



TESIS - MN092350

**KAJIAN BENTUK *STERN HULL* KAPAL
SHALLOW DRAFT UNTUK MENINGKATKAN
PERFORMANCE KAPAL**

HABIBIE SID'QON

4114 203 341

DOSEN PEMBIMBING

Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK PRODUKSI DAN MATERIAL KELAUTAN

PROGRAM STUDI TEKNOLOGI KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015



THESIS - MN092350

**STUDY FOR THE STERN HULL IN SHALLOW
DRAFT VESSEL TO INCREASE SHIP
PERFORMANCE**

HABIBIE SID'QON

4114 203 341

SUPERVISOR

Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.

POST GRADUATE PROGRAM

MAJOR OF MARINE PRODUCTION AND MATERIAL ENGINEERING

PROGRAM STUDY OF MARINE TECHNOLOGY

FAKULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

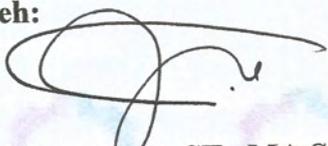
2015

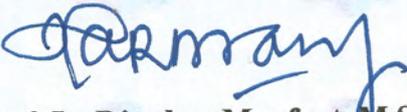
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

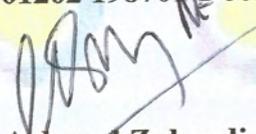
Oleh:
Habibie Sid'qon
4114203341

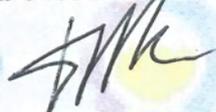
Tanggal Ujian : 22 Januari 2015
Periode Wisuda : Maret 2015

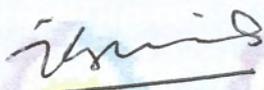
Disetujui Oleh:


1. Aries Sulisetvono, ST., MA.Sc., Ph.D. (Pembimbing)
NIP. 19710320 199512 1 002


2. Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19601202 198701 1 001


3. Prof. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19590505 1984031 012


4. Prof. Ir. I.K.A.P. Utama, M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19670406 199203 1 001


5. Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc. (Penguji)
NIP. 19691231 200604 1 178

Direktur Program Pascasarjana,


Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
NIP. 19640405 199002 1 001

KAJIAN BENTUK STERN HULL KAPAL SHALLOW DRAFT UNTUK MENINGKATKAN PERFORMANCE

KAPAL

Nama mahasiswa : Habibie Sid'qon

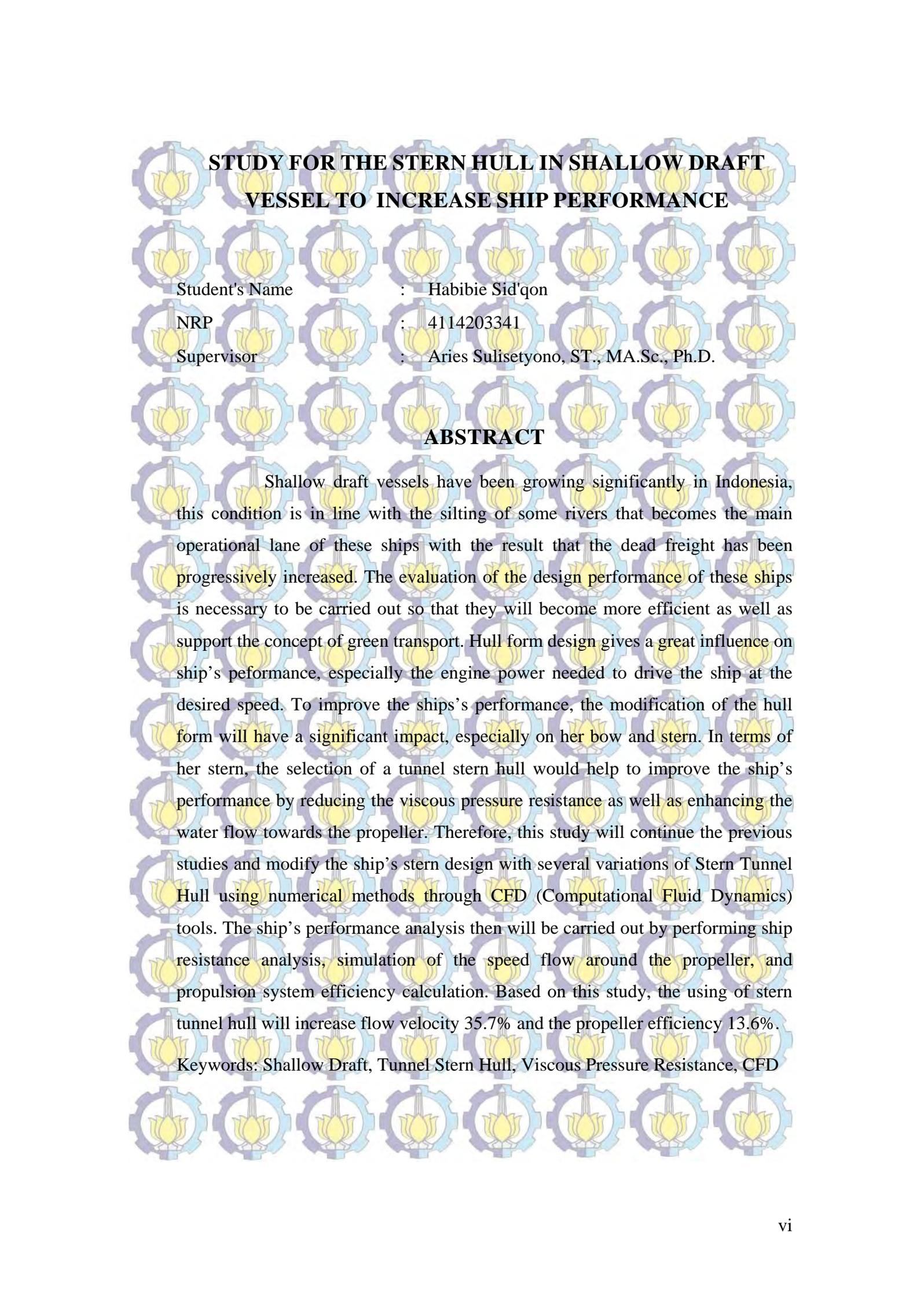
NRP : 4114203341

Pembimbing : Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Kapal-kapal yang bertipe *Shallow Draft* semakin berkembang dengan signifikan di Indonesia, hal ini sejalan dengan pendangkalan beberapa sungai yang menjadi jalur operasional utama kapal-kapal tersebut sehingga kondisi *dead freight* semakin lama semakin meningkat. Beberapa penelitian terkait kapal bertipe *Shallow Draft* juga terus dilakukan, terutama yang menyangkut *performance* kapal-kapal tersebut terutama *Hull form* semakin menjadi fokus utama terlebih lagi bentuk buritan kapal. Dari penelitian sebelumnya, penggunaan bentuk *tunnel stern hull* untuk kapal-kapal *Deep-V* dapat menurunkan *viscous pressure resistance* sehingga *performance* kapal dapat meningkat lebih baik. Penelitian ini akan menitik beratkan pada aplikasi bentuk *tunnel stern hull* terhadap kapal yang bertipe *Shallow Draft* sehingga dapat meningkatkan performa kapal dengan cara menurunkan hambatan kapal dengan bantuan metode numerik melalui CFD (*Computational Fluid Dynamics*), memperbaiki aliran disekitar propeller yang nantinya akan sangat berpengaruh terhadap besarnya efisiensi sistem propulsi. Dari hasil penelitian ini, penggunaan *tunnel stern hull* dapat meningkatkan kecepatan aliran sebesar 35.7% dan peningkatan efisiensi propeller sebesar 13.6%

Kata Kunci: *Shallow Draft, Tunnel Stern Hull, Viscous Pressure Resistance, CFD*



STUDY FOR THE STERN HULL IN SHALLOW DRAFT VESSEL TO INCREASE SHIP PERFORMANCE

Student's Name : Habibie Sid'qon

NRP : 4114203341

Supervisor : Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

Shallow draft vessels have been growing significantly in Indonesia, this condition is in line with the silting of some rivers that becomes the main operational lane of these ships with the result that the dead freight has been progressively increased. The evaluation of the design performance of these ships is necessary to be carried out so that they will become more efficient as well as support the concept of green transport. Hull form design gives a great influence on ship's performance, especially the engine power needed to drive the ship at the desired speed. To improve the ships's performance, the modification of the hull form will have a significant impact, especially on her bow and stern. In terms of her stern, the selection of a tunnel stern hull would help to improve the ship's performance by reducing the viscous pressure resistance as well as enhancing the water flow towards the propeller. Therefore, this study will continue the previous studies and modify the ship's stern design with several variations of Stern Tunnel Hull using numerical methods through CFD (Computational Fluid Dynamics) tools. The ship's performance analysis then will be carried out by performing ship resistance analysis, simulation of the speed flow around the propeller, and propulsion system efficiency calculation. Based on this study, the using of stern tunnel hull will increase flow velocity 35.7% and the propeller efficiency 13.6%.

Keywords: Shallow Draft, Tunnel Stern Hull, Viscous Pressure Resistance, CFD

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “Kajian Bentuk *Stern Hull* Kapal *Shallow Draft* Untuk Meningkatkan Performance Kapal”.

Di dalam penyusunan Tesis ini, penulis merasa banyak hambatan yang penulis hadapi. Namun, berkat bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak, hambatan tersebut dapat penulis atasi. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tesis ini, yaitu:

1. Bapak Aries Sulisetyono, ST., MA.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Tesis atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tesis ini;
2. Bapak Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Wali yang telah banyak membimbing penulis selama masa studi penulis di Jurusan Teknik Perkapalan, ITS, Surabaya;
3. Bapak Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D. atas bantuan serta dukungan dalam penyelesaian Tesis ini;
4. Istriku tercinta Mega Puspasari serta Anak-anakku tersayang Faiz, Habli, dan si junior calon bayi yang selalu mendukung penulis dengan motivasi dan doa;
5. Rekan kerja saudara Sutiyo, Gita, Didik, Lucky, Baidowi, Hasanudin dan Matias yang telah membantu jalannya pengerjaan Tesis ini;
6. Terakhir namun tidak kalah penting, Orang tua, adik dan kakak yang terus memberi *support*..

Penulis menyadari bahwa laporan Tesis ini masih jauh dari sebuah kesempurnaan. Oleh sebab itu, penulis mohon maaf apabila ada kesalahan-kesalahan di dalam penulisan laporan ini. Akhir kata, penulis harapkan laporan ini mempunyai suatu manfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Surabaya, 23 Januari 2015

Habibie Sidqon

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Maksud dan Tujuan	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Hipotesis	5
1.6 Batasan Masalah	5
BAB II. KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1. <i>Shallow Draft Vessel</i>	7
2.2. Tunnel Stern Hull	8
2.3. Hambatan Kapal	9
2.4. Fenomena Aliran Air Dibelakan Kapal	13
2.4.1. <i>Velocity of advance</i> (V_a) dan <i>Wake Fraction</i> (w_T)	13
2.4.2. Efisiensi Sistem Propulsi (η_D)	14
2.5. Computational Fluid Dynamics (CFD)	16
2.5.1. Governing Equation	17
2.5.2. Metode Penyelesaian	17
2.5.3. Software	18
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1. Langkah-langkah Penelitian	21
3.1.1. Definisi Permasalahan	21
3.1.2. Studi Literatur	21

3.1.3.	Pengumpulan Data	21
3.1.4.	Simulasi Hambatan <i>existing ship</i> dengan <i>tools</i> CFD	22
3.1.5.	Evaluasi Hambatan Total dengan CFD	22
3.1.6.	Modifikasi Bentuk Buritan Kapal	23
3.1.7.	Analisa <i>Performance</i> Kapal	23
3.1.8.	Pemilihan Bentuk Buritan yang Optimum	24
3.2.	Alur Penelitian	25
BAB IV. PEMBUATAN MODEL DAN SIMULASI		27
4.1.	Pendahuluan	27
4.2.	Pembuatan Model Kapal	27
4.3.	Model Stern Tunnel	28
4.4.	Pemberian <i>Boundary</i> dan <i>Meshing</i> pada Model	31
4.5.	Tahap Pre Processor	36
4.6.	Tahap Solver	39
4.7.	Post Processor	40
4.8.	Proses Validasi	45
BAB V. HASIL SIMULASI MODEL		47
5.1.	Pendahuluan	47
5.2.	Hasil Analisis Kecepatan Aliran untuk Model CFD Kapal Asli	48
5.3.	Hasil Analisis Kecepatan Aliran untuk Model CFD Kapal Tunnel A	50
5.4.	Hasil Analisis Kecepatan Aliran untuk Model CFD Kapal Tunnel B	53
5.5.	Perbandingan Aliran <i>uniform</i>	55
5.6.	Perbandingan Model CFD	57
5.6.1.	Perbandingan Model CFD Untuk <i>Deep Water</i>	57
5.6.2.	Perbandingan Model CFD Untuk <i>Shallow Water</i>	57
5.6.3.	Pengaruh Lebar Tunnel Terhadap Kecepatan Aliran	58
5.7.	Perbandingan Effisiensi Propeller	59
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN		63

6.1.	Pendahuluan.....	63
6.2.	Kesimpulan.....	63
6.3.	Saran.....	64
	DAFTAR PUSTAKA.....	xiii
	LAMPIRAN A GAMBAR MODEL CFD KAPAL.....	xv
	LAMPIRAN B GAMBAR <i>MESHING</i> DESAIN <i>STERN TUNNEL</i>	xvi
	LAMPIRAN C GAMBAR DISTRIBUSI TEKANAN.....	xviii
	LAMPIRAN D GAMBAR DISTRIBUSI ALIRAN.....	xx
	LAMPIRAN E OPEN WATER DIAGRAM.....	xxiii
	LAMPIRAN F PRESSURE PADA PLANE 1.....	xxix
	LAMPIRAN G VECTOR ALIRAN.....	xxx

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Perbandingan Dimensi Kapal dan Model	28
Tabel 4.2 Parameter dari desain <i>stern tunnel</i>	29
Tabel 4.3 Hubungan Antara Jumlah Elemen dan Hasil Simulasi Hambatan Total Kondisi <i>Deep water</i> (Anggara, 2013)	35
Tabel 4.4 Ekspresi-ekspresi pada CEL (CFX, 2007)	37
Tabel 4.5 Proses Validasi Hambatan Total Model CFD Kapal Asli dengan Percobaan Towing Tank	45
Tabel 4.6 Nilai Hambatan Total Model CFD	45
Tabel 5.1 Rata-rata kecepatan aliran (V_a), debit (Q) dan mass flow (M) model CFD kapal asli	49
Tabel 5.2 Rata-rata kecepatan aliran (V_a), debit (Q) dan mass flow (M) model CFD Tunnel A	52
Tabel 5.3 Rata-rata kecepatan aliran (V_a), debit (Q) dan mass flow (M) model CFD Tunnel B	54
Tabel 5.4 Hasil Perhitungan Efisiensi Propeller	61
Tabel 5.5 Rasio kecepatan aliran untuk kondisi <i>deep water</i>	61
Tabel 5.6 Rasio kecepatan aliran untuk kondisi <i>shallow water</i>	61
Tabel 5.7 Pengaruh Penambahan lebar tunnel terhadap Efisiensi Propeller	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Self Propelled Urea Barge MV Pusri Indonesia I (Ahadyanti G, 2014)	8
Gambar 2.2 Beberapa bentuk <i>Stern Hull</i> dan <i>Tunnel Stern Hull</i>	9
Gambar 2.3 Komponen-komponen <i>resistance</i> (Bertram, 2000)	9
Gambar 2.4 Komponen Hambatan Viskos (Carlton, 2007)	11
Gambar 2.5 Puncak gelombang dari kelompok gelombang Kelvin yang ditimbulkan oleh usikan yang bergerak di P (Harvald, 1992)	12
Gambar 3.1 Alur Penelitian	25
Gambar 4.1 Lambung Model <i>Existing Ship</i>	28
Gambar 4.2 Geometri dari <i>Stern Tunnel</i>	29
Gambar 4.3 Perbandingan Desain <i>Stern Tunnel</i>	30
Gambar 4.4 Sketsa domain simulasi CFD	31
Gambar 4.5 Pembuatan Domain Komputasi	32
Gambar 4.6 Pengelompokan Parts dan <i>mesh</i> pada model <i>existing ship</i>	33
Gambar 4.7 Pembuatan Fluida	33
Gambar 4.8 vektor kecepatan air dan udara pada simulasi 2 fluida	34
Gambar 4.9 <i>Grid Independence</i> Evaluasi Hambatan Total <i>Deep water</i> (Anggara, 2013)	35
Gambar 4.10 Ukuran Kerapatan <i>Mesh</i> pada Domain Komputasi	36
Gambar 4.11 Ukuran (Kerapatan) <i>Mesh</i> pada Model	36
Gambar 4.12 Hasil Pendefinisian Batas (<i>Boundary</i>)	38
Gambar 4.13 Grafik Proses <i>Running</i> pada Tahapan Solver	40
Gambar 4.14 Bentuk dan Lokasi Plane	41
Gambar 4.15 Lokasi Plane (sisi <i>portside</i>) pada tahap <i>Post-Processor</i>	42

Gambar 4.16 Bentuk Plane (sisi <i>portside</i>) pada tahap <i>Post-Processor</i>	42
Gambar 4.17 <i>Contour</i> kecepatan pada tahap <i>post-processor</i>	43
Gambar 4.18 Distribusi tekanan pada lambung model CFD kapal Tunnel A untuk <i>deep water</i>	43
Gambar 4.19 Distribusi tekanan pada lambung model CFD kapal Tunnel A untuk <i>shallow water</i>	44
Gambar 4. 20 Aliraaan fluida di sekitar model kapal tunnel A untuk <i>deep water</i> ..44	
Gambar 4. 21 Aliran fluida di sekitar model kapal tunnel A untuk <i>shallow water</i>	44
Gambar 5.1 Bagan simulasi model	47
Gambar 5.2 Distribusi kecepatan aliran tiap plane untuk Model CFD Kapal Asli49	
Gambar 5.3 Grafik rata-rata kecepatan aliran model CFD kapal asli.....	50
Gambar 5.4 Distribusi kecepatan aliran tiap plane untuk Model CFD Kapal Tunnel A	51
Gambar 5.5 Grafik rata-rata kecepatan aliran model CFD kapal Tunnel A	52
Gambar 5.6 Distribusi kecepatan aliran tiap plane untuk Model CFD Kapal Tunnel B.....	54
Gambar 5.7 Grafik rata-rata kecepatan aliran model CFD kapal Tunnel B	55
Gambar 5. 8 Perbandingan aliran uniform setiap model CFD.....	56
Gambar 5.9 Grafik kecepatan rata-rata aliran model CFD deep water.....	57
Gambar 5.10 Grafik kecepatan rata-rata aliran model CFD shallow water.....	58
Gambar 5.11 Pengaruh lebar tunnel terhadap kecepatan aliran untuk plane 1.....	59
Gambar 5. 12 Grafik Open Water Diagram kondisi Deep Water.....	60
Gambar 5. 13 Grafik Open Water Diagram kondisi Deep Water.....	60
Gambar 5. 14 Grafik pengaruh lebar tunnel terhadap efisiensi propeller.....	62

DAFTAR PUSTAKA

Ahadyanti G. 2014. Tugas Akhir. *Modifikasi Bentuk Lambung pada Shallow Draft Bulk Carrier Untuk Menurunkan Konsumsi Bahan Bakar*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Anderson, John D. 1995. *Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications*. Science/Engineering/Math. McGraw-Hill Science.

Anggara S. 2013. Thesis. *Studi Komperatif Performaa Hidrodinamik Kapal Bertipe Shallow Draft Barge Pada Kondisi Perairan Dangkal, Sedang dan Dalam*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Atlar, Mehmet, et al. "Anti-slamming bulbous bow and tunnel stern applications on a novel Deep-V catamaran for improved performance." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 5.2 (2013): 302-312.

Bertram, V. 2002. *Practical Ship Hydrodynamics*. Butterworth Heinemann.

Carlton, J. 2007. *Marine Propellers and Propulsion, 2nd edition, Chapter 12: Ship Resistance and Propulsion*. Butterworth-Heinemann.

Churchward, V., E. Isely, and A.T. Kearney. 1981. *National waterways study--overview of the transportation industry*. U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources, Water Resources Support Center, Fort Belvoir, VA.

CFX. 2007. CFX Manual XIII Chapter 9: *Free Surface Flow Over a Bump*. Ansys.

Couser, P. 2002. *Use of computers in the design of high-speed craft. High-speed craft technology and operation*. RINA.

Couser, P. R., Molland, A. F., Amstrong, N. A. and Utama, I. K. A. P. 1997. *Calm Water Powering Prediction for High Speed Catamarans*. In Fast '97. Sydney, Australia.

Harvald, Sv. Aa. 1992. *Tahanan dan Propulsi Kapal (Terjemahan)*. Surabaya : Airlangga Press.

Jamaluddin, A., Utama, I. K. A. P. and Molland, A. F. 2010. *Experimental Investigation into The Drag Characteristics of Symmetrical and Asymmetrical Staggered and Unstaggered Catamaran*. International Conference on Ship and Offshore Technology (ICSOT)-Indonesia 2010. Surabaya, Indonesia.

Koh, K.K and Yasukawa, H. 2012. *Comparison study of a pusher barge system in shallow water, medium shallow water and deep water conditions*. Elsevier.

Lewis, Edward V. 1988. *Principles of Naval Architecture Volume II: Resistance, Propulsion and Vibration*. Society of Naval Architects and Marine Engineers.

Madden, Lewis D., Anthony J. Mannino, and Terrence W. Schmidt. "Variable-draft vessel." U.S. Patent No. 6,877,450. 12 Apr. 2005.

Mahardika, Nanang. 2007. Tugas Akhir. *Simulasi Nnumerik Aliran 3D untuk Kondisi Quasi Steady dan Unsteady pada Turbin Uap Aksial*. Bandung: Institut Teknologi Bandung (ITB).

Mitchell, R. R., and Webb, M. B. 2008. *A study of the base pressure distribution of a Slender Body of Square Cross-Section*. AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1-8.

Van Oortmerssen, G. 1976. "The Motions of a Ship in Shallow Water". *Ocean Engineering* 3, No. 4.

Parsons, Michael G. 2001. *Parametric Design, Chapter 11*. University of Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering.

Setiawan A. 2014. Tugas Akhir. *Modifikasi Bentuk Buritan pada Shallow Draft Bulk Carrier untuk meningkatkan Efisiensi Sistem Propulsi*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Siswanto D. 2011. Handout. *Tahanan Kapal*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Society of Naval Architecs and Marine Engineers (SNAME). 1989. *Principle of Naval Architecture Vol II Resistance and Propulsion*.

Steen, Sverre. 2012. *Speed-Power Prediction based on Model Tests*. Norway: Norwegian University of Science and Technology.

Utama, I. K. A. P., Murdijanto, and Setyawan, Dony. 2011. *Ship Resistance and Propulsion, Teaching Grant*. ITS

Watson, D.G. M. 1998. *Practical Ship Design (Vol. 1)*. (R. Bhattacharyya, Ed.) Oxford: Elsevier.

Zahalka, P. 2002. "Squat". Verein Hanseatischer Transportversicherer. E. V. Bremen-Hamburg.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan semakin meningkatnya kegiatan industri saat ini, mengakibatkan terjadinya lonjakan kegiatan logistik berupa transportasi barang baik kebutuhan bahan mentah ataupun produk olahan. Transportasi menggunakan moda darat memiliki daya angkut yang terbatas dan saat ini di perparah oleh padatnya arus lalu lintas jalan raya, sehingga di beberapa daerah penggunaan jalur laut dan sungai menjadi lebih efisien dan ekonomis. Oleh karena itu, kapal memegang peranan penting untuk angkutan muatan curah bahan mentah ataupun produk olahan karena angkutan jenis ini dapat membawa muatan yang jauh lebih banyak dibanding angkutan darat (Anggara dan Aryawan, 2013).

Selain itu di beberapa daerah tertentu di Indonesia khususnya di pedalaman Kalimantan dan Sumatra tidak semua tempat dapat diakses secara baik melalui darat, ada daerah tertentu yang hanya dapat diakses dengan jalur air, dalam hal ini sungai. Transportasi sungai di Indonesia dimanfaatkan dengan baik oleh beberapa perusahaan yang berada di sekitar wilayah tersebut sebagai sarana pendistribusian hasil produksi dan pengadaan bahan-bahan kebutuhan produksi perusahaan. Salah satu perusahaan yang memanfaatkan transportasi sungai adalah PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (PT Pusri). Kondisi perairan Indonesia yang memiliki banyak sungai sebagai jalur pelayaran kapal ini dapat membantu mengurangi beban jalan raya untuk angkutan barang.

Sementara itu di Kalimantan, PT Tonasa Lines yang merupakan anak perusahaan PT Semen Tonasa berencana membangun 11 kapal *Self Propelled Cement Barge (SPCB)* yang di rencanakan di gunakan untuk distribusi semen di pulau Kalimantan yang banyak memiliki jalur sungai (Tribunnews, 2012). Kapal tersebut direncanakan memiliki payload antara 8000 dan 8500 DWT. Sebagaimana diketahui bersama bahwa sungai menjadi tulang punggung jalur distribusi di Kalimantan. Pulau Kalimantan memiliki 13,000 km jalur sungai dan 100 dermaga sungai (Aji, 2007). Hal tersebut menjadikan kapal SPB yang mampu

berlayar di perairan dangkal menjadi suatu kebutuhan mutlak untuk kelancaran distribusi nasional.

Berdasar data register BKI saat ini terdapat lebih dari 140 kapal SPB berbagai jenis yang beroperasi di Indonesia (Klasifikasi Indonesia, 2014). Dari jumlah tersebut, 136 diantaranya merupakan kapal Self Propelled Oil Barge (SPOB). Dari sisi usia kapal-kapal SPOB tersebut relatif muda yaitu berkisar 10 tahun (2003– 2013). Hal tersebut menandakan bahwa pertumbuhan jumlah kapal *Self-Propelled Barge* (SPB) di Indonesia sangatlah tinggi dan sampai saat ini masih belum ada standard desain kapal SPB. Namun performa dari desain kapal-kapal tersebut masih perlu di evaluasi sehingga lebih efisien dan mendukung konsep *green transport*.

Desain bentuk lambung memberikan pengaruh besar pada performa kapal khususnya daya yang dibutuhkan mesin untuk menggerakkan kapal pada kecepatan yang di inginkan. Besarnya daya yang dibutuhkan mesin tergantung pada hambatan kapal. Secara umum semakin *streamline* bentuk lambung semakin kecil nilai tahanan kapal namun di sisi lain semakin *streamline* maka semakin kecil pula payload dari kapal tersebut. Oleh karenanya perlu di kembangkan standar bentuk lambung *Shallow Draft Vessel* yang memiliki performa lebih baik dari desain-desain sebelumnya.

Seiring dengan pembangunan kapal *Shallow Draft* yaitu Self Propelled Urea Barge (SPUB) milik salah satu perusahaan pupuk di Indonesia ini, maka beberapa penelitian terkait peningkatan performa tipe kapal ini sudah dilakukan, diantaranya adalah:

1. *Studi komparatif Performa Hidrodinamik Kapal bertipe Shallow Water Draft Barge Pada Kondisi Perairan Dangkal, Sedang dan Dalam* (Anggara, 2013);
2. *Modifikasi Bentuk Buritan pada Shallow Draft Bulk Carrier untuk meningkatkan Efisiensi Sistem Propulsi* (Setiawan, 2014);
3. *Modifikasi Bentuk Lambung pada Shallow Draft Bulk Carrier Untuk Menurunkan Konsumsi Bahan Bakar* (Ahadyanti, 2014).

Secara umum, hasil evaluasi dari ketiga penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa *Stern Hull* dari kapal *Shallow Draft* ini mempunyai performa yang rendah seperti:

- Aliran air tidak uniform;
- Mempunyai hambatan kapal yang besar;
- Unsteady propeller load;
- Getaran yang besar.

Untuk memperbaiki *performance* dari kapal tersebut maka modifikasi dari bentuk hull form akan sangat berpengaruh secara signifikan, terutama dibagian haluan dan buritan kapal. Khusus untuk bentuk buritan kapal, konsep penggunaan tunnel akan sangat membantu memperbaiki *performance* kapal, yaitu dapat menurunkan *viscous pressure resistance* dan memperbaiki aliran air yang menuju ke propeller tersebut (Atlar, Mehmet, et al. 2013).

Disamping itu, pengaruh kedalaman air juga perlu mendapat perhatian khusus, baik itu perairan dalam (*deep water*) maupun perairan dalam (*shallow water*). Kajian pada beberapa kedalaman ini perlu dilakukan karena menurut penelitian oleh para ahli, Koh dan Ysukawa (2012), Andersen (1979), Oortmerssen (1976), kapal pada umumnya, termasuk tipe *barge*, menunjukkan performa yang berbeda ketika kedalaman air berubah, baik dari aspek hambatan maupun aspek *ship performance*. Dijelaskan bahwa fenomena ini terjadi akibat *squat effect*, yaitu menurunnya tekanan di bagian bawah kapal akibat interaksi antara dasar perairan dan lambung kapal (Zahalka, 2012). Penurunan tekanan tersebut dapat menyebabkan kapal cenderung mengalami *grounding*. Selain itu juga dapat menyebabkan kenaikan hambatan dan menurunnya kemampuan *performance* kapal.

Oleh sebab itu penelitian ini akan meneruskan penelitian sebelumnya dan mengkaji ulang rancangan bentuk buritan kapal (*Stern Hull*) dengan penggunaan beberapa variasi *Tunnel Stern Hull*. Diharapkan dari penelitian ini dapat diperoleh bentuk buritan kapal yang paling optimum untuk kapal bertipe *Shallow Draft* ini.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, beberapa permasalahan yang bisa dipaparkan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memodifikasi bentuk buritan kapal *Shallow Draft* menjadi *Tunnel Stern Hull* dengan kondisi *displacement* yang sama dengan *existing ship*?
2. Bagaimana pola aliran yang terjadi di daerah sekitar propeller tersebut?
3. Bagaimana hambatan kapal yang terjadi kapal *Shallow Draft* tersebut?
4. Bagaimana efisiensi sistem propulsi pada kapal *Shallow Draft* tersebut?

1.3 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk melanjutkan dan mengembangkan penelitian sebelumnya mengenai *Modifikasi Bentuk Buritan pada Shallow Draft Bulk Carrier untuk meningkatkan Efisiensi Sistem Propulsi* (Setiawan, 2014) dan *Modifikasi Bentuk Lambung pada Shallow Draft Bulk Carrier Untuk Menurunkan Konsumsi Bahan Bakar* (Ahadyanti, 2014).

Sementara tujuan dari penelitian ini antara lain :

1. Membuat model *Tunnel Stern Hull* pada kapal *Shallow Draft* yang sesuai untuk perairan dangkal;
2. Mengetahui kecepatan aliran disekitar pada kapal *Shallow Draft* tersebut diatas;
3. Mengetahui dan membandingkan hambatan kapal model *Tunnel Stern Hull* dengan *existing ship*;
4. Menganalisa pengaruh yang ditimbulkan dari bentuk *Tunnel Stern Hull* terhadap peningkatan efisiensi sistem propulsi dengan metode numerik.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat antara lain:

1. Sebagai bahan referensi bagi produsen pupuk sekaligus pemilik kapal pengangkut Urea dalam memilih bentuk lambung untuk pembangunan kapal yang akan datang.



2. Sebagai referensi bagi berbagai pihak mengenai desain bentuk buritan yang lebih optimal.

1.5 Hipotesis

Pemilihan dari beberapa alternatif bentuk buritan kapal dengan menggunakan metode numerik diharapkan mampu meningkatkan performa kapal sehingga dapat mempercepat pembangunan kapal seri selanjutnya (*sister ship*).

1.6 Batasan Masalah

Masalah dibatasi guna menyederhanakan proses perhitungan. Adapun batasan masalah untuk permasalahan ini adalah:

1. Obyek penelitian kapal *Shallow Draft* dibatasi pada kapal Self Propelled Urea Barge milik PT. Pusri untuk perairan dimana kapal tersebut beroperasi;
2. Lambung buritan kapal yang dianalisa adalah *Tunnel Stern Hull*;
3. Penelitian dilakukan dengan menggunakan simulasi komputer (*Computational Fluid Dynamics*) dengan metode secara numerik;
4. Pada penelitian ini tidak memperhitungkan *Squat Effect*;
5. Tujuan analisa hanya dititik beratkan pada aspek pola aliran disekitar propeller, hambatan kapal dan perhitungan efisiensi sistem propulsi.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. *Shallow Draft Vessel*

Lambung kapal didesain sesuai dengan daerah operasional tertentu, seperti penggunaan pada laut dangkal (*shallow water*) maupun laut dalam (*deep water*).

Perbedaan pada desain lambung ini akan memberikan keuntungan yang optimal pada penggunaan daerah operasional tertentu seperti pada desain *shallow draft vessel* atau kapal dengan sarat yang rendah. Kapal dengan tipe *shallow draft* ini sering mempunyai bentuk lambung yang *flat* untuk memaksimalkan *displacement* dengan sarat yang rendah, sedangkan kapal dengan tipe *deep draft* sering menggunakan lambung yang berbentuk *v-hull* yang mana bertujuan untuk meningkatkan kemampuan olah gerak kapal atau *seakeeping* (Madden, Lewis D., Anthony J. Mannino, and Terrence W. Schmidt, 2005).

