analisis Alternatif Hull Form Selpropelled Barge Untuk Meningkatkan Performa Hidrodinamika*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).
- Donnelly, K. J. (2010). Master Thesis. *Reduction of Ship Resistance through Induced Turbulent Boundary Layers*. Florida, USA: Florida Institute of Technology.
- F. Alam, H. C. (2010). A Comparative Study of Golfball Aerodynamics. *17th Australian Fluid Mechanics Conference*. Auckland.
- Hart, J. (2016). Comparison of Turbulence Modeling Approaches To The Simulation Of A Dimpled Sphere. *Procedia Engineering 147* , 68-73.
- Harvald, S. A. (1992). *Resistance and Propulsion of Ships*. Florida.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical Computation of Internal and External Flows*. Oxford: John Wiley & Sons, Ltd.
- ITTC. (2014). Recommended Procedures and Guidelines.
- Juniper, M. (2015). Lecture Handout. *Fluid Mechanics*. Cambridge, UK: University of Cambridge.
- Kavas, I. (2016, September 22). *A Brief History of the Golf Ball*. Retrieved 2018, from golfsupport.com: <https://golfsupport.com/blog/a-brief-history-of-the-golf-ball/>
- Kundu, P., & Cohen, I. (2008). *Fluid Mechanics*. MA: Academic Press.
- Lewis, E. V. (1988). *Principles of Naval Architecture Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration*. Society of Naval Architects & Marine Engineers.
- Lomax, H., Pulliam, T., & Zingg, D. (1999). *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Toronto.
- Martin, J. S. (1968). *The Curious History of the Golf Ball, Mankind's Most Fascinating Sphere*. New York: Horizon Press.
- Molland, A., Turnock, S., & Hudson, D. (2011). *Ship Resistance and Propulsion*. Southampton: Cambridge University Press.
- Philip Hill, C. p. (1992). *Mechanics and thermodynamics of Propulsion*. Pearson.
- Schlichting, H. (1978). *Boundary-Layer Theory*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Selma Brynolf, E. F. (2014). Environmental Assessment of Marine Fuels: Liquefied Natural Gas, Liquefied Biogas, Methanol and Bio-Methanol. *Journal of Cleaner Production*, 86-95.
- Veldman, A. (2012). Lecture Notes. *Boundary Layers in Fluid Dynamics*. Groningen, Netherlands: University of Groningen.
- Watson, D. (1998). *Practical Ship Design* (Vol. 1). (R. Bhattacharyya, Ed.) Oxford: Elsevier.

LAMPIRAN

Lampiran A – Perhitungan Radius Bilga

Lampiran B – Kontur simulasi lambung “Kapal Pengangkut Ikan 60GT”

Lampiran C – Kontur simulasi *dimple surfaced hull 1*

Lampiran D – Kontur simulasi *dimple surfaced hull 2*

Lampiran E – Kontur simulasi *dimple surfaced hull 3*

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN RADIUS BILGA

Perhitungan di bawah ini merupakan perhitungan radius bilga yang mengacu pada *Practical Ship Design Vol. 1*, dimana persamaan radius bilga yang digunakan merupakan persamaan untuk kapal-kapal yang memiliki *rise of floor*.

T	1.6	m
B	5.2	m
F	?	m
Cm	?	
K	?	
π	3.14	

$$R = \frac{B \cdot T \cdot (1 - C_m) - F(B/2 - K/2)}{2\{(1 - \pi/4) - F/(B - K)\}} \quad ^{0.5}$$

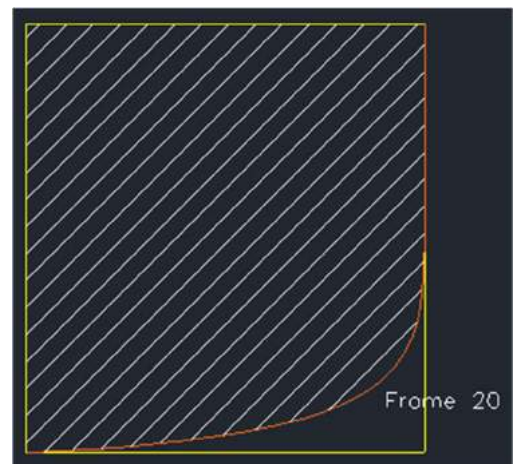
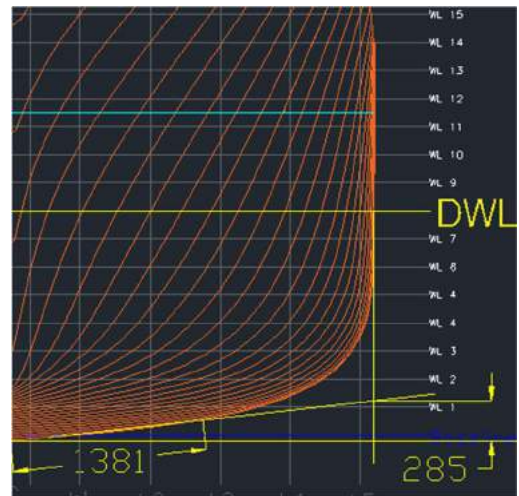
$$F = 0.285m$$

$$K = 1381 \times 2 \\ = 2762m$$

$$C_m = \text{Area frame Midship/} \\ \text{Ara persegi berpotongan} \\ = 0.92453$$

$$R = \left[\frac{[5.2 \times 1.6(1 - 0.92453) - 0.285(5.2/2 - 2762/2)]}{2\{(1 - 22/28) - 0.285/(5.2 - 2762)\}} \right]^{1/2}$$

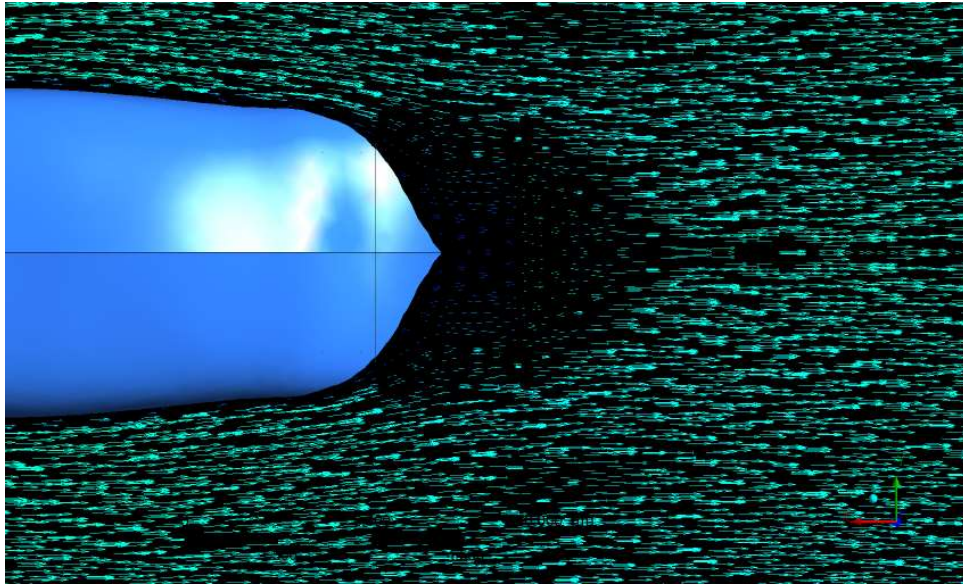
$$R = 1.196m$$



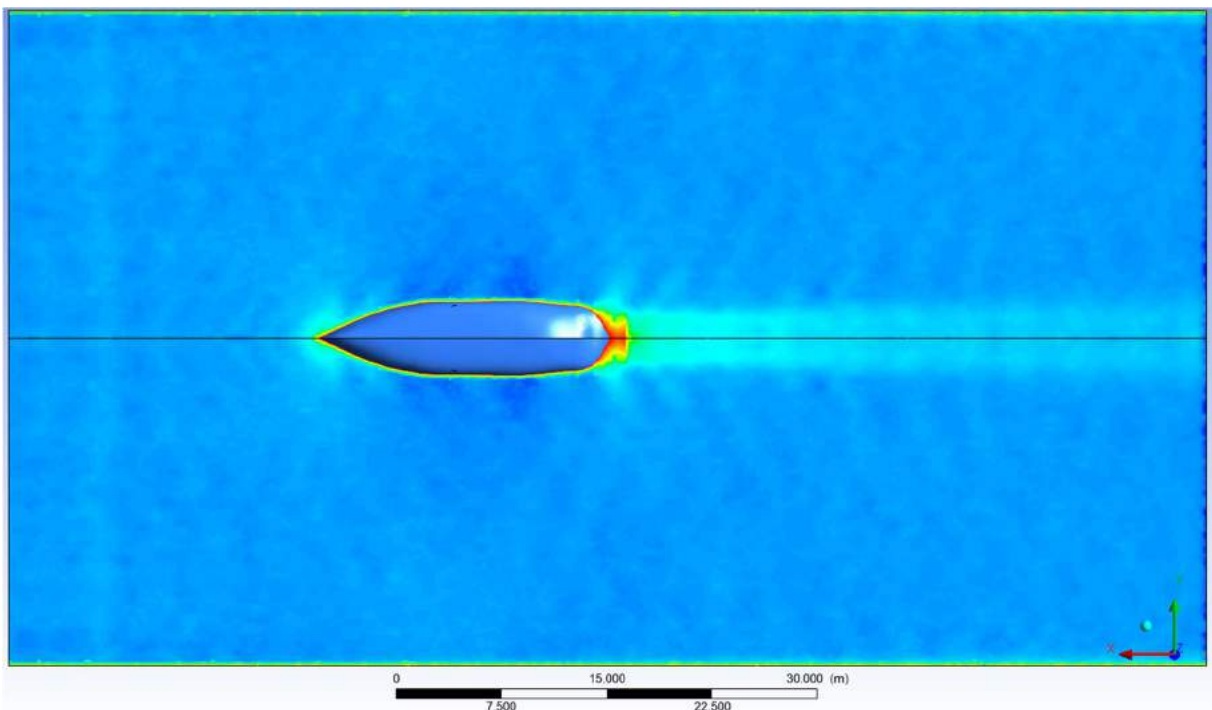
LAMPIRAN B
KONTUR SIMULASI LAMBUNG “KAPAL PENGANGKUT
IKAN 60GT”

Lampiran ini berisi kontur kecepatan aliran, vektor kecepatan aliran, kontur tegangan geser kontur energi kinetik turbulensi, kontur tekanan serta kontur *free surface* pada setiap kecepatan yang diuji pada model lambung Kapal Pengangkut Ikan 60GT tanpa *dimple*

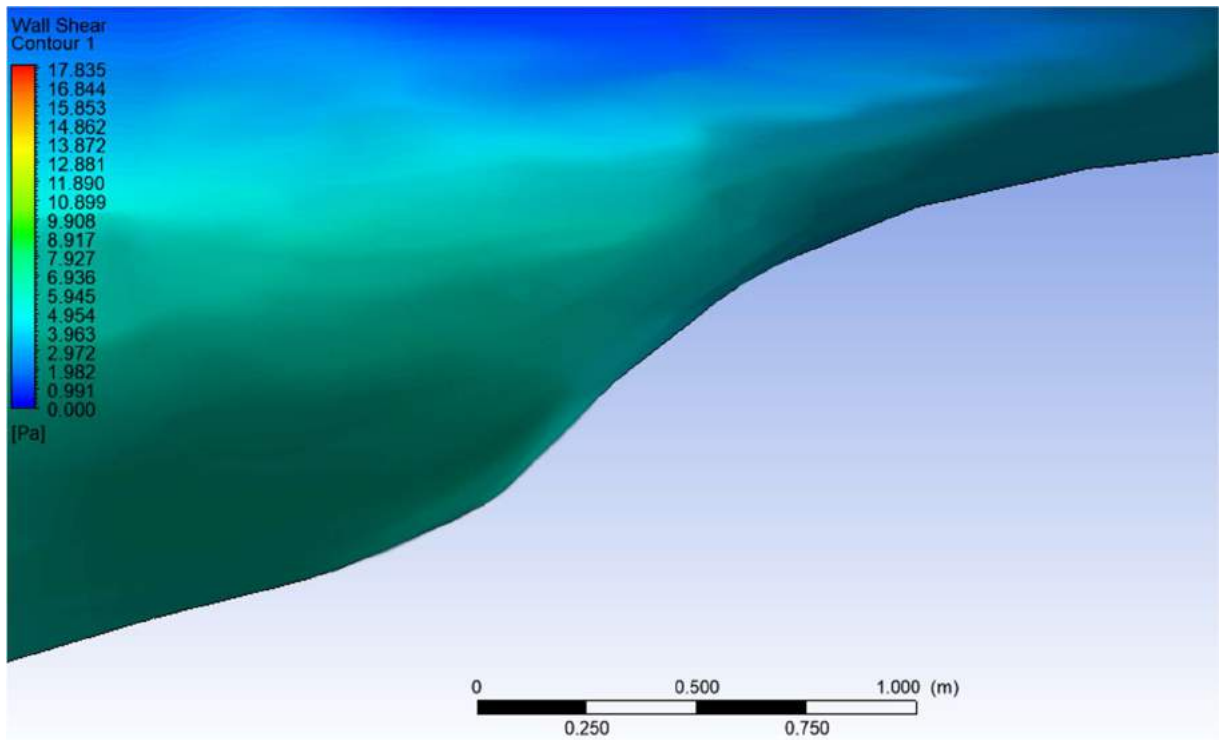
5 knot



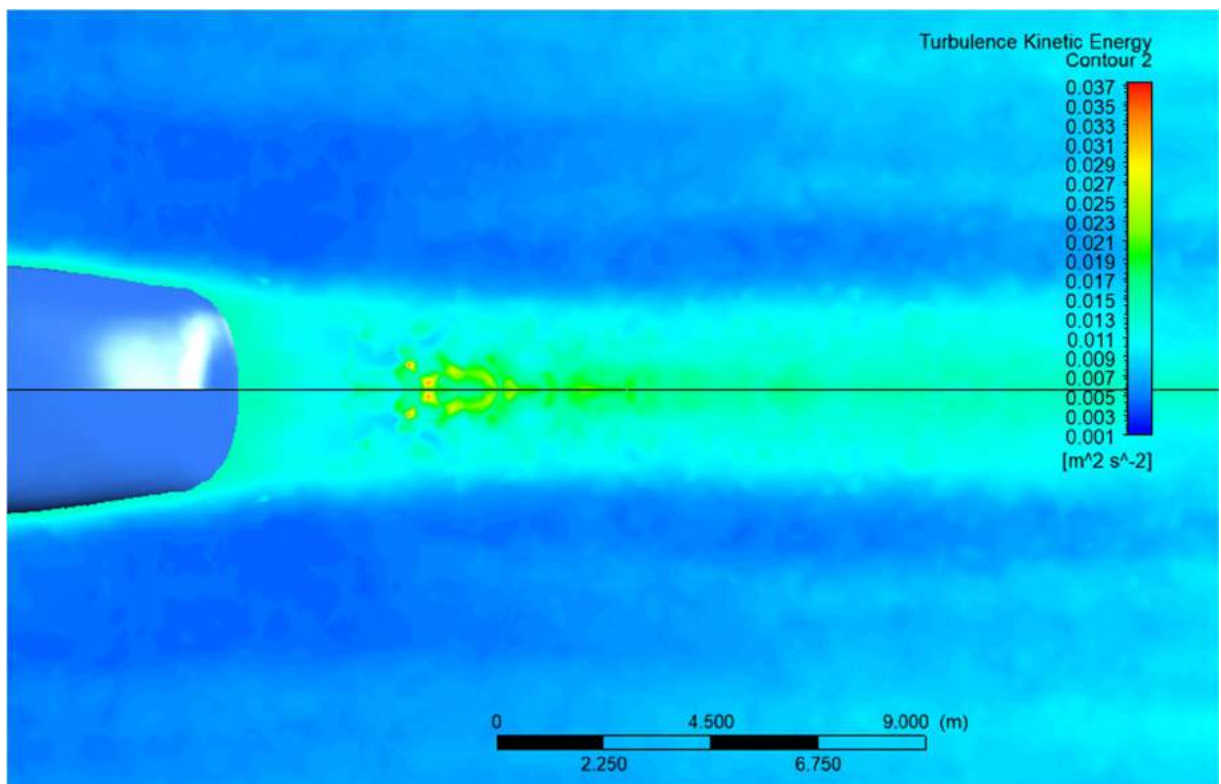
Lampiran B. 1 Vektor Kecepatan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 5 knot



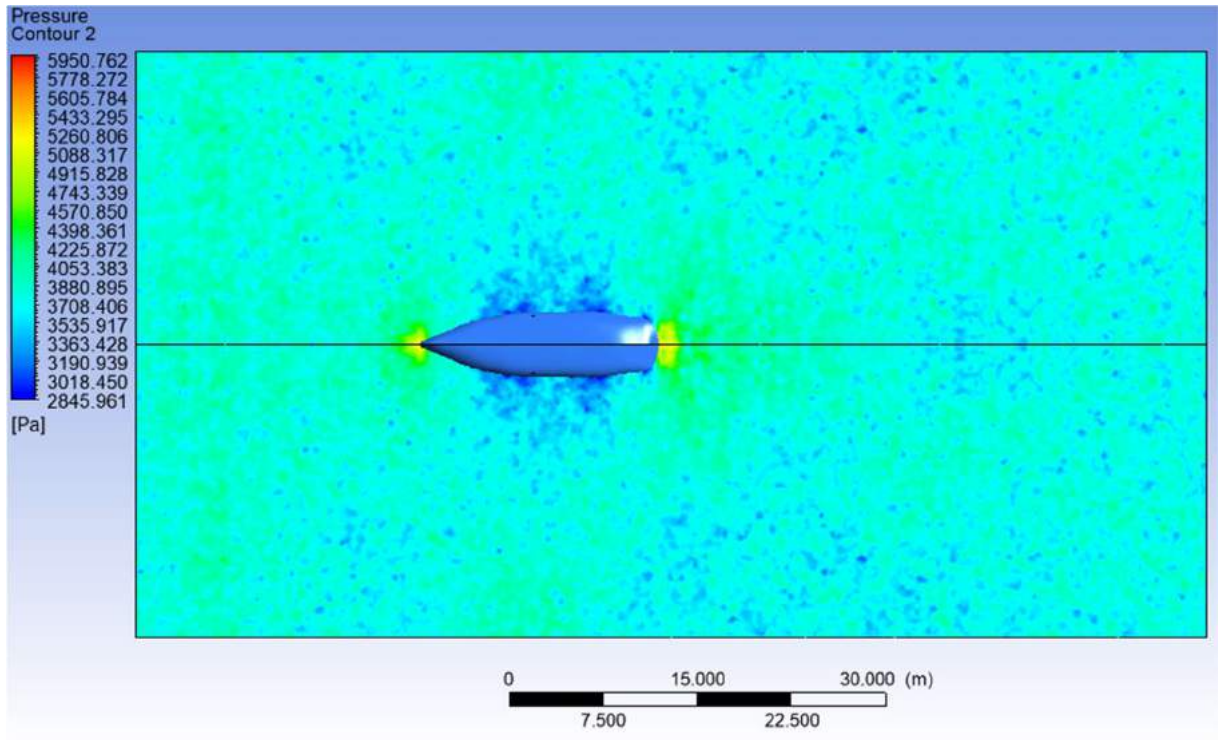
Lampiran B. 2 Kontur kecepatan aliran model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 5 knot



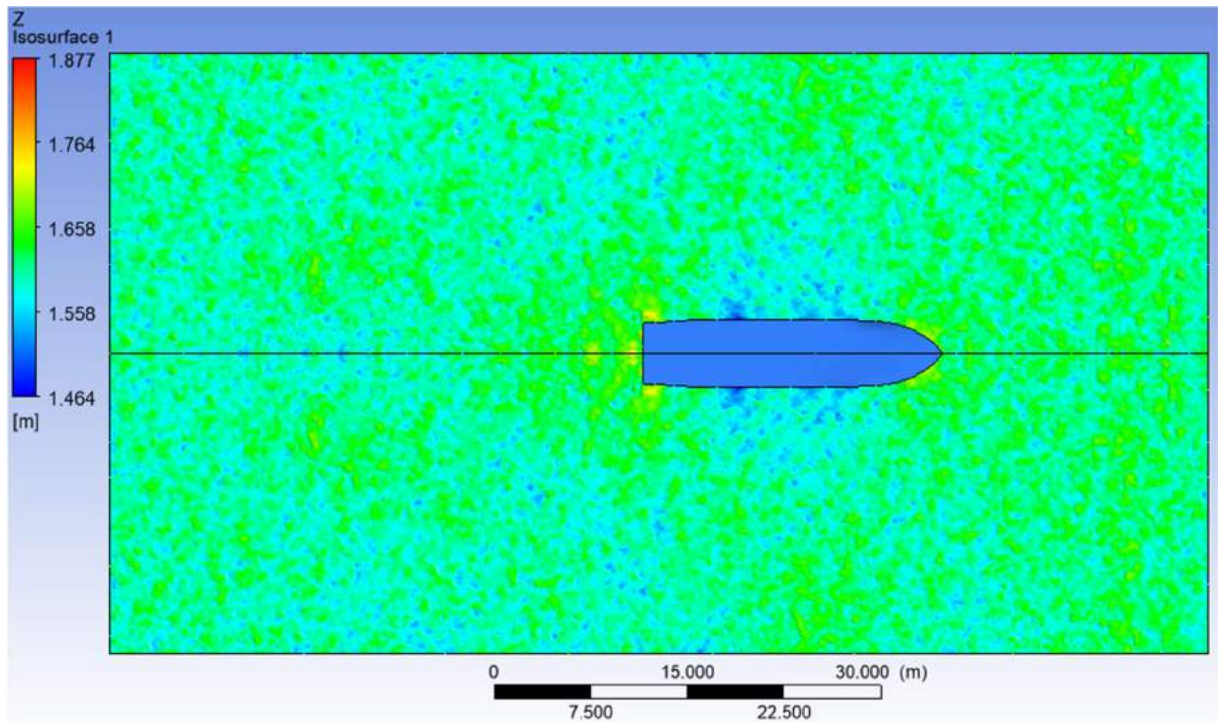
Lampiran B. 3 Kontur tegangan geser model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 5 knot



Lampiran B. 4 Kontur energi kinetic turbulen model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 5 knot

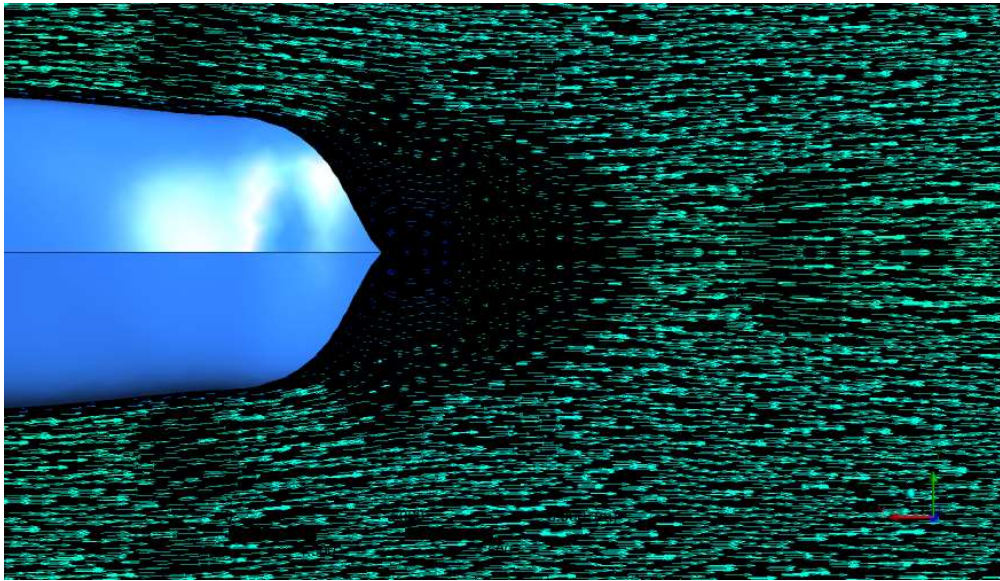


Lampiran B. 5 Kontur tekanan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 5 knot

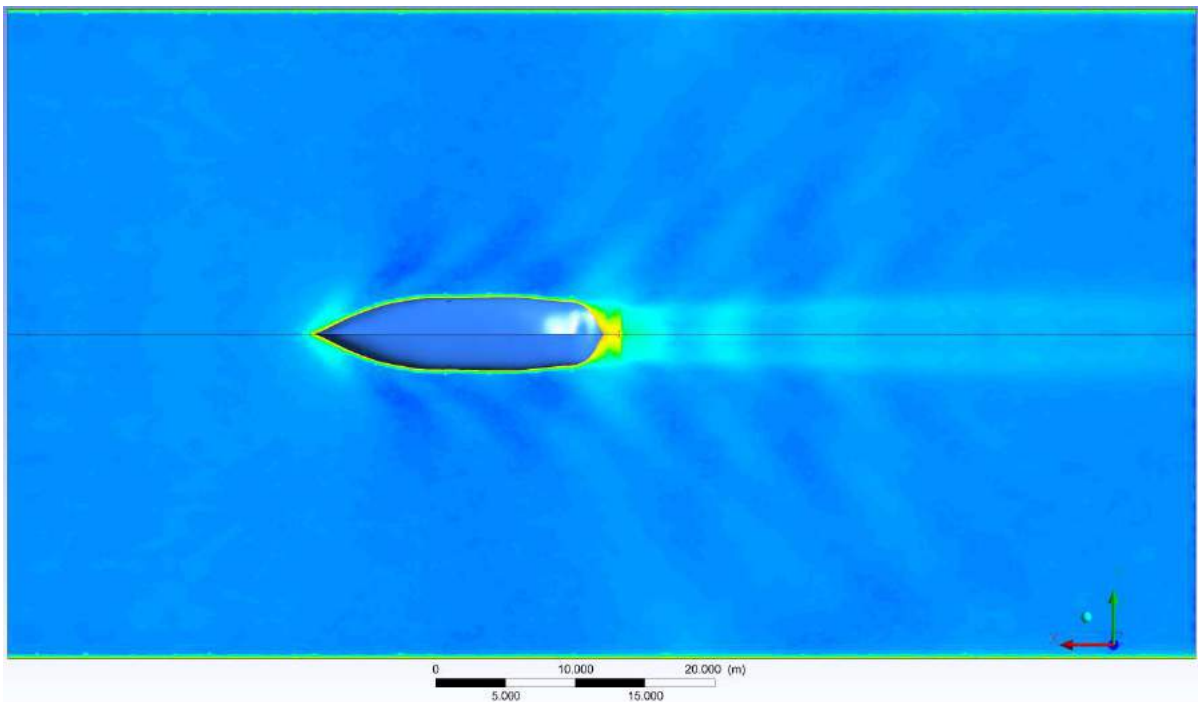


Lampiran B. 6 Kontur *free surface* model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 5 knot

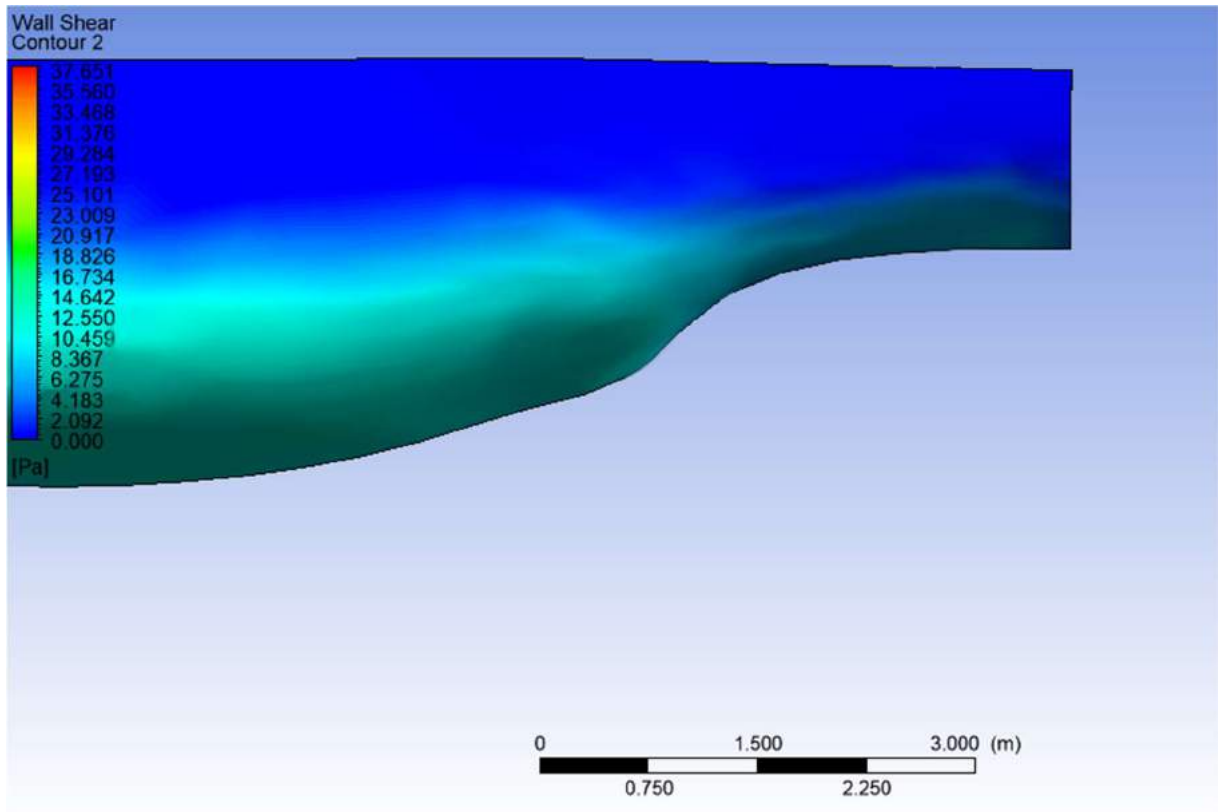
7 Knot



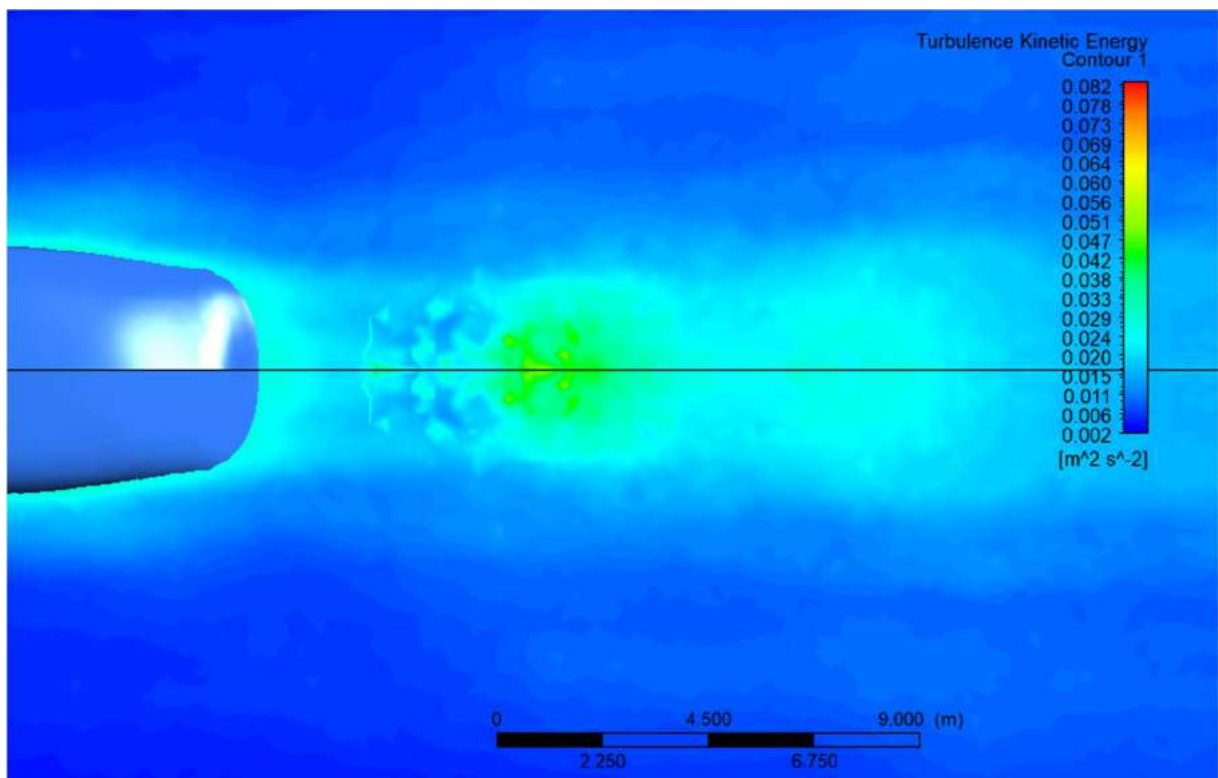
Lampiran B. 7 Vektor kecepatan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 7 knot



