TESIS - MN142532

ANALISIS ALTERNATIF *HULL FORM SELF-PROPELLED BARGE* UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA HIDRODINAMIKA

FEBRIANI ROHMA DHANA
4116 203 009

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
TEKNOLOGI PRODUKSI DAN MATERIAL KELAUTAN
PROGRAM PASCASARJANA TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

TESIS MN142532

ANALISIS ALTERNATIF HU*LL FORM SELF-PROPELLED BARGE* UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA HIDRODINAMIKA

FEBRIANI ROHMA DHANA
4116 203 009

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
TEKNOLOGI PRODUKSI DAN MATERIAL KELAUTAN
PROGRAM PASCASARJANA TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

THESIS MN142532

ALTERNATIVE HULL FORM ANALYSIS OF SELF PROPELLED BARGE TO IMPROVE HER HYDRODYNAMIC PERFORMANCE

FEBRIANI ROHMA DHANA
4116 203 009

SUPERVISOR
Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D.

MASTER PROGRAM
PRODUCTION AND MATERIAL TECHNOLOGY OF MARINE
PROGRAM STUDY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS ALTERNATIF *HULL FORM SELF-PROPELLED BARGE* UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA HIDRODINAMIKA

TESIS

Disusun untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Bidang Keahlian Teknik Produksi dan Material Kelautan
Program Pascasarjana Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FEBRIANI ROHMA DHANA
NRP. 4116 203 009

Tanggal Ujian : 11 Januari 2018
Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh:

1. **Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D.** .....
   NIP. 19640210 198903 1 001
2. **Prof. Ir. I Ketut Arya Pria Utama, M.Sc., Ph.D.** .....
   NIP. 19670406 199203 1 001
3. **Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.** .....
   NIP. 19710320 199512 1 002
4. **Dr. Ir. I Ketut Suastika, M.Sc.** .....
   NIP. 19691231 200604 1 78

Dekan Fakultas Teknologi Kelautan

Prof. Ir. Daniel Mohammad Rosyid, Ph.D.
NIP. 19610702 198803 1003

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Alloh SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayat serta inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul "Analisis Alternatif Hull Form Self-Propelled Barge untuk Meningkatkan Performa Hidrodinamika". Selama pengerjaan Tugas Akhir penulis mendapatkan banyak dukungan, bimbingan, bantuan, serta saran-saran dari beberapa pihak. Untuk itu tidak lupa pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Departemen Teknik Perkapalan FTK-ITS, Dosen Wali, dan Dosen Pembimbing yang telah berkenan meluangkan waktu beliau yang padat, membagikan ilmu dan memberikan arahan dalam pengerjaan Tesis ini.
2. Kedua orang tua penulis, Ibu Utami dan Bapak Sarbini yang sudah tenang di sisi-Nya. Terimakasih atas kasih sayang, doa dan dukungannya selama ini yang tidak terbatas dan tidak akan bisa terbalaskan.
3. Kedua kakak penulis, Mbak Ririn dan Mbak Luluk, serta keponakan penulis: Anisa, Faris, Igo, Uki, Aziz, dan Azul. Terimakasih atas kasih sayang, doa, dukungan, dan hiburannya selama ini.
4. Teman-teman seangkatan seperjuangan dan semua pihak yang telah membantu pengerjaan Tesis ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan Tesis ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Penulis mengharapkan adanya saran dan kritik yang bersifat membangun demi kesempurnaan Tesis ini. Penulis berharap semoga Tesis ini dapat diterima dan bermanfaat sebagai referensi bagi banyak pihak.

Surabaya, 11 Januari 2018

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS ALTERNATIF *HULL FORM SELF-PROPELLED BARGE* UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA HIDRODINAMIKA

Nama Mahasiswa : Febriani Rohmadhana
NRP : 4116 203 009
Dosen Pembimbing : Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D.

ABSTRAK

Self-Propelled Urea Barge (SPUB) Pusri Indoensia I milik PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang merupakan tipe kapal yang memiliki karakteristik lambung gemuk dan sarat rendah. Kapal ini telah sukses beroperasi dengan performa hirodinamika yang cukup baik. Namun performa ini masih dapat ditingkatkan lagi dengan cara mengembangkan bentuk lambungnya. Faktor utama yang memiliki pengaruh besar terhadap performa kapal khususnya besarnya hambatan adalah bentuk lambung kapal (*hull form*), terutama bentuk haluan kapal. Oleh karena itu pada Tesis ini dilakukan studi pengembangan bentuk lambung SPB menjadi bentuk *X-bow* dan *Axe-bow* untuk menurunkan hambatan dan memperbaiki kulaitas *seakeeping* kapal. Analisis hambatan dan *seakeeping* dilakukan dengan metode CFD. Dari hasil analisis hambatan total dari hasil modifikasi bentuk lambung X-bow dan Axe-bow didapatkan hasil bentuk lambung X-bow dapat menurunkan hambatan total kapal sebesar 4.78% dari bentuk lambung asli atau sekitar 8.91 kN, sedangkan bentuk lambung Axe-bow sebesar 6.22% dari hambatan total kapal asli atau sekitar 12.01 kN. Dari sisi *seakeeping* didapatkan hasil bahwa bentuk lambung Axe-bow memiliki nilai maksimum *heave* dan *pitch* lebih kecil dari bentuk lambung asli. Sementara bentuk lambung X-bow nilai maksimumnya justru lebih besar . Jadi dari segi hambatan dan *seakeeping* bentuk lambung Axe-bow memiliki performa paling baik dari bentuk lambung asli dan X-bow.

Kata Kunci : *Self-Propelled Barge, Hull Form,*X-bow, Axe-bow, CFD

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ALTERNATIVE HULL FORM ANALYSIS OF SELF PROPELLED BARGE TO IMPROVE HER HYDRODYNAMIC PERFORMANCE

Author : Febriani Rohmadhana
ID Number : 4116 203 009
Supervisor : Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D.

ABSTRACT

Self-Propelled Urea Barge (SPUB) Pusri Indoensia I owned by PT. Pusri Pupuk Sriwidjaja Palembang is a kind of ship which has characteristics of full-bodied hull and shallow draft. This ship is successfully operated with good enough hydrodynamic performance. However this performace still need an improvement by develop her hull form. The main factor that affect the ship performance particularly ship resistance is ship hull form, especially the bow form. Therefore in this Thesis is conducted the study of hull form improvement of self propelled barge into shape of X-bow and Axe-bow to reduce the total resistance and improve the seakeeping performace. Analysis of resistance and seakeeping conducted using CFD method. From the resistance analysis by modified the hull form into X-bow can reduce the resistance about 4.78% or 8.91 kN and Axe-bow hull form about 6.22% or 12.01 kN. From the seakeeping analysis obtained results of maximum heave and pitch of Axe-bow hull form less than existiting hull form and X-bow hull form greater than existiting hull form instead. So, from this study in the resistance and seakeeping aspect Axe-bow hull form has best performance than existing and X-bow hull form.

Kata Kunci : *Self-Propelled Barge, Hull Form,*X-bow, Axe-bow, CFD

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN iii
KATA PENGANTAR v
ABSTRAK vii
ABSTRACT ix
DAFTAR ISI xi
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xxi
DAFTAR SIMBOL xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan masalah 2
1.3. Maksud dan tujuan 3
1.4. Manfaat 3
1.5. Batasan Masalah 3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI 5
2.1 *Self-Propelled Barge* (SPB) 5
2.2 Studi Pengembangan Bentuk Lambung SPB 6
2.3 Bentuk Haluan Kapal 9
2.4 Bentuk Lambung *X-bow* dan *Axe-bow* 9
2.5 Studi Bentuk Lambung *X-bow* dan *Axe-bow* 11
2.6 Teori Hambatan Kapal 13
2.6.1 *Viscous Resistance* 14
2.6.2 *Friction Resistance* 14

2.6.3 *Appendages Resistance* 15
2.6.4 *Wave Making Resistance* 15
2.7 *Computational Fluid Dynamic* (CFD) 15
2.7.1 *Governing Equation* 16
2.7.2 Pembuatan *Grid* atau *Meshing* 18
2.7.3 *Grid Independence* 20
2.7.4 Tahapan Simulasi CFD 21
2.8 Teori Gelombang 23
2.8.1 Gelombang Air Laut 24
2.8.2 Gelombang Regular dan Irregular 26
2.9 Teori *Seakeeping* 27
2.9.1 Gerakan Heaving 29
2.9.2 Gerakan *Pitching* 30
2.9.3 *Response Amplitude Operator* (RAO) 32
2.9.4 Spektrum Gelombang 33
2.9.5 Respon Spektrum pada Gelombang Acak (*Irregular Wave*) 36
2.10 *Software* Analisis *Seakeeping* 38
2.10.1 3D *Diffraction Theory* 38
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 41
3.1 Diagram Alir Penelitian 41
3.2 Tahapan Penelitian 42
3.2.1 Studi Literatur 42
3.2.2 Pengumpulan Data 42
3.2.3 Pembuatan dan Validasi Model 42
3.2.4 Modifikasi *Hull Form* 42

3.2.5 Analisis Hambatan 43
3.2.6 Analisis *Seakeeping* 43
3.2.7 Analisis Hasil dan Pembahasan 44
3.2.8 Penyusunan Laporan 44
BAB 4 PEMBUATAN MODEL DAN VALIDASI 45
4.1 Pembuatan Model Kapal 45
4.2 *Meshing* dan Domain Komputasi 46
4.3 *Grid Independence* 49
4.4 Tahap *Pre-Processor* 50
4.5 Tahap *Processor* dan Konvergensi 54
4.6 Tahap *Post-Processor* 56
4.7 Hasil Hambatan Total dan Validasi 56
BAB 5 MODIFIKASI *HULL FORM* DAN ANALISIS HAMBATAN 63
5.1 Batasan Modifikasi *Hull Form* 63
5.2 Modifikasi Lambung Menjadi X-*Bow* 64
5.3 Modifikasi Lambung Menjadi *Axe-Bow* 65
5.4 Analisis Hambatan 68
5.4.1 Hasil Hambatan Total Bentuk Lambung X-bow 68
5.4.2 Hasil Hambatan Total Bentuk Lambung Axe-bow 70
5.5 Analisis Distribusi Tekanan 74
BAB 6 ANALISIS *SEAKEEPING* 77
6.1 Batasan Analisis *Seakeeping* 77
6.2 Tahap-tahap Analisis *Seakeeping* 79
6.2.1 Pengaturan Geometri 79
6.2.2 Input Data Simulasi 80

6.2.3 *Meshing* 81
6.2.4 *Proses Solving* 83
6.3 Hasil Analisis *Seakeeping* 84
6.3.1 RAO Model Asli Kondisi Diam 84
6.3.2 RAO Model Asli Kondisi Bergerak 87
6.3.3 RAO Model Hasil Modifikasi Kondisi Diam 88
6.3.4 RAO Model Hasil Modifikasi Kondisi Bergerak 93
6.3.5 *Wave Spectrum* 96
6.3.6 *Response Spectrum* 98
6.3.7 Analisis *Significant Amplitude* pada Respon Spektrum 102
6.3.8 Batasan Kriteria Analisis *Seakeeping Self Propelled Barge* 104
KESIMPULAN DAN SARAN 105
7.1 Kesimpulan 105
7.2 Saran 106
DAFTAR PUSTAKA xxi
LAMPIRAN .....
BIODATA PENULIS .....

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Self-Propeleld Barge Milik PT. Pusri Indonesia I 5
Gambar 2.2 Modifikasi SPB dengan Variasi Rise of Floor, Anggara (2013) 6
Gambar 2.3 Bentuk Lambung Penelitian Awal (Ahadyanti, 2014) 7
Gambar 2.4 Bentuk Lambung Modofikasi (Ahadyanti, 2014) 8
Gambar 2.5 Lambung Tipe B (Baidowi, 2015) 8
Gambar 2.6 Beberapa Tipe Bentuk Haluan Kapal (Watson, 2002) 9
Gambar 2.7 Bentuk Haluan X-Bow (http:/// www.imare-indonesia.org, 2012) 10
Gambar 2.8 Bentuk Haluan Axe-Bow (http:/// www.imare-indonesia.org, 2012) 11
Gambar 2.9 Prinsip *Axe Bow* (Prastyawan,2013) 12
Gambar 2.10 Komponen-Komponen Resistance (Bertram, 2000) 13
Gambar 2.11 Komponen Hambatan Viskos (Carlton, 2007) 14
Gambar 2.12 Structured grid bentuk hexahedral dalam 2 D 19
Gambar 2.13 Unstructured grid dalam 2D 20
Gambar 2.14 Cohtoh Grid Independence (Anggara, 2013) 21
Gambar 2.15 Gelombang regular di permukaan laut (Sumber: Bhattacharyya, 1978) 25
Gambar 2.16 Root-mean-Square (RMS), Skewness and Kurtosis 27
Gambar 2.17 Gambaran Gerakan Seakeeping (Rudiyansah, 2013) 28
Gambar 2.18 Transformasi Spektrum Gelombang menjadi Respon Spektrum (Ahadyanti, 2015) 37
Gambar 2.19 Lambung Kapal dibagi menjadi beberapa Panel (Sholihin, 2015) 39
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 41
Gambar 3.2 Simulasi Analisis Hambatan 43
Gambar 3.3 Simulasi Analisis Seakeeping 43
Gambar 4.1 Lines Plan SPUB Pusri Indonesia I 45
Gambar 4.2 Hasil Pembuatan Model Lambung Kapal 46
Gambar 4.3 Sketsa Boundary Condition yang digunakan 47
Gambar 4.4 Medium Domain Komputasi Dibagi 2 Fluida; (a) Air dan (b) Udara ... 48
Gambar 4.5 Hasil Meshing 48

Gambar 4.6 *Grid Independence untuk Analisis Hambatan* 50
Gambar 4.7 Pendefinisian Boundary Condition 53
Gambar 4.8 Grafik Konvergensi untuk Coarse Meshing..... 55
Gambar 4.9 Grafik Konvergensi untuk Fine Meshing..... 55
Gambar 4.10 Vektor Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Pada Kapal..... 56
Gambar 4.11 Perbedaan Vector Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Disekitar Kapal pada Kecepatan; (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots..... 57
Gambar 4.12 Validasi Hambatan Total Penelitian Saat Ini 59
Gambar 4.13 Validasi Hambatan Total Penelitian Saat Ini Penelitian Sebelumnya. 59
Gambar 4.14 Bentuk Aliran Air di Sekitar Kapal Hasil Simulasi CFD pada Kecepatan 10 Knots 60
Gambar 4.15 Bentuk Aliran Air di Sekitar Kapal Hasil Towing Test pada Kecepatan 10 Knots, Anggara (2013)..... 61
Gambar 4.16 *Volume Fraction* Air Lambung Asli pada Kecepatan: (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots..... 61
Gambar 5.1 Kurva Penentuan Penambahan Bulbows Bow Berdasarakan Nilai Fn dan Cb (Watson, 1998) 63
Gambar 5.2 Hasil Modifikasi X-bow (Tampak Samping)..... 64
Gambar 5.3 Hasil Modifikasi X-bow (Tampak 3D) 65
Gambar 5.4 Hasil Modifikasi Axe-bow (Tampak Samping) 66
Gambar 5.5 Hasil Modifikasi Axe-bow (Tampak 3D) 66
Gambar 5.6 Perbandingan Body Plan dan Sheer Plan Bentuk Lambung Asli, X-bow, dan Axe-bow 67
Gambar 5.7 Perbandingan Hambatan Total Hull Form Asli dan Hasil Modifikasi X-Bow 69
Gambar 5.8 Vektor Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Bentuk Lambung X-Bow pada Kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots..... 69
Gambar 5.9 Volume Fraction Air Lambung X-Bow pada Kecepatan: (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots..... 70
Gambar 5.10 Perbandingan Hambatan Total Hull Form Asli dan Hasil Modifikasi Axe-Bow 71

Gambar 5.11 Vektor Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Bentuk Lambung Axe-Bow pada Kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots 71
Gambar 5.12 *Volume Fraction* Air Lambung Axe-Bow pada Kecepatan: (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots 72
Gambar 5.13 Perbandingan Hambatan Total Kapal Asli dan Hasil Modifikasi 73
Gambar 5.14 perbandingan Total Resistance Coefficient (CT) 73
Gambar 5.15 Distribusi Tekanan Haluan Bentuk Lambung Asli 74
Gambar 5.16 Distribusi Tekanan Haluan Bentuk Lambung X-bow 74
Gambar 5.17 Distribusi Tekanan Haluan Bentuk Lambung Axe-bow 75
Gambar 5.18 Kurva Distrisbusi Pressure Pada Kecepatan 8 Knots 75
Gambar 5.19 Kurva Distrisbusi Pressure Pada Kecepatan 9 Knots 76
Gambar 5.20 Kurva Distrisbusi Pressure Pada Kecepatan 10 Knots 76
Gambar 5.21 Kurva Distrisbusi Pressure Pada Kecepatan 11 Knots 76
Gambar 6.1 Distribusi Tinggi Gelombang Signifikan di Perairan Indonesia 78
Gambar 6.2 Hasil Pengaturan Geometri 80
Gambar 6.3 Grid Independence untuk Analisis Seakeeping 82
Gambar 6.4 Meshing untuk Analisis Seakeeping 83
Gambar 6.5 Arah Datang Gelombang untuk Simulasi Kapal Diam 83
Gambar 6.6 Arah Datang Gelombang untuk Simulasi Kapal Bergerak 84
Gambar 6.7 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam 85
Gambar 6.8 RAO Gerakan Heave dalam 3 Dimensi 85
Gambar 6.9 RAO Gerakan Pitch Pada Kondisi Kapal Diam 86
Gambar 6.10 RAO Gerakan Pitch dalam 3 Dimensi 86
Gambar 6.11 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Bergerak 87
Gambar 6.12 RAO Gerakan Pitch Pada Kondisi Kapal Bergerak 88
Gambar 6.13 RAO Gerakan *Heave* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 0^o 88
Gambar 6.14 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 45^o 89
Gambar 6.15 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 90^o 90

Gambar 6.16 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 135º 90
Gambar 6.17 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 180º 90
Gambar 6.18 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 0º 91
Gambar 6.19 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 45º 92
Gambar 6.20 RAO Gerakan Pitch Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 135º 92
Gambar 6.21 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 180º 92
Gambar 6.22 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 90º 93
Gambar 6.23 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 8 Knots 94
Gambar 6.24 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 11 Knots 95
Gambar 6.25 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 8 Knots 95
Gambar 6.26 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 11 Knots 96
Gambar 6.27 Wave Spectrum JONSWAP untuk Empat Tinggi Gelombang Berbeda 97
Gambar 6.28 Respon Spektrum Gerakan Heave pada Hs = 1.25 m 98
Gambar 6.29 Respon Spektrum Gerakan Heave pada Hs 2.5 m 99
Gambar 6.30 Respon Spektrum Gerakan Heave pada Hs = 4 m 99
Gambar 6.31 Respon Spektrum Gerakan Heave pada Hs = 6 m 100
Gambar 6.32Respon Spektrum Gerakan Pitch pada Hs = 1.25 m 100
Gambar 6.33 Respon Spektrum Gerakan Pitch pada Hs = 2.5 m 101
Gambar 6.34 Respon Spektrum Gerakan Pitch pada Hs = 4 m 101

Gambar 6.35 Respon Spektrum Gerakan Pitch pada Hs = 6 m 101
Gambar 6.36 Significant Heave Amplitude untuk Ketiga Bentuk Lambung..... 103
Gambar 6.37 Significant Pitch Amplitude untuk Ketiga Bentuk Lambung..... 104

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Dimensi Kapal dan Model (Anggara, 2013) 7
Tabel 2.2 Rumus Respon Amplitude Operator (RAO) (Sholihin, 2015) 32
Tabel 4.1 Data Ukuran Utama Kapal Asli dan Model 46
Tabel 4.2 Grid Independence untuk Analisis Hambatan 49
Tabel 4.3 Eskpresi-ekspresi pada CEL (CFX, 2007) 51
Tabel 4.4 Pendifinisian Boundary Condition 53
Tabel 4.5 Nilai Hambatan Total Kapal pada Empat Variasi Kecepatan 56
Tabel 4.6 Hasil Validasi Model Penelitian Sebelumnya (Anggara & Ahadyanti) 57
Tabel 4.7 Hasil Ekstrapolasi Hambatan Total Penelitian Sebelumnya 58
Tabel 4.8 Validasi Hambatan Total Hasil Simulasi CFD Penelitian Sebelumnya 58
Tabel 4.9 Validasi Hambatan Total Hasil Simulasi CFD Penelitian Saat ini 59
Tabel 5.1 Perubahan Ukuran Utama Modifikasi X-bow 65
Tabel 5.2 Perubahan Ukuran Utama Modifikasi Axe-bow 66
Tabel 5.3 Hasil Hambatan Total Hasil Modifikasi X-Bow 68
Tabel 5.4 Hasil Hambatan Total Hasil Modifikasi Axe-Bow 71
Tabel 5.5 perbandingan Total Resistance Coefficient (CT) 73
Tabel 6.1 Input Point Mass dan Point Bouyancy 81
Tabel 6.2 Grid Independence untuk Analisis Seakeeping 82
Tabel 6.3 Hasil Perhitungan Significant Heave Amplitude 102
Tabel 6.4 Hasil Perhitungan Significant Pitch Amplitude 103
Tabel 6.5 Analisis Batasan Kriteria 104

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR SIMBOL

ρ = Massa jenis air laut (1025 kg/m^3)

v = Kecepatan dinas (m/s)

C_{FO} = Koefisien gesek

Rn = Angka Reynold

υ = *kinematic viscosity*

$1+k_1$ = *form factor*

V = Kecepatan aliran

Δ = Perpindahan

μ = *frictional resistance* yang merepresentasikan viskositas

f = gaya dari luar, misalnya gaya gravitasi

nf = Frekuensi dasar harmonik (*hertz*)

ω = Frekuensi gelombang (rad/s)

ω_p = Frekuensi puncak gelombang (rad/s)

ω_{nz} = Frekuensi natural gerakan *heave* (rad/s)

$\omega_{n\Theta}$ = Frekuensi natural gerakan *pitch* (rad/s)

c_p = Kecepatan puncak gelombang (m/s)

T_p = Periode puncak (*second*)

T_n = Periode natural (*second*)

ζa : Amplitudo gelombang

za : Amplitudo gerakan *heave* (m)

Θa : Amplitudo gerakan *pitch* (derajat)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

μ = *Heading angle* kapal (derajat)

T = Periode gerakan (*second*)

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Self-Propelled Barge merupakan tipe kapal yang memiliki karakteristik lambung gemuk dan sarat rendah. Berkembangnya penggunaan SPB sebagai angkutan muatan curah, bahan mentah maupun produk olahan dikarenakan angkutan jenis ini dapat membawa muatan yang jauh lebih banyak dibanding angkutan darat (Anggara, 2013). Karakteristik lain dari kapal SPB adalah mampu berlayar di perariran dalam, sedang, maupun dangkal tanpa harus mengurangi jumlah muatan sehingga dapat menjadi solusi terhadap permasalahan tidak terpenuhinya jumlah muatan yang harus diangkut ke tempat tujuan atau *deadfreight*.

Di Indonesia khususnya pulau Kalimantan dan Sumatera dibutuhkan kapal tipe SPB yang mampu berlayar di perairan dangkal (sungai). Hal ini disebabkan terdapat banyak perusahaan yang berdiri di sekitar wilayah sungai seperti PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri), PT. Pertamina, PT Tonnasa, dan banyak perusahaan swasta lain. Dengan menggunakan SPB proses pengangkutan muatan ke tempat tujuan lebih ekonomis dibandingkan melalui jalur darat karena muatan tidak harus transit terlebih dahulu.

Namun dari beberapa evaluasi terhadap kapal-kapal SPB yang telah dibangun terdapat beberapa permasalahan yang sama, antara lain: timbulnya getaran yang besar, aliran yang tidak *uniform* pada buritan, hambatan yang besar, dan *unsteady propeller load* (Baidowi, 2014). Faktor utama yang memiliki pengaruh besar terhadap performa kapal khususnya besarnya hambatan adalah bentuk lambung kapal (*hull form*), terutama bentuk haluan kapal. Haluan kapal merupakan bagian lambung kapal yang mendapat tekanan dari luar paling besar akibat gerakan kapal yang menerjang ombak, sehingga bentuk haluan kapal dibuat sedemikian hingga dapat meminimalkan hambatan. Secara umum semakin *streamline* bentuk lambung kapal semakin kecil nilai hambatan kapal namun di sisi lain semakin kecil pula *payload* dari kapal tersebut.

Salah satu kapal tipe SPB yang sudah beroperasi dan memiliki performa hodrodinamika yang cukup baik adalah kapal SPUB Pusri Indonesia I milik PT. Pusri. Namun performa hodrodinamika kapal SPB masih perlu dioptimalkan dengan cara melalukan perbaikan bentuk lambungnya untuk mendapatkan nilai hambatan kapal yang kecil dan memperbaiki *seakeeping* nya. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Anggara (2013) telah dilakukan modifikasi bentuk haluan SPB dengan 3 (tiga) variasi *Rise of Floor* (ROV) dan juga pada penelitian Ahadyanti (2014) yang telah memodifikasi bagian buritan SPB ini untuk menurunkan konsumsi bahan bakar.

Sedangkan pada penelitian ini pengembangan bentuk lambung SPB akan dilakukan pada bagian haluan kapal dengan memodifikasi menjadi bentuk *X-bow* dan *Axe-bow*, dimana dua bentuk haluan ini memiliki klaim performa hidrodinamika yang baik dari segi hambatan dan gerakan *pitching.* Dari hasil modifikasi akan dilakukan analisis hambatan dan *seakeeping* dengan menggunakan metode *Computational Fluids Dynamic* (CFD). Hasil analisis hambatan akan dibandingkan dengan hambatan dari bentuk lambung SPB asli hasil uji tarik atau *towing test.* Hasil modifikasi lambung SPB dengan bentuk *X-bow* dan *Axe-bow* diharapkan memiliki performa hodrodinamika yang lebih baik.

1.2. Rumusan masalah

Dalam pengembangan alternatif *hull form Self-Propelled Barge* berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan terdapat beberapa rumusan masalah antara lain sebagai berikut:

1. Bagaimana analisis hambatan pengaruh modifikasi bentuk lambung X-bow dan Axe-bow terhadap bentuk lambung asli *Self-Propelled Barge*.
2. Bagaimana analisis *seakeeping* pengaruh modifikasi bentuk lambung X-bow dan Axe-bow terhadap bentuk lambung asli *Self-Propelled Barge*.
3. Bagaimana desain alternatif *hull form Self-Propelled Barge* yang paling optimum dalam mengurangi hambatan kapal dan memperbaiki *seakeeping*.

1.3. Maksud dan tujuan

Penelitian ini dimaksudkan untuk melakukan Analisis Alternatif *Hull Form Self-Propelled Barge* untuk Meningkatkan Performa Hidrodinamika. Adapun tujuannya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis hambatan pengaruh modifikasi bentuk lambung X-bow dan Axe-bow terhadap bentuk lambung asli *Self-Propelled Barge*.
2. Melakukan analisis *seakeeping* pengaruh modifikasi bentuk lambung X-bow dan Axe-bow terhadap bentuk lambung asli *Self-Propelled Barge*.
3. Mendapatkan desain alternatif *hull form Self-Propelled Barge* yang paling optimum dalam mengurangi hambatan kapal dan memperbaiki *seakeeping*.

1.4. Manfaat

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dihasilkan alternatif *hull form Self-Propelled Barge* yang paling optimum dalam mengurangi hambatan kapal dan memperbaiki *seakeeping*;
2. Dapat digunakan sebagai referensi dalam studi pengembangan *hull form Self-Propelled Barge* dan juga kapal-kapal jenis lain.

1.5. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah antara lain sebagai berikut:

1. Modifikasi *hull form* difokuskan pada bagian haluan dengan bentuk *X-bow* dan *Axe-bow*;
2. Analisis hambatan fokus pada aspek hambatan total kapal pada 4 (empat) variasi kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots;
3. Analisis *seakeeping* dilakukan untuk gerakan *heave* dan *pitch;*
4. Analisis hambatan dan *seakeeping* dilakukan dengan metode CFD;
5. Analisis hambatan dilakukan menggunakan *software* ANSYS CFX 16.0 dan untuk analisis *seakeeping* menggunakan *software* ANSYS AQWA 16.0;
6. Spesifikasi komputer yang digunakan adalah OS Windows 7 dengan *processor* Intel(R) Core(TM) i3-2350M CPU @ 2.30 GHz dan Ram 4 GB.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Self-Propelled Barge* (SPB)

Ada beberapa tipe *barge* yang sudah memiliki tenaga penggerak sendiri, dinamakan sebagai *Self-Propelled Barge* (SPB). SPB sudah memiliki *superstructure*, meskipun kecil, yang digunakan sebagai tempat akomodasi *crew* (Ahadyanti, 2014). SPB merupakan kapal yang sesuai beroperasi di perariran sungai karena memiliki karakteristik lambung yang gemuk dan bersarat rendah. Pada awalnya SPB lebih banyak digunakan di sungai dan terbatas pada angkutan muatan curah namun mengalami perkembangan muatan tidak hanya curah saja seperti muatan container, LNG dan muatan lain (Baidowi and Aryawan, 2015).

Gambar 2.1 *Self-Propeleld Barge* Milik PT. Pusri Indonesia I

Karakteristik lain dari kapal SPB adalah mampu berlayar di perariran dangkal (sungai) tanpa kehilangan jumlah muatan yang besar sehingga menjadi jawaban yang cukup tepat untuk permasalahan *deadfreight* di Indonesia. Karakteristik perairan yang dangkal ini di definisikan sebagai perairan yang memiliki perbandingan kedalaman air (h) dan sarat kapal (d) sebesar 1.2 (Koh, 2012) sementara itu SNAME mendifinisikan perariran dangkal dengan nilai h/d < 1/5.