Kapal dengan tipe *shallow draft* ini seringkali mempunyai bentuk alas (*botom*) yang flat dikarenakan untuk memberikan kemampuan kapal beroperasi di perairan dangkal, seperti di sungai, pelabuhan, pantai, dan perairan dangkal lainnya. Kapal tipe *shallow draft* ini juga didesain dengan kemampuan untuk memaksimalkan muatan (*cargo*) serta dapat mempermudah proses bongkar muat. Beberapa contoh kapal dengan tipe *shallow draft* adalah landing craft utility (LCU) dan tongkang (*barge*).

Ada beberapa definisi dari tipe perairan operasional kapal yang didefinisikan oleh beberapa ahli berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Salah satunya adalah Koh dan Yasukawa (2012) yang melakukan studi perbandingan sebuah *pusher-barge* pada kondisi *shallow water*, *medium water*, dan *deep water* di Kyushu University Square Tank. Pada penelitian tersebut *shallow water* didefinisikan sebagai perbandingan antara kedalaman air (h) dan sarat kapal (d) adalah 1.2, *medium shallow water* bernilai $h/d=1.5$, serta *deep water* bernilai $h/d=19.3$. Definisi yang lain diberikan oleh SNAME (1989) bahwa

kondisi *shallow water* didefinisikan dengan nilai $h/d < 1.5$, kondisi *medium water* apabila $1.5 < h/d < 4$, serta kondisi *deep water* dengan $h/d > 4$.

Saat ini PT. Pupuk Sriwidjaya (Pusri) Palembang sudah meluncurkan *Shallow Water Draft Vessel* yang diberi nama Pusri Indonesia I yang dapat dilihat pada Gambar 2.1.

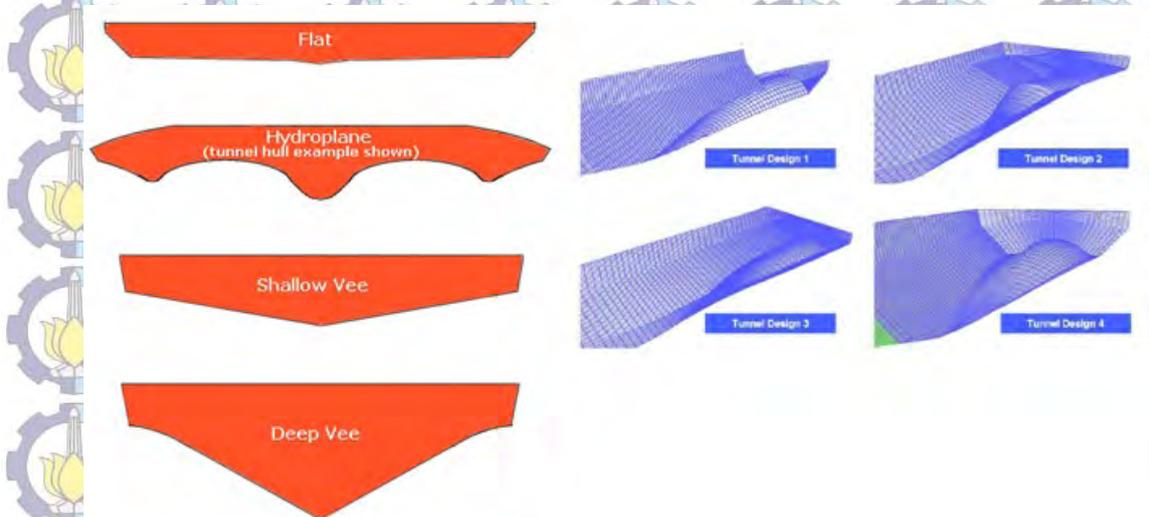


Gambar 2.1 Self Propelled Urea Barge MV Pusri Indonesia I (Ahadyanti G, 2014)

2.2. Tunnel Stern Hull

Kapal yang bergerak diatas air dengan kecepatan tertentu akan menghasilkan suatu fenomena aliran air dari bagian depan kapal menuju buritan kapal (*stern hull*). Pada bagian depan kapal dihasilkan gelombang sebagai akibat dari aliran air yang mengenai bagian badan kapal bagian depan, kemudian aliran air melewati badan kapal bagian tengah dan selanjutnya menuju bagian belakang kapal masuk ke *propeller*. Fenomena yang terjadi dibagian belakang kapal akibat perubahan dari kecepatan aliran yang dihasilkan dari bagian depan kapal. Aliran air yang nantinya memasuki propeller berdampak pada efisiensi sistem propulsi kapal. Untuk itu pemilihan bentuk bagian belakang kapal (*stern hull*) juga sangat berpengaruh terhadap aliran air dibelakang kapal, disamping itu penentuan bentuk stern hull nantinya akan sangat berdampak pada besarnya nilai hambatan kapal. Sedangkan khusus untuk bentuk tunnel stern hull kapal selain dapat menurunkan viscous pressure resistance juga dapat membantu memberi ruang yang cukup besar bagi diameter propeller (Atlar, Mehmet, et al 2013).

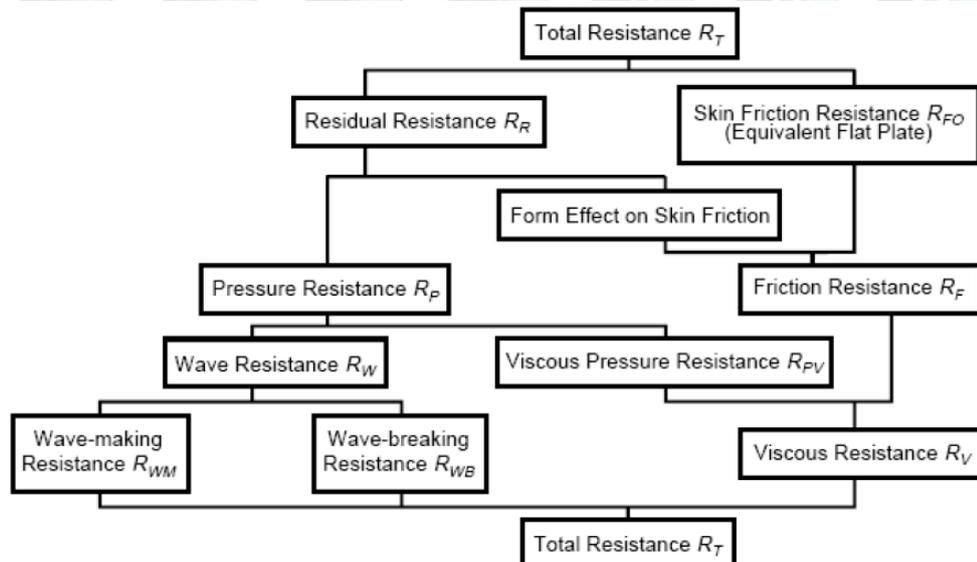
Beberapa bentuk *stern hull* dan detail modifikasi bentuk *Tunnel stern hull* dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Beberapa bentuk *Stern Hull* dan *Tunnel Stern Hull*

2.3. Hambatan Kapal

Kapal yang bergerak di media air dengan kecepatan tertentu, akan mengalami gaya hambat (tahanan) yang berlawanan dengan arah gerak kapal tersebut. Besar hambatan suatu kapal dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu luas permukaan basah, jenis fluida dan juga kecepatan kapal. Nilai hambatan kapal akan meningkat apabila angka *Froude* mengalami kenaikan (Harvald, 1992).



Gambar 2.3 Komponen-komponen *resistance* (Bertram, 2000)

Besar hambatan total akan naik secara kontinu seiring bertambahnya kecepatan kapal, hingga pada kecepatan tertentu hambatan akan sangat besar pada kenaikan kecepatan yang tidak begitu signifikan. Secara umum, hambatan total dihitung dengan menguraikan ke dalam komponen-komponennya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Bertram, 2000). Rumusan hambatan total dapat ditulis melalui persamaan 2.1:

$$R_T = R_V + R_W + R_A \quad (2.1)$$

di mana:

R_T = Hambatan Total (N)

R_V = Hambatan Viskos (N)

R_W = Hambatan Gelombang Kapal (N)

R_A = Hambatan Udara (N)

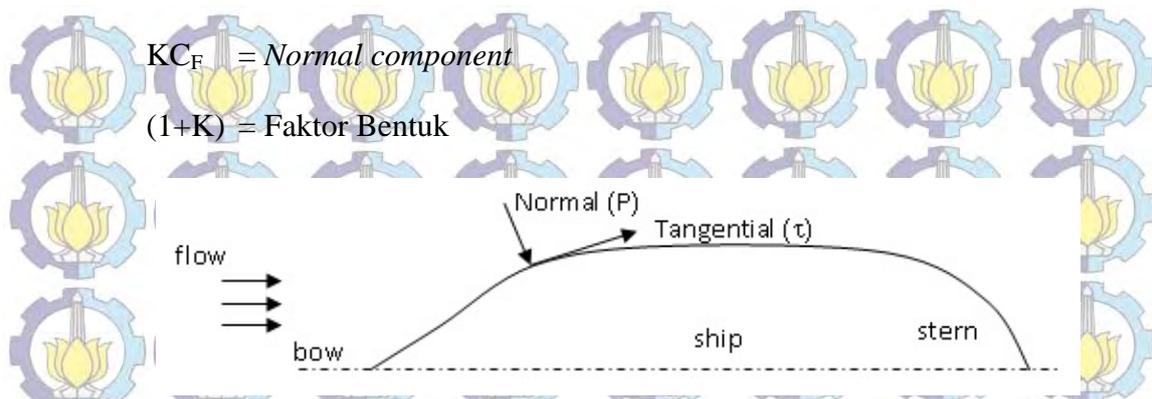
Menurut Lewis (1988), hambatan total yang bekerja pada kapal dapat dibagi dalam empat komponen utama yaitu:

1. Hambatan *Viskos*, merupakan hambatan yang muncul karena adanya efek viskositas fluida. Secara teoritis, hambatan viskos atau sering dipresentasikan sebagai koefisien C_V memiliki 2 komponen utama yaitu *friction* dan *pressure resistance* (Utama, 2011). Komponen tersebut memiliki arah sumbu kerja yang berbeda, satu komponen bekerja pada arah mengikuti garis *stream line* lambung kapal membentuk sudut terhadap aliran normal fluida (arah tangensial) disebut sebagai *friction resistance* (hambatan gesek), sedangkan komponen lainnya bekerja sebagai gaya normal yang arahnya tegak lurus dengan lambung kapal *pressure resistance* (hambatan bentuk/tekan) seperti yang tertulis pada persamaan 2.2. Untuk memperjelas dapat dilihat ilustrasi pada Gambar 2.4

$$C_V = C_F + KC_F = (1+K) C_F \quad (2.2)$$

di mana:

C_F = *Tangential component*



Gambar 2.4 Komponen Hambatan Viskos (Carlton, 2007)

2. Hambatan gesek (*Frictional resistance*), merupakan salah satu komponen dari hambatan viskos. Hambatan ini terjadi akibat gesekan antara molekul fluida dan nilainya dipengaruhi oleh viskositas, kecepatan kapal dan luas permukaan basah. Rumus umum hambatan gesek kapal tertulis pada persamaan 2.3 (ITTC 1957).

$$R_f = \frac{1}{2} \rho C_F S V^2 \quad (2.3)$$

dimana:

R_f = Hambatan Gesek

ρ = Kerapatan Fluida

C_F = Koefisien Gesek

S = Wetted Surface Area

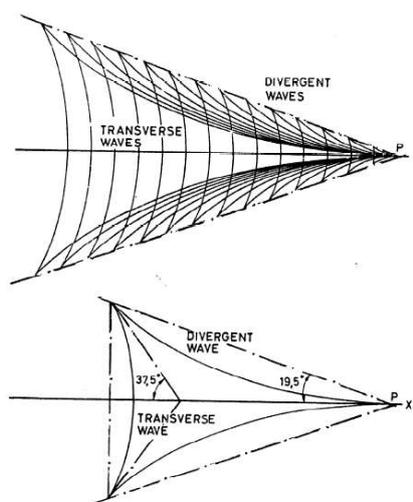
V = Kecepatan Kapal

3. Hambatan tekan, atau biasa disebut sebagai hambatan bentuk, merupakan komponen kedua dari hambatan viskos yang mana nilainya diperoleh dengan mengintegrasikan komponen dari tekanan normal akibat viskositas dan turbulensi (Harvald, 1992)

4. Hambatan gelombang (*wave-making resistance*). Sebuah benda yang bergerak di dalam fluida akan menghasilkan medan tekanan di sekitar benda tersebut dimana dengan adanya permukaan bebas (misalnya pertemuan air dengan udara) akan menghasilkan suatu bentuk sistem gelombang. Gelombang terbentuk dengan konstan dan bergerak meninggalkan kapal ke arah belakang ketika kapal bergerak maju ke depan dan selanjutnya menjadi sumber atau komponen hambatan kapal.

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. Gambar 2.5 menunjukkan pola gelombang demikian itu. Seluruh bagian pola itu berada di antara dua garis lurus yang berawal dari titik tersebut dan masing-masing, pada sisi yang berbeda, membentuk sudut $19,5^\circ$ dengan garis gerakan. Jarak antara satu gelombang melintang dengan gelombang melintang berikutnya sangat tergantung pada kecepatan gerakan titik itu sendiri (Harvald, 1992).

Pola gelombang Kelvin tersebut memberikan banyak gambaran dan kejelasan mengenai ciri khas (features) kapal-sistem gelombang. Di depan kapal ada daerah yang bertekanan tinggi, sehingga di situ timbul gelombang haluan yang cukup mencolok. Gelombang ini merupakan bagian dari sistem gelombang melintang dan gelombang divergen. Di dekat lambung garis puncak (crest line) gelombang melintang mempunyai kedudukan yang tegak lurus arah gerakan kapal. Begitu mendekati sistem gelombang divergen garis puncak tersebut berbelok balik dan akhirnya lenyap di dalam sistem divergen. Pada bahu lambung dan pada buritan juga terbentuk sistem gelombang (Harvald, 1992).



Gambar 2.5 Puncak gelombang dari kelompok gelombang Kelvin yang ditimbulkan oleh usikan yang bergerak di P (Harvald, 1992)

5. Hambatan udara (*Air resistance*), adalah hambatan yang disebabkan oleh pengaruh gaya dari udara atau angin. Besarnya dipengaruhi oleh proyeksi luas penampang, bentuk kapal diatas garis air, kecepatan dan arah angin. Nilainya sekitar 4% – 8 % dari hambatan total.

2.4. Fenomena Aliran Air Dibelakan Kapal

Kapal yang bergerak diatas air dengan kecepatan tertentu akan menghasilkan suatu fenomena aliran dari bagian depan kapal menuju buritan kapal hingga aliran air nantinya melewati buritan kapal. Pada bagian depan kapal dihasilkan gelombang sebagai akibat dari aliran air yang mengenai badan kapal bagian depan, kemudian aliran air melewati badan kapal bagian tengah dan selanjutnya menuju bagian belakang kapal masuk ke *propeller*. Fenomena yang terjadi dibagian belakang kapal akibat perubahan dari kecepatan aliran yang dihasilkan dari bagian depan kapal. Aliran air yang nantinya memasuki *propeller* berdampak pada harga efisiensi sistem propulsi kapal. Berikut adalah penjelasan lebih lanjut mengenai fenomena aliran air dibelakang kapal, penyebab terjadinya dan efek yang ditimbulkan.

2.4.1. *Velocity of advance* (V_a) dan *Wake Fraction* (w_T)

Dalam setiap aliran air yang bergerak pada badan kapal dari depan kapal sampai ke bagian buritan kapal, selalu terjadi *wake* / arus ikut (w) yang dalam penelitian ini disebut *wake fraction* yaitu merupakan perbedaan antara kecepatan kapal dengan kecepatan air yang melalui baling-baling (Harvald, 1983). *Wake fraction* merupakan faktor penyebab munculnya 2 macam kecepatan kapal yakni V_s (kecepatan servis kapal) serta V_a *Velocity of advance* / kecepatan relatif dari partikel air yang melewati piringan baling-baling). Dengan timbulnya *Wake fraction* inilah menyebabkan besar V_a akan selalu lebih kecil dari besar V_s . Semakin besar w yang terjadi akan mengakibatkan V_a akan menjadi lebih kecil. Dengan V_a yang semakin kecil maka daya yang diperlukan untuk mendorong kapal agar mencapai kecepatan yang diinginkan akan menjadi lebih besar, seperti tertulis pada persamaan 2.4.

$$V_a / V_s = (1-w_T) \quad (2.4)$$

Dengan menggunakan rumus dari (Lewis, 1988), wake fraction dapat ditulis dengan persamaan 2.5.

$$w_T = 0.3095.C_b + 10.C_v.C_b - 0.23 D/(BT)^{0.5} \quad (2.5)$$

Wake fraction pada kapal dapat terjadi karena pengaruh lambung kapal itu sendiri (dimana air akan mengalir menuju buritan dan membentuk arus) atau juga karena gerakan baling-baling kapal sehingga pada daerah disekitar baling-baling mengandung arus sesuai arah gerak baling baling tersebut. Besarnya V_a dapat dirumuskan sebagai persamaan 2.6.

$$V_a = (1-w_T) V_s \quad (2.6)$$

Dengan :

V_a : *Velocity of advance* (m/s)

V_s : Kecepatan dinas kapal (m/s)

w_T : *Wake fraction*

2.4.2. Efisiensi Sistem Propulsi (η_D)

Dalam melakukan estimasi daya yang dibutuhkan kapal, perlu diketahui terlebih dahulu performa dan karakteristik dari sistem propulsi yang telah dipilih pada tahap desain, yang mana hal tersebut akan menentukan sistem operasi dan efisiensi dari sistem propulsi secara keseluruhan. Kebutuhan utama pada sistem propulsi kapal merupakan konversi daya (P) yang dimiliki oleh kapal yang berasal dari mesin penggerak utama kapal, yang diubah menjadi daya dorong (T) yang dibutuhkan untuk menggerakkan kapal pada kecepatan yang diinginkan (V) secara efisien. Pada Tesis ini dikaji hanya pada perubahan efisiensi sistem propulsi karena nantinya diharapkan terjadinya peningkatan efisiensi sistem propulsi kapal tanpa harus mengganti mesin kapal. Besarnya efisiensi sistem propulsi η_D dapat dirumuskan seperti persamaan 2.7 (Lewis, 1988).

$$DHP = EHP / \eta_D \quad (2.7)$$

Dimana :

DHP : Daya propulsi kapal (kW)

EHP : Daya efektif kapal (kW)

η_D : *Propeller Quasi-Propulsive Coefficient (QPC)*

Dari rumusan di atas dapat diambil harga efisiensi sistem propulsi tanpa memperhitungkan daya mesin karena mesin yang digunakan adalah sama, seperti tertulis pada persamaan 2.8 (Lewis, 1988).

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_O \quad (2.8)$$

Dimana :

η_D : *Propeller Quasi-Propulsive Coefficient (QPC)*

η_H : *Hull Efficiency*

η_R : *Relative-rotative Efficiency*

η_O : *Propeller Open Water Efficiency*

Komponen yang mempengaruhi nilai efisiensi sistem propulsi salah satunya adalah efisiensi *hull* (η_H). Sedangkan efisiensi *hull* dipengaruhi oleh harga *wake* (w), *wake* didapat dari perhitungan pada persamaan (2.5) untuk kapal dengan 2 (dua) baling-baling. *Hull Efficiency* (η_H) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9 (Lewis, 1988).

$$\eta_H = (1 - t) / (1 - w) \quad (2.9)$$

Dimana :

w : *wake*; persamaan (2.5)

t : *trust deduction*, $t = 0.325 CB - 0.185 D / (B.T)^{0.5}$

η_R atau disebut juga dengan *Relative-rotative Efficiency* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.10 (Lewis, 1988).

$$\eta_R = 0.9737 + 0.111 (CP - 0.0225) + 0.06325 P/D \quad (2.10)$$

η_O atau disebut juga dengan *Propeller Open Water Efficiency* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.11.

$$\eta_0 = (J/2\pi) \times (KT/KQ) \quad (2.11)$$

Efisiensi *propeller* dapat juga diperoleh dengan menggunakan kurva KT-KQ-J. Pada satu kurva KT-KQ-J pada AE/AO tertentu terdiri dari beberapa kurva KT dan efisiensi *propeller* yang jumlahnya tergantung pada banyaknya variasi P/D dan 1 (satu) kurva KT design, dimana efisiensi dan KT sebagai sumbu ordinat dan J sebagai sumbu absis.

1. Perhitungan nilai J, dapat dilihat pada persamaan 2.12.

$$J = V / n \cdot D \quad (2.12)$$

Dimana :

n : putaran *propeller* (rps)

D : Diameter *Propeller* (m)

V : Kecepatan aliran yang masuk ke *propeller* (m/s)

2. Perhitungan KT (design), dirumuskan pada persamaan 2.13.

$$KT(\text{design}) = (T \cdot J^2) / (\rho V^2 \cdot D^2) \quad (2.13)$$

Dimana :

T : *Thrust* ;

t : *Thrust deduction*

Pada kurva KT-KQ-J dicari nilai efisiensi tertinggi dengan menggabungkan titik-titik pada kurva efisiensi dari hasil perpotongan kurva KT dan kurva KT(design) kemudian dilakukan regresi untuk mendapatkan suatu persamaan kuadrat guna mendapatkan titik puncak dari kurva efisiensi yang nantinya akan menjadi nilai efisiensi *propeller*.

2.5. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational fluid dynamics, biasanya disingkat sebagai CFD, adalah cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk memecahkan dan menganalisis masalah yang melibatkan aliran fluida. Komputer digunakan untuk melakukan perhitungan yang diperlukan untuk

mensimulasikan interaksi antara zat cair dan gas dengan permukaan yang didefinisikan oleh kondisi batas (Anderson, 1995).

2.5.1. Governing Equation

Dasar yang fundamental pada hampir semua masalah CFD adalah persamaan Navier-Stokes (dinamakan dari Claude Louis Navier dan George Gabriel Stokes), yang menjelaskan pergerakan dari suatu fluida seperti cairan dan gas (Couser, 2002). Dalam persamaan ini, asumsi pertama adalah bahwa fluida *incompressible* (tidak dapat dimampatkan), yang mengarah ke persamaan lain: kekekalan massa (*conservation of mass*).

Bentuk umum persamaan Navier-Stokes seperti terlihat pada persamaan 2.14.

$$\rho(\partial v/\partial t + v \cdot \nabla v) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f \quad (2.14)$$

dimana:

v = Kecepatan Aliran (m/s)

∇ = Del Operator

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

μ = frictional resistance yang merepresentasikan viskositas (Ns/m²)

f = gaya dari luar, misalnya gaya gravitasi (N)

t = waktu (s)

2.5.2. Metode Penyelesaian

Metode yang biasa digunakan untuk menyelesaikan *governing equation* di atas adalah metode diskrit. Beberapa metode diskrit yang digunakan adalah:

Finite Element Method (FEM) dan Finite Volume Method (FVM). *Finite Element Method (FEM)* menggunakan fungsi bentuk sederhana (linear atau kuadrat) pada elemen yang menggambarkan variasi variabel aliran. Persamaan pengendali dapat

dipenuhi dengan penyelesaian secara eksak. Jika perkiraan persamaan tersebut tidak terpenuhi maka akan terjadi sisa (*residual*) yang dapat diukur kesalahannya.

Kemudian sisa tersebut diminimumkan dengan cara mengalikannya dengan fungsi berat dan pengintegralan. hasilnya adalah fungsi aljabar untuk koefisien yang tidak diketahui dari fungsi perkiraan.

Finite Volume Method (FVM) dikembangkan dengan formulasi khusus metode beda hingga. Secara global, algoritma numerik yang dimiliki oleh metode beda hingga adalah dengan melakukan pengintegralan persamaan pengendali aliran fluida terhadap seluruh kontrol volume dari domain penyelesaian. Kemudian dilanjutkan dengan pendiskritan yang meliputi substitusi berbagai pendekatan beda hingga dari suku-suku persamaan yang diintegrasikan tersebut. Sehingga menggambarkan proses aliran seperti konveksi, difusi dan *source*. Pada tahap ini setiap persamaan integral akan diubah menjadi persamaan aljabar. Setelah itu persamaan-persamaan aljabar akan diselesaikan dengan metode iterasi.

2.5.3. Software

Terkait dengan metode penyelesaian yang telah dijelaskan sebelumnya, *governing equation* di atas dapat diselesaikan dengan *software-software* yang memiliki *tools* CFD, dan *software* yang sedang populer saat ini di bidang perkapalan adalah ANSYS CFX dan Fluent. Produk CFD yang dilakukan pada penelitian ini adalah CFX yang merupakan bagian dari ANSYS Software.

ANSYS CFX adalah sebuah *software* analisis elemen hingga (*finite element*), bisa dipakai untuk melakukan analisis mekanika benda tegar, analisis fluida, dan analisis perpindahan panas. Untuk analisa hambatan, ANSYS CFX secara terpisah mampu menganalisa hambatan viskos terkait aliran fluida dan hambatan total terkait efek dari *free surface*. Ada beberapa tahapan umum yang terdapat pada simulasi untuk proses tersebut, yaitu: *pre processor*, *solver*, *post processor*.

2.5.3.1. Pre Processor

Pre processor mengandung input dari masalah fluida. Beberapa kegiatan yang masuk dalam bagian ini adalah:

- Pendefinisian dari geometri daerah kajian dan domain komputasi
- Grid generation yaitu pembagian domain ke domain domain yang lebih kecil yaitu grid atau mesh dari elemen elemen kecil (cells)
- Pemilihan fenomena fisik dan kimia dari masalah yang dimodelkan
- Pendefinisian properti fluida

- Spesifikasi kondisi batas yang sesuai pada cell yang bersinggungan dengan batas domain

Solusi dari masalah fluida didefinisikan pada titik di dalam tiap *cell*. Akurasi dari solusi CFD diatur oleh banyaknya jumlah *cell* dalam *grid*. Secara umum semakin besar jumlah *cell* maka akurasi dari solusi yang dihasilkan menjadi lebih baik. Semakin banyak jumlah *grid* maka biaya komputasi juga semakin besar.

Oleh karena itu *grid* yang optimal memiliki *mesh* yang tidak seragam, dengan *mesh* yang halus di area yang terjadi perubahan dari titik satu ke titik lain dan *mesh* yang lebih kasar di area dengan perubahan properti relatif sedikit.

Kemampuan yang juga dikembangkan adalah *self adaptive meshing* yaitu kemampuan memperhalus *grid* di daerah dengan variasi properti tinggi. Secara umum terdapat 2 bagian yang dominan di tahap Pre Processor ini yaitu definisi geometri dari domain dan *Grid generation* (Mahardika, 2007).

2.5.3.2. Solver

Terdapat beberapa teknik utama dalam mencari solusi numerik yaitu *finite difference*, *finite element* dan *spectral method*. Secara garis besar metode numerik yang menjadi dasar dari *solver* melakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Aproksimasi dari variabel aliran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi-fungsi sederhana
2. Diskritisasi dengan melakukan substitusi dari aproksimasi tersebut ke persamaan-persamaan atur aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi matematis
3. Solusi dari persamaan aljabar

Metode lain dikembangkan dari ketiga metode tersebut, salah satunya metode volume hingga (*finite volume*). Metode ini merupakan pengembangan dari metode *finite difference* yang memiliki formulasi khusus. Algoritma numerik yang mengandung langkah sebagai berikut:

- Integrasi dari persamaan persamaan atur dari fluida sepanjang semua volume atur dari domain.

- Diskritisasi yang melibatkan substitusi dari berbagai macam aproksimasi *finite difference* ke persamaan yang diintegrasikan. Sehingga persamaan integral diubah menjadi persamaan aljabar.
- Solusi dari persamaan aljabar dengan metode iteratif (Mahardika, 2007).

2.5.3.3. Post Processor

Tahap ini merupakan tahap untuk menampilkan hasil (*output*) dari proses simulasi numerik. Hasil dari proses simulasi numerik dapat dilihat melalui fitur “Function Calculator” yang dapat berupa: luas (*area*), gaya (*force*), volume, torsi, dan sebagainya. Selain itu, fitur pada post processor ini juga dapat menampilkan data visual. Hasil visual yang dapat ditampilkan dari fitur post processor ini diantaranya adalah geometri domain, geometri model, surface fluida, plot vector, plot kontur, plot aliran fluida, animasi, dan sebagainya

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Langkah-langkah Penelitian

3.1.1. Definisi Permasalahan

- Bagaimana memodifikasi bentuk buritan kapal SPUB menjadi bentuk *Tunnel Stern Hull* dengan kondisi *dispacement* yang sama dengan *existing ship*?
- Bagaimana memilih bentuk buritan *Tunnel Stern Hull* yang optimum terhadap penelitian sebelumnya dan *existing ship*?

3.1.2. Studi Literatur

Studi literatur merupakan kegiatan survey untuk mencari teori dan data pendukung yang berkaitan dengan kondisi atau permasalahan yang terjadi pada kasus yang akan dikaji dalam penelitian ini. Teori dan data-data pendukung dapat bersumber dari buku-buku teks, jurnal-jurnal, maupun penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang mempunyai interes yang sama dengan bidang penelitian ini, terutama untuk kapal *Shallow Draft*.

3.1.3. Pengumpulan Data

Untuk bisa memulai penelitian ini, diperlukan data-data pendukung seperti:

1. Rencana Garis (*Lines Plan*)

Bentuk lambung kapal sangat berkaitan erat dengan gambar rencana garis, karena gambar tersebut merupakan *parent hull* dari semua bentuk modifikasi stern hull yang akan dilakukan. Gambar rencana garis *existing ship* yang berbentuk CAD, maxsurf dan CFD ini harus sudah divalidasi terhadap komponen hidrostatisnya agar semaksimal mungkin bisa sama nilainya.

2. Hasil Uji tarik model *existing Ship*

Data hasil uji tarik dari model *existing ship* ini diperlukan sebagai alat validasi dalam hal perhitungan hambatan total dari model CFD.

3. Hasil *Sea Trial Existing Ship*

Dalam proses akhir pembangunan kapal, pastinya harus ada pengujian kecepatan kapal dilaut atau yang biasa disebut proses *sea trial*, proses ini dilakukan untuk mengetahui kecepatan sebenarnya dari kapal tersebut. Oleh sebab itu hasil *sea trial* ini sangat diperlukan untuk parameter kecepatan model kapal yang akan dianalisa lebih lanjut.

3.1.4. Simulasi Hambatan *existing ship* dengan *tools* CFD

Pada tahap ini, dilakukan pemodelan *existing ship* tanpa modifikasi untuk kemudian dianalisa hambatannya dengan bantuan *tools* CFD. Simulasi awal ini dilakukan guna memverifikasi hambatan yang diperoleh melalui CFD dengan hambatan yang telah diperoleh pada penelitian sebelumnya. Hasil simulasi dikatakan valid apabila selisih antara hasil simulasi dengan hasil penelitian sebelumnya kurang dari 5%. Apabila hasil simulasi melebihi 5%, maka perlu dilakukan simulasi ulang dengan memperbaiki *meshing*.

Evaluasi dengan menggunakan CFD disimulasikan dengan menggunakan 1 (satu) variasi kecepatan. Kecepatan model didapatkan dari hasil penyekalaan kecepatan kapal sebenarnya melalui persamaan kinematis $F_n \text{ model} = F_n \text{ kapal}$, di mana *Froude Number* $F_n = V/\sqrt{gL}$. Dengan mengetahui kecepatan, ukuran kapal sebenarnya dan ukuran model diperoleh variasi kecepatan simulasi yaitu: 0.7 m/s.

3.1.5. Evaluasi Hambatan Total dengan CFD

Berbeda dengan evaluasi sebelumnya, evaluasi hambatan total harus menggunakan 2 medium, air dan udara, karena dalam simulasinya terdapat efek *free surface*, yaitu fluida 1 memasuki area fluida lainnya. Efek ini biasa disebut sebagai gelombang kapal. Ukuran domain tidak berbeda jauh dengan domain yang digunakan pada simulasi hambatan viskos, hanya terdapat penambahan ketinggian domain udara. Adapun kondisi batas yang diterapkan adalah (Anggara, 2013):

- Inlet, diset senilai kecepatan air masuk sesuai dengan kecepatan kapal
- Outlet, Tekanan pada outflow dianggap statis, mengikuti tekanan hidrostatik fluida, merupakan fungsi 'DownPres' CCL (CFX, 2007).
- Model dan bottom dibuat 'No Slip', tidak terjadi selip
- Wall dibuat 'free slip', tidak terjadi gesekan
- Top, bagian dinding atas, di set sebagai *opening* atau dinding terbuka yang artinya tidak ada pengaruh tekanan dari mana pun. (CFX, 2007).

3.1.6. Modifikasi Bentuk Buritan Kapal

Setelah hasil simulasi terbukti valid, langkah selanjutnya adalah memodifikasi bentuk buritan kapal menjadi beberapa model *Tunnel Stern Hull*.