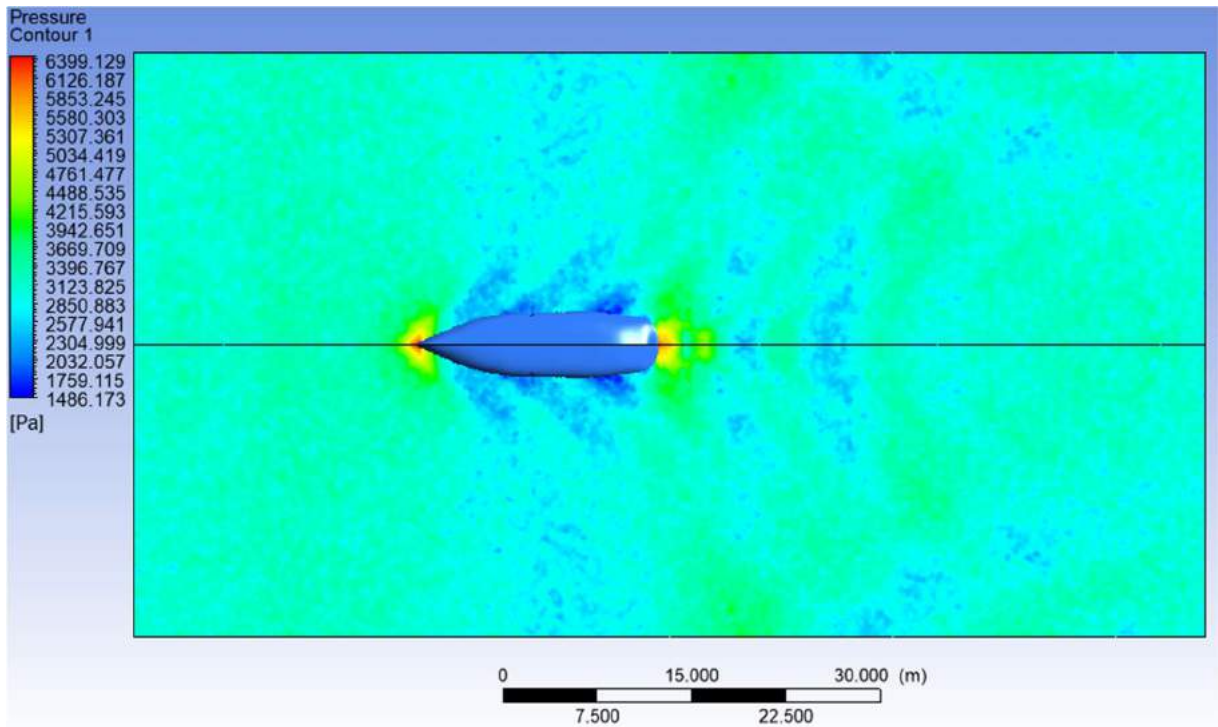
Lampiran B. 8 Kontur kecepatan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 7 knot



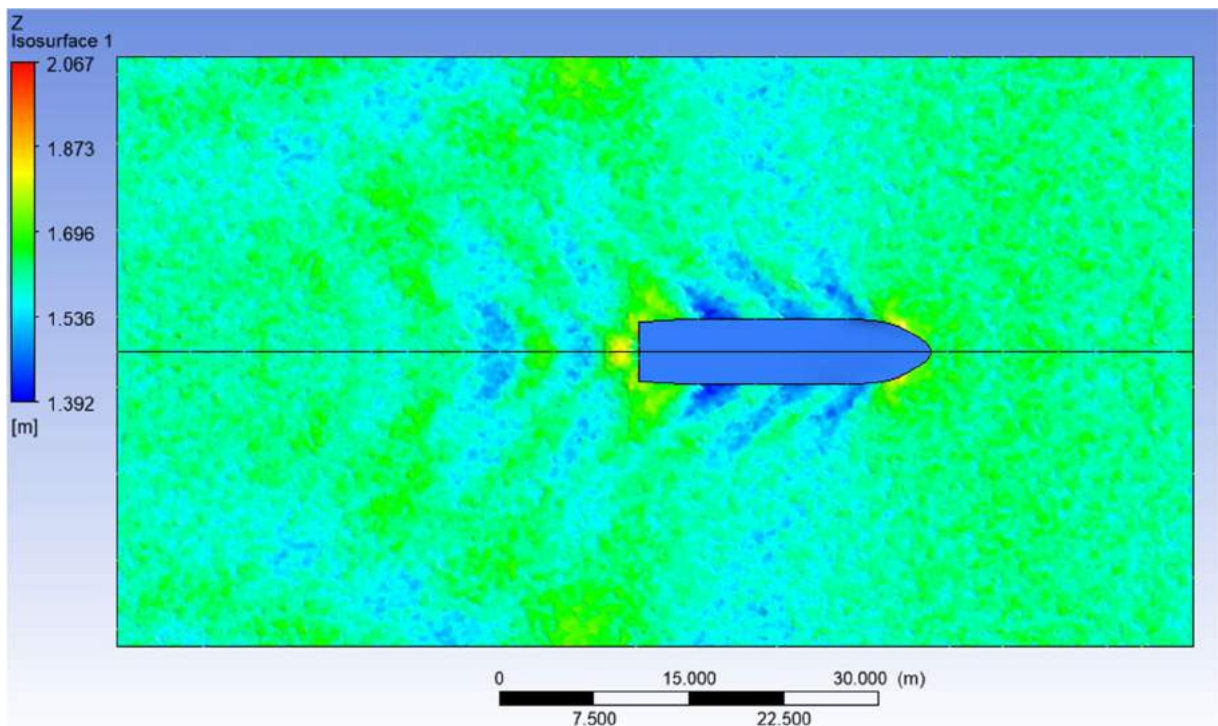
Lampiran B. 9 Kontur tegangan geser model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 7 knot



Lampiran B. 10 Kontur energi kinetik turbulen model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 7 knot

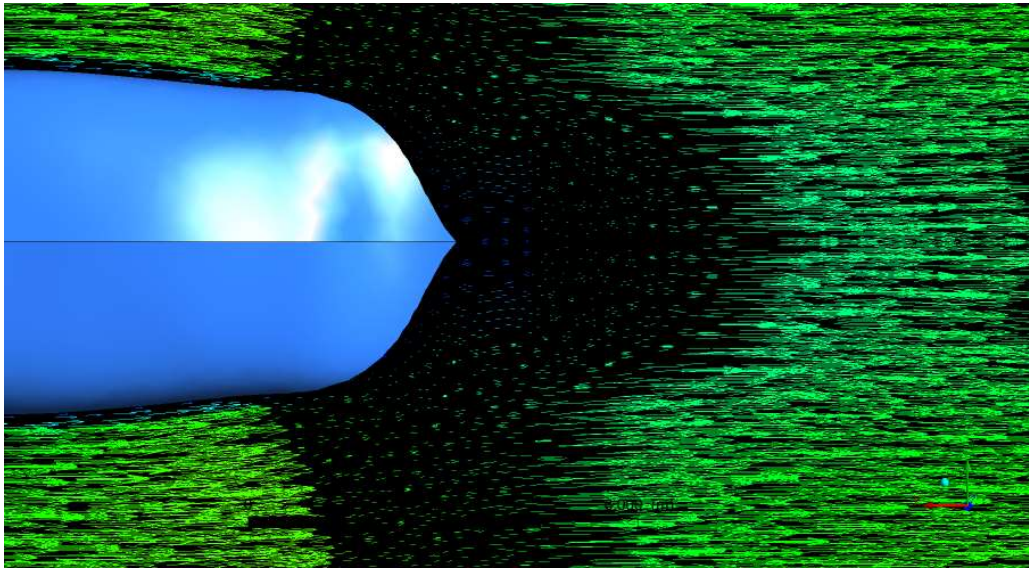


Lampiran B. 11 Kontur tekanan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 7 knot

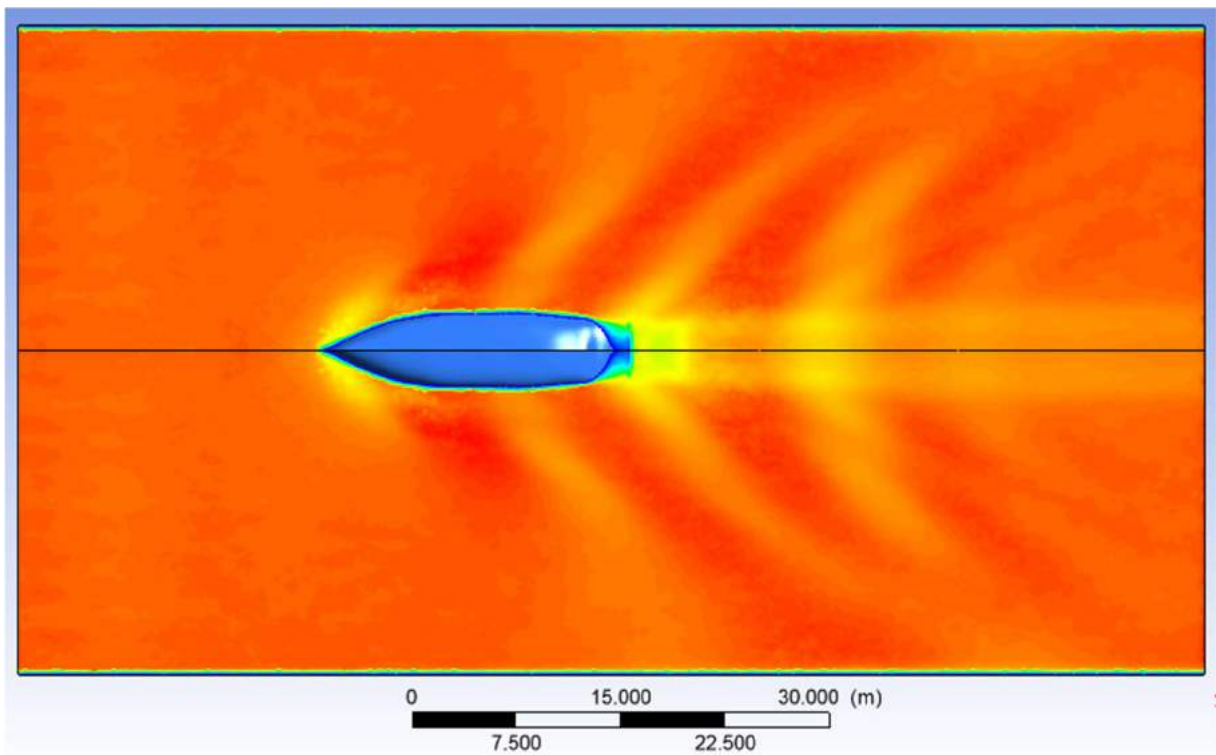


Lampiran B. 12 Kontur *free surface* model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 7 knot

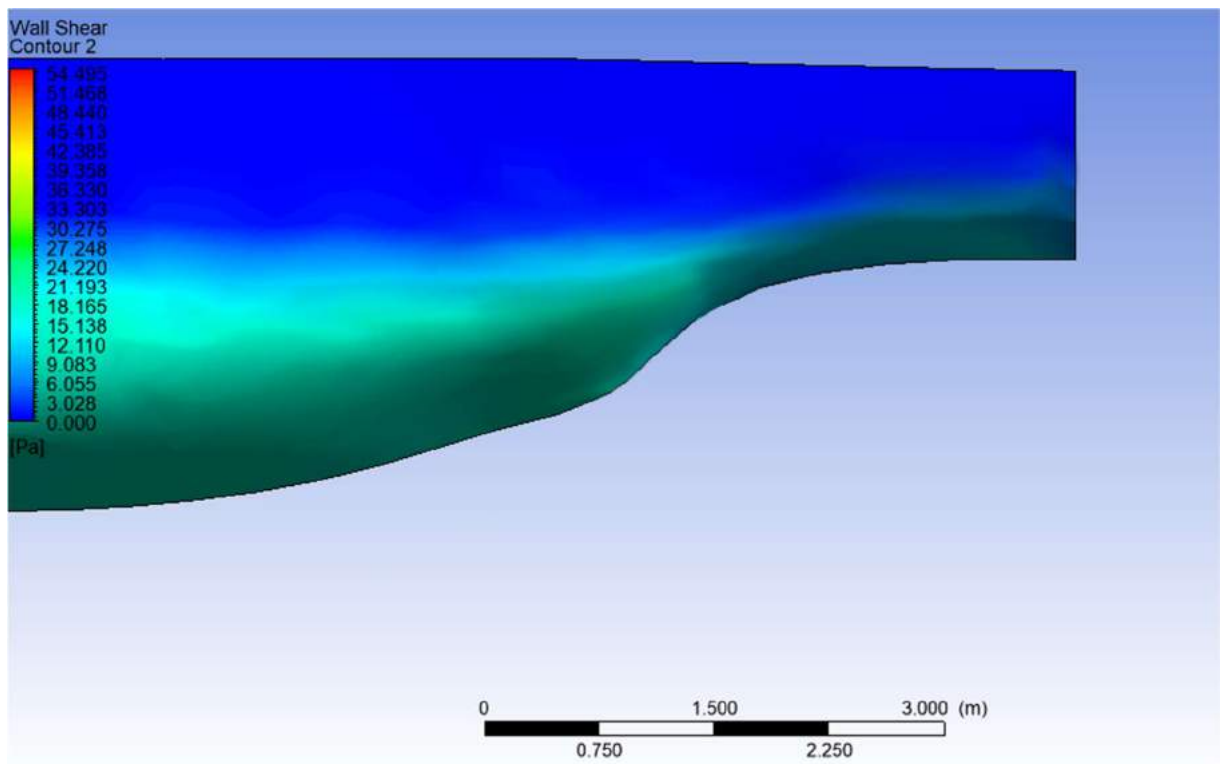
9 Knot



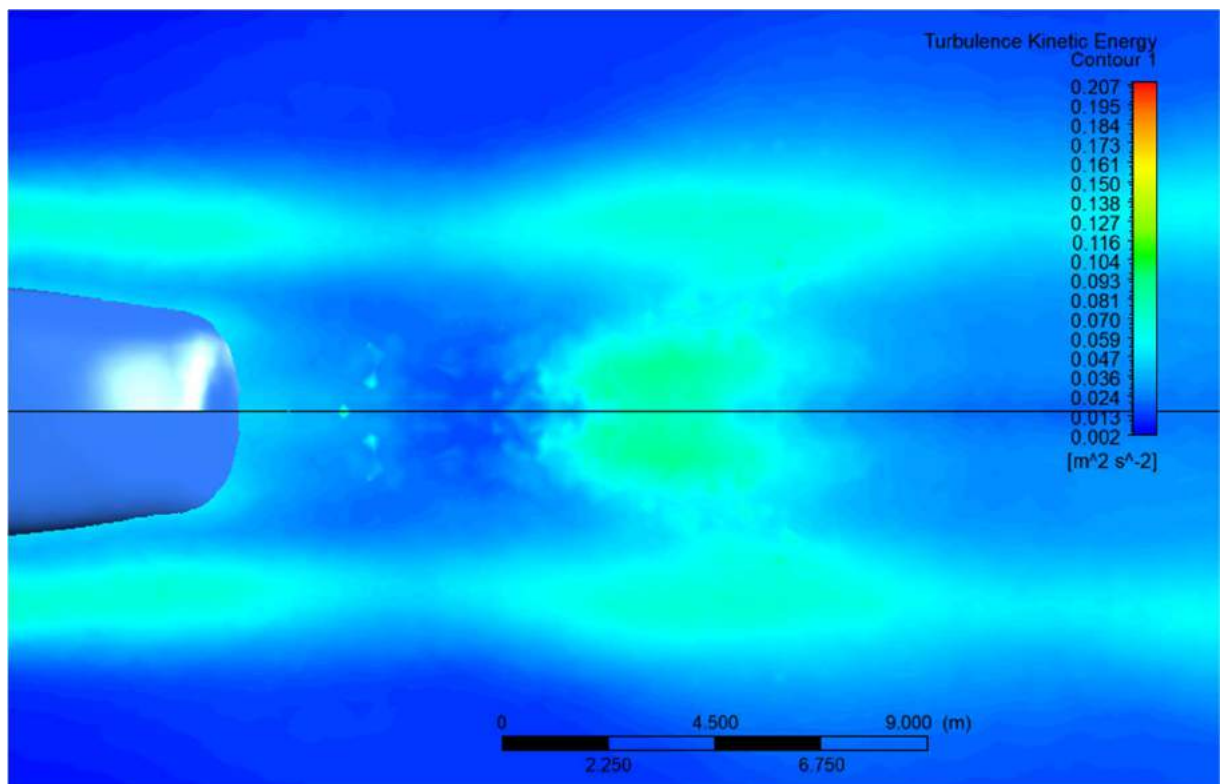
Lampiran B. 13 Vektor kecepatan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 9 knot



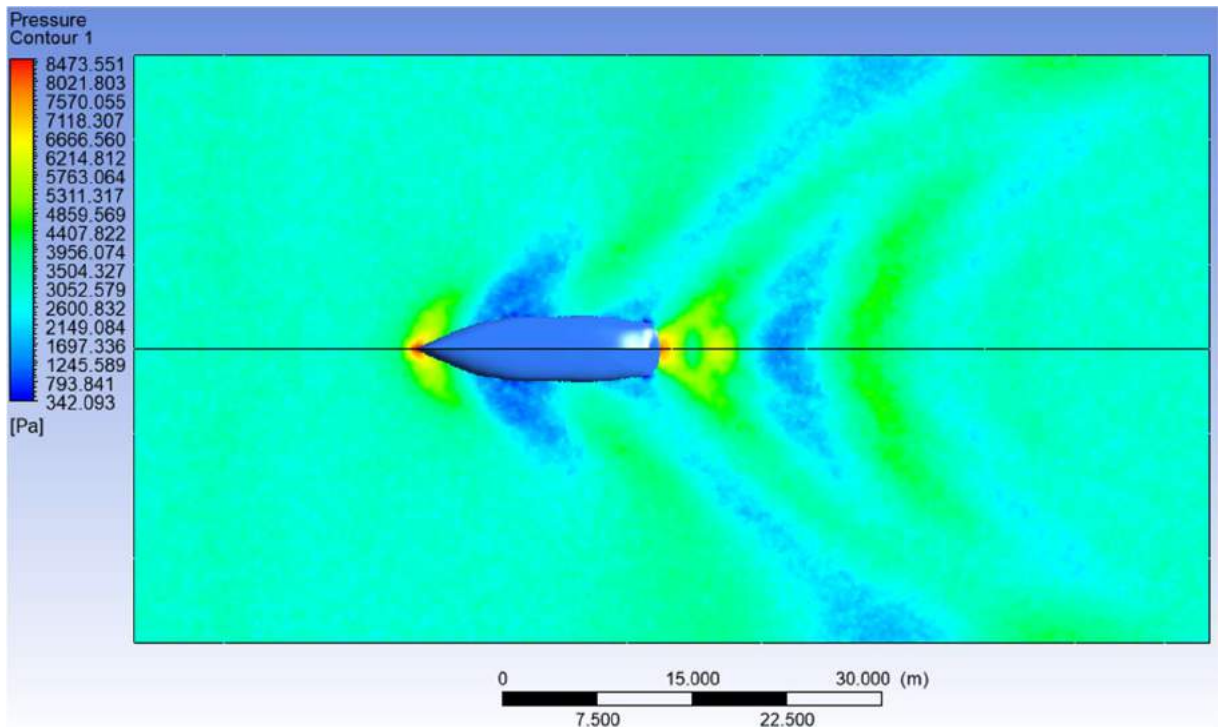
Lampiran B. 14 Kontur kecepatan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 9 knot



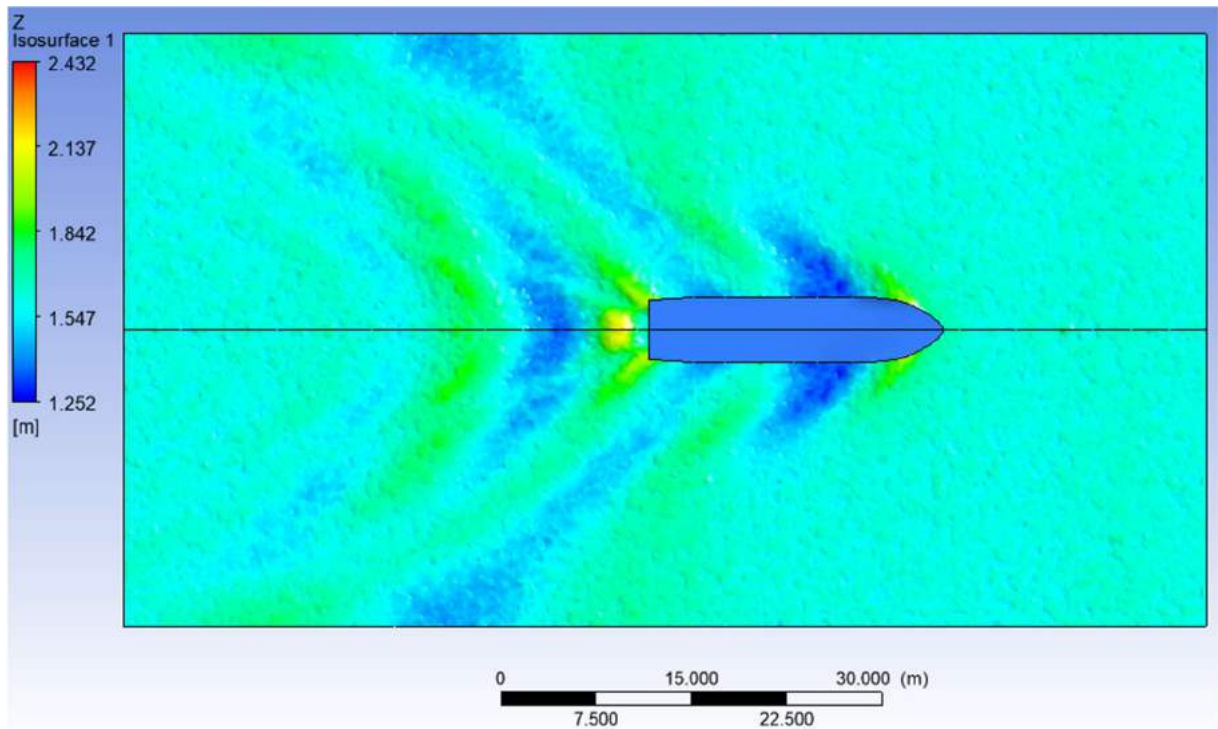
Lampiran B. 15 Kontur tegangan geser model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 9 knot



Lampiran B. 16 Kontur tekanan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 9 knot

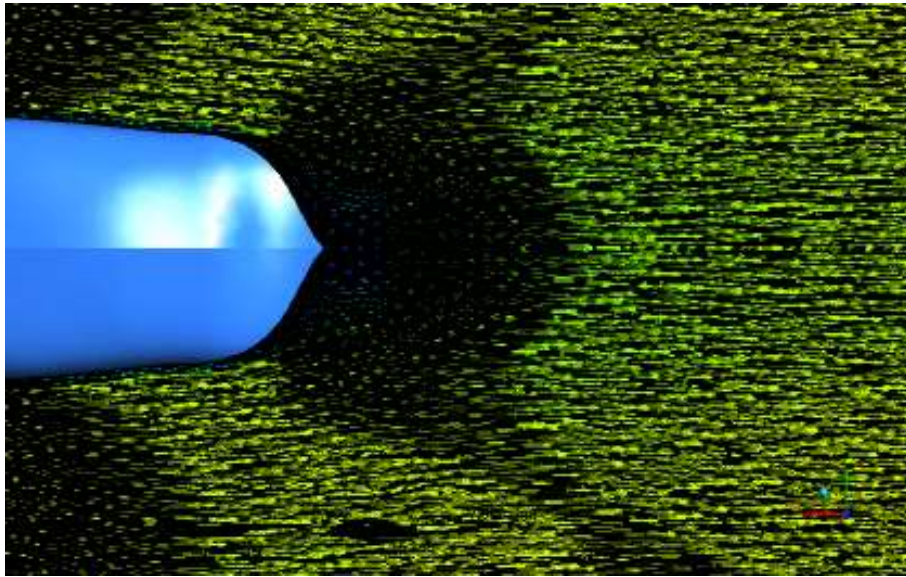


Lampiran B. 17 Kontur tekanan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 9 knot

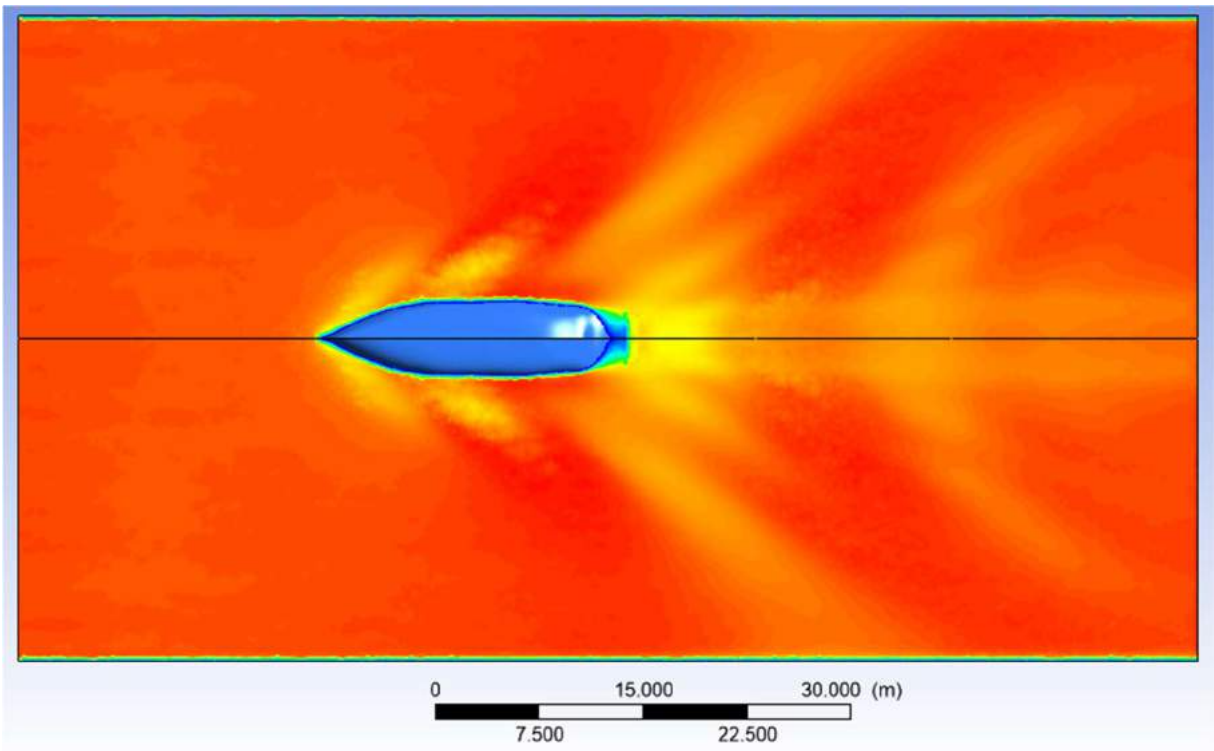


Lampiran B. 18 Kontur *free surface* model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 9 knot

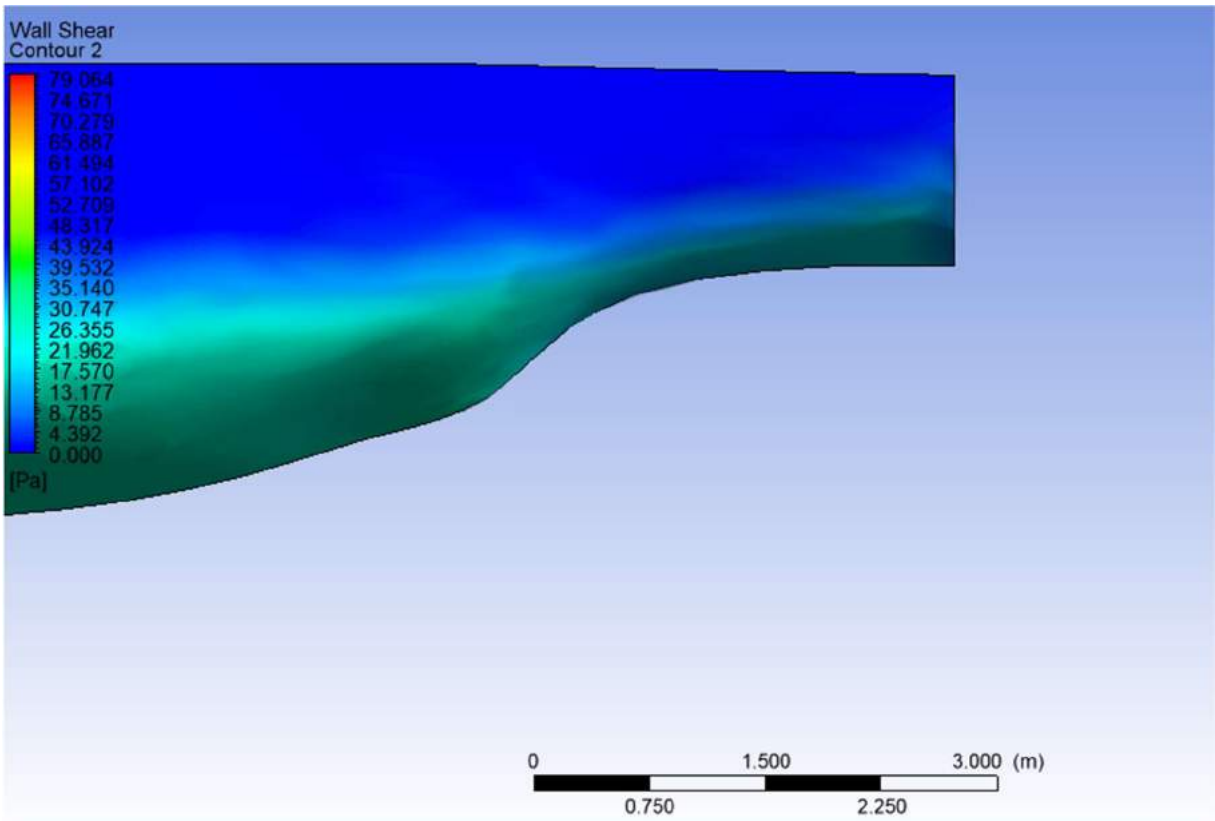
11 Knot



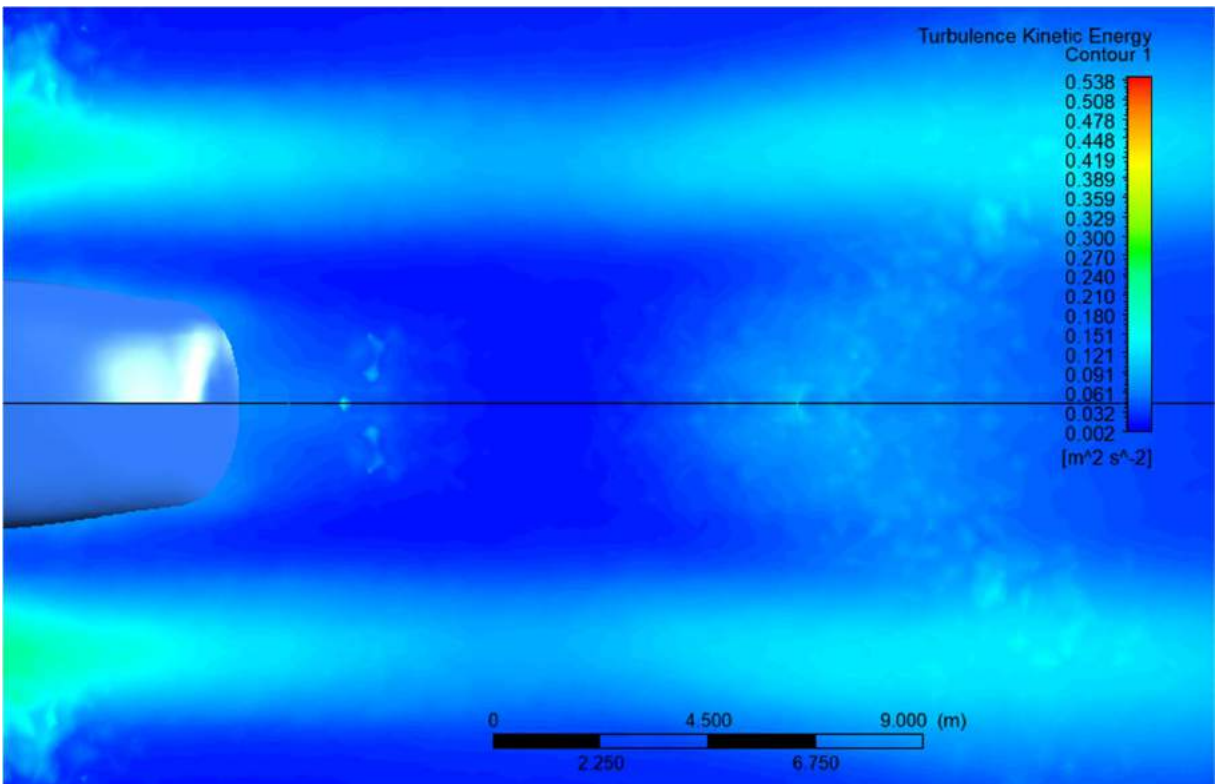
Lampiran B. 19 Vektor kecepatan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 11 knot



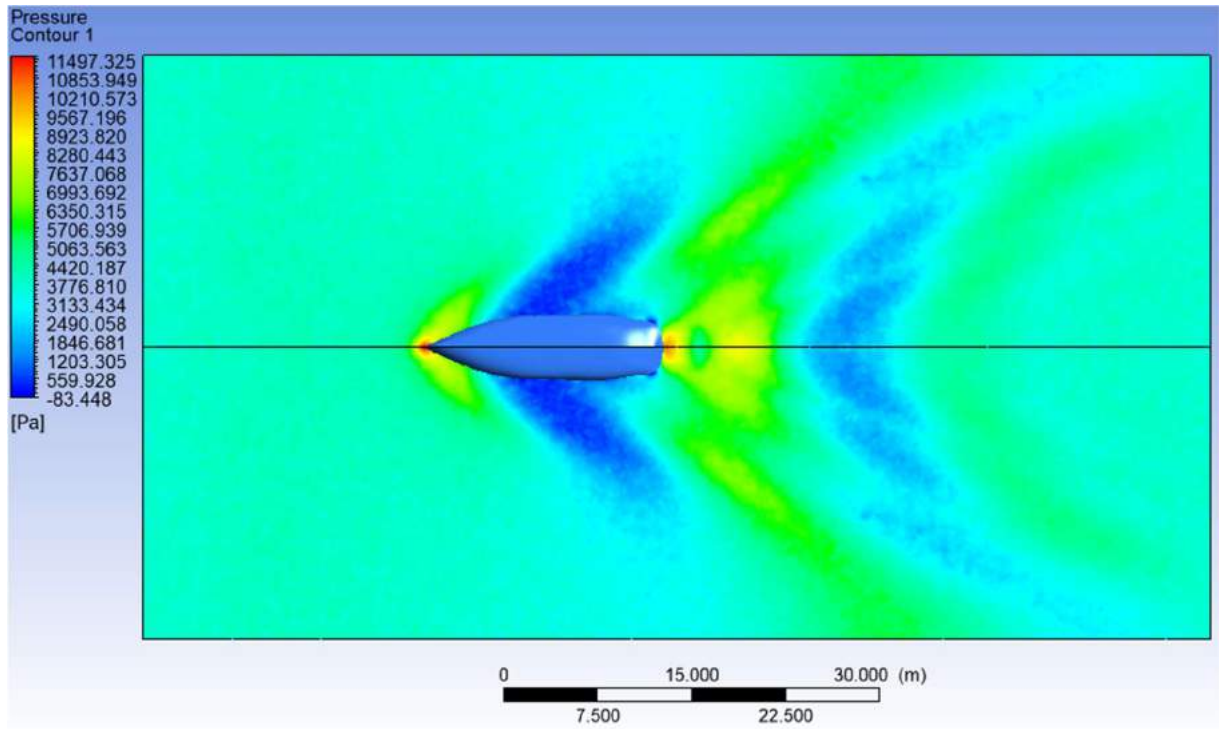
Lampiran B. 20 Kontur kecepatan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 11 knot