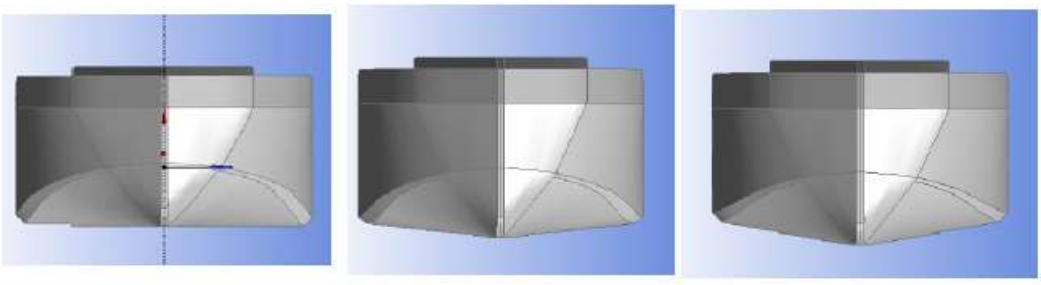
Berdasar data register BKI saat ini terdapat lebih dari 140 kapal SPB ber-bagai jenis yang beroperasi di Indonesia (Klasifikasi Indonesia, 2014). Dari jumlah tersebut, 136 diantaranya merupakan ka-pal *Self-Propelled Oil Barge* (SPOB).

Dari sisi usia kapal-kapal SPOB tersebut relatif muda yaitu berkisar 10 tahun (2003– 2013). Hal tersebut menandakan bahwa pertumbuhan jumlah kapal 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* (Baidowi and Aryawan, 2015).

2.2 Studi Pengembangan Bentuk Lambung SPB

Pada penelitian Anggara (2013) mengenai "Studi Komperatif Performa Hidrodinamik Kapal Bertipe *Shallow Draft Barge* pada Kondisi Perairan Dangkal, Sedang dan Dalam" dilakukan simulasi *barge* pada beberapa kondisi kedalaman air yang berbeda. Variasi kedalaman dibagi menjadi 3 meliputi perairan dangkal (*shallow water*) dengan perbandingan kedalaman air dan sarat kapal, h/d = 1.2, perairan sedang (*medium shallow water*) h/d = 2 dan perairan dalam (*deep water*) dengan h/d = 20.

Kondisi batas dari kedua metode dibuat sama sehingga hasilnya dapat bandingkan. Setelah hasil diperoleh, dilakukan desain baru terhadap lambung kapal *barge* dengan memvariasikan sudut *rise of floor* 5^o dan 8^o, kemudian disimulasikan pada kondisi *shallow water* untuk mengetahui pengaruhnya dalam rangka menemukan desain lambung yang optimum. Hasilnya menunjukkan bahwa *rise of floor* dengan sudut yang tidak terlalu besar dapat mengurangi hambatan di *shallow water* dan memperbaiki kemampuan *seakeeping* (Anggara, 2013).



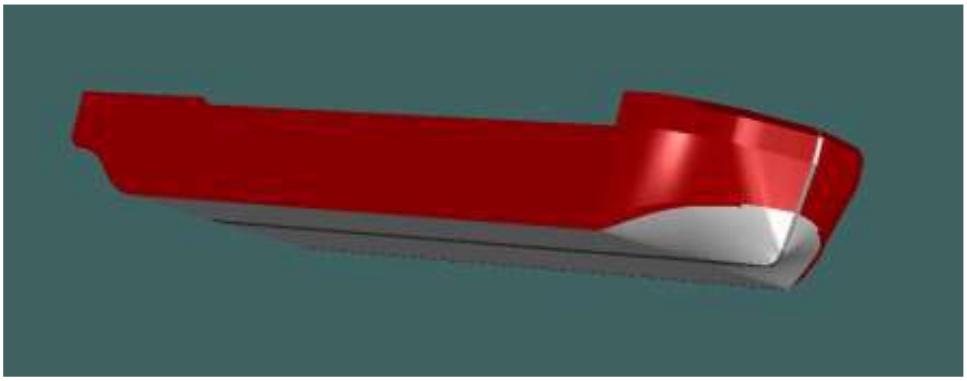
Gambar 2.2 Modifikasi SPB dengan Variasi *Rise of Floor*, Anggara (2013)

Anggara melakukan evaluasi hambatan dan *seakeeping* model dengan mengkombinasikan metode numerik melalui CFD (*Computational Fluid Dynamic*)

dengan eksperimen di laboratorium. Data kapal dan model uji yang digunakan Anggara dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Dimensi Kapal dan Model (Anggara, 2013)

Dimensi	**Kapal**	**Model**
	Skala = 1: 43.5	
Loa (m)	134.00	3.075
Lwl (m)	132.9	3.050
Bmld (m)	26.40	0.606
Hmld (m)	11.00	0.252
T (m)	5.400	0.124
WSA (m^2)	4580.639	2.413

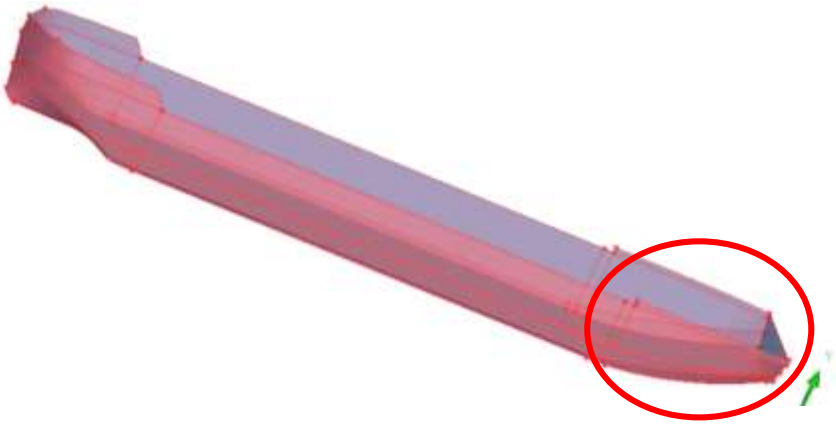


Gambar 2.3 Bentuk Lambung Penelitian Awal (Ahadyanti, 2014)

Pada penelitian lebih lanjut oleh Ahadyanti (2014) dilakukan modifikasi terhadap bentuk lambung *barge* dari Anggara untuk meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar dengan cara melangsingkan *parallel middle body* sebesar kurang lebih 10%. Modifikasi pada lambung kapal Pusri Indonesia I dapat menurunkan tahanan kapal sehingga menurunkan konsumsi bahan bakar. Pada penelitian ini, dengan bentuk lambung hasil modifikasi, hambatan pada kecepatan 0,778 m/s yang merepresentasikan kecepatan dinas turun sebesar 0,519% sehingga konsumsi bahan bakar dapat dihemat hingga sebesar 71,716 ton per tahun.

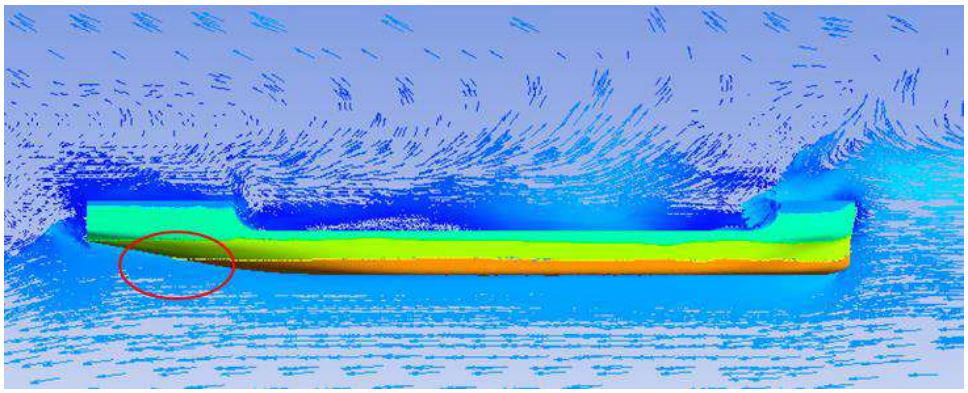
Selain mempertahankan letak LCB, batasan lain yang digunakan dalam memodifikasi lambung adalah *payload*. Untuk mempertahankan *payload*, maka

yang harus diperhatikan adalah *volume displacement* model. Pada model yang bentuk lambungnya dimodifikasi, *volume displacement* model dipertahankan, sehingga mengakibatkan sarat kapal naik. Untuk mempertahankan letak LCB agar tidak berubah, maka bentuk lambung depan kapal juga "dilangsingkan" meskipun tidak seekstrim perubahan pada bentuk lambung belakang kapal (Ahadyanti, 2014).



Gambar 2.4 Bentuk Lambung Modofikasi (Ahadyanti, 2014)

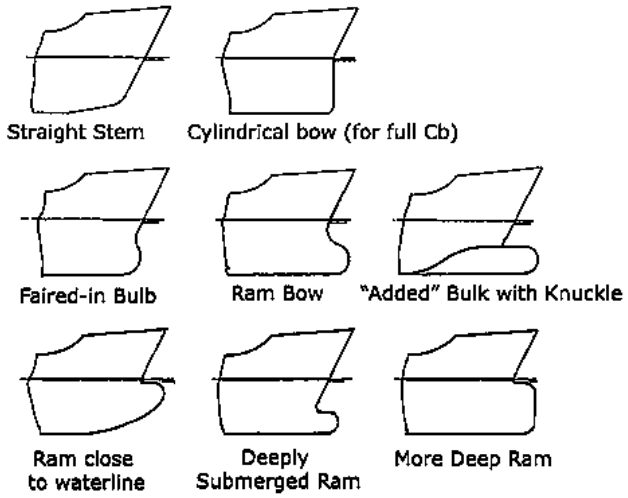
Sedangkan dari penelitian yang dilakukan oleh Baidowi (2015) tentang "Pengembangan Series Bentuk Lambung *Self-Propelled Barge"* dihasilkan bentuk lambung Tipe B series 19 yang memiliki hambatan paling kecil dibandingkan bentuk lambung serie lainnya. Dalam pemelitiannya Baidowi memvariasaikan bentuk lambung berdasarkan 5 (lima) *parent hull* dan di series kan secara parametrik berdasar beberapa ukuran utama dan hambatan kapal. Variasi tersebut antara lain: LCB, L/B, B/H, dan Cb, hingga didapatkan 27 series lambung.



Gambar 2.5 Lambung Tipe B (Baidowi, 2015)

2.3 Bentuk Haluan Kapal

Haluan kapal adalah lambung kapal bagian depan yang mendapat tekanan dan tegangan dari luar paling besar akibat gerakan kapal yang menerjang ombak, sehingga bentuk haluan kapal dibuat sedemikian hingga dapat meminimalkan hambatan kapal (*ship resistance*) pada saat kapal berlayar. Dengan hambatan yang sekecil mungkin daya mesin dan bahan bakar yang dibutuhkan kapal semakin efisien. Jadi bentuk haluan merupakan bagian lambung (*hull form*) yang paling berpengaruh terhadap besar kecilnya hambatan kapal.



Gambar 2.6 Beberapa Tipe Bentuk Haluan Kapal (Watson, 2002)

Pada Gambar 2.6 dapat dilihat gambaran beberapa tipe bentuk haluan kapal dimana ada 8 tipe bentuk haluan yang terdiri dari; *straight sterb, cylinder bow* (untuk Cb=1*), faired bulb, ram bow, added bulk with knuckle, ram close to waterline, deeply submerged ram,* dan *more deep ram.*

2.4 Bentuk Lambung *X-bow* dan *Axe-bow*

Selain 8 tipe bentuk haluan pada Gambar 2.6 beberapa tahun terakhir ini juga berkembang bentuk haluan tipe baru, yaitu X-bow dan Axe-bow. Kapal dengan bentuk haluan X-bow pada saat diperkenalkan pertama kalinya di dunia telah menyebabkan sensasi, karena bentuknya secara keseluruhan sangatlah berbeda dengan kapal-kapal konvensional yang ada; dengan seluruh bagian depannya didominasi oleh haluan yang tinggi, bulat dengan mengembang sedikit diatasnya, namun dengan daya apung yang ekstra besar karena adanya volume

tambahan karena bentuk ini (Gambar 2.7). Bentuk haluan yang revolusioner ini juga cukup besar untuk memberikan ruang akomodasi dibagian depan dari kapal, dengan anjungan navigasi yang berada diatasnya (Stowmaster, 2012).

Gambar 2.7 Bentuk Haluan X-Bow (http:/// www.imare-indonesia.org, 2012)

Dalam konfigurasi awalnya kapal ini dirancang dan disesuaikan untuk wahana lepas pantai dan sejumlah kapal jenis ini benar-benar telah dibangun untuk "membuktikan" kecanggihan rancang bangunnya. Bisa diperlihatkan bahwa bentuk dasar dari kapal secara teknis masih bisa diperbaiki lagi. Ada sejumlah klaim kelebihan dari bentuk lambung X-bow ini antara lain *seakeeping* yang lebih baik. Bentuk dari haluan ini memungkinkannya kemampuan menerjang ombak yang yang lebih baik jika dibandingkan dengan kapal-kapal dengan haluan konvensional yang mengembang keatas (*flare*), sehingga hambatan kapal lebih kecil dan kecepatan bisa maksimal dengan daya mesin yang sama.

Sedangkan bentuk haluan Axe-bow memiliki konfigurasi penambahan panjang haluan dengan kemiringan nyaris vertikal, dan meruncing kebagian depan berbentuk tajam yang berperan membelah ombak yang datang (Gambar 2.8). Meskipun rancang bangun awalnya dimakdsudkan untuk kapal patroli berkecepatan tinggi, rancang bangun ini menarik perhatian industri perminyakan di Laut Utara, dimana kegiatan yang memerlukan armada kapal-kapal cepat, yang tahan segala cuaca untuk memasok barang kebutuhan dan pergantian awak kapal yang melayani platform-platform pengeboran minyak.

Gambar 2.8 Bentuk Haluan Axe-Bow (http:/// www.imare-indonesia.org, 2012)

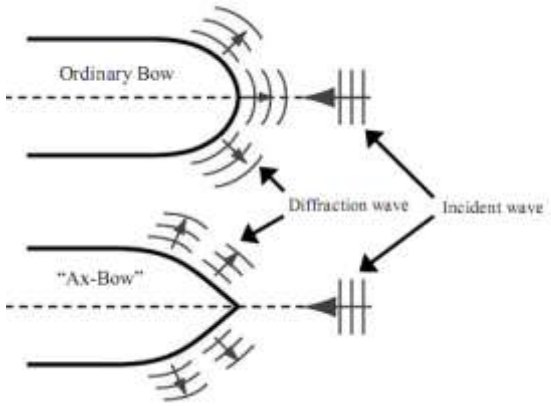
2.5 Studi Bentuk Lambung *X-bow* dan *Axe-bow*

Dalam studi eksperimen yang dilakukan oleh Perwira (2016), tentang analisis perbandingan penggunanan X-bow dan *bulbous bow* konvensional terhadap hambatan total dan *seakeeping* kapal menghasilkan kesimpulan bahwa bentuk haluan X-bow menghasilkan hambatan lebih kecil dibandingkan *bulbous bow* konvensional pada kondisi air bergelombang. Perbandingan hambatan rata-rata pada kondisi air tenang untuk *spherical bulbous bow* lebih baik 11.5% jika dibandingkan dengan *tapering bulbous bow* dan 19.8% dengan X-bow. Perbandingan hambatan rata-rata pada kondisi air bergelombang untuk X-bow lebih baik 5.08% jika dibandingkan dengan *spherical bulbous bow* dan 10.18% dari *tapering bulbous bow* (Perwira, 2014).

Sedangkan dalam penelitian Sidabalok (2016) yang dilakukan dengan metode CFD dari tiga variasi bentuk haluan, nilai hambatan terendah terjadi pada model 3 dengan desain haluan X-Bow yaitu koefisien total sebesar 0.006565 dan nilai hambatan total sebesar 242,76 KN. Sedangkan untuk 2 (dua) model lainnya menghasilkan nilai koefisien total masing-masing 0,007211 dan 0,007368. Dengan nilai hambatan total model 1 sebesar 267,22 KN dan nilai hambatan total model 2 sebesar 273,40 KN.

Sedangkan analisa *seakeeping* kapal menunjukan respon *heaving* kapal terkecil dialami pada sudut 90^{o} saat tinggi gelombang 3 meter oleh model 3 yaitu

sebesar 0,204 meter. Sedangkan untuk model 1 memiliki nilai 0,214 meter dan model 2 memiliki nilai 0,208 meter. Untuk respon *pitching* kapal terkecil juga dialami pada sudut 90^{o} saat tinggi gelombang 3 meter oleh model 3 yaitu sebesar 0,065^{o}. Sedangkan untuk model 1 memiliki nilai 0,084^{o} dan model 2 memiliki nilai 0,098 ^{o}. Untuk *probability slamming* baik model 1, model 2 maupun model 3 tidak memiliki kemungkinan untuk terjadinya *slamming*. Dari hasil analisa baik dari segi hambatan maupun seakeeping kapal didapat bahwa model 3 yakni model dengan menggunakan desain haluan X-Bow adalah model terbaik yang dapat dijadikan alternatif jika dibandingkan model 1 dan model 2 (Sidabalok, 2016).

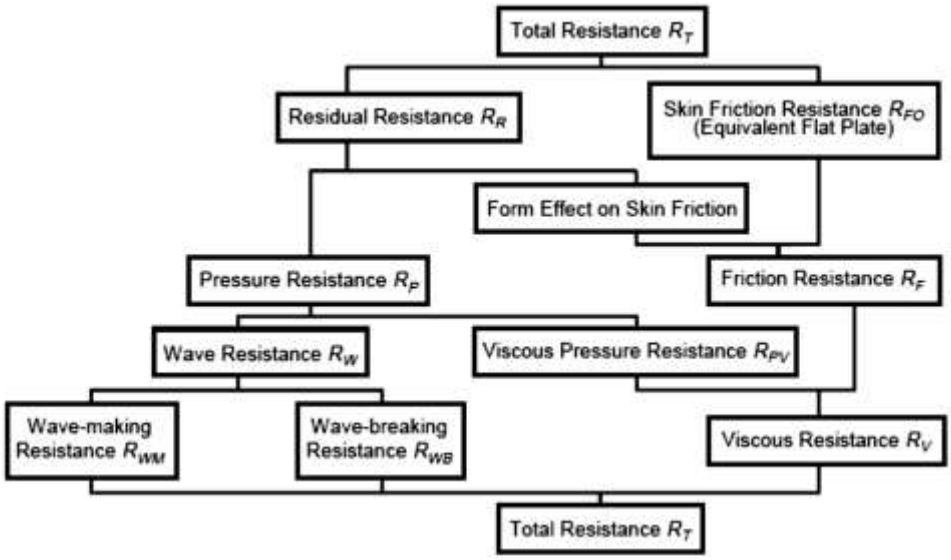


Gambar 2.9 Prinsip *Axe Bow* (Prastyawan,2013)

Dalam penelitian Prastyawan (2013) dilakukan analisis penerapan haluan tipe axe-bow untuk mengurangi konsumsi bahan bakar pada *utility vessel* 48 meter dihasilkan bahwa haluan dengan konsep *axe bow* memiliki tahanan yang jauh lebih kecil daripada tahanan pada kapal dengan konsep *conventional bow*. Setelah dilakukan pemilihan engine dengan merk dan *RPM* yang sama maka diketahui bahwa *bow type axe* dapat mengurangi konsumsi bahan bakar mencapai ±40 liter/jam. Kerugian pada desain ini adalah pengurangan jumlah displacement yang dipunya sebagai akibat pengurangan tahanan, hal ini dikarenakan dalam desain tidak melakukan penambahan panjang, lebar, dan draft. Kerugian ini tidak terlalu berdampak signifikan karena besaran tonnage dari bahan kabar dan pelumasan, sehingga air tawar yang dikorbankan tetap dipertahankan pada desain ini (Prastyawan, 2013).

2.6 Teori Hambatan Kapal

Hambatan kapal dapat diartikan sebagai gaya yang bekerja melawan arah gerak kapal. Gaya ini diakibatkan karena terjadinya kontak langsung antara badan kapal dan fluida yang dilewatinya. Besarnya hambatan suatu kapal dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu luas permukaan basah, jenis fluida dan kecepatan kapal. Nilai hambatan kapal akan meningkat apabila *Froude Number (Fr)* mengalami peningkatan (Harvald, S A, 1992).



Gambar 2.10 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 . Rumusan hambatan total dapat ditulis melalui persamaan 2.1:

$$RT = RV + RW + RA \quad (2.1)$$

di mana:

RT = Hambatan Total

RV = Hambatan Viskos

RW = Hambatan Gelombang Kapal

RA = Hambatan Udara

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

2.6.1 *Viscous Resistance*

Untuk menghitung hambatan keketalan dibutuhkan komponen-komponen untuk mendapatkannya. Seperti bilangan *Rn* (*Reynold number*) untuk mendapatkan koefisien gesek yang menggunakan rumus ITTC 1957 dan *form factor of bare hull* (1 + k_1). Adapun rumus *viscous resistance* $\left(R_V\right)$ diberikan sebagai berikut (Lewis, 1988):

$$R_V = \frac{1}{2}\rho V^2 \cdot C_{FO}(1+k_1)S \qquad (2.2)$$

dimana :

ρ = *mass density salt water* (1025 kg/m^3)

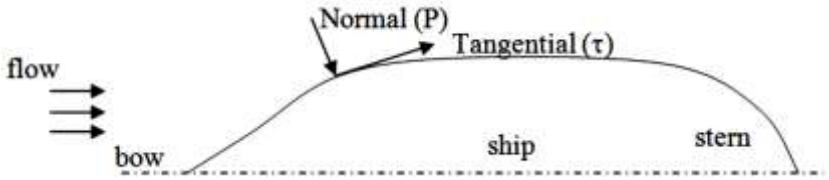
V = *service speed* [ms^{-1}]

C_{FO} = *friction coefficient* (ITTC 1957)

Rn = *Reynold Number*

υ = *kinematic viscosity*

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



Gambar 2.11 Komponen Hambatan Viskos (Carlton, 2007)

2.6.2 *Friction Resistance*

Hambatan gesek (*friction resistance*), merupakan salah satu komponen dari hambatan viskos. Hambatan ini terjadi akibat gesekan antara molekul fluida dannilainya dipengaruhi oleh viskositas, kecepatan kapal dan luas permukaan basah. Rumus umum hambatan gesek kapal ditulis pada Persamaan 2.3 (ITTC 1957):

$$Rf = ½.\ \rho.C_f.S.V^2 \qquad (2.3)$$

di mana :

Rf = Hambatan Gesek

ρ = Kerapatan fluida

C_F = koefisien gesek

2.6.3 *Appendages Resistance*

Dalam menghitung hambatan kapal yang diakibatkan oleh bentuk badan kapal yang tercelup dalam air, dibutuhkan luas permukaan basah kapal (S_{tot}) yang terdiri dari luas badan kapal WSA (S) dan luas tonjolan-tonjolan seperti kemudi, *bulbous bow*, dan *bilge keel* (S_{app}). Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung *appendages resistance* yaitu (Lewis, 1988):

$$R_{APP} = \frac{1}{2}\rho V^2 \cdot C_{FO} \cdot S_{tot}(1+k) \tag{2.4}$$

2.6.4 *Wave Making Resistance*

Untuk menghitung hambatan gelombang, dibutuhkan masukan data seperti berat *displacement*, sudut masuk, luasan *bulbous bow* dan *transom*. Adapun rumus diberikan sebagai berikut (Lewis, 1988):

$$\frac{R_w}{W} = C_1 C_2 C_3 e^{m_1 Fn^d} + m_2 \cos\left(\lambda Fn^{-2}\right) \tag{2.5}$$

Gelombang yang terjadi merupakan akibat gerakan titik tekanan tunggal yang bergerak sepanjang garis lurus pada permukaan air, menimbulkan sejumlah gelombang yang bergabung membentuk suatu pola yang khas. Pola ini terdiri dari sistem (sejumlah) gelombang melintang (*transverse waves*) dan sistem gelombang divergen yang menyebar dari titik tersebut. Jarak antara satu gelombang melintang dengan gelombang melintang berikutnya sangat tergantung pada kecepatan gerakan titik itu sendiri (Harvald, 1992).

2.7 *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Secara historis, metode *Computational Fluids Dynamic* atau CFD pertama kali dikembangkan untuk memecahkan persamaan Potensi Linearized. Metode dua dimensi, dengan menggunakan transformasi konformal aliran sekitar silinder dengan aliran sekitar sebuah aerofoil dikembangkan pada tahun 1930. Kekuatan komputer pengembangan serba tersedia tiga-dimensi metode. Makalah pertama pada metode tiga-dimensi praktis untuk memecahkan persamaan potensial linierisasi diterbitkan oleh John Hess dan AMO Smith dari Douglas Aircraft pada

tahun 1967. Metode ini membagi permukaan geometri dengan panel, menimbulkan kelas ini program-program yang disebut Metode Panel.Metode mereka sendiri disederhanakan, dalam hal itu tidak termasuk aliran mengangkat dan karenanya terutama diterapkan untuk kapal lambung dan fuselages pesawat.

CFD merupakan suatu metode numerik yang digunakan untuk melakukan perhitungan, prediksi dan pendekatan aliran fluida dengan bantuan perangkat lunak *(software)* pada komputer, CFD melakukan pendekatan dengan metode numerasi serta menggunakan persamaan-persamaan fluida. Dalam proses analisisnya, CFD menggunakan persamaan yang didasarkan pada dinamika fluida yaitu persamaan kontinuitas, serta momentum dan energi. Persamaan-persamaan ini merupakan pernyataan matematis untuk tiga prinsip dasar fisika :

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

2.7.1 *Governing Equation*

Persamaan dasar yang digunakan sebagai *background* dalam penyelesaian masalah menggunakan 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 (Temam, 1984):

$$\rho\left(\frac{\partial V}{\partial t} + v.\nabla v\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2 v + f \qquad (2.6)$$

Dimana :

- V = Kecepatan aliran
- Δ = Perpindahan
- ρ = masa jenis fluida
- μ = *frictional resistance* yang merepresentasikan viskositas
- f = gaya dari luar, misalnya gaya gravitasi
- t = waktu

Metode yang digunakan pada proses penyelesaian g*overning equation* adalah metode diskrit. Beberapa metode diskrit yang digunakan adalah: *Finite Element Method* (FEM) dan *Finite Volume Method* (FVM).

a. Finite Element Method (FEM)

Finite Element Method (FEM) menggunakan fungsi bentuk sederhana (*line*ar 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. Selanjutnya dihasilkan persamaan volume yang mengatur persamaan dalam bentuk :

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint QdV + \iint F\,dA = 0 \qquad (2.7)$$

Dimana Q adalah vektor variabel dilestarikan, F adalah vektor dari fluks (lihat persamaan Euler atau persamaan Navier-Stokes), V adalah volume dari elemen kontrol volume, dan luas permukaan elemen volume kontrol.

b. Finite Volume Method (FVM)

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. Dalam metode ini, sebuah persamaan tertimbang sisa terbentuk :

$$R_i = \iiint W_i Q dV^e \qquad (2.8)$$

Dimana Ri adalah persamaan sisa pada elemen simpul i, Q adalah persamaan konservasi dinyatakan atas dasar elemen, Wi adalah faktor berat badan, dan Ve adalah volume elemen.

c. *Finite Difference Method (FDM)*

Finite Difference Method (FDM) atau Metode Beda Hingga, memiliki sejarah penting dan sederhana untuk program. Hal ini saat ini hanya digunakan dalam kode khusus beberapa. Modern Kode beda hingga menggunakan sebuah batas tertanam untuk menangani geometri yang kompleks, membuat kode-kode yang sangat efisien dan akurat. Cara lain untuk menangani geometri termasuk penggunaan tumpang tindih grid, dimana solusinya adalah interpolated di jaringan masing-masing.

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial F}{\partial x}+\frac{\partial G}{\partial y}+\frac{\partial H}{\partial z}=0 \qquad (2.9)$$

dimana Q adalah vektor variabel dilestarikan, dan F, G, dan H adalah fluks dalam x, y, dan z masing-masing arah.

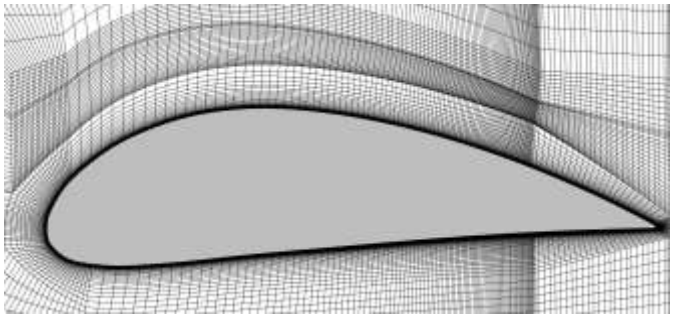
2.7.2 Pembuatan *Grid* atau *Meshing*

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 waktu 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).

Untuk pembuatan geometri bentuk grid dapat dibuat *top-down* atau *bottom up*. Bentuk *top-down* dipakai ketika bentuk benda silinder, balok, dan bola.

Sedangkan bentuk *bottom up* dipakai ketika bentuk benda vertical (poin-poin), penghubung yang menghubungkan permukaan, dan kombinasi permukaan yang membentuk ruang-ruang. Terdapat 3 tipe grid berdasarnya susunannya, yaitu *structured grid, unstructured grid,* dan *hybrid grid.*

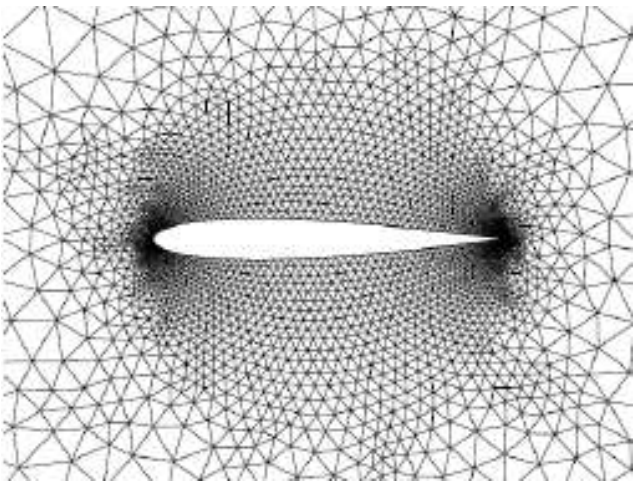


Gambar 2.12 *Structured grid* bentuk hexahedral dalam 2 D

Structured grid merupakan tipe grid yang bentuk dan susunannya nya dalam satu objek secara keseluhan sama dan beraturan. Jenis elemen yang memungkinkan untuk digunakan adalah quadrilateral dalam 2D and hexahedra dalam 3D. Grid tipe ini memiliki efisiensi ruang yang tinggi. Keseluruhan hubungan antar elemen disimpan dalam bentuk tersusun. Beberapa kelebihan lain adalah grid tipe ini memiliki konvergensi lebih baik dan resolusi tinggi. Kekurangan dari structured grid adalah :

1. Dibutuhkan waktu beberapa hari atau bulan untuk pembuatan dan penyusunan
2. Dibutuhkan user yang professional
3. Terbatas untuk bentuk geometri yang kompleks atau rumit

Sedangkan *unstructure grid* merupakan tipe grid yang hubungan antar elemennya tidak beraturan. Grid tipe ini tidak bisa dengan mudah ditetapkan dalam bentuk dan susunan 2D atau 3D dalam memori komputer. Hal ini memungkinkan berbagai bentuk elemen dapat digunakan. Jika dibandingkan dengan *structured grid, unstructured grid* memiliki ruang yang tidak efisien. Grid tipe ini secara umum berbentuk setigita dalam 2D dan tetrahedral dalam 3D.