3.1.7. Analisa *Performance* Kapal

Setelah bentuk buritan model *Existing Ship* dimodifikasi, maka tahap selanjutnya adalah melakukan analisa *performance* kapal dengan kriteria sebagai berikut:

1. Simulasi Hambatan dengan CFD

Langkah pertama adalah melakukan simulasi hambatan dengan bantuan *tools* CFD dengan kondisi kapasitas *displacement* yang sama dengan *existing ship*. Simulasi dilakukan baik untuk hambatan viskos maupun hambatan total dengan 1 variasi kecepatan.

2. Simulasi kecepatan aliran di sekitar propeller

Langkah kedua adalah melakukan simulasi terhadap pola aliran disekitar buritan kapal, dalam hal ini adalah simulasi kecepatan aliran yang menuju ke propeller

3. Mengitung efisiensi sistem propulsi

Langkah selanjutnya adalah perhitungan mengenai efisiensi sistem propulsi untuk menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran air diburitan kapal dapat meningkatkan efisiensi sistem propulsi.

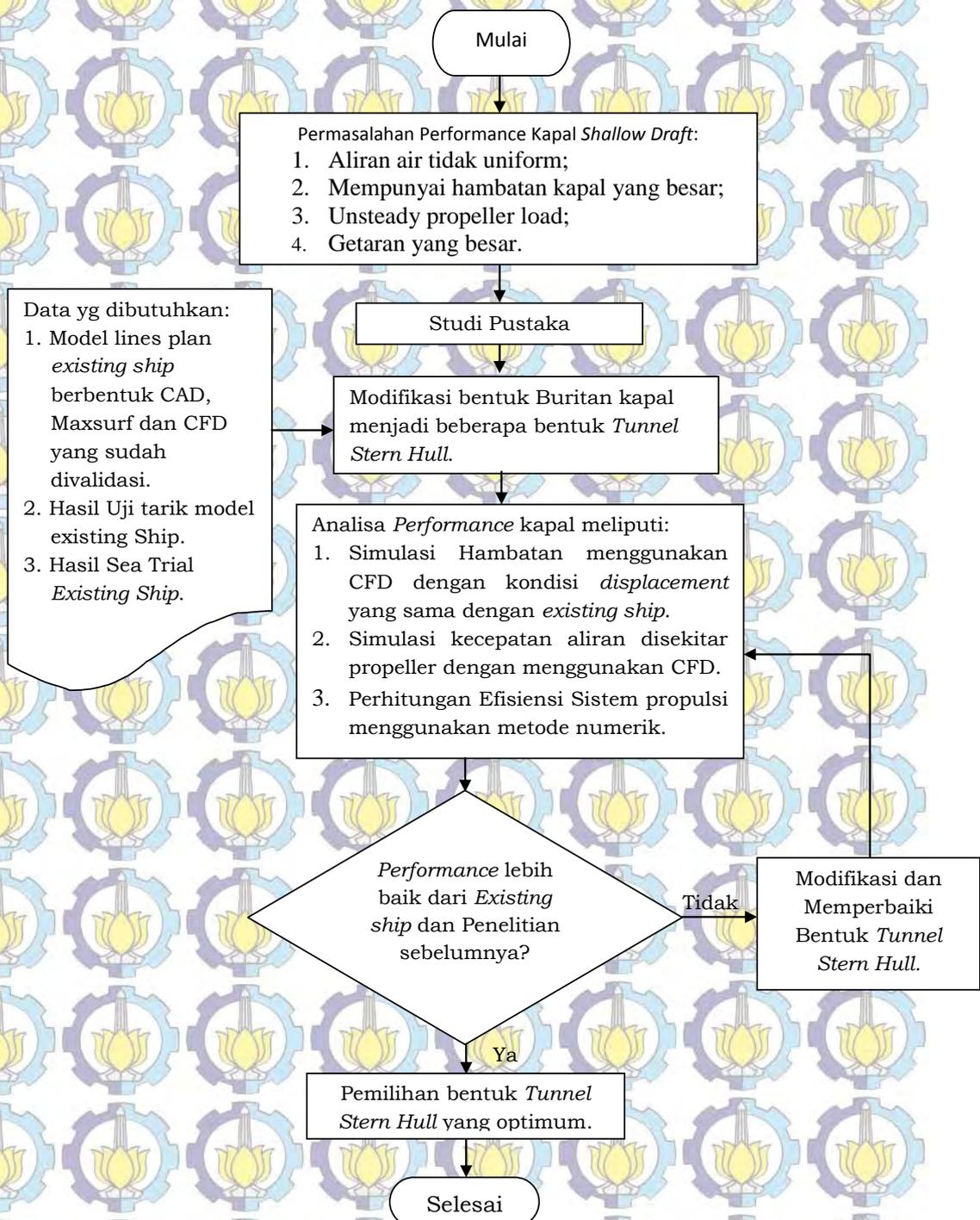


Apabila analisa performance dari 3 (tiga) kriteria diatas lebih kecil dari *existing ship*, maka dilakukan modifikasi atau perbaikan terhadap usulan model *Tunnel Stern Hull* sampai benar-benar memenuhi kriteria tersebut.

3.1.8. Pemilihan Bentuk Buritan yang Optimum

Setelah melakukan analisa *performance* kapal terhadap 3 (tiga) kriteria diatas, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pemilihan bentuk buritan yang optimum dari beberapa model *Tunnel Stern Hull* tersebut. Pemilihan bentuk buritan yang optimum ini didasarkan pada ke-3 (tiga) nilai kriteria *performance* yang paling tinggi.

3.2. Alur Penelitian



Gambar 3.1 Alur Penelitian

BAB IV

PEMBUATAN MODEL DAN SIMULASI

4.1. Pendahuluan

Pada Bab III telah dijelaskan bahwa penelitian ini hanya memprediksi hambatan total dan menganalisa aliran air dibelakang buritan kapal sebagai pengaruh dari modifikasi bentuk stern yang datar (*flat*) menjadi stern tunnel terhadap peningkatan efisiensi sistem propulsi kapal. Analisa aliran air yang dimaksud adalah kecepatan aliran air sebelum memasuki propeller dan setelah melewati propeller.

Penggunaan variasi kecepatan fluida dan posisi penempatan plane sangat diperlukan sehingga akan terlihat jelas perbedaan efisiensi sistem propulsi saat menggunakan stern tunnel maupun tidak, baik itu di perairan dangkal (*shallow water*) maupun diperairan dalam (*deep water*).

4.2. Pembuatan Model Kapal

Untuk menghitung hambatan kapal dan menganalisa aliran air diburitan kapal dengan menggunakan bantuan *tools* CFD, langkah pertama yang harus dikerjakan adalah memodelkan kapal ke dalam bentuk 3D melalui ICM CFD.

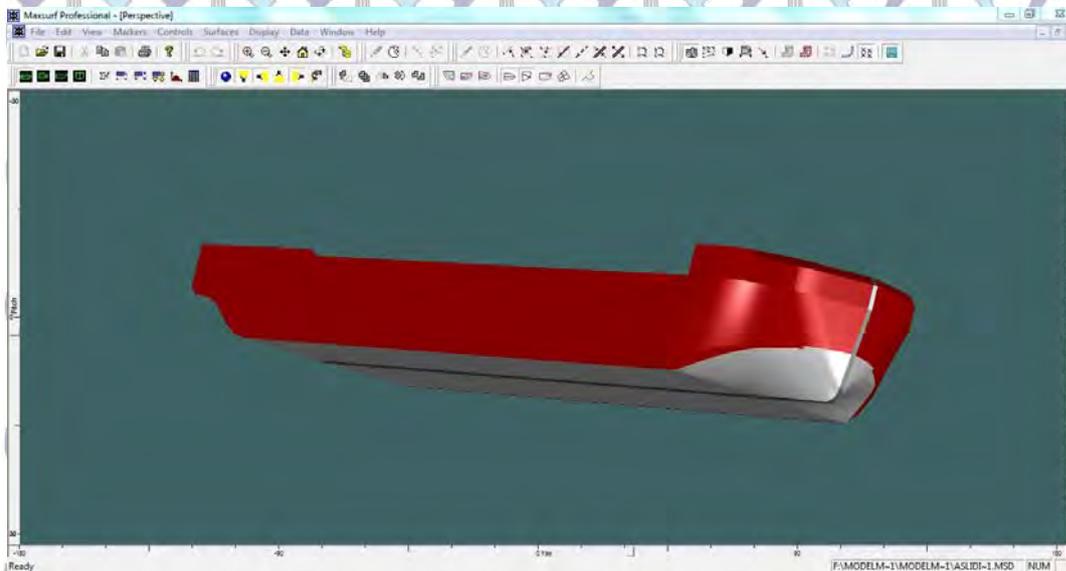
Untuk dapat memodelkan kapal ke dalam bentuk 3D, sebelumnya kita sudah harus mempunyai desain *lines plan* dari kapal tersebut. *Lines plan* dapat dibuat baik dengan menggunakan bantuan *software* Maxsurf maupun autoCAD. Model lambung kapal yang digunakan pada penelitian ini digambar menggunakan bantuan *software* Maxsurf. Model yang digunakan pada penelitian ini merupakan *barge* dengan skala 1:43,5 dari kapal sebenarnya. Bentuk model lambung telah didapat dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Anggara, 2013).

Perbandingan dimensi kapal dengan dimensi model ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan Dimensi Kapal dan Model

Dimensi	Kapal	Model
	Skala = 1: 43.5	
Loa (m)	134.00	3.075
Lwl (m)	132.9	3.050
B _{mld} (m)	26.40	0.606
H _{mld} (m)	11.00	0.252
T (m)	5.400	0.124
WSA (m ²)	4580.639	2.413

Bentuk 3D lambung kapal yang dihasilkan oleh *software* Maxsurf dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Lambung Model *Existing Ship*

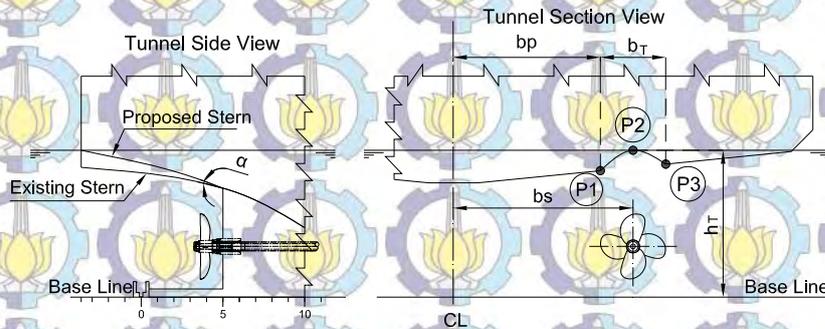
Setelah model kapal selesai dibuat, langkah selanjutnya adalah memodifikasi bentuk buritan kapal menjadi *stern tunnel*, setelah itu meng-*export* file .msd (*default software* Maxsurf) ke dalam bentuk file .igs agar dapat dibaca oleh ICEM CFD untuk kemudian dilakukan pembagian elemen ke dalam bentuk yang lebih kecil (*meshing*).

4.3. Model Stern Tunnel

Desain dari bentuk stern tunnel sangat mempengaruhi transisi dari aliran air mulai dari tunnel bagian depan sampai belakang. Oleh sebab itu transisi dari bentuk tunnel tidak boleh terlalu besar karena akan mengakibatkan penurunan

daya apung kapal (*loss of bouyancy*) dan perubahan gaya angkat (*dynamic lift*). Untuk kapal dengan $F_{wT} \leq 2.5$ maka tunnel slope (α) tidak boleh lebih dari 15^0

(Blount, D.L., 1997, *Design of propeller tunnels for high-speed craft*).



Gambar 4.2 Geometri dari *Stern Tunnel*

Pada Gambar 4.2 diatas menggambarkan bentuk geometri dari stern tunnel yang akan dipakai untuk melakukan analisa selanjutnya. Adapun parameter dari geometri *stern tunnel* tersebut adalah:

bp : Prismatic part width (m)

b_T : Tunnel width (m)

bs : Propeller position from CL (m)

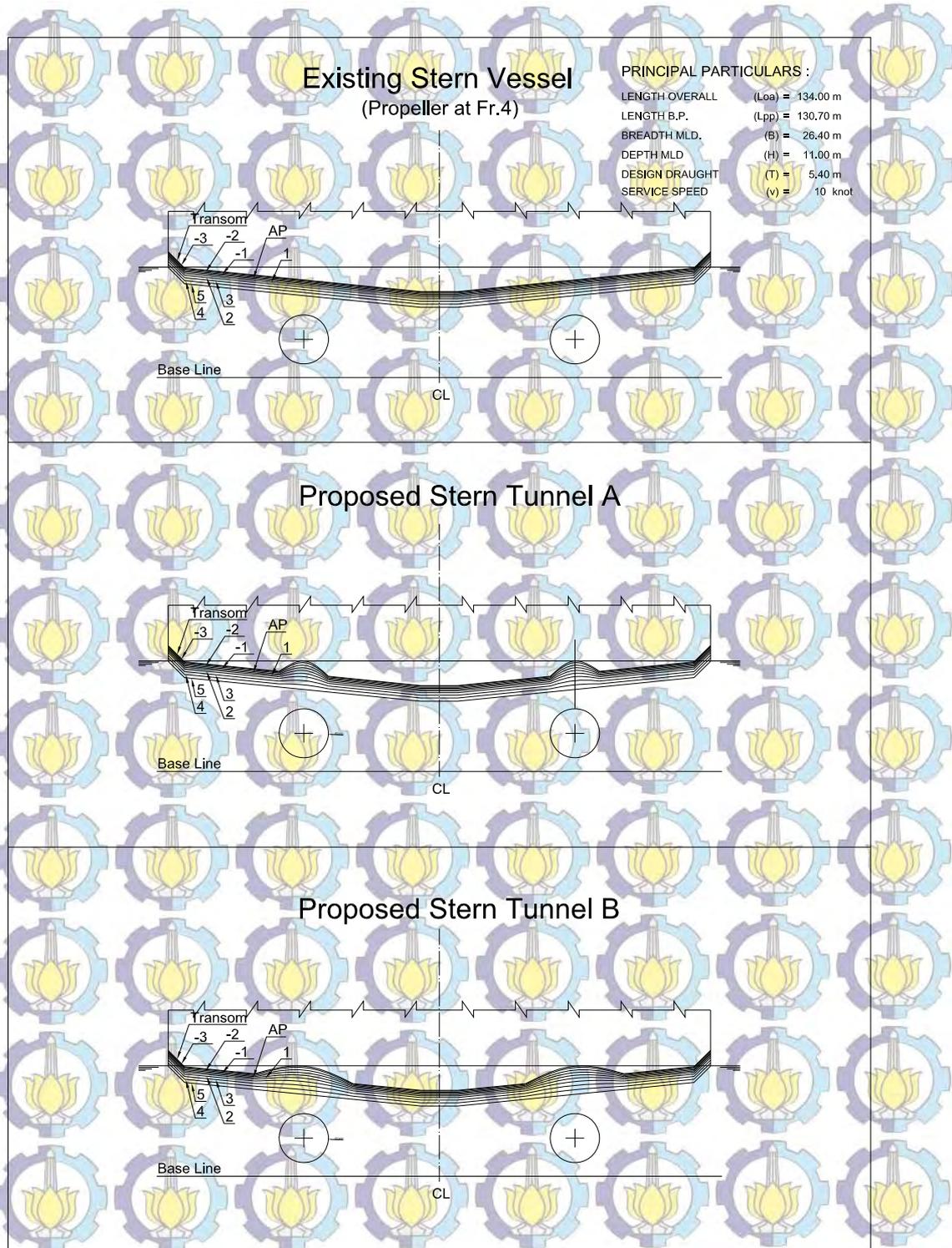
h_T : Tunnel height (m)

α : Tunnel slope (deg.)

Tabel 4.2 dan Gambar 4.3 merupakan pilihan hasil desain stern tunnel yang akan dianalisa kecepatan aliran disekitar buritan kapal ini, baik itu di perairan dangkal (*shallow water*) maupun di perairan dalam (*Deep water*).

Tabel 4.2 Parameter dari desain *stern tunnel*

No	Item	Stern Tunnel A	Stern Tunnel B	Unit
1	bp	5.40	4.20	m
2	b_T	2.40	4.80	m
3	bs	6.60	6.60	m
4	h_T	5.40	5.40	m
5	α	7	7	deg.

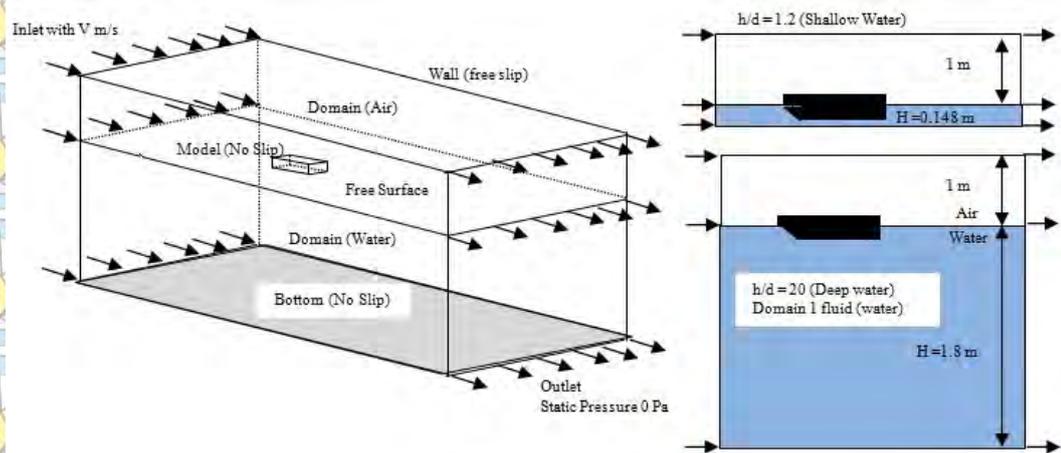


Gambar 4.3 Perbandingan Desain *Stern Tunnel*

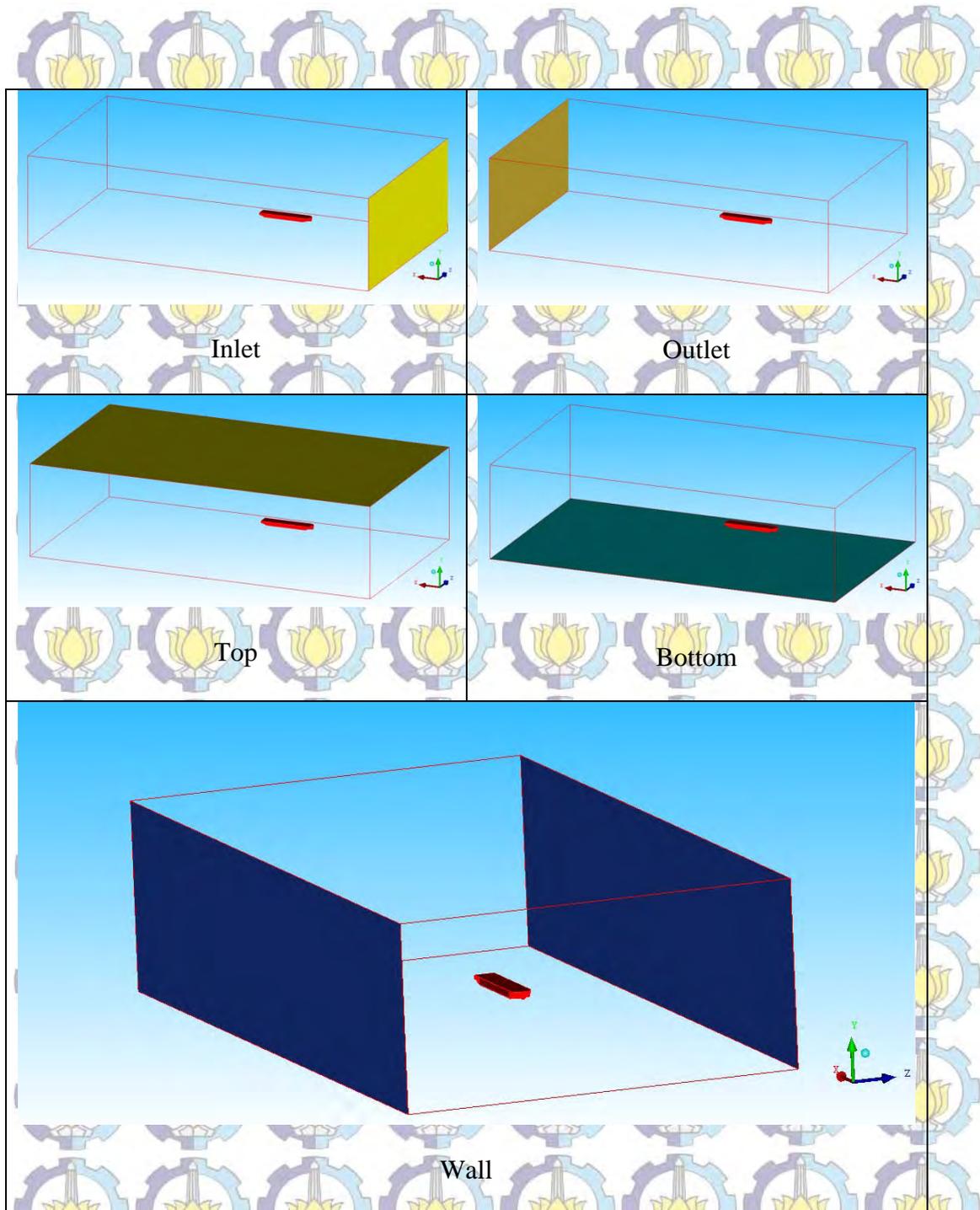
4.4. Pemberian *Boundary* dan *Meshing* pada Model

Setelah penggambaran model selesai dilakukan, maka selanjutnya adalah pemberian *boundary* atau batas-batas yang nantinya akan menjadi parameter dalam melakukan simulasi. Batas-batas yang dimaksud adalah *inlet*, *outlet*, *wall* dan *domain*. Pemberian batas hanya menggunakan fitur *surface*, yang digambar dengan bentuk balok yang diletakan mengelilingi model. Pemberian batas ini sesuai dengan ukuran yang optimum berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dan ditulis dalam beberapa poin di bawah ini (Anggara,2013).

1. Jarak sisi depan (*inlet*) terhadap model berkisar $2L - 3L$,
2. Jarak samping ke sisi model $\geq 2L$
3. Jarak sisi belakang (*outlet*) terhadap model berkisar $3L-5L$
4. Perlu diingat bahwa setiap simulasi dilaksanakan pada variasi kedalaman, sehingga kedalaman domain, dari sarat ke bottom, perlu diatur sesuai dengan perbandingan h/d . untuk simulasi *shallow water* kedalaman domain adalah 0.1488 m, dan *deep water* 2.48 meter. Untuk lebih jelas bisa dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Sketsa domain simulasi CFD



Gambar 4.5 Pembuatan Domain Komputasi

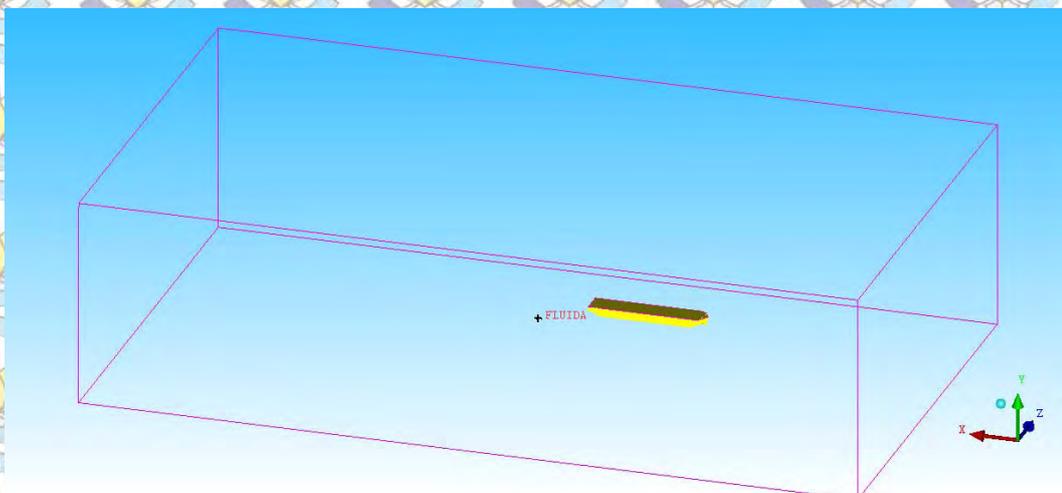
Setelah pembuatan domain komputasi selesai dikerjakan, maka langkah selanjutnya adalah mengelompokkan domain-domain tersebut ke dalam *parts*. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut. Klik kanan pada opsi “Parts” lalu klik “Create Part”. Beri nama part sesuai yang diinginkan lalu pilih bentuk atau geometri mana yang akan menjadi *part* tersebut. Pada penelitian ini total *parts*

yang dibentuk sejumlah delapan *parts*, yakni berupa *inlet*, *oulet*, *wall*, *top*, dan *bottom* yang merupakan domain-domain komputasi, ditambah dengan geom, model, dan fluida seperti terlihat pada Gambar 4.5. Geom merupakan garis-garis serta poin-poin yang membentuk domain-domain komputasi, model merupakan model *barge*, dan fluida merupakan *body* yang akan dijelaskan lebih lanjut setelah ini. Untuk pengelompokan *parts* dan *mesh* pada model *existing ship* dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pengelompokan Parts dan *mesh* pada model *existing ship*

Setelah semua geometri dikelompokkan menjadi parts-parts, maka langkah selanjutnya adalah pembuatan properti fluida. Ini dilakukan dengan menggunakan fitur *create body* dan mengubah nama *body* menjadi fluida. Perlu dicatat bahwa fluida harus berada di dalam balok yang mengelilingi model. Pembuatan fluida beserta letaknya dapat dilihat pada Gambar 4.7.

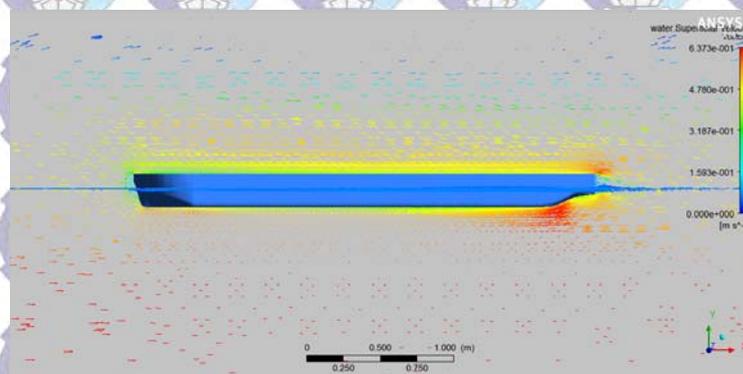


Gambar 4.7 Pembuatan Fluida

Setelah itu, langkah selanjutnya adalah pembagian elemen model menjadi elemen-elemen yang lebih kecil (*cells*) yang biasa disebut *meshing*. Pada tahap ini ukuran *meshing* ditentukan dengan perbandingan antara model dengan domain adalah 1:10. Durasi lamanya proses *meshing* bergantung pada ukuran *meshing* dan jumlah elemen yang dihasilkan. Semakin kecil ukuran *meshing* dan semakin banyak jumlah elemennya, maka akan semakin lama pula durasi proses *meshing*. Untuk mendapatkan ukuran *meshing* serta jumlah elemen yang optimum perlu dilakukan analisa *Grid Independence*.

Grid Independence diperoleh dengan melakukan beberapa kali simulasi. Hasil optimum yang dimaksudkan adalah ketika ada beberapa parameter yang menjadi pertimbangan batasan, dalam kasus ini adalah kecepatan komputasi dan kerasionalan hasil. Artinya jumlah elemen tertentu harus menghasilkan hasil yang masuk akal dengan waktu komputasi yang relatif minimum. Pada penelitian sebelumnya telah didapat jumlah elemen yang maksimum setelah diperoleh selisih *output* antara 2 (dua) percobaan yang berurutan berdasarkan penambahan elemennya adalah dibawah 2%. Pada penelitian ini, analisa *Grid Independence* hanya dilakukan untuk mencari hambatan total (Anggara, 2013).

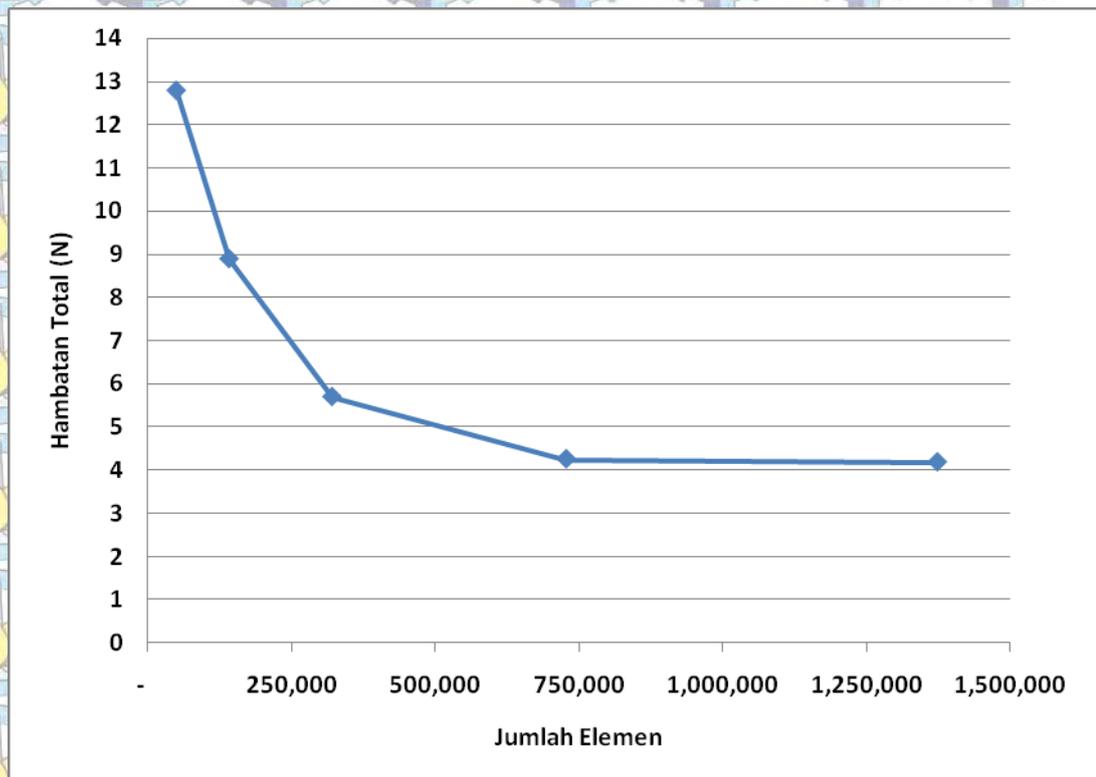
Evaluasi hambatan total harus menggunakan 2 medium, air dan udara, karena dalam simulasinya terdapat efek free surface, yaitu fluida 1 memasuki area fluida lainnya. Efek ini biasa disebut sebagai gelombang kapal. Gambar 4.8 menunjukkan 2 velocity vector yang mewakili kecepatan air dan udara. Terlihat bagian free surface yang naik ke atas yang tidak lain adalah gelombang akibat gerakan kapal. Gambar 4.8 ini merupakan contoh hasil dari simulasi 2 fluida.



Gambar 4.8 vektor kecepatan air dan udara pada simulasi 2 fluida

Tabel 4.3 Hubungan Antara Jumlah Elemen dan Hasil Simulasi Hambatan Total Kondisi *Deep water* (Anggara, 2013)

Simulasi ke-	1	2	3	4	5
Jumlah elemen	50467	142300	321130	728100	1373015
Hambatan Total [N]	12.787	8.890	5.698	4.258	4.186
% ΔR_T	-	30.476	35.905	25.259	1.691

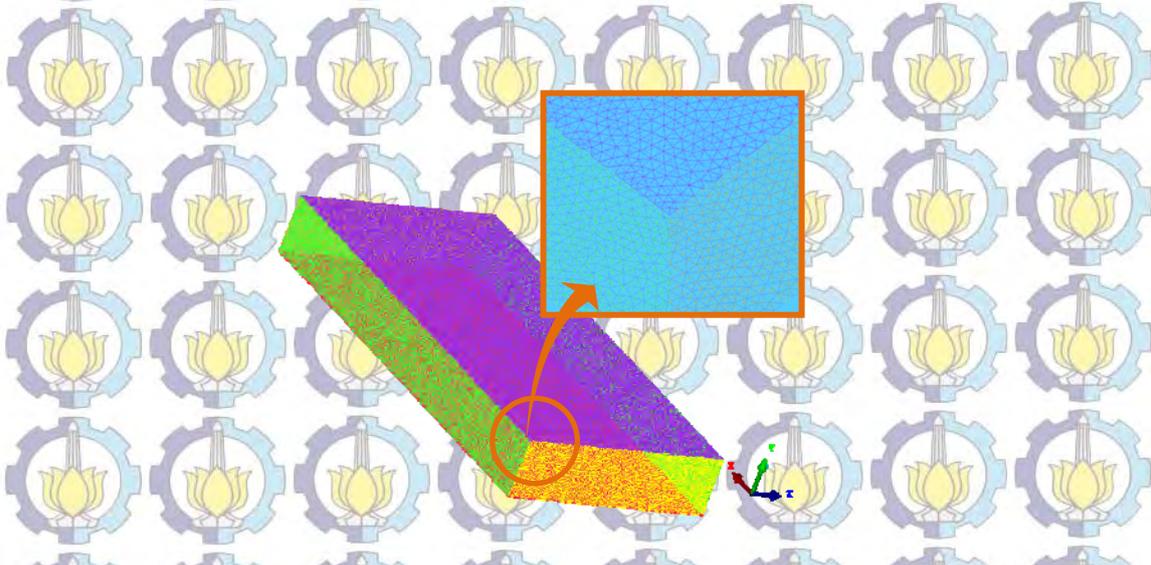


Gambar 4.9 *Grid Independence* Evaluasi Hambatan Total *Deep water*(Anggara, 2013)

Tabel 4.3 dan Gambar 4.9 menunjukkan ringkasan hasil *Grid Independence* untuk kasus analisa hambatan total pada kondisi perairan dalam. Jumlah elemen optimum inilah yang akan dijadikan sebagai patokan untuk simulasi baik pada kecepatan lainnya maupun bentuk model lainnya hasil dari modifikasi(Anggara, 2013).