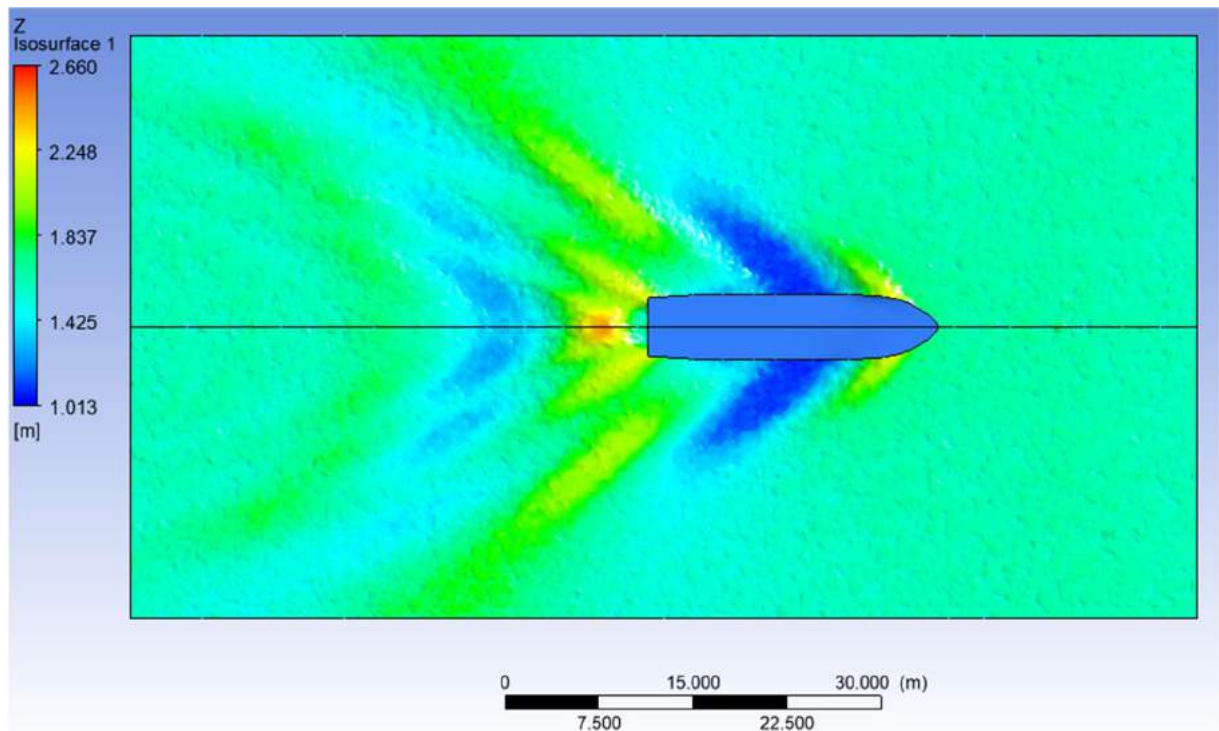
Lampiran B. 21 Kontur tegangan geser model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 11 knot



Lampiran B. 22 Kontur energi kinetic turbulen model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 11 knot



Lampiran B. 23 Kontur tekanan model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 11 knot

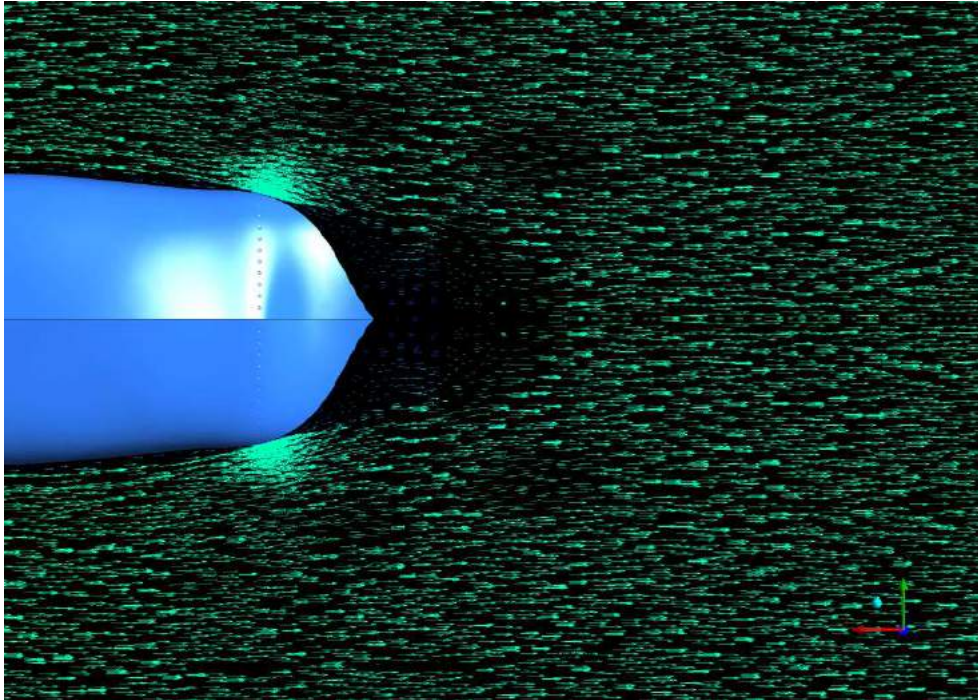


Lampiran B. 24 Kontur *free surface* model lambung tanpa *dimple* pada kecepatan 11 knot

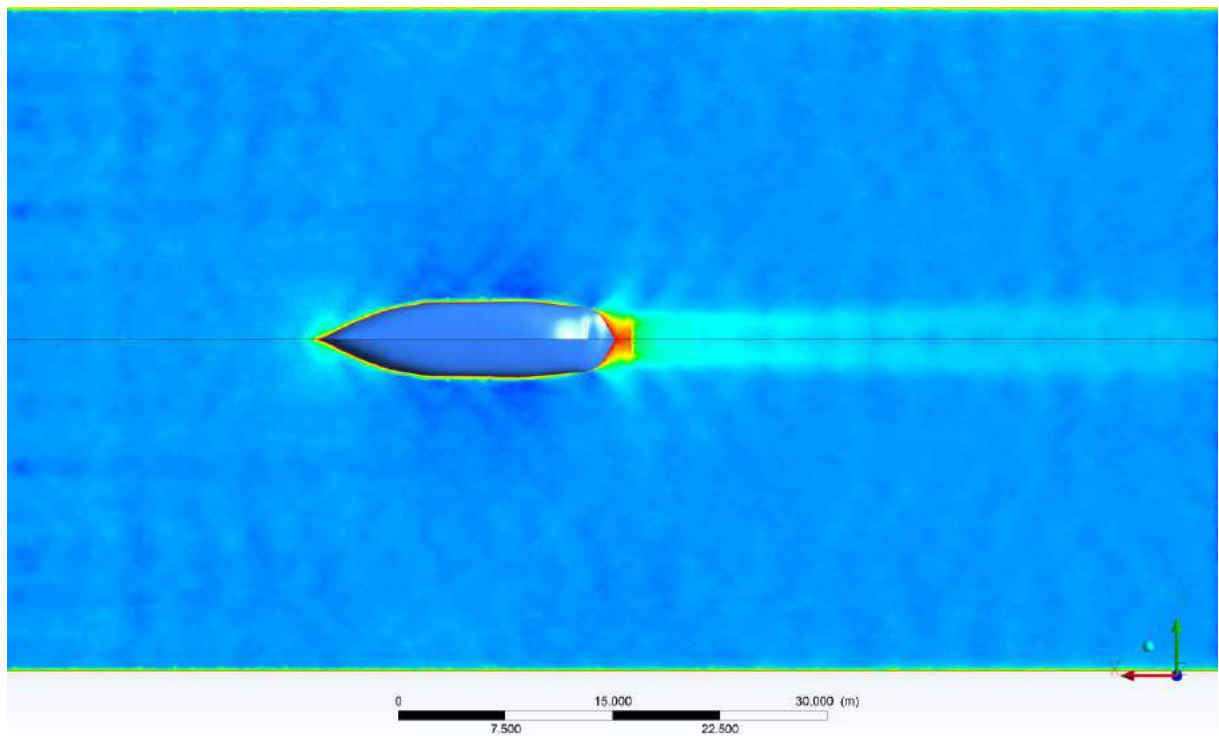
LAMPIRAN C
KONTUR ALIRAN SIMULASI *DIMPLE SURFACED HULL 1*

Lampiran ini berisi kontur kecepatan aliran, vektor kecepatan aliran, kontur tegangan geser kontur energi kinetik turbulensi, kontur tekanan serta kontur *free surface* pada setiap kecepatan yang diuji pada model *dimple surfaced hull 1*.

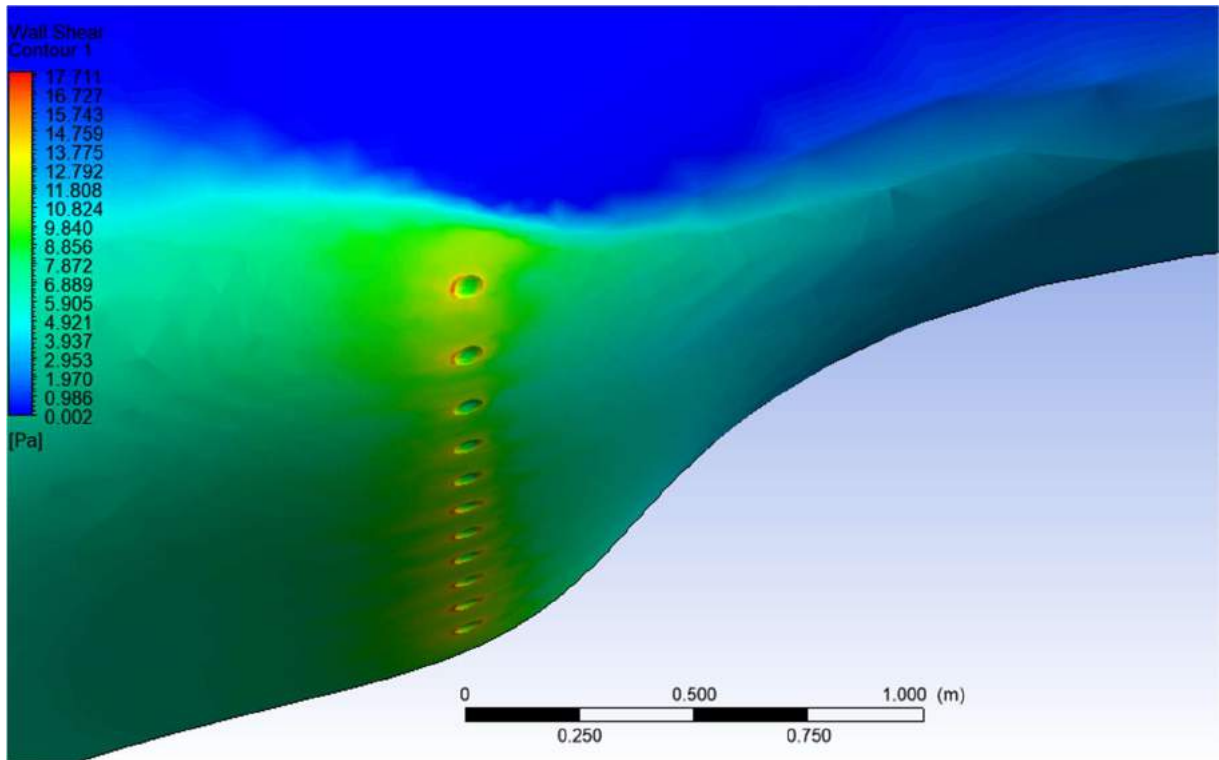
5 Knot



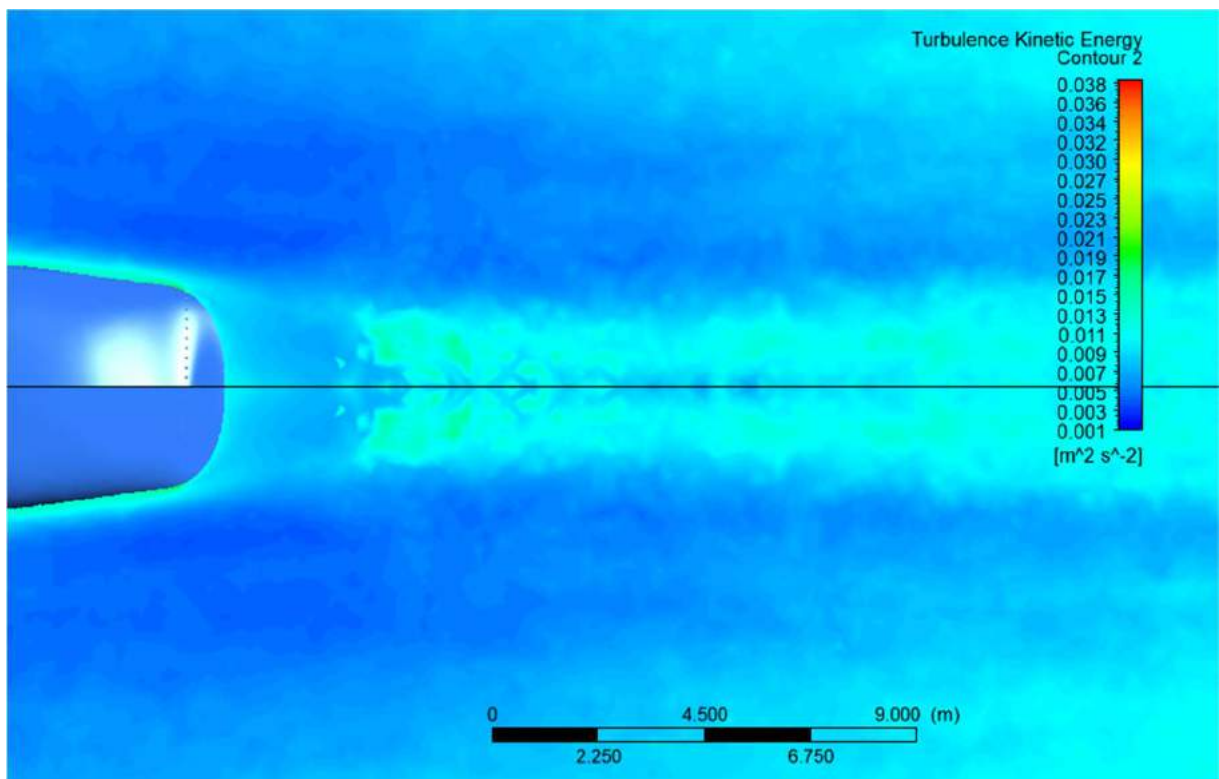
Lampiran C. 1 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 5 knot



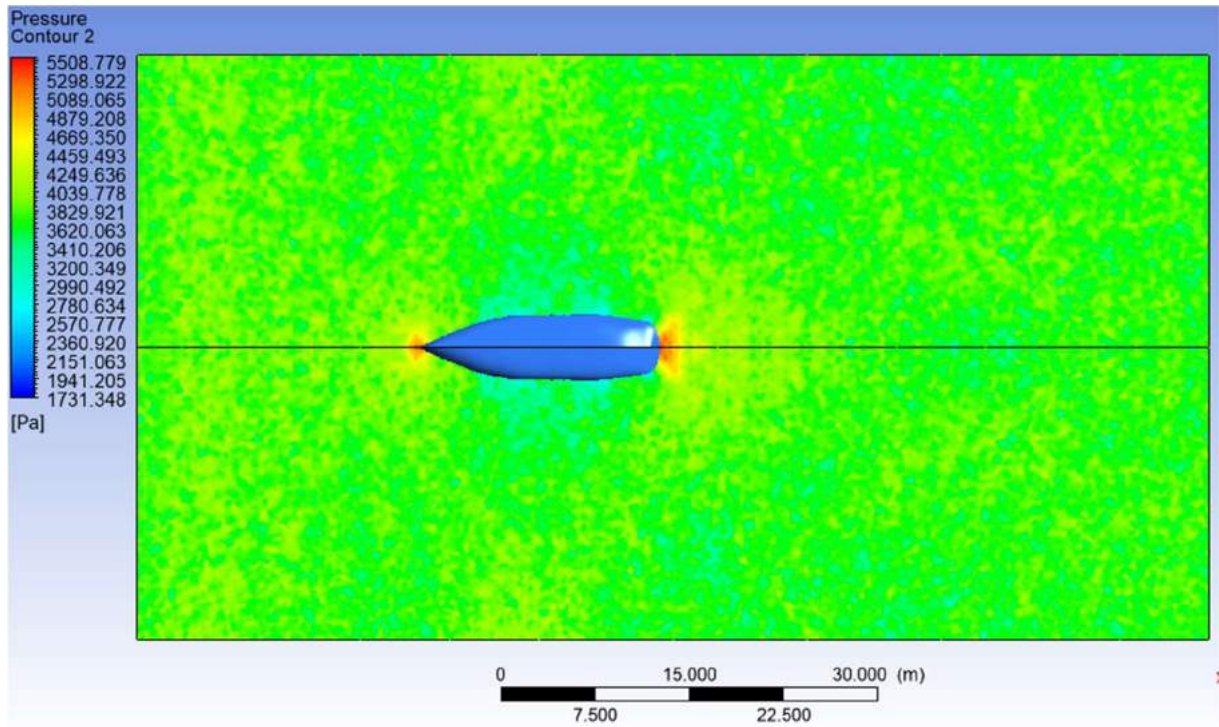
Lampiran C. 2 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 5 knot



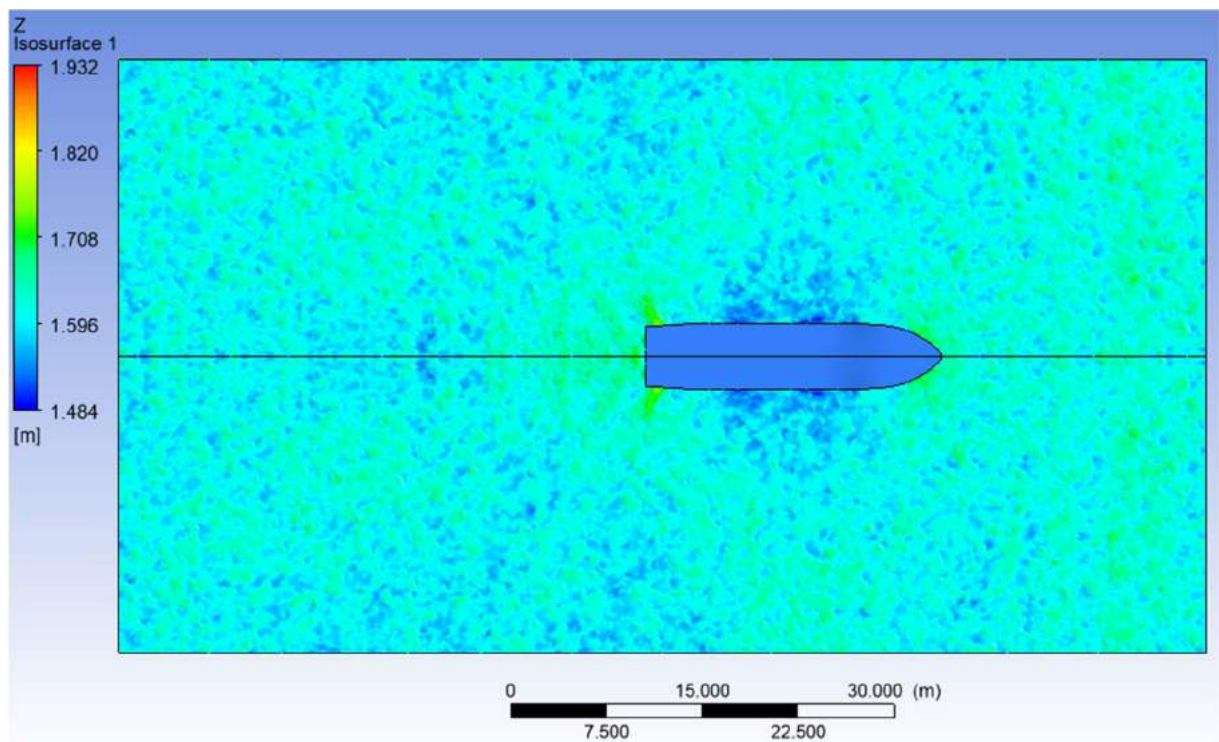
Lampiran C. 3 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 5 knot



Lampiran C. 4 Kontur energi kinetic turbulen model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 5 knot

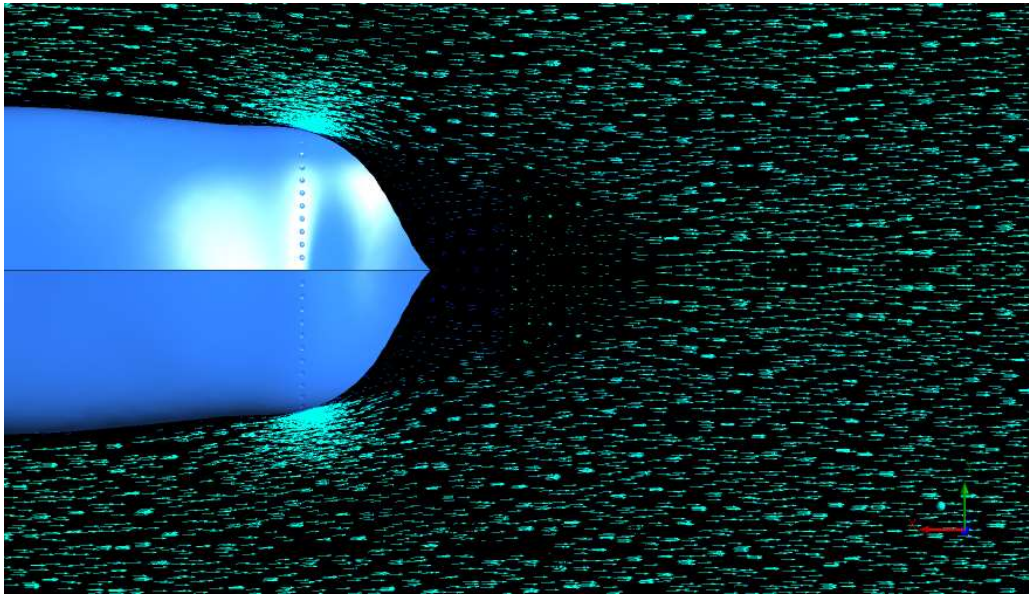


Lampiran C. 5 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 5 knot

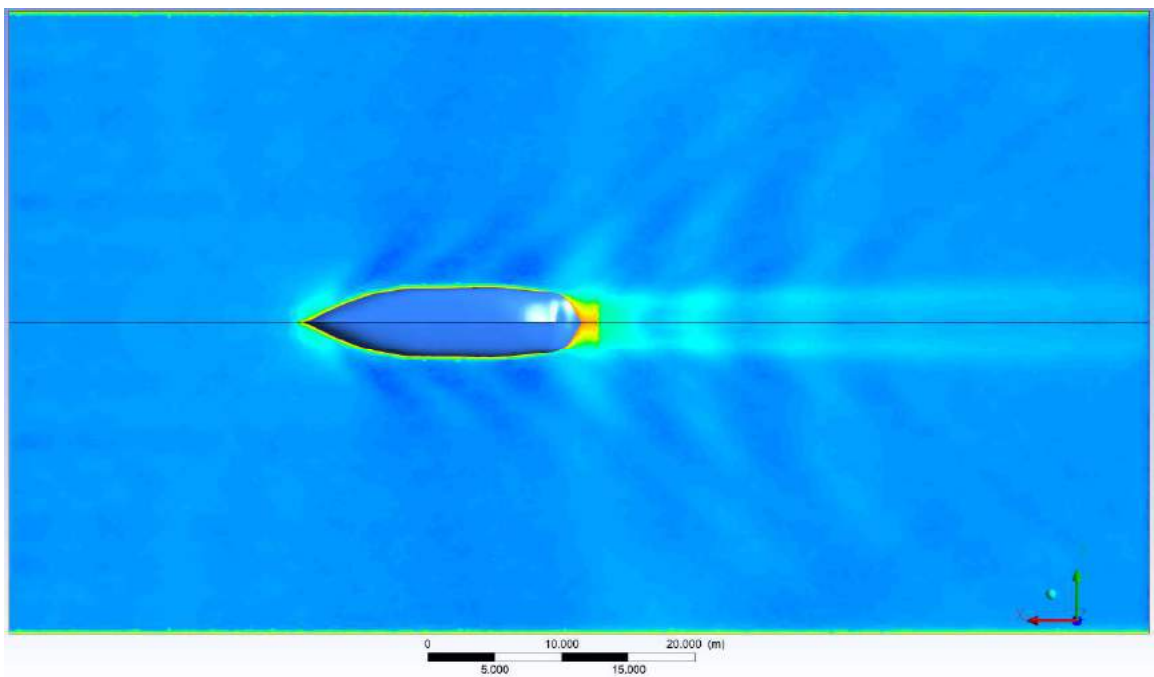


Lampiran C. 6 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 5 knot

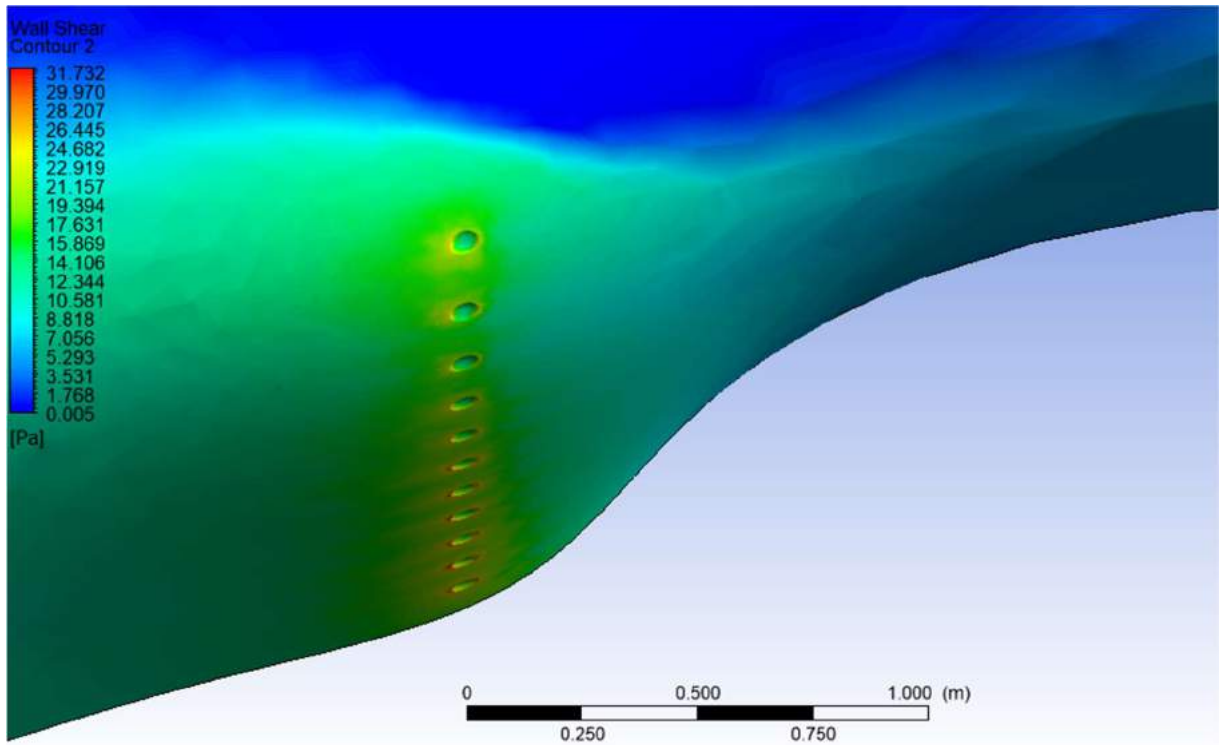
7 knot



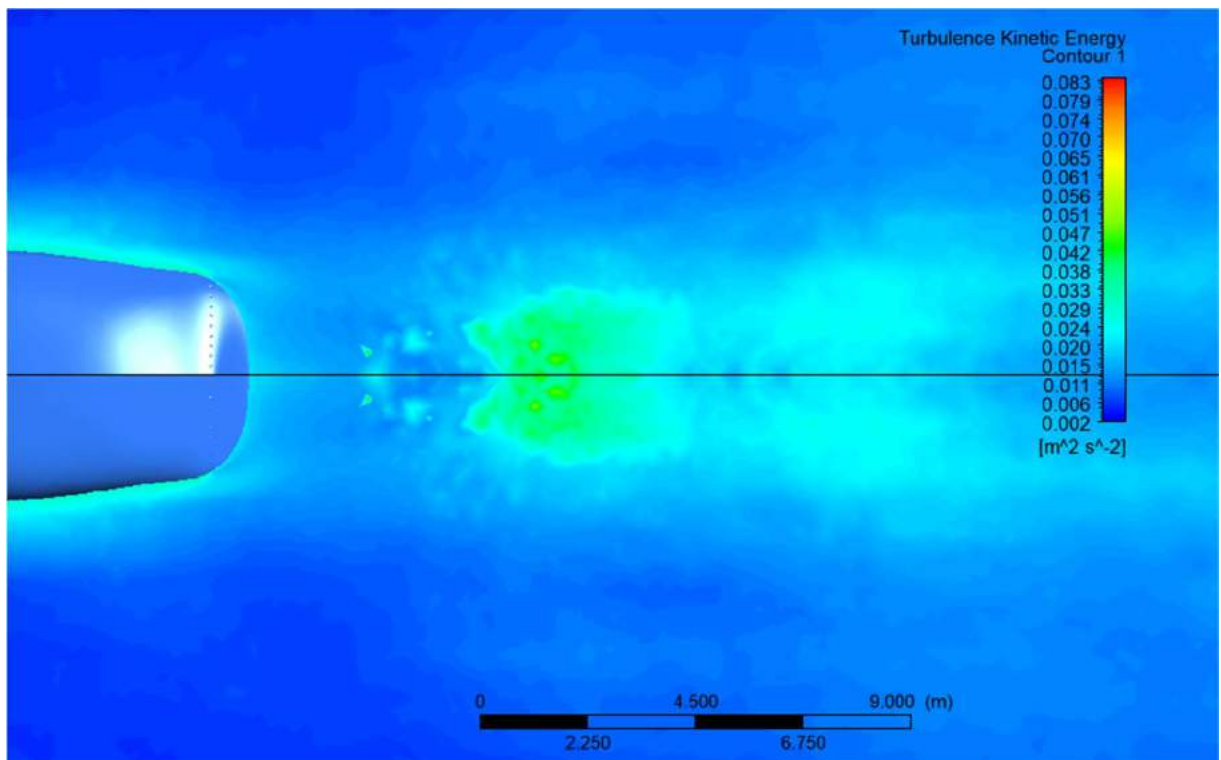
Lampiran C. 7 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 7 knot



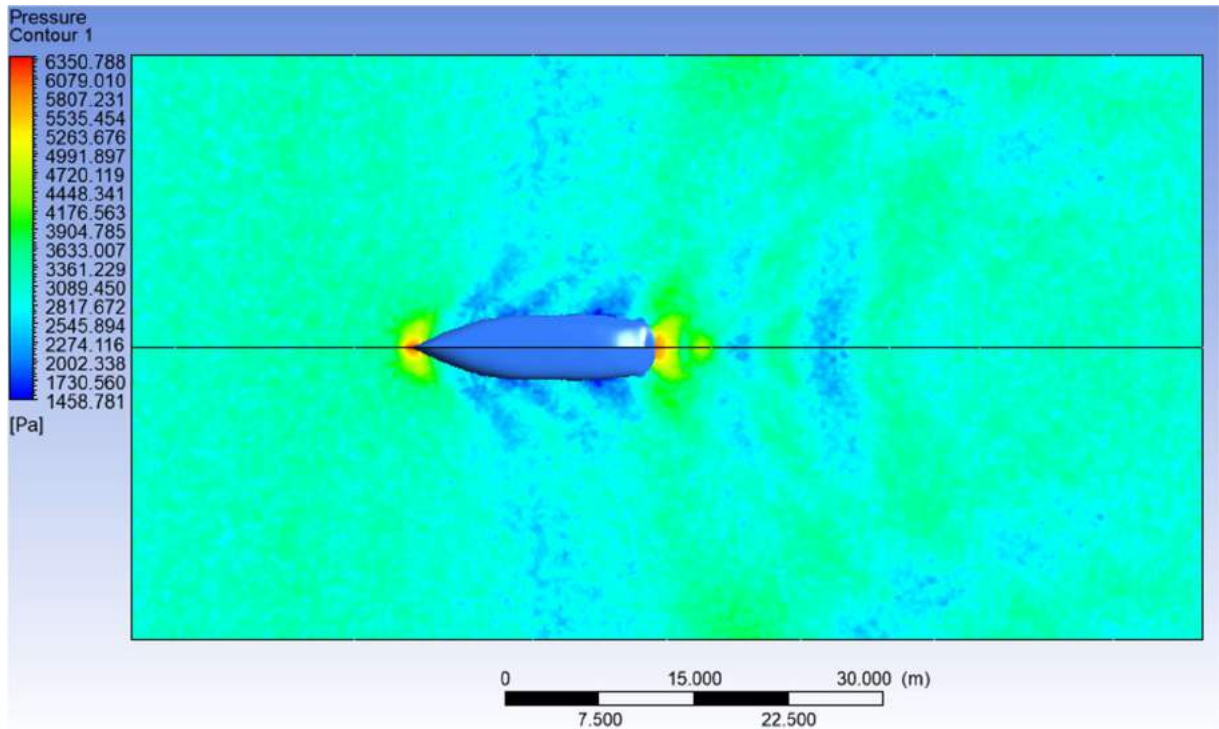
Lampiran C. 8 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 7 knot