Gambar 2.13 *Unstructured grid* dalam 2D

Unstructured grids menghasilkan bentuk hexahedra, tetahedra, pyramid, dan prisma tanpa bentuk pemetaan yang nyata dan ruang dalam bentuk komputasi (vertices yang berdekatan dalan bentuk nyata tidak harus disusun berdekatan dalam bentuk komputasi). Hubungan informasi disimpan dalam tabel konektivitas. Hasil dari unstructured grid dapat secara otomatis digunakan untuk sudut yang besar dalam waktu yang singkat (beberapa jam). Sedangkan kekurangan dari *structured grid* adalah :

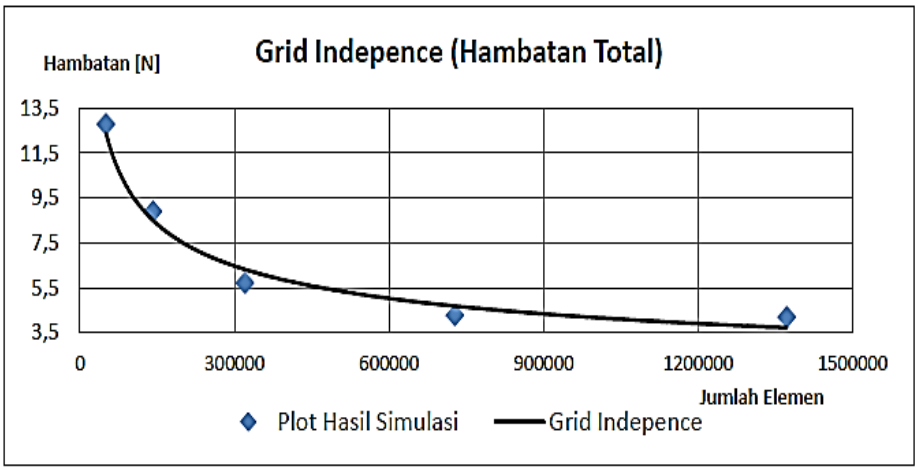
1. Sulit untuk menentukan kontrol yang tepat untuk memperhalus grid yang termasuk dalam ukuran sel yang lebih besar
2. Sangat sensitive dengan bentuk geometri dari model CAD yang tidak sempurna
3. Membutuhkan waktu yang lebih lama dan memori solver yang besar

2.7.3 *Grid Independence*

Salah satu metode yang digunakan untuk membuktikan keakuratan hasil simulasi adalah dengan menggunakan *grid Independence*. Hasil yang ditampilkan oleh CFD sangat bergantung pada ukuran *meshing* dari model. Semakin kecil ukuran *mesh* maka jumlah elemen model yang terbentuk semakin banyak. Jumlah elemen yang besar akan memberikan hasil yang lebih mendekati nilai sebenarnya. Namun tidak selamanya jumlah elemen yang banyak menjamin optimalisasi simulasi. Proses simulasi dapat dinilai optimal tidak hanya karena hasil yang akurat, melainkan juga waktu yang digunakan dapat dibatasi. Penggunaan waktu

yang minimum dapat diatur melalui pemilihan jumlah elemen. Proses *running* akan semakin singkat apabila jumlah elemen sangat sedikit.

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.



Gambar 2.14 Cohtoh *Grid Independence* (Anggara, 2013)

2.7.4 Tahapan Simulasi CFD

Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan ketika melakukan simulasi CFD, yaitu : *Pre-pocessor, Processor* dan *Post-processor* (Wendt, 2008).

1. *Pre-processor*

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

1. Pendefinisian dari geometri daerah kajian dan domain komputasi
2. *Grid generation* yaitu pembagian domain ke dalam domain yang lebih kecil yaitu *grid* atau *mesh* dari elemen elemen kecil *(cells)*
3. Pemilihan fenomena fisik dan kimia dari masalah yang dimodelkan
4. Pendefinisian properti fluida

5. Spesifikasi kondisi batas yang sesuai pada *cell* yang bersinggungan dengan batas domain

Dalam menganalisa suatu aliran fluida terdapat dua metode yang dapat digunakan, yang pertama adalah mencari pola aliran secara detail (x, y, z) pada setiap titik atau yang kedua, mencari pola aliran pada suatu daerah tertentu dengan keseimbangan antara aliran masuk dan keluar dan menentukan (secara kasar) efek-efek yang mempengaruhi aliran tersebut (seperti: gaya atau perubahan energi). Metode pertama adalah metode analisa diferensial sedangkan yang kedua adalah metode integral atau *control volume*.

Bagian paling penting pada tahap *pre-processor* yang sangat berpengaruh pada hasil analisis adalah pendefinisian domain komputasi, terutama pengaturan *boundary condition. Boundary conditions* adalah kondisi dari batasan sebuah kontrol volume tersebut. Dalam analisa menggunakan CFD seluruh titik dalam kontrol volume tersebut di cari nilainya secara detail, seperti yang telah di jelaskan di awal bab ini, dengan memanfaatkan nilai-nilai yang telah diketahui pada boundary conditions. Secara umum boundary conditions terdiri dari dua macam, inlet dan oulet. Inlet biasanya didefinisikan sebagai tempat dimana fluida memasuki domain (control volume) yang ditentukan.

Berbagai macam kondisi didefinisikan pada inlet ini mulai dari kecepatan, komposisi, temperatur, tekanan, laju aliran. Sedangkan pada outlet biasanya didefinisikan sebagai kondisi dimana fluida tersebut keluar dari domain atau dalam suatu aplikasi CFD merupakan nilai yang didapat dari semua variabel yang didefinisikan dan diextrapolasi dari titik atau sel sebelumnya.

2. *Processor* (*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 subtitusi 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 memilki formulasi khusus.

Dalam proses *set-up* dan *running* simulasi ada tahapan identifikasi dan formulasi permasalahan aliran dengan pertimbangan fenomena fisika dan kimia. Pemahaman yang cukup baik diperlukan dalam menyelesaikan algoritma penyelesaian numerik. Ada 3 konsep matematika yang digunakan dalam menentukan berhasil atau tidaknya alogaritma (Wilcox, 1998) yaitu :

1. Konvergensi;
2. Konsistensi;
3. Stabilitas*;*

3. *Post-Processor*

Hasil perhitungan CFD dapat disajikan dalam bentuk gambar, grafik dan animasi dengan pola-pola tertentu. Pada tahap ini akan ditampilkan hasil perhitungan yang telah dilakukan pada tahap sebelumya, hasil perhitungan dapat dilihat berupa data numerik dan data visualisasi aliran fluida pada model. Data numerik yang diambil adalah data nilai variabel sifat fluida.

2.8 Teori Gelombang

Dalam studi olah gerak kapal perlu dipelajari terlebih dahulu masalah gelombang. Gelombang yang didefinisikan sebagai perubahan bentuk karena gerakan permukaan air. Selanjutnya setiap gelombang yang dimaksudkan adalah gelombang air laut. Sebelum mempelajari lebih jauh mengenai gelombang, lebih dahulu diperkenalkan hal-hal yang berhubungan dengan gelombang sebagai berikut :

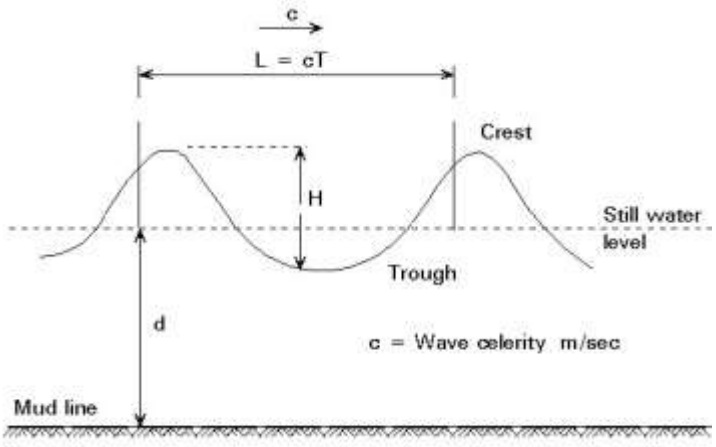
a) Puncak gelombang *(Crest)* adalah titik dimana permukaan air berada pada elevasi tertinggi.
b) Lembah gelombang *(Trough*) adalah titik dimana permukaan air berada pada elevasi terendah.
c) Garis datum adalah garis datar permukaan air (diambil secara statistik) pada

waktu air tenang.

d) Elevasi gelombang *(ζ)* adalah jarak suatu titik pada permukaan gelombang dengan garis datum pada suatu waktu tertentu.
e) Amplitudo gelombang *(ζw)* adalah garis vertikal antara titik tertinggi atau titik terendah dengan garis datum.
f) Panjang gelombang *(λ)* adalah jarak dari puncak (lembah) gelombang dengan puncak (lembah) gelombang berikutnya.
g) Kecepatan gelombang *(V)* adalah jarak yang ditempuh suatu titik per satuan waktu.
h) Frekuensi gelombang *(ω)* adalah banyaknya puncak (lembah) gelombang yang dilalui oleh suatu titik per satuan waktu (Bhattacharyya, 1978)

2.8.1 Gelombang Air Laut

Laut memiliki kondisi yang berbeda-beda di setiap tempat tergantung dari kondisi alam yang mempengaruhinya. Gelombang laut dipengaruhi oleh dalam atau tidaknya suatu perairan. Oleh karena itu bentuk dan sifat gelombang sangatlah kompleks. Gelombang dibedakan menjadi dua macam, yaitu gelombang *sinusoidal* dan gelombang *trochoidal*. Karena jenis gelombang tersebut sangat kompleks maka untuk melakukan perhitungan ilmiah dilakukan pendekatan agar dapat digambarkan sifat dari gelombang yang kita gunakan. Gelombang *sinusoidal* adalah gelombang harmonik yang mengikuti fungsi sinus, bagian puncak dan lembah gelombang mempunyai bentuk yang sama. Sedangkan gelombang *trochoidal* mempunyai puncak gelombang yang runcing dengan lembah gelombang yang datar dan lebih panjang. Jenis gelombang ini lebih sulit diterapkan dalam perhitungan meskipun bentuknya lebih mendekati bentuk gelombang sesungguhnya. (Bhattacharyya, 1978)



Gambar 2.15 Gelombang regular di permukaan laut (Sumber: Bhattacharyya, 1978)

Laut memiliki kondisi yang berbeda-beda di setiap tempat tergantung dari kondisi alam yang mempengaruhinya. Gelombang laut dipengaruhi oleh dalam atau tidaknya suatu perairan. Oleh karena itu, bentuk dan sifat gelombang sangatlah kompleks. Gelombang dibagi menjadi dua jenis, yaitu gelombang *sinusoidal* (biasa disebut *regular wave*) dan gelombang *trochoidal* (biasa disebut *irregular wave*). Karena jenis kedua gelombang tersebut dangat kompleks, maka untuk melakukan perhitungan ilmiah dilakukan pendekatan agar dapat digambarkan sifat dari gelombang yang kita gunakan. Gelombang sinusoidal adalah gelombang harmonik yang mengikuti fungsi sinus, bagian puncak dan lembah gelombang yang runcing dengan lembah gelombang yang datar dan lebih panjang. Jenis gelombang ini lebih sulit diterapkan dalam perhitungan meskipun bentuknya lebih mendekati bentuk gelombang sesungguhnya. (Bhattacharya, 1978)

Gelombang diasumsikan pada perairan dalam sehingga pengaruh dasar (kedalaman) tidak terjadi atau diabaikan. Selain itu, lebar perairan tak terbatas, sehingga pengaruh sisi perairan kecil. Beberapa karakteristik gelombang harmonik sinusoidal antara lain dirumuskan sebagai berikut:

1) Panjang gelombang (L_w)

$$\boldsymbol{L_w} = \frac{2\pi V_w^2}{\sqrt{C_f}} = \frac{2\pi g}{\omega_w^2} = \frac{g T_w^2}{2\pi} \qquad (2.1)$$

2) *Wave velocity* (V_w)

$$\boldsymbol{V_w} = \frac{L_w}{T_w} = \frac{g}{\omega_w} = \left(\frac{gL_w}{2\pi}\right)^{3/2} \quad (2.2)$$

3) *Wave number* (k)

$$\boldsymbol{k} = \frac{2\pi}{L_w} = \frac{\omega_w^2}{g} = \frac{g}{V_w^2} = \frac{4\pi^2}{gT_w^2} \quad (2.3)$$

4) Periode gelombang (T_w)

$$\boldsymbol{T_w} = \sqrt{\frac{2\pi L_w}{g}} \quad (2.4)$$

2.8.2 Gelombang Regular dan Irregular

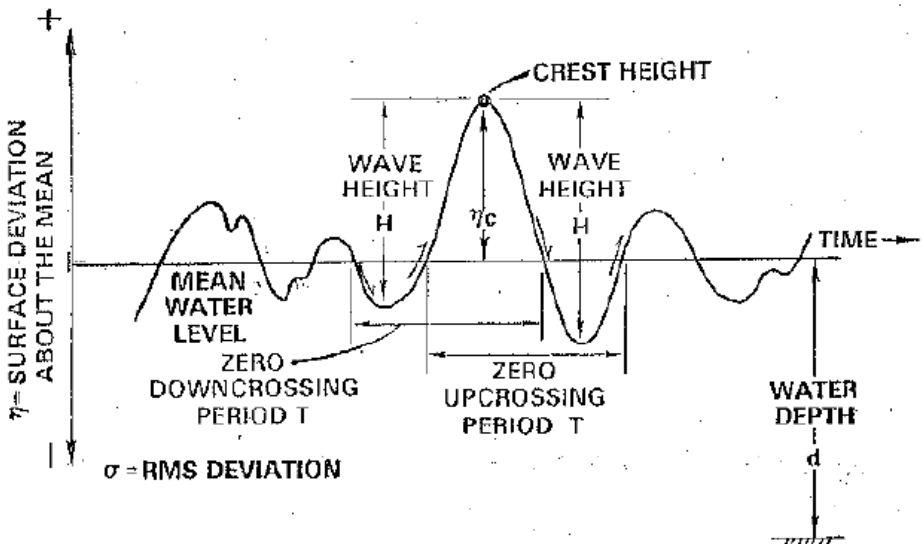
Gelombang sebagaimana halnya dengan fluida dinamis yang lain dapat dipandang sebagai aliran fluida cair yang mempunyai pola yang khas. Perumusan yang paling sederhana dari gelombang laut adalah dalam bentuk osilasi sinusoidal, seperti yang diperkenalkan oleh Airy (1984). Teori ini didasarkan pada asumsi bahwa tinggi gelombang adalah relatif kecil bila dibandingkan dengan panjangnya ,ataupun kedalaman perairan dimana gelombang berada.

Gelombang regular merupakan gelombang osilasi berulang yang beraturan. Regular wave atau biasa disebut sinusoidal wave memiliki bentuk simetri antara lembah dan puncak gelombang. Puncak gelombang dideffinisikan sebagai titik dimana permukaan air memiliki ketinggian maksimum. Sedangkan Lembah gelombang adalah titik terendah dari permukaain air pada gelombang. Jarak vertikal perbedaan antara puncak gelombang dan lembah gelombang disebut amplitudo gelombang (ζa).

Jarak horizontal tiap puncak atau lembah gelombang disebut panjang gelombang (Lw). Pada gelombang regular puncak gelombang akan bergerak ke kanan berdasarkan waktu. Jarak yang ditempuh puncak gelombang per detik disebut dengan kecepatan gelombang (Vw). Jumlah puncak gelombang yang melewati titik tertentu dalam 1 sekon disebut dengan frekuensi karakteristik (f),

yang besarnya sama dengan kecepatan gelombang dibagi dengan panjang gelombangnya.

Gelombang yang mempengaruhi gerakan kapal di laut secara umum merupakan gelombang irregular. Tidak ada 2 gelombang yang memiliki tinggi yang sama pada permukaan laut dengan kecepatan berbeda dan arah yang berbeda, tetapi mempelajari karakteristik dari gelombang regular yang ideal juga perlu dipelajari.



Gambar 2.16 Root-mean-Square (RMS), Skewness and Kurtosis
Ochi (1998) Ocean Waves

Gelombang regular tidak pernah terjadi pada kondisi laut sebenarnya, walaupun gelombang ini bisa dibuat pada towing tank untuk menganalisa seakeeping model kapal. Gelombang irregular didasarkan pada asumsi bahwa gelombang ini dihasilkan dengan cara menambahkan atau mengalikan kelompok gelombang regular. Jadi sudah jelas bahwa karakteristik gelombang regular memiliki pengaruh besar dalam mempelajari perilaku gerakan kapal pada kondisi laut walaupun gelombang regular tidak pernah terjadi di laut.

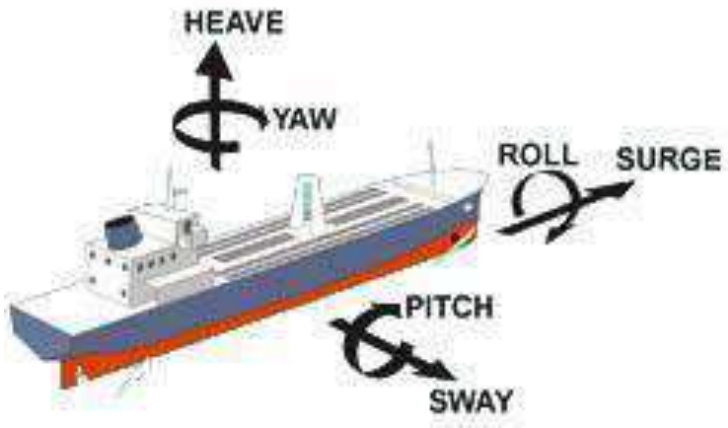
2.9 Teori *Seakeeping*

Gerakan kapal laut lepas selalu mempunyai dan menimbulkan masalah bagi para perancang kapal. Hal ini merupakan tanggung jawab mereka untuk menjamin bahwa kapal tersebut tidak hanya aman jika berlayar di laut yang kondisi

cuacanya relatif tenang tetapi juga harus menjamin bahwa kapal tersebut juga mampu berlayar pada kondisi cuaca yang buruk, dimana dalam keadaan tersebut kapal mengalami penurunan fungsi dari sistem-sistem kerjanya. Untuk mengetahui kondisi tersebut harus dilakukan analisa terhadap perilaku kapal. Perkembangan dari percobaan mengenai prilaku kapal dilaut di mulai dengan pesat pada pertengahan tahun 1950, dan pada saat itu digunakan penerapan dari teori hidrodinamika ataupun secara percobaan model eksperimen Rawson, K.J (1984). Perkembangan tersebut merupakan suatu langkah penting yang dapat di capai untuk menuju pengertian atau pengetahuan yang lebih baik tentang masalah dan cara pemecahan selanjutnya. Masalah gerak kapal ini dapat diselidiki dengan empat macam cara yang berbeda yaitu :

1. Analisa berdasarkan teori.
2. Eskperimen dengan menggunakan model percobaan.
3. Empiris dari data-data statistik.
4. *Full scale test/ sea trial* dengan menggunakan kapal yang sebenarnya.

Ilmu yang mempelajari masalah gerak kapal ini disebut *Seakeeping. Seakeeping* adalah gerakan kapal yang dipengaruhi oleh gaya-gaya luar yang disebabkan oleh kondisi air laut . Secara sederahana, *seakeeping* suatu kapal diilustrasikan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Gambaran Gerakan Seakeeping (Rudiyansah, 2013)

Macam-macam *Seakeeping* kapal antara lain :

1. *Surging;* adalah gerakan translasi sepanjang sumbu X.

2. *Rolling;* adalah gerakan kapal yang memutari sumbu X.
3. *Swaying;* adalah gerakan translasi kapal yang terjadi ketika kapal bergerak sepanjang sumbu Y.
4. *Pitching;* adalah gerakan kapal yang memutari sumbu Y.
5. *Heaving;* adalah gerakan kapal yang sepanjang sumbu Z.
6. *Yawing;* adalah gerakan kapal memutari sumbu Z.

2.9.1 Gerakan Heaving

Pada *heaving,* gaya ke bawah akibat dari berat kapal membuat kapal tercelup ke air lebih dalam dan kembali ke awal hingga diperoleh kesetimbangan kapal. Ketika gaya *buoyancy* lebih besar akibat kapal tercelup, kapal akan bergerak secara vertikal ke atas, ketika posisi kapal telah setimbang lantas tidak berhenti akan tetapi tetap naik dikarenakan ada pangaruh momentum. Selanjutnya kejadiannya akan berulang. Pada kondisi *heaving* ini kapal hanya bergerak secara vertikal pada satu arah, sehingga pendekatan dalam perhitungan kondisi *heaving* ini adalah dengan menggunakan hukum Newton ke 2.

Heaving memiliki persamaan gerak sebagai berikut (Bhattacharya, 1978):

$$A\,.\,\ddot{Z} + B\,.\dot{Z} + C\,.Z = F_O\,.cos\,\omega_e t \qquad (2.10)$$

Terdapat 4 elemen penting yang terdapat pada persamaan gerakan kapal,

1) Gaya inersia, di mana saat kapal mengalami gerakan osilasi digambarkan dalam persamaan,

   $$F_a(y) = -A\,.\,\ddot{Z} \qquad (2.11)$$

   Di mana A adalah *virtual mass* atau massa kapal ditambah dengan *added mass* $\left(A_n = C\,.\frac{\rho\pi B_n}{8}\right)$ dan $\ddot{Z} = \frac{d^2z}{d^2t}$ adalah percepatan ke arah vertikal.

2) *Damping force* adalah gaya yang selalu menjadi *resistance* ke model seperti persamaan,

   $$F_b(y) = B\,.\,\dot{Z} \qquad (2.12)$$

Di mana B adalah konstanta *damping* atau peredaman $\left(B_n = \frac{A\rho g^2}{\omega_e^3}\right)$ dan $\dot{Z} = \frac{dz}{dt}$ atau kecepatan.

3) *Restoring force* atau konstanta *spring*, di mana selalu membawa kapal kepada keadaan yang konstan,

$$F_c(y) = C \, . Z \tag{2.13}$$

Di mana C adalah konstanta *restoring* ($C = \rho \, g \, A_{wp}$, A adalah beban pada garis air) dan Z adalah displacement pada pusat gravitasi (KG) kapal.

4) *Exciting force* atau *encountering force*, yang mana bekerja pada massa kapal,

$$F = F_O \cos \omega_e t \tag{2.14}$$

Di mana F_O adalah amplitudo dari encountering force, ω_e adalah encountering frecuency dan t adalah waktu.

2.9.2 Gerakan *Pitching*

Kondisi gerakan *pitching* bergerak secara rotasional sehingga pendekatan perhitungan yang dapat diterapkan adalah hukum Euler. Konstruksi benda apung mengalami *simple harmonic motion* yang berupa gerakan dalam arah sumbu transversal (x) maupun gerakan dalam arah sumbu longitudinal (y), apabila benda apung tersebut mengalami perpindahan posisi keseimbanganya dan kemudian dilepaskan atau pada benda apung tersebut dikenakan suatu kecepatan awal sehingga bergerak menjauh dari posisi keseimbanganya. Pada kondisi pergerakan angular seperti benda apung yang mengalami gerakan *rolling* atau *pitching*, maka perhitungan dan analisa yang sangat berperan adalah gaya momen dibandingkan dengan besar gayanya sendiri.

Seperti halnya pada gerakan *heaving*, kapal menjalani gerakan harmonis sederhana pada koordinat *transversal axis* maupun *longitudinal axis.* Gerakan tersebut akan berpengaruh *initial velocity* dari kesetimbangan posisi. Sehingga perlu untuk memperhitungkan momen dari gaya.

Pitching memiliki persamaan gerak sebagai berikut (Bhattacharya, 1978):

$$A\,.\,\frac{d^2\theta}{dt^2} + B\,.\frac{d\theta}{dt} + C\,.\theta = M_0\,.cos\,\omega_e t \qquad (2.15)$$

1) Momen inersia, di mana saat kapal mengalami gerakan osilasi digambarkan dalam persamaan,

$$M_a(y) = -A\,.\,\frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (2.16)$$

Di mana A adalah *virtual mass* atau massa kapal ditambah dengan *added mass* dan $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ adalah percepatan angular untuk *pitching*.

2) *Damping moment* adalah momen yang selalu menjadi *resistance* ke model seperti persamaan,

$$M_b(y) = B\,.\,\frac{d\theta}{dt} \qquad (2.17)$$

Di mana B adalah konstanta *damping* atau peredaman dan $\frac{d\theta}{dt}$ atau kecepatan angular untuk *pitching*.

3) *Restoring moment* atau konstanta *spring*, di mana selalu membawa kapal kepada keadaan yang konstan,

$$M_c(y) = C\,.\theta \qquad (2.18)$$

Di mana C adalah konstanta pemulih atau *restoring* dan $\boldsymbol{\theta}$ adalah pergeseran angular.

4) *Exciting moment* atau *encountering moment*, yang mana bekerja pada massa kapal,

$$M = M_O\,cos\,\omega_e t \qquad (2.19)$$

Di mana M_O adalah amplitudo dari *encountering moment*, ω_e adalah *encountering frecuency* dan t adalah waktu.

2.9.3 *Response Amplitude Operator* (RAO)

Gerakan suatu struktur pada gelombang regular disebut sebagai *Response Amplitude Operator* (RAO). RAO merupakan fungsi amplitudo struktur yang bergerak di gelombang regular per unit amplitudo gelombang. Oleh karena itu, RAO akan berbeda untuk tiap jenis gerakan. RAO dapat diperoleh dari tes model pada towing tank, perhitungan analitis, maupun simulasi dengan perangkat lunak.

Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge*, *sway* dan *heave*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan kapal dengan amplitudo gelombang.

$$RAO = \frac{\zeta k_0}{\zeta_0}\left(\frac{m}{m}\right) \tag{2.20}$$

Sedangkan, respon gerakan RAO untuk gerakan rotasi *(roll*, *pitch*, dan *yaw)* merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni perkalian antara angka gelombang (*k)* dengan amplitudo gelombang.

$$RAO = \frac{\zeta k_0}{\mathrm{k}_w \zeta_0} = \frac{\zeta k_0}{(\frac{\omega^2}{g})\zeta_0}\left(\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{rad}}\right) \tag{2.21}$$

RAO dapat diperoleh dari tes model pada *towing tank*, perhitungan analitis, maupun simulasi numerik dengan perangkat lunak. Rangkuman rumus umum RAO untuk 6 derajat kebebasan dapat dilihat pada

Tabel 2.2 Rumus Respon Amplitude Operator (RAO) (Sholihin, 2015)

No.	Gerakan	RAO	No.	Gerakan	RAO
1	*Surge*	$(x_a/\zeta_a)^2$	**4**	*Roll*	$(\Phi_a/\zeta_a)^2$
2	*Sway*	$(y_a/\zeta_a)^2$	**5**	*Pitch*	$(\Theta_a/\zeta_a)^2$
3	*Heave*	$(z_a/\zeta_a)^2$	**6**	*Yaw*	$(\psi_a/\zeta_a)^2$

Di mana:

ζ_a : Amplitudo gelombang

x_a : Amplitudo gerakan *surge*

y_a : Amplitudo gerakan *sway*

z_a : Amplitudo gerakan *heave*

Φ_a : Amplitudo gerakan *roll*

Θ_a : Amplitudo gerakan *pitch*

ψ_a : Amplitudo gerakan *yaw*

RAO disebut juga sebagai *transfer function* karena dapat digunakan untuk mentransformasikan beban gelombang menjadi respon spektrum. Pada gelombang yang panjang, nilai frekuensi gelombang sangat kecil dan efek dinamis yang terkait dengan *added mass* dan *damping* secara virtual dapat diabaikan. Jadi eksitasi dan reaksi yang dialami oleh kapal sebagian besar disebabkan oleh perubahan *buoyancy* kapal saat gelombang melewati lambung kapal.

2.9.4 Spektrum Gelombang

Suatu gelombang timbul karena adanya angin. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin lama angin berhembus dan semakin luar area hembusan angin, maka gelombang yang akan timbul juga semakin besar. Spektrum gelombang diperlukan dalam proses merancang kapal maupun bangunan lepas pantai, dimana untuk dapat memperkirakan seberapa besar gelombang maksimum yang ditimbulkan dimana kapal beroperasi atau di daerah tempat bangunan lepas pantai akan dibangun.