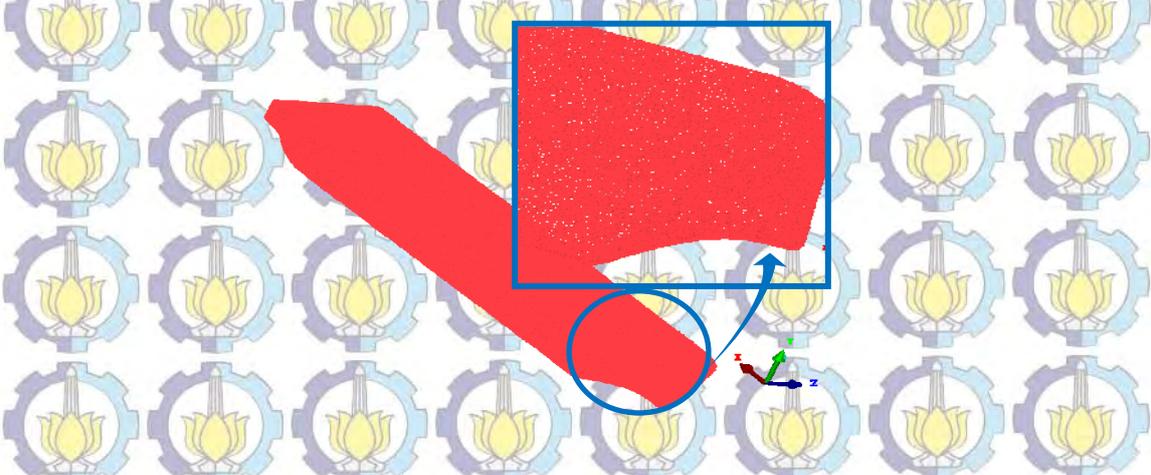
Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa perbandingan ukuran *mesh* untuk menghasilkan jumlah elemen optimum adalah 1:10 untuk model:domain. Dengan ukuran mesh serta jumlah elemen optimum tersebut, mesh yang dihasilkan berukuran sangat kecil dan sangat rapat antara satu dengan yang

lain. Hasil ukuran (kerapatan) *mesh* untuk domain komputasi dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Ukuran Kerapatan *Mesh* pada Domain Komputasi

Sedangkan hasil ukuran (kerapatan) *mesh* untuk model dapat dilihat pada Gambar 4.11.



4.5. Tahap Pre Processor

Gambar 4.11 Ukuran (Kerapatan) *Mesh* pada Model

Tahap berikutnya setelah model 3D di-*meshing* adalah tahap Pre Processor.

Model yang telah di-*meshing* kemudian di-*import* untuk diatur kondisi batas (*boundary conditions*) yang sesuai untuk simulasi permukaan bebas (*free surface*).

Simulasi *free surface* lebih sensitif terhadap *boundary* dan *setting* perkiraan awal yang tidak benar dari pada model-model *basic* lainnya. Pada tahap ini, *mesh* juga diperhalus dengan menggunakan *mesh adaption* di mana volume fraksi gradien

yang terbesar (*mesh* yang diperhalus membantu perkembangan *interface* yang tajam antara air dan udara).(CFX, 2007)

Langkah pertama adalah meng-*import* model beserta domain yang sudah di-*mesh* pada proses sebelumnya. Simulasi arus *free surface* biasanya membutuhkan pendefinisian *boundary* dan *initial conditions* untuk mengatur tekanan yang tepat dan bidang fraksi volume. Untuk mendefinisikan kondisi ini, dapat menggunakan CEL (*CFX Expression Language*). (CFX, 2007).

Dalam simulasi ini, kondisi berikut di-*setting* dan memerlukan ekspresi:

- Sebuah batas *inlet* di mana fraksi volume di atas permukaan bebas adalah 1 untuk udara dan 0 untuk air, dan di bawah permukaan bebas adalah 0 untuk udara dan 1 untuk air.
- Sebuah batas *outlet* di mana tekanan di atas permukaan bebas adalah konstan dan tekanan di bawah permukaan bebas adalah distribusi hidrostatik.

Ekspresi-ekspresi untuk *boundary* dan *initial conditions* yang didefinisikan pada CEL dapat dilihat pada Tabel 4.4.

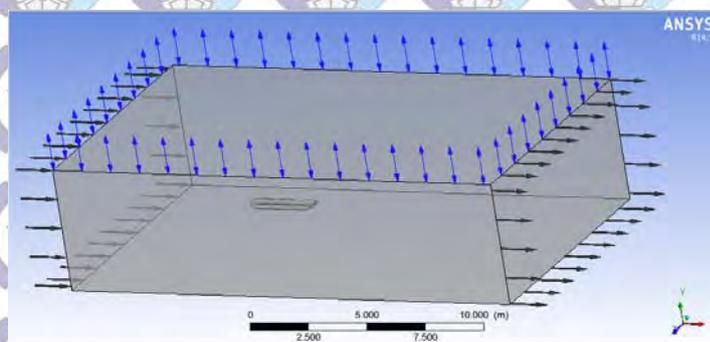
Tabel 4.4 Ekspresi-ekspresi pada CEL (CFX, 2007)

Item	Nama	Definisi
tinggi hulu <i>free surface</i>	UpH	1.80 [m]
tinggi hilir <i>free surface</i>	DownH	1.80 [m]
densitas air	DenWater	1000 [kg m ⁻³]
densitas udara	DenRef	1.185 [kg m ⁻³]
densitas air–densitas udara	DenH	(DenWater - DenRef)
fraksi volume udara (hulu)	UpVFAir	step((y-UpH)/1[m])
fraksi volume air (hulu)	UpVFWater	1-UpVFAir
distribusi tekanan hulu	UpPres	DenH*g*UpVFWater*(UpH-y)
fraksi volume udara (hilir)	DownVFAir	step((y-DownH)/1[m])
fraksi volume air (hilir)	DownVFWater	1-DownVFAir
distribusi tekanan hilir	DownPres	DenH*g*DownVFWater*(DownH-y)

Langkah selanjutnya adalah pendefinisian domain. Domain yang dimaksudkan di sini adalah jenis dari fluida yang akan dilakukan penelitian yaitu air dan udara. Temperatur udara di-*setting* 25°C menyesuaikan kondisi *towing tank* dan tekanan di-*setting* sebesar 1 atm. Pada Tab Basic setting terdapat opsi Gravity X Dim, Gravity Y Dim, dan Gravity Z Dim yang diisi dengan angka 0 m/s; -g; dan 0 m/s secara berturut-turut. Untuk Buoy. Ref. Density diisi dengan “DenRef “ sesuai dengan ekspresi-ekspresi CEL yang telah dijelaskan di atas. Untuk opsi-opsi lainnya dibiarkan dengan *setting default*.

Pada tab “Fluid Model”, kotak di sebelah pilihan “Homogeneous Model” dicentang dan pada opsi “Free Surface Model” di-*setting* mode “Standard”, sedangkan untuk model turbulensi di-*setting* “Shear Stress Transport”. Untuk opsi-opsi lainnya dibiarkan dengan setting default. Pada tab “Fluid Specific Model”, harus dipastikan bahwa fluida yang telah di-*setting* pada proses ini ada dua yaitu air dan udara.

Setelah domain selesai didefinisikan, langkah berikutnya adalah pendefinisian batas (*boundary*) seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Pada batas *inlet* dimasukkan kecepatan kapal dan pada batas *outlet* di-*setting* “Static Pressure” (tekanan outlet dianggap statis). Batas *wall* di-*setting* “Free Slip” yang berarti dianggap tidak ada gesekan (fluida bebas bergerak). Batas *top* didefinisikan sebagai “Opening” atau dinding terbuka yang artinya tidak ada pengaruh tekanan dari mana pun. Batas *bottom*, sama seperti halnya model, didefinisikan “No Slip” yang artinya tidak terjadi slip. Gambar 4.12 menunjukkan hasil pendefinisian batas (*boundary*) pada tahap Pre Processor.



Gambar 4.12 Hasil Pendefinisian Batas (*Boundary*)

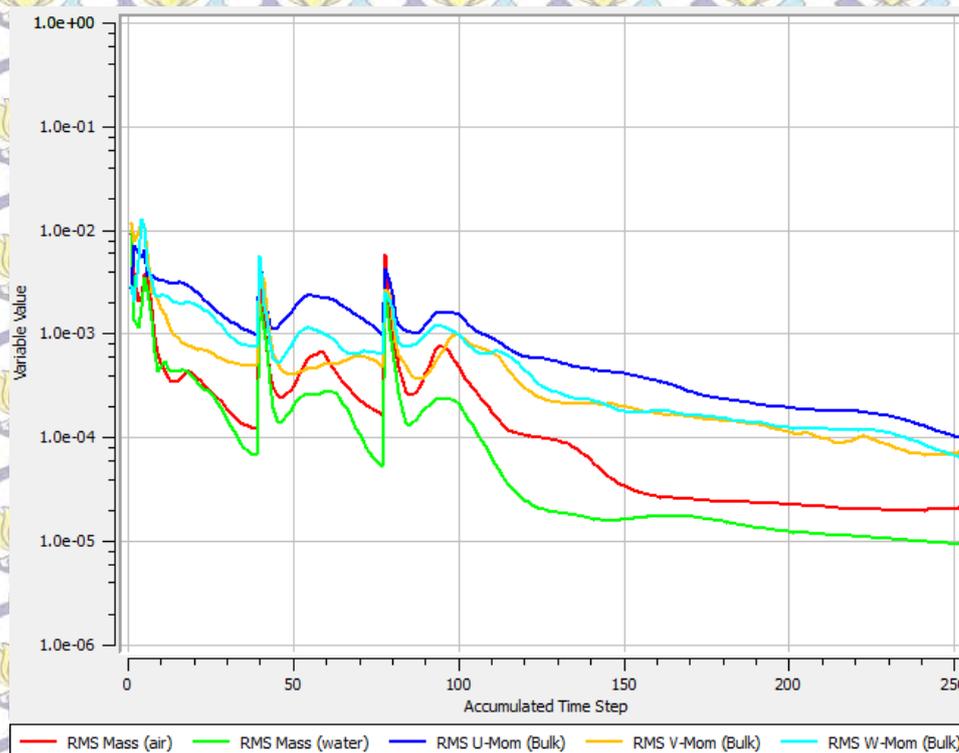
Setelah pendefinisian batas telah dilakukan, langkah berikutnya adalah mengatur fitur "Initial Condition" agar konsisten dengan batas *inlet*. Pada komponen kecepatan, dimasukkan nilai kecepatan kapal sesuai dengan batas *inlet*. Selanjutnya men-*setting* parameter-parameter pada fitur "Mesh Adaption" untuk meningkatkan resolusi *interface* antara udara dan air. Pada fitur ini juga ditetapkan berapa maksimum iterasi yang diinginkan ketika akan melakukan *running* model. Iterasi adalah parameter atau batas yang mengontrol ketika *software* melakukan *running* hingga didapat hasil yang konvergen. Setelah fitur pada "Mesh Adaption" telah selesai di-*setting*, maka langkah selanjutnya adalah men-*setting* fitur "Solver Control" untuk mengatur batas maksimum iterasi yang diinginkan. Langkah terakhir pada tahap ini setelah semua fitur di atas telah di-*setting* adalah mengubah menjadi file menjadi *.def* sebagai input untuk proses *running*.

4.6. Tahap Solver

Kemudian, setelah melalui tahapan *pre-processor* dan didapat file dengan format *.def*. Selanjutnya file tersebut di-*running* pada *solver*. Pada proses ini dilakukan *iterasi* sebanyak 600. Jumlah iterasi tidak ditentukan besarnya, dapat dimasukkan sembarang *iterasi* karena proses *running* akan berhenti secara otomatis ketika perhitungan telah *konvergen* meskipun belum mencapai batas maksimal *iterasi*. Jika proses *running* belum berhenti meski telah melewati batas maksimal iterasi maka proses itu dapat dikatakan gagal dan proses *running* harus diberhentikan dan mengubah kembali nilai *iterasi* maksimal pada tahapan *preprocessor*. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah nilai iterasi terlalu kecil dan meshing yang terlalu rapat sehingga membutuhkan proses *running* yang lebih lama.

Proses *running* ini digambarkan dengan sebuah grafik, dengan sumbu x menunjukkan *acumulated time step* sesuai dengan nilai *iterasi* yang kita masukkan dan sumbu y menunjukkan *variable vellue* (nilai konvergensi) dengan nilai 1 sampai 10^{-6} yang ditentukan pada saat tahap *pre-processor* dan berdasarkan penelitian sebelumnya pada simulasi ini ditentukan batas *variable value* adalah 10^{-5} (Anggara, 2013). Pada tahapan berguna untuk mengatur tingkat error dari

simulasi yang dilakukan, pengaturan tingkat error tersebut dipengaruhi oleh nilai *iterasi*, proses *running* juga dipengaruhi oleh nilai *variable value*. Semakin kecil nilai *variable value* maka proses *running* akan semakin lama dan semakin akurat. Proses *running* selesai ketika semua kurva didalam grafik telah melewati batasan dari nilai *variable value*. Untuk lebih jelasnya maka proses *running* dapat digambarkan dengan grafik sesuai dengan Gambar 4.13.

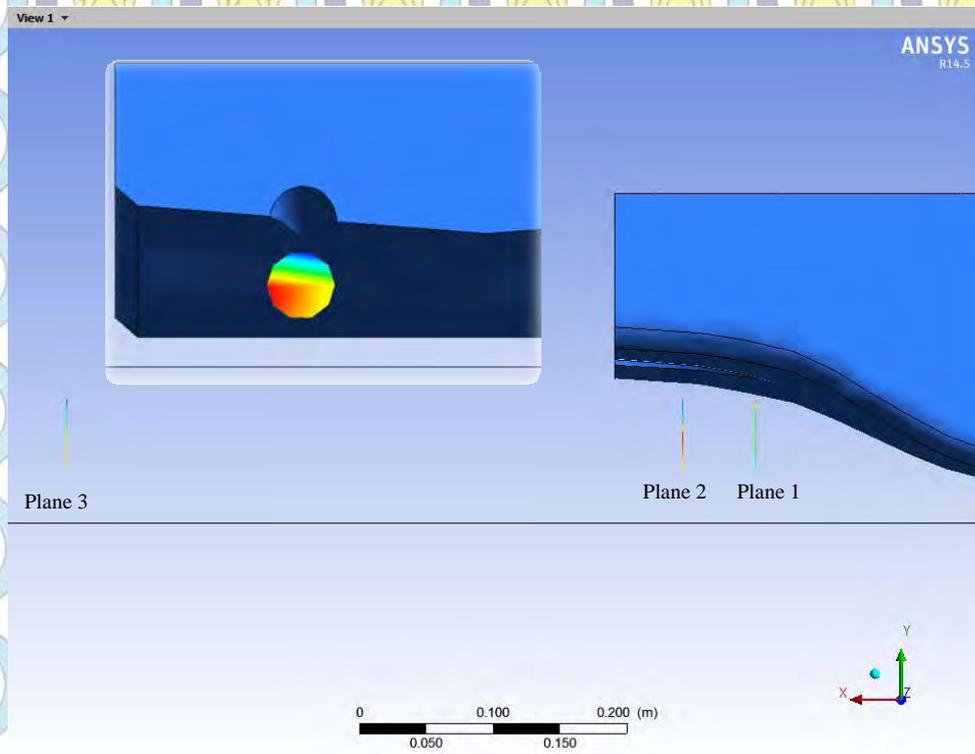


Gambar 4.13 Grafik Proses *Running* pada Tahapan Solver

4.7. Post Processor

Setelah melalui proses iterasi dan melakukan *running* pada tahap solver, parameter-parameter atau variable yang diperlukan untuk melakukan proses analisis model kapal akan diperoleh pada tahapan post-processor. Parameter tersebut diantara adalah *creating velocity vector plots*. Pada bagian ini ditentukan lokasi area yang akan dianalisis, area ini dinamakan dengan *plane*. Pada penelitian ini lokasi *plane* berada dibagian buritan kapal dan *plane* berbentuk menyerupai *propeller* baik itu lokasi dan ukuran diameternya karena analisis yang akan dilakukan nantinya bertujuan untuk menganalisis buritan dan sistem propulsinya. Lokasi *plane* sendiri dibuat berbeda yaitu dibagi menjadi 3 (tiga) tempat *plane* 1

berada di *propeller plane*, *plane 2* berada AP, *plane 3* berada 15 m dibelakang AP. Lokasi *plane* pada bagian buritan kapal yang menjadi focus lokasi pengamatan dapat dilihat pada Gambar 4.14.

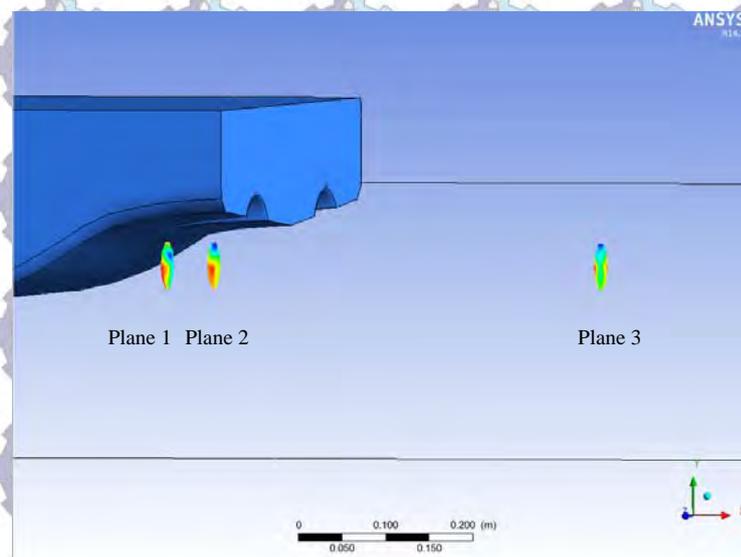


Gambar 4.14 Bentuk dan Lokasi Plane

Pada *plane* juga dimasukkan variable yang berpengaruh di area tersebut, contohnya: *water velocity* dan *air velocity*. *Water velocity* dimaksudkan untuk mengetahui kecepatan air dalam hal ini kecepatan air sama dengan kecepatan model kapal. Sedangkan *air velocity* karena pengaruh dari kecepatan udara, variable ini diperlukan ketika akan melakukan simulasi dengan metode 2 (dua) *fluida*.

Setelah penentuan bentuk dan lokasi *plane* selesai dilakukan, berikutnya adalah memasukkan parameter-parameter yang berpengaruh terhadap proses simulasi pada tahapan *post-processor*. Hasil dari parameter-parameter ini nantinya akan digambarkan pada permukaan *plane* yang mempunyai nilai tertentu dan nantinya akan dianalisis menjadi nilai kecepatan aliran dibagian buritan kapal. Parameter-parameter yang dimaksudkan disini adalah: *vector* dari kecepatan, *streamline*, tekanan, gaya, temperatur dan *contour*.

Setelah semua parameter selesai dimasukkan, maka hasil dari tahapan *post-processor* ini tampak pada bagian permukaan *plane*. Dengan bantuan fitur atau parameter *contour* maka tampak dibagian permukaan *plane* memiliki variasi warna, pada tiap warna memiliki nilai yang berbeda, dari macam-macam warna inilah nantinya akan dianalisis nilai kecepatan air, artinya *contour* mewakili nilai kecepatan kapal pada lokasi *plane* tersebut. Letak dari *plane* dibagian buritan kapal dari hasil tahapan *post-processor* dapat dilihat pada Gambar 4.15.



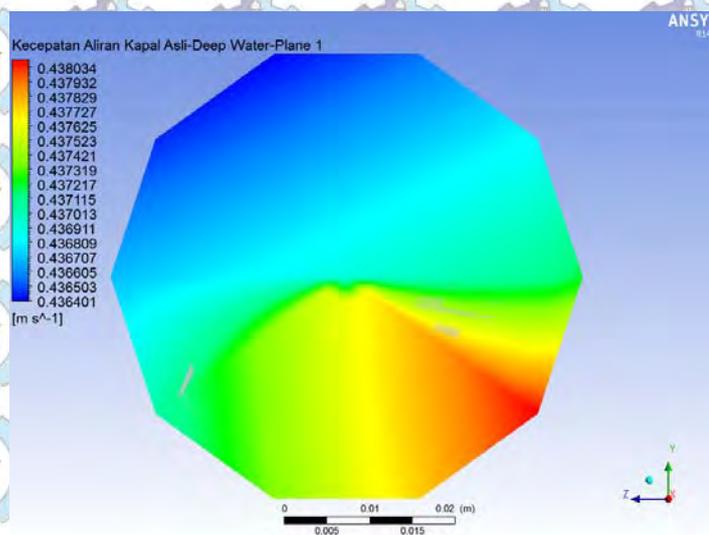
Gambar 4.15 Lokasi *Plane* (sisi *portside*) pada tahap *Post-Processor*

Pada simulasi ini *plane* dirancang sesuai dengan bentuk *propeller* dari kapal aslinya dengan $D = 2,4$ meter pada kapal asli dan $D = 0,055$ meter pada model kapal. Bentuk dari *plane* dibagian buritan kapal dari hasil tahapan *post-processor* dapat dilihat pada Gambar 4.16.



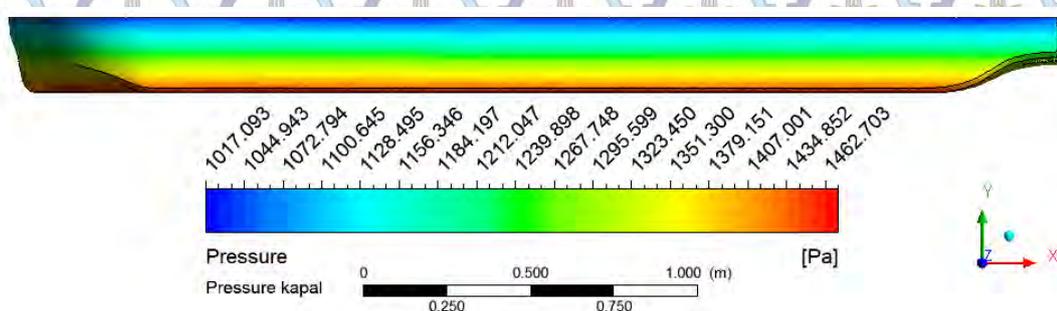
Gambar 4.16 Bentuk *Plane* (sisi *portside*) pada tahap *Post-Processor*

Pada permukaan *plane* terlihat muncul beberapa variasi warna. Warna tersebut didapat dari fitur *contour* yang terdapat pada tahapan *post-processor*. Variasi warna pada *contour* diatur memiliki nilai sebesar 0 m/s hingga 0.3 m/s, nilai ini diambil berdasarkan pertimbangan kecepatan maksimal yang dimasukkan kedalam simulasi sebesar 0.271 m/s. Variasi warna pada *plane* dibagian buritan kapal dari hasil tahapan *post-processor* dapat dilihat pada Gambar 4.17.

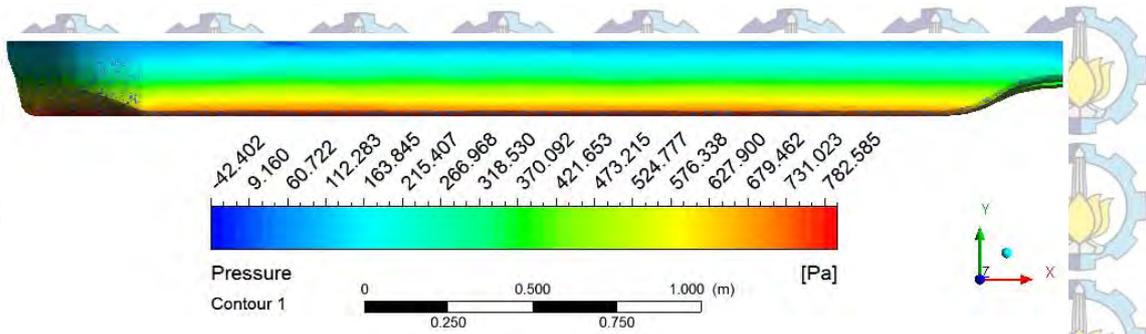


Gambar 4.17 *Contour* kecepatan pada tahap *post-processor*

Pada tahap Post-Processor ini juga dapat ditampilkan distribusi tekanan yang ada pada lambung. Distribusi tekanan ini juga berpengaruh terhadap hambatan total kapal. Untuk distribusi tekanan pada kapal dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.

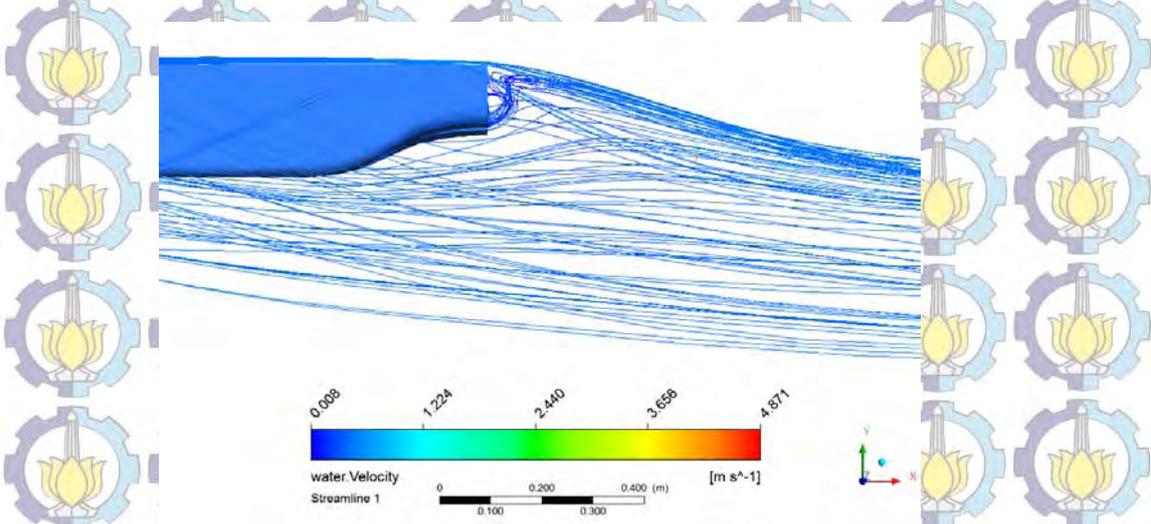


Gambar 4.18 Distribusi tekanan pada lambung model CFD kapal Tunnel A untuk *deep water*

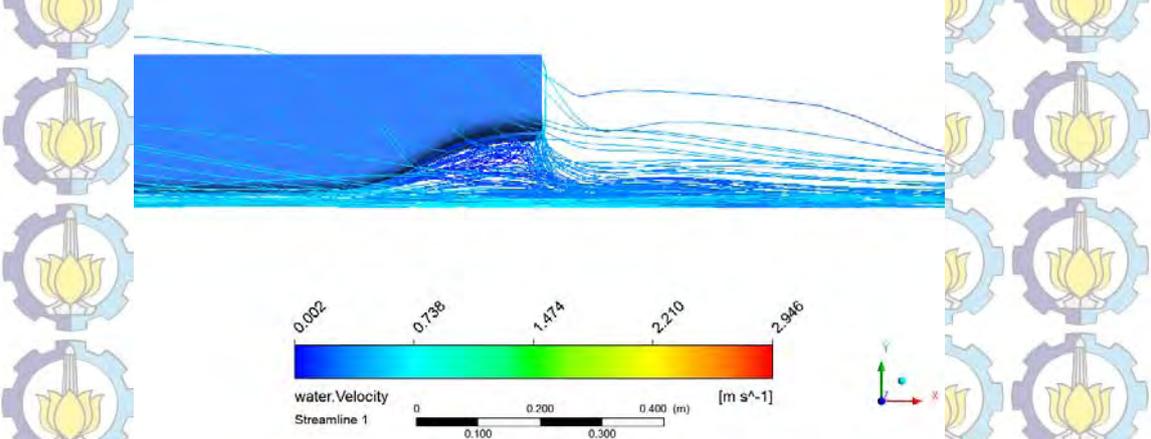


Gambar 4.19 Distribusi tekanan pada lambung model CFD kapal Tunnel A untuk *shallow water*

Selain menampilkan distribusi pressure diatas, hasil aliran fluida (*Streamline*) juga di tampilkan seperti pada Gambar 4. 20 dan Gambar 4. 21.



Gambar 4. 20 Aliraaan fluida di sekitar model kapal tunnel A untuk *deep water*



Gambar 4. 21 Aliran fluida di sekitar model kapal tunnel A untuk *shallow water*

4.8. Proses Validasi

Untuk mengetahui keakuratan hasil yang kita peroleh, maka perlu dilakukan proses validasi. Yang dimaksud dengan proses validasi adalah proses penyesuaian variable atau parameter antara model dengan objek yang dimodelkan. Variable atau parameter yang dicocokkan adalah hasil dari pengujian eksperimen dilaboratorium dengan simulasi menggunakan *software*, dalam hal ini adalah *CFD software package*.

Proses validasi dilakukan dengan cara membandingkan hambatan total hasil simulasi model kapal asli dengan percobaan towing tank yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Anggara, 2013). Hasil hambatan total percobaan *towing tank* dan model kapal asli dapat dilihat pada Tabel 4. 5. Setelah proses validasi selesai dilakukan maka selanjutnya dilakukan modifikasi bagian buritan model kapal asli dengan desain *Stern Tunnel* yang telah direncanakan. Nilai hambatan total untuk model CFD kapal tunnel A dan Tunnel B dapat dilihat pada Tabel 4. 6.