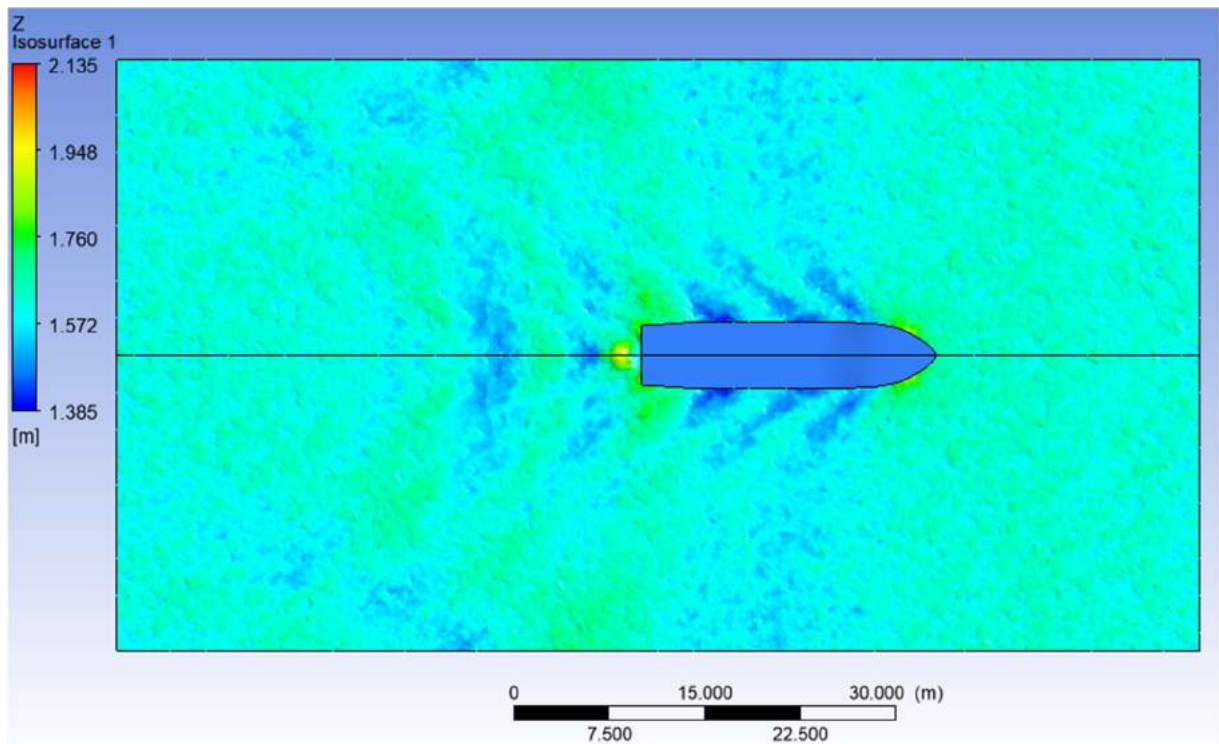
Lampiran C. 9 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 7 knot



Lampiran C. 10 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 7 knot

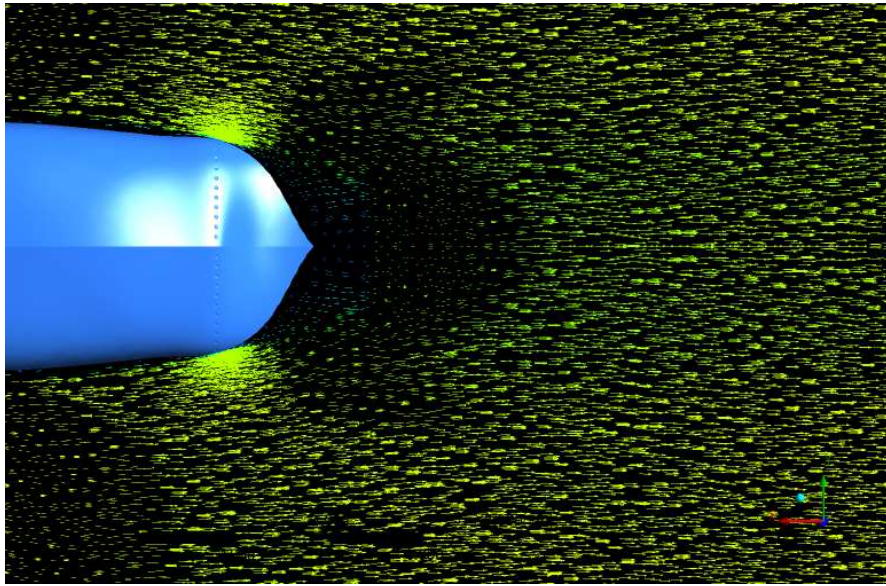


Lampiran C. 11 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 7 knot

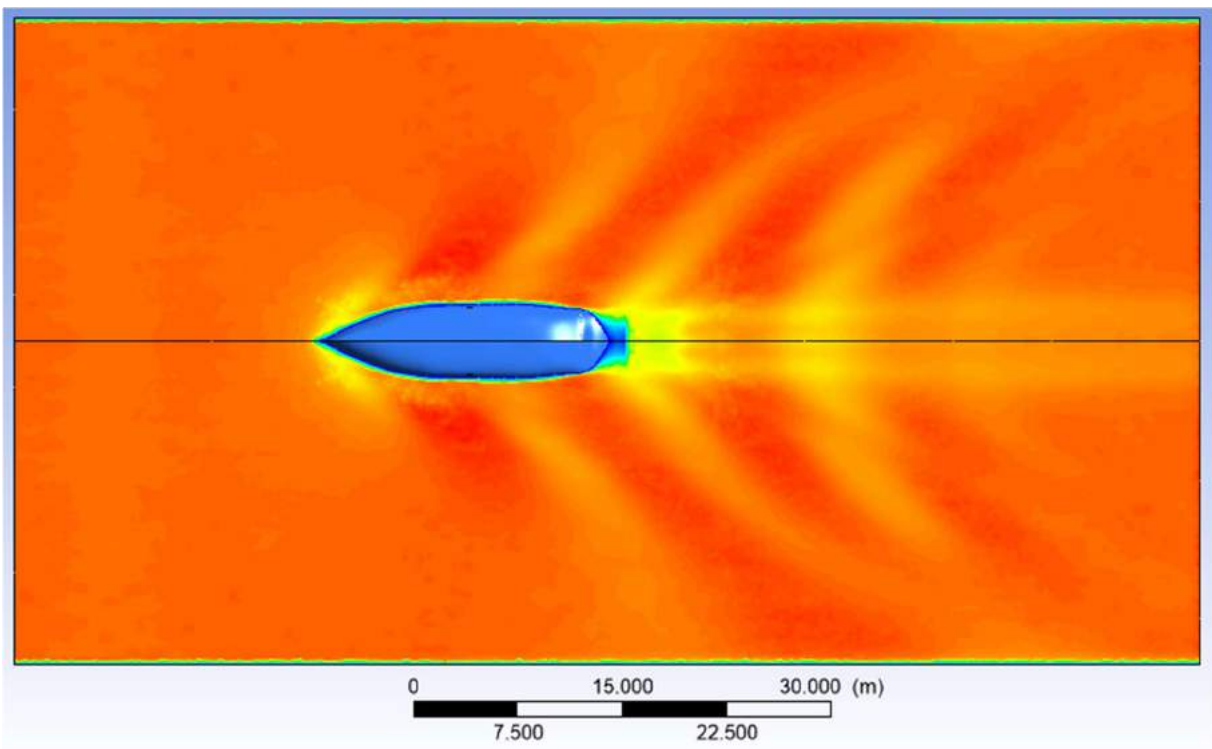


Lampiran C. 12 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 7 knot

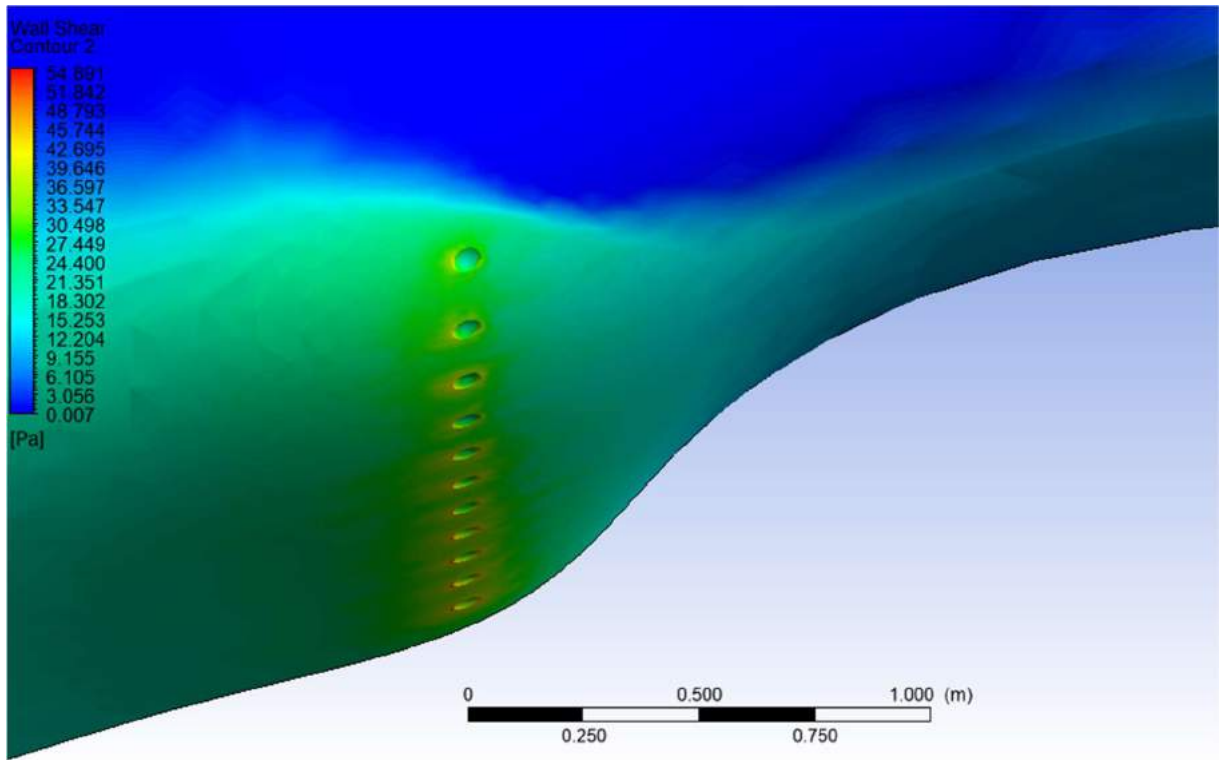
9 Knot



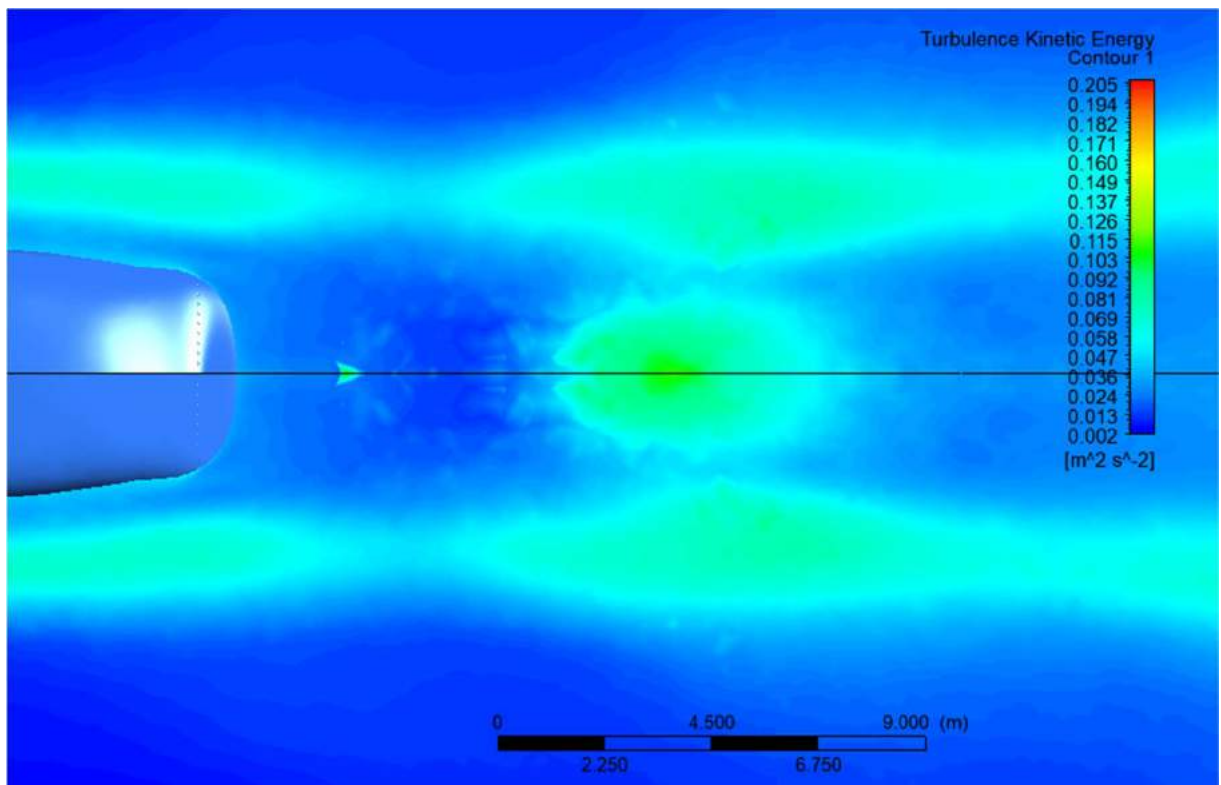
Lampiran C. 13 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 9 knot



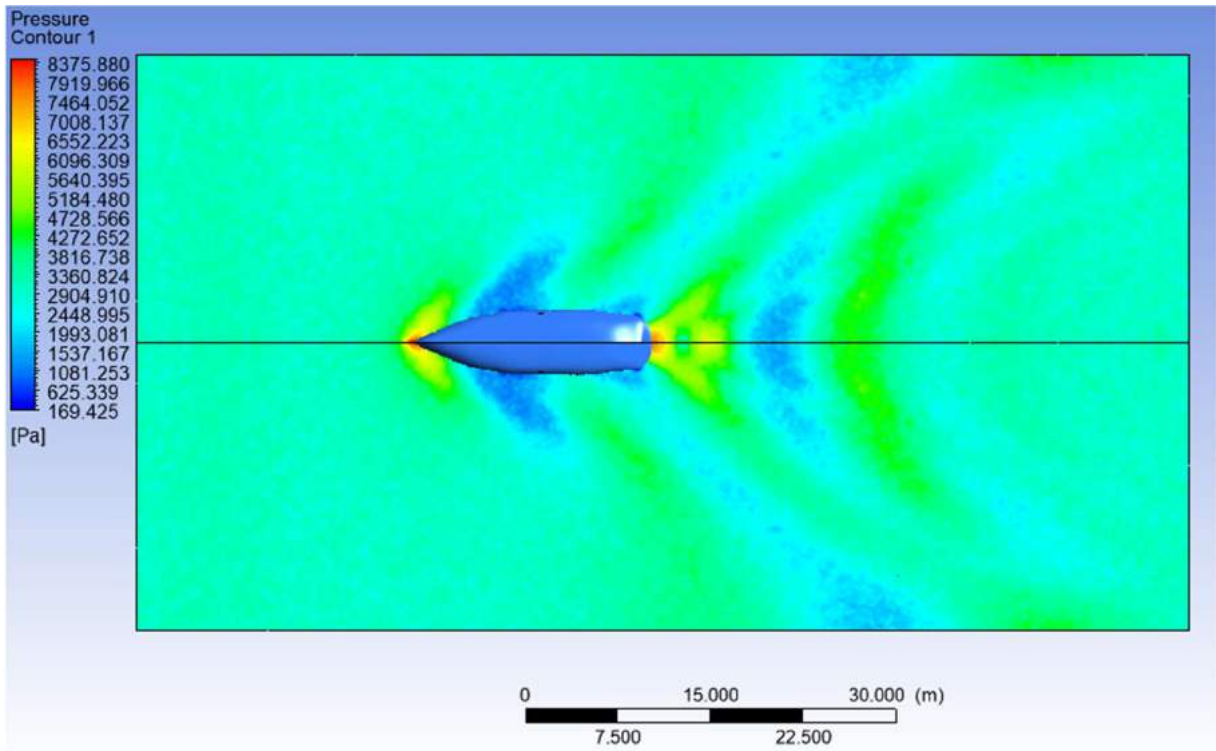
Lampiran C. 14 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 9 knot



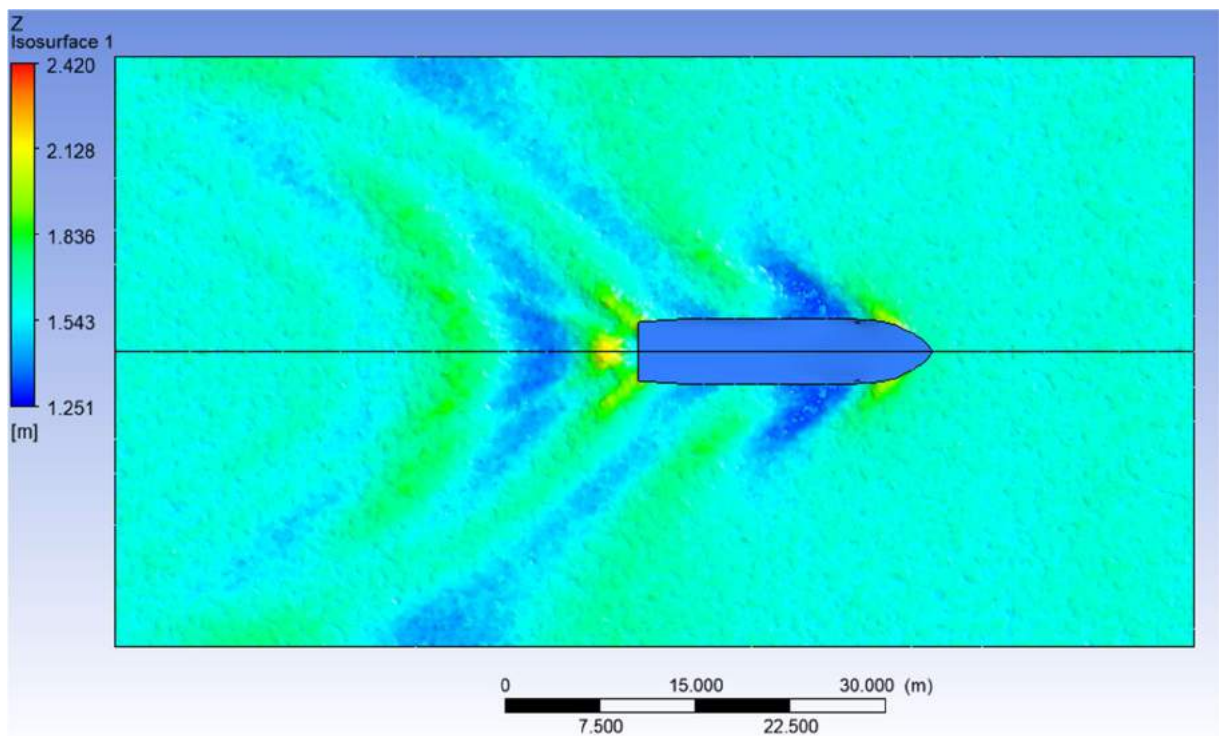
Lampiran C. 15 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 9 knot



Lampiran C. 16 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 9 knot

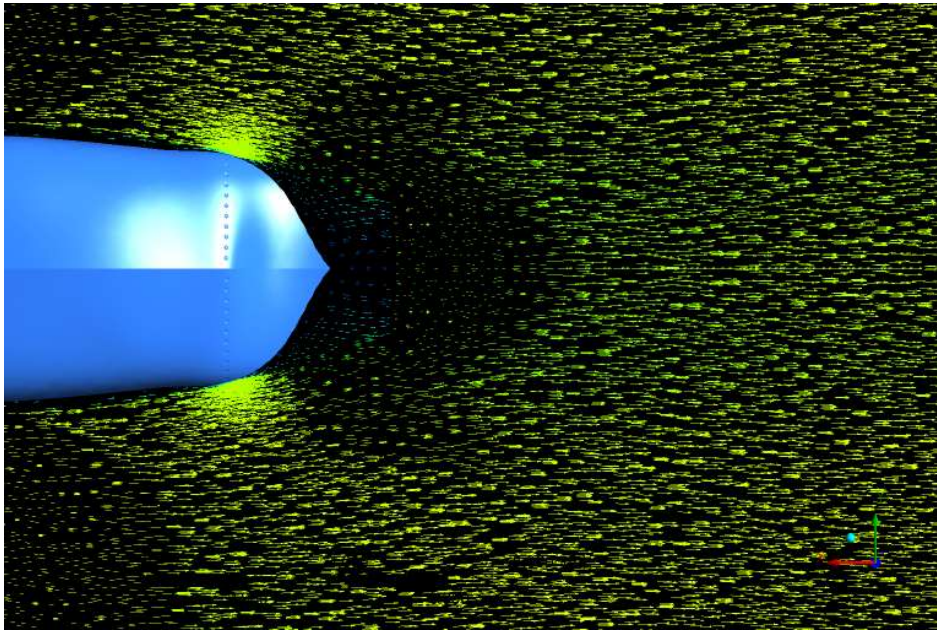


Lampiran C. 17 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 9 knot

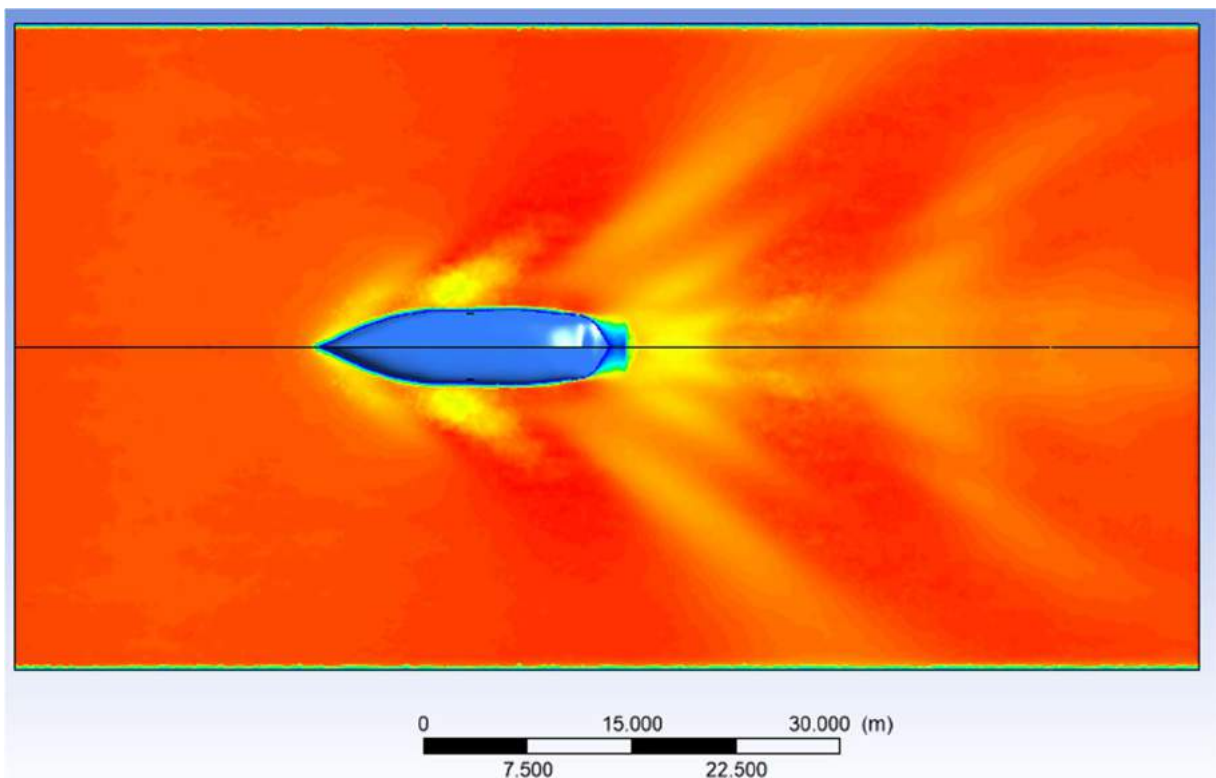


Lampiran C. 18 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 9 knot

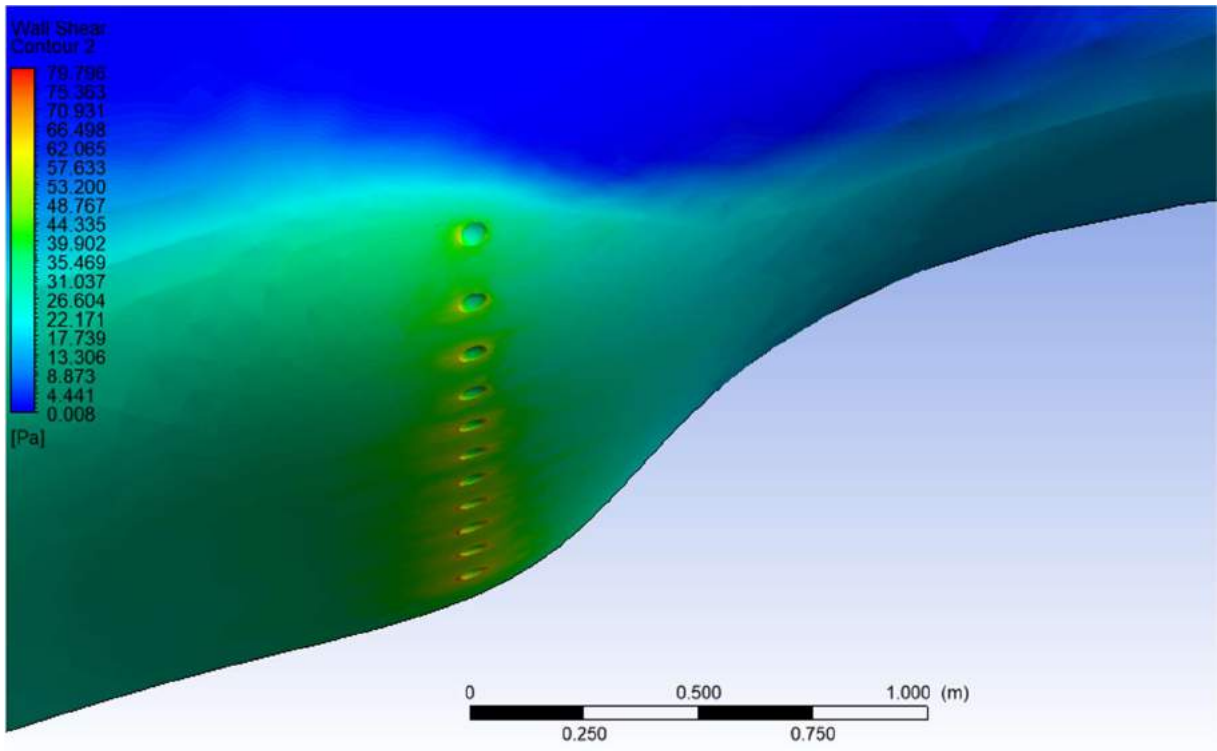
11 Knot



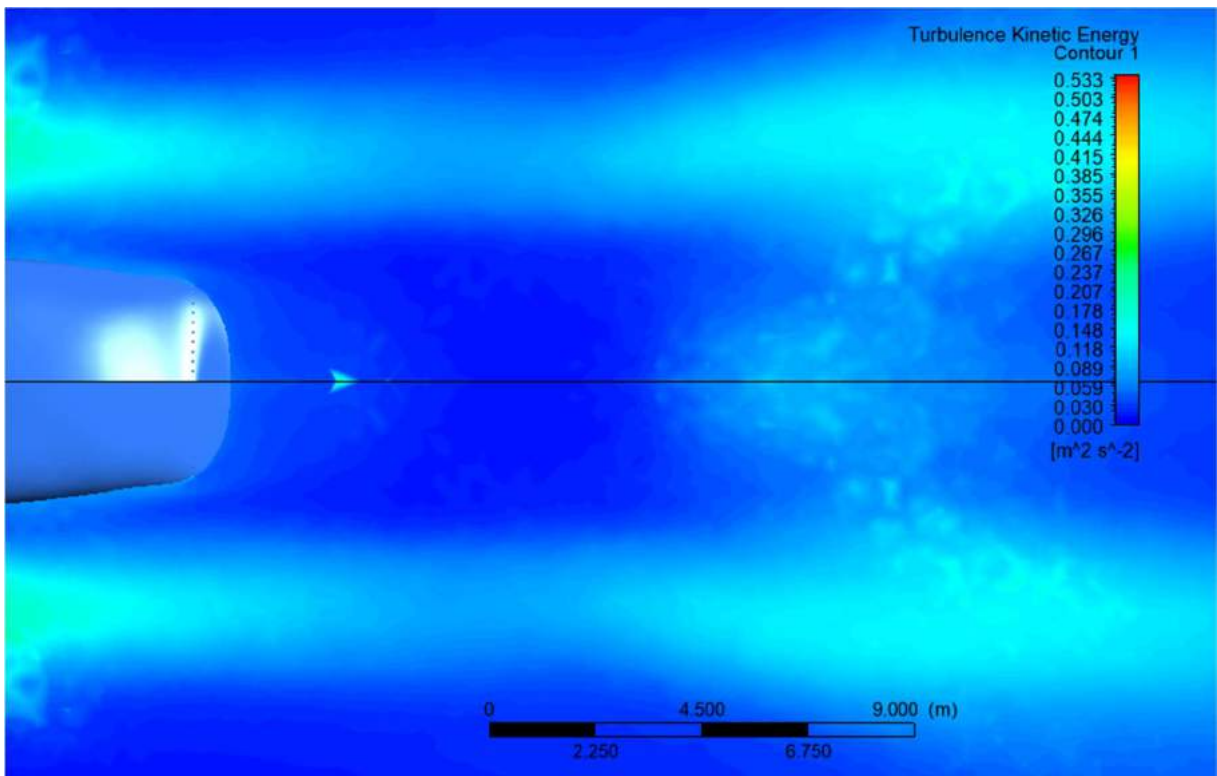
Lampiran C. 19 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 11 knot



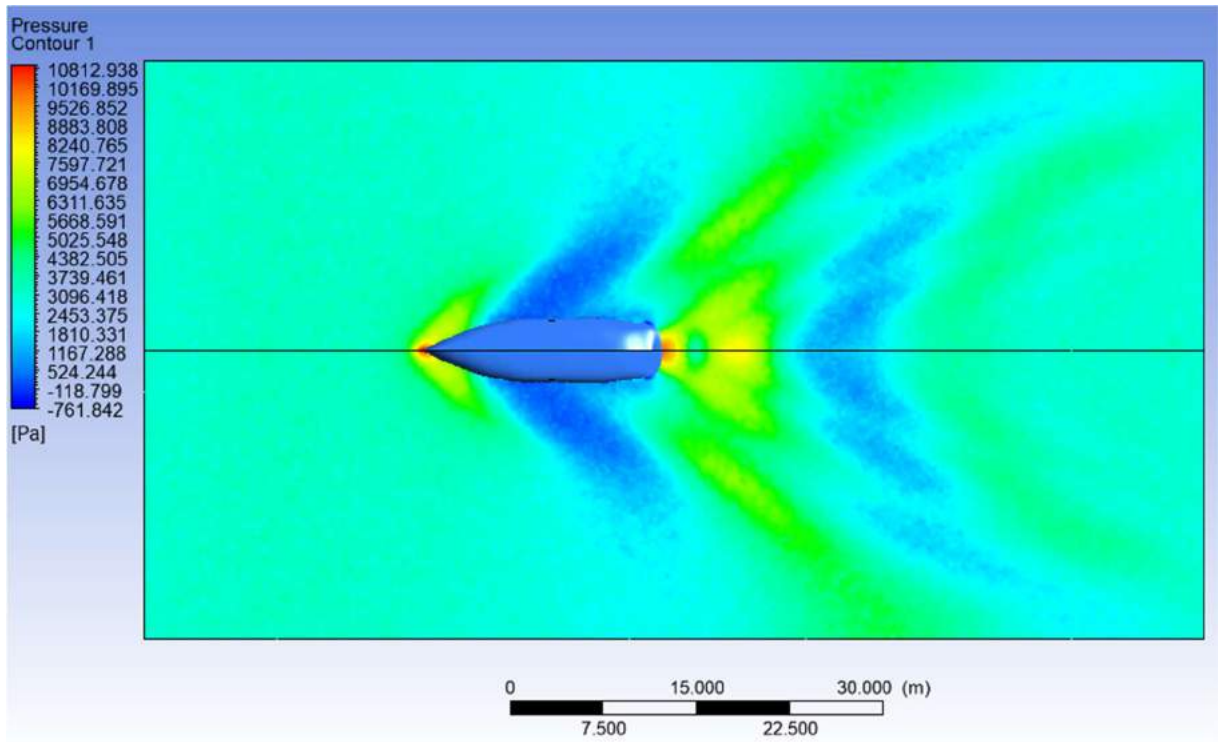
Lampiran C. 20 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 11 knot