Pada acara *International Towing Tank Conference* (ITTC) ke-14 pada tahun 1975 di kota Ottawa, Canada, Mirokhin dan Kholodilin telah mengajukan suatu formula baru untuk spektra gelombang, dengan mempertimbangkan perkembangan data mutakhir pada saat itu. Para peserta yang terdiri dari pakar hidrodinamika dari berbagai laboratorium hidrodinamika sedunia yang tergabung dalam ITTC kemudian menyetujui formulasi tersebut untuk dijadikan standar utama dalam berbagai pengujian perilaku gerakan kapal di gelombang acak. ITTC kemudian berkomunikasi dengan *International Ship Structure Congress (ISSC)*, dan sebagai hasilnya kedua lembaga sepakat memakai formulasi tersebut. Oleh

karenanya formulasi ini kemudian dikenal sebagai spektra ITTC/ISSC, dengan bentuk:

$$S_\zeta(\omega) = \frac{0.0081.g^2}{\omega^5} \text{ x } \exp\left(\frac{-3.11}{H_S^2 \,.\, \omega^4}\right) \quad (2.4)$$

Dimana :

$S_\zeta(\omega)$ = Spektrum Gelombang

g = gravitasi

ω = frekuensi

Hs = tinggi gelombang signifikan

Hal yang sangat menarik adalah meskipun secara konstanta dalam persamaan berbeda, namun ternyata hasil kurva spektra dari ITTC/ISSC – 1975 ini sama dengan Spektrum Bretschneider. (Djatmiko, 2012). Sebuah gelombang regular memuat energi yang diidentifikasikan pada setiap unit atau satuan luas permukaannya ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:

$$\frac{dE_T}{dA} = \frac{dE_P + dE_K}{dA} = \frac{1}{2}\,\rho g \zeta_o^2 \quad (2.26)$$

Di mana:

dE_T = Energi total

dA = Luas permukaan

dE_P = Energi potensial

dE_K = Energi kinetik

ζ_o = Amplitudo gelombang

Mengacu pada hal ini, maka energi yang dimuat dalam sebuah gelombang acak *(irregular wave)* merupakan penjumlahan energi yang dikontribusikan oleh semua komponen gelombang regulernya. Adapun energi yang dikontribusikan oleh komponen gelombang reguler ke-n adalah:

$$E_n = \frac{1}{2}\,\rho g \zeta_{no}^2 \qquad (2.27)$$

Penjumlahan energi dari seluruh komponen gelombang regular per satuan luas permukaan dapat diekspresikan sebagai kepadatan spektrum gelombang atau lebih dikenal dengan istilah spektrum gelombang. (Ahadyanti, 2015)

Dengan semakin meningkatnya intensitas studi yang dilakukan mengenai respon gerak pada gelombang acak telah banyak dihasilkan spektrum gelombang yang beragam sesuai dengan kondisi lingkungan yang dianalisis. Jenis-jenis spektrum gelombang yang biasa digunakan dalam perhitungan adalah model *Pierson-Moskowitz* (1964), ISSC (1964), Scott (1965), Bretschneider (1969), JONSWAP (1973), ITTC (1975) dan Wang (1991).

Spektrum JONSWAP didasarkan pada percobaan yang dilakukan di *North Sea*. Persamaan spektrum JONSWAP dapat dituliskan dengan memodifikasi persamaan spektrum *Pierson-Moskowitz*, menjadi:

$$Sj(\omega) = A_\gamma\, S_{pm}(\omega)\, \gamma^{\exp\left(-0{,}5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \qquad (2.28)$$

Di mana:

$S_{pm}(\omega)$ = Spektra *Pierson-Moskowitz*

$$= \frac{5}{16} Hs^2\, \omega_p^4\, \omega^{-5} exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \qquad (2.29)$$

γ = Parameter puncak (*peakedness parameter*); untuk Laut Utara mempunyai harga 3,3

σ = Parameter bentuk (*shape parameter*) untuk $\omega \leq \omega_o = 0{,}07$ dan $\omega \geq \omega_o = 0{,}09$

A_γ = *Normalizing factor = 1 – 0.287 ln (γ)*

ω = *Wave frequency* (rad/sec)

ω_p = *Angular spectralpeak frequency* (rad/sec)

Hs = Tinggi gelombang signifikan (m)

Tp = Periode puncak (s)

Formulasi spektra JONSWAP akhir-akhir ini banyak dipakai dalam perancangan dan analisis bangunan lepas pantai yang dioperasikan di Indonesia. Hal ini cukup dapat dimengerti karena perairan Indonesia di mana kebanyakan bangunan lepas pantai untuk kegiatan migas dioperasikan merupakan perairan kepulauan atau perairan tertutup. Namun dari sejumlah kajian, untuk perairan Indonesia disarankan memakai parameter γ (gamma) yang lebih kecil, sekitar 2,0 sampai 2,5. Hal ini pada intinya adalah untuk mengurangi dominasi energi yang dikontribusikan oleh frekuensi gelombang tertentu saja. (Djatmiko, 2012)

2.9.5 Respon Spektrum pada Gelombang Acak (*Irregular Wave*)

Gelombang acak merupakan superposisi dari komponen-komponen pembentuknya berupa gelombang sinusoidal dalam jumlah yang tak terhingga. Tiap-tiap komponen gelombang memiliki tingkat energi tertentu yang dikontribusikan dan secara keseluruhan dapat diakumulasikan dalam bentuk spektrum energi gelombang. (Djatmiko, 2012)

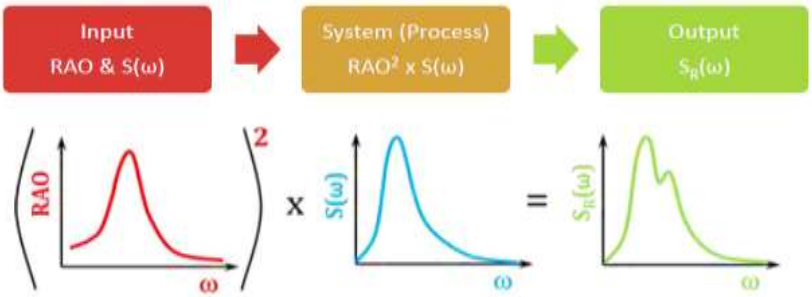
Respon spektrum pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga kuadrat dari *Response Amplitude Operators* (RAOs) dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung tersebut beroperasi. Persamaan spektrum respon secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S_R = [RAO\ (\omega)]^2\ S(\omega) \qquad (2.30)$$

Di mana:

S_R = Spektrum respons (m^2-sec)
$S\ (\omega)$ = Spektrum gelombang (m^2-sec)
RAO (ω) = *Transfer function*
ω = Frekuensi gelombang (rad/sec)

Seperti pada proses sistem elektronik, persamaan di atas dapat diilustrasikan secara grafis pada *Gambar 2.18*, di mana input berupa S(ω) dan RAO yang masuk ke dalam kotak proses, akan menghasilkan spektra respons SR(ω). Proses seperti ini secara umum dikenal sebagai analisis spektral atau *spectral analysis*. (Djatmiko, 2012)



Gambar 2.18 Transformasi Spektrum Gelombang menjadi Respon Spektrum (Ahadyanti, 2015)

Setelah spektrum respon diperoleh maka intensitas gerakan dapat dihitung sebagai fungsi luasan di bawah kurva spektrum respon atau merupakan variasi elevasi gerakan, yaitu sebagai berikut:

$$m_{ro} = \int_0^\infty S_\zeta\ (\omega) d\omega \tag{2.31}$$

$$m_{r2} = \int_0^\infty \omega^2 S_\zeta\ (\omega) d\omega \tag{2.32}$$

$$m_{r4} = \int_0^\infty \omega^4 S_\zeta\ (\omega) d\omega \tag{2.33}$$

Varian *mr0* diistilahkan sebagai luasan di bawah kurva spektra respons, momen kedua luasan di bawah kurva spektra *mr2*, dan momen keempat luasan di bawah kurva spektra respons *mr4*. Dengan demikian momen spektra dapat diberikan dalam bentuk umum (Djatmiko, 2012):

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S_\zeta\ (\omega) d\omega \tag{2.34}$$

Berdasarkan persamaan 2.31 jika diturunkan akan didapatkan harga-harga statistik gerakan sebagai fungsi varian elevasi gerakan *mr0*, yaitu misalnya sebagai amplitudo gerakan rata-rata yang dihitung sebagai berikut:

$$R_{1/2} = 2{,}50\ \sqrt{m_{r0}} \tag{2.35}$$

Harga amplitudo gerakan signifikan dihitung sebagai:

$$R_{1/3} = 4{,}00 \sqrt{m_{r0}} \quad (2.36)$$

Di samping itu kemudian juga dapat diturunkan korelasi antara tinggi gelombang 1/10 tertinggi dengan tinggi gelombang signifikan seperti di bawah ini:

$$R_{1/10} = 5{,}10 \sqrt{m_{r0}} \quad (2.37)$$

2.10 *Software* Analisis *Seakeeping*

Pada penelitian ini analisis *seakeeping* dilakukan dengan menggunakan bantuan *software*. Pemecahan masalah *seakeeping* dengan *software* ini dilakukan dengan teori difraksi-radiasi 3-Dimensi berdasarkan persamaan gerak dengan 6 derajat kebebasan yang dapat dituliskan sebagai berikut (ANSYS, Inc., 2014):

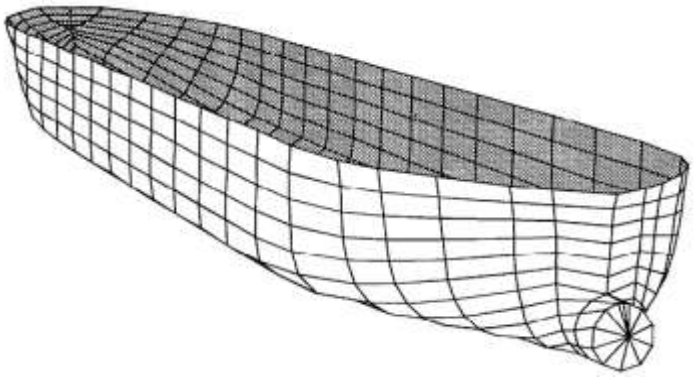
$$\left[-\omega_w^2 \left(M_s + M_a\right) - i\omega_e C + K_{hys}\right][X_{jm}] = [F_{jm}] \quad (2.24)$$

Di mana:

ω_w = Frekuensi gelombang
Ms = Matriks 6x6 dari massa struktur
Ma = Matriks 6x6 dari massa tambahan
ω_e = Frekuensi *encountering*
C = Koefisien *damping*
K_{hys} = *Restoring force motions*
F_{jm} = *Exciting force*

2.10.1 3D *Diffraction Theory*

Metode ini digunakan untuk menganalisa gerakan struktur dengan bentuk sembarang, baik terapung bebas maupun dengan *mooring system.* Permukaan struktur dibagi dalam N panel yang cukup kecil sehingga diasumsikan gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja adalah sama di tiap panel, seperti ditunjukkan pada gambar II. 1 di bawah ini.



Gambar 2.19 Lambung Kapal dibagi menjadi beberapa Panel (Sholihin, 2015)

Selanjutnya, sebuah persamaan dibentuk sehingga kecepatan potensial dapat diperoleh. Pada kondisi tenang, persamaan kecepatan potensial total *Φ* akibat pengaruh kecepatan *U* adalah sebagai berikut:

$$\Phi(x,y,z;t) = [-U_x + \phi_S(x,y,z)] + \phi_T(x,y,z)e^{-i\omega_e t} \quad (2.25)$$

Di mana x, y dan z menyatakan arah (sistem koordinat). *Wave exciting force* yang bekerja pada tiap panel dihitung dengan formula berikut:

$$F_{kj} = \rho \int_{S_B}^{0} \left[\omega_e^2 X_j(\phi_{jc} + i\phi_{js}) + i\omega_e U X_j \frac{\partial}{\partial_j}(\phi_{jc} + i\phi_{js})\right] n_k \, ds \quad (2.26)$$

Sehingga gerak struktur dapat dihitung dengan persamaan matriks berikut:

$$X_j^0 = F_k^0 \left[\sum_{j=1}^{6} -\omega_e^2 (M_{kj} + A_{kj}) - i\omega_e B_{kj} + C_{kj}\right]^{-1} \quad (2.27)$$

Di mana:

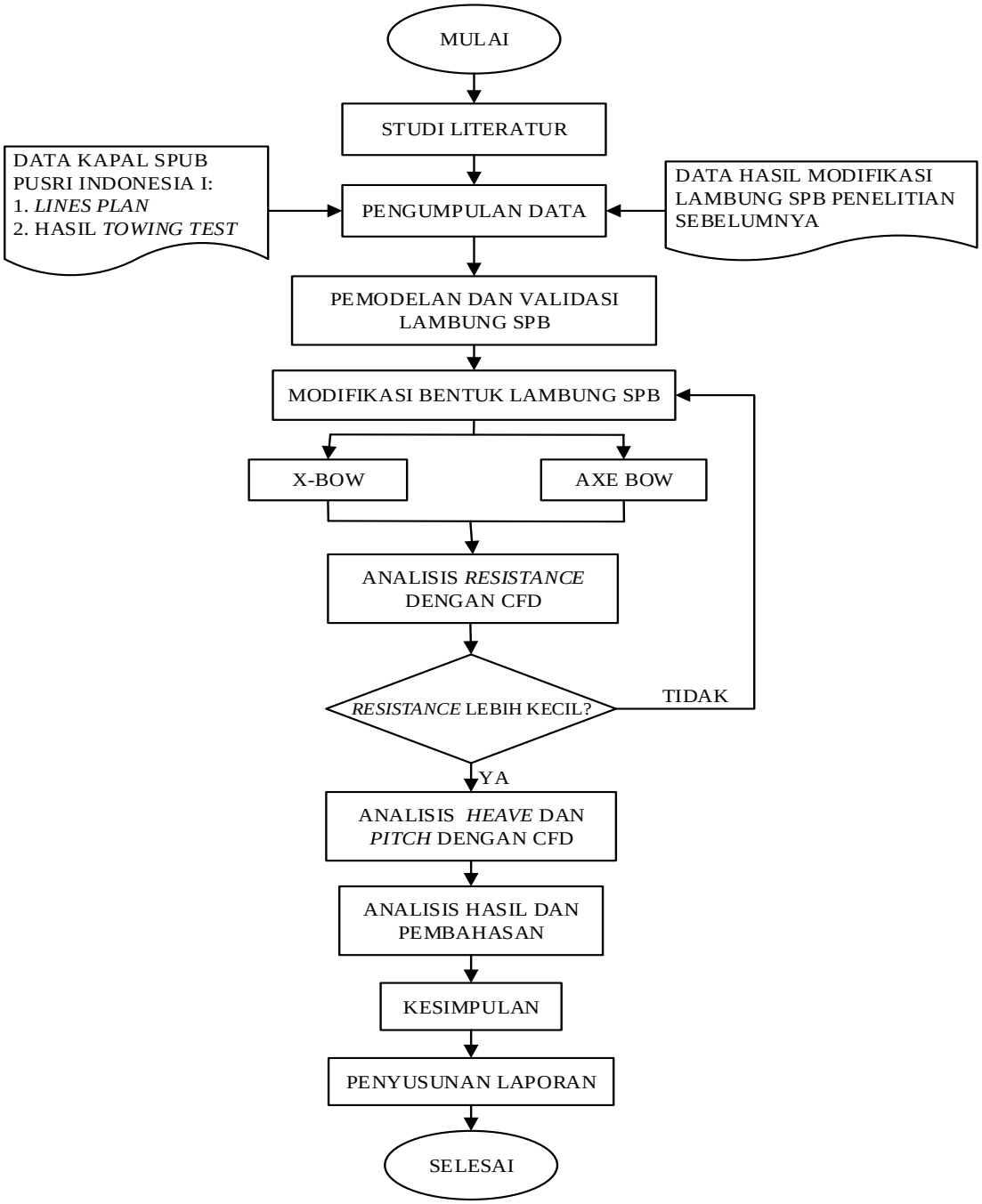
X_j : Amplitudo gerakan struktur
M_{kj} : Matriks insersia struktur
A_{kj} : Matriks koefisien *added mass*
B_{kj} : Matriks koefisien *damping*
C_{kj} : Koefisien inersia statis
F_k : Amplitudo *wave exciting force*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini dibuat sebagai landasan operasional agar pelaksanaan penelitian lebih skematis dan struktur (Gambar 3.1).



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

3.2.1 Studi Literatur

Sebelum penelitian dimulai dilakukan pengumpulan dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan dari berbagai seumber, seperti; jurnal, penelitian sebelumnya, pendapat para ahli, internet dan lain-lain.

3.2.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data yang diperlukan untuk menunjang penelitian ini, yaitu data kapal *Self Propelled Urea Barge* (SPUB) Pusri Indonesia I dan hasil modifikasi lambung SPB dari penelitian-penilitian sebelumnya, antara lain penelitian Anggara (2013) dan Ahadyanti (2014).

3.2.3 Pembuatan dan Validasi Model

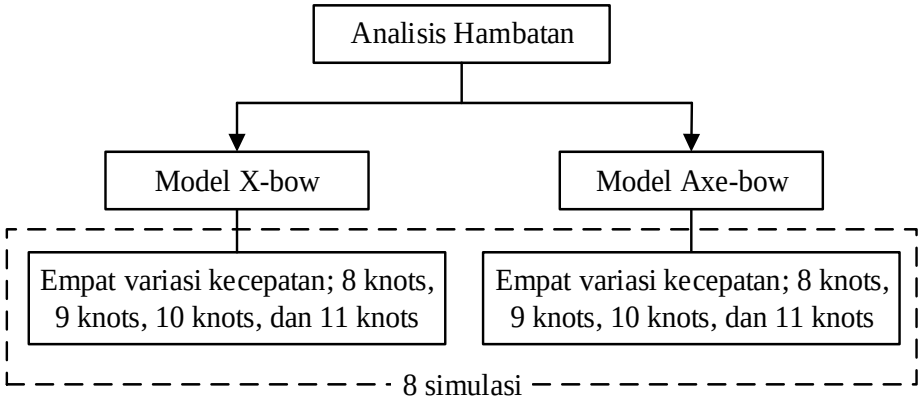
Setelah data kapal SPB didapatkan selanjutnya dilakukan pemodelan ulang lambung SPB. Model yang dihasilkan akan divalidasi terhadap hasil uji tarik dan hasil validasi penelitian sebelumnya dengan cara simulasi CFD. Validasi ini dinyatakan valid jika selisih hambatan dari pemodelan ulang lambung SPB ini dengan hasil uji tarik atau eksperimen dan penelitian sebelumnya kurang dari 5% (Bertram, 2000).

Evaluasi hambatan total menggunakan 2 medium, yaitu 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 (Anggara, 2013).

3.2.4 Modifikasi *Hull Form*

Modifikasi *hull form* SPB difokuskan pada bagian haluan dengan batasan *displacement* dan LCB kapal. Bentuk haluan SPB dimodifikasi dengan bentuk *X-bow* dan *Axe-bow* untuk dilakukan analisis lebih lanjut apakah *hull form* hasil modifikasi saat ini lebih efektif dalam meningkatkan performa kapal dibandingkan *hull form* SPB awal.

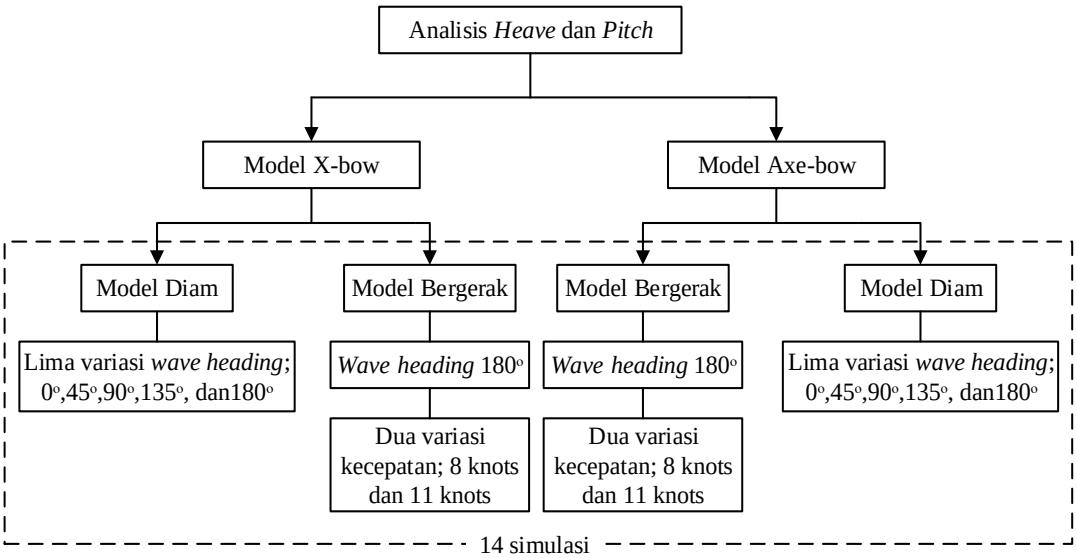
3.2.5 Analisis Hambatan



Gambar 3.2 Simulasi Analisis Hambatan

Hasil modifikasi *hull form* yang baru akan dilakukan analisis hambatan nya dengan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) menggunakan *commercial software* untuk analisis hambatan. Sedangkan analisis *pitching* dan *heaving* akan dilakukan pada *commercial software* untuk analisis *seakeeping*. Simulasi hambatan kapal dengan CFD dilakukan pada 4 (empat) variasi kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots.

3.2.6 Analisis *Seakeeping*



Gambar 3.3 Simulasi Analisis Seakeeping

Analisis *seakeeping* dilakukan pada gelombang irregular dan hanya untuk gerakan *heave* dan *pitch* saja. Simulasi akan dilakukan pada kondisi model diam dan model bergerak dengan kecepatan maju (*forward speed*). Model diam akan dianalisis pada 5 (lima) variasi sudut hadap gelombang (*wave heading*); 0^o (*following sea*), 45^o, 90^o (*beam sea*), 135^o dan 180^o (*heading sea*). Sedangkan model bergerak disimulasikan hanya pada arah gelombang 180^o dengan 2 (dua) vasiasi kecepatan, 8 knots dan 11 knots.

3.2.7 Analisis Hasil dan Pembahasan

Dari analisis hambatan dan *seakeeping* hasil modifikasi *hull form* yang baru akan dibandingkan dengan bentuk *hull form* asli, sehingga dapat diketahui seberapa besar dan efektifmya pengaruh modifikasi bentuk haluan *X-bow* dan *Axe-bow* pada kapal SPB dalam meningkatkan performa hidrodinamika. Terutama menurunkan hambatan total.

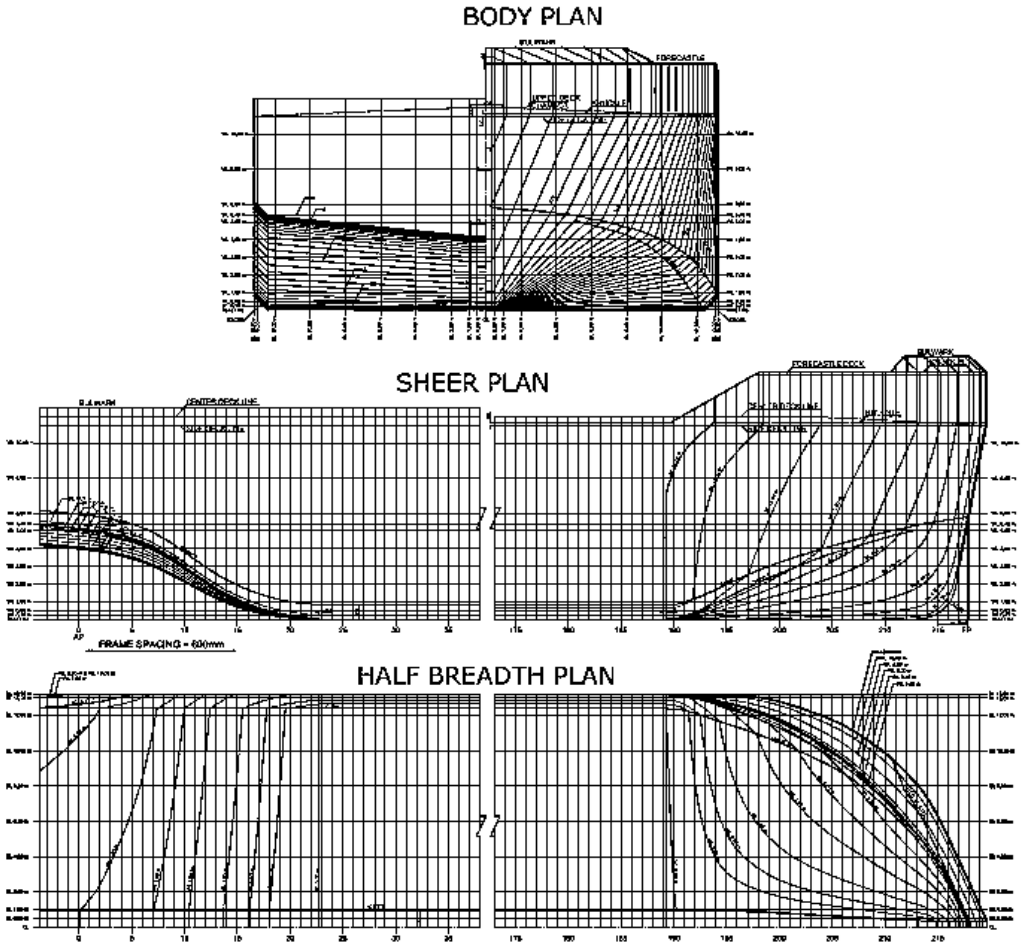
3.2.8 Penyusunan Laporan

Peyusunan laporan merupakan tahap terakhir pada penelitian ini dimana laporan yang dibuat sesuai dengan SOP yang ditentukan.

BAB 4
PEMBUATAN MODEL DAN VALIDASI

4.1 Pembuatan Model Kapal

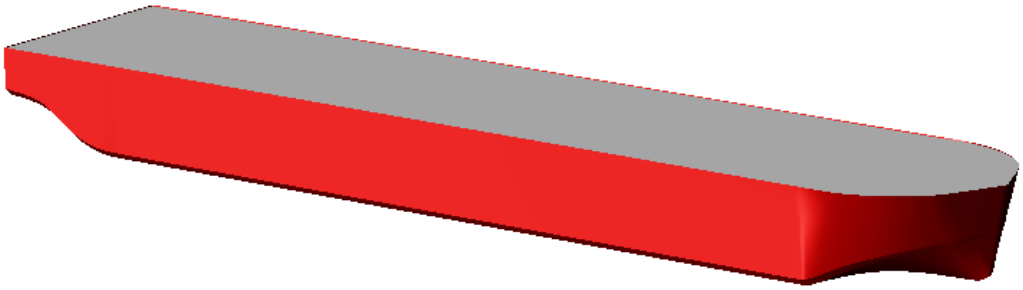
Tahap pertama yang harus dilakukan dalam proses modifikasi kapal adalah pembuatan model lambung kapal asli dari data *Lines Plan* kapal yang digunakan sebagai studi kasus. Lambung kapal yang digunakan sebagai studi kasus pada penelitian ini adalah lambung kapal SPUB Pusri Indonesia I dengan data ukuran utama seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Anggara (2013) dan Ahadyanti (2014), model lambung dibuat dengan skala 1:43.5. Namun, pada penelitian ini model lambung akan dibuat sesuai ukuran kapal sebenarnya 1:1.



Gambar 4.1 *Lines Plan* SPUB Pusri Indonesia I

Tabel 4.1 Data Ukuran Utama Kapal Asli dan Model

Dimensi	Kapal Asli	Model
LOA (m)	134,00	134,00
Lwl (m)	132,90	132,90
B (m)	26,40	26,40
H (m)	11,00	11,00
T (m)	5,40	5,40
WSA (m^2)	4580,64	4597,15



Gambar 4.2 Hasil Pembuatan Model Lambung Kapal

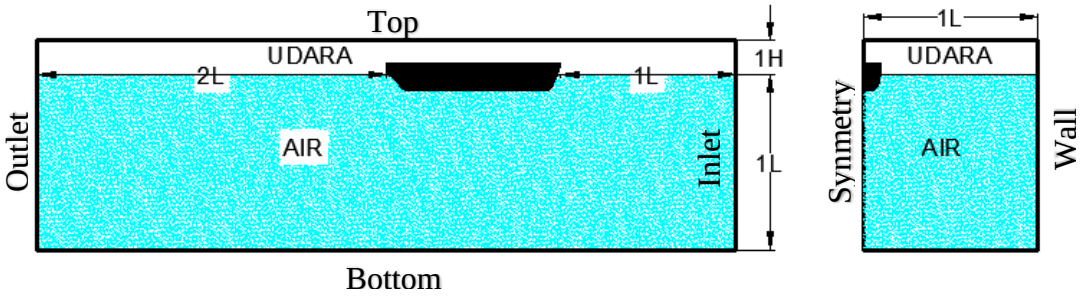
Pembuatan model lambung SPB dilakukan dengan bantuan *software Maxsurf Modeler for Student.* Dari model lambung yang dihasilkan selanjutnya divalidasi dengan cara menghitung hambatannya dan dibandingkan dengan hasil hambatan dari uji tarik atau *towing test*. Pada penelitian ini perhitungan hambatan dilakukan dengan menggunakan metode CFD. Pada analisis hambatan dengan menggunakan CFD model harus dibagi menjadi grid-grid/elemen atau disebut proses *meshing*.

4.2 *Meshing* dan Domain Komputasi

Pembuatan *meshing* dilakukan dengan cara membagi geometri model ke dalam elemen-elemen kecil (segitiga, tetra/mixed, hexa-dominant) yang disebut *cell*. Gabungan dari *cell-cell* tersebut membentuk satu kesatuan yang disebut *mesh* atau *grid* karena gabungan dari elemen-elemen tersebut membentuk seperti jala. Sebelum dilakukan proses *mesihing*, model 3D lambung SPB hasil pemodelan dari Maxsurf harus di-*export* ke dalam bentuk file .igs terlebih dahulu agar dapat terbaca di *software* CFD.

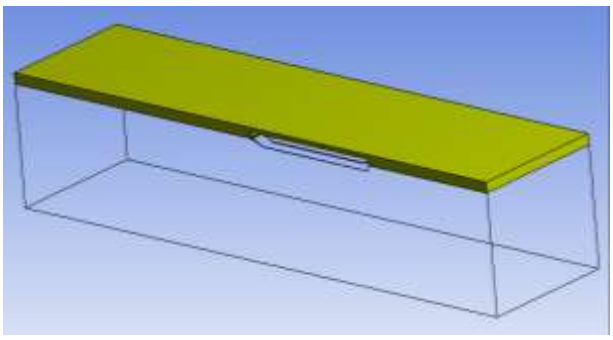
Seletah model berhasil di-*export* selanjutnya dilakukan pembuatan batas domain komputasi berupa *surface* berbentuk persegi panjang yang mengelilingi objek atau kapal dan diberi batasan (*boundary condition*). Menurut ITTC (*International Towing Tank Conference*) simulasi CFD untuk analisis *resistance* domain komputasi dapat dibuat setengahnya dengan menerapkan *boundary* jenis *symmetry* pada bagian tengah objek. Tujuannya adalah untuk mengurangi jumlah grid menjadi setengahnya dan mempercepat proses simulasi. Namun, jika spesifikasi komputer yang digunakan cukup tinggi dan memadai maka sebaiknya domain komputasi dibuat penuh untuk menghindari kemungkinan terjadinya bagian geometri yang hilang sehingga hasil yang didapatkan benar-benar akurat.