Tabel 4. 5 Proses Validasi Hambatan Total Model CFD Kapal Asli dengan Percobaan Towing Tank

Item	Hambatan Total (N)		Ratio Hambatan Total
	Towing Tank	Model CFD Kapal Asli	
Shallow Water	6.603	6.820	3.281%
Deep Water	2.750	2.647	3.735%

Tabel 4. 6 Nilai Hambatan Total Model CFD

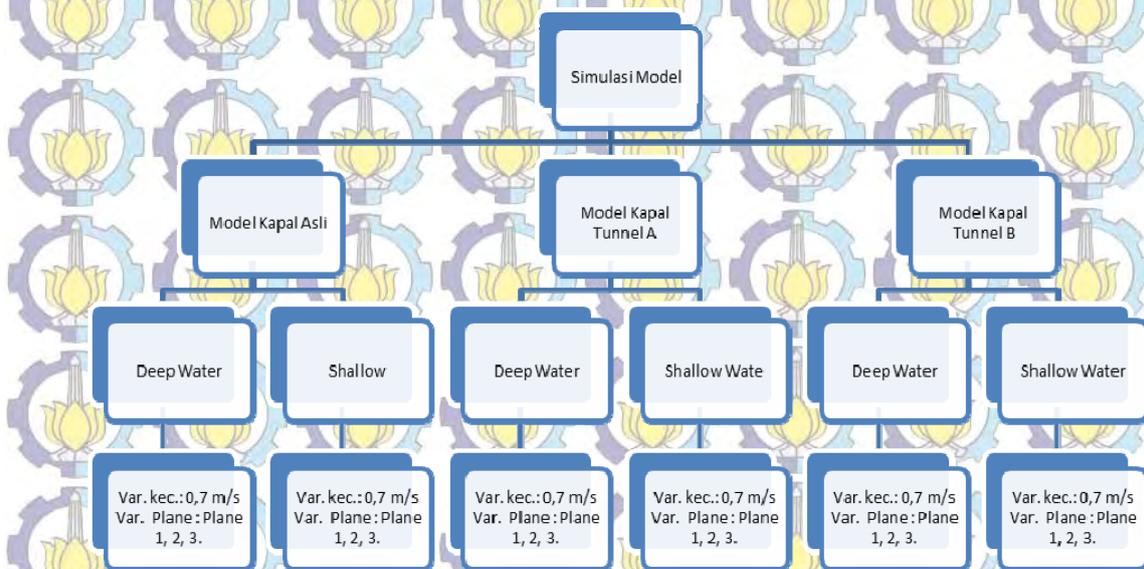
Item	Hambatan Total Model CFD (N)	
	Tunnel A	Tunnel B
Shallow Water	7.791	5.808
Deep Water	2.742	2.753

BAB V

HASIL SIMULASI MODEL

5.1. Pendahuluan

Setelah melewati proses simulasi CFD, maka akan didapatkan hasil berupa nilai kecepatan aliran diburitan kapal untuk selanjutnya akan dilakukan analisis. Kecepatan ini nantinya berpengaruh terhadap besarnya *wake* dan kecepatan aliran yang memasuki *propeller*, *wake* sendiri merupakan perbedaan antara kecepatan kapal dengan kecepatan aliran yang menuju *propeller*. Pada bab V ini nantinya akan dibagi menjadi 3 (tiga) bagian penting dari hasil simulasi model. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Bagan simulasi model

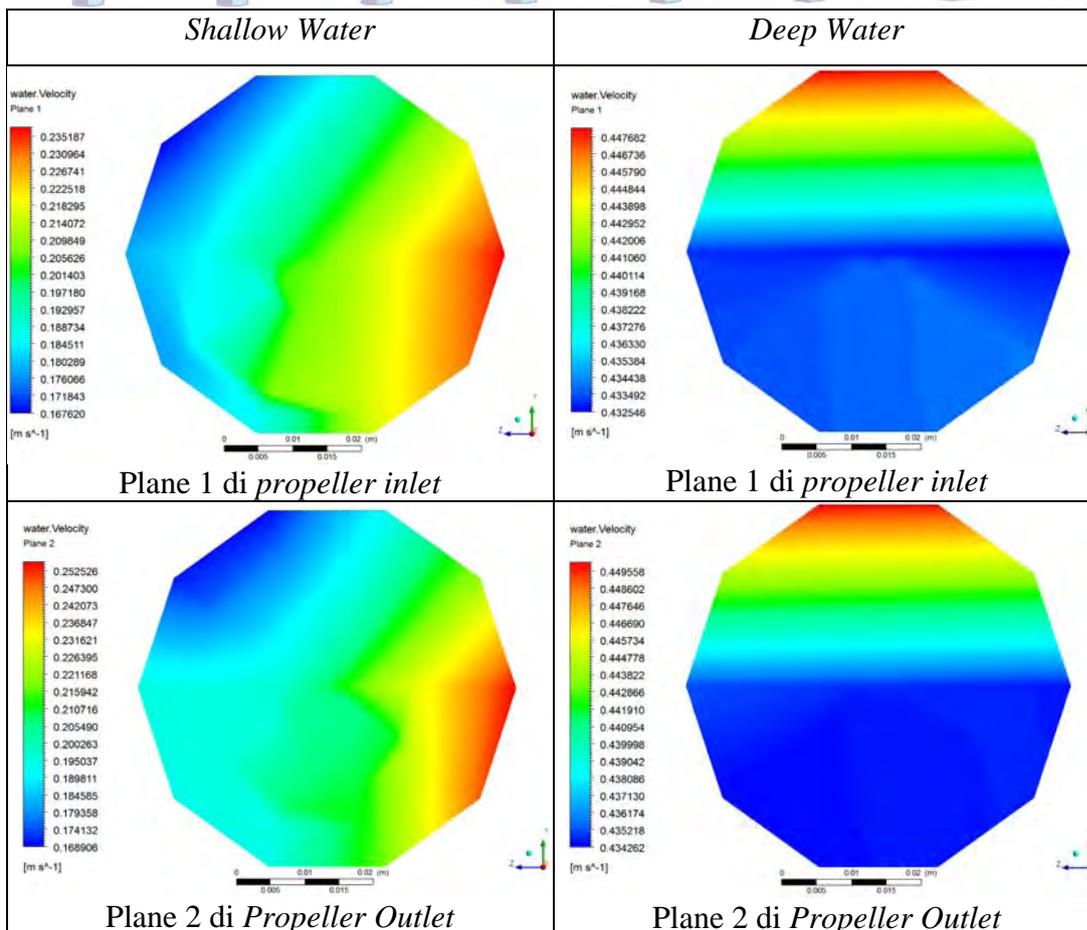
Pada simulasi model dengan menggunakan *CFD software package* diberikan beberapa variasi untuk mendapatkan hasil yang bervariasi sehingga diharapkan hasil yang diperoleh nantinya menjadi lebih maksimal. Variasi berupa 1 (satu) kecepatan pada tiap variasi *plane*. Lokasi *plane* sendiri dibuat berbeda yaitu dibagi menjadi 3 (tiga) tempat. *Plane 1* berada di *propeller inlet*, *plane 2* berada di *propeller outlet* (pada AP) dan *plane 3* berada pada keluar

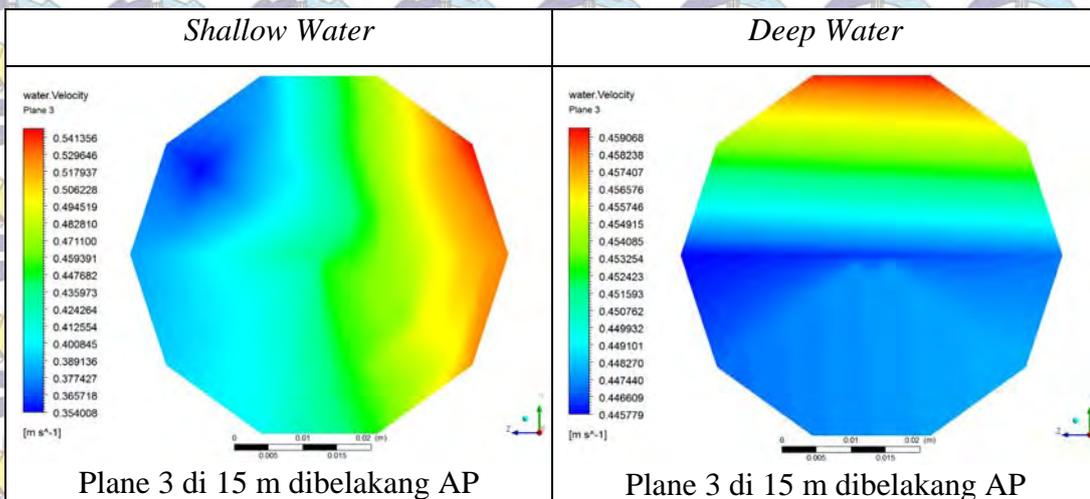
badan kapal (15 m dibelakang AP). Semua *plane* adalah untuk sisi *portside* kapal. Diameter *plane* disesuaikan berdasarkan diameter *propeller* yang sebenarnya yaitu 2.40 meter yang terskala 43.5 menjadi 0.0276 m.

Data rata-rata kecepatan aliran untuk setiap *plane* di dapatkan dengan menggunakan *tools function calculator* yang tersedia di *software* ANSYS.

5.2. Hasil Analisis Kecepatan Aliran untuk Model CFD Kapal Asli

Dari hasil analisis ANSYS pada model kapal asli maka akan didapatkan tampilan distribusi kecepatan aliran untuk setiap *plane* dan kondisi batas yang di tetapkan. Tampilan setiap warna dari kontur yang dihasilkan merupakan perwakilan besaran nilai kecepatan aliran. Untuk gambaran distribusi kecepatan aliran setiap *plane* dapat dilihat pada Gambar 5.2.





Gambar 5.2 Distribusi kecepatan aliran tiap plane untuk Model CFD Kapal Asli

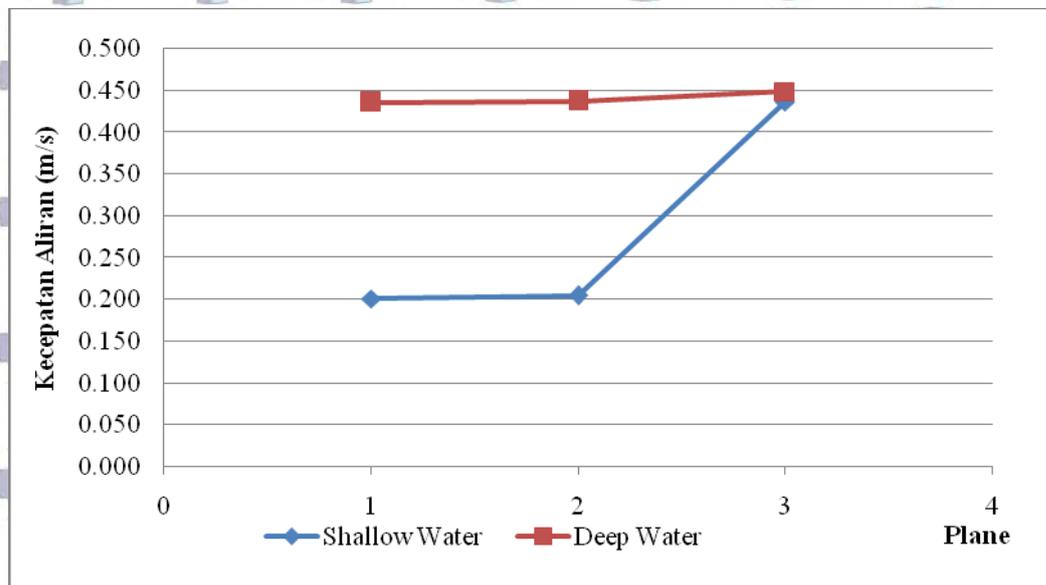
Dari visualisasi plane ini terlihat bahwa warna merah merupakan kecepatan aliran tertinggi untuk shallow water dan berada pada posisi mendekati *center line* kapal, Sedangkan untuk kondisi *deep water* berada pada posisi bagian atas dari plane.

Kemudian dengan menggunakan *tools functions calculator* yang terdapat pada ANSYS, didapatkan data rata-rata kecepatan aliran (V_a) setiap plane, baik itu untuk kondisi *shallow water* (SW) maupun kondisi *deep water* (DW). Dari data kecepatan rata-rata aliran ini kemudian bisa dihitung debit aliran (Q) dan *mass flow* (M) pada setiap penampang plane dengan luas penampang plane 0.00238 m^2 dan massa jenis air 1000 kg/m^3 . Data dari rata-rata kecepatan aliran, debit dan *mass flow* untuk setiap plane pada model CFD kapal asli dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Rata-rata kecepatan aliran (V_a), debit (Q) dan *mass flow* (M) model CFD kapal asli

Item	Model CFD Kapal Asli					
	V_a (m/s)		Q (m^3/s)		M (kg/s)	
	SW	DW	SW	DW	SW	DW
Plane 1	0.2014	0.4359	0.0005	0.0010	0.4797	1.0383
Plane 2	0.2048	0.4374	0.0005	0.0010	0.4879	1.0419
Plane 3	0.4369	0.4491	0.0010	0.0011	1.0407	1.0698

Sedangkan untuk grafik rata-rata kecepatan aliran setiap plane untuk model CFD kapal asli dapat dilihat pada Gambar 5.3.

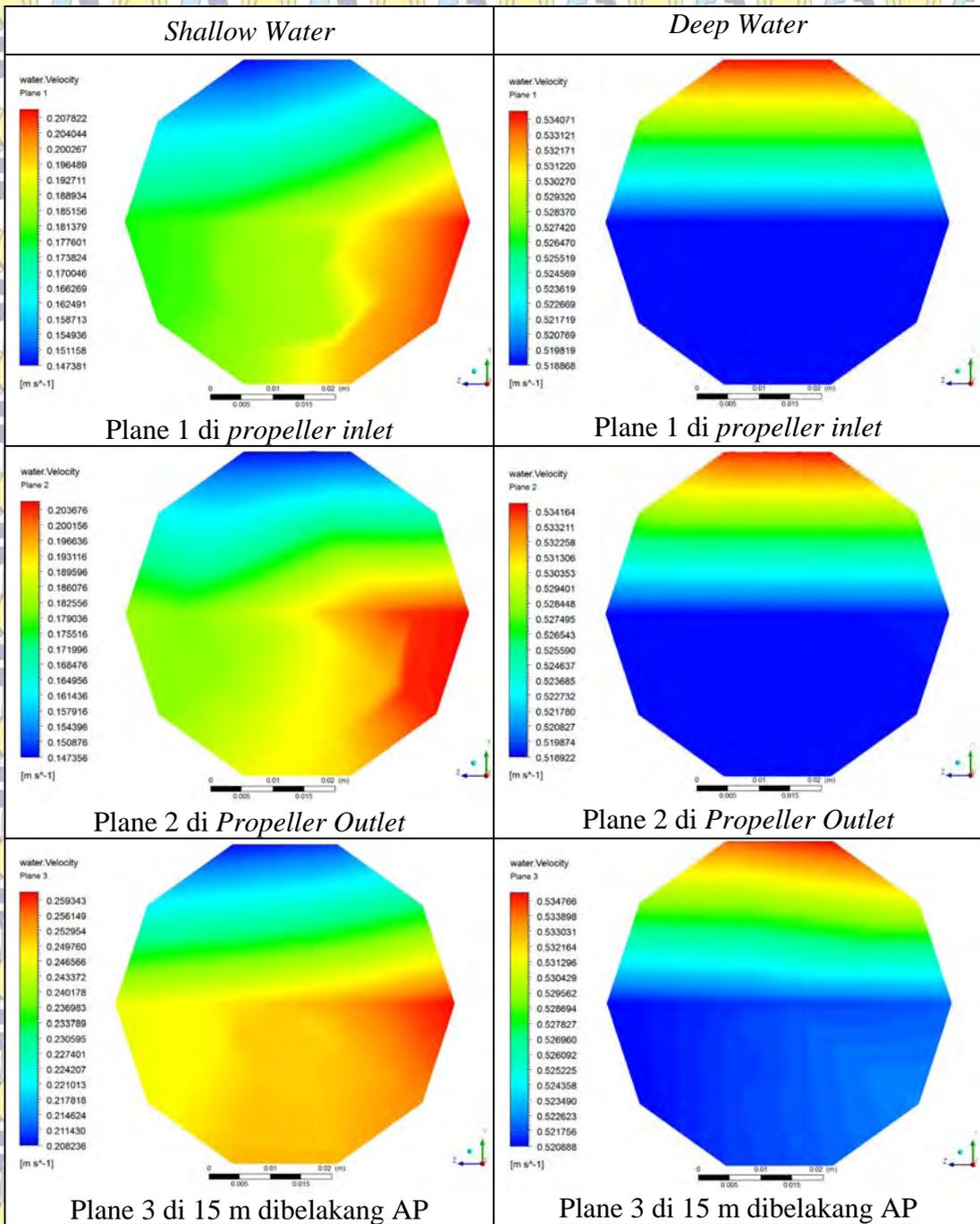


Gambar 5.3 Grafik rata-rata kecepatan aliran model CFD kapal asli

Dari hasil kecepatan aliran pada model CFD kapal asli ini terlihat bahwa kecepatan aliran pada daerah propeller inlet (plane 1) dan propeller outlet (plane 2) untuk kondisi *shallow water* turun drastis dibandingkan dengan kondisi *deep water*, hal ini dikarenakan volume dan massa aliran yang menuju plane juga mengalami penurunan yang signifikan, sedangkan untuk aliran yang keluar kapal (plane 3) akan meningkat dan pada akhirnya kembali ke kecepatan aliran awal (kecepatan aliran saat masuk model kapal).

5.3. Hasil Analisis Kecepatan Aliran untuk Model CFD Kapal Tunnel A

Dari hasil analisis ANSYS pada model CFD kapal Tunnel A maka akan didapatkan tampilan distribusi kecepatan aliran untuk setiap plane dan kondisi batas yang di tetapkan. Tampilan setiap warna dari kontur yang dihasilkan merupakan perwakilan besaran nilai kecepatan aliran. Untuk gambaran distribusi kecepatan aliran setiap plane pada model CFD kapal Tunnel A dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Distribusi kecepatan aliran tiap plane untuk Model CFD Kapal Tunnel A

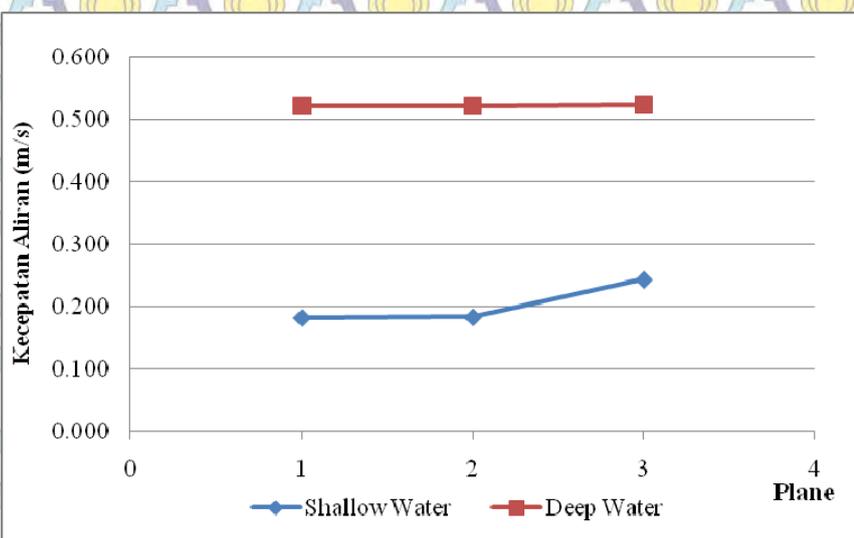
Dari visualisasi plane ini terlihat bahwa warna merah merupakan kecepatan aliran tertinggi untuk *shallow water* dan berada pada posisi mendekati *center line* kapal, Sedangkan untuk kondisi *deep water* berada pada posisi bagian atas dari plane.

Kemudian dengan menggunakan *tools functions calculator* yang terdapat pada ANSYS, didapatkan data rata-rata kecepatan aliran (V_a) setiap plane, baik itu untuk kondisi *shallow water* (SW) maupun kondisi *deep water* (DW). Dari data kecepatan rata-rata aliran ini kemudian bisa dihitung debit aliran (Q) dan *mass flow* (M) pada setiap penampang plane dengan luas penampang plane 0.00238 m^2 dan massa jenis air 1000 kg/m^3 . Data dari rata-rata kecepatan aliran, debit dan *mass flow* untuk setiap plane pada model CFD kapal asli dapat dilihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Rata-rata kecepatan aliran (V_a), debit (Q) dan *mass flow* (M) model CFD Tunnel A

Item	Model CFD Kapal Tunnel A					
	V_a (m/s)		Debit (m^3/s)		Mass Flow (kg/s)	
	SW	DW	SW	DW	SW	DW
Plane 1	0.1824	0.5217	0.0004	0.0012	0.4344	1.2427
Plane 2	0.1834	0.5218	0.0004	0.0012	0.4368	1.2428
Plane 3	0.2439	0.5240	0.0006	0.0012	0.5810	1.2482

Sedangkan untuk grafik rata-rata kecepatan aliran setiap plane untuk model CFD kapal Tunnel A dapat dilihat pada Gambar 5.5.



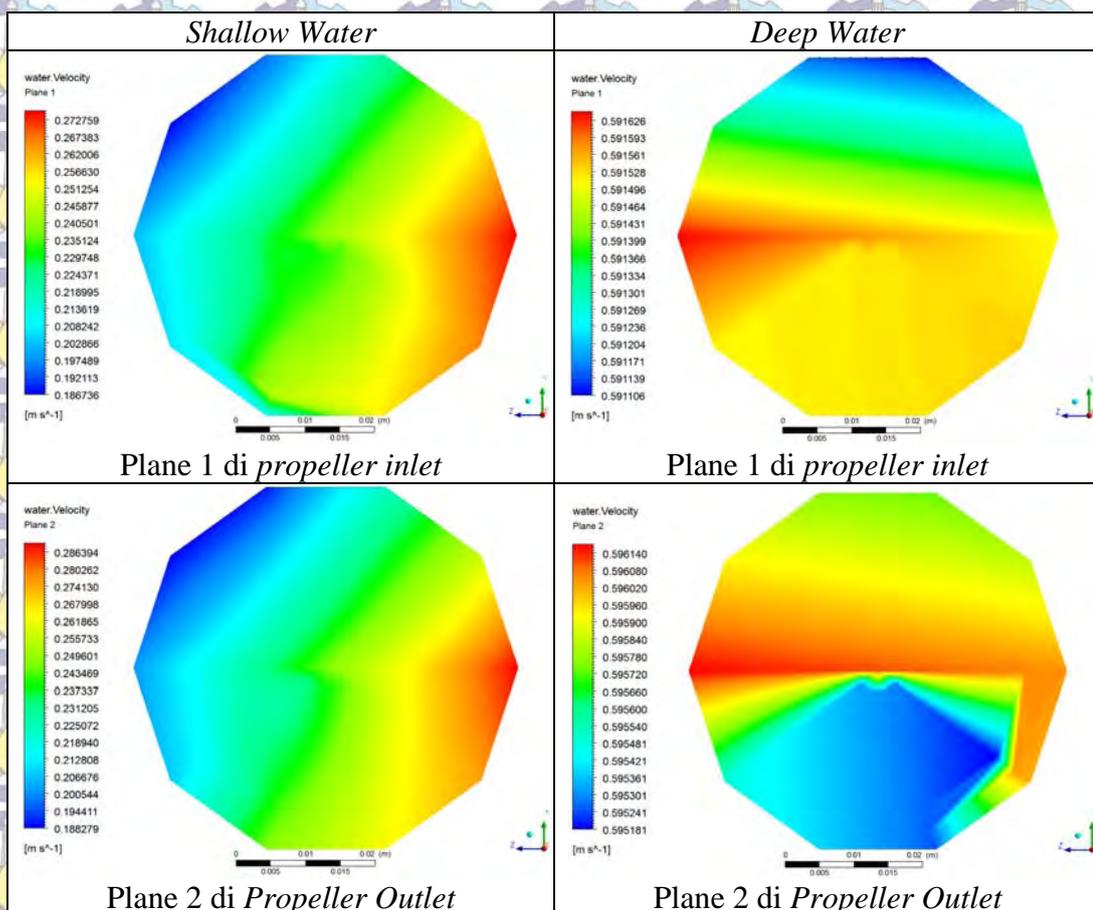
Gambar 5.5 Grafik rata-rata kecepatan aliran model CFD kapal Tunnel A

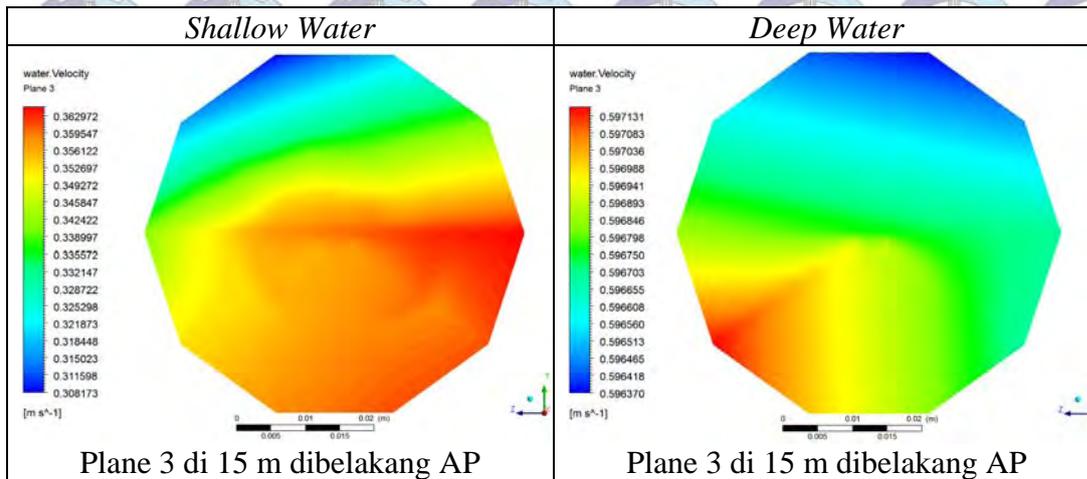
Dari hasil kecepatan aliran pada model CFD kapal Tunnel A ini terlihat bahwa kecepatan aliran pada daerah propeller inlet (plane 1) dan propeller outlet

(plane 2) untuk kondisi *shallow water* turun drastis dibandingkan dengan kondisi *deep water*, hal ini dikarenakan volume dan massa aliran yang menuju plane juga mengalami penurunan yang signifikan, sedangkan untuk aliran yang keluar kapal (plane 3) akan meningkat dan pada akhirnya kembali ke kecepatan aliran awal (kecepatan aliran saat masuk model kapal).

5.4. Hasil Analisis Kecepatan Aliran untuk Model CFD Kapal Tunnel B

Dari hasil analisis ANSYS pada model CFD kapal Tunnel B maka akan didapatkan tampilan distribusi kecepatan aliran untuk setiap plane dan kondisi batas yang di tetapkan. Tampilan setiap warna dari kontur yang dihasilkan merupakan perwakilan besaran nilai kecepatan aliran. Untuk gambaran distribusi kecepatan aliran setiap plane pada model CFD kapal Tunnel B dapat dilihat pada Gambar 5.6.





Gambar 5.6 Distribusi kecepatan aliran tiap plane untuk Model CFD Kapal Tunnel B

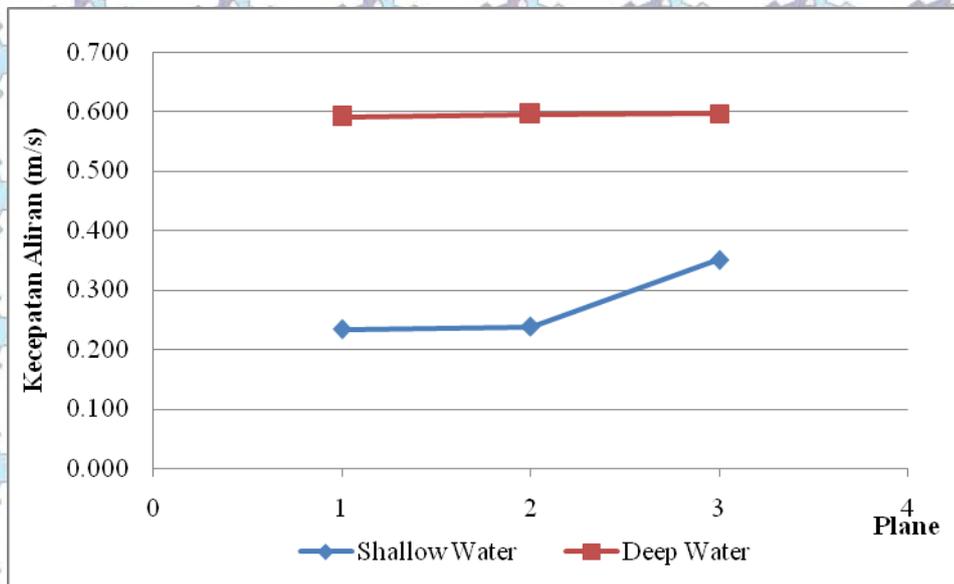
Dari visualisasi plane ini terlihat bahwa warna merah merupakan kecepatan aliran tertinggi untuk *shallow water* dan berada pada posisi mendekati *center line* kapal, Sedangkan untuk kondisi *deep water* berada pada posisi keluar kapal.

Kemudian dengan menggunakan *tools functions calculator* yang terdapat pada ANSYS, didapatkan data rata-rata kecepatan aliran (V_a) setiap plane, baik itu untuk kondisi *shallow water* (SW) maupun kondisi *deep water* (DW). Dari data kecepatan rata-rata aliran ini kemudian bisa dihitung debit aliran (Q) dan *mass flow* (M) pada setiap penampang plane dengan luas penampang plane 0.00238 m^2 dan massa jenis air 1000 kg/m^3 . Data dari rata-rata kecepatan aliran, debit dan *mass flow* untuk setiap plane pada model CFD kapal asli dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Rata-rata kecepatan aliran (V_a), debit (Q) dan *mass flow* (M) model CFD Tunnel B

Item	Model CFD Kapal Tunnel B					
	V_a (m/s)		Debit (m^3/s)		Mass Flow (kg/s)	
	SW	DW	SW	DW	SW	DW
Plane 1	0.2331	0.5915	0.0006	0.0014	0.5553	1.4089
Plane 2	0.2381	0.5957	0.0006	0.0014	0.5672	1.4191
Plane 3	0.3503	0.5968	0.0008	0.0014	0.8345	1.4215

Sedangkan untuk grafik rata-rata kecepatan aliran setiap plane untuk model CFD kapal Tunnel B dapat dilihat pada Gambar 5.7 .

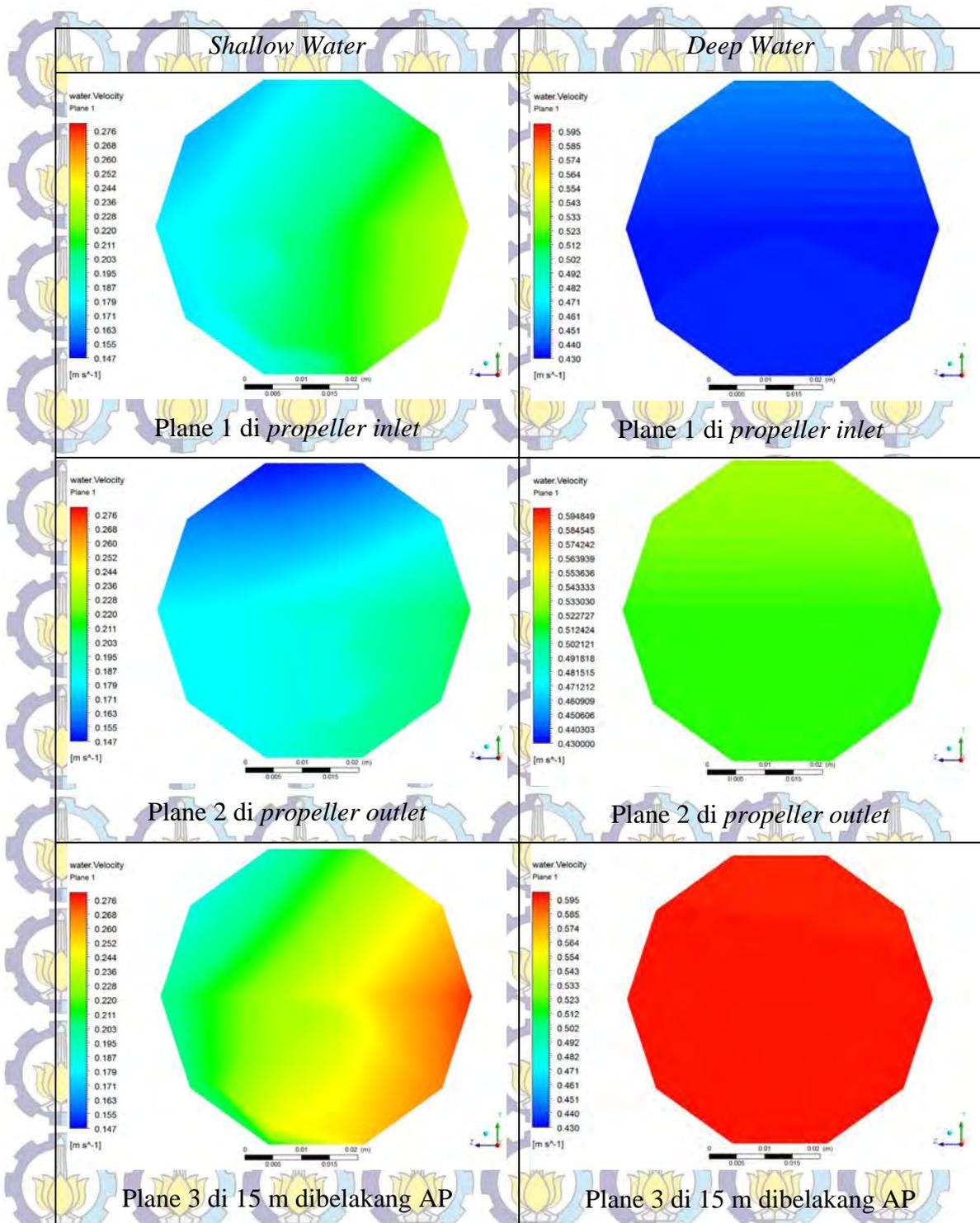


Gambar 5.7 Grafik rata-rata kecepatan aliran model CFD kapal Tunnel B

Dari hasil kecepatan aliran pada model CFD kapal asli ini terlihat bahwa kecepatan aliran pada daerah propeller inlet (plane 1) dan propeller outlet (plane 2) untuk kondisi *shallow water* turun drastis dibandingkan dengan kondisi *deep water*, hal ini dikarenakan volume dan massa aliran yang menuju plane juga mengalami penurunan yang signifikan, sedangkan untuk aliran yang keluar kapal (plane 3) akan meningkat dan pada akhirnya kembali ke kecepatan aliran awal (kecepatan aliran saat masuk model kapal).