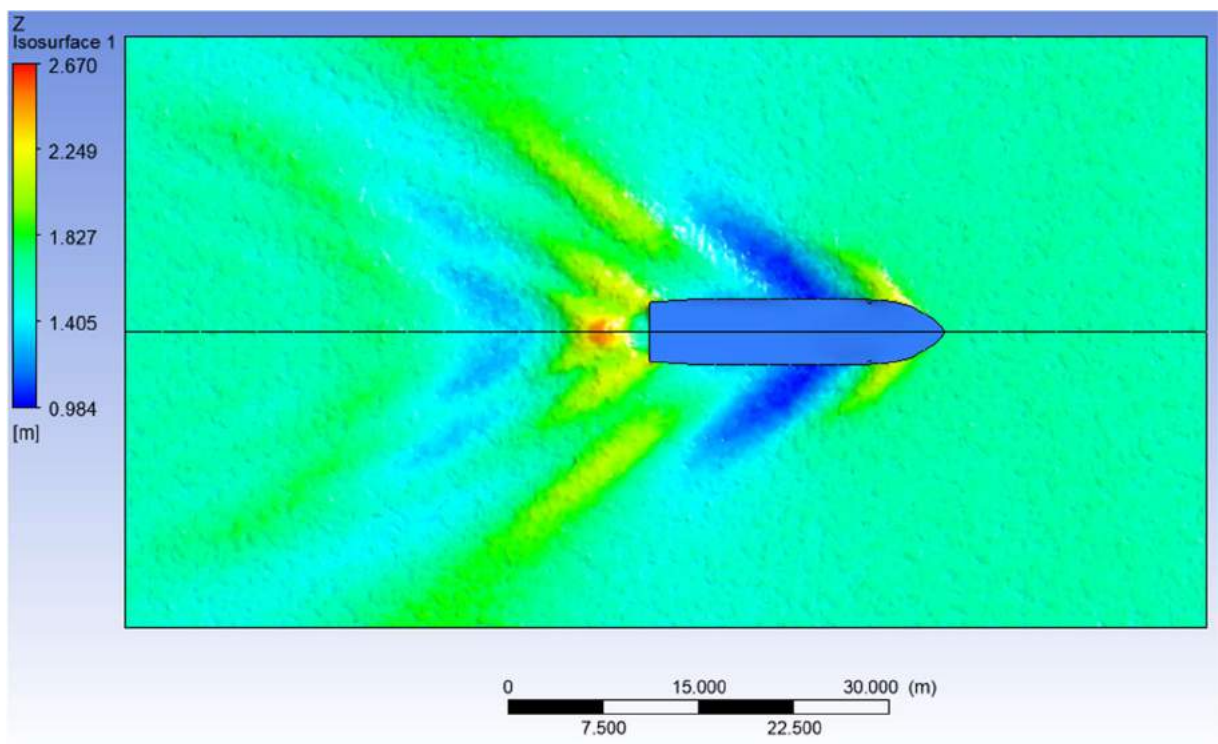
Lampiran C. 21 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 11 knot



Lampiran C. 22 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 11 knot



Lampiran C. 23 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 11 knot

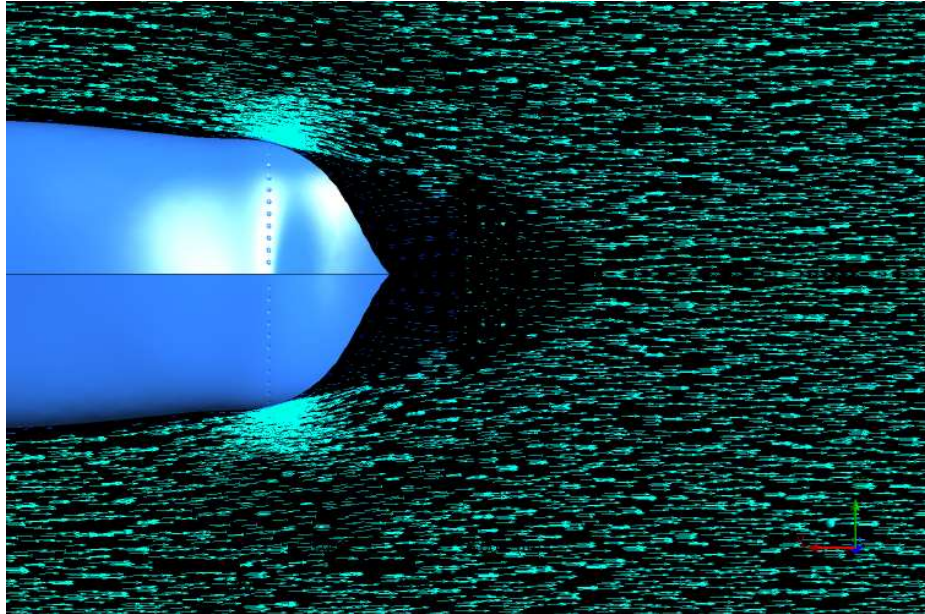


Lampiran C. 24 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 1* pada kecepatan 11 knot

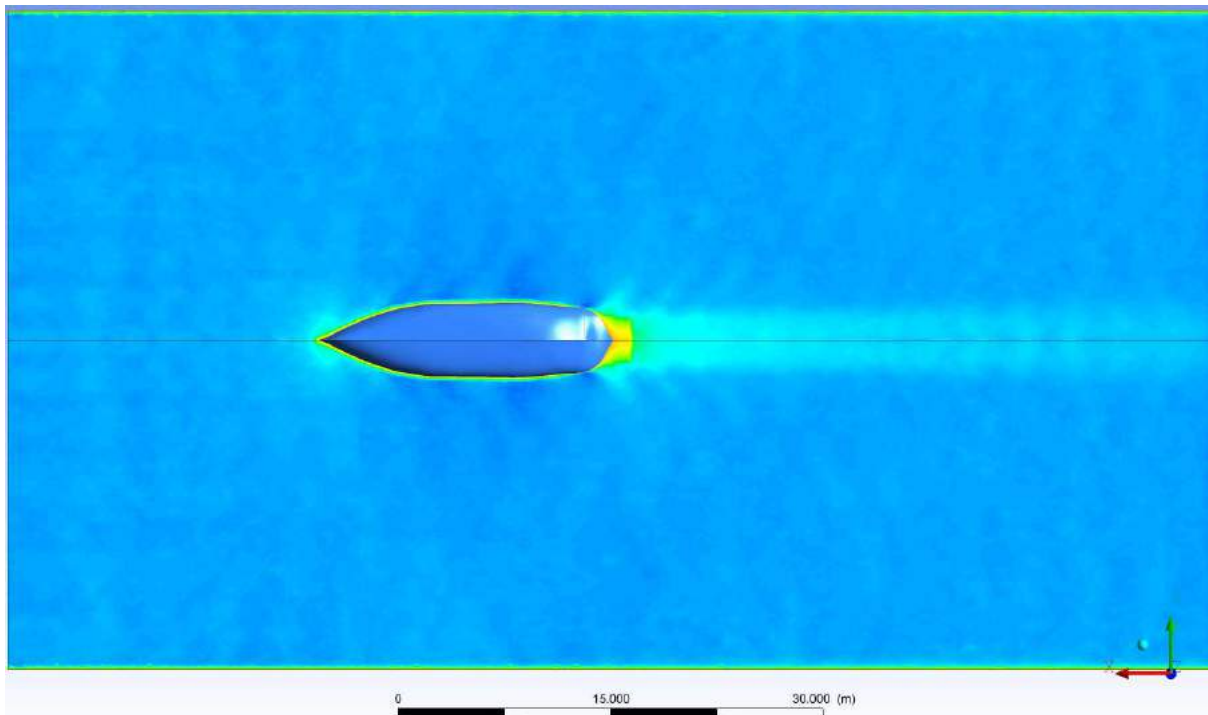
LAMPIRAN D
KONTUR ALIRAN SIMULASI *DIMPLE SURFACED HULL 2*

Lampiran ini berisi kontur kecepatan aliran, vektor kecepatan aliran, kontur tegangan geser kontur energi kinetik turbulensi, kontur tekanan serta kontur *free surface* pada setiap kecepatan yang diuji pada model *dimple surfaced hull 2*.

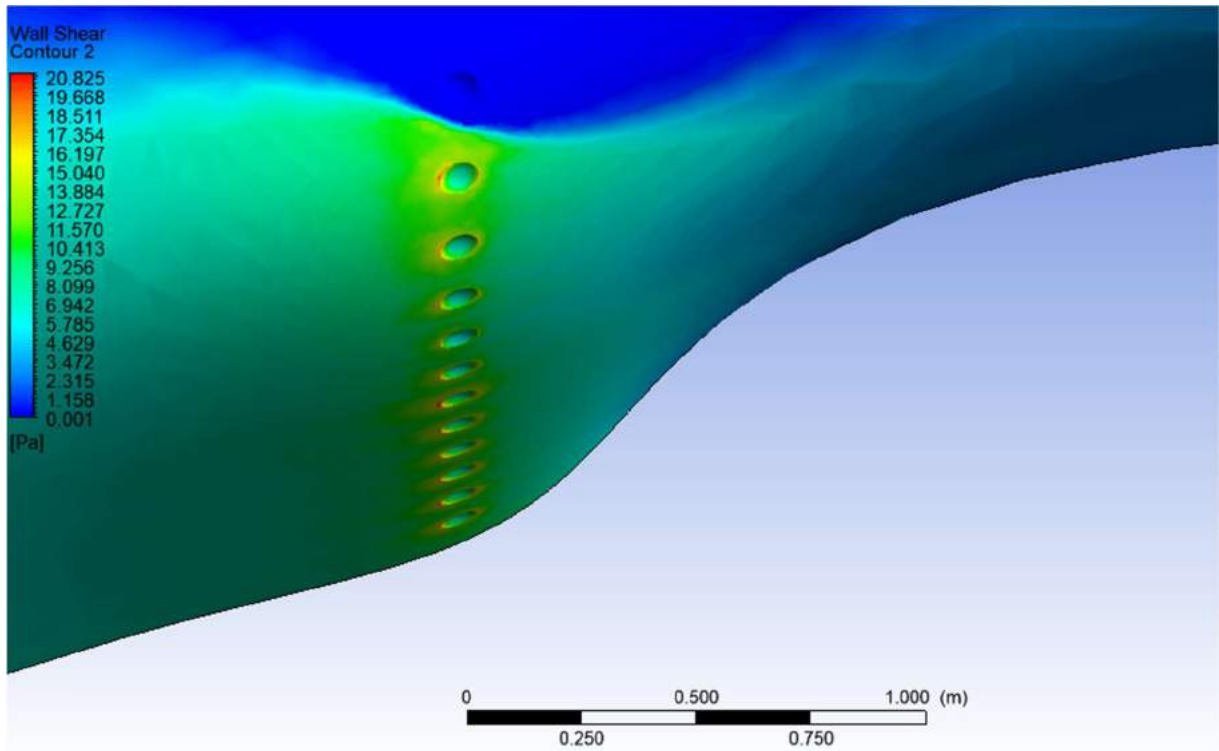
5 Knot



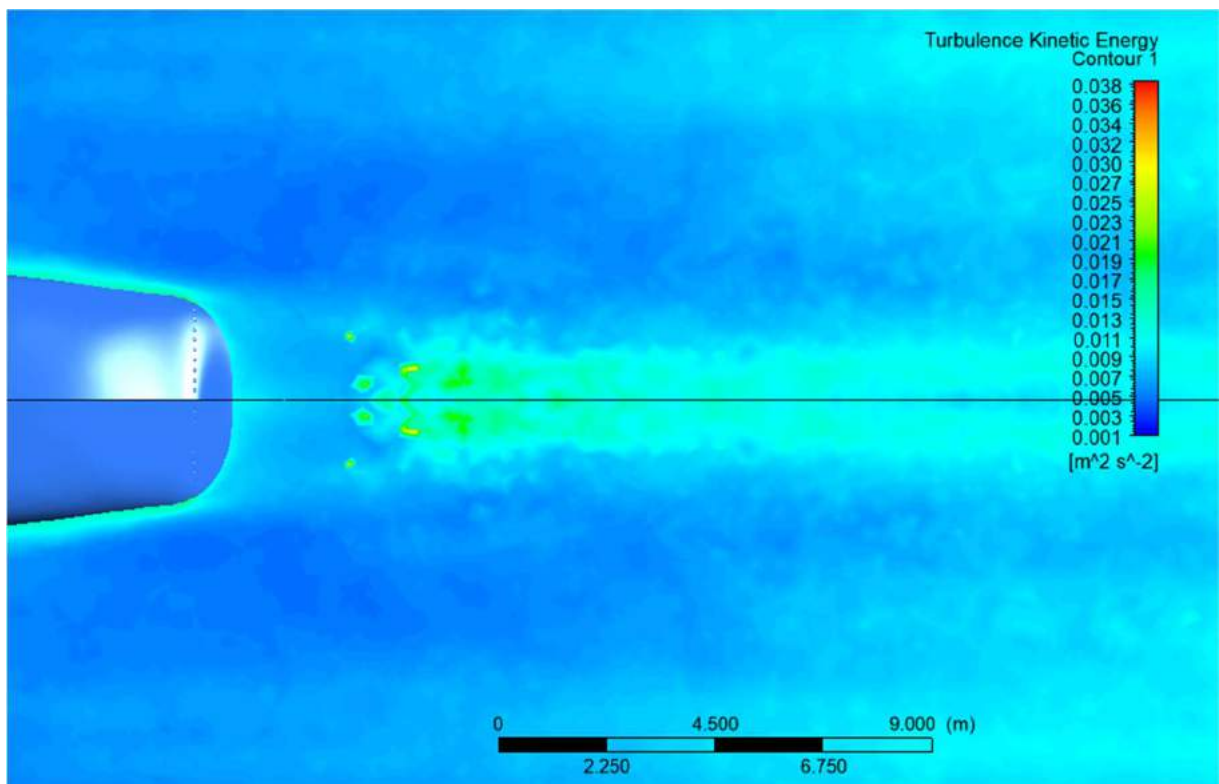
Lampiran D. 1 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 5 knot



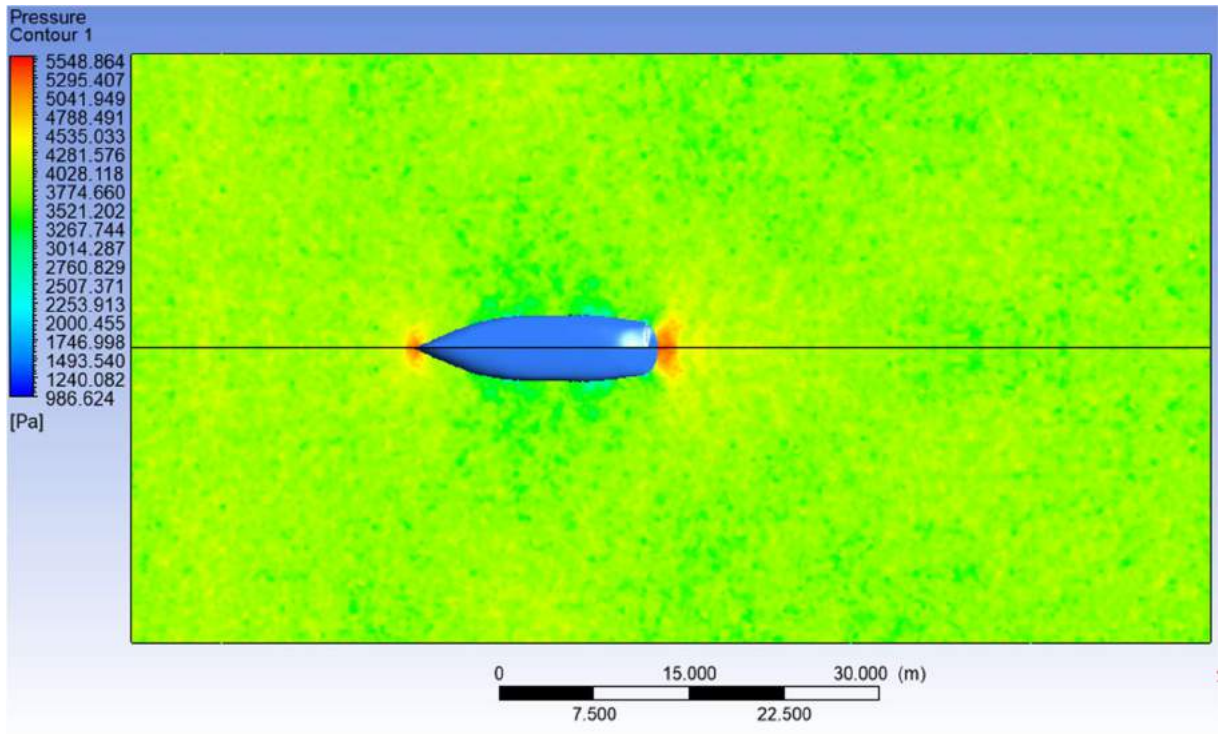
Lampiran D. 2 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 5 knot



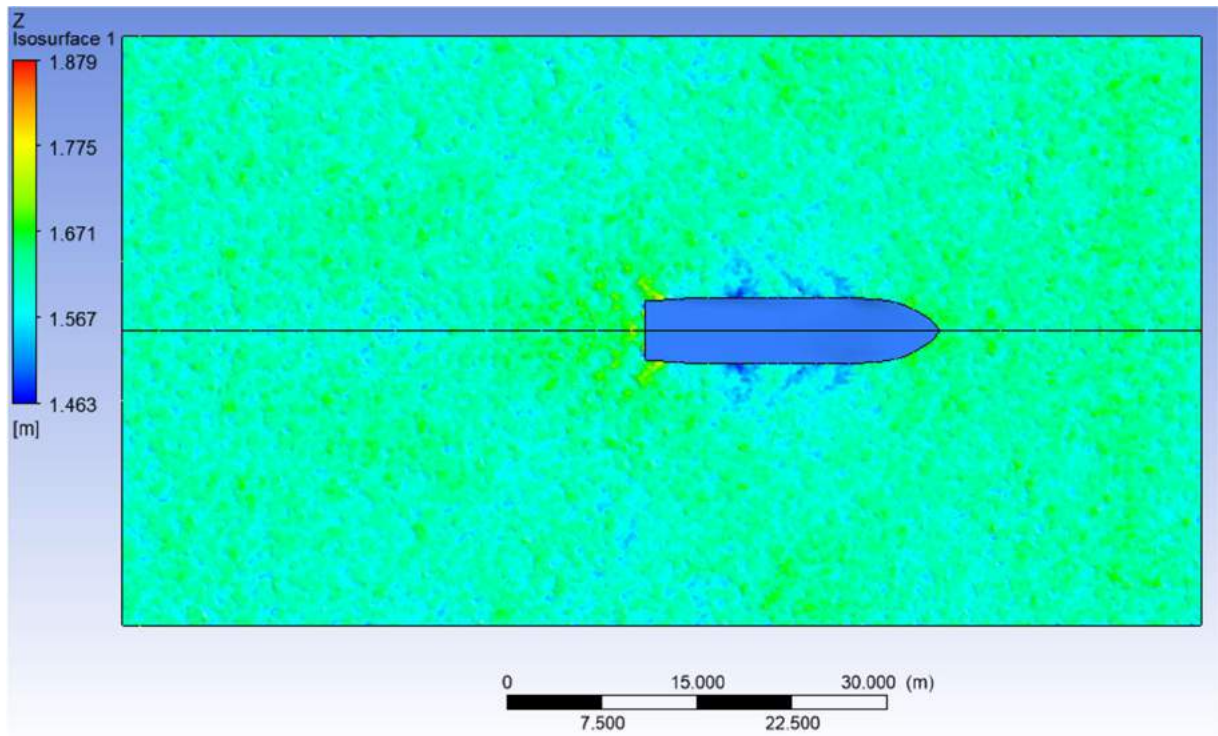
Lampiran D. 3 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 5 knot



Lampiran D. 4 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 5 knot

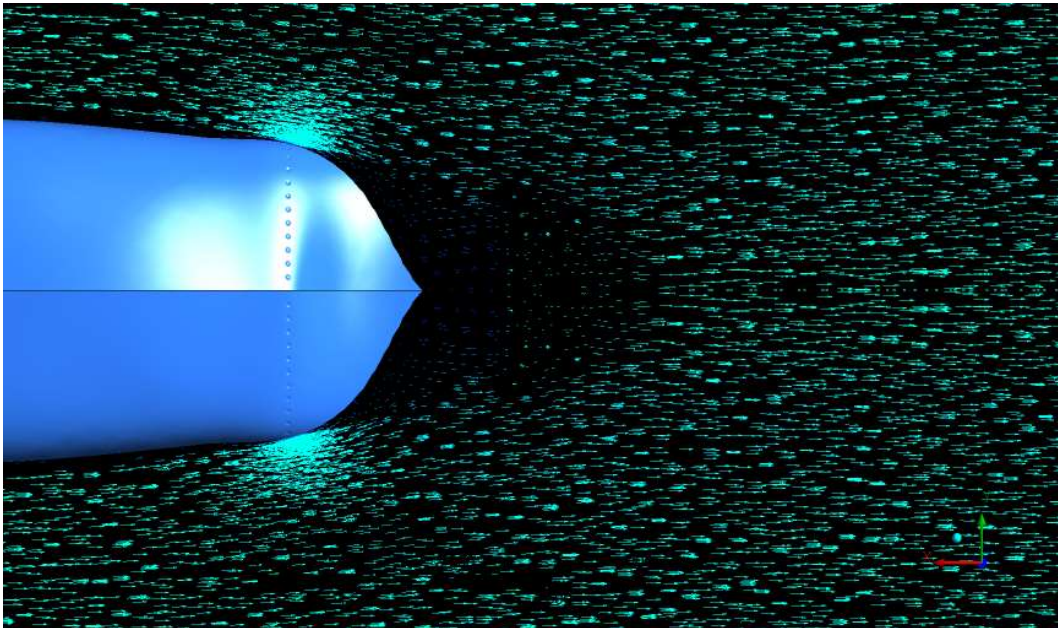


Lampiran D. 5 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 5 knot

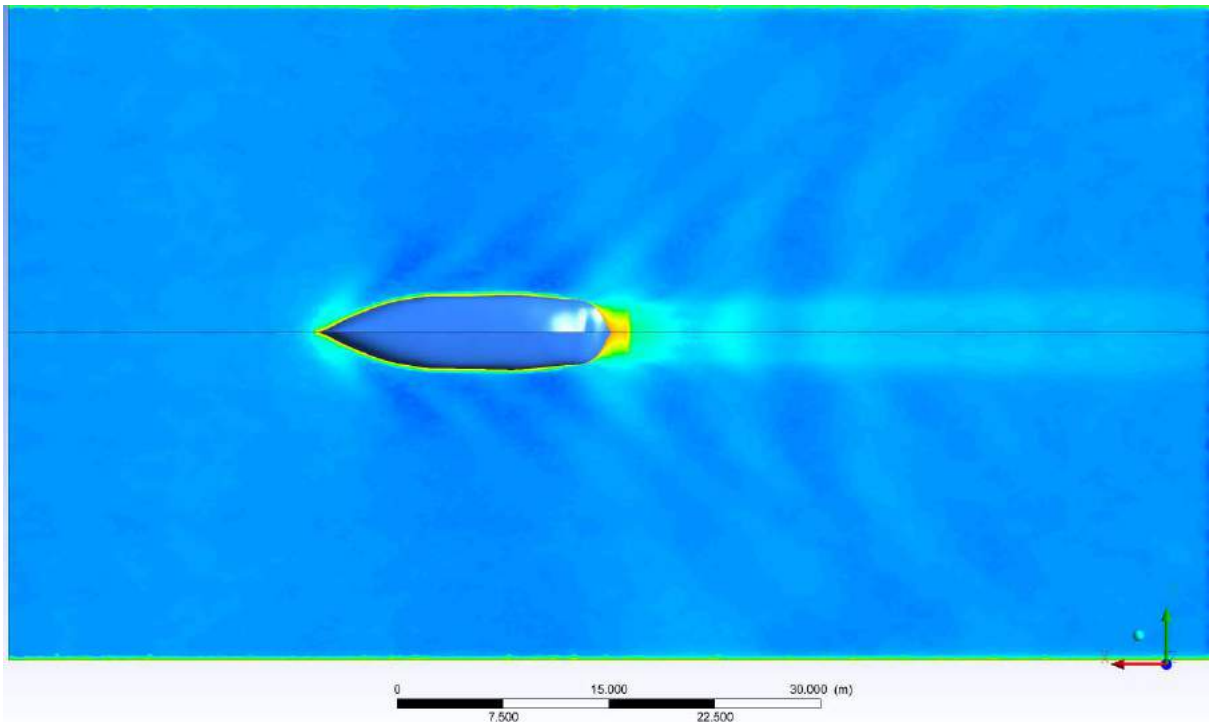


Lampiran D. 6 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 5 knot

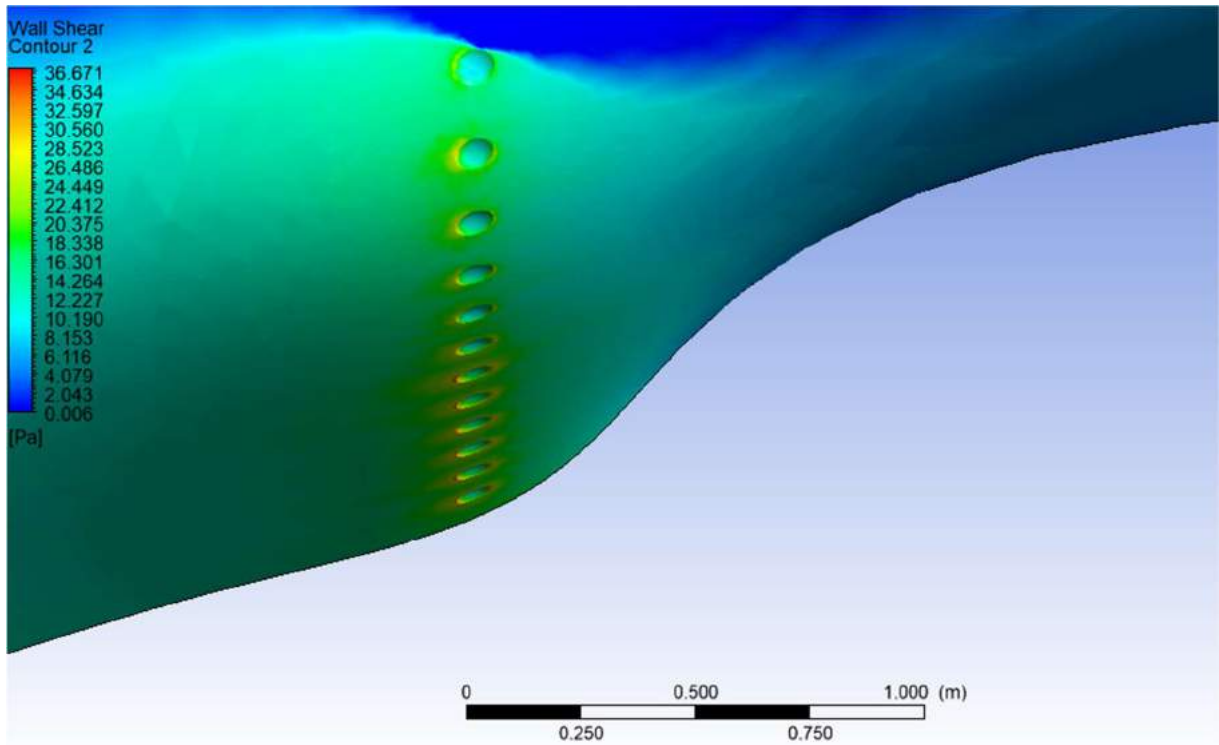
7 Knot



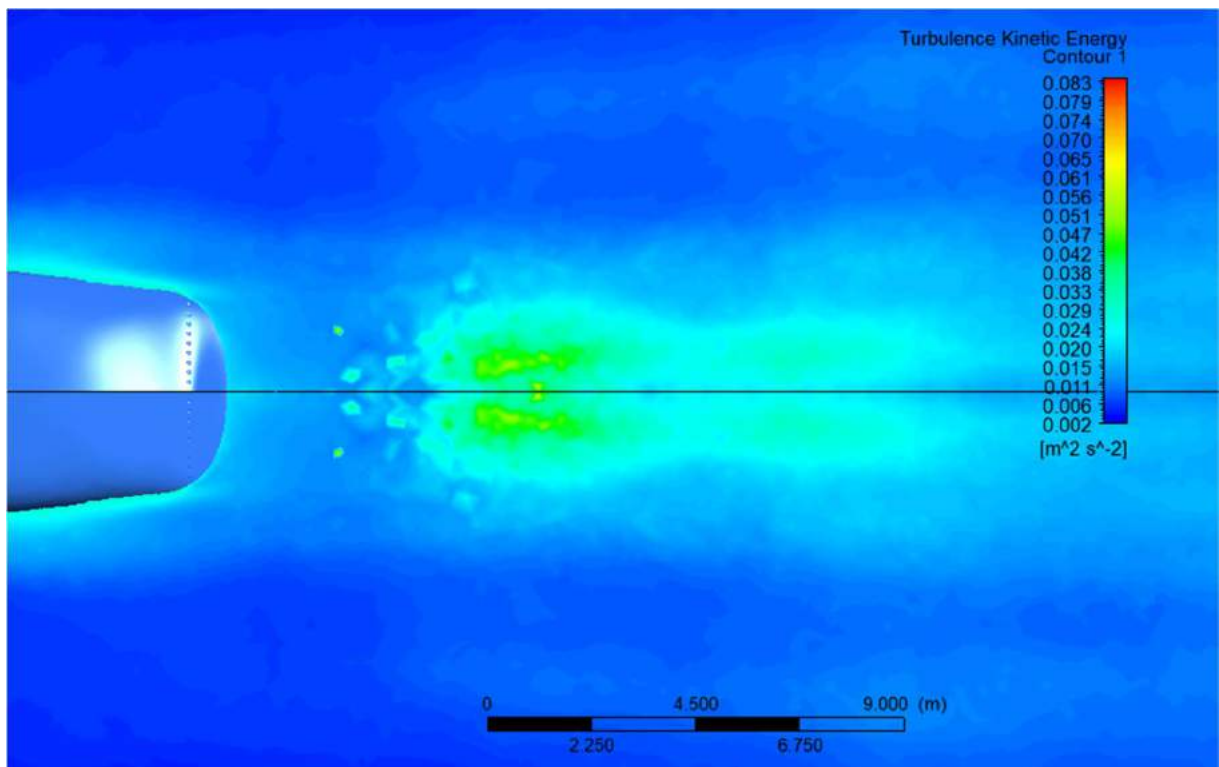
Lampiran D. 7 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 7 knot



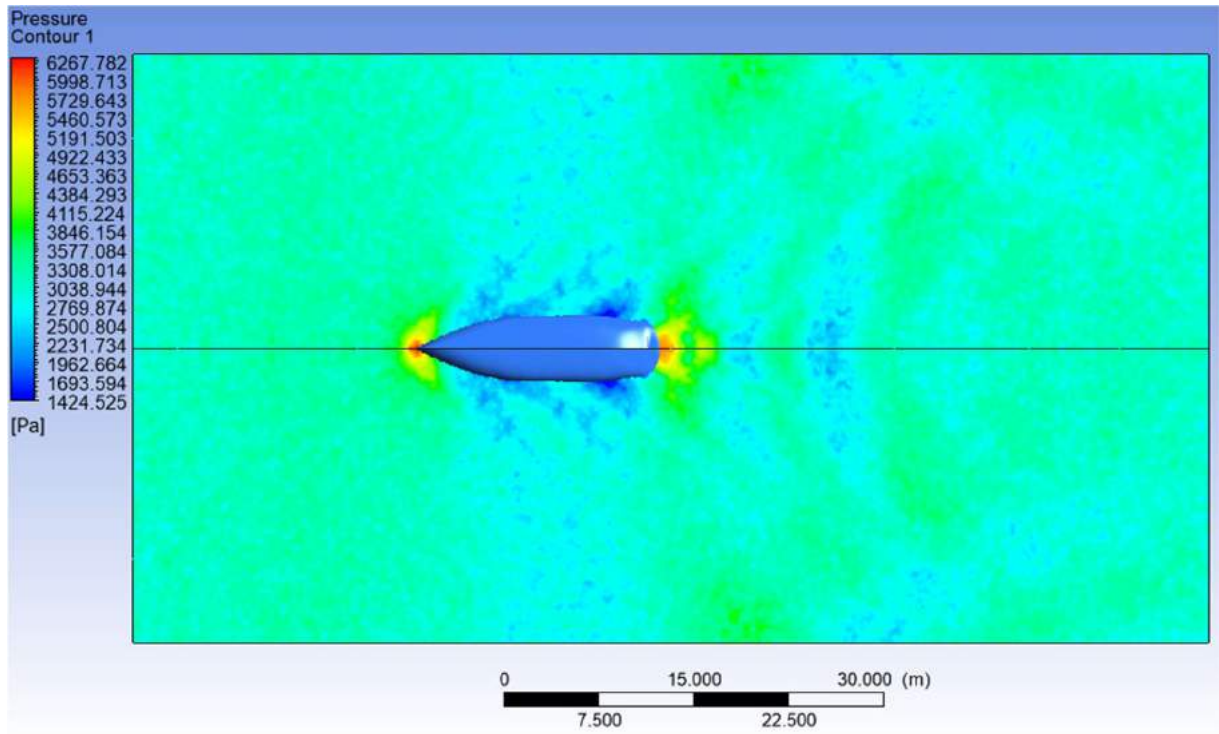
Lampiran D. 8 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 7 knot



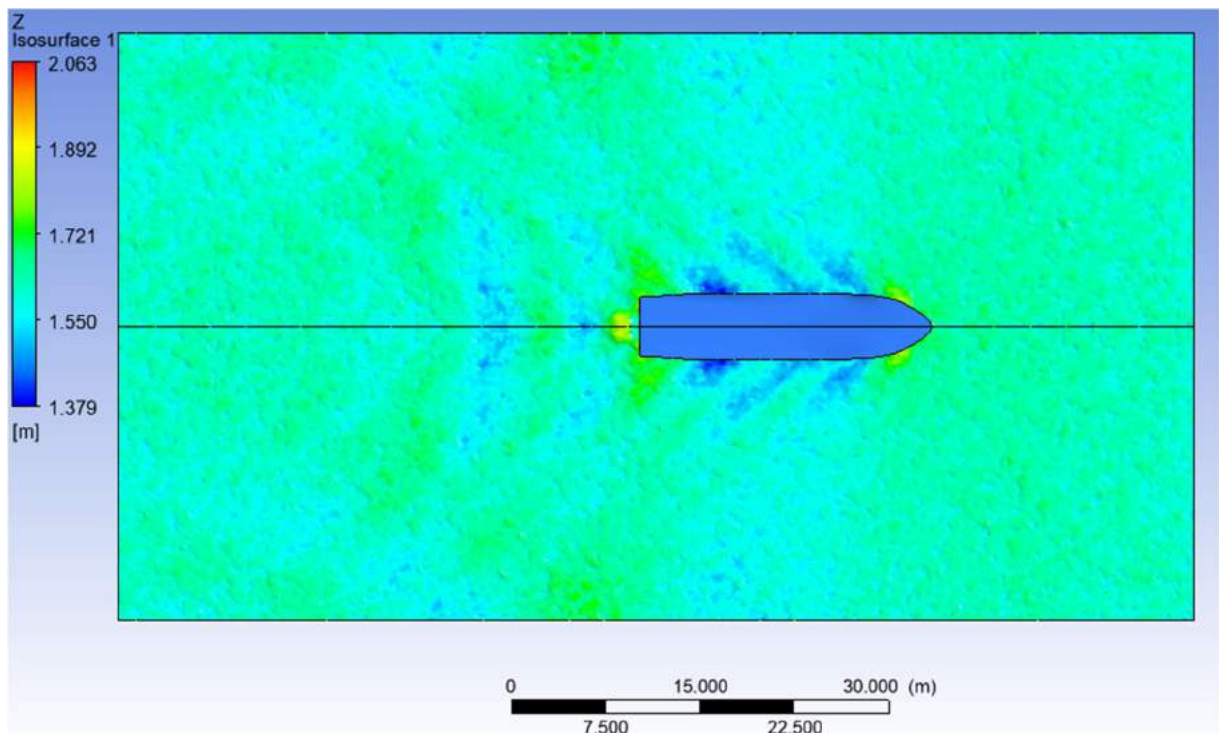
Lampiran D. 9 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 7 knot