Jarak *boundary condition* pada simulasi ini diatur berdasarkan ketentuan *International Towing Test Conference* (ITTC, 2014), dimana jarak *upstream* atau *inlet* dibuat kira-kira satu kali panjang kapal ($1L_{pp}$) dari haluan dan jarak *downstream* atau *outlet* dibuat kira-kira dua kali panjang objek ($2L_{pp}$) dari buritan. Sedangkan batas samping dibuat $1L_{pp}$ dari batas *symmetry* dan batas bawah dibuat $1L_{pp}$ dari alas (*keel*). Sementara untuk batas diatas kapal minimal dibuat 0.025 L_{pp} dari *deck*, tetapi pada simulasi ini dibuat satu kali tinggi kapal atau 1H dari sarat.

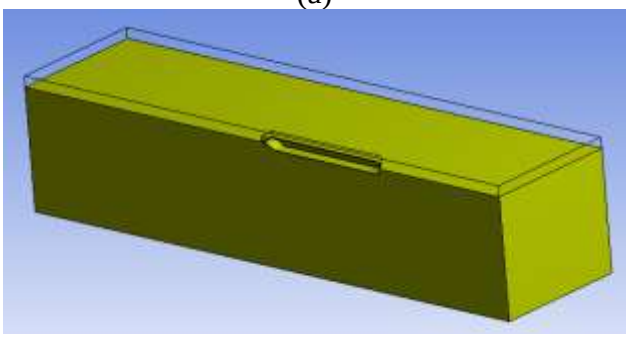


Gambar 4.3 Sketsa *Boundary Condition* yang digunakan

Evaluasi hambatan total yang dilakukan untuk memvalidasi model lambung menggunakan 2 medium, yaitu air dan udara (Gambar 4.4). Sehingga dalam simulasinya terdapat efek *free surface*, yaitu fluida 1 (air) memasuki area fluida lainnya (udara). Sehingga pengaturan ukuran *mesh* sangat berpengaruh, dimana *meshing* pada bagian kapal (*ship*) dan sarat kapal atau *free surface* harus dibuat lebih rapat agar proses *solving* dan hasil hambatan total benar-benar valid. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 ukuran *meshing* pada bagian sarat kapal lebih kecil dan rapat dibandingkan bagian lainnya.

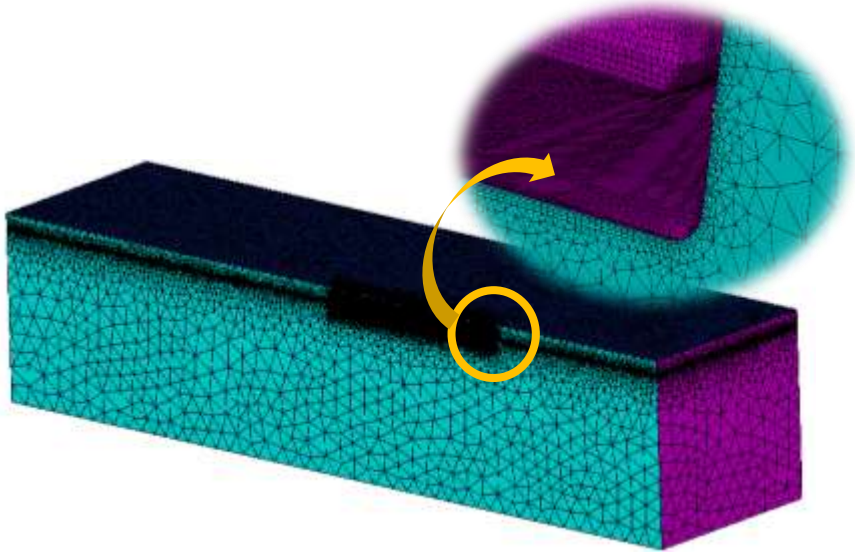


(a)



(b)

Gambar 4.4 Medium Domain Komputasi Dibagi 2 Fluida; (a) Air dan (b) Udara



Gambar 4.5 Hasil *Meshing*

Jenis *meshing* yang digunakan pada analisis ini dalah *unstructured mesh* dengan bentuk meshing tetra/mixed. Jenis mesh ini dipilih karena proses meshingnya lebih mudah dan lebih cepat. Ukuran elemen yang digunakan untuk domain komputasi adalah 10, lambung kapal 0.4, dan *free surface* 2. Elemen yang terbentuk dari *meshing* ini terdiri dari bentuk tetra, tri, penta, dan quad.

4.3 *Grid Independence*

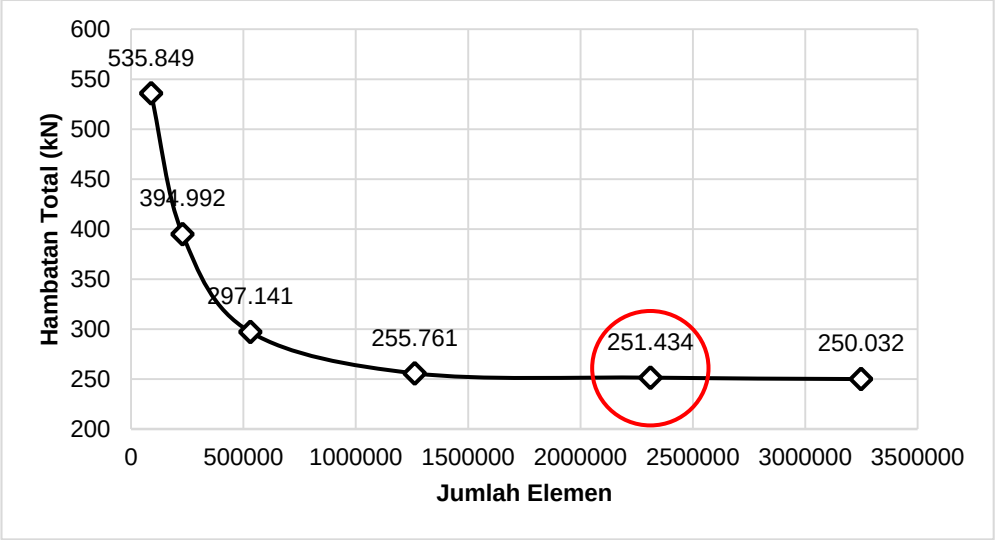
Durasi lamanya proses *meshing* bergantung pada ukuran *meshing* dan jumlah elemen yang dihasilkan. Semakin kecil ukuran meshing dan semakin banyak jumlah elemennya, maka akan semakin lama pula durasi proses *meshing*. Untuk mendapatkan ukuran *meshing* serta jumlah elemen yang optimum perlu dilakukan analisa *grid independence*.

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 tingkat error kecil dengan waktu komputasi yang minimum. Telah dibuktikan secara praktis bahwa jumlah pembagian elemen model akan memperlambat proses simulasi jika jumlahnya terlalu besar meskipun di sisi lain menjamin keluaran hasilnya (Anggara, 2013).

Pembuatan *grid independence* dilakukan dengan cara melakukans beberapa kali simulasi dengan jumlah elemen yang berbeda. Pencatatan perlu dilakukan untuk setiap simulasi terkait jumlah elemen dan nilai keluaran/outputnya. Jumlah elemen harus bertambah secara signifikan dari satu percobaan ke percobaan selanjutnya misalnya dua kali lipat, tujuannya untuk memastikan bahwa perbedaan output masing-masing percobaan bersifat mutlak, hingga pada akhirnya diketahui selisih nilai output dari deretan percobaan dalam presentase. Menurut Utama (2002) jumlah elemen model CFD disebut optimum jika selisih output antara 2 percobaan yang berurutan berdasarkan pertambahan elemennya adalah 2%.

Tabel 4.2 *Grid Independence* untuk Analisis Hambatan

Simulasi Ke:	**Jumlah Elemen**	**R_T (kN)**	**Selisih (%)**
1	88.960	535,849	-
2	228.880	394,992	35,66
3	530.485	297,141	32,93
4	1.262.118	255,761	16,18
5	2.311.085	251,434	1,72
6	3.248.591	250,032	0,56



Gambar 4.6 *Grid Independence untuk Analisis Hambatan*

Dari *grid independence* yang telah dibuat dapat diketahui bahwa jumlah elemen yang optimum untuk analisis ini adalah 2.31.1085 elemen. Jumlah elemen ini dikatakan optimum karena selisih dengan jumlah elemen sebelumnya adalah 1,72% atau kurang darai 2%. Sebenarnya pada simulasi ke-6 didapatkan selisih yang lebih kecil lagi yaitu 0,56% (Tabel 4.2). Namun, karena keterbatasan spesifikasi komputer maka dipilih jumlah elemen pada simulasi ke-5 mengingat semakin banyak jumlah elemen maka semakin lama waktu simulasi. Dan beberapa hasil *meshing* dari ke 6 simulasi dapat dilihat pada

4.4 Tahap *Pre-Processor*

Pada 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 daripada model-model *basic* lainnya. Oleh karena itu tahap *pre-processor* ini merupakan tahap yang butuh ketelitian dan ketepatan dalam pendefinisian setiap *boundary.* Berikut ini merupakan tahapan yang dilakukan dalam pengaturan simulasi *free surface:*

1. Langkah pertama adalah meng-*import* model beserta domain yang telah di-*mesh* pada proses sebelumya. Pada *free surface* dilakukan pendefinisian

boundary dan *initial conditions* untuk mengatur tekanan yang tepat dan bidang fraksi volume.

2. Tahap selanjutnya adalam melakukan pendefinisian CEL (*CFX Expression Language*) dimana CEL ekspresi-ekspresi bahasa pemrograman terhadap *boundary conditions* dituliskan (CFX, 2007). Ekspresi-ekspresi untuk *boundary* dan *inititial conditions* yang didefinisikan pada CEL dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Eskpresi-ekspresi pada CEL (CFX, 2007)

Nama Bagian	**CEL**	**Definisi**
tinggi hulu *free surface*	UpH	5,4 [m]
tinggi hilir *free surface*	DownH	5,4 [m]
densitas air	DenWater	1025 [kg m^-3]
densitas udara	DenRef	1,125 [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)

3. Setelah ekspresi-ekspresi yang akan digunakan selesai didefinisikan selanjutnya adalah pendifinisian kondisi batasnya, dimana fraksi volume di atas permukaan bebas pada batas *Inlet* adalah 1 untuk udara dan 0 untuk air, dan di bawah permukaan bebas adalah 0 untuk udara dan 1 untuk air. Batas *outlet* dimana tekanan di atas permukaan bebas adalah konstan dan tekanan di bawah permukaan bebas adalah distribusi hidrostatik.
4. Langkah selanjutnya adalah pendefinisian domain fluida. Pada bagian ini jenis fluida dibagi dalam dua jenis yaitu air dan udara dimana temperatur fluida di-*setting* 25^{o}C menyesuaikan kondisi *towing tank* dan tekanan di-*setting* sebesar

1 atm. Pad *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 Suface 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 Mode‖,* harus dipastikan bahwa fluida yang telah di-*setting* pada proses ini ada dua yaitu air dan udara. model turbulensi fluida menggunakan *shear stress transport* pada kondisi *isothermal* lebih memberikan akurasi yang lebih baik. Metode turbulen ini telah digunakan oleh Menter (1993a, 1994b) dan dinyatakan sebagai metode paling akurat untuk pemodelan berbagai aliran yang termasuk dalam diskusi NASA *Technical Memorandum* (Bardina dkk, 1997; Swennberg, 2000).

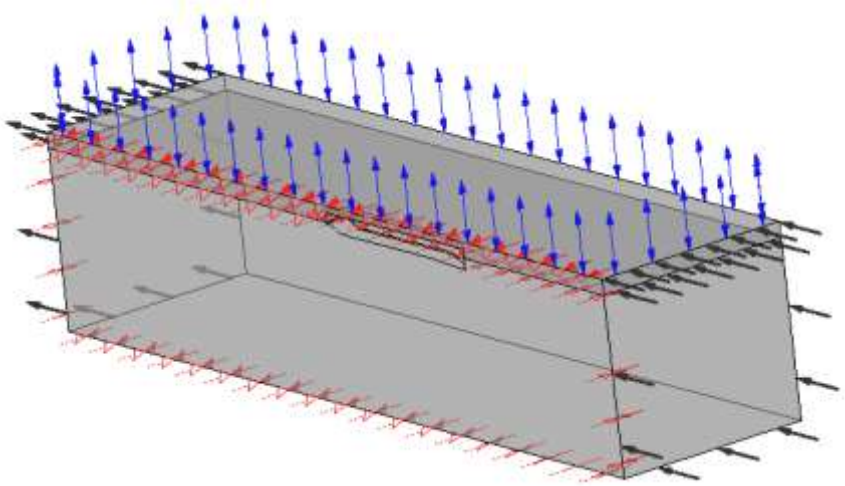
5. Setelah domain selesai didefinisikan, langkah berikutnya adalah pendefinisian batas *(boundary)*. Pada batas *Inlet* dimasukkan kecepatan kapal (*normal speed*) yaitu 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots untuk setiap simulasi. Pada batas *outlet* di-*setting static pressure* dengan nilai sesuai CEL "*DownPres"*. Batas *Wall* di-*setting wall* dan batas *ymmetry* di-*setting* dengan *symmetry* yang berarti bahwa tekanan kondisi dalam dan luar lingkungan pengujian sama, gelombang tidak dipantulkan terhadap dinding. Batas *top* didefinisikan sebagai *Opening* atau dinding terbuka yang artinya tidak ada pengaruh tekanan dari manapun. Batas *bottom*, sama seperti halnya model, didefinisikan *Free Slip* yang artinya bebas slip .
6. Setelah pendefinisian batas telah dilakukan, langkah berikutnya adalah mengatur fitur *Initial Condition* atau *Initialitation* agar konsisten dengan batas *Inlet*. Pada komponen kecepatan, dimasukkan nilai kecepatan kapal sesuai dengan batas *Inlet*. *Initialization* merupakan tahap pengaturan dimana kecepatan aliran fluida diatur, fraksi udara diatur dengan mengisikan *"UpVFAir"* dan fraksi air diisi dengan *"UpVFWater".*

7. Langkah terakhir adalah pengaturan pada "*Solver Control*" untuk mengatur batas maksimum iterasi yang diinginkan. Pada langkah ini juga diatur batas skala waktu atau *timescale* yang diberikan, dimana pada pilihan terdapat tiga pilahan *timescale* yaitu *Automatic Timescale, Local* Timescale, dan *Physical Timescale*. Pada analisis ini menggunakan *Physical Timescale*, karena dari beberapa referensi jenis *timescale* ini paling konsistance dalam mencapai batas konvergen dibandingkan jenis *timescale* lainnya.

Untuk lebih jelasnya ringkasan pengaturan *boundary condition* pada domain komputasi dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan sketsa pendefinisian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Tabel 4.4 Pendifinisian *Boundary Condition*

Boundary Condition	***Basic Setting***	***Boundary Details***	***Fluid Values***
Inlet	*Inlet*	*Normal speed*	Udara = *UpVFAir* Air = *UpVFWater*
Outlet	*Outlet*	*Static pressure = DownPres*	
Bottom & Ship	*No Slip*	-	-
Wall	*Free slip*	-	-
Synmetry	*Synmetry*	-	-
Top	*Opening*	*Entertainment= 0 Pa, zero gradient*	Udara = 1 Air = 0



Gambar 4.7 Pendefinisian *Boundary Condition*

4.5 Tahap *Processor* dan Konvergensi

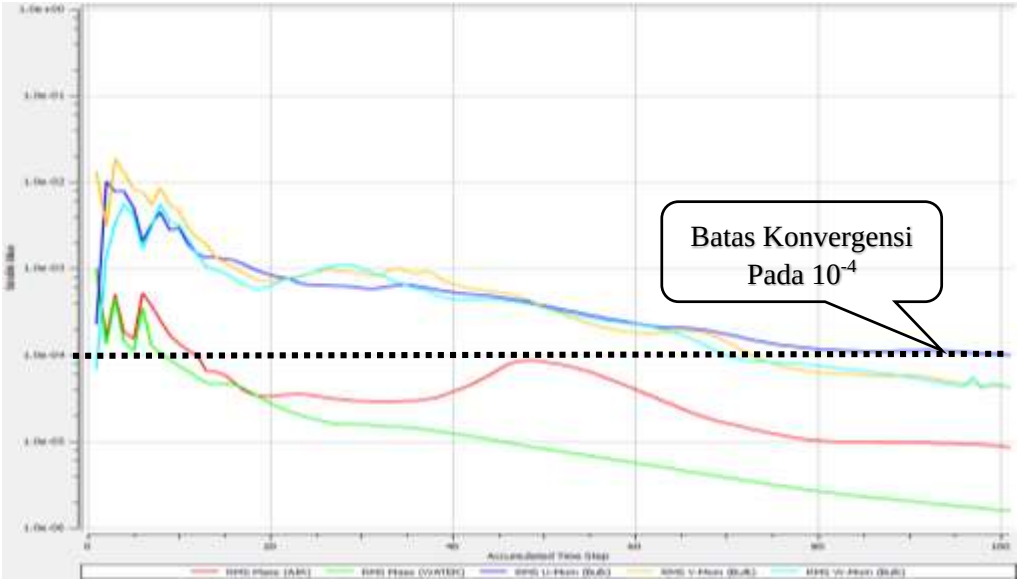
Tahap *processor* atau proses *solving* merupakan tahap perhitungan yang dilakukan setelah tahap oses *pre-processor*. Proses *solving* ini digambarkan dengan sebuah grafik, dengan sumbu x menunjukkan *acumulated time step* sesuai dengan nilai iterasi yang dimasukkan dan sumbu y menunjukkan *variable value* (nilai konvergensi) dengan nilai 1 sampai 10^{-6} yang ditentukan pada saat tahap *pre-processor*. Semakin kecil tingkat kesalahan yang diset, maka proses perhitungan akan memakan waktu yang lebih lama, hingga pada suatu saat proses tersebut akan berhenti pada suatu posisi konvergen, yaitu posisi di mana tingkat keakuratan yang diatur tercapai. Pada analisis ini batas konvergensi yang diberikan sebesar 10^{-4} mengingat keterbatasan waktu dan spesifikasi komputer.

Konvergensi merupakan pengaturan persamaan *solver control* yang bertujuan meminimalisir *error* pada hasil simulasi. Proses perhitungan berulang atau disebut proses iterasi pada tahap *flow solver* dilakukan jika semua data pada kondisi batas telah ditentukan. Proses iterasi berpengaruh terhadap tingkat akurasi yang dapat diperoleh. Penentuan banyaknya iterasi dipengaruhi oleh tingkat ketelitian dari model yang telah dibuat. Semakin banyak jumlah *grid* dalam pemodelan maka semakin banyak pula iterasi yang perlu dilakukan untuk perhitungan model tersebut.

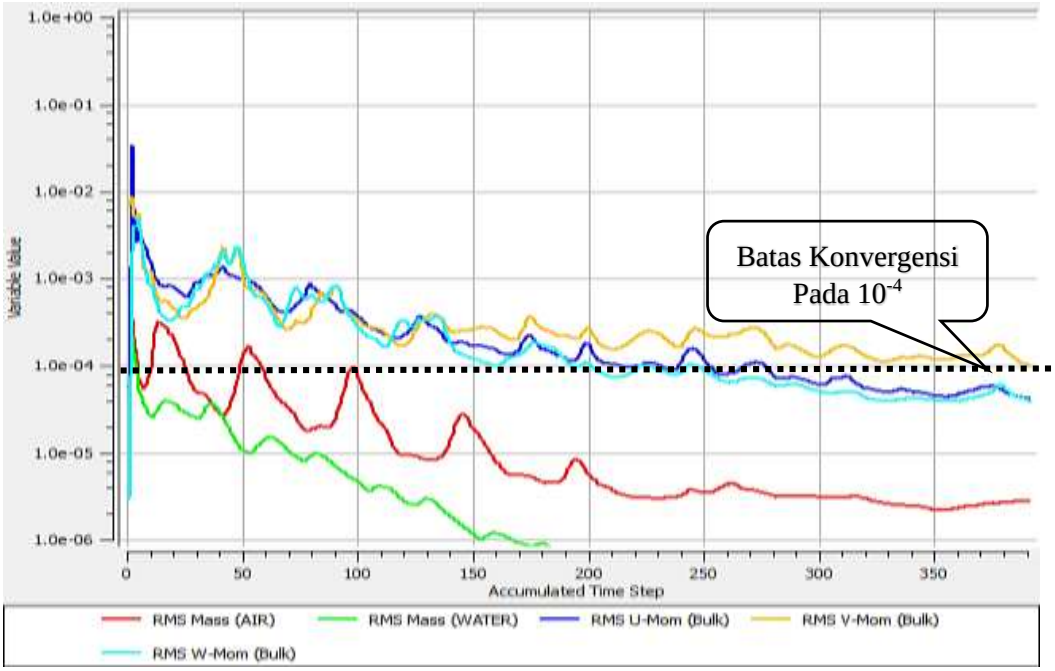
Perbedaan ini dapat dilihat pada *Gambar 4.8* dan *Gambar 4.9*, dimana *Gambar 4.8* menunjukkan grafik konvergensi untuk *coarse meshing* dengan jumlah *grid* 88.960 dan *Gambar 4.9* untuk *fine meshing* dengan jumlah *grid* 2.311.085 elemen. Proses iterasi akan berhenti jika telah mencapai batas konvergensi yang telah ditentukan. Proses *solving* berhenti ketika keempat grafik melewati nilai 10^{-4}. Iterasi maksimum yang diberikan untuk simulasi ini adalah 1000s. Untuk simulasi *coarse meshing* proses *solving* berhenti pada iterasi ke-101 dan untuk simulasi *fine meshing* berhenti pada iterasi ke-385s.

Jika proses *solving* sudah mencapai batas iterasi maksimum tetapi belum mencapai batas konvergensi maka batas iterasi harus ditambah hingga batas konvergensi dapat tercapai. Ketika proses *solving* berhenti maka iterasi tidak dapat dilanjutkan, sehingga harus mengulang lagi dari awal. Namun, batas iterasi

maksimum dapat dibuat sebanyak-banyaknya untuk menghindari proses iterasi ulang, karena proses *solving* akan tetap berhenti dengan sendirinya ketika sudah mencapai batas konvergensi tanpa harus menunggu sampai batas iterasi maksimum tercapai.



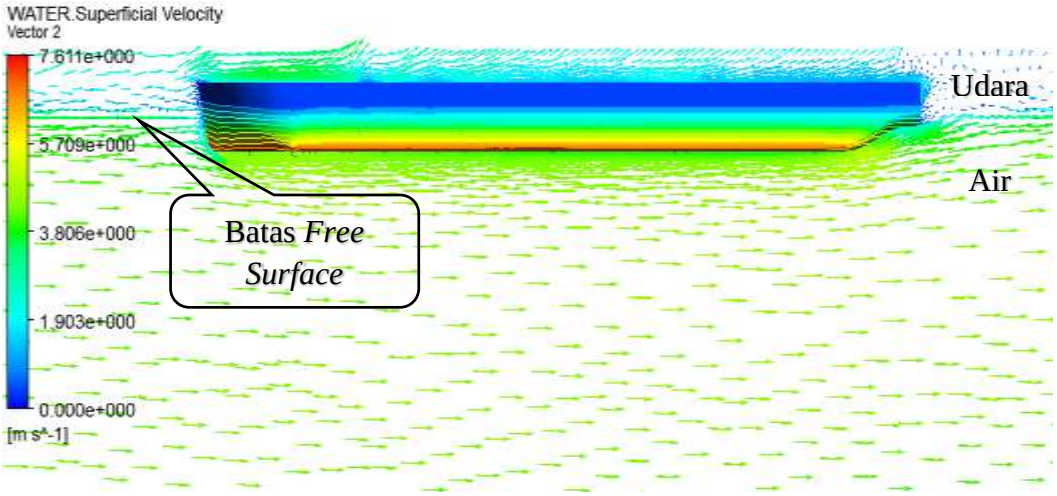
Gambar 4.8 Grafik Konvergensi untuk *Coarse Meshing*



Gambar 4.9 Grafik Konvergensi untuk *Fine Meshing*

4.6 Tahap *Post-Processor*

Pada tahap akhir setelah proses *solving* selesai maka hasil simulasi dapat dilihat pada *post-processor*. Hasil simulasi yang bisa dilihat berupa angka hasil perhitungan atau iterasi, plot gambar dan kurva, serta animasi. Terdapat beberapa pilihan untuk menampilakan plot hasil simulasi, salah satunya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.10 yang merupakan vektor aliran fluida berupa air dan udara disekitar kapal yang terpisah pada batas *free surface* serta distribusi tekanan pada kapal.



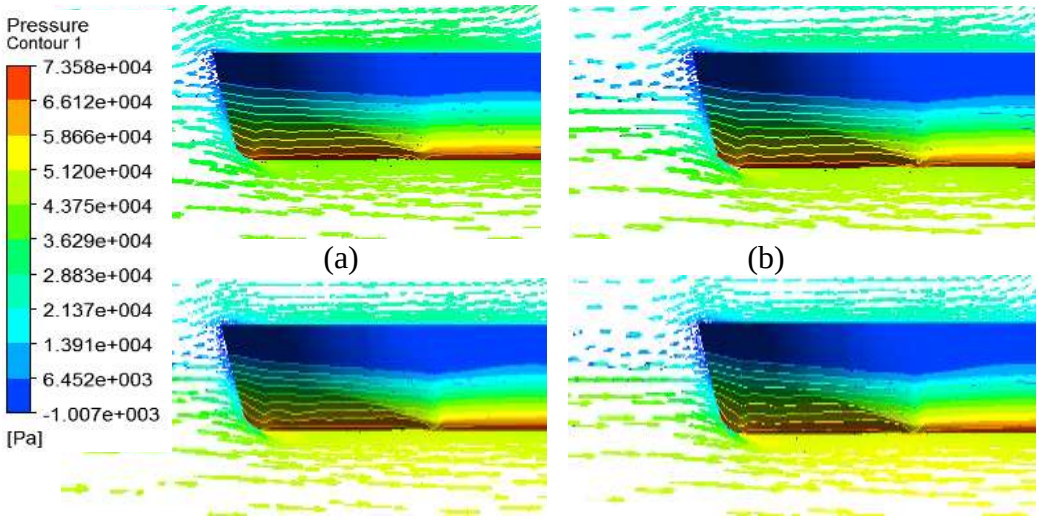
Gambar 4.10 Vektor Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Pada Kapal

4.7 Hasil Hambatan Total dan Validasi

Simulasi dilakukan pada empat kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots. Pada setiap simulasi didapatkan hasil hambatan yang berbeda, dimana semakin tinggi kecepatan semakin tinggi hambatannya Tabel 4.5. Perbedaan tersebut juga terlihat dari vector aliran fluida dan distribusi tekanan di sekitar kapal, terutama dibagian haluan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.10.

Tabel 4.5 Nilai Hambatan Total Kapal pada Empat Variasi Kecepatan

Simulasi Ke:	V (knot)	Hambatan Total (kN)
1	8,00	133,061
2	9,00	142,002
4	10,00	181,429
6	11,00	251,434



Gambar 4.11 Perbedaan Vector Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Disekitar Kapal pada Kecepatan; (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots

Hambatan total dari hasil simulasi selanjutnya divalidasi dengan cara membandingkannya dengan nilai hambatan total hasil uji tarik atau eksperimen (*towing test*). Hasil pengujian dengan eksperimen digunakan sebagai patokan karena kondisinya dianggap paling mendekati kondisi lapangan sebenarnya (Anggara, 2013). Selisih dari kedua nilai tersebut tidak boleh lebih dari 5% (Bertram, 1998). Jika selisihnya lebih dari 5% maka hasil simulasi dinyatakan tidak valid maka harus dilakukan perbaikan *meshing* dan simulasi ulang hingga didapatkan selisih tidak lebih dari 5%.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Anggara (2013) dan Ahadyanti (2014) proses simulasi dilakukan dengan model berskala 1:43.5. Dari hasil simulasi tersebut didapatkan nilai hambatan model yang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Validasi Model Penelitian Sebelumnya (Anggara & Ahadyanti)

Vkapal (knot)	**Vmodel (m/s)**	**Hambatan Total Model (N)**		
		Uji Tarik	**Anggara**	**Ahadyanti**
8,00	0,622	2,406	2,122	2,144
9,00	0,700	2,750	2,719	2,851
10,00	0,778	3,438	3,413	3,511
11,00	0,856	4,469	4,187	4,245

Setelah data tersebut diekstrapolasi berdasarkan rumus ITTC (ITTC, 1999) maka didapatkan data hambatan kapal sebenarnya seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil Ekstrapolasi Hambatan Total Penelitian Sebelumnya

V (knot)	Hambatan Total Kapal (kN)		
	Uji Tarik	Anggara	Ahadyanti
8,00	127,835	103,617	105,465
9,00	139,851	137,195	148,439
10,00	179,732	177,664	185,969
11,00	247,479	223,448	228,412

Tingkat error atau selisih dari hambatan total hasil simulasi CFD penelitian sebelumnya yang menggunakan skala model 1:43.5 lebih besar dari simulasi CFD yang dilakukan pada penelitian ini yang menggunakan skala model 1:1 atau *full scale*. Pada Tabel 4.8 dapat dilihat validasi dari simulasi CFD penelitian sebelumnya, dimana pada penelitian sebelumnya ada yang selisih nilai hambatan totalnya dengan hasil uji tarik lebih dari 5%.