5.5. Perbandingan Aliran *uniform*

Kecepatan aliran yang masuk ke propeller pada 0.2R, 0.4R, 0.6R, 0.8R dan R tidaklah sama, sehingga kinerja *propeller* tidak optimal. Untuk itu diupayakan kecepatan aliran yang masuk ke *propeller* adalah *uniform*. Untuk mengetahui aliran yang memasuki suatu propeller maka pada plane 1 untuk semua model CFD dilakukan analisa aliran *uniform* dengan menyamakan batas maksimum dan minimum untuk variable kecepatan aliran. Gambar 5. 8 menunjukkan visualisasi kecepatan aliran di semua model CFD untuk kondisi *deep water* dan *shallow water*.



Gambar 5. 8 Perbandingan aliran uniform setiap model CFD

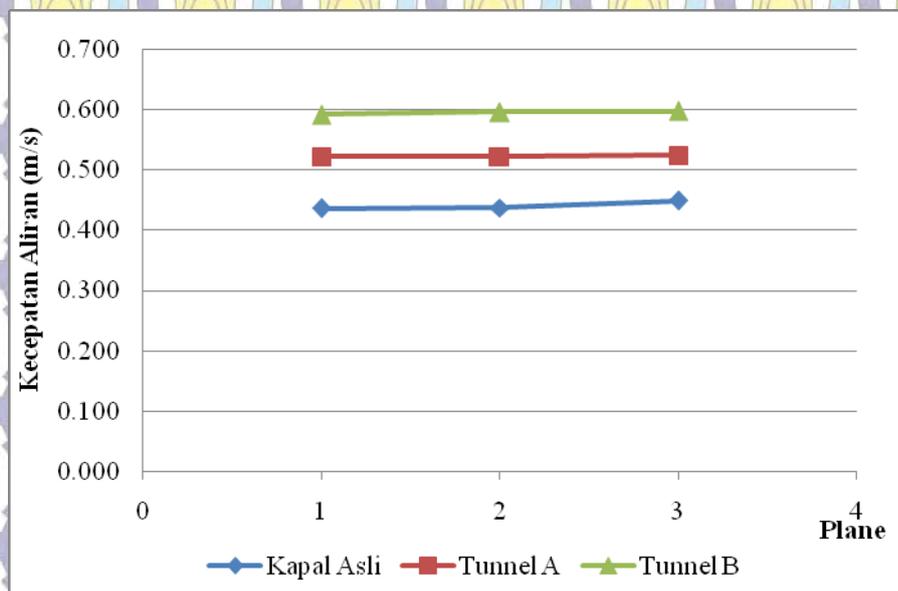
Dari visualisasi plane ini terlihat bahwa warna plane untuk kondisi *deep water* lebih seragam dibanding *shallow water* sehingga bisa dikatakan bahwa aliran pada kondisi *deep water* lebih *uniform* dibanding aliran pada *shallow water*.

5.6. Perbandingan Model CFD

Setelah seluruh data kecepatan rata-rata aliran setiap model CFD terkumpul maka selanjutnya dilakukan perbandingan data setiap kecepatan rata-rata aliran untuk kondisi batas. Hal ini berguna untuk menganalisa pengaruh modifikasi tunnel pada model.

5.6.1. Perbandingan Model CFD Untuk *Deep Water*

Perbandingan Model CFD Kapal Asli dengan Kapal Tunnel A dan Tunnel B untuk *deep water* dapat dilihat pada Gambar 5.9.

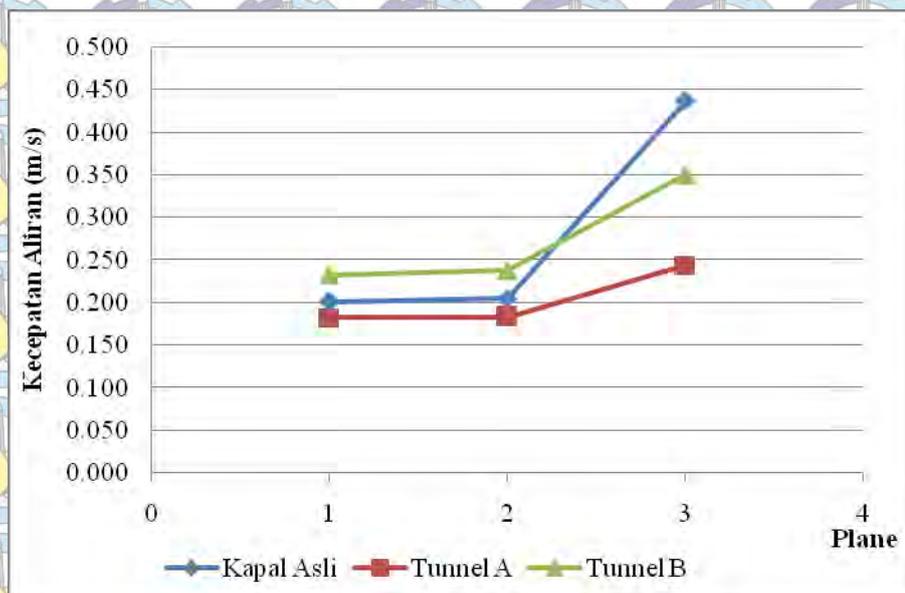


Gambar 5.9 Grafik kecepatan rata-rata aliran model CFD deep water

Dari grafik ini dapat dilihat bahwa model kapal Tunnel B mempunyai kecepatan aliran yang lebih tinggi dibanding dengan model Tunnel A, sedangkan kecepatan aliran pada model Tunnel A lebih tinggi daripada model kapal asli.

5.6.2. Perbandingan Model CFD Untuk *Shallow Water*

Perbandingan Model CFD Kapal Asli dengan Kapal Tunnel A dan Tunnel B untuk *shallow water* dapat dilihat pada Gambar 5.10.

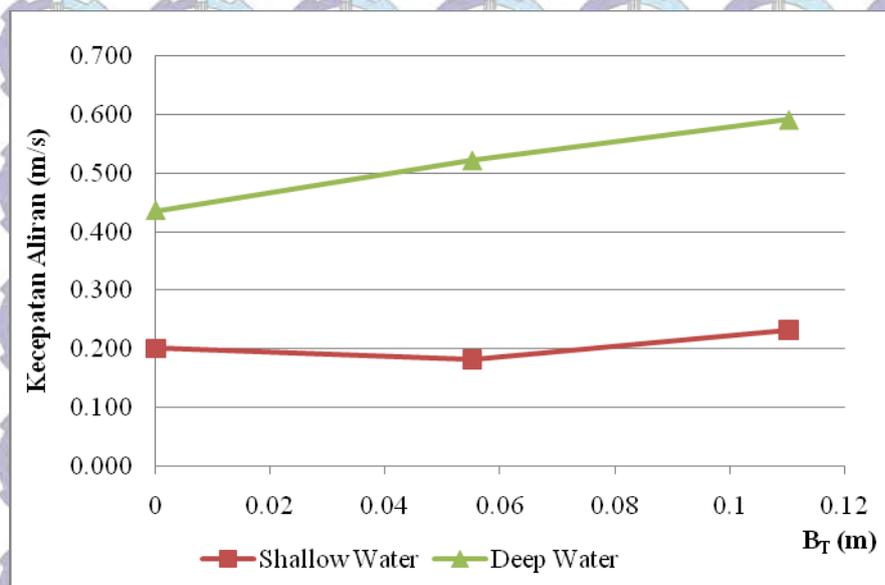


Gambar 5.10 Grafik kecepatan rata-rata aliran model CFD shallow water

Dari grafik ini dapat dilihat bahwa untuk kondisi *shallow water* aliran lebih tidak seragam karena efek dari *sea bed* sangat berpengaruh besar, sehingga pada kecepatan aliran pada plane 1 dan plane 2 untuk model kapal Tunnel B mempunyai kecepatan aliran yang lebih tinggi dibanding dengan model kapal asli, sedangkan kecepatan aliran pada model kapal asli lebih tinggi daripada model kapal Tunnel A. Namun pada plane 3, model kapal asli justru mempunyai kecepatan aliran yang lebih tinggi dibanding dengan model Tunnel A dan Tunnel B, hal ini dikarenakan efek dari penggunaan tunnel masih punya pengaruh (adanya *turbulent*) pada plane 3 (posisi 15 m dibelakang AP). Disamping itu fenomena ini sesuai dengan prinsip Bernoulli yang menyatakan bahwa pada suatu aliran fluida, peningkatan kecepatan fluida disebabkan oleh penurunan tekanan pada aliran tersebut ($p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstan}$).

5.6.3. Pengaruh Lebar Tunnel Terhadap Kecepatan Aliran

Dengan membandingkan data kecepatan rata-rata aliran setiap model untuk plane 1, dapat dilihat pengaruh perubahan lebar tunnel terhadap kecepatan aliran yang melewati plane 1. Seperti terlihat pada Gambar 5.11 bahwa pada *deep water* penambahan lebar tunnel dapat meningkatkan kecepatan aliran yang melewati plane 1. Berbeda dengan *shallow water*, penambahan lebar tunnel justru mengurangi kecepatan rata-rata aliran yang melewati plane 1.



Gambar 5.11 Pengaruh lebar tunnel terhadap kecepatan aliran untuk plane 1

5.7. Perbandingan Efisiensi Propeller

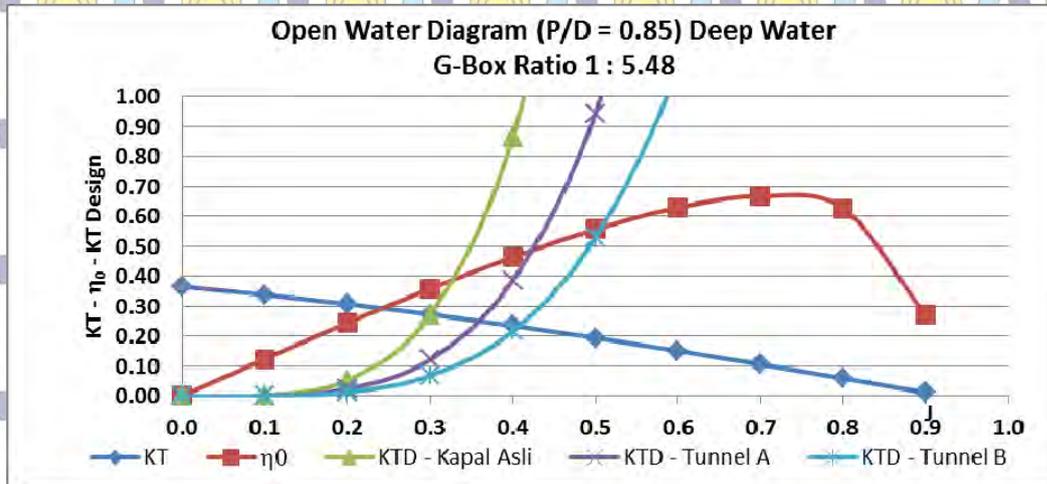
Setelah mengetahui kecepatan aliran yang masuk pada propeller, maka langkah selanjutnya adalah menghitung efisiensi sistem propulsi. Salah satu komponen yang mempengaruhi Efisiensi sistem Propulsi adalah efisiensi *propeller* itu sendiri. Pada penelitian ini tidak melakukan design *propeller*, ukuran *propeller* di dapat dari data propeler yang telah ada. Adapun data *propeller* yang akan dipakai pada kapal ini adalah sebagai berikut:

Jumlah Propeller	: 2 unit
Diameter <i>Propeller</i> (D)	: 2400 mm
Pitch (P)	: 2039 mm
Jumlah Daun <i>Propeller</i> (Z)	: 4
AE/AO	: 0.587
P/D	: 0.850

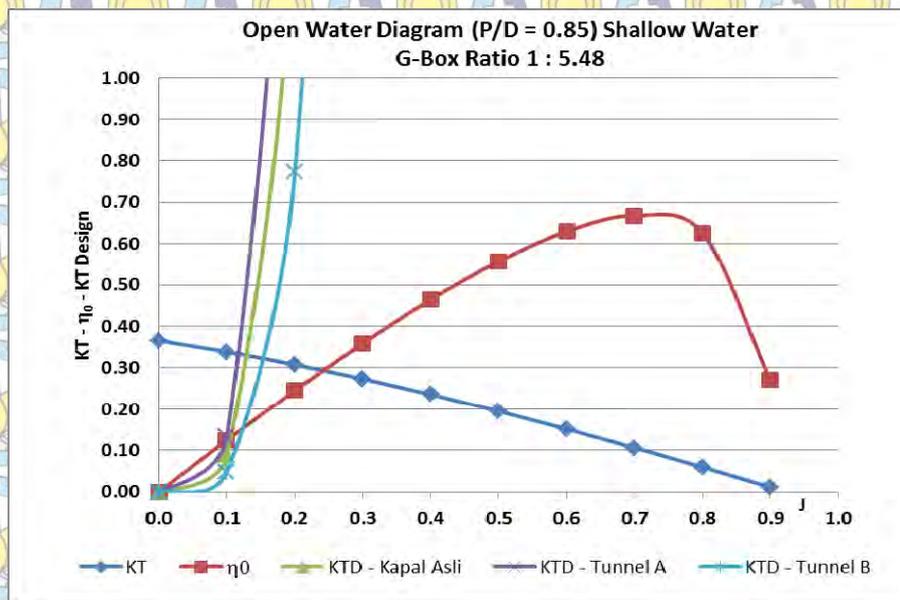
Sedangkan data untuk Main Engine adalah:

Kapasitas Daya Mesin	: 1600 kW
Engine Revolution	: 1400 RPM
Ratio Gearbox	: 5.84

Dari data propeller dan data main engine maka dapat dilakukan perhitungan *open water efficiency* (η_0). Gambar 5. 12 dan Gambar 5. 13 merupakan grafik dari *open water diagram* untuk *deep water* dan *shallow water* pada semua model kapal.



Gambar 5. 12 Grafik Open Water Diagram kondisi Deep Water



Gambar 5. 13 Grafik Open Water Diagram kondisi Deep Water

Dari perhitungan open water diagram maka didapatkan nilai *open water efficiency* (η_0) yang kemudian dipakai untuk menghitung efisiensi propeller (η_p) atau yang biasa disebut *Quasi-Propulsive Coefficient* (QPC). Tabel 5. 4 menunjukkan nilai dari efisiensi propeller untuk semua model CFD kapal asli maupun model tunnel.

Tabel 5. 4 Hasil Perhitungan Efisiensi Propeller

ITEM	Model CFD					
	Model CFD Kapal Asli		Tunnel A		Tunnel B	
	Deep W.	Shallow W.	Deep W.	Shallow W.	Deep W.	Shallow W.
Va model CFD (m/s)	0.436	0.201	0.522	0.182	0.591	0.233
wake (w)	0.377	0.712	0.255	0.739	0.155	0.667
Hull eff. (η_H)	1.342	2.426	1.220	2.647	1.162	2.140
trust deduction (t)	0.164	0.302	0.091	0.310	0.018	0.287
Open Water Eff (η_0)	0.359	0.172	0.423	0.156	0.471	0.198
Relative-Rotative Eff (η_R)	1.021	1.021	1.021	1.021	1.021	1.021
Prop Eff (η_D)	0.492	0.425	0.526	0.421	0.559	0.433

Dari tabel tersebut diatas dapat dilihat bahwa untuk ukuran dimensi propeller yang sama pada kondisi *deep water* akan terjadi peningkatan efisiensi propeller dibanding model kapal asli, hal ini disebabkan karena ada peningkatan kecepatan aliran pada plane 1 (daerah propeller) sebesar 19.7% untuk Tunnel A dan 35.7% untuk Tunnel B. Perbandingan kecepatan aliran pada plane 1 kondisi *deep water* dapat dilihat pada tabel 5.5.

Tabel 5. 5 Rasio kecepatan aliran untuk kondisi *deep water*

Model CFD	Va (m/s) Deep Water	Ratio Va
Kapal Asli	0.436	
Tunnel A	0.522	19.7%
Tunnel B	0.591	35.7%

Untuk kondisi *shallow water* pada semua model CFD, terjadi penurunan kecepatan aliran lebih dari 50% dibandingkan dengan kondisi *deep water*. Tabel 5. 6 menunjukkan rasio dari kecepatan aliran untuk kondisi *shallow water*.

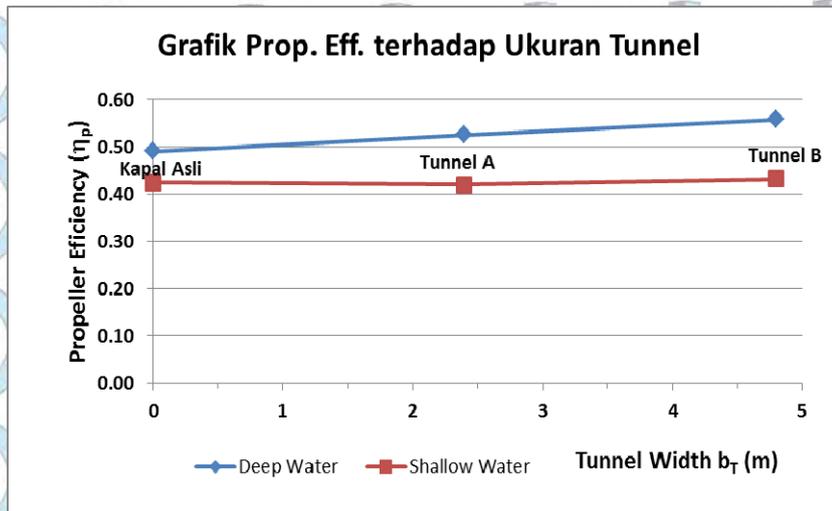
Tabel 5. 6 Rasio kecepatan aliran untuk kondisi *shallow water*

Model CFD	Kecepatan Aliran Va (m/s)		Ratio Va
	Deep	Shallow	
Kapal Asli	0.436	0.201	-53.8%
Tunnel A	0.522	0.182	-65.0%
Tunnel B	0.591	0.233	-60.6%

Dari hasil kecepatan aliran pada plane 1 (daerah propeller), maka dibuatlah rasio perbandingan untuk pengaruh penambahan lebar tunnel (*tunnel width*) terhadap efisiensi sistem propulsi (η_D) baik itu kondisi *deep water* dan *shallow water*.

Tabel 5. 7 Pengaruh Penambahan lebar tunnel terhadap Efisiensi Propeller

Model CFD	Tunnel Width b_t (m)	Propeller Efficiency (η_D)		Ratio Prop Eff	
		Deep	Shallow	Deep	Shallow
Kapal Asli	0	0.492	0.425		
Tunnel A	2.4	0.526	0.421	6.9%	-1.0%
Tunnel B	4.8	0.559	0.433	13.6%	1.7%



Gambar 5. 14 Grafik pengaruh lebar tunnel terhadap efisiensi propeller

Tabel 5. 7 dan Gambar 5. 14 merupakan rasio perbandingan antara penambahan lebar tunnel terhadap efisiensi sistem propulsi (η_D) untuk kondisi *deep water* dan *shallow water*. Terlihat bahwa untuk kondisi *deep water*, model Tunnel A mengalami peningkatan efisiensi sistem propulsi sebesar 6.9% dan untuk model Tunnel B sebesar 13.6% terhadap model kapal asli. Sedangkan untuk kondisi *shallow water*, pengaruh penambahan lebar tunnel (*tunnel width*) tidak signifikan mengubah efisiensi sistem propulsi.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Pendahuluan

Setelah semua pokok pembahasan telah dikaji pada bab-bab sebelumnya, maka seluruh hasilnya dapat dirangkum pada satu kesimpulan. Bab ini memberikan rangkuman dari hasil-hasil tersebut. Kesimpulan yang ditulis adalah jawaban dari tujuan yang sudah ditulis pada bab I di Pendahuluan.

6.2. Kesimpulan

Setelah beberapa aspek *performance* kapal yang berkaitan dengan kecepatan aliran dan efisiensi sistem propulsi telah dibahas pada bab sebelumnya, berikut ini adalah beberapa rangkuman dari pembahasan yang telah dilakukan yang dituangkan kedalam kesimpulan ini yang bertujuan untuk menjawab tujuan dari penelitian pada BAB 1. Adapun kesimpulannya adalah sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan perbandingan nilai kecepatan aliran di buritan kapal maka dilakukan pemodelan numerik dengan menggunakan CFD *software package* untuk tiga (3) model kapal, yaitu model kapal tanpa tunnel, tunnel A dengan $b_t = 2.40$ m dan tunnel B dengan $b_t = 4.80$ m.
2. Nilai hambatan total pada kondisi perairan dangkal akan jauh meningkat secara signifikan jika dibandingkan dengan kondisi perairan dalam, sedangkan penggunaan tunnel dibagian buritan kapal tidak secara signifikan mengubah hambatan kapal dibanding dengan model kapal tanpa tunnel, baik itu untuk kondisi perairan dalam (*deep water*) maupun perairan dangkal (*shallow water*).
3. Kedalaman air secara signifikan juga mampu meningkatkan kecepatan aliran air dibagian buritan kapal. Jika dibandingkan dengan kedalaman air tak terbatas ($h/d = 20$), maka kecepatan aliran air pada model tunnel akan meningkat hingga 35.7% dibandingkan model kapal asli tanpa tunnel. Sedangkan untuk kondisi *shallow water* ($h/d = 1.2$) akan menurunkan

kecepatan aliran lebih dari 50% terhadap kondisi *deep water*, hal ini karena *squat effect* berpengaruh pada kondisi *shallow water*.

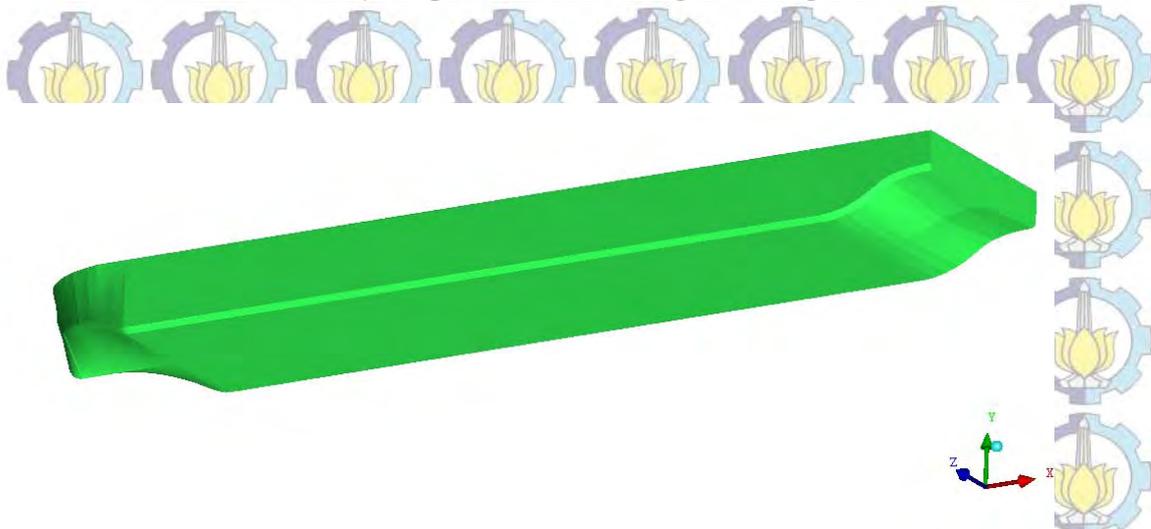
4. Seiring dengan peningkatan kecepatan aliran air diburitan kapal pada model tunnel untuk kondisi perairan dalam, maka penambahan lebar tunnel akan menambah efisiensi sistem propulsi hingga 13.6%. Sedangkan untuk kondisi perairan dangkal (*shallow draft*), pengaruh penambahan lebar tunnel tidak secara signifikan mengubah efisiensi sistem propulsi kapal.

6.3. Saran

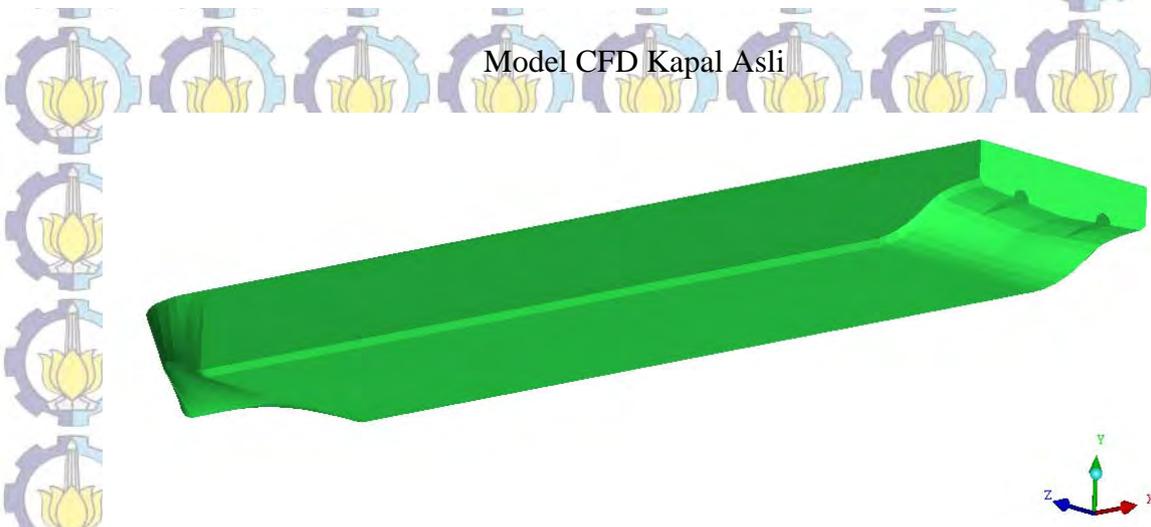
Di luar seluruh pekerjaan yang sudah diselesaikan, tentunya masih banyak permasalahan yang belum bisa dijangkau dalam pembahasan pada penelitian ini. Kendala utama yang menyebabkannya adalah keterbatasan waktu dan fasilitas yang digunakan. Diharapkan hal tersebut dapat diperbaiki pada penelitian selanjutnya. Untuk itu pada bagian ini dituliskan beberapa saran sebagaimana dituliskan sebagai berikut:

1. Penggunaan software lain dalam dalam pengerjaan simulasi model kapal.
2. Dibutuhkan spesifikasi komputer yang lebih tinggi lagi untuk mendapatkan hasil pengerjaan yang lebih maksimal.
3. Model kapal dengan tunnel dibagian buritan pada penelitian ini dilakukan hanya dengan menggunakan metode CFD saja, untuk itu perlu divalidasi dengan pengujian eksperimen model di Laboratorium guna mendapatkan hasil yang lebih presisi.
4. Penelitian ini merupakan tahap awal penggunaan tunnel untuk kondisi perairan dalam (*deep water*) dan perairan dangkal (*shallow water*), untuk itu perlu dilakukan beberapa variasi lain baik itu menambah kondisi perairan sedang (*medium water*).
5. Analisa aliran perlu dilakukan pada beberapa variasi kecepatan kapal, terutama pada kondisi *shallow water* kecepatan kapal harus lebih rendah dari kecepatan dinas kapal dikarenakan ada *squat effect* dan *blockage correction factor*.