Lampiran D. 10 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 7 knot

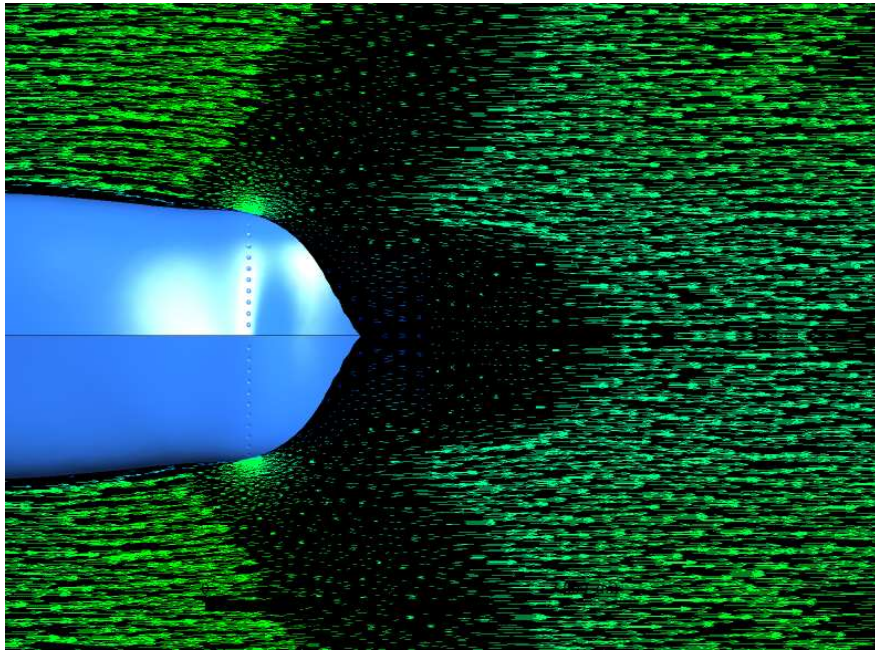


Lampiran D. 11 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 7 knot

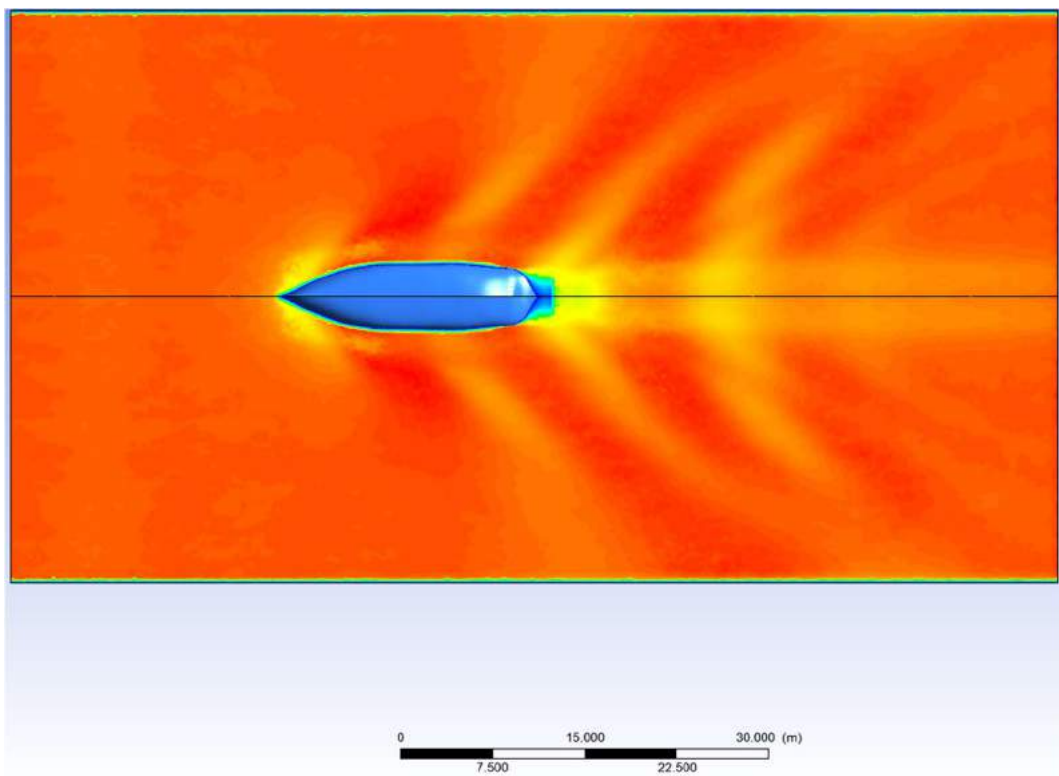


Lampiran D. 12 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 7 knot

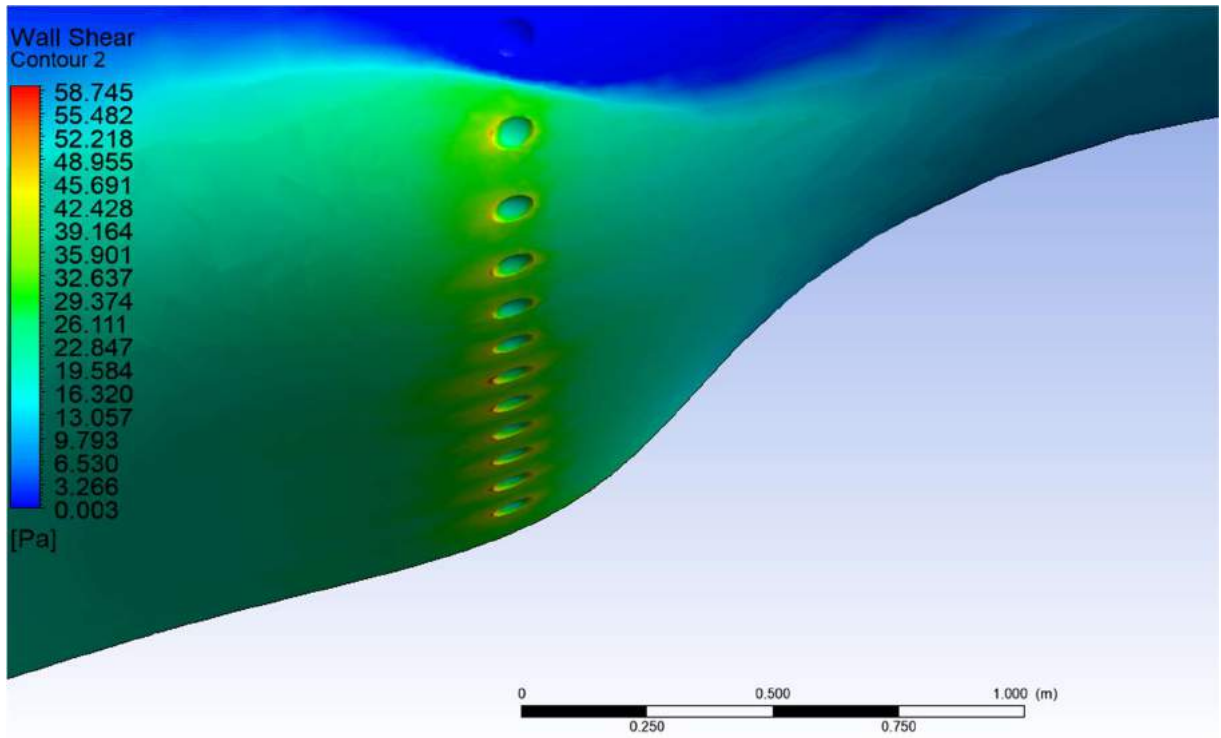
9 Knot



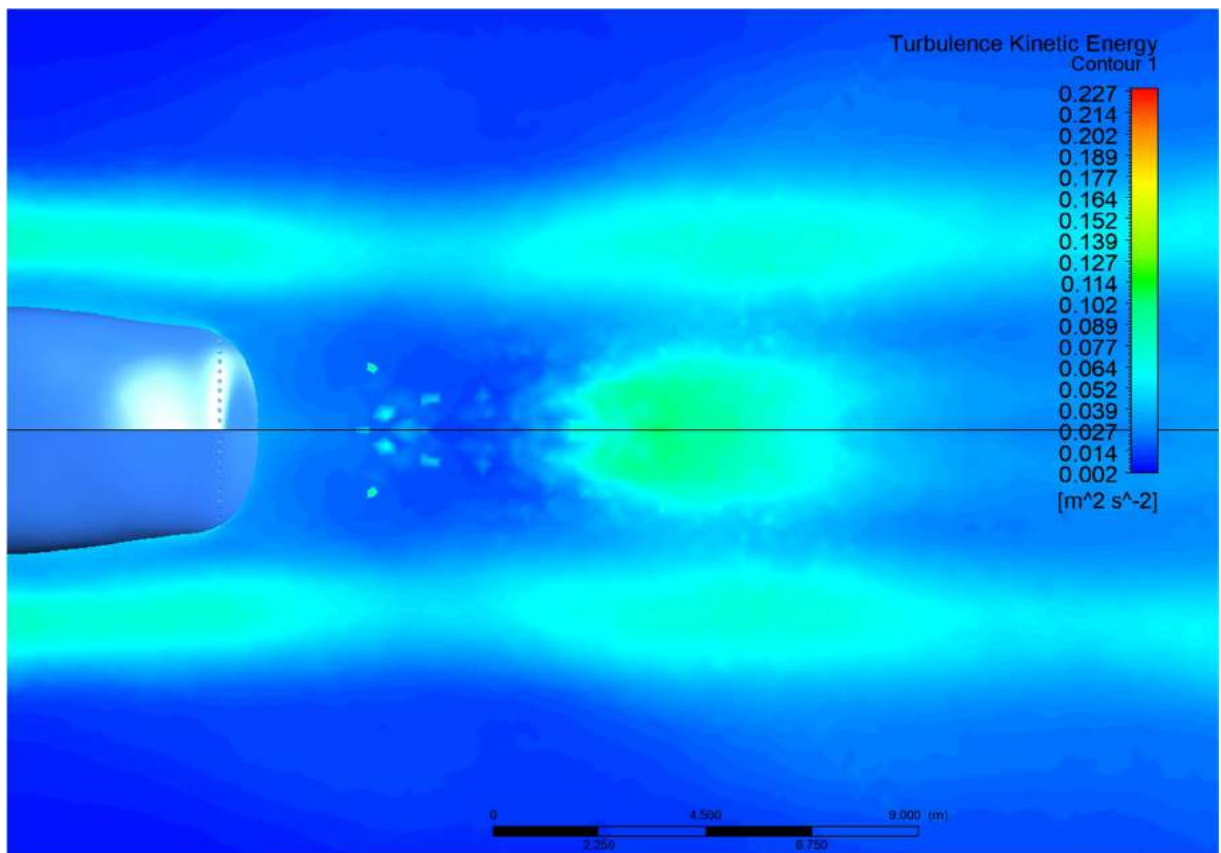
Lampiran D. 13 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 9 knot



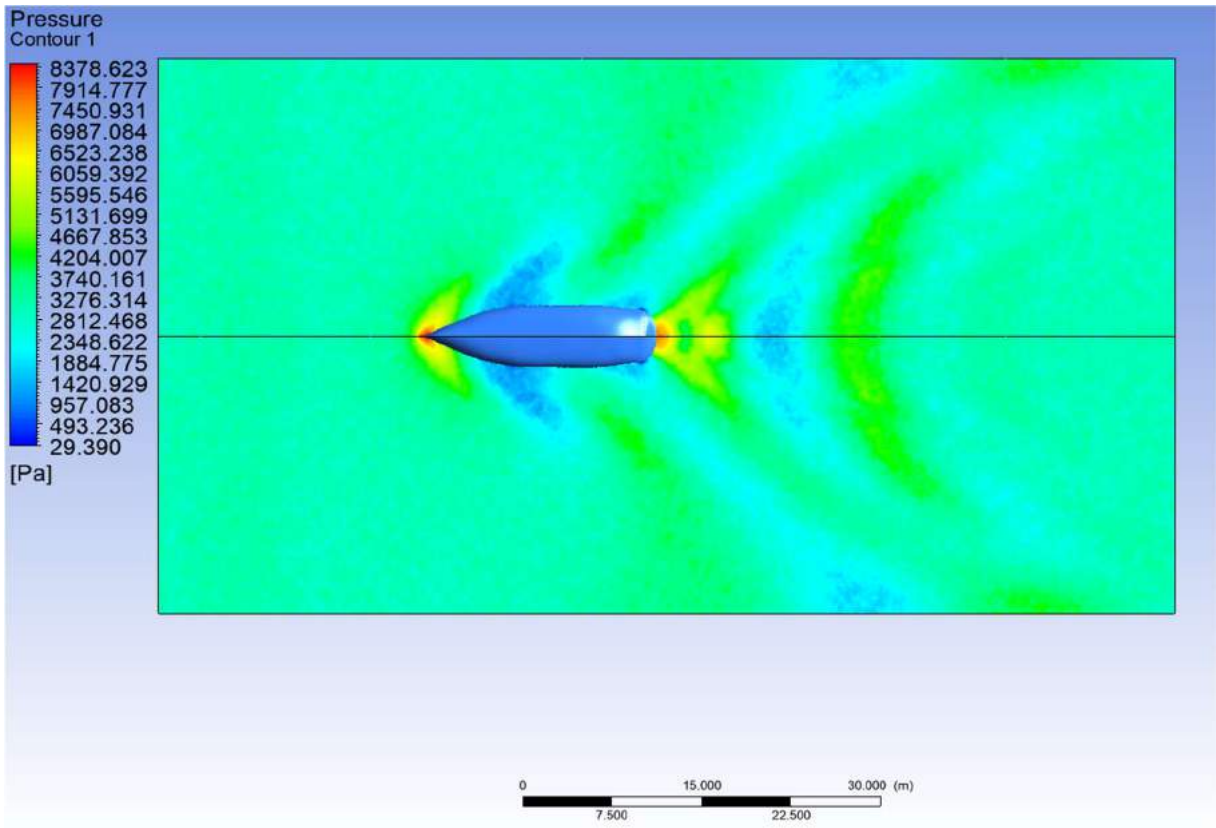
Lampiran D. 14 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 9 knot



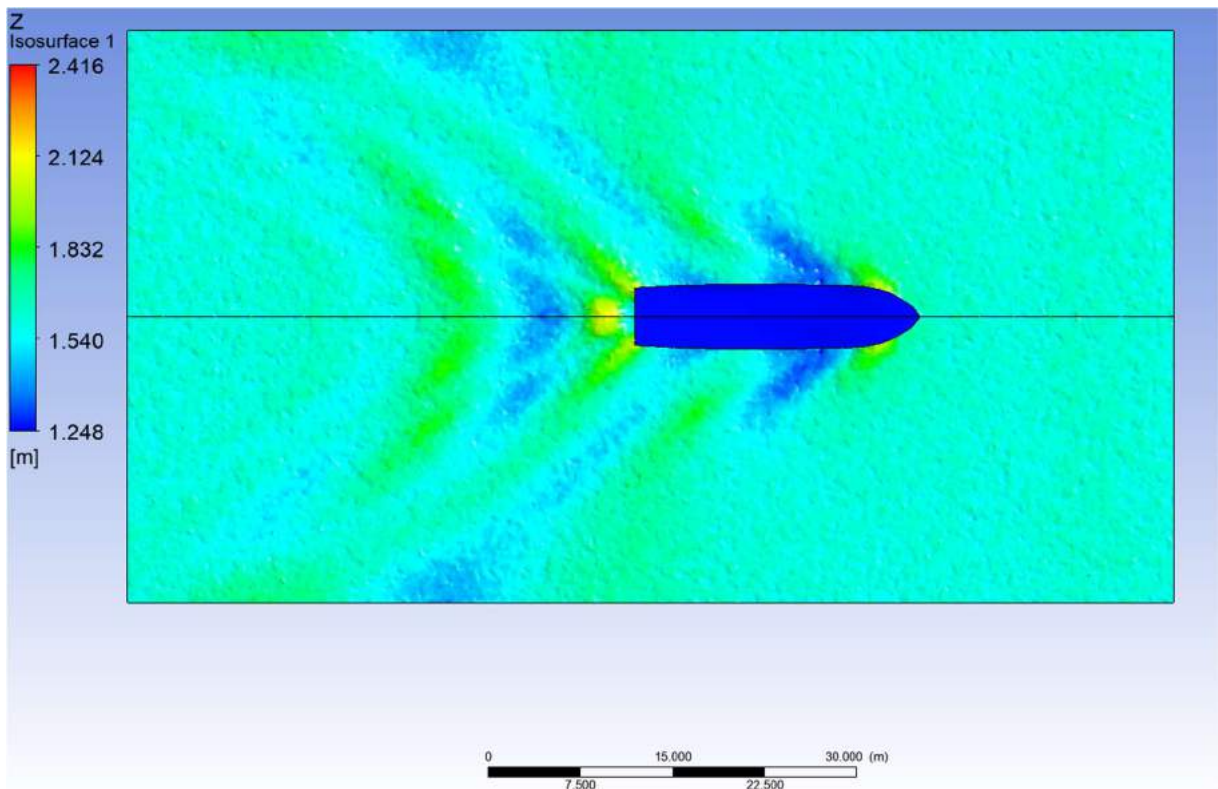
Lampiran D. 15 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 9 knot



Lampiran D. 16 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 9 knot

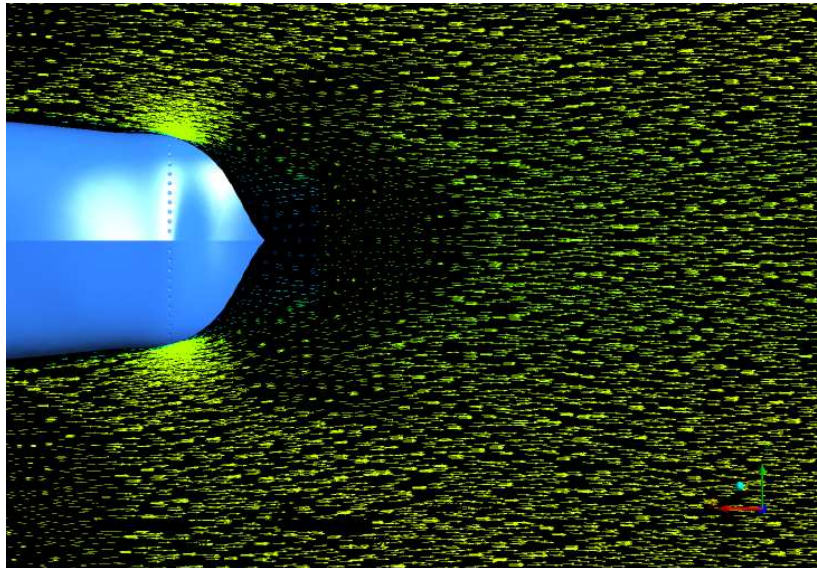


Lampiran D. 17 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 9 knot

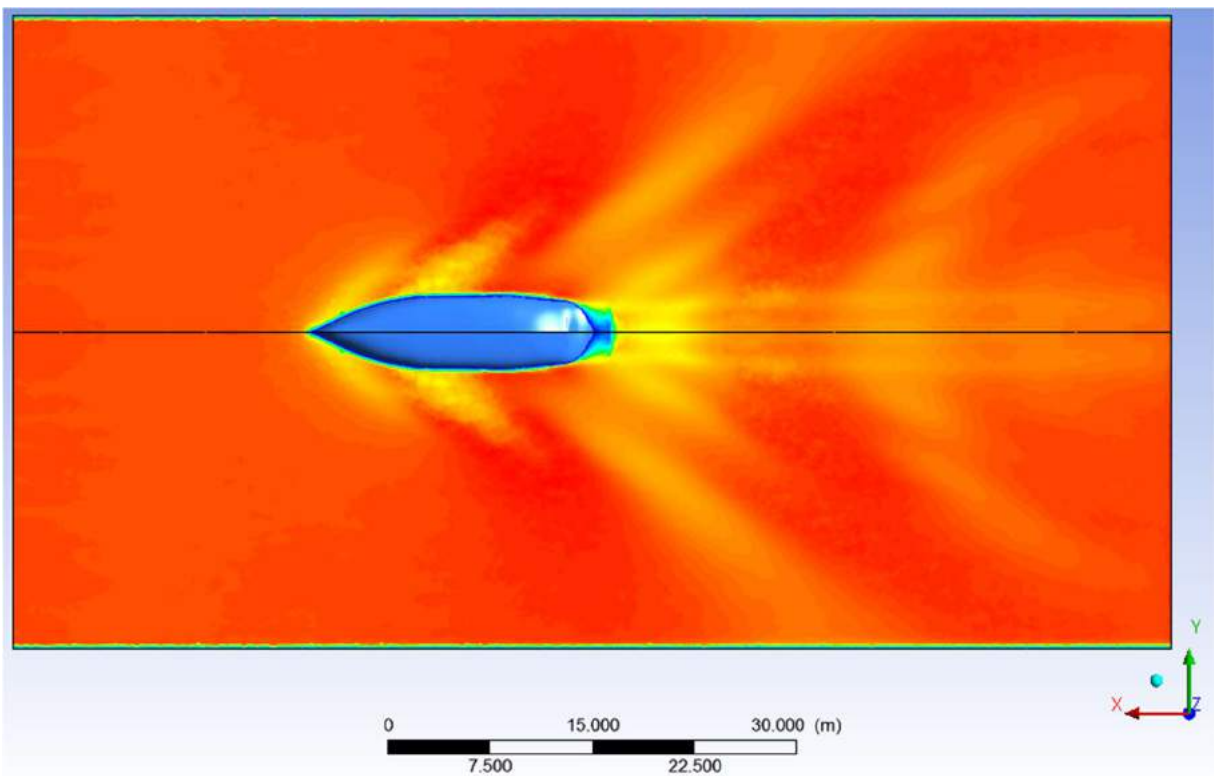


Lampiran D. 18 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 9 knot

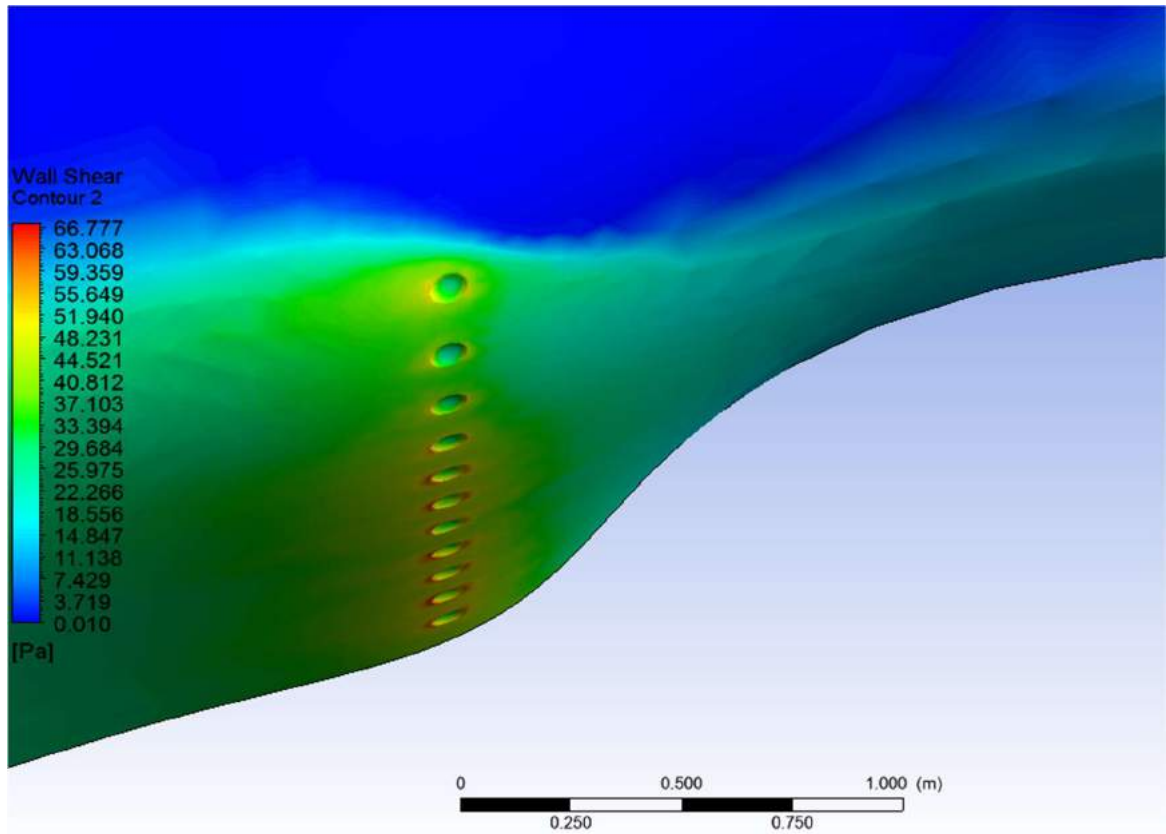
11 Knot



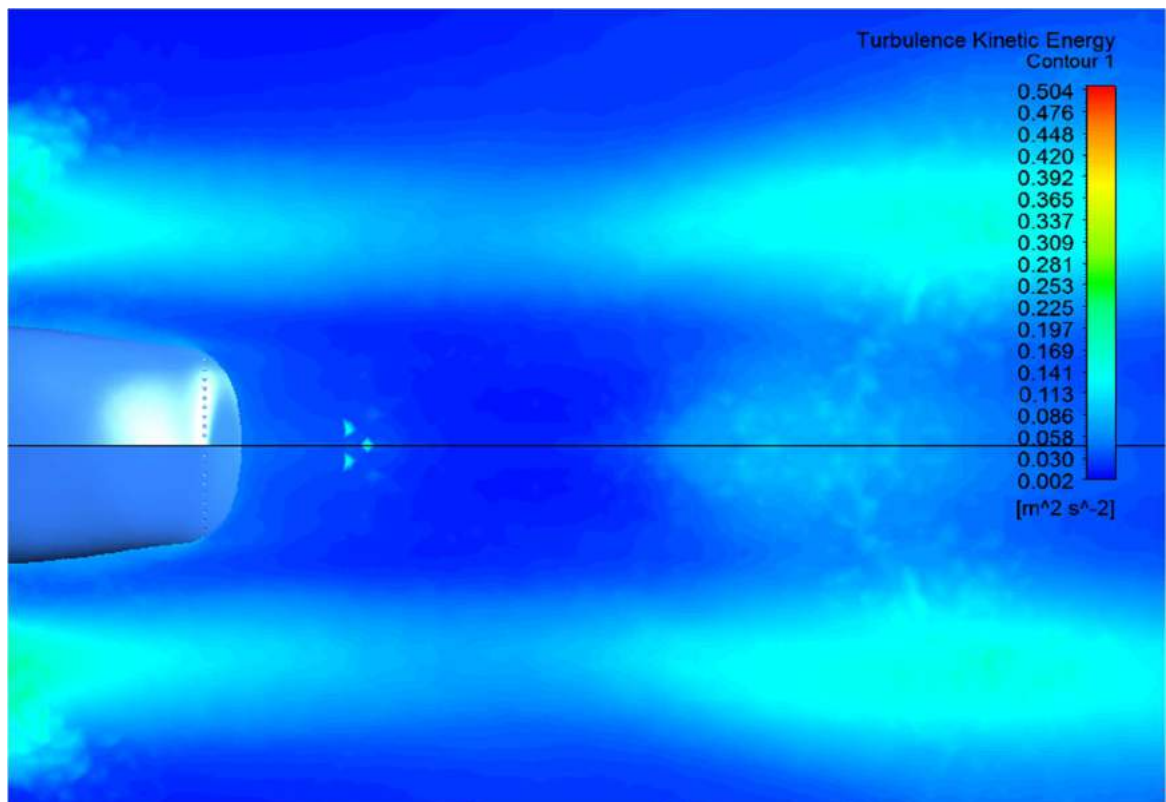
Lampiran D. 19 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 11 knot



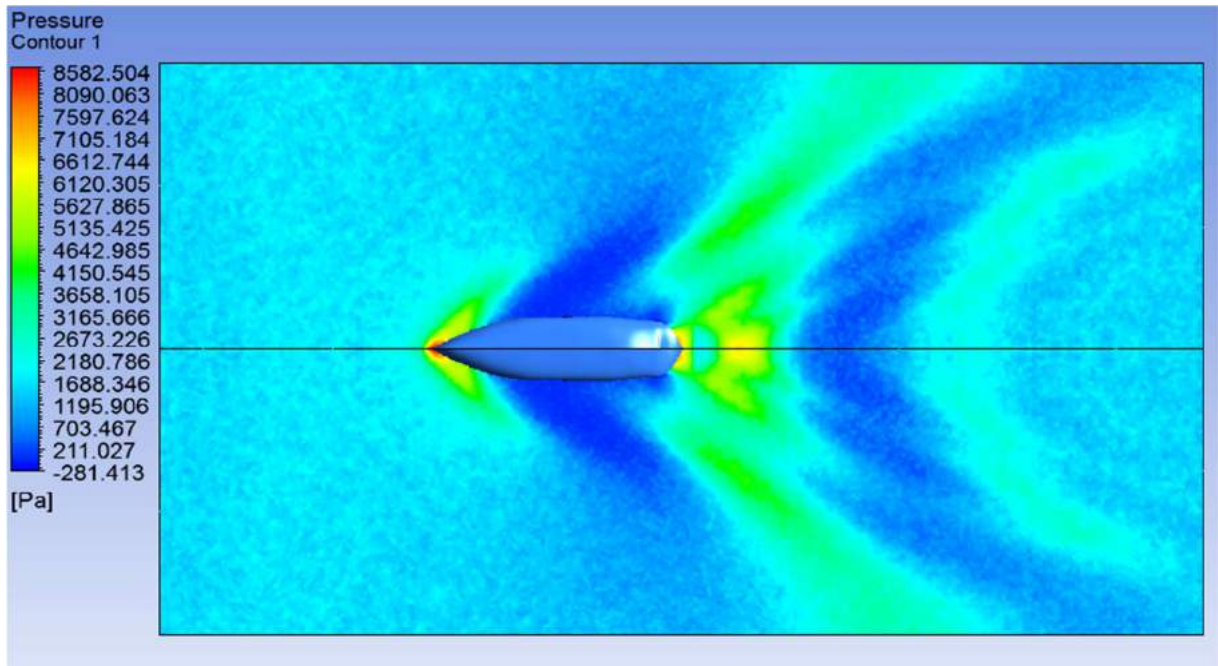
Lampiran D. 20 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 11 knot



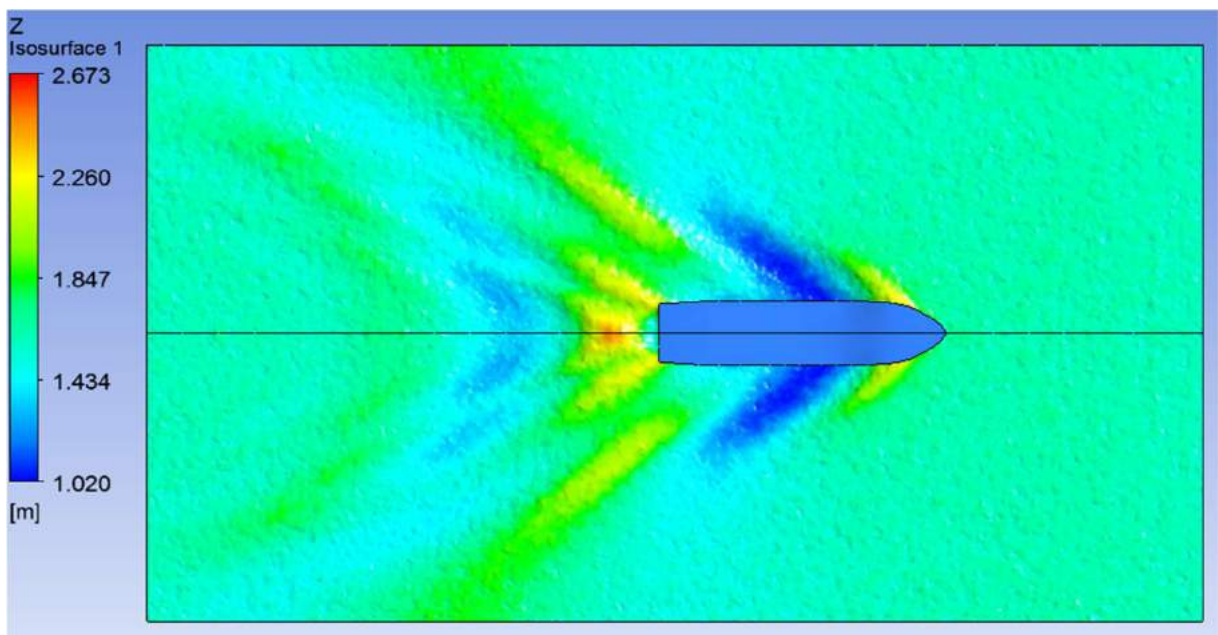
Lampiran D. 21 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 11 knot



Lampiran D. 22 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 11 knot



Lampiran D. 23 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 11 knot

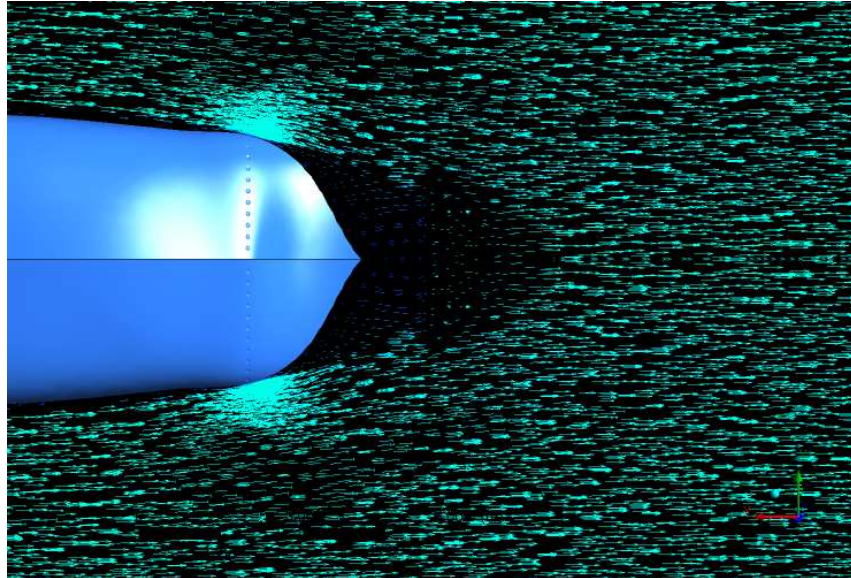


Lampiran D. 24 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 2* pada kecepatan 11 knot

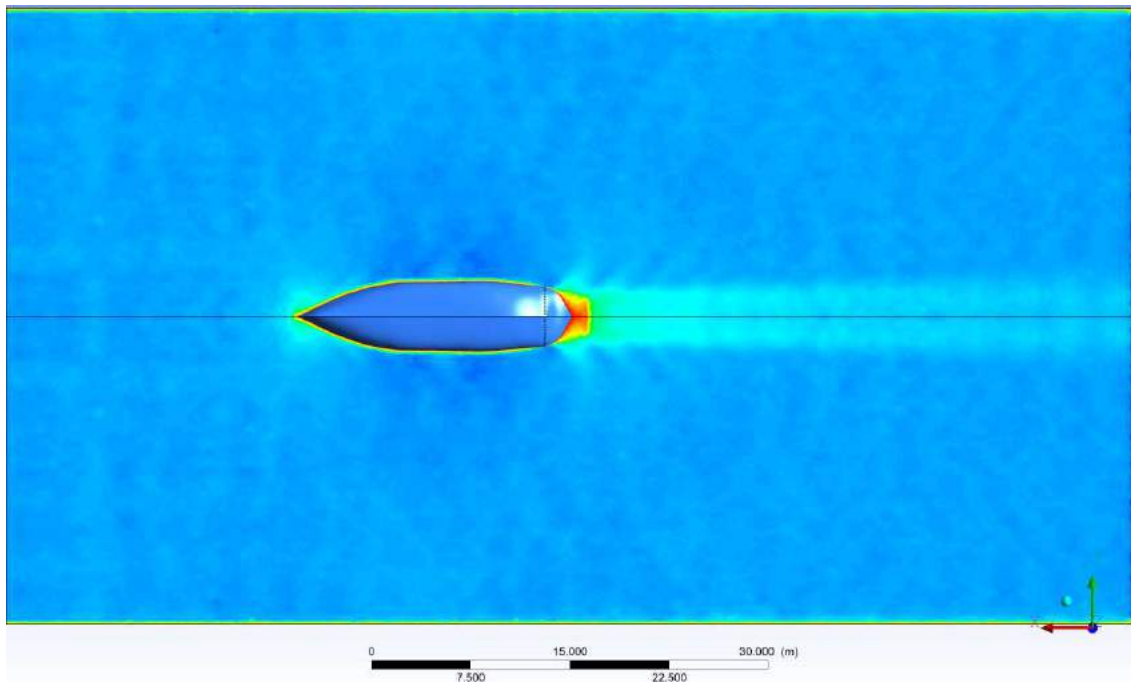
LAMPIRAN E
KONTUR ALIRAN SIMULASI *DIMPLE SURFACED HULL 3*

Lampiran ini berisi kontur kecepatan aliran, vektor kecepatan aliran, kontur tegangan geser kontur energi kinetik turbulensi, kontur tekanan serta kontur *free surface* pada setiap kecepatan yang diuji pada model *dimple surfaced hull 3*.