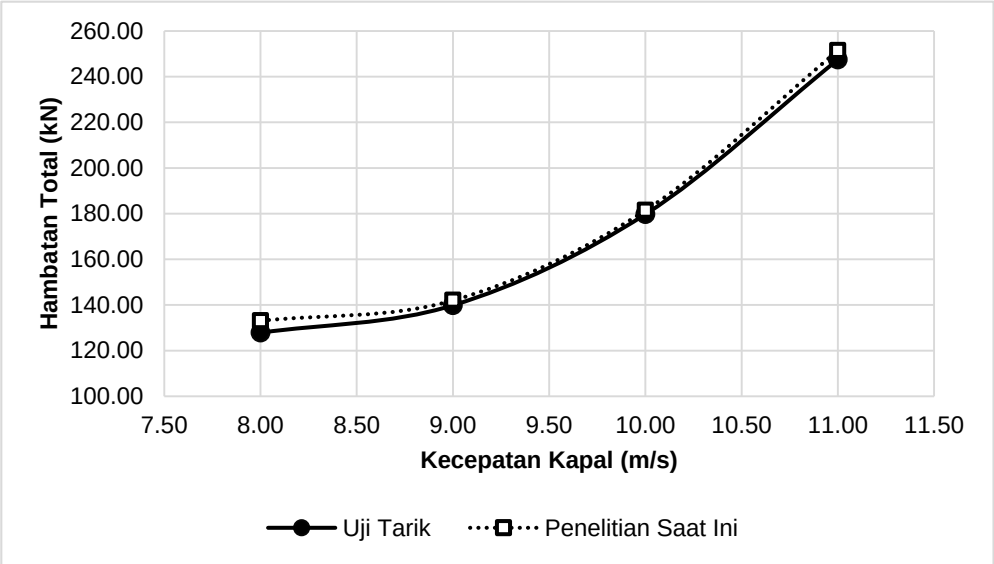
Tabel 4.8 Validasi Hambatan Total Hasil Simulasi CFD Penelitian Sebelumnya

V (knot)	Hambatan Total (kN)				
	Uji Tarik	Penelitian Anggara	Error (%)	Penelitian Ahadyanti	Error (%)
8,00	127,835	103,62	18,9	105,46	17,5
9,00	139,851	137,20	1,9	148,44	6,1
10,00	179,732	177,66	1,2	185,97	3,5
11,00	247,479	223,45	9,7	228,41	7,7

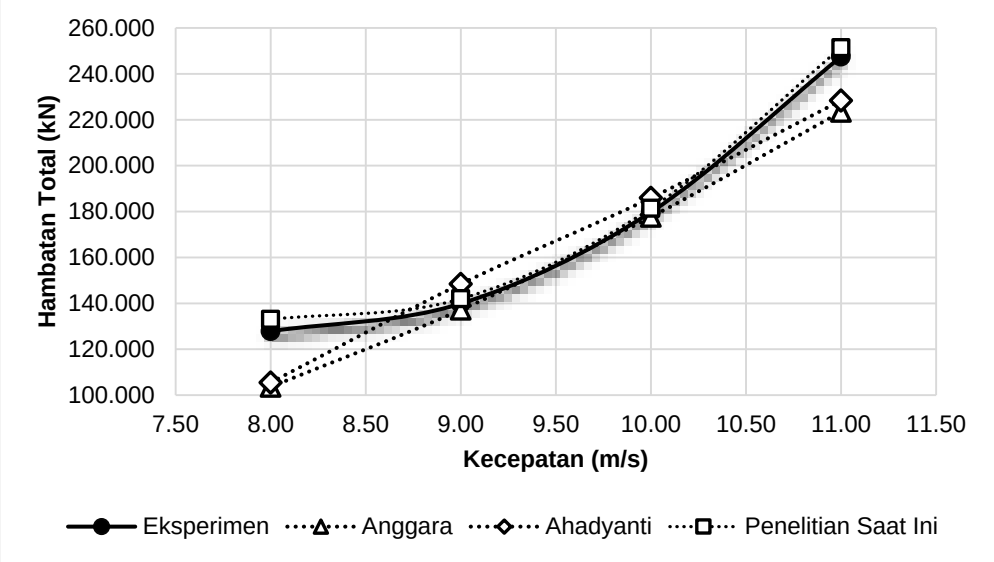
Sedangkan nilai hambatan total dari hasil simulasi CFD penelitian ini untuk keempat tingkat kecepatan memiliki selisih kurang dari 5% dari hasil uji tarik. Jadi model dan hasil hambatan total dari simulasi CFD pada penelitian ini dinyatakan valid dengan tingkat error paling besar 4,1% seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.9 Simulasi CFD yang menggunakan model *full scale* pada penelitian ini menghasilkan tingkat validasi yang lebih akurat dibandingkan simulasi CFD menggunakan model skala 1:1 dari penelitiannya sebelumnya.

Tabel 4.9 Validasi Hambatan Total Hasil Simulasi CFD Penelitian Saat ini

V (knot)	Hambatan Total (kN)		Error (%)
	Uji Tarik	CFD	
8,00	127,83	133,061	4,1
9,00	139,85	142,002	1,5
10,00	179,73	181,429	0,9
11,00	247,48	251,434	1,6



Gambar 4.12 Validasi Hambatan Total Penelitian Saat Ini

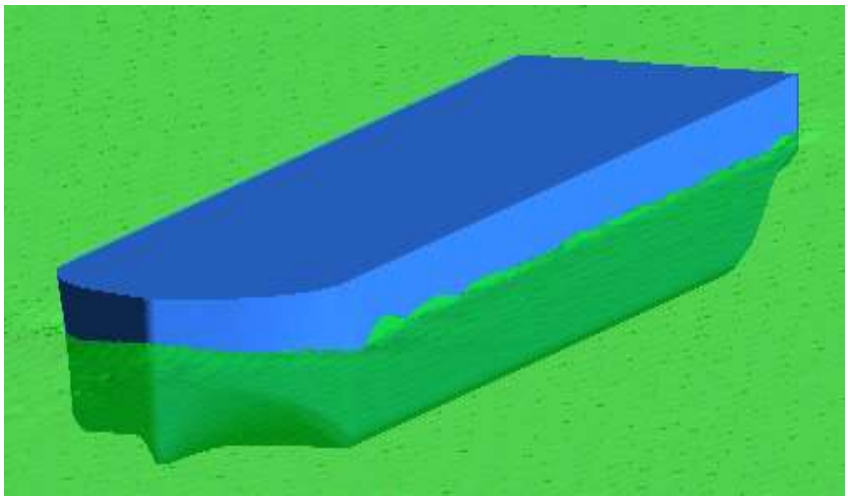


Gambar 4.13 Validasi Hambatan Total Penelitian Saat Ini Penelitian Sebelumnya

Perbedaan validasi antara penelitian saat ini dengan penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 4.13. Dari ketiga grafik hambatan total hasil simulasi CFD, grafik hambatan total dari dari penelitian ini paling mendekati grafik hambatan total hasil uji tarik dan memiliki nilai error yang lebih kecil. Sehingga untuk proses validasi menggunakan simulasi CFD sebaiknya model dibuat *full scale* untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

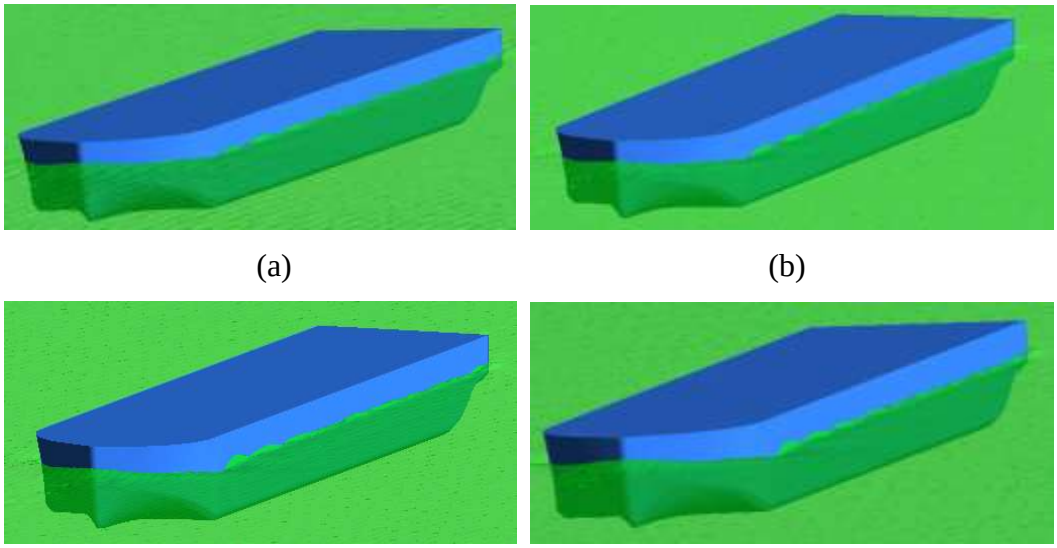
Selain dilihat dari besarnya nilai hambatan total, validasi juga dilakukan dengan membandingkan bentuk aliran air di sekitar kapal dari hasil simulasi CFD dan hasil eksperimen. Pada Gambar 4.14. dapat dilihat dengan cukup jelas bahwa bentuk aliran air disekitar kapal pada kecepatan 10 knots dari hasil simulasi CFD yang telah dilakukan menyerupai aliran air pada saat uji tarik pada *towing tank* atau *towing test* (Gambar 4.15) dari penelitian Anggara (2013).

Dan pada Gambar 4.16 dapat dilihat perbedaan aliran air pada keempat kecepatan kapal. Semakin besar kecepatan kapal menyebabkan aliran air di sekitar kapal dan gelombang yang dihasilkan juga semakin besar. Terlihat jelas perbedaan aliran air disekitar kapal pada Gambar (a) untuk kecepatan 8 knots dan Gambar (b) untuk kecepatan 11 knots.



Gambar 4.14 Bentuk Aliran Air di Sekitar Kapal Hasil Simulasi CFD pada Kecepatan 10 Knots

Gambar 4.15 Bentuk Aliran Air di Sekitar Kapal Hasil *Towing Test* pada Kecepatan 10 Knots, Anggara (2013)



(a) (b)

(c) (d)

Gambar 4.16 *Volume Fraction* Air Lambung Asli pada Kecepatan: (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots

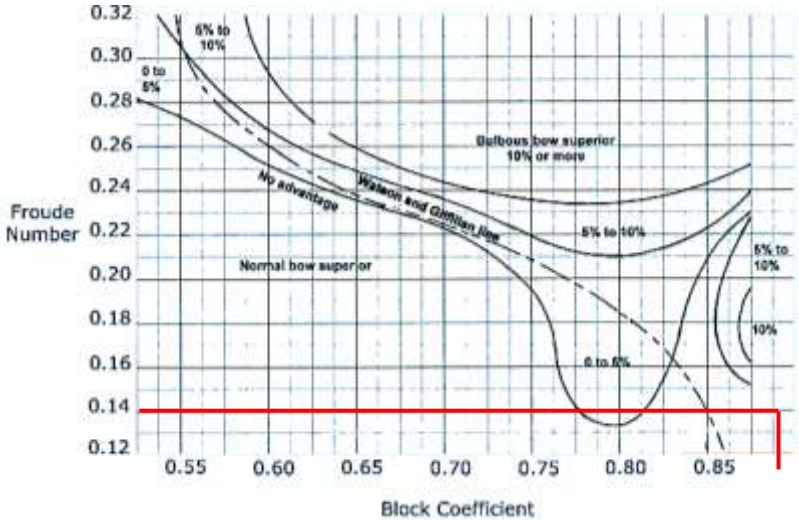
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5
MODIFIKASI *HULL FORM* DAN ANALISIS HAMBATAN

5.1 Batasan Modifikasi *Hull Form*

Modifikasi *hull form* dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai hambatan total yang lebih kecil dari *hull form* kapal asli. Modifikasi dilakukan setelah model lambung kapal asli sudah di validasi dan hasilnya akurat seperti yang telah dijelaskan pada BAB 4. Nilai hambatan total dari tahap validasi akan dijadikan sebagai nilai acuan untuk dibandingkan dengan hambatan total kapal hasil modifikasi. Modifikasi kapal difokuskan pada bagian haluan menjadi bentuk X-bow dan Axe-bow. Kedua bentuk lambung ini dipilih karena dari beberapa penelitian telah terbukti memiliki nilai hambatan lebih kecil dibandingkan bentuk lambung konvensional.

Sebenarnya bentuk *bulbous bow* sudah sejak lama juga telah terbukti dapat menurunkan hambatan kapal. Namun, berdasarkan perbandingan *Froude Number* (Fn) dan *Block Coefficient* (Cb) kapal ini dilihat dari grafik penentuan penambahan *bulbows bow* Watson (1998) tidak memberikan keuntungan. Nilai Fn kapal ini 0.156 dan nilai Cb nya 0.88. Jadi jika dilihat dari Gambar 5.1 penambahan *bulbows bow* tidak akan memberikan keuntungan. Sehingga bentuk *bulbows bow* tidak dijadikan sebagai salah satu *hull form* alternatif dalam memodifikasi kapal ini.



Gambar 5.1 Kurva Penentuan Penambahan *Bulbows Bow* Berdasarakan Nilai Fn dan Cb (Watson, 1998)

Selain itu menurut Watson (1998), pada semua nilai koefisien blok, *bulbuos bow* menunjukkan keuntungan terbaik pada kapal-kapal cepat dan sering merugikan pada kapal-kapal yang dengan kecepatan sedang. *Bulbuos bow* pada umumnya akan mengurangi gerakan *pitching*, namun di sisi lain *bulbuos bow* akan cenderung menyebabkan *slamming*.

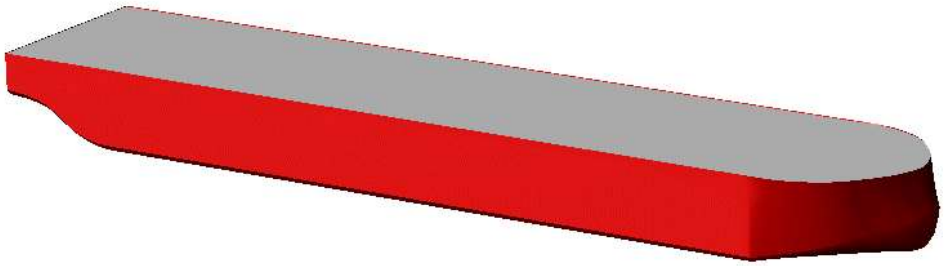
Dalam modifkasi bentuk lambung kapal yang harus dipertimbangkan adalah letak atau posisi *Longitudinal Center of Buoyancy* (LCB). Dalam beberapa jenis kapal, hal ini ditentukan oleh disposisi berat dan kebutuhan untuk mendapatkan bentuk lambung yang langsing, tetapi pada banyak kapal hal ini harus diatur oleh untuk meminimalkan kebutuhan daya. Para desainer hampir selalu mengatakan bahwa posisi LCB telah ditentukan oleh persyaratan trim (Watson, 1998).

Jadi dalam modifikasi ini diberikan batasan nilai LCB tidak boleh kurang dari 1% dari LCB kapal asli mengingat perubahan letak LCB sangat berpengaruh terhadap trim kapal. Selain batasan LCB dalam modifikasi ini juga diberikan batasan terhadap nilai *displacement* dan Lwl kapal, dimana tinggi sarat kapal dipertahankan.

5.2 Modifikasi Lambung Menjadi X-*Bow*

Karakteristik dari bentuk lambung X-bow adalah seluruh bagian depannya didominasi oleh haluan yang tinggi, bulat dengan mengembang sedikit diatasnya, namun dengan daya apung yang ekstra besar karena adanya volume tambahan. Dari bentuk lambung asli yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 bagian haluannya akan dimodifikasi menjadi bentuk X-bow. Hasil modifikasi lambung kapal menjadi X-bow dapat dilihat pada Gambar 5.2 dan Gambar 5.3.

Gambar 5.2 Hasil Modifikasi X-bow (Tampak Samping)



Gambar 5.3 Hasil Modifikasi X-bow (Tampak 3D)

Dikarenakan bagian haluan kapal berubah maka terdapat beberapa ukuran utama kapal yang mengalami perubahan tetapi tidak signifikan seperti yang dapat dilihat pada . Nilai *displacement*, Lwl dan sarat kapal tetap, sedangkan nilai LCB kapal berubah sebesar 0.2% (Tabel 5.1).

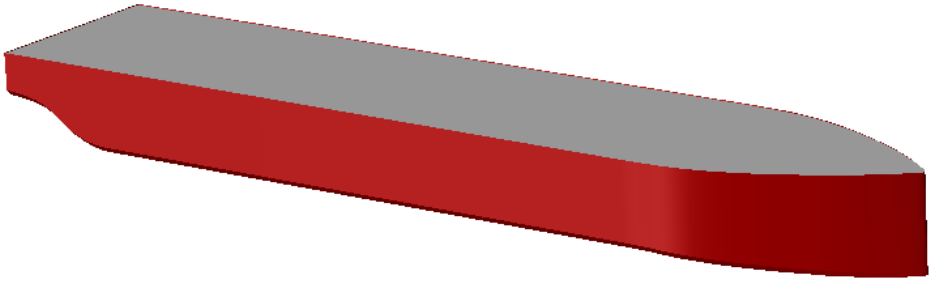
Tabel 5.1 Perubahan Ukuran Utama Modifikasi X-bow

Ukuran	**Model Asli**	**X-Bow**
Displacement (ton)	17086,00	17086,00
Lwl (m)	132,90	132,90
B (m)	26,40	26,40
H (m)	11,00	11,00
T (m)	5,40	5,40
WSA (m^2)	4594,191	4592,493
Block Coeff. (Cb)	0,880	0,880
LCB (from AP)	66,208	66,353

5.3 Modifikasi Lambung Menjadi *Axe-Bow*

Karakteristik dari bentuk lambung Xe-bow adalah memiliki konfigurasi penambahan panjang haluan dengan kemiringan nyaris vertikal, dan meruncing kebagian depan berbentuk tajam yang berperan membelah ombak yang datang. Dari bentuk lambung asli yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 bagian haluannya akan dimodifikasi menjadi bentuk Axe-bow. Hasil modifikasi lambung kapal menjadi X-bow dapat dilihat pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5.

Gambar 5.4 Hasil Modifikasi Axe-bow (Tampak Samping)



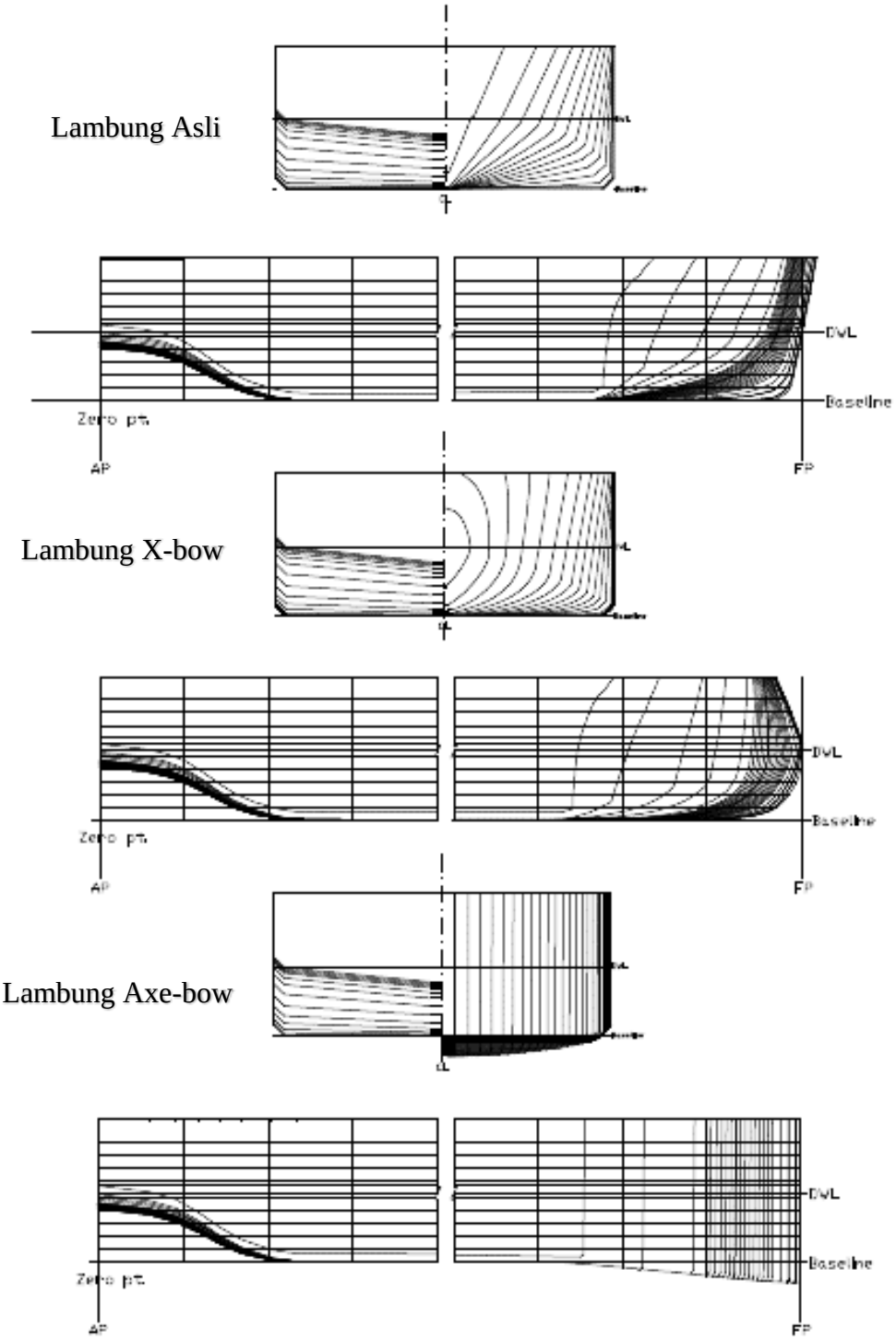
Gambar 5.5 Hasil Modifikasi Axe-bow (Tampak 3D)

Dikarenakan bagian haluan kapal berubah maka terdapat beberapa ukuran utama kapal yang mengalami perubahan tetapi tidak signifikan seperti yang dapat dilihat pada . Nilai *displacement*, Lwl dan sarat kapal tetap, sedangkan nilai LCB kapal berubah sebesar 0.06%.

Tabel 5.2 Perubahan Ukuran Utama Modifikasi Axe-bow

Ukuran	**Model Asli**	**Axe-Bow**
Displacement (ton)	17086,00	17086,00
Lwl (m)	132,90	132,90
B (m)	26,40	26,40
H (m)	11,00	11,00
T (m)	5,40	5,40
WSA (m^2)	4594,191	4589,427
Block Coeff. (Cb)	0,880	0,880
LCB (from AP)	66,208	66,249

Untuk melihat perbedaan antara ketiga bentuk lambung dapat dilihat dari *Lines Plan* ketiga model tersebut pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Perbandingan Body Plan dan Sheer Plan Bentuk Lambung Asli, X-bow, dan Axe-bow

5.4 Analisis Hambatan

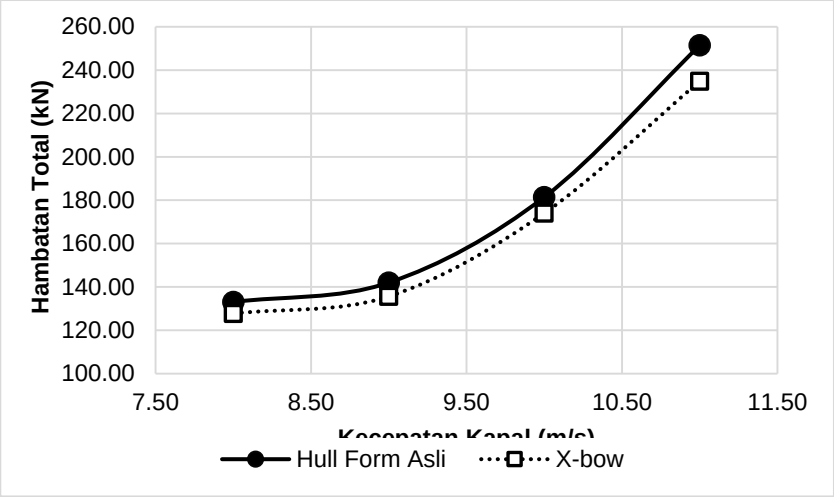
Setelah tahap modifikasi *hull form* selanjutnya dilakukan analisis hambatan untuk mengetahui nilai hambatan total kapal hasil modifikasi dengan bentuk X-bow dan Axe-bow. Analisis hambatan dilakukan untuk mengetahui apakah bentuk lambung yang baru, X-bow dan Axe-bow memiliki nilai hambatan total lebih kecil dari bentuk lambung asli. Tahap analisis hambatan ini sama dengan analisis hambatan yang dilakukan pada tahap validasi model kapal asli yang telah dijelaskan di BAB 4.

5.4.1 Hasil Hambatan Total Bentuk Lambung X-bow

Dari hasil analisis hambatan total untuk bentuk lambung X-bow pada empat kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots diketahui bahwa dengan memodifikasi lambung asli menjadi menjadi bentuk X-bow dapat menurunkan hambatan total kapal dari masing-masing tingkat kecepatan sebesar 3.98%, 4.47%, 4.07%, dan 6.60% (Tabel 5.3). Jika dirata-rata maka penurunan hambatan total yang didapatkan adalah sekitar 4.78% dari hambatan total kapal asli atau sekitar 8.91 kN. Perbandingan hambatan total kapal asli dan hasil modifikasi dapat dilihat pada Gambar 5.7.

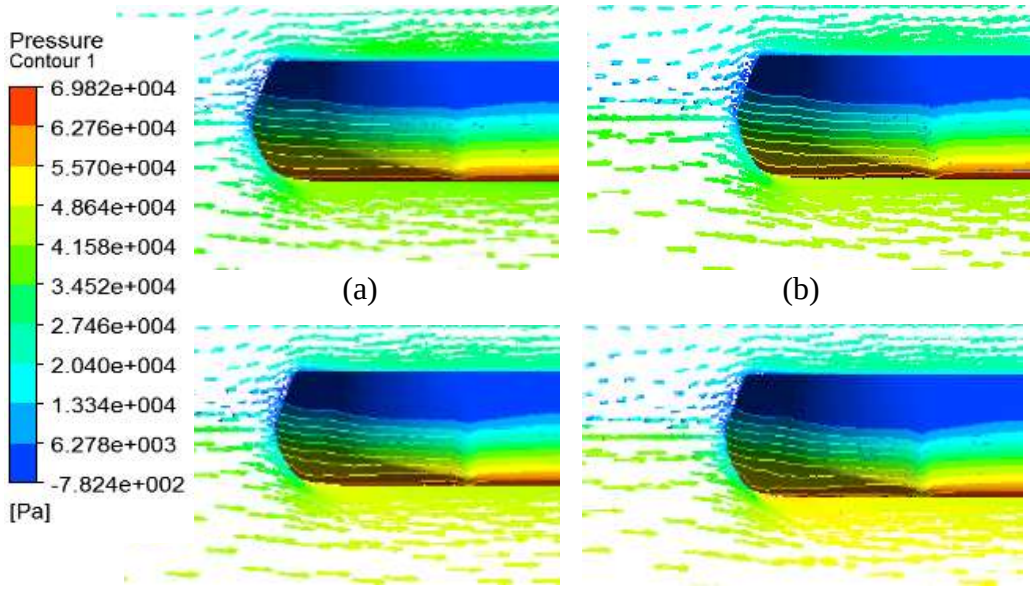
Tabel 5.3 Hasil Hambatan Total Hasil Modifikasi X-Bow

V (knot)	**Hambatan Total (kN)**		**Selisih (%)**
	***Hull Form* Asli**	**X-bow**	
8,00	133,06	127,76	3,98%
9,00	142,00	135,66	4,47%
10,00	181,43	174,05	4,07%
11,00	251,43	234,84	6,60%



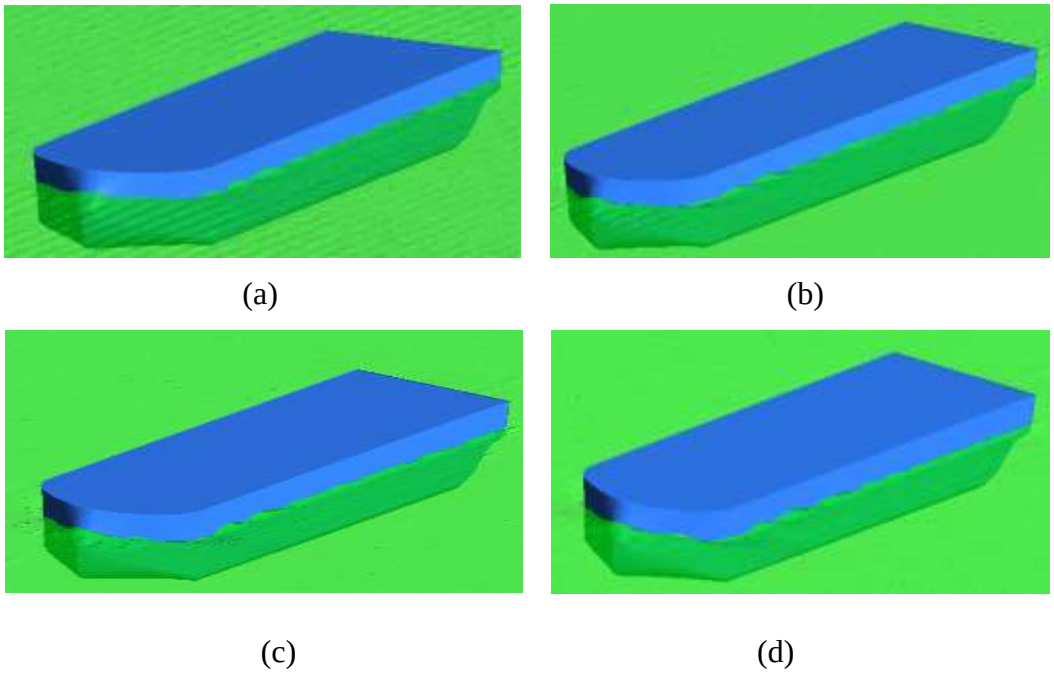
Gambar 5.7 Perbandingan Hambatan Total Hull Form Asli dan Hasil Modifikasi X-Bow

Selain nilai hambatan total yang lebih kecil dari kapal asli, vektor aliran fluida bentuk lambung X-bow (Gambar 5.8) lebih *smooth* dibandingkan bentuk lambung asli (Gambar 5.10). Untuk distribusi tekanan dari bentuk lambung X-Bow dapat dilihat pada Gambar 5.8. Tekanan tebesar pada bentuk lambung X-Bow adalah 6,982.10^4 Pa, lebih kecil dari tekanan terbesar bentuk lambung asli sebesar 7,35.10^4 Pa.