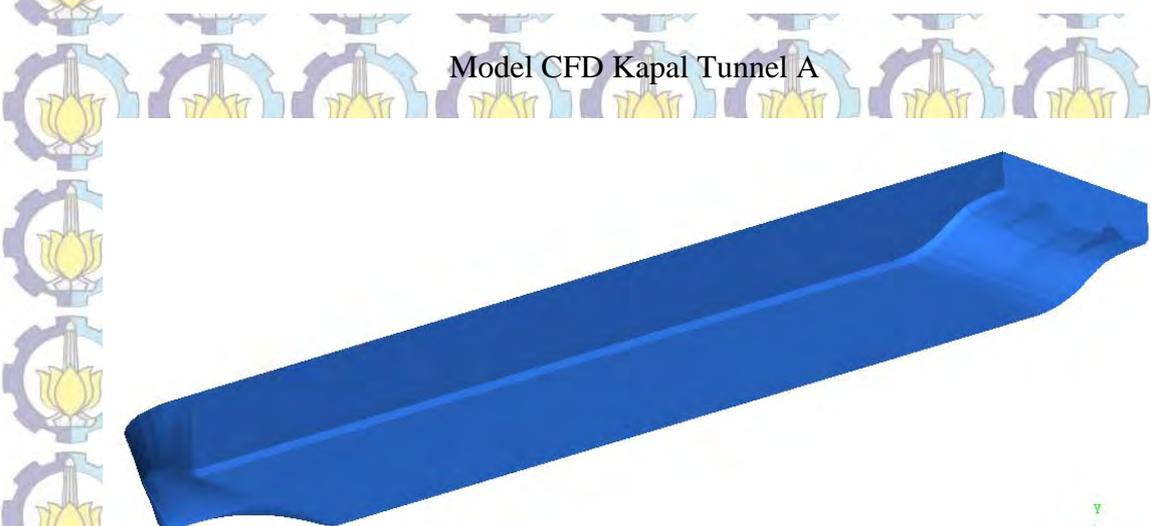
LAMPIRAN A GAMBAR MODEL CFD KAPAL



Model CFD Kapal Asli



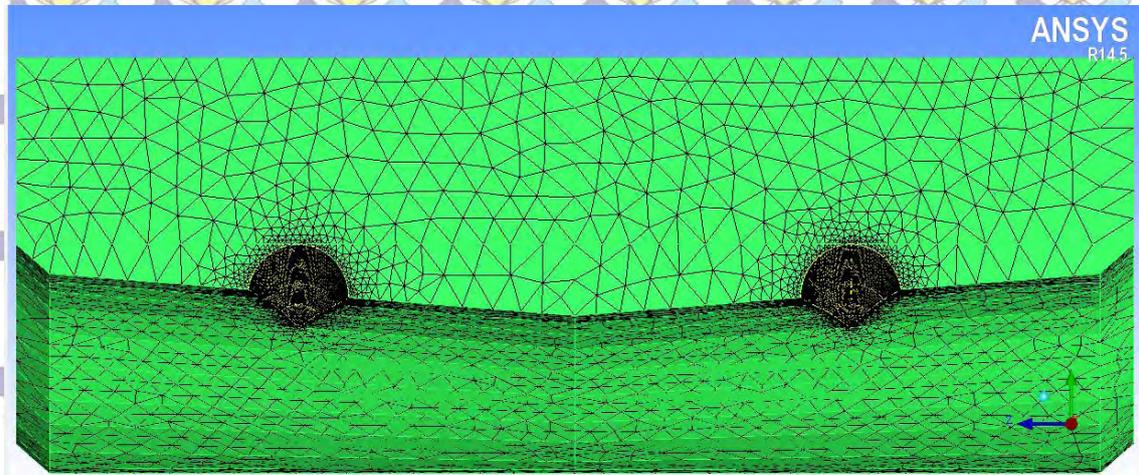
Model CFD Kapal Tunnel A



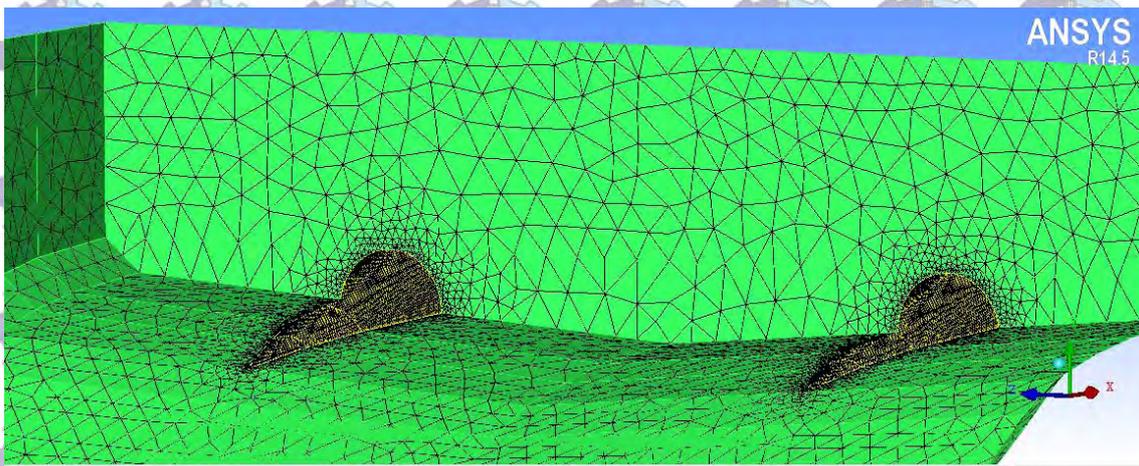
Model CFD Kapal Tunnel B

LAMPIRAN B GAMBAR *MESHING* DESAIN *STERN*

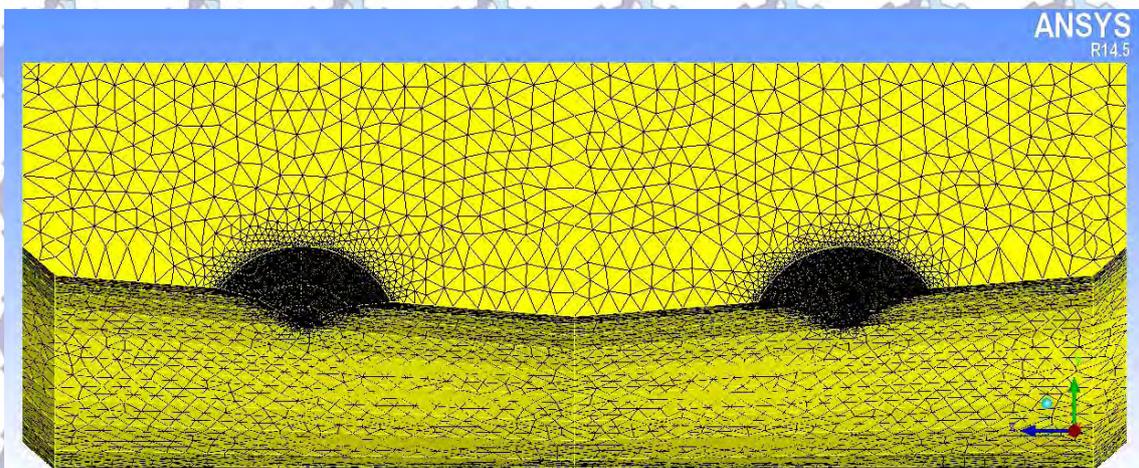
TUNNEL



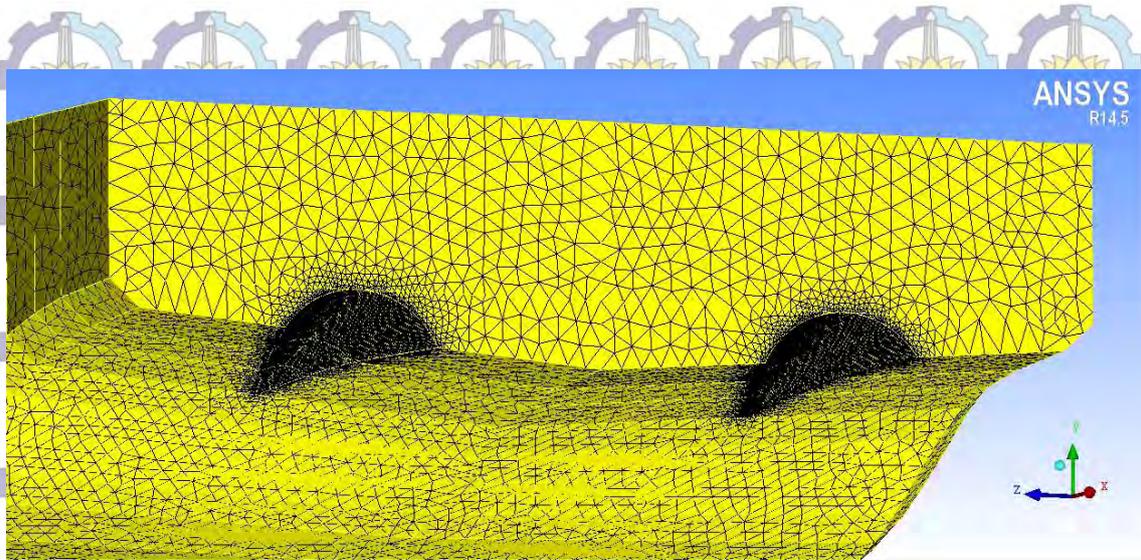
Tampak belakang desain *Stern Tunnel A*



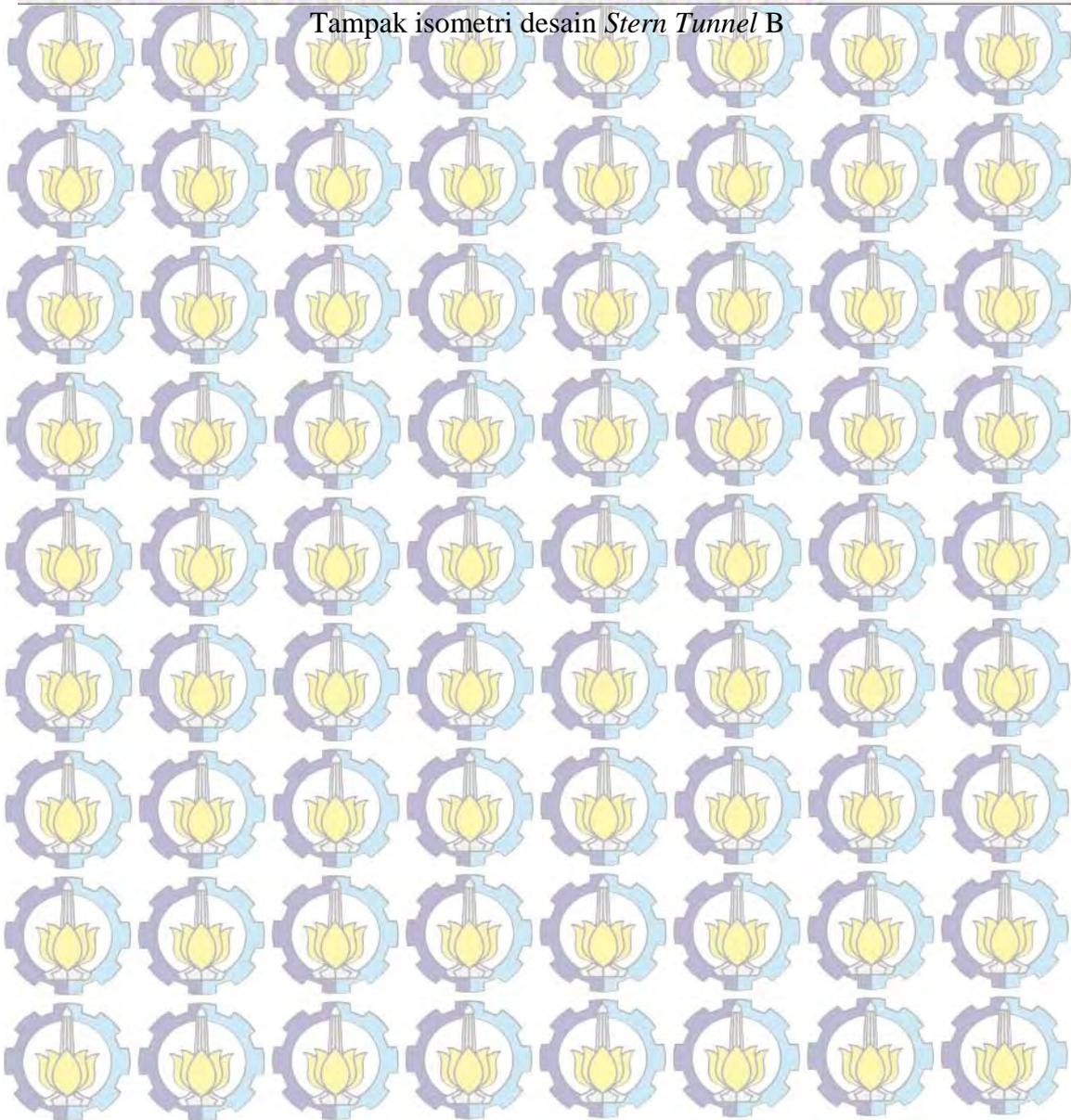
Tampak isometri desain *Stern Tunnel A*



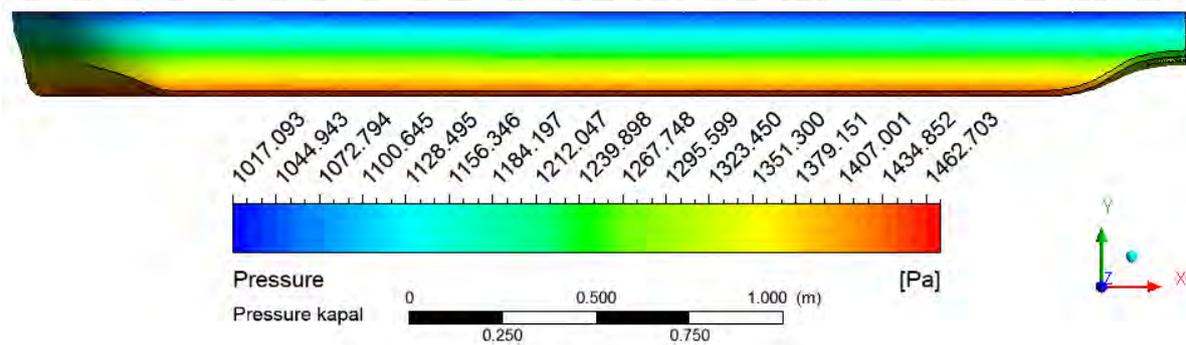
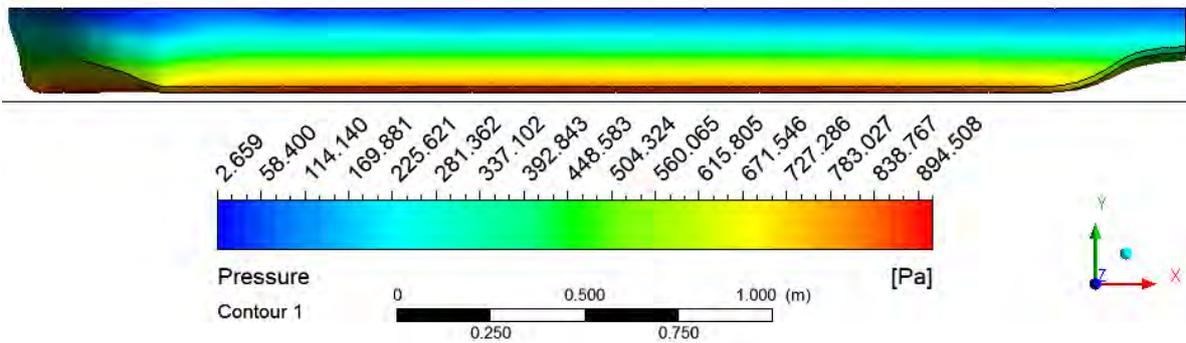
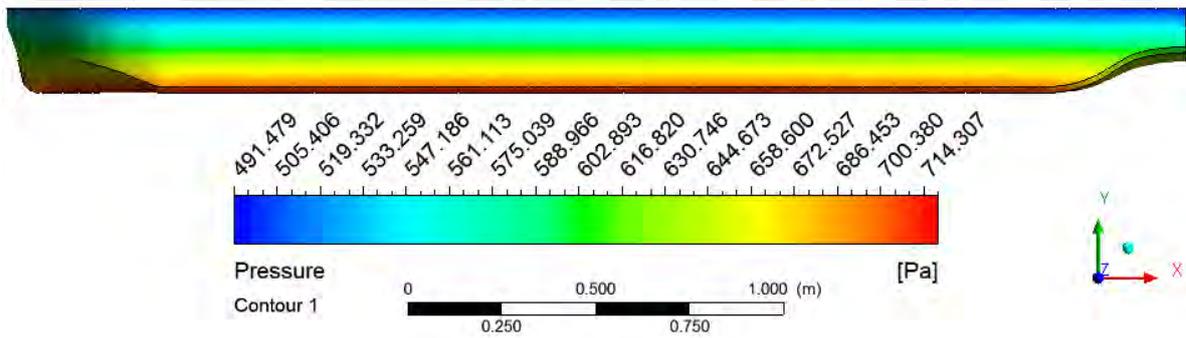
Tampak belakang desain *Stern Tunnel B*

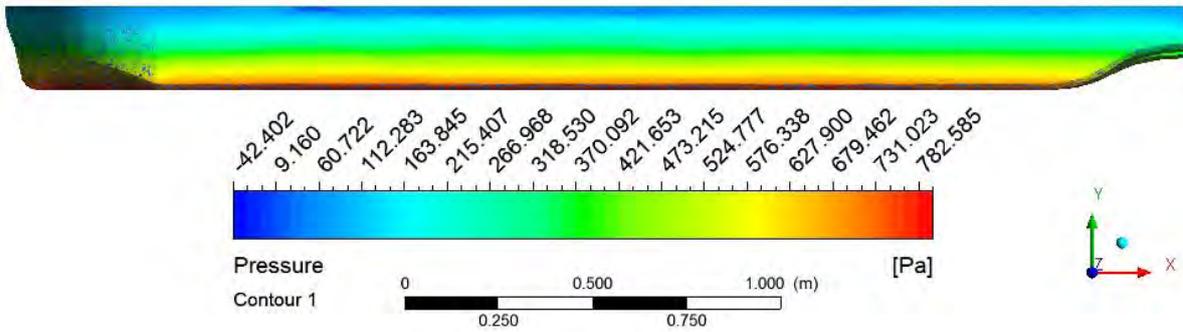


Tampak isometri desain *Stern Tunnel B*

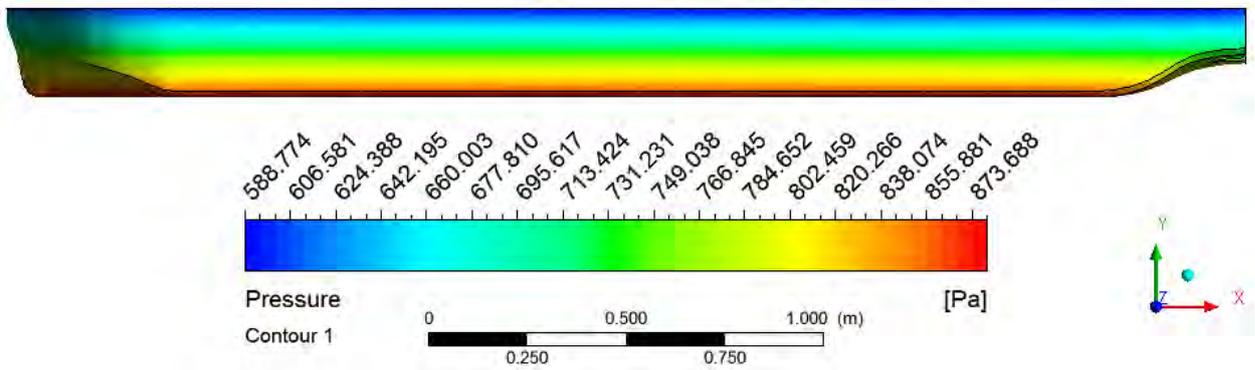
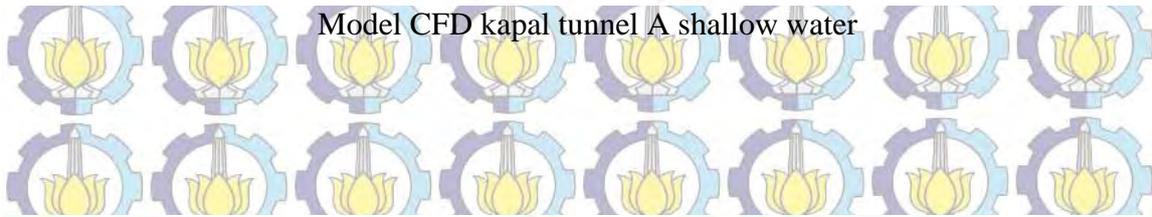


LAMPIRAN C GAMBAR DISTRIBUSI TEKANAN

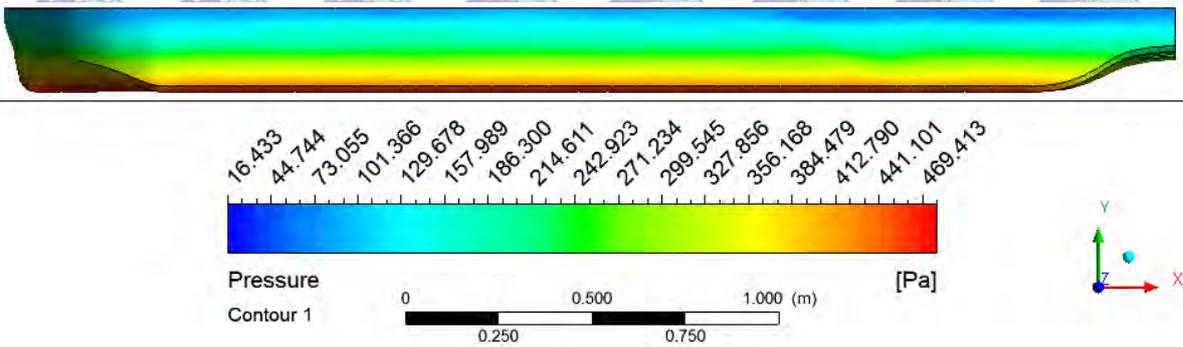
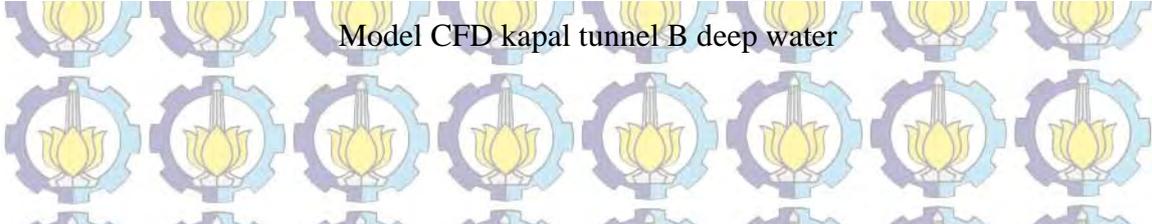




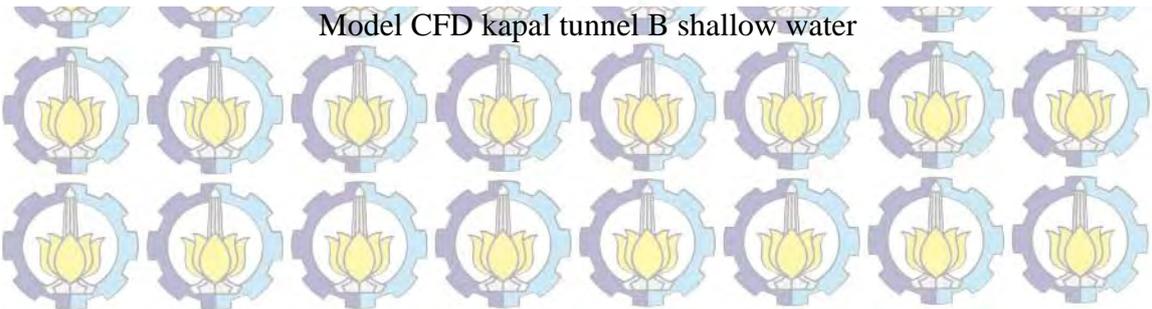
Model CFD kapal tunnel A shallow water



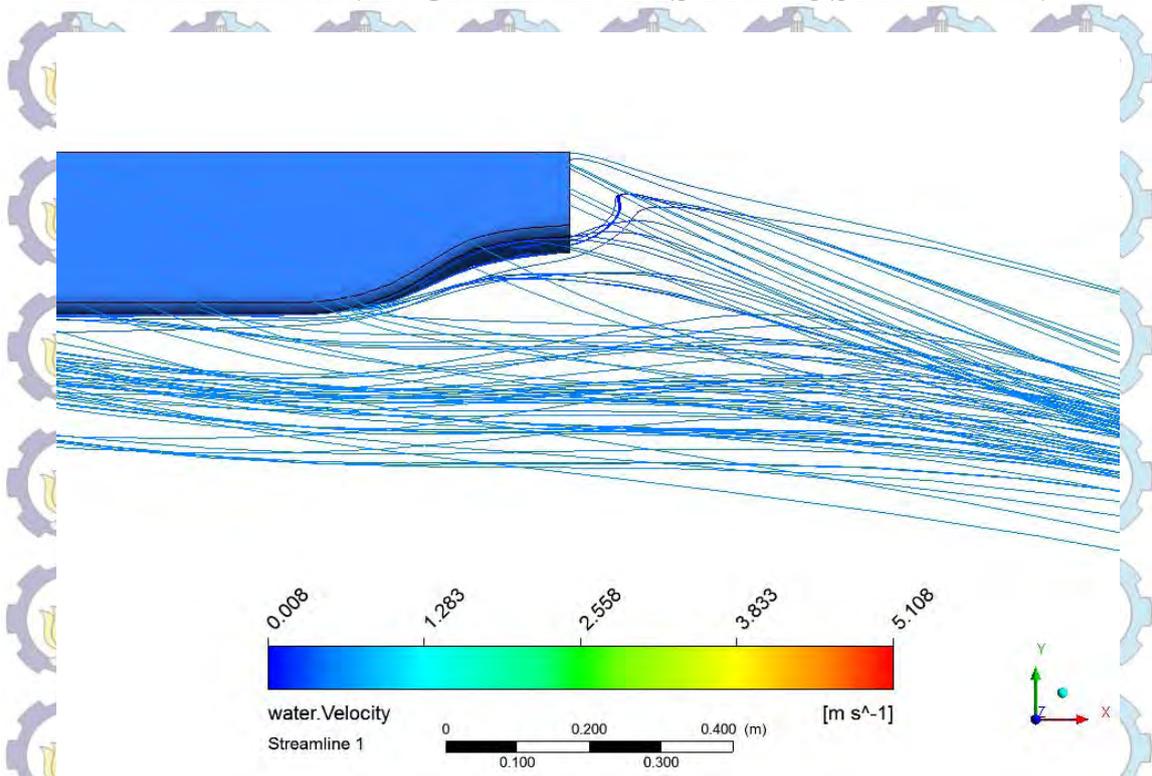
Model CFD kapal tunnel B deep water



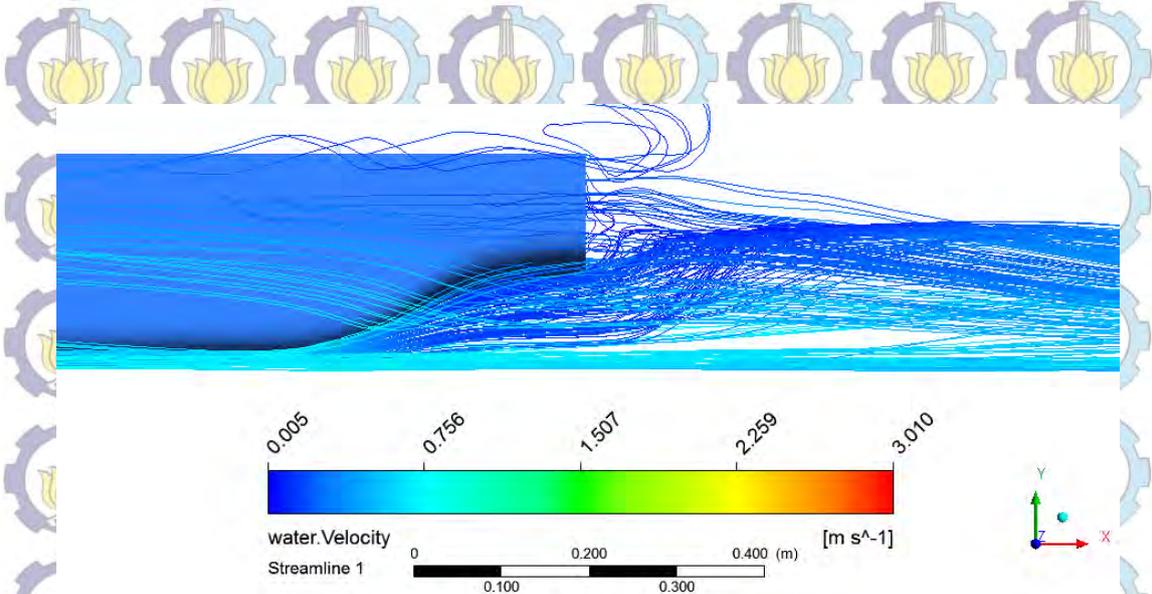
Model CFD kapal tunnel B shallow water



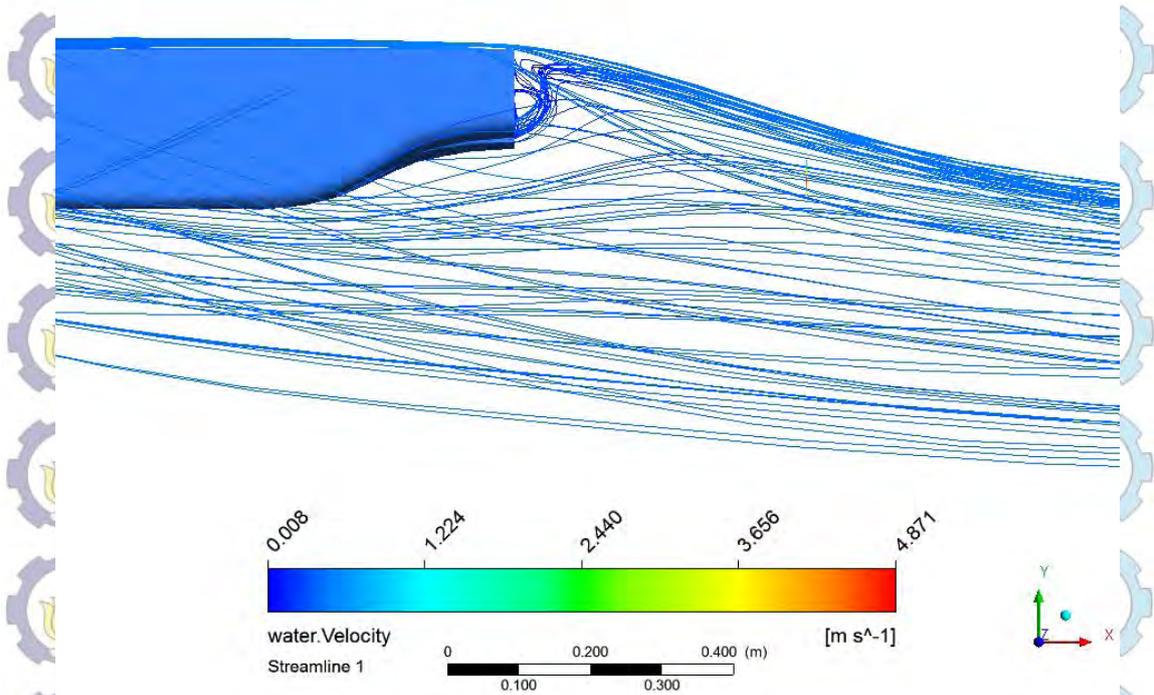
LAMPIRAN D GAMBAR DISTRIBUSI ALIRAN



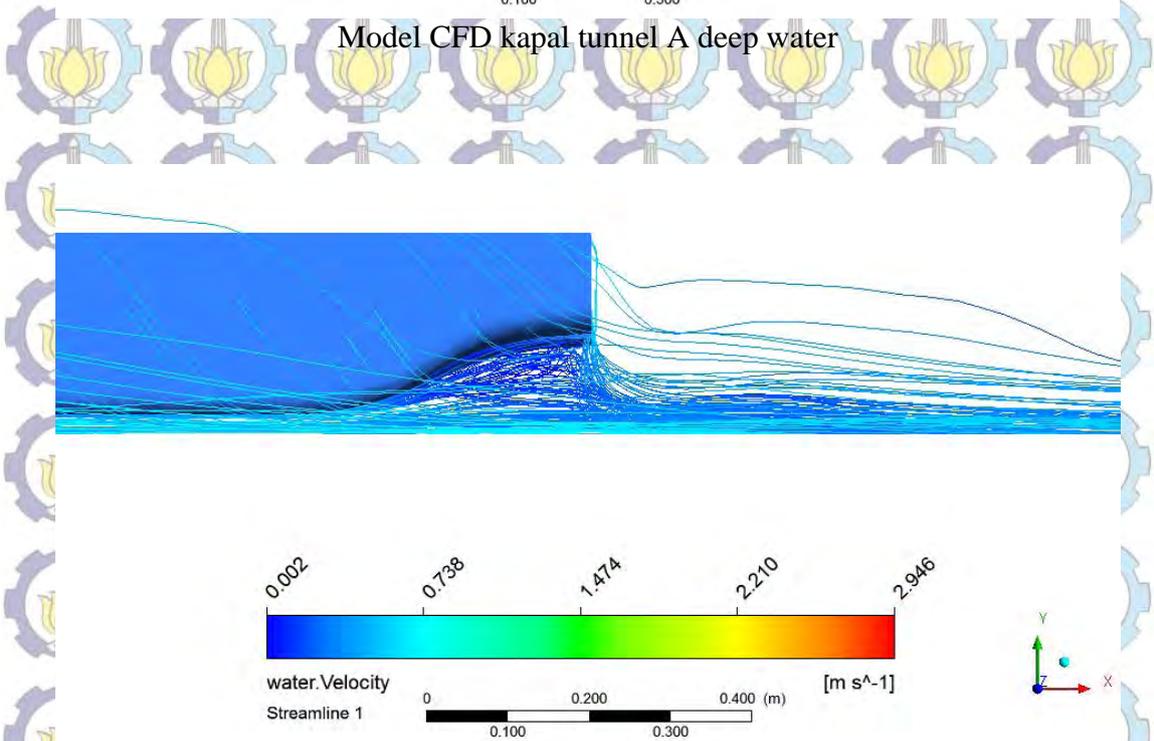
Model CFD kapal asli deep water



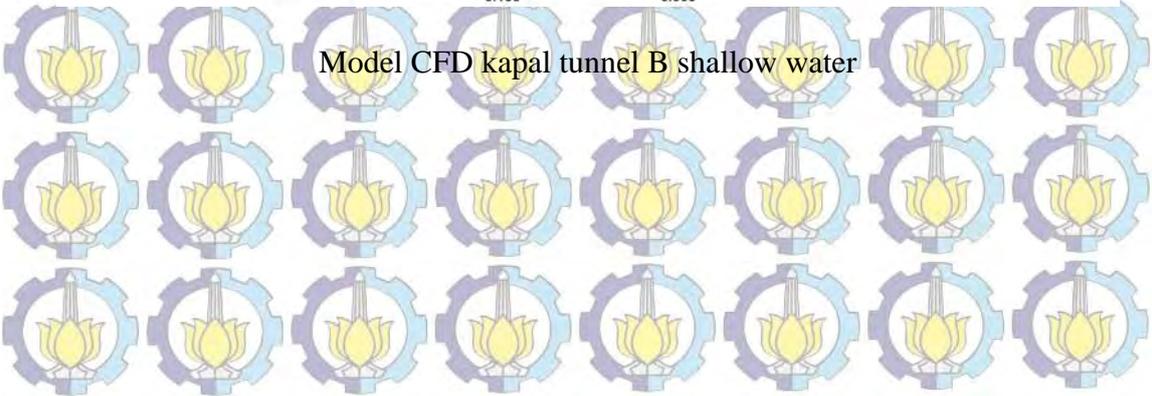
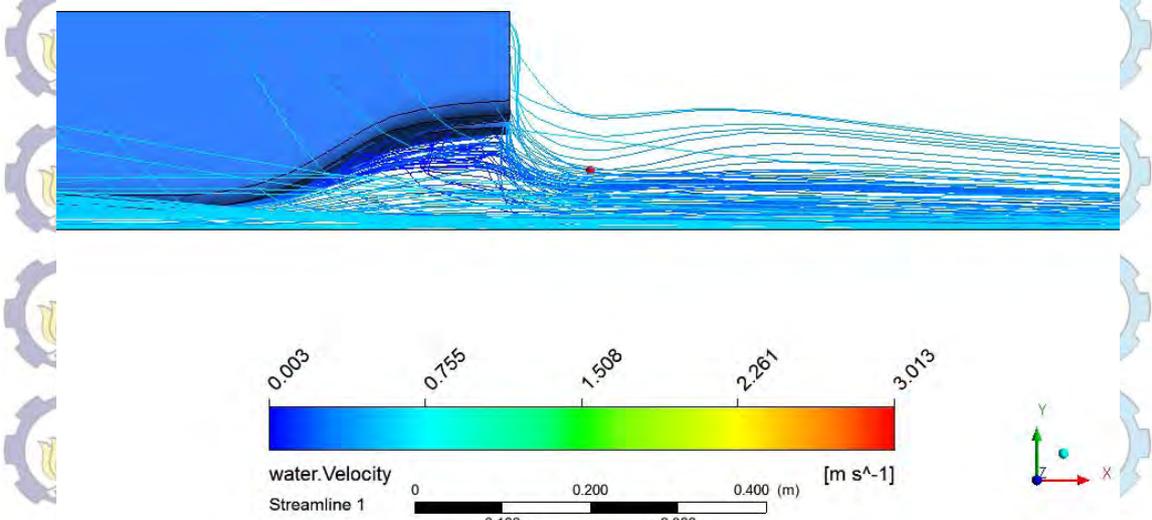
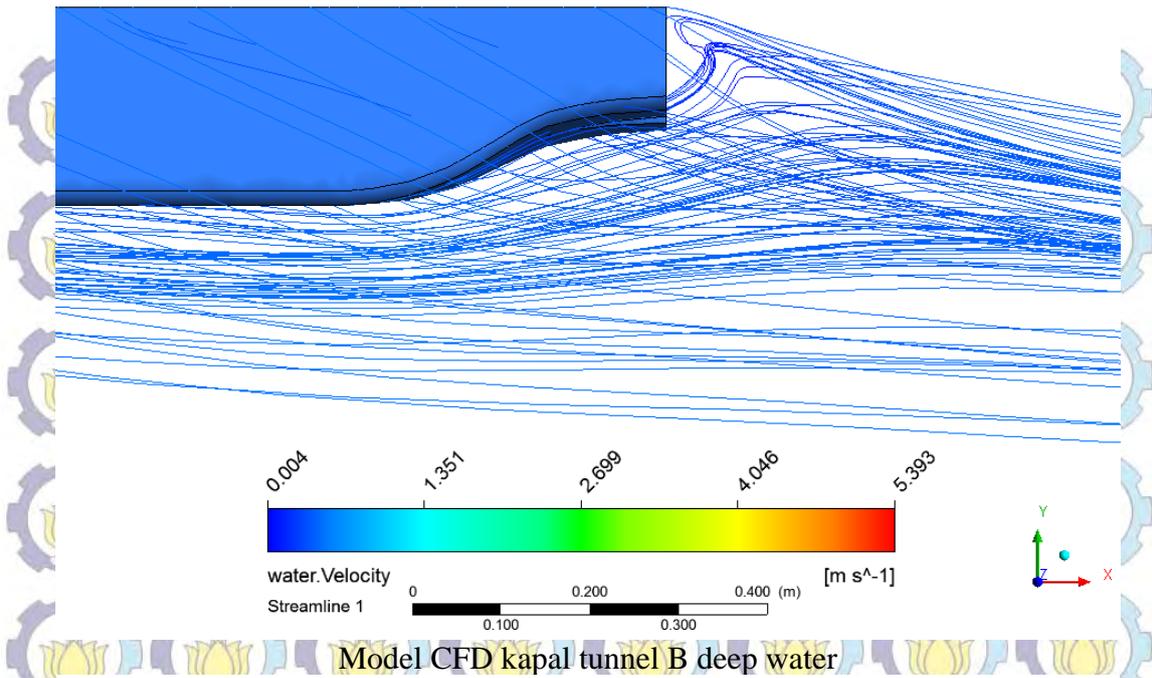
Model CFD kapal asli shallow water