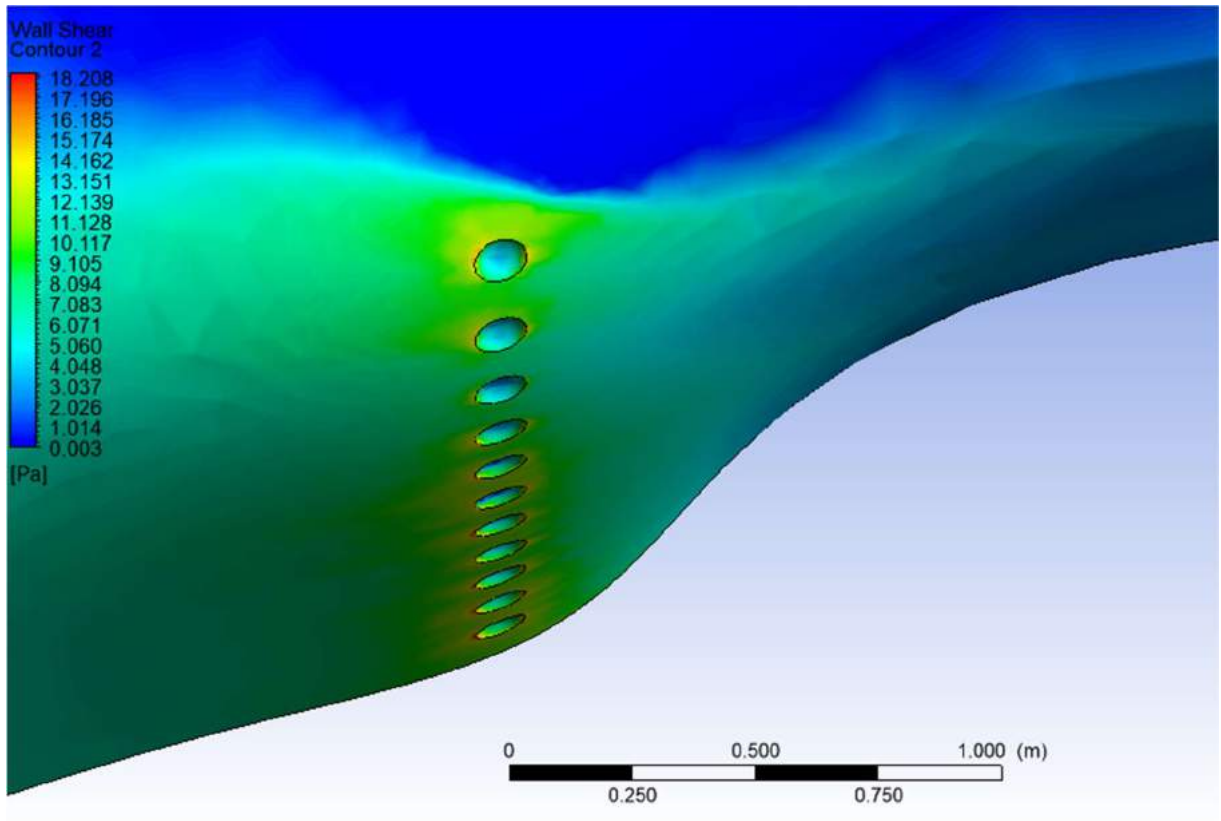
5 knot



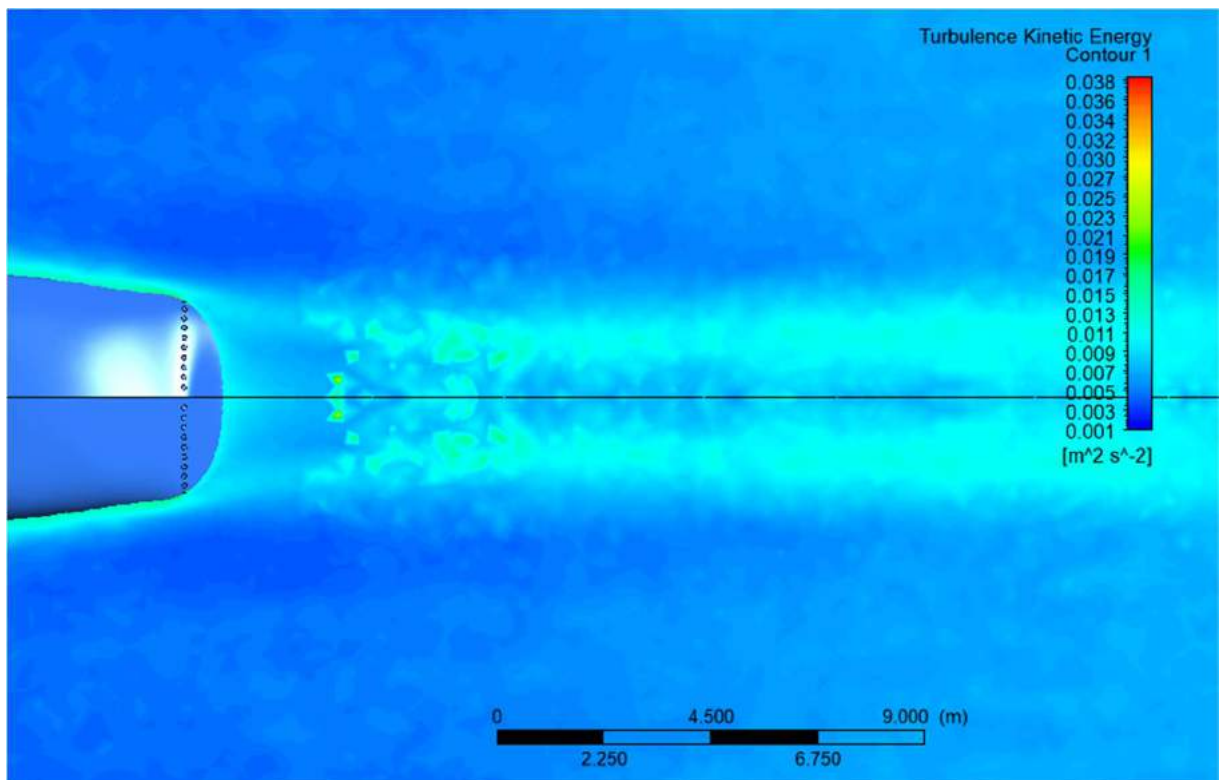
Lampiran E. 1 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 5 knot



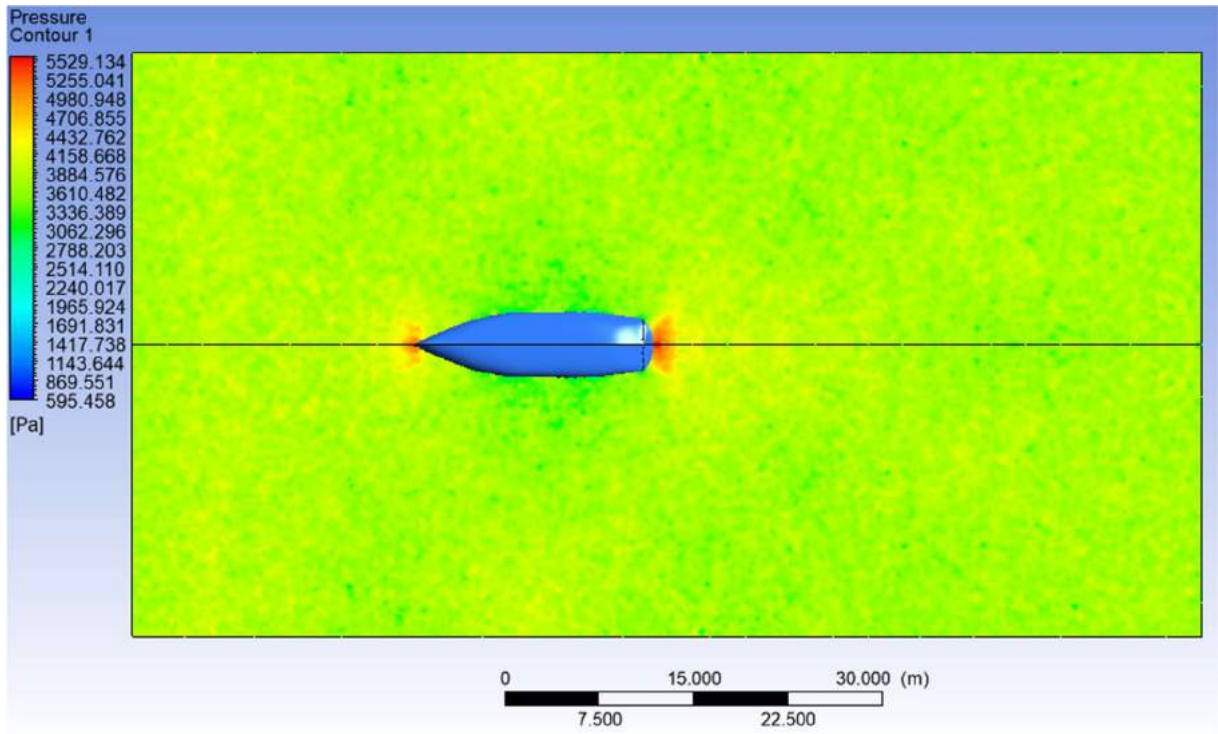
Lampiran E. 2 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 5 knot



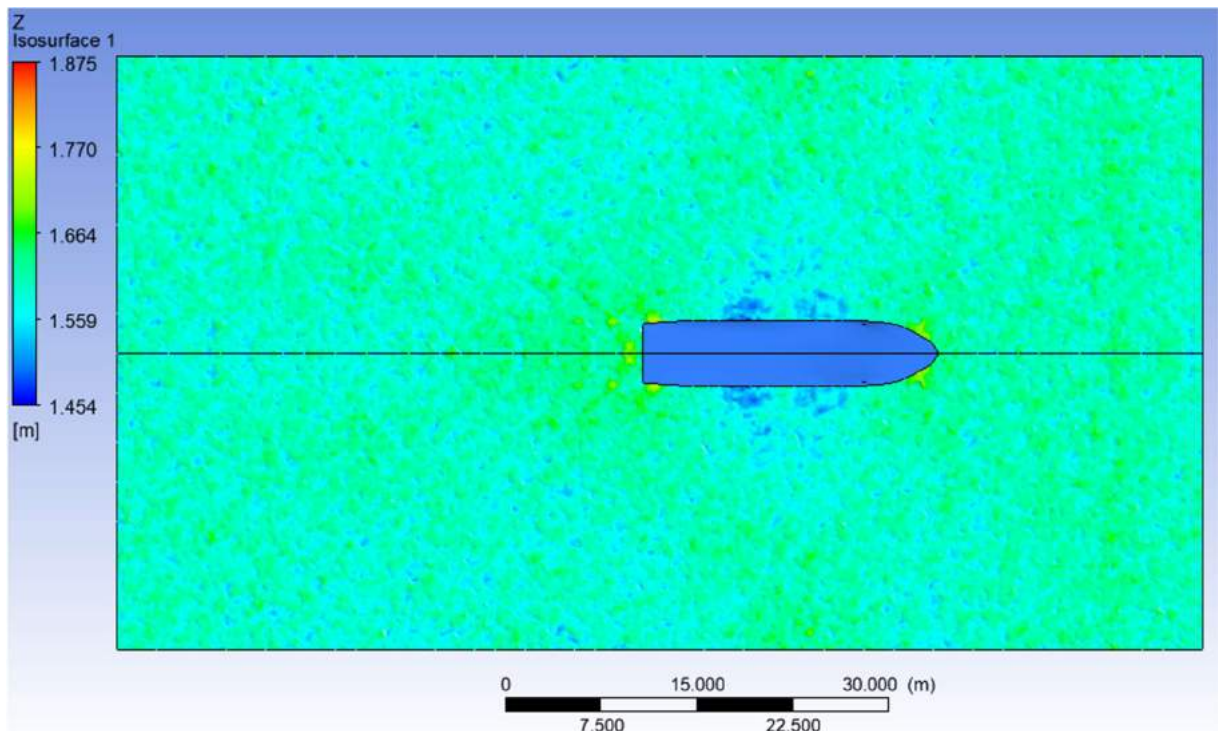
Lampiran E. 3 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 5 knot



Lampiran E. 4 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 5 knot

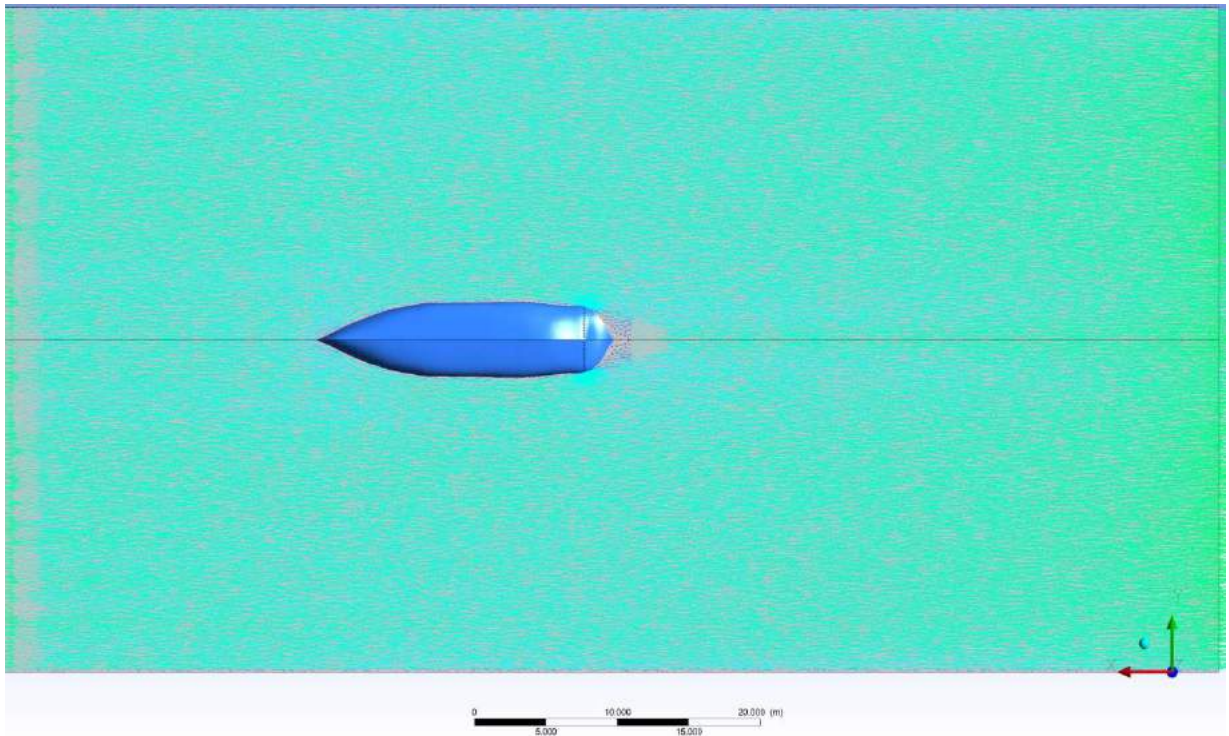


Lampiran E. 5 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 5 knot

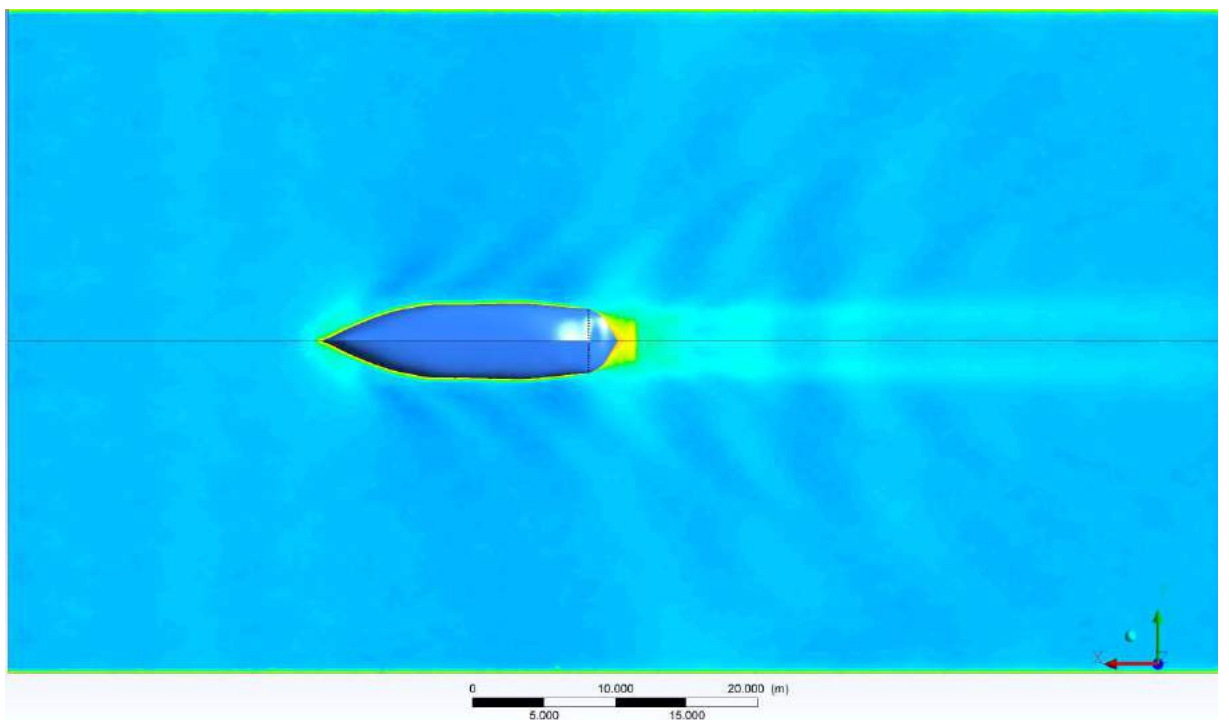


Lampiran E. 6 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 5 knot

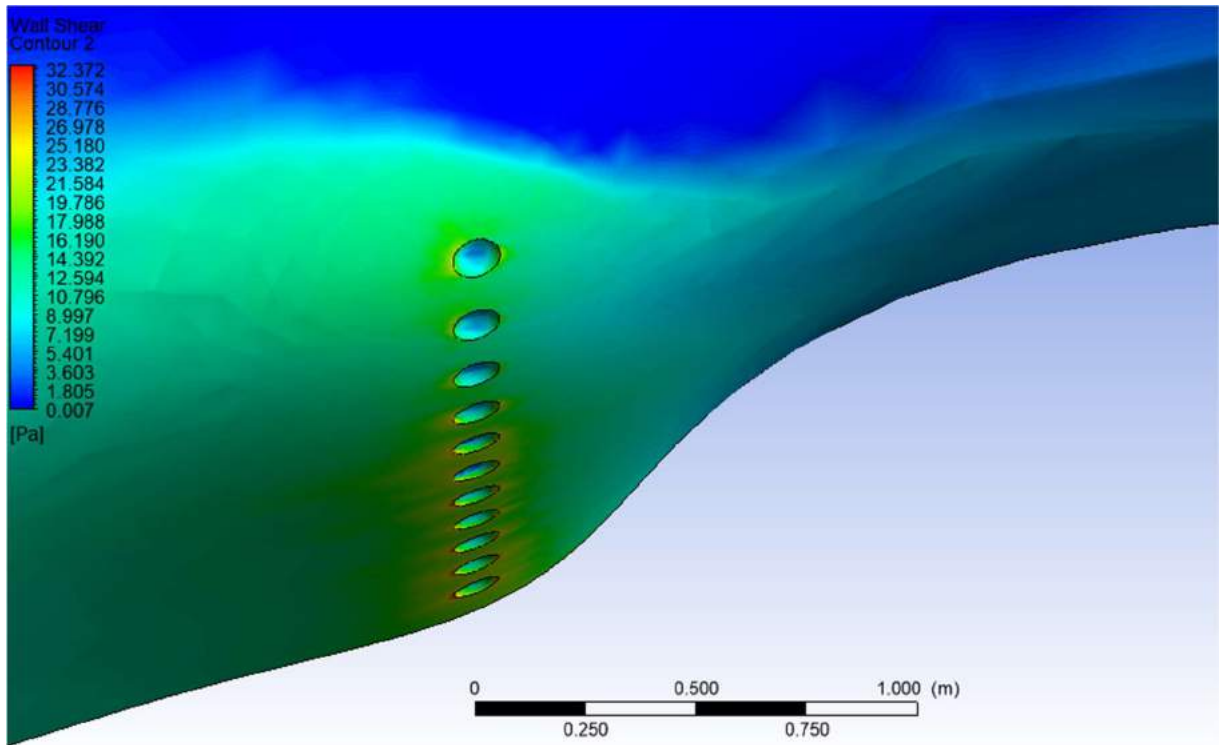
7 Knot



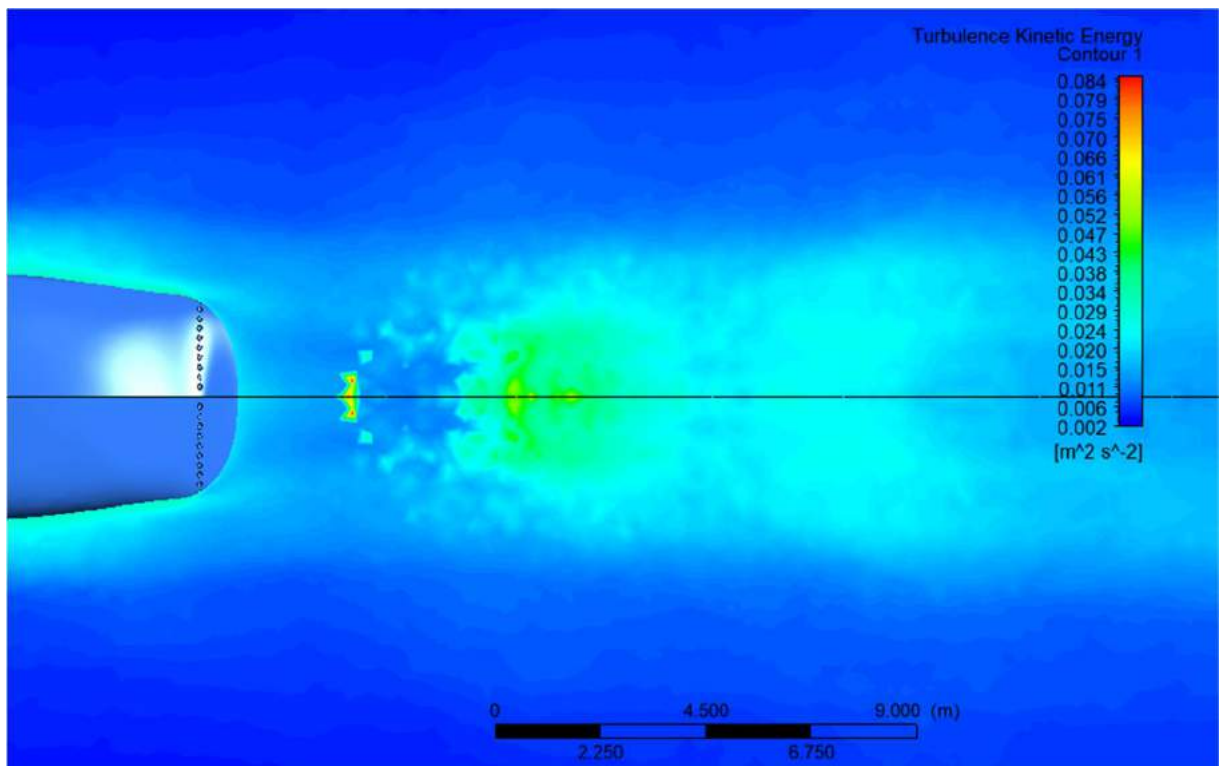
Lampiran E. 7 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 7 knot



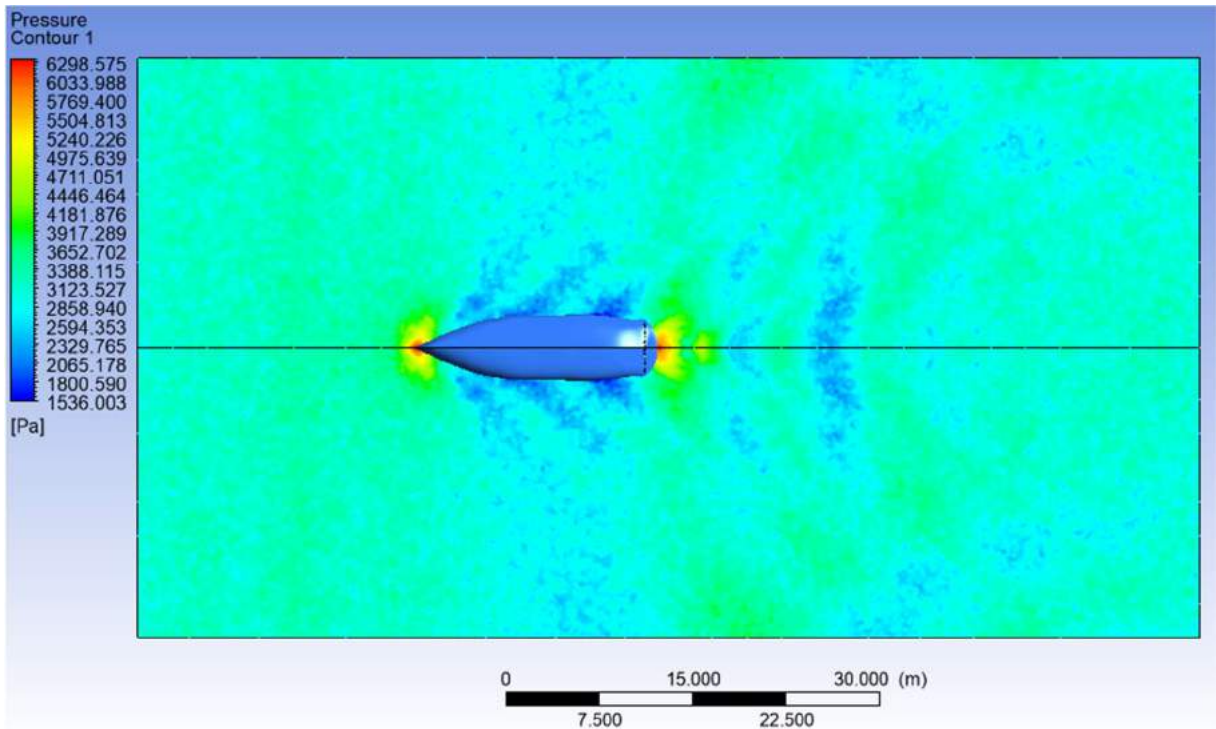
Lampiran E. 8 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 7 knot



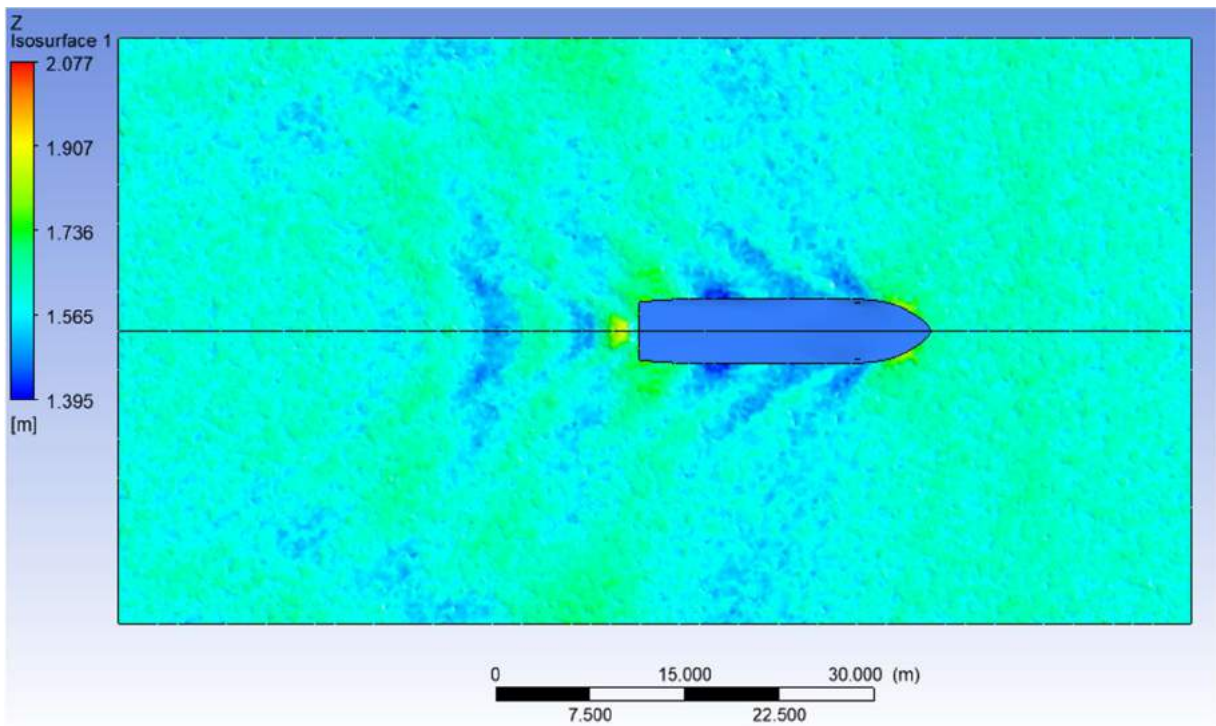
Lampiran E. 9 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 7 knot