Gambar 5.8 Vektor Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Bentuk Lambung X-Bow pada Kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots

Sedangkan dari bentuk gelombang yang diakibatkan gerakan kapal atau *wave making* bentuk lambung X-Bow jika dilihat pada Gambar 5.10 juga lebih kecil dibandingkan bentuk lambung asli (Gambar 4.16).



(a) (b)

(c) (d)

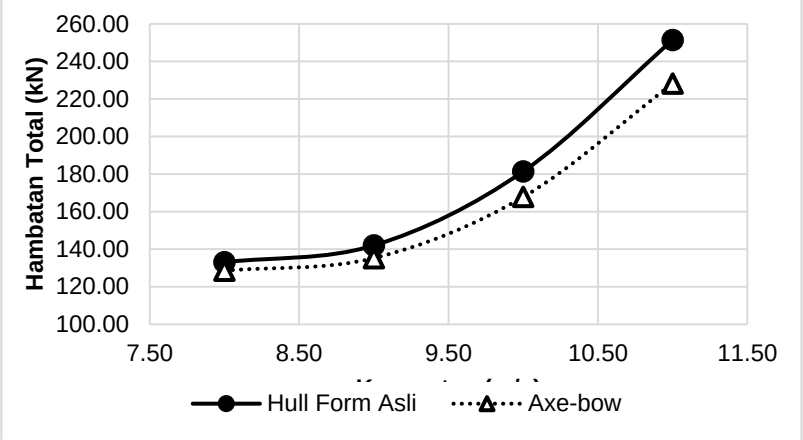
Gambar 5.9 *Volume Fraction* Air Lambung X-Bow pada Kecepatan: (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots

5.4.2 Hasil Hambatan Total Bentuk Lambung Axe-bow

Dari hasil analisis hambatan total untuk bentuk lambung Axe-bow pada empat kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots diketahui bahwa dengan memodifikasi lambung asli menjadi menjadi bentuk Axe-bow dapat menurunkan hambatan total kapal dari masing-masing tingkat kecepatan sebesar 3.38%, 4.76%, 7.50%, dan 9.22% (Tabel 5.4). Jika dirata-rata maka penurunan hambatan total yang didapatkan adalah sekitar 6.22% dari hambatan total kapal asli atau sekitar 12.01 kN. Perbandingan hambatan total kapal asli dan hasil modifikasi dapat dilihat pada Gambar 5.10.

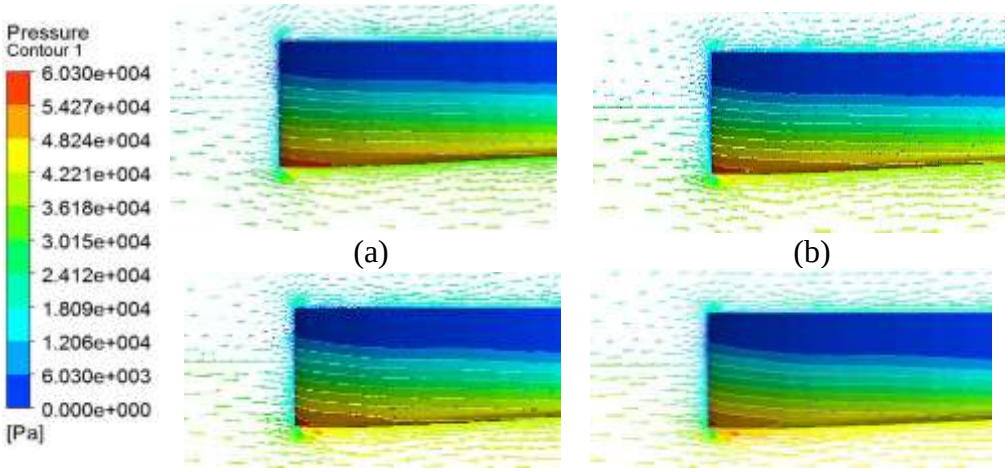
Tabel 5.4 Hasil Hambatan Total Hasil Modifikasi Axe-Bow

V (knot)	Hambatan Total (kN)		Selisih (%)
	***Hull Form* Asli**	**Axe-bow**	
8.00	133.06	128.56	3.38%
9.00	142.00	135.24	4.76%
10.00	181.43	167.82	7.50%
11.00	251.43	228.25	9.22%



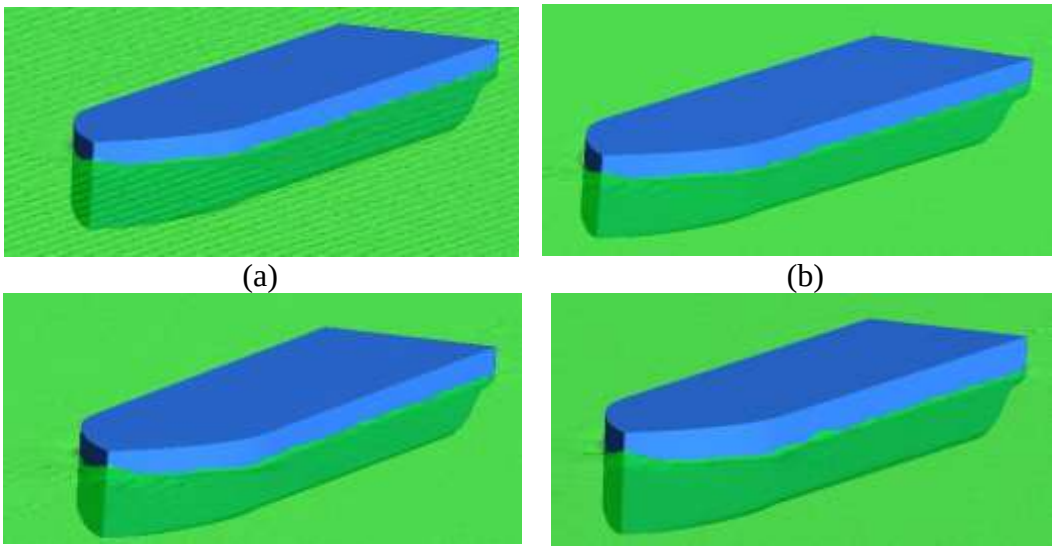
Gambar 5.10 Perbandingan Hambatan Total Hull Form Asli dan Hasil Modifikasi Axe-Bow

Selain nilai hambatan total yang lebih kecil dari kapal asli (Gambar 5.8), vektor aliran fluida bentuk lambung Axe-bow lebih *smooth* dibandingkan bentuk lambung asli dan bentuk lambung X-bow. Tekanan tebesar pada bentuk lambung Axe-Bow adalah $6{,}03.10^4$ Pa, lebih kecil dari tekanan terbesar bentuk lambung asli sebesar $7{,}35.10^4$ Pa (Gambar 5.11).



Gambar 5.11 Vektor Aliran Fluida dan Distribusi Tekanan Bentuk Lambung Axe-Bow pada Kecepatan; 8 knots, 9 knots, 10 knots, dan 11 knots

Sedangkan dari bentuk gelombang yang diakibatkan gerakan kapal atau *wave making* bentuk lambung Axe-Bow jika dilihat pada Gambar 5.12 juga lebih kecil dibandingkan bentuk lambung asli (Gambar 4.16) dan bentuk lambung X-bow (Gambar 5.8).

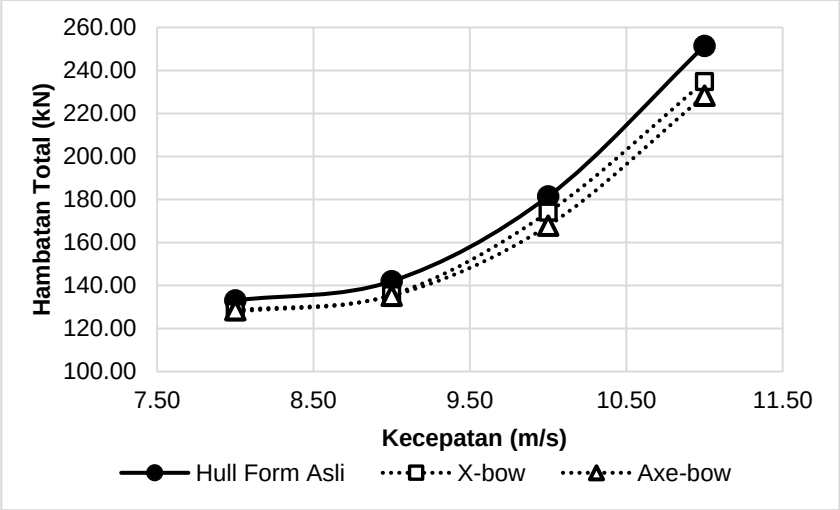


(a) (b)

(c) (d)

Gambar 5.12 *Volume Fraction* Air Lambung Axe-Bow pada Kecepatan: (a) 8 knots, (b) 9 knots, (c) 10 knots, dan (d) 11 knots

Jadi dapat disimpulkan bahwa bentuk lambung X-bow dan Axe-bow dapat digunakan sebagai alternatif *hull form* untuk kapal tipe *Self Propelled Barge*. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.13, kedua bentuk lambung alternatif ini memiliki nilai hambatan total lebih kecil dari bentuk lambung asli. Bentuk lambung X-bow memiliki nilai hambatan total paling kecil. Jika dilihat dari Gambar 5.13 semakin tinggi kecepatan perbedaan nilai hambatan total dari ketiga bentuk lambung terlihat semakin signifikan. Hal ini terjadi karena memang sebenarnya bentuk lambung X-bow dan Axe-bow awalnya didesain untuk kapal-kapal dengan kecepatan tinggi seperti *suplly vessel* dan *fast patrol boat.*

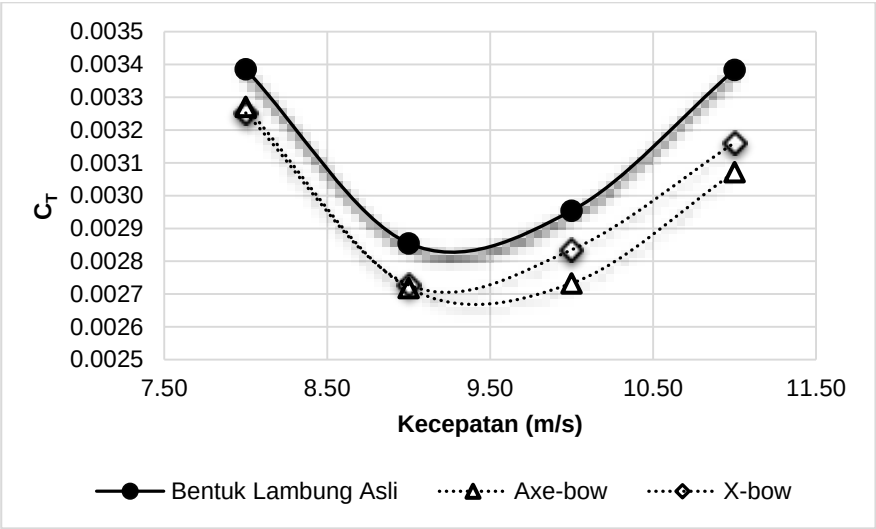


Gambar 5.13 Perbandingan Hambatan Total Kapal Asli dan Hasil Modifikasi

Selain dilihat dari perbandingan besarnya hambatan total perbedaan juga juga dapat dilihat dari perbandingan *Total Resistance Coefficient* (C_T) ketiga bentuk lambung. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan Gambar 5.14.

Tabel 5.5 perbandingan Total Resistance Coefficient (CT)

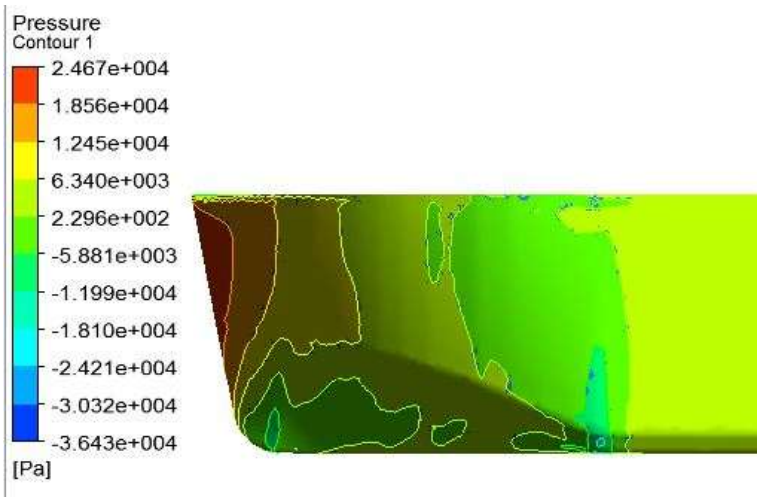
V (knot)	***Total Resistance Coefficient* (C_T)**		
	Bentuk Lambung Asli	**X-bow**	**Axe-bow**
8.00	0.003385	0.003252	0.003271
9.00	0.002855	0.002728	0.002719
10.00	0.002954	0.002835	0.002733
11.00	0.003384	0.003161	0.003072



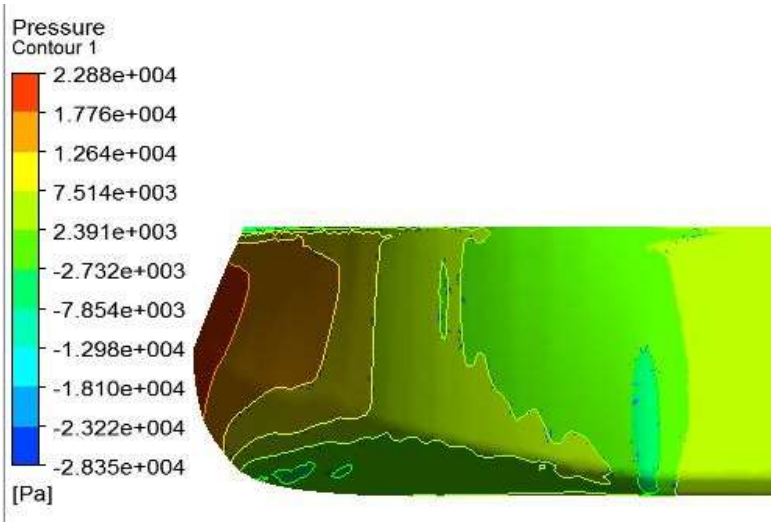
Gambar 5.14 perbandingan Total Resistance Coefficient (CT)

5.5 Analisis Distribusi Tekanan

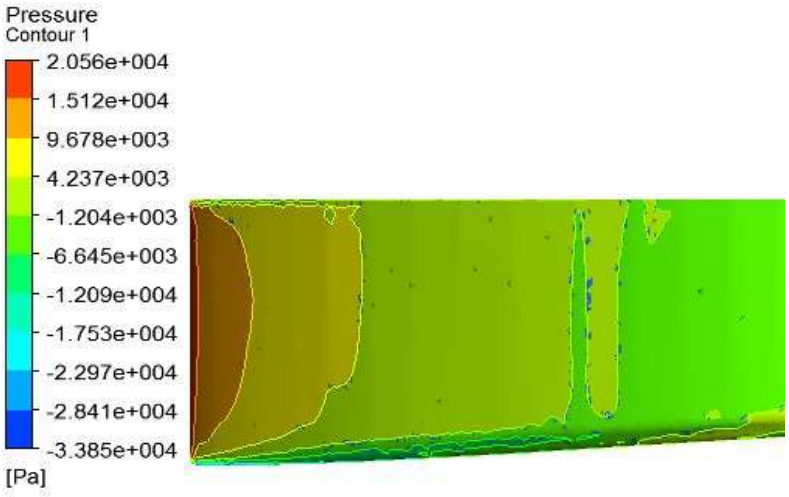
Selain dilihat dari besarnya hambatan total pengaruh modifikasi bagian haluan kapal ini juga dilihat dari distribusi tekanan disepanjang kapal. Pada Gambar 5.15 dapat dilihat distribusi tekanan untuk bentuk lambung Asli, dimana nilai *pressure* maksimumnya adalah $2.467x10^4$ Pa. Sedangkan bentuk lambung X-bow dan Axe-bow masing-masing memiliki *pressure* maksimum $2.288x10^4$ dan $2.056x10^4$ Pa (Gambar 5.16 dan Gambar 5.17).



Gambar 5.15 Distribusi Tekanan Haluan Bentuk Lambung Asli

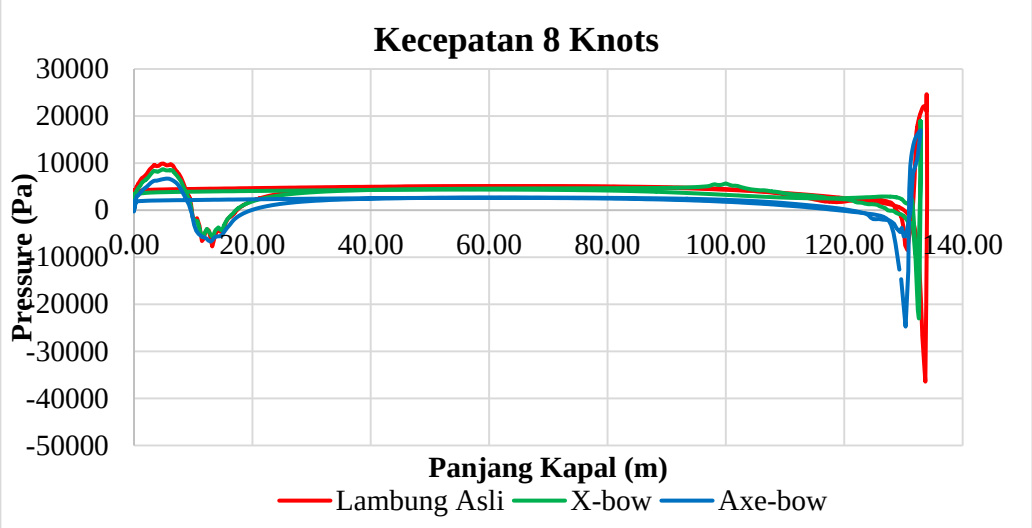


Gambar 5.16 Distribusi Tekanan Haluan Bentuk Lambung X-bow

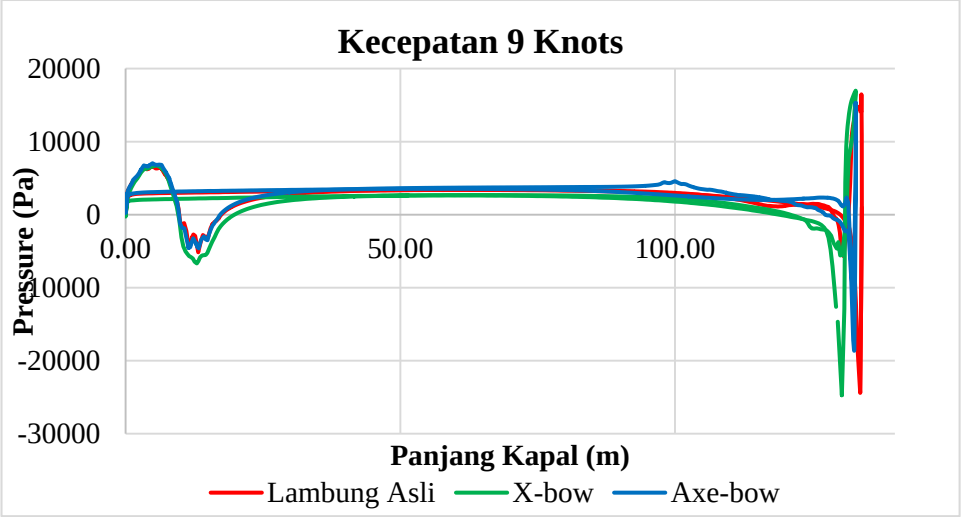


Gambar 5.17 Distribusi Tekanan Haluan Bentuk Lambung Axe-bow

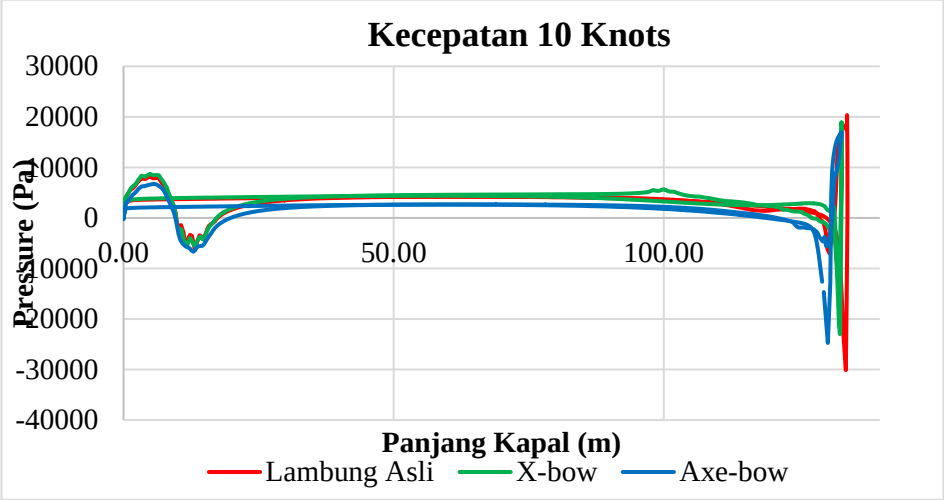
Perbedaan distribusi tekanan di sepanjang kapal dari ketiga bentuk lambung juga dapat dilihat dalam bentuk plot kurva panjang kapal terhadap preesure seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5.18 sampai Gambar 5.21. Dapat dilihat bahwa besarnya *pressure* bentuk lambung asli paling besar dan bentuk lambung Axe-bow paling kecil. Terlihat jelas dari nilai *pressure* pada bagian haluan. Hal ini sebanding dengan besarnya nilai hambatan dari ketiga bentuk lambung.



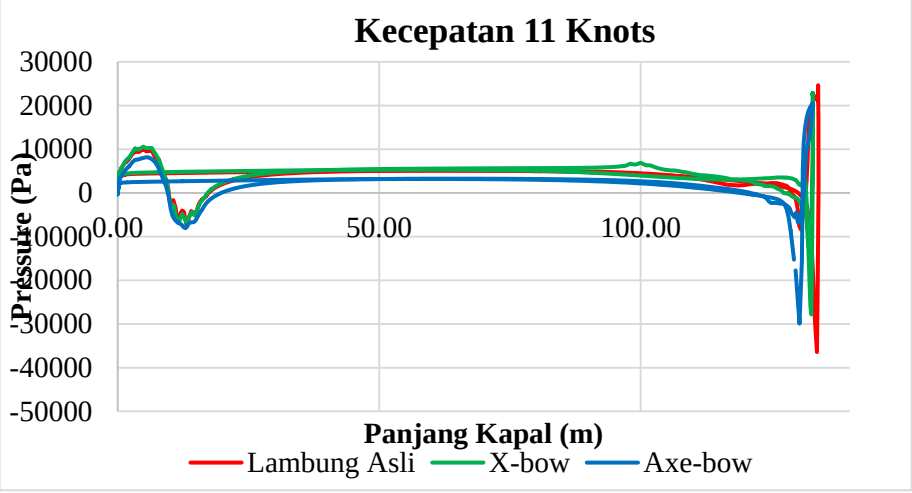
Gambar 5.18 Kurva Distrisbusi *Pressure* Pada Kecepatan 8 Knots



Gambar 5.19 Kurva Distrisbusi *Pressure* Pada Kecepatan 9 Knots



Gambar 5.20 Kurva Distrisbusi *Pressure* Pada Kecepatan 10 Knots



Gambar 5.21 Kurva Distrisbusi *Pressure* Pada Kecepatan 11 Knots

BAB 6
ANALISIS *SEAKEEPING*

6.1 Batasan Analisis *Seakeeping*

Analisis *seakeeping* pada kapal ini hanya dilakukan untuk gerakan *heave* dan *pitch*. Hal ini dikarenakan proses modifikasi hanya dilakukan pada bagian haluan kapal atau searah memanjang kapal. Sehingga hanya titik berat kapal secara memanjang yang berubah. Perubahan titik berat memanjang ini tidak memiliki pengaruh besar untuk keempat gerakan *seakeeping* lainnya; *surge, sway, roll,* dan *yaw*. Titik berat kapal secara vertikal memang berubah tetapi sangat kecil dan tidak memiliki pengaruh yang besar terhadap analisis *seakeeping* kapal ini.

Analisis *seakeeping* ini dilakukan pada gelombang irregular mengingat gelombang yang mempengaruhi gerakan kapal di laut secara umum merupakan gelombang irregular. Tidak ada 2 gelombang yang memiliki tinggi yang sama pada permukaan laut dengan kecepatan berbeda dan arah yang berbeda. Simulasi *seaakeeping* akan dilakukan pada kondisi model diam dan model bergerak dengan kecepatan maju (*forward speed*). Model diam akan dianalisis pada 5 (lima) variasi sudut hadap gelombang (*wave heading*); 0^o (*following sea*), 45^o, 90^o (*beam sea*), 135^o dan 180^o (*heading sea*). Sedangkan model bergerak disimulasikan hanya pada arah gelombang 180^o dengan 2 (dua) vasiasi kecepatan, 8 knots dan 11 knots.

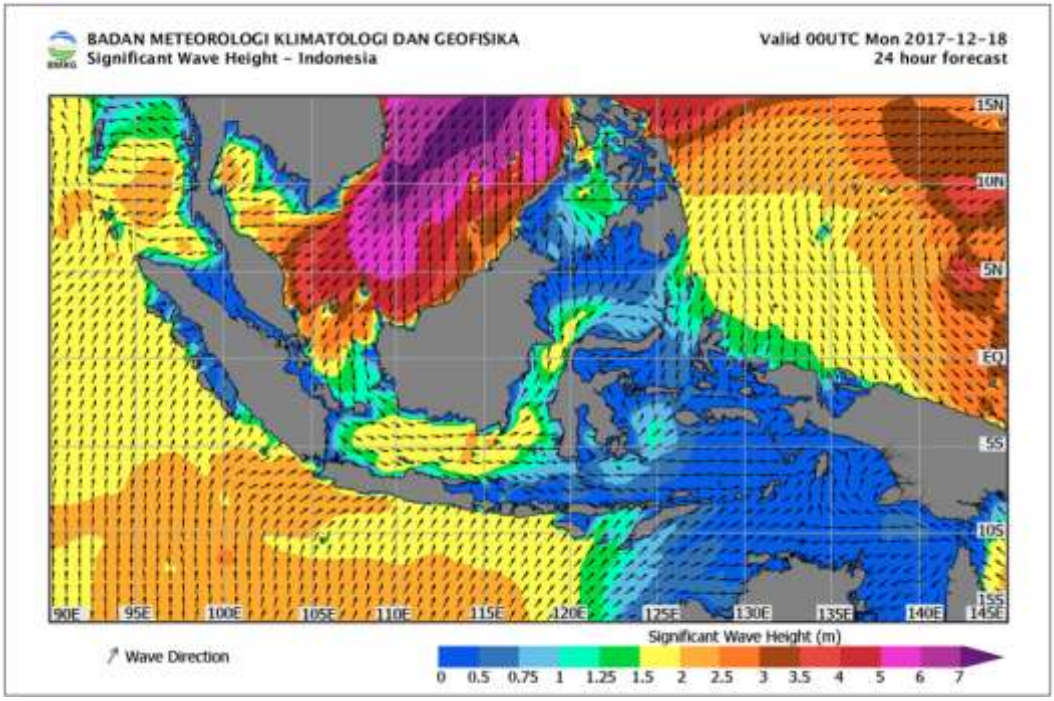
Sedangkan untuk tinggi gelombang signifikan atau *significant wave high* (Hs) ditentukan berdasarkan data dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) pada tanggal 18 Desember 2017 sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 6.1. Dimana distribusi tinggi gelombang di perairan Indonesia dibagi dalam beberapa area, antara lain sebagai berikut:

1. 1.25 - 2.50 m (*Moderate Sea*) :

   Selat Malaka bagian utara, Perairan Lhokseumawe, Perairan P. Sabang, Perairan barat Aceh, Perairan barat P. Simeulue – Kep. Mentawai, Perairan Enggano - Bengkulu, Perairan barat Lampung, Selat Sunda bagian selatan, Perairan selatan Banten, Perairan selatan Jawa hingga Sumbawa, Selat Bali – Selat Lombok – Selat Alas bagian selatan, Perairan selatan P. Sumba – P.

Sawu, Laut Sawu, Samudra Hindia barat Sumatra hingga selatan NTT, Perairan utara Pangkal Pinang, Selat Karimata, Perairan selatan Kalimantan, Laut Jawa bagian barat, Perairan Kotabaru, Selat Makassar bagian tengah dan utara, Laut Sulawesi bagian barat dan tengah, Perairan Kep.Sangihe – Kep.Talaud, Laut Maluku bagian utara, Perairan utara Halmahera, Laut Halmahera, Perairan utara Papua Barat hingga Papua, Samudra Pasifik utara Halmahera hingga Papua barat.

2. 2.50 - 4.0 m (*Rough Sea*) :
   Laut Natuna, Perairan utara Kep. Bintan, Laut Jawa bagian tengah dan timur, Selat Makassar bagian selatan, Samudera Pasifik utara Papua.
3. 4.0 - 6.0 m (*Very Rough Sea*) :
   Laut Natuna Utara, Perairan utara Perairan Kep.Anambas - Kep. Natuna



Gambar 6.1 Distribusi Tinggi Gelombang Signifikan di Perairan Indonesia

Pada analisis *seakeeping* yang dilakukan pada kapal ini dipilih empat variasi tinggi gelombang signifikan (Hs), yaitu 1.25 m, 2.5 m, 4 m, dan 6 m berdasarkan kondisi perairan Indonesia. Selain batasan tinggi gelombang pada analisis ini juga diberikan batasan nilai gamma (γ) dan periode puncak atau *peak periode* (T). Menurut Djatmiko (2012), tinggi gelombang di Indonesia adalah

antara 2.0 – 2.5. Pada analisis ini dipilih panjang gelombang terbesar yaitu 2.5 m. Dan untuk *peak periods* didapatkan nilai sebesar 5.2 sekon dari perhitungan berdasarkan persamaan 2.4.