Model CFD kapal tunnel A deep water



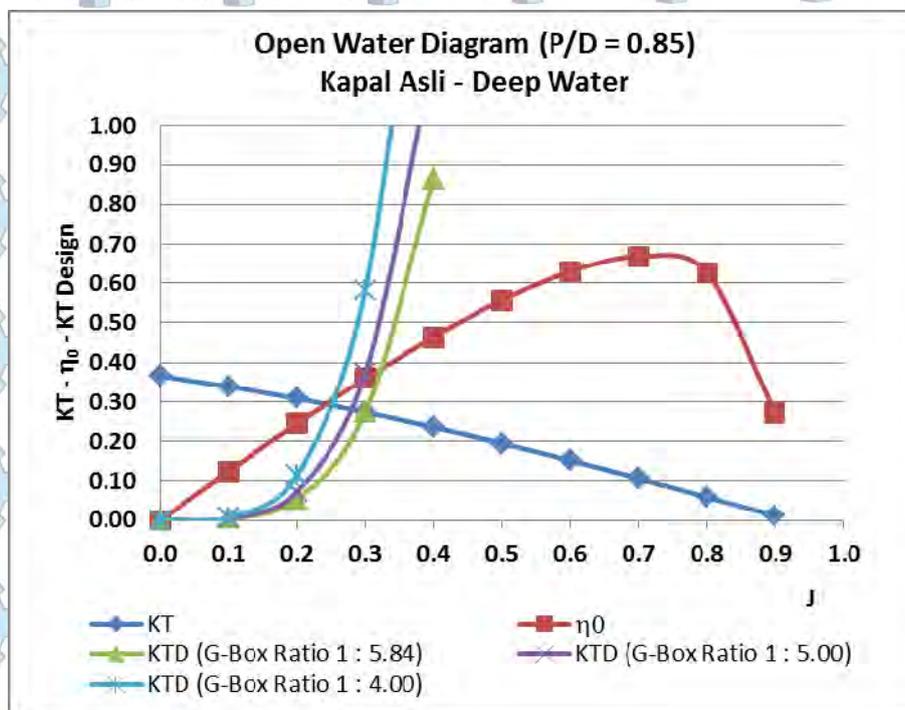
Model CFD kapal tunnel A shallow water



LAMPIRAN E OPEN WATER DIAGRAM

Tabel Open Water Diagram Kapal Asli (Deep Water)

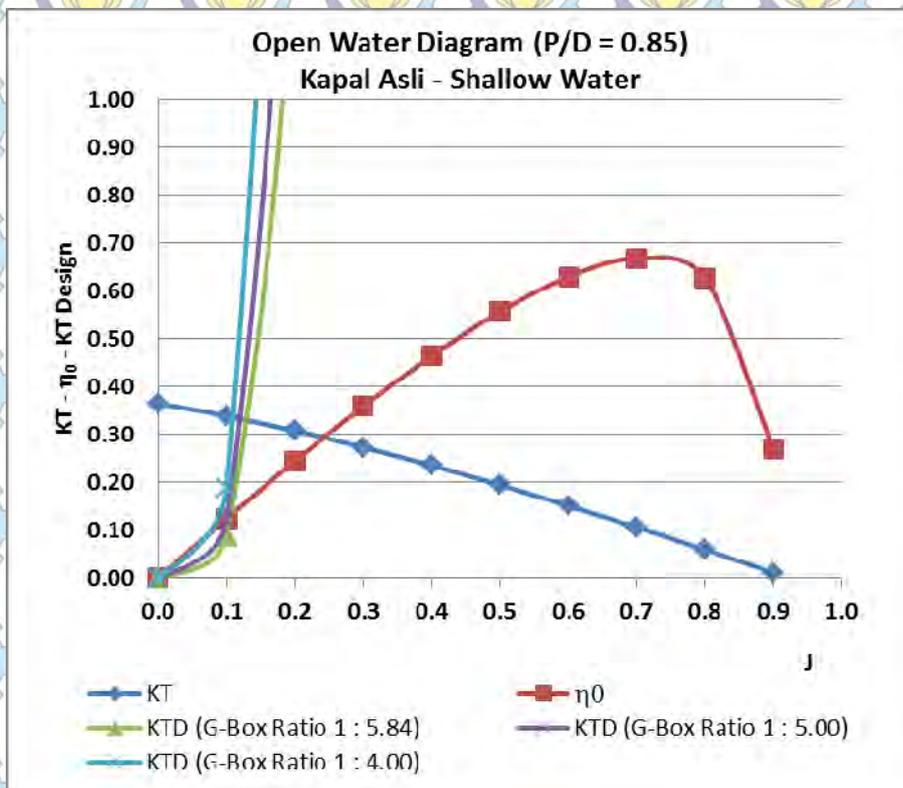
J	KT	KQ	η_0	KT Design Kapal Asli Deep Water		
				[Ratio Gear Box = 4.00 (n=5.83 rps) ; 5.00 (n=4.67 rps) ; 5.84 (n=4rps)]		
				5.83	4.67	4.00
0.0	0.366	-0.046	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.339	0.043	0.125	0.007	0.005	0.003
0.2	0.308	0.040	0.245	0.115	0.074	0.054
0.3	0.274	0.036	0.359	0.582	0.373	0.273
0.4	0.236	0.032	0.464	1.840	1.178	0.863
0.5	0.195	0.028	0.557	4.493	2.875	2.108
0.6	0.152	0.023	0.630	9.316	5.962	4.370
0.7	0.106	0.018	0.668	17.259	11.045	8.097
0.8	0.060	0.012	0.626	29.442	18.843	13.812
0.9	0.011	0.006	0.270	47.161	30.183	22.125
1.0	-0.037	-0.000	18.357	71.881	46.004	33.721
1.1	-0.087	-0.007	2.131	105.241	67.354	49.372
1.2	-0.136	-0.014	1.816	149.052	95.393	69.925
1.3	-0.184	-0.022	1.749	205.298	131.391	96.312
1.4	-0.232	-0.030	1.740	276.137	176.728	129.544
1.5	-0.278	-0.038	1.750	363.896	232.893	170.715



Grafik Open Water Diagram Kapal Asli (Deep Water)

Tabel Open Water Diagram Kapal Asli (Shallow Water)

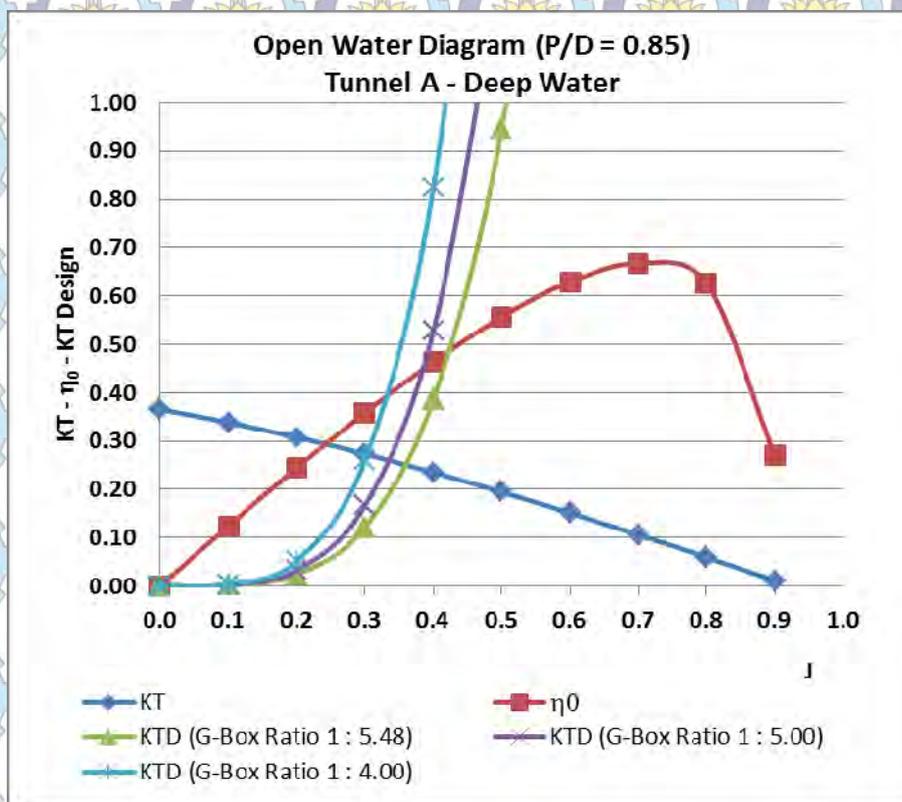
J	KT	KQ	η_0	KT Design Kapal Asli Shallow Water [Ratio Gear Box = 4.00 (n=5.83 rps) ; 5.00 (n=4.67 rps) ; 5.84 (n=4rps)]		
				5.83	4.67	4.00
				0.0	0.366	0.046
0.1	0.339	0.043	0.125	0.189	0.121	0.089
0.2	0.308	0.040	0.245	3.022	1.934	1.418
0.3	0.274	0.036	0.359	15.300	9.792	7.178
0.4	0.236	0.032	0.464	48.356	30.948	22.685
0.5	0.195	0.028	0.557	118.058	75.557	55.384
0.6	0.152	0.023	0.630	244.804	156.675	114.845
0.7	0.106	0.018	0.668	453.530	290.259	212.765
0.8	0.060	0.012	0.626	773.702	495.169	362.968
0.9	0.011	0.006	0.270	1239.321	793.165	581.404
1.0	-0.037	0.000	18.357	1888.921	1208.909	886.152
1.1	-0.087	-0.007	2.131	2765.569	1769.964	1297.415
1.2	-0.136	-0.014	1.816	3916.866	2506.794	1837.524
1.3	-0.184	-0.022	1.749	5394.947	3452.766	2530.938
1.4	-0.232	-0.030	1.740	7256.478	4644.146	3404.240
1.5	-0.278	-0.038	1.750	9562.661	6120.103	4486.143



Grafik Open Water Diagram Kapal Asli (Shallow Water)

Tabel OpenWater Diagram Kapal Tunnel A (Deep Water)

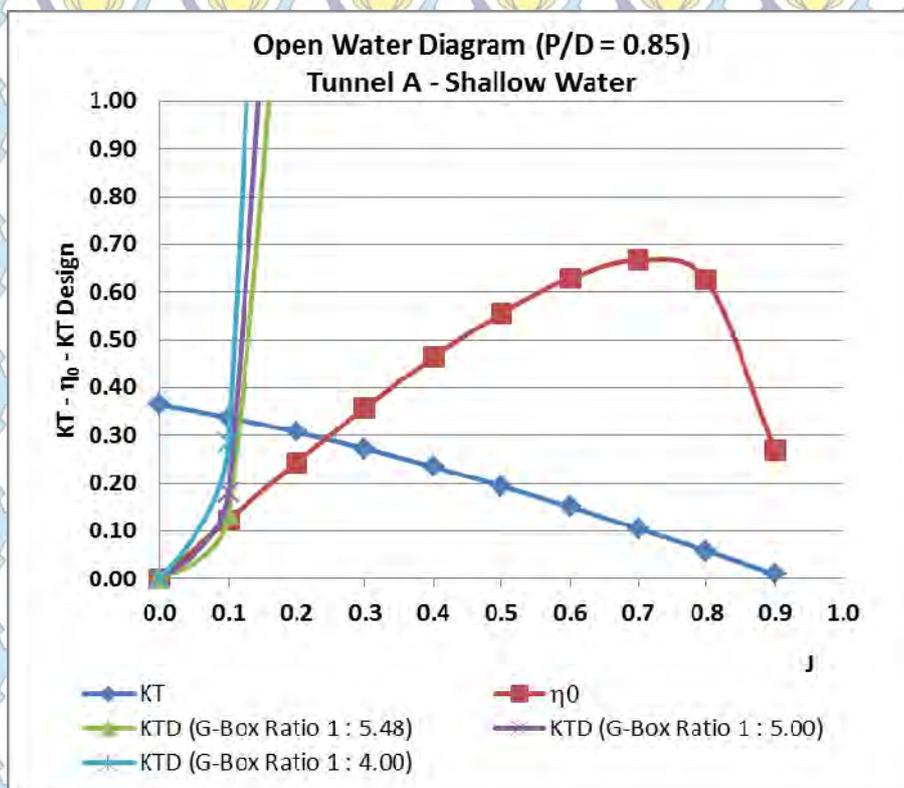
J	KT	KQ	η_0	KT Design Tunnel A Deep Water [Ratio Gear Box = 4.00 (n=5.83 rps) ; 5.00 (n=4.67 rps) ; 5.84 (n=4rps)]		
				5.83	4.67	4.00
0.0	0.366	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.339	0.043	0.125	0.003	0.002	0.002
0.2	0.308	0.040	0.245	0.052	0.033	0.024
0.3	0.274	0.036	0.359	0.261	0.167	0.122
0.4	0.236	0.032	0.464	0.825	0.528	0.387
0.5	0.195	0.028	0.557	2.013	1.289	0.945
0.6	0.152	0.023	0.630	4.175	2.672	1.959
0.7	0.106	0.018	0.668	7.735	4.950	3.629
0.8	0.060	0.012	0.626	13.195	8.445	6.190
0.9	0.011	0.006	0.270	21.137	13.527	9.916
1.0	-0.037	0.000	18.357	32.216	20.618	15.113
1.1	-0.087	-0.007	2.131	47.167	30.187	22.127
1.2	-0.136	-0.014	1.816	66.802	42.753	31.339
1.3	-0.184	-0.022	1.749	92.011	58.887	43.165
1.4	-0.232	-0.030	1.740	123.759	79.206	58.059
1.5	-0.278	-0.038	1.750	163.091	104.378	76.511



Grafik Open Water Diagram Kapal Tunnel A (Deep Water)

Tabel Open Water Diagram Kapal Tunnel A (Shallow Water)

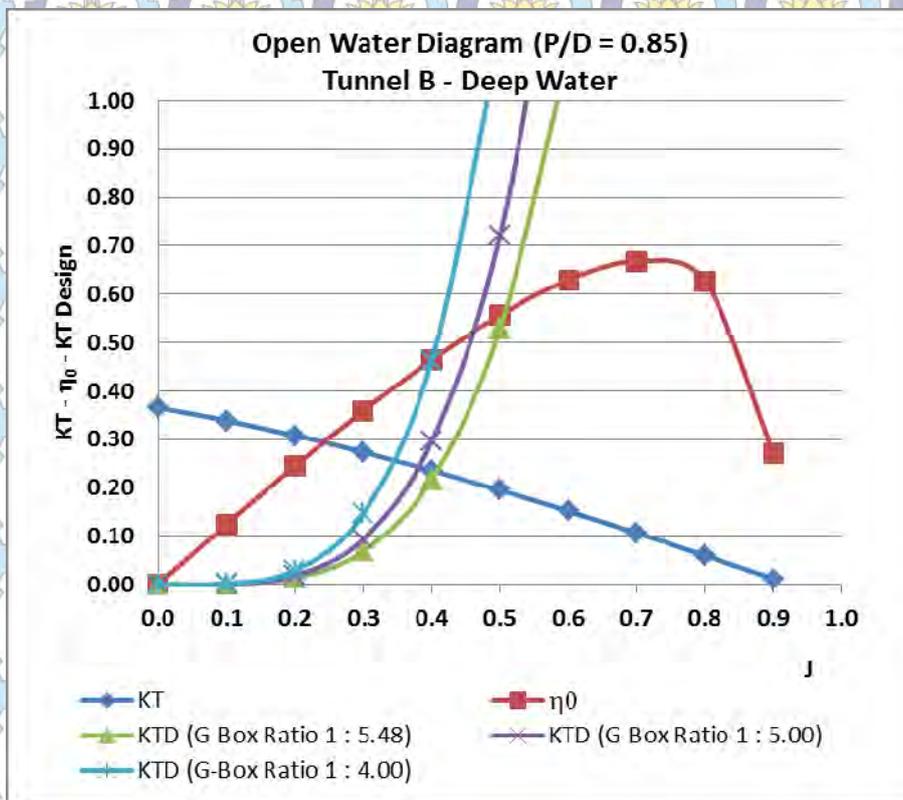
J	KT	KQ	η_0	KT Design Tunnel A Shallow Water [Ratio Gear Box = 4.00 (n=5.83 rps) ; 5.00 (n=4.67 rps) ; 5.84 (n=4rps)]		
				5.83	4.67	4.00
				0.0	0.366	0.046
0.1	0.339	0.043	0.125	0.284	0.182	0.133
0.2	0.308	0.040	0.245	4.547	2.910	2.133
0.3	0.274	0.036	0.359	23.021	14.733	10.800
0.4	0.236	0.032	0.464	72.757	46.564	34.133
0.5	0.195	0.028	0.557	177.629	113.683	83.331
0.6	0.152	0.023	0.630	368.332	235.732	172.796
0.7	0.106	0.018	0.668	682.380	436.723	320.126
0.8	0.060	0.012	0.626	1164.110	745.030	546.120
0.9	0.011	0.006	0.270	1864.679	1193.395	874.779
1.0	-0.037	0.000	18.357	2842.065	1818.922	1333.301
1.1	-0.087	-0.007	2.131	4161.068	2663.083	1952.087
1.2	-0.136	-0.014	1.816	5893.306	3771.716	2764.734
1.3	-0.184	-0.022	1.749	8117.222	5195.022	3808.042
1.4	-0.232	-0.030	1.740	10918.078	6987.570	5122.011
1.5	-0.278	-0.038	1.750	14387.955	9208.291	6749.838



Grafik Open Water Diagram Kapal Tunnel A (Shallow Water)

Tabel Open Water Diagram Kapal Tunnel B (Deep Water)

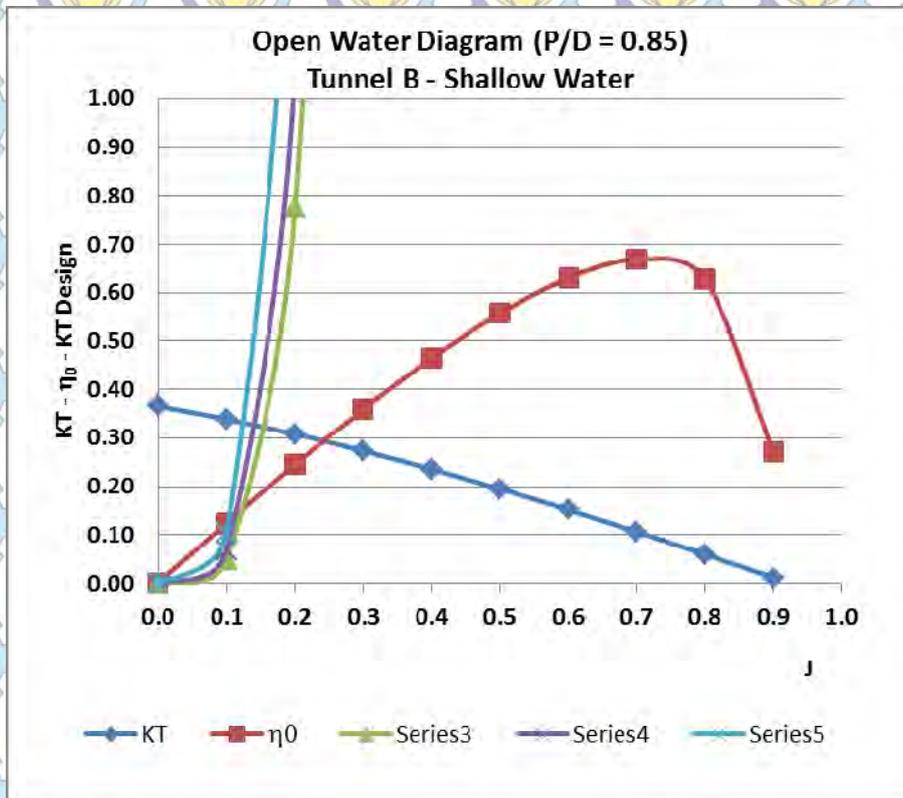
J	KT	KQ	η_0	KT Design Tunnel B Deep Water [Ratio Gear Box = 4.00 (n=5.83 rps) ; 5.00 (n=4.67 rps) ; 5.84 (n=4rps)]		
				5.83	4.67	4.00
0.0	0.366	0.046	0.000	0.000	0.000	0.000
0.1	0.339	0.043	0.125	0.002	0.001	0.001
0.2	0.308	0.040	0.245	0.029	0.018	0.014
0.3	0.274	0.036	0.359	0.146	0.094	0.069
0.4	0.236	0.032	0.464	0.462	0.296	0.217
0.5	0.195	0.028	0.557	1.128	0.722	0.529
0.6	0.152	0.023	0.630	2.339	1.497	1.097
0.7	0.106	0.018	0.668	4.334	2.773	2.033
0.8	0.060	0.012	0.626	7.393	4.731	3.468
0.9	0.011	0.006	0.270	11.842	7.579	5.555
1.0	-0.037	0.000	18.357	18.049	11.551	8.467
1.1	-0.087	-0.007	2.131	26.426	16.912	12.397
1.2	-0.136	-0.014	1.816	37.426	23.953	17.558
1.3	-0.184	-0.022	1.749	51.550	32.992	24.184
1.4	-0.232	-0.030	1.740	69.337	44.376	32.528
1.5	-0.278	-0.038	1.750	91.373	58.479	42.866



Grafik Open Water Diagram Kapal Tunnel B (Deep Water)

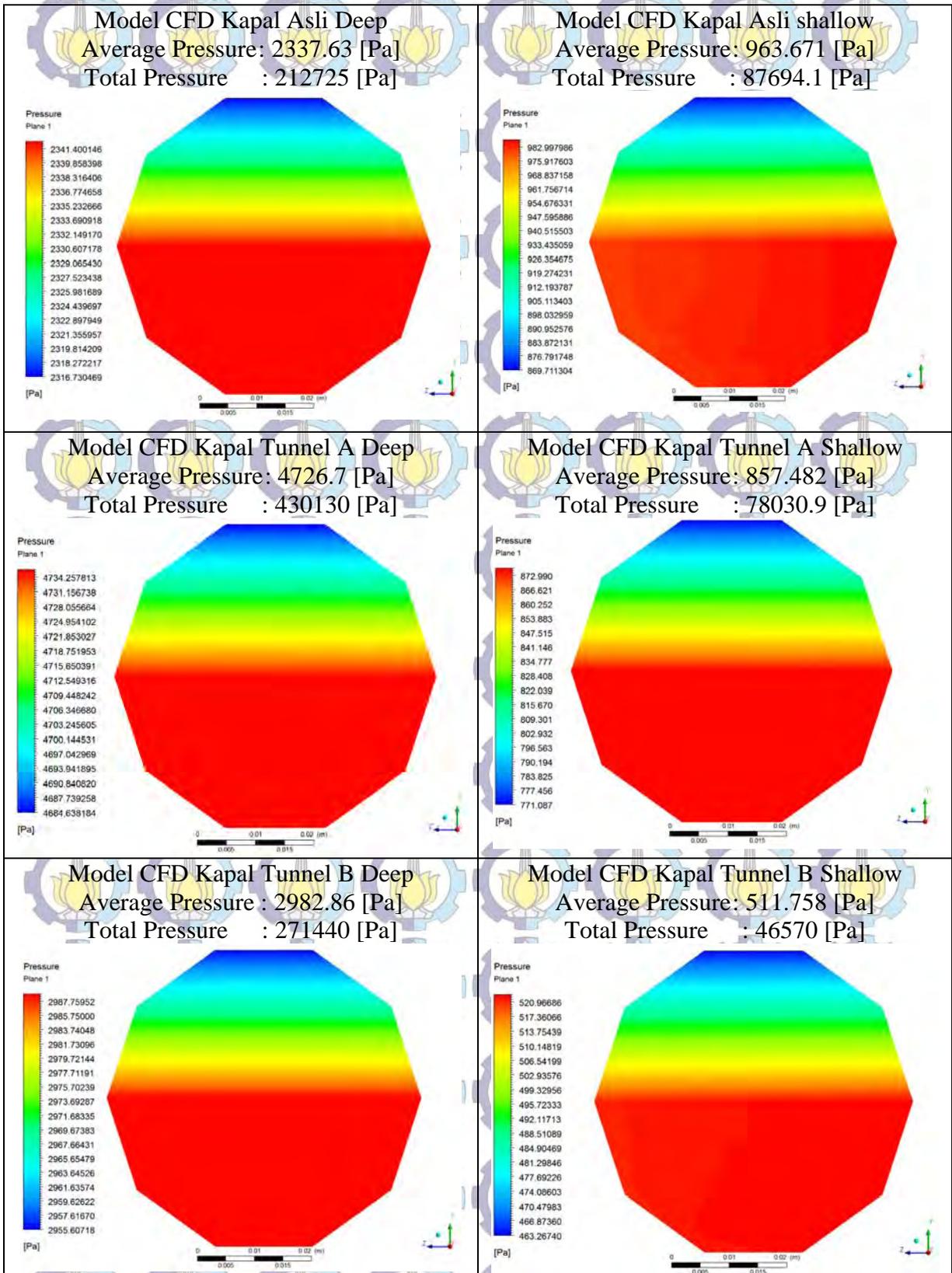
Tabel Open Water Diagram Kapal Tunnel B (Shallow Water)

J	KT	KQ	η_0	KT Design Tunnel B Shallow Water [Ratio Gear Box = 4.00 (n=5.83 rps) ; 5.00 (n=4.67 rps) ; 5.84 (n=4rps)]		
				5.83	4.67	4.00
				0.0	0.366	0.046
0.1	0.339	0.043	0.125	0.103	0.066	0.048
0.2	0.308	0.040	0.245	1.649	1.055	0.774
0.3	0.274	0.036	0.359	8.347	5.342	3.916
0.4	0.236	0.032	0.464	26.382	16.885	12.377
0.5	0.195	0.028	0.557	64.410	41.222	30.217
0.6	0.152	0.023	0.630	133.560	85.478	62.657
0.7	0.106	0.018	0.668	247.436	158.359	116.080
0.8	0.060	0.012	0.626	422.115	270.153	198.027
0.9	0.011	0.006	0.270	676.146	432.733	317.201
1.0	-0.037	0.000	18.357	1030.553	659.554	483.465
1.1	-0.087	-0.007	2.131	1508.833	965.653	707.841
1.2	-0.136	-0.014	1.816	2136.955	1367.651	1002.512
1.3	-0.184	-0.022	1.749	2943.363	1883.752	1380.823
1.4	-0.232	-0.030	1.740	3958.973	2533.743	1857.278
1.5	-0.278	-0.038	1.750	5217.176	3338.993	2447.540



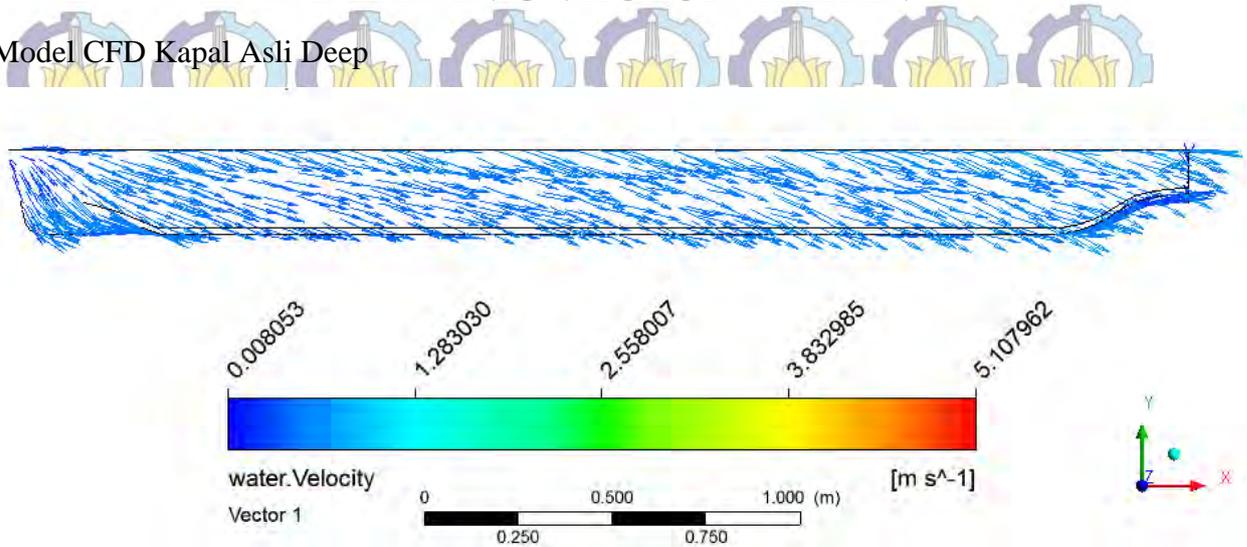
Grafik Open Water Diagram Kapal Tunnel B (Shallow Water)

LAMPIRAN F PRESSURE PADA PLANE 1

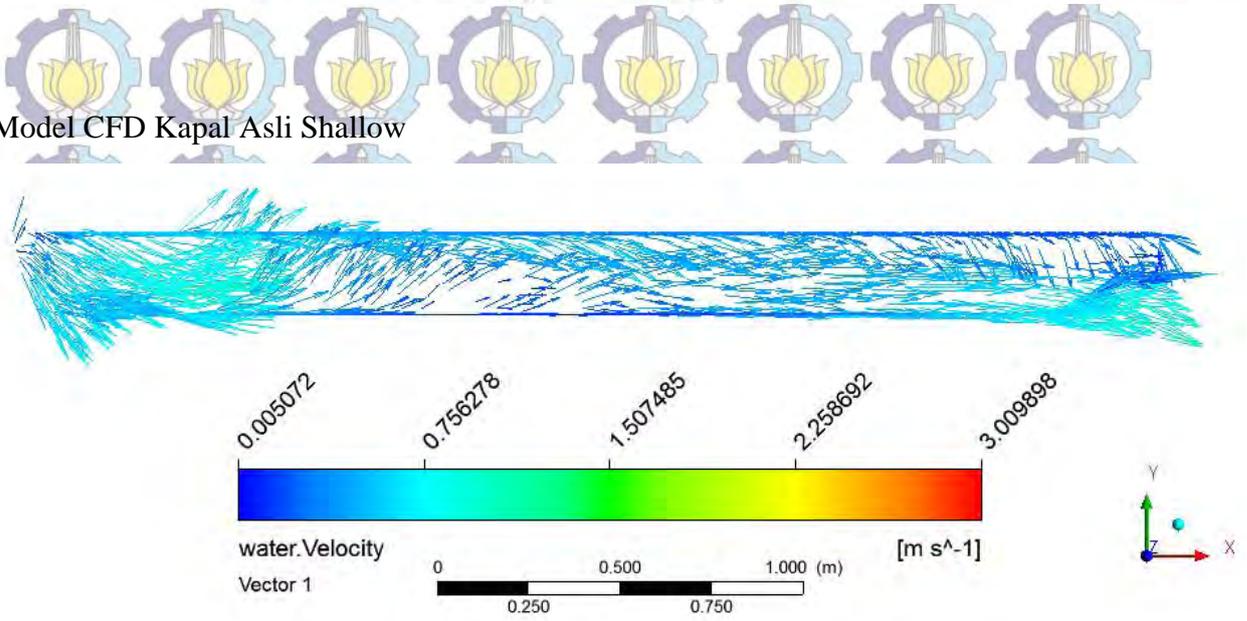


LAMPIRAN G VECTOR ALIRAN

Model CFD Kapal Asli Deep



Model CFD Kapal Asli Shallow



Model CFD Kapal Tunnel A Deep