Lampiran E. 10 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 7 knot

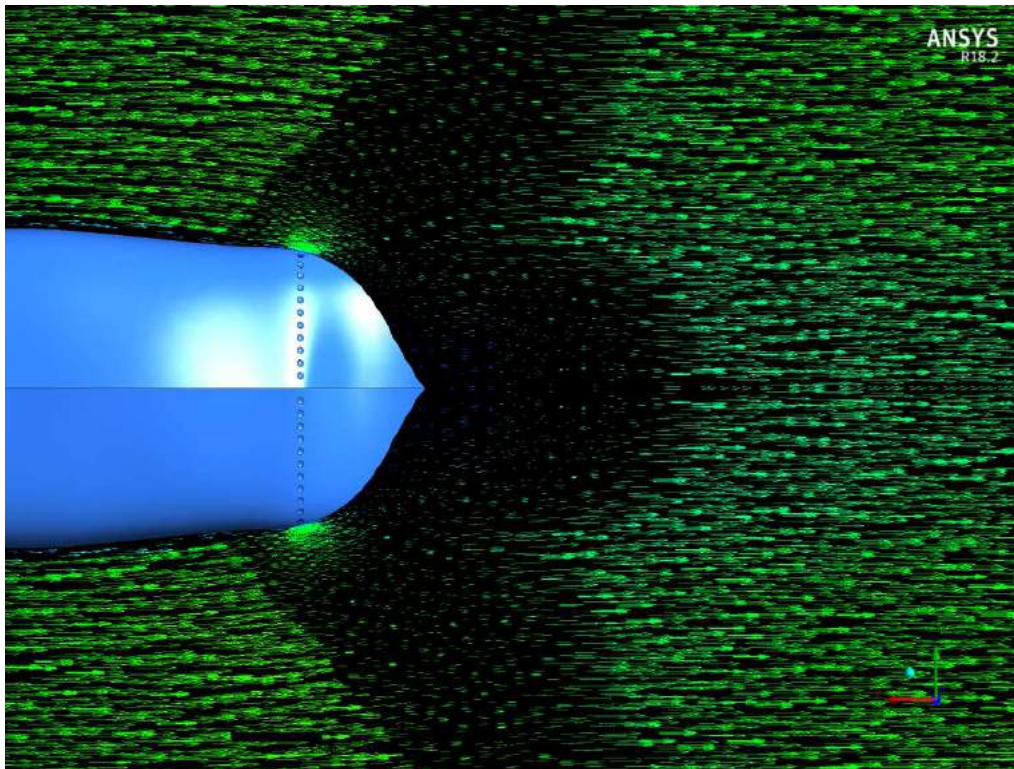


Lampiran E. 11 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 7 knot

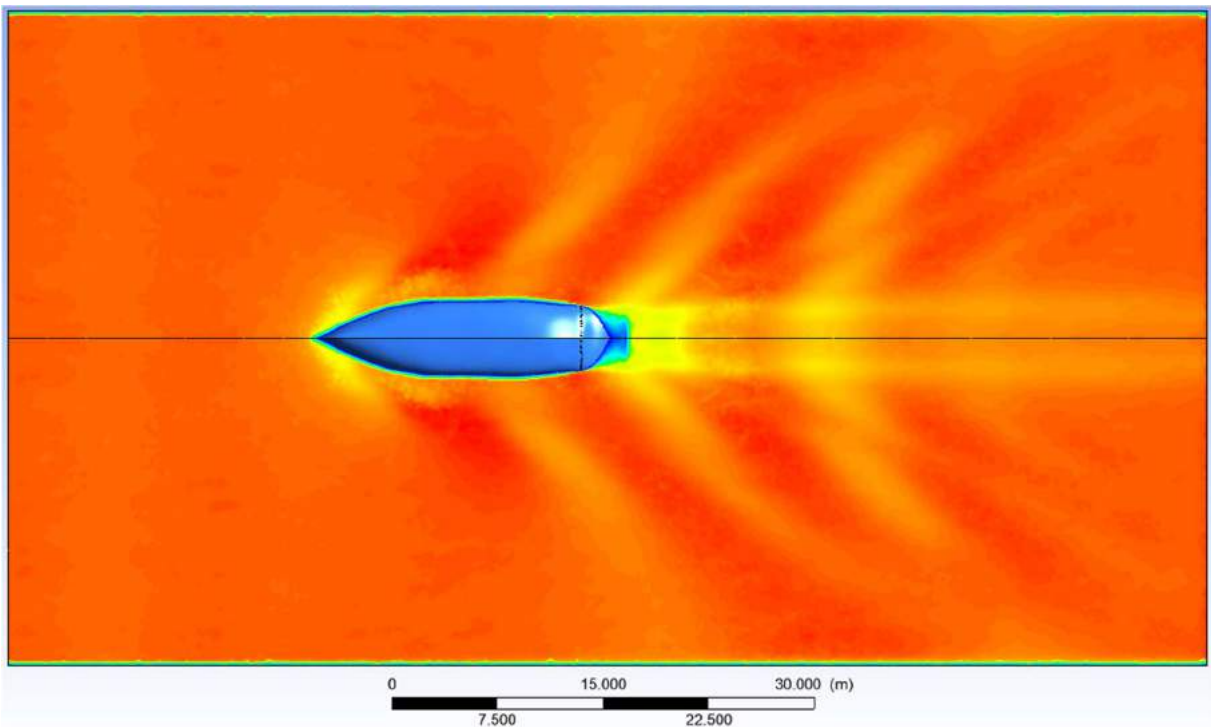


Lampiran E. 12 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 9 knot

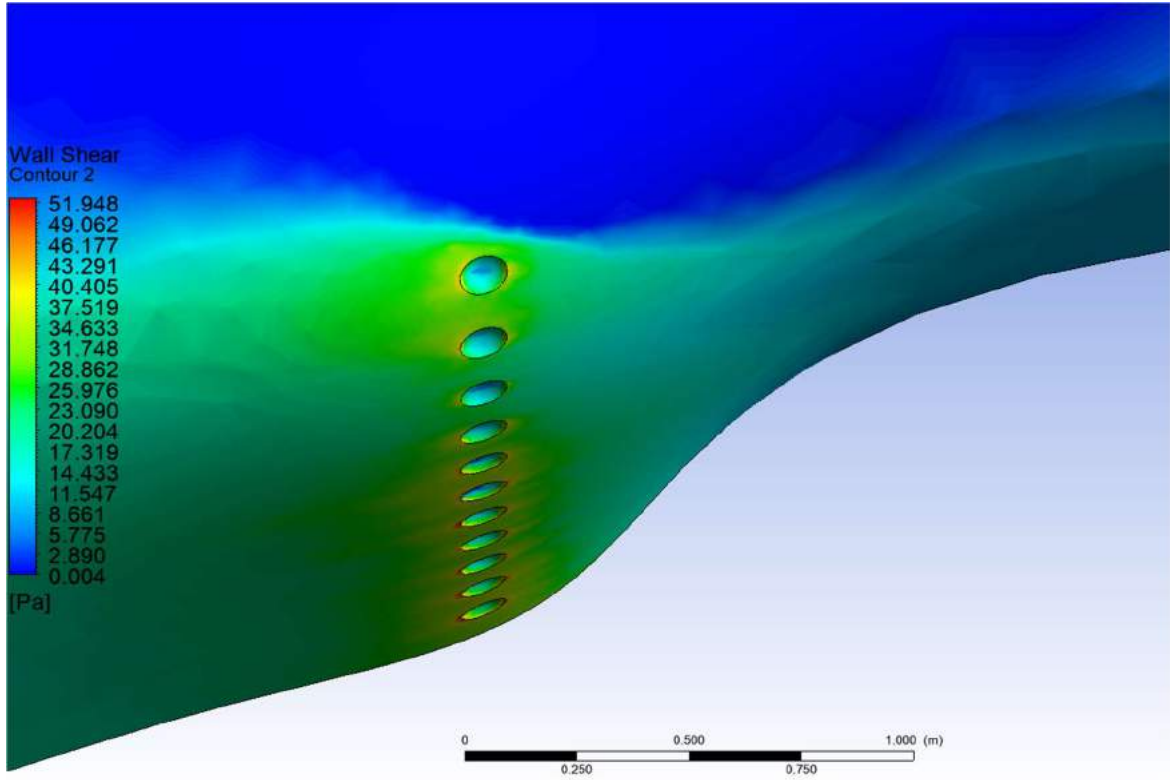
9 Knot



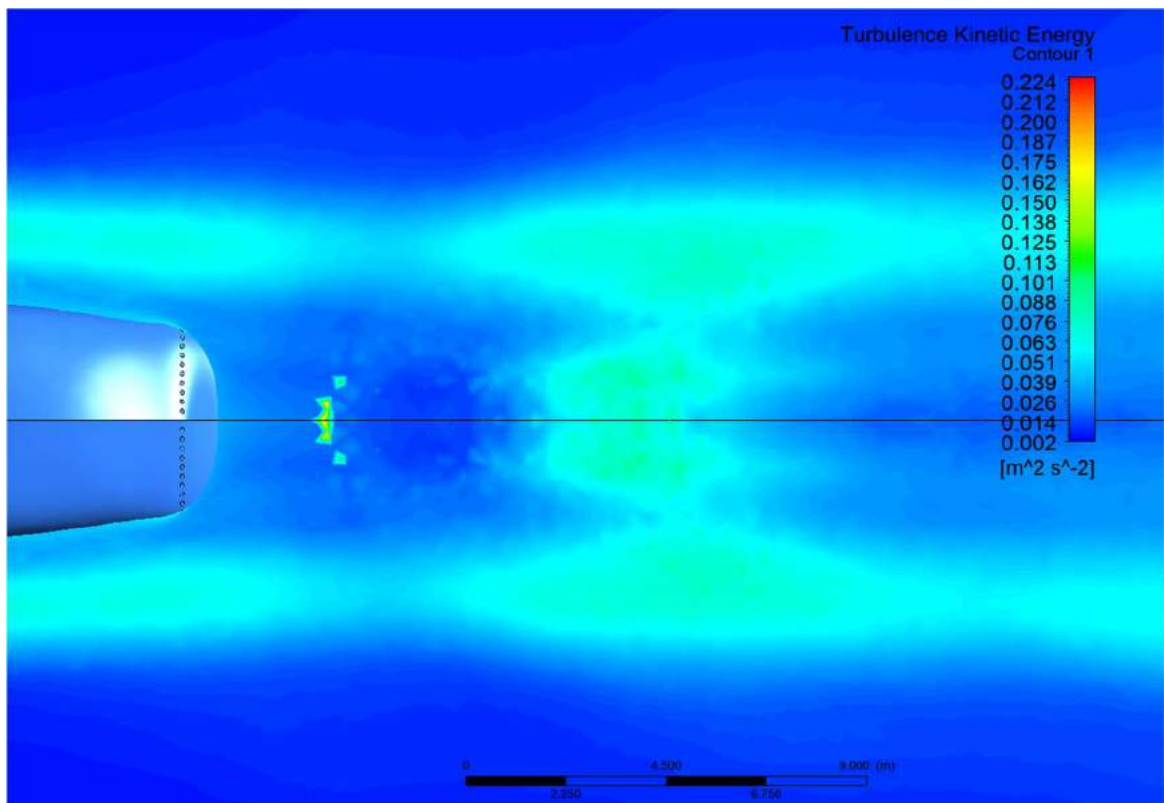
Lampiran E. 13 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 9 knot



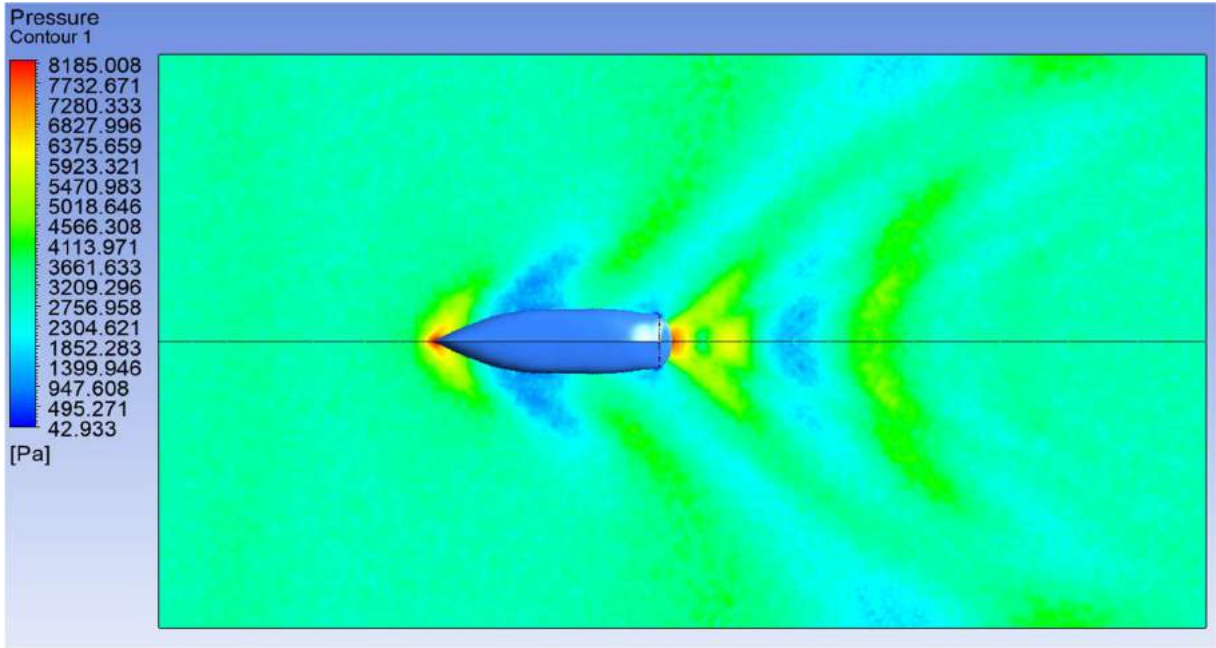
Lampiran E. 14 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 9 knot



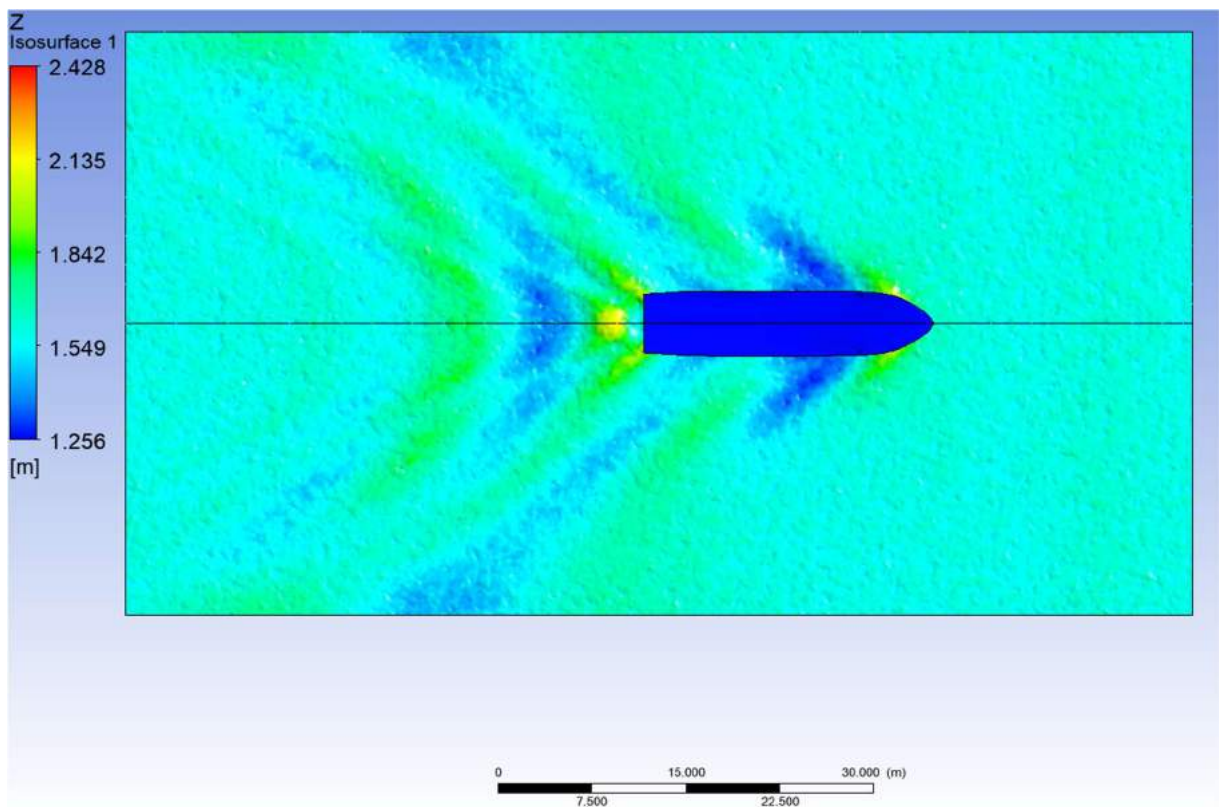
Lampiran E. 15 Kontur tegangan geser model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 9 knot



Lampiran E. 16 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 9 knot

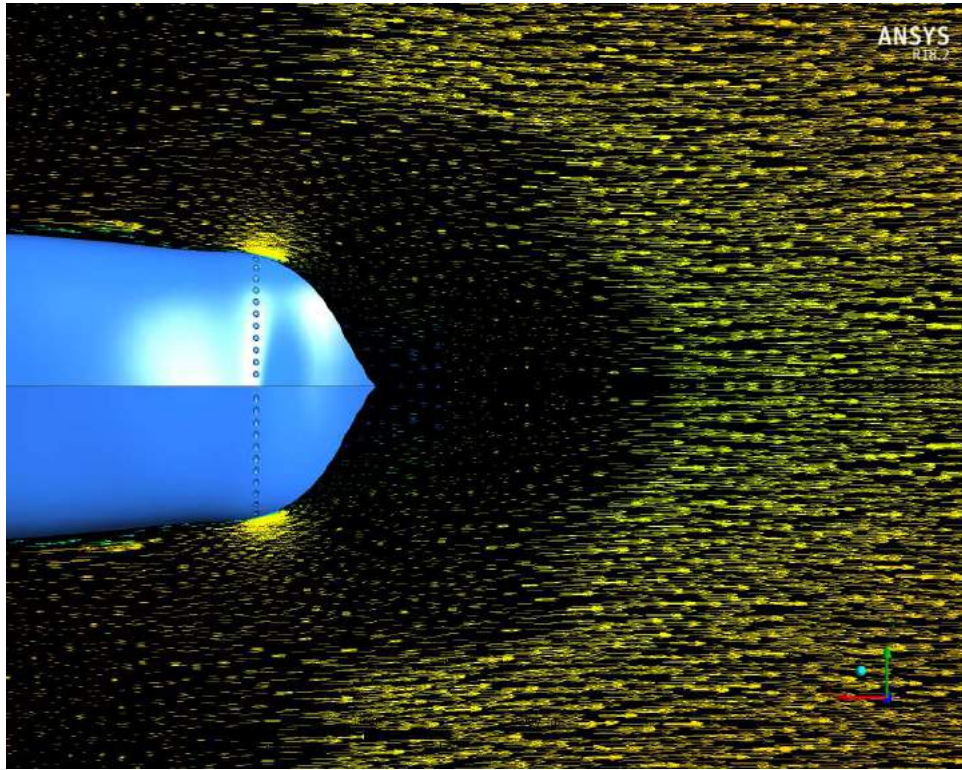


Lampiran E. 17 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 9 knot

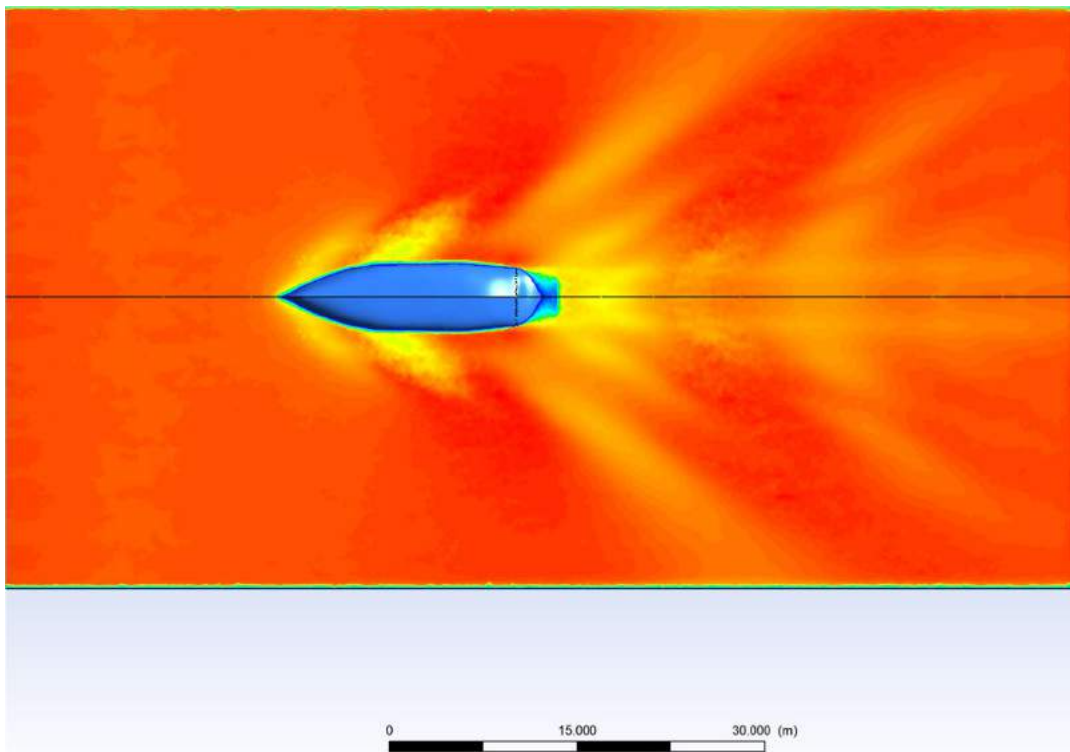


Lampiran E. 18 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 9 knot

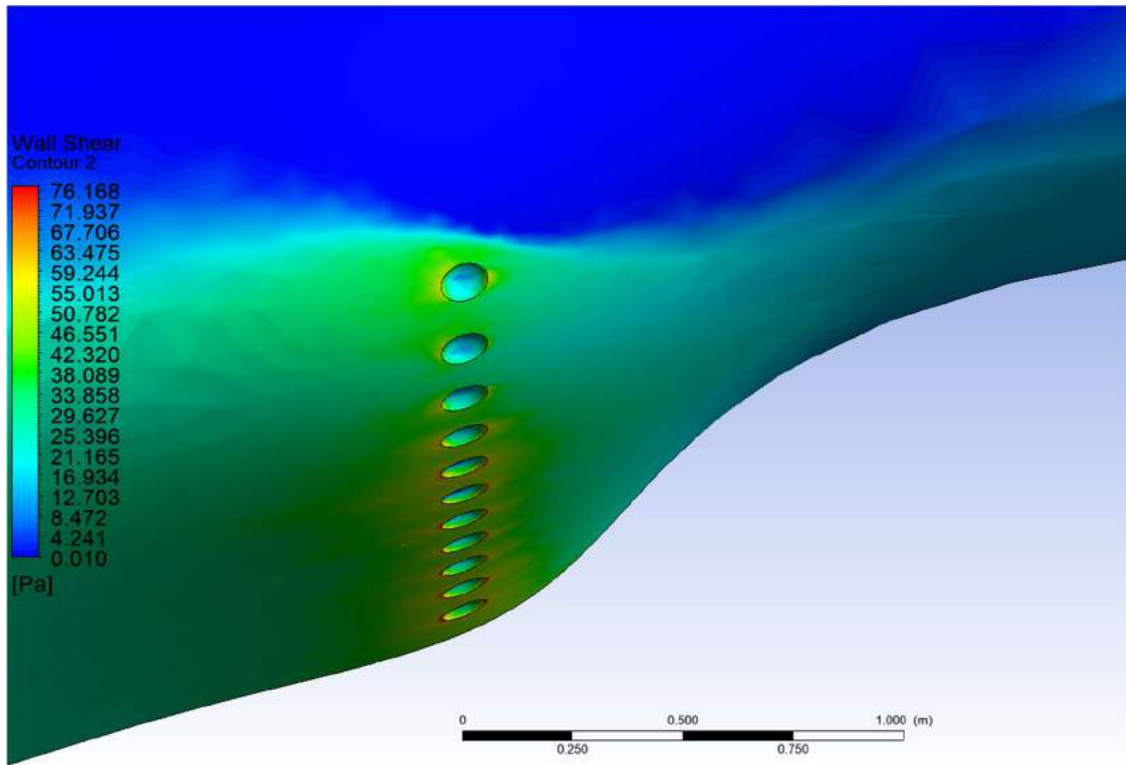
11 Knot



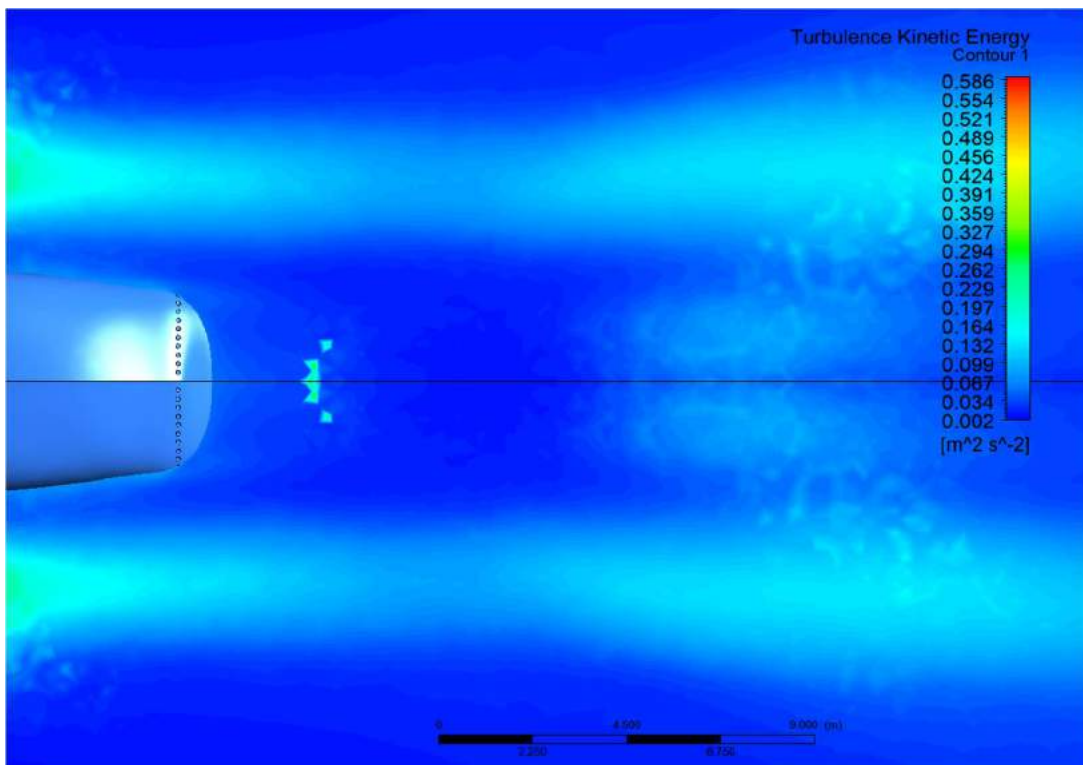
Lampiran E. 19 Vektor kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 11 knot



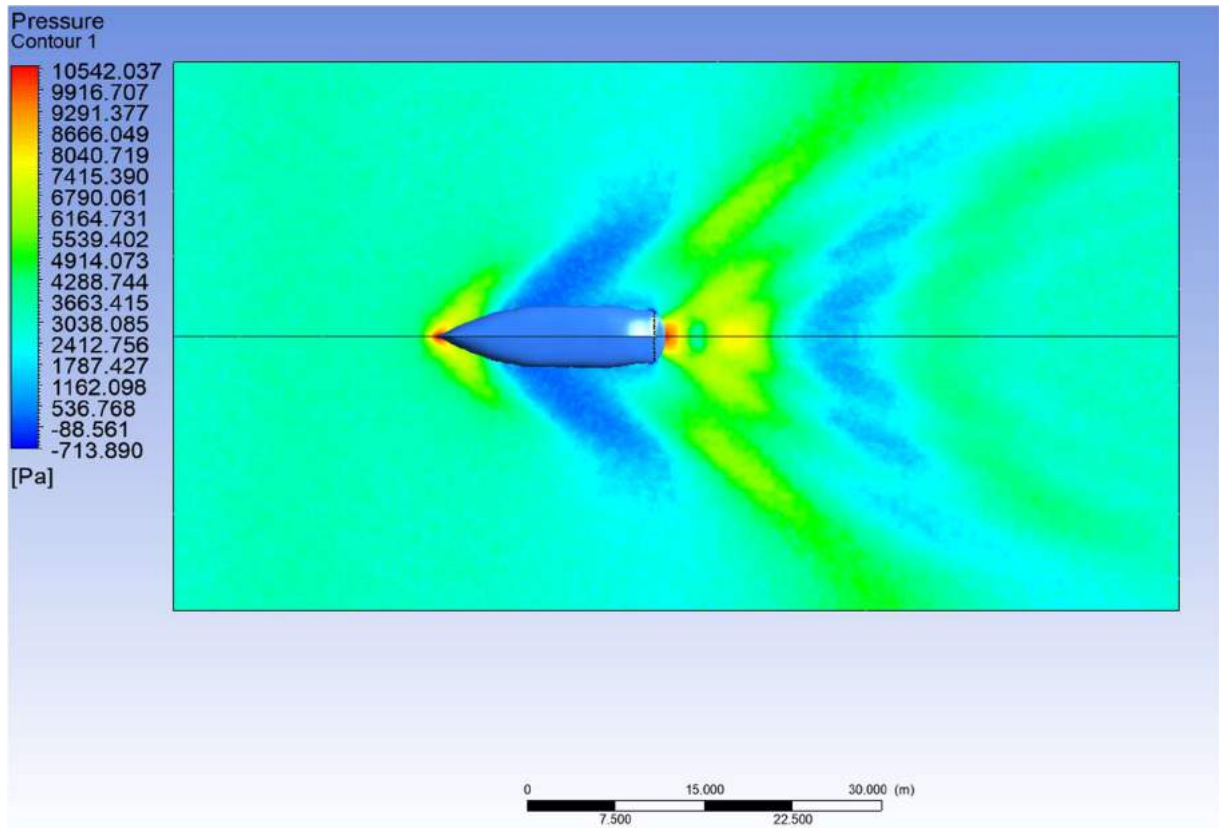
Lampiran E. 20 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 11 knot



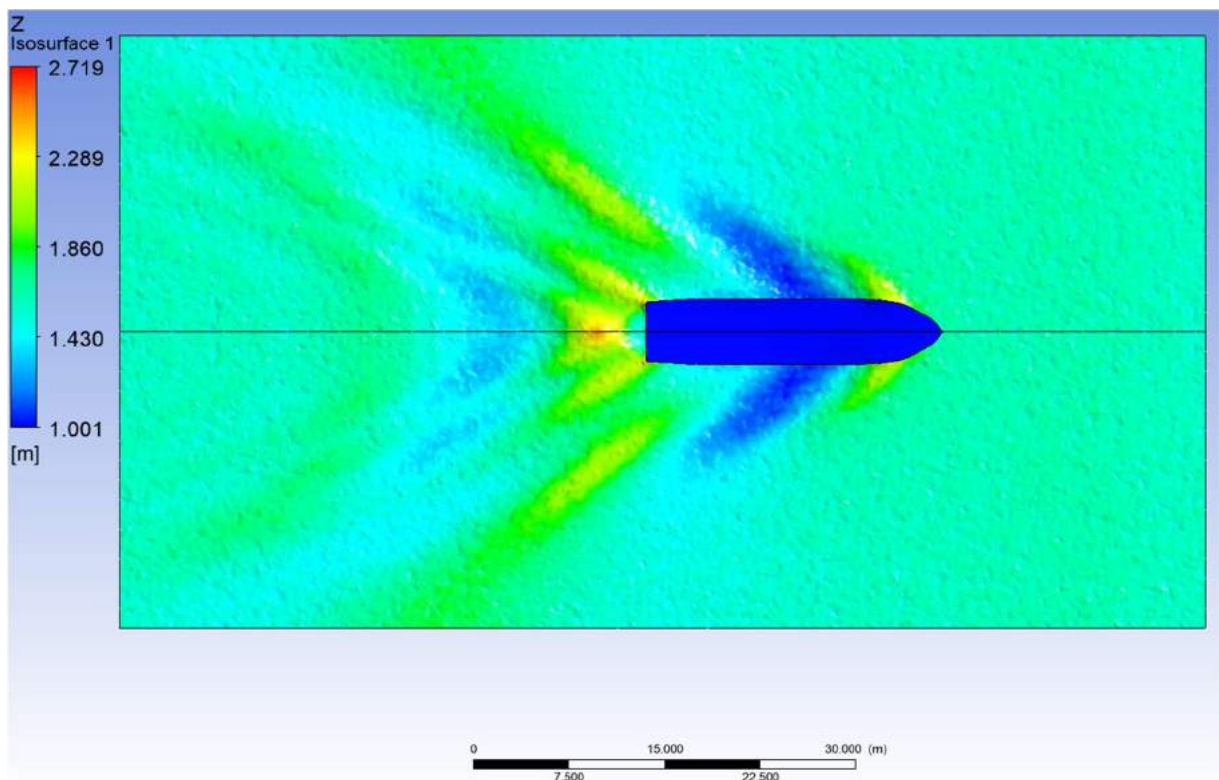
Lampiran E. 21 Kontur kecepatan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 11 knot



Lampiran E. 22 Kontur energi kinetik turbulen model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 11 knot



Lampiran E. 23 Kontur tekanan model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 11 knot



Lampiran E. 24 Kontur *free surface* model *dimple surfaced hull 3* pada kecepatan 11 knot

BIODATA PENULIS



Ariel Krisna Boediman merupakan nama lengkap penulis. Penulis lahir di Jakarta pada 18 Oktober 1997. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK. Tunas Permata, Lippo Karawaci, kemudian melanjutkan bersekolah di High/Scope Indonesia Elementary Program, Jakarta, lalu melanjutkan ke SMP Mardi Yuana Depok dan SMA Kristen 7 BPK Penabur Jakarta. Setelah lulus SMA penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2015 melalui jalur SBMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan penulis mengambil bidang studi Rekayasa Perkapalan - Hidrodinamika. Selama masa studi di ITS, selain menempuh aktivitas akademik, penulis juga aktif di bidang ekstrakurikuler. Penulis tercatat aktif sebagai Wakil Ketua Umum UKM Musik ITS Periode 2017, Ketua Acara Sampanesia HIMATEKPAL periode 2016/2017, dan Staf Departemen Media Informasi Kreatif HIMATEKPAL Periode 2016/2017. Penulis juga tercatat pernah menjuarai kompetisi tingkat internasional yaitu *2nd Prize Award – Sembcorp Marine's Greenwave Environmental Care Project 2018* (Singapore) dan *Good Presenter Award* pada kompetisi yang sama.

Email : arielboediman@yahoo.com