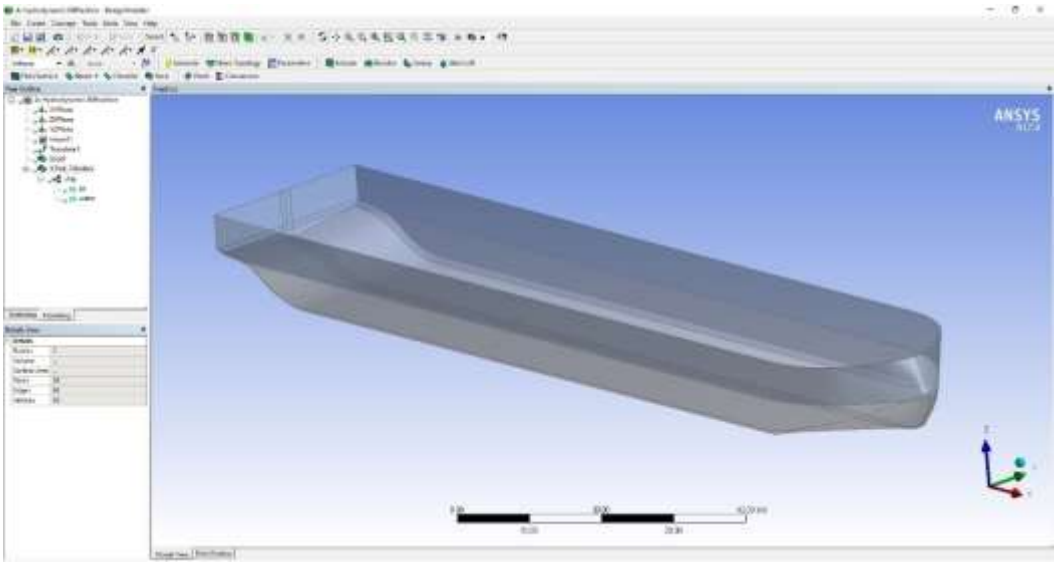
6.2 Tahap-tahap Analisis *Seakeeping*

Tahap-tahap analisis *seakeeping* yang dilakukan pada kapal ini dimulai dari pengaturan geometri awal, input data, meshing, dan proses *solving*. Analisis *seakeeping* dilakukan menggunakan sistem analisis *hydrodynamic diffraction* untuk mencari Response Amplitude Operator (RAO) dan *hydrodynamics response* untuk menganalisis *wave spectrum* serta *time response*.

6.2.1 Pengaturan Geometri

Langkah–langkah yang harus dilakukan dalam pengaturan geometri pada *Comercial Software* untuk analisis *seakeeping* adalah sebagai berikut:

1) Pertama harus dipastikan *body* kapal dalam bentuk 3D *surface* bukan 3D *solid,* karena *Software* ini hanya bisa melakukan proses *solving* untuk benda 3D *surface.* Apabila *body* kapal masih dalam bentuk *solid,* maka harus dijadikan bentuk *surface* terlebih dahulu dengan *toolbar create – thin/surface.*
2) Kedua posisi sarat kapal dijadikan sebagai *zero point* searah sumbu XY dengan menggunakan tool *body transformation,* lalu pilih *translate* dan masukkan nilai minus dari tinggi sarat kapal.
3) Selanjutnya model kapal harus didefinisikan bagian yang tercelup air dan bagian yang berada di atas air dengan menggunakan *tool create – slice,* sehingga kapal akan didefinisikan menjadi dua *body,* yaitu bentuk *body* bagian atas dan *body* bagian bawah garis air. Pembagian *body* berdasarkan pembagian *body transformation* langkah sebelumnya.
4) Yang terakhir adalah langkah *joint part,* pilih tiga bagian kapal pada pohon perintah kemudian klik kanan pada mouse dan pilih perintah *Form New Part* seperti ditunjukkan pada gambar IV. 1 di bawah ini. Langkah ini umumnya akan membuat model kapal menjadi *1 part and 2 bodies,* yaitu *body* bagian atas dan bawah kapal.



Gambar 6.2 Hasil Pengaturan Geometri

6.2.2 Input Data Simulasi

Setelah melakukan pengaturan geometri pada *design modeler*, langkah selanjutnya adalah penginputan data model kapal dan data lingkungan untuk simulasi menggunakan *Software* ini sebagai berikut:

a) Lingkungan simulasi

Data lingkungan untuk simulasi *Self Propelled Barge* ini adalah perairan Indonesia. Berikut data simulasi yang digunakan:

Kedalaman operasional : 150 m
Kedalaman maksimum : 250 m
Massa jenis fluida : 1025 kg/m^3
Kecepatan arus : 1 knot
Kecepatan angin maks. : 20 knot
Ketinggian gelombang : 1.25 m, 2.5 m, 4 m, dan 6 m

b) *Point mass* dan *Point Bouyancy*

Untuk mempermudah proses simulasi, proses input pada *point mass* ini dipilih dari *direct input of inertia*, sehingga nilai radius girasi secara otomatis akan

keluar (Twiasyuni, 2016). Detail input dari *point mass* dan *point bouyancy* untuk bentuk lambung asli, X-bow, dan Axe-bow dapat dilihat pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Input *Point Mass* dan *Point Bouyancy*

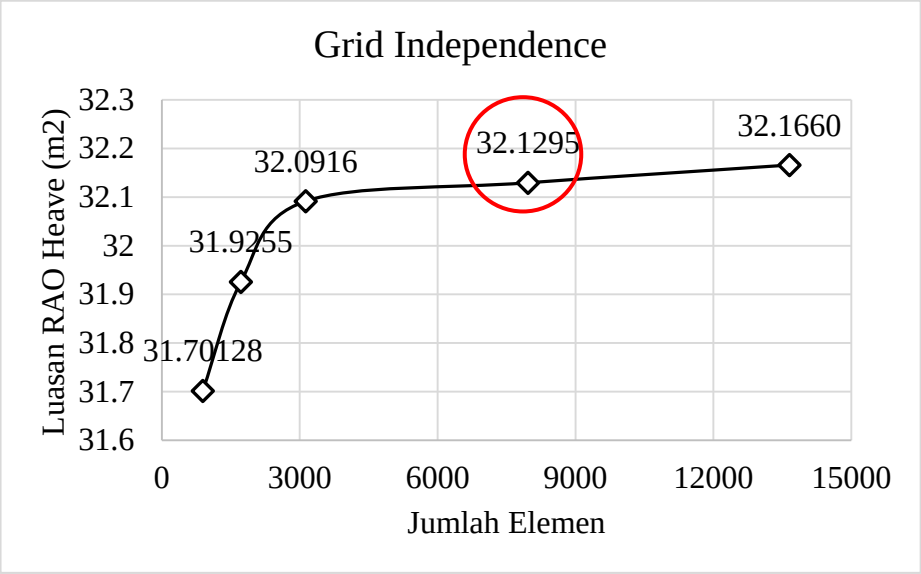
	Bentuk Lambung Asli	**X-bow**	**Axe-bow**
LCG (m)	66,171	66,171	66,171
KG (m)	5,490	5,490	5,490
Massa (kg)	17086000,000	17086000,000	17086000,000
LCB (m)	66,208	66,353	66,249
KB (m)	2,796	2,785	2,683
Volume (m3)	16668,411	16669,593	16669,020
Kxx (m)	8,976	8,976	8,976
Kyy (m)	33,225	33,225	33,225
Kzz (m)	34,554	34,554	34,554
Ixx (m)	1376594689,536	1376594689,536	1376594689,536
Iyy (m)	18861246078,75	18861246078,75	18861246.07,875
Izz (m)	20400323758,776	20400323758,776	20400323758,776

6.2.3 *Meshing*

Setelah input data selesai dilakukan selanjutnya model kapal dibagi dalam beberapa elemen atau disebut *meshing.* Langkah ini merupakan tahap yang penting dan sangat berpengaruh terhadap proses *solving*. Semakin kecil ukuran elemen maka semakin banyak jumlah elemen, sehingga hasil yang didapatkan akan semakin akurat. Untuk mengetahui jumlah elemen yang optimum maka dilakukan pembuatan *grid independence* yang prinsipnya sama dengan pembuatan *grid independence* pada analisis hambatan. Pada pembuatan *grid independence* untuk analisis *seakeeping* ini menggunakan acuan nilai RAO *heave* dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 6.2.

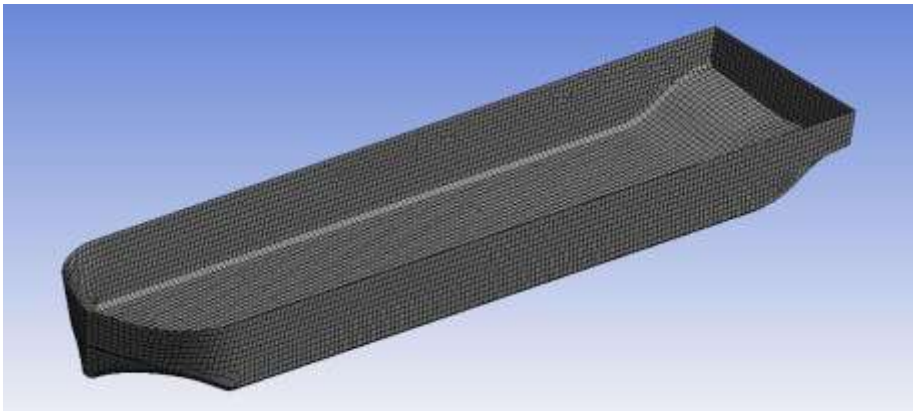
Tabel 6.2 *Grid Independence* untuk Analisis *Seakeeping*

No. Simulasi	Ukuran Elemen (m)	Jumlah Elemen	Luasan Kurva RAO Heave	Selisih %
1	5	889	31.70128	0.707%
2	3.5	1719	31.9255	0.520%
3	2.5	3129	32.0956	0.118%
4	1.5	7966	32.1295	0.114%
5	1.15	13655	32.1660	-



Gambar 6.3 *Grid Independence* untuk Analisis *Seakeeping*

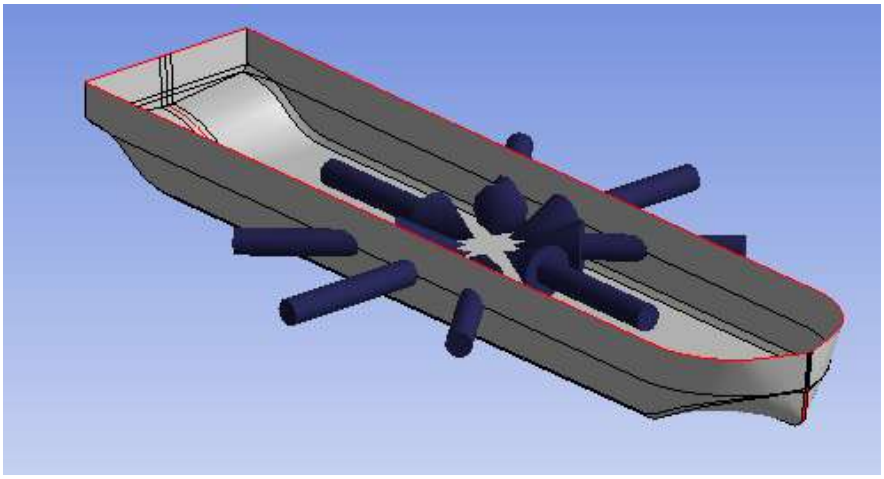
Dari Tabel 6.2 dapat dilihat bahwa pada simulasi ke-4 dengan ukuran elemen 1.5 m didapatkan selisih sebesar 0.118% dari simulasi sebelumnya, sehingga jumlah elemen ini yang digunakan untuk analisis *seakeeping*. Sebenarnya pada simulasi ke-5 selisih hasilnya lebih kecil lagi, namun mengingat semakin banyak elemen semakin lama proses *solving* maka yang dipilih adalah hasil simulasi ke-4. Hasil dari pembuatan *meshing* dari simulasi ke-4 ini dapat dilihat pada Gambar 6.4.



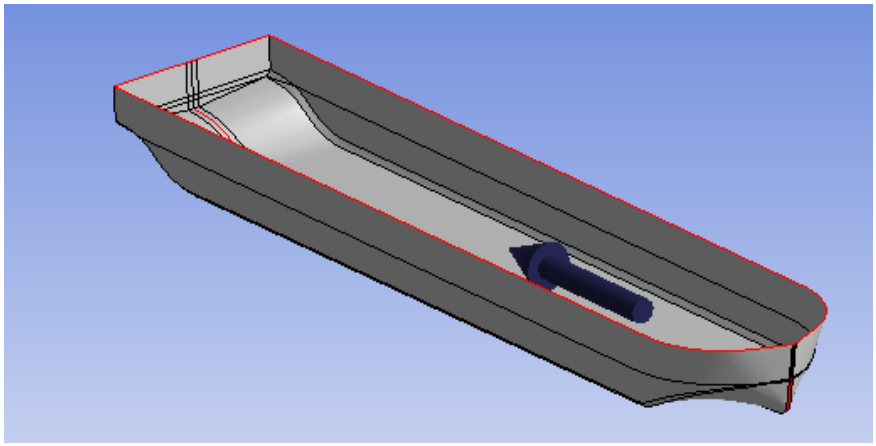
Gambar 6.4 Meshing untuk Analisis Seakeeping

6.2.4 *Proses Solving*

Proses *solving* ini adalah proses dimana akan ditentukan hasil apa yang ingin didapatkan dari simulasi ini. Untuk simulasi ini hasil yang akan didapatkan adalah nilai *Response Amplitude Operators* (RAOs) dari model. Dalam sekali proses *solving* dapat dianalisis beberapa nilai RAOs lebih dari satu gerakan *seakeeping* pada enam derajat kebebasan sekaligus, tergantung *output* apa yang ditentukan dalam *solution*. Sebelum proses *solving* dilakukan ada beberapa parameter yang harus ditentukan seperti *wave directions* dan *wave frequencies.* Pada *wave frequencies*, rentang frekuensi gelombang yang akan dianalisis antara 0,1 - 2,1 rad/s dengan interval pertambahannya sebesar 0,1 rad/s.



Gambar 6.5 Arah Datang Gelombang untuk Simulasi Kapal Diam



Gambar 6.6 Arah Datang Gelombang untuk Simulasi Kapal Bergerak

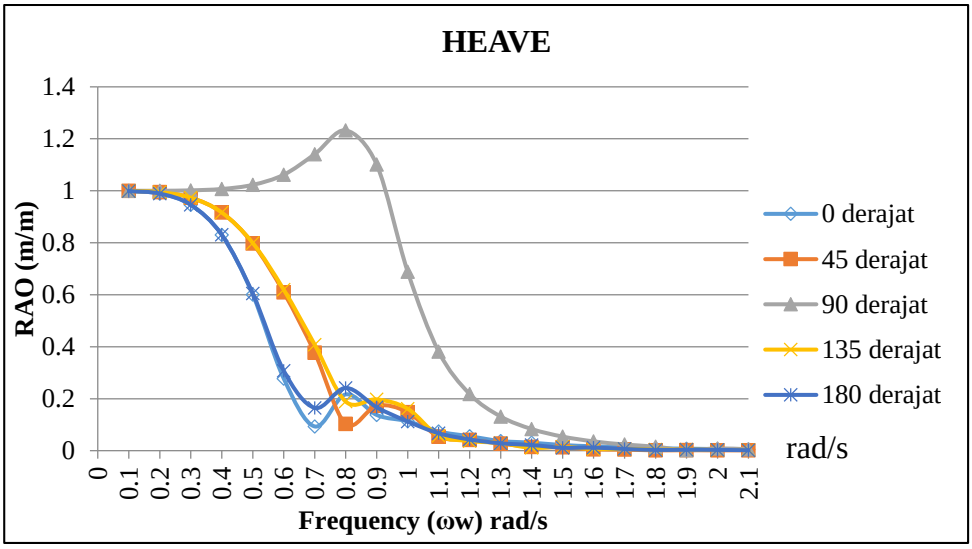
Seperti yang telah dijelaskan diawal bahwa analisis *seakeeping* untuk kapal ini dilakukan pada kondisi kapal diam dan bergerak. Untuk analisis model kapal diam dilakukan pada 5 sudut hadap; 0^o, 45^o, 90^o, 135^o dan 180^o. Sedangkan untuk model bergerak hanya dianalisis pada sudut hadap 180^o dengan 2 (dua) vasiasi kecepatan, 8 knots dan 11 knots.

6.3 Hasil Analisis *Seakeeping*

Hasil atau output dari analisis s*eakeeping* ini terdiri dari *Response Amplitude Operator* (RAO), perhitungan *wave spectrum, spectrum response, significant amplitude*, dan kriteria batasan gerakan *heave* dan *pitch* untuk kapal *Self Propelled Barge* pada gelombang irregular. Dari hasil nilai-nilai tersebut akan diketahui apakah model lambung X-bow dan Axe-bow memiliki kriteria gerakan *heave* dan *pitch* yang lebih baik dari bentuk lambung asli.

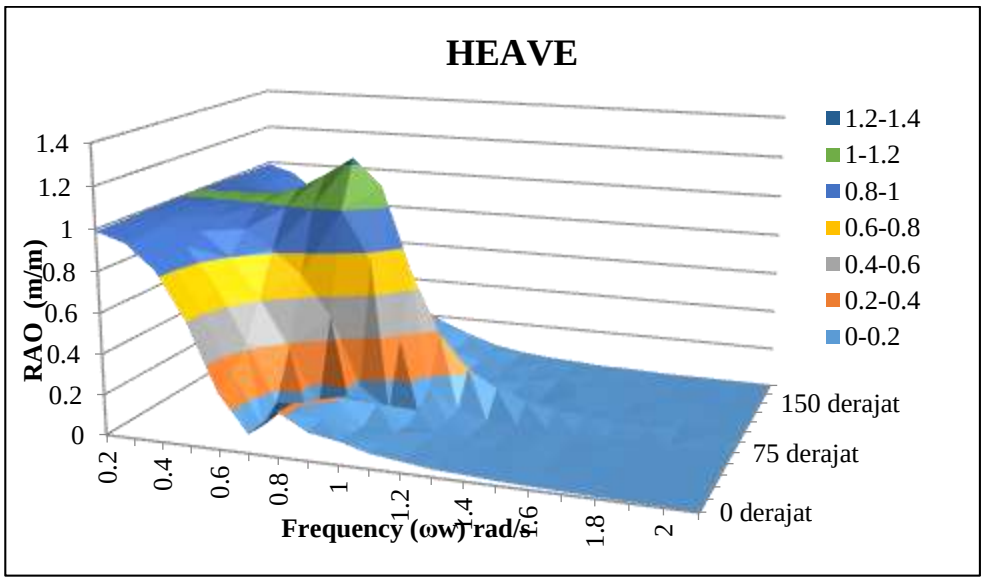
6.3.1 RAO Model Asli Kondisi Diam

Hasil RAO model kapal asli untuk gerakan *heave* pada kondisi kapal diam dapat dilihat pada Gambar 6.7. Dapat dilihat bahwa nilai respon yang paling tinggi terjadi pada sudut hadap 90^o dan frekuensi 0,9 rad/s dengan nilai 1,232 m/m. Untuk keempat sudut hadap lainnya nilai RAO terbesarnya tidak terlalu berbeda dengan besar masing-masing dari sudut 0^o, 45^o, 135^o dan 180^o adalah 0.99906 m/m, 0.99955 m/m, 0.99954 m/m, dan 0.99906 m/m.



Gambar 6.7 RAO Gerakan *Heave* Pada Kondisi Kapal Diam

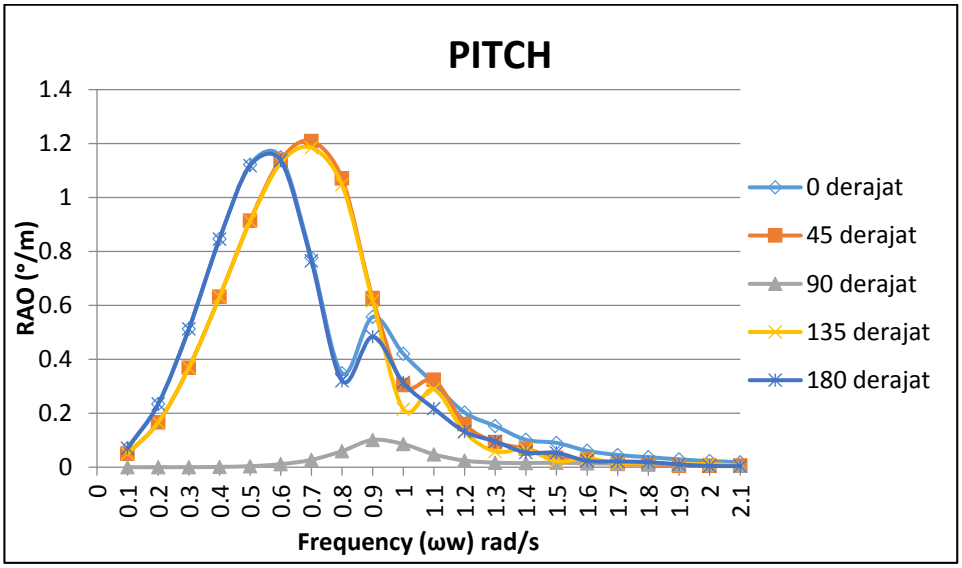
Untuk lebih jelasnya bentuk RAO gerakan *heave* dari model asli kapal ini dapat dilihat dalam bentuk 3 Dimensi pada Gambar 6.8. Gerakan *heave* ini memiliki frekuensi natural 0.9 rad/s dan periode natural sekitar 6.98 detik yang terjadi pada sudut hadap 90º.



Gambar 6.8 RAO Gerakan *Heave* dalam 3 Dimensi

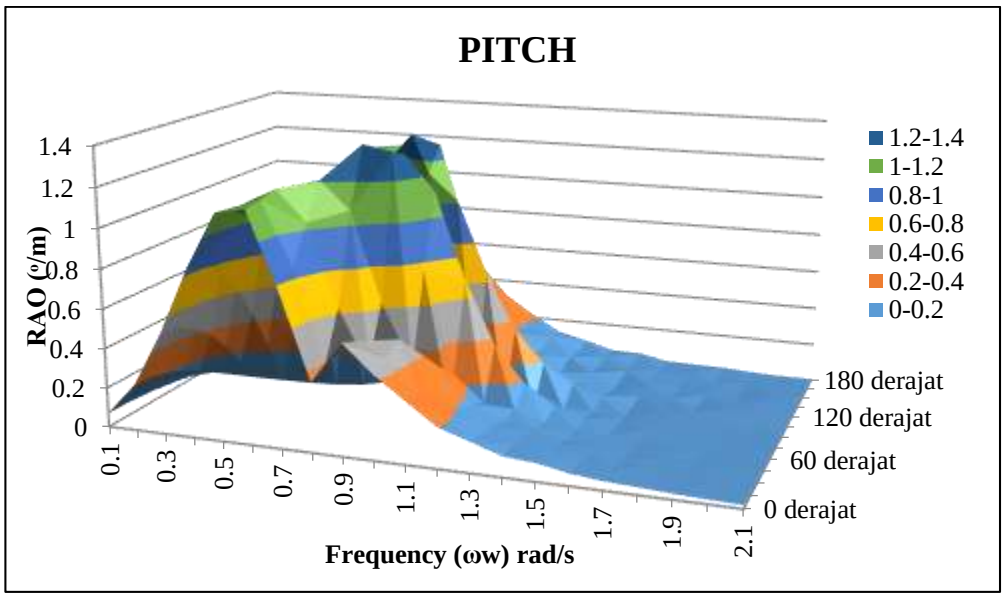
Sedangkan hasil RAO untuk gerakan *pitch* pada kondisi kapal diam dapat dilihat pada Gambar 6.9. Dapat dilihat bahwa nilai respon pada sudut hadap 90º paling kecil dibandingkan keempat sudut hadap lainnya dimana nilai terbesarnya hanya 0.1011 m/m. Dan untuk keempat sudut hadap lainnya nilai RAO terbesarnya

tidak terlalu berbeda dengan besar masing-masing dari sudut hadap 0º, 45º, 135º dan 180º adalah 1.14947 º/m, 1.20939 º/m, 1.18497 º/m, dan 1.13693 º/m. Jadi respon terbesar terjadi pada sudut hadap 45º, tepatnya pada frekuensi 0.7 rad/s sebesar 1.20939 º/m.



Gambar 6.9 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam

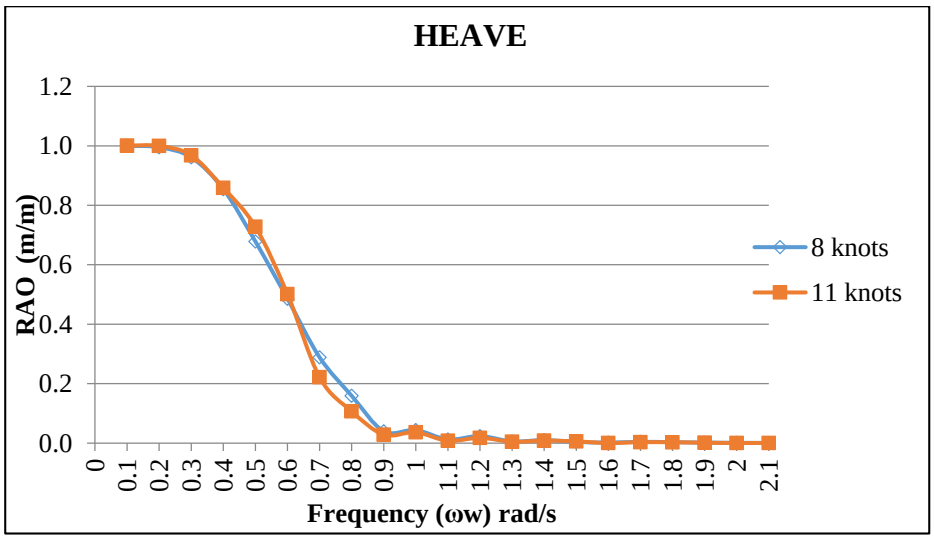
Untuk lebih jelasnya bentuk RAO gerakan *heave* dari model asli kapal ini dapat dilihat dalam bentuk 3 Dimensi pada Gambar 6.8. Gerakan *heave* ini memiliki frekuensi natural 0.7 rad/s dan periode natural sekitar 8.976 detik yang terjadi pada sudut hadap 45º.



Gambar 6.10 RAO Gerakan *Pitch* dalam 3 Dimensi

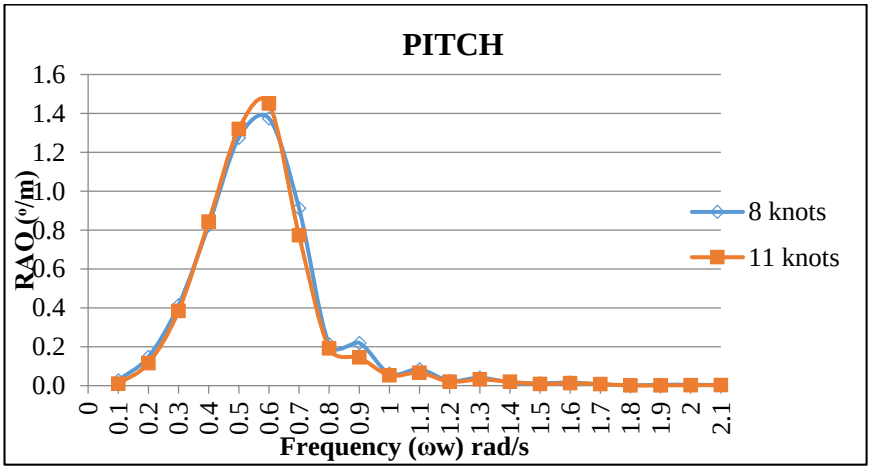
6.3.2 RAO Model Asli Kondisi Bergerak

Hasil RAO model kapal asli untuk gerakan *heave* pada kondisi kapal bergerak dapat dilihat pada Gambar 6.11. dapat dilihat bahwa antara frekuensi 0.1 rad/s sampai 0.6 rad/s nilai RAO *heave* kapal pada kecepatan 11 knots lebih besar dari RAO pada kecepatan 8 knots dengan nilai RAO terbesar 1.00111 m/m tepat pada frekuensi 0.1 rad/s. Sebaliknya pada frekuensi 0.7 rad/s keatas nilai RAO *heave* pada kecepatan 8 knots lebih besar dari kecepatan 11 knots dengan nilai RAO terbesar 1.00021 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s.



Gambar 6.11 RAO Gerakan *Heave* Pada Kondisi Kapal Bergerak

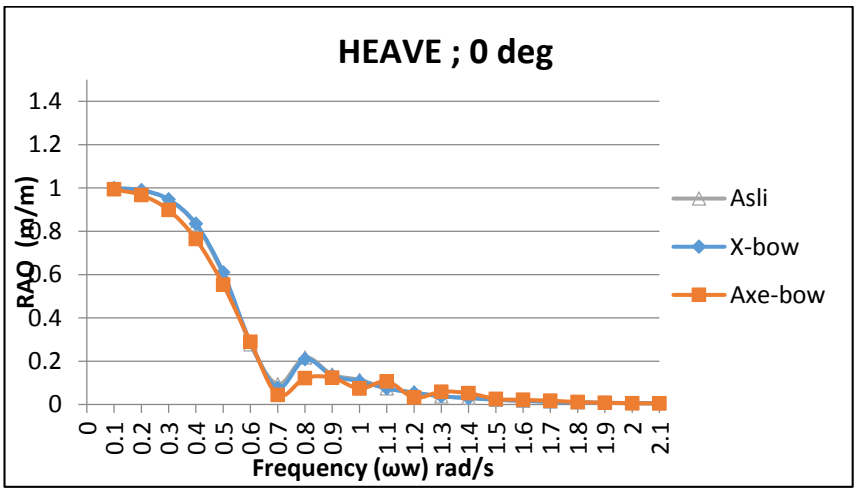
Sedangkan untuk gerakan *pitch* pada kondisi kapal bergerak dapat dilihat pada Gambar 6.12. Dapat dilihat bahwa antara frekuensi 0.1 rad/s sampai 0.6 rad/s nilai RAO *pitch* kapal pada kecepatan 11 knots lebih besar dari RAO pada kecepatan 8 knots dengan nilai RAO terbesar 1.45091 ^{o}/m tepat pada frekuensi 0.1 rad/s. Sebaliknya pada frekuensi 0.7 rad/s keatas nilai RAO *pitch* pada kecepatan 8 knots lebih besar dari kecepatan 11 knots dengan nilai RAO terbesar 1.37474 ^{o}/m pada frekuensi 0.1 rad/s.



Gambar 6.12 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Bergerak

6.3.3 RAO Model Hasil Modifikasi Kondisi Diam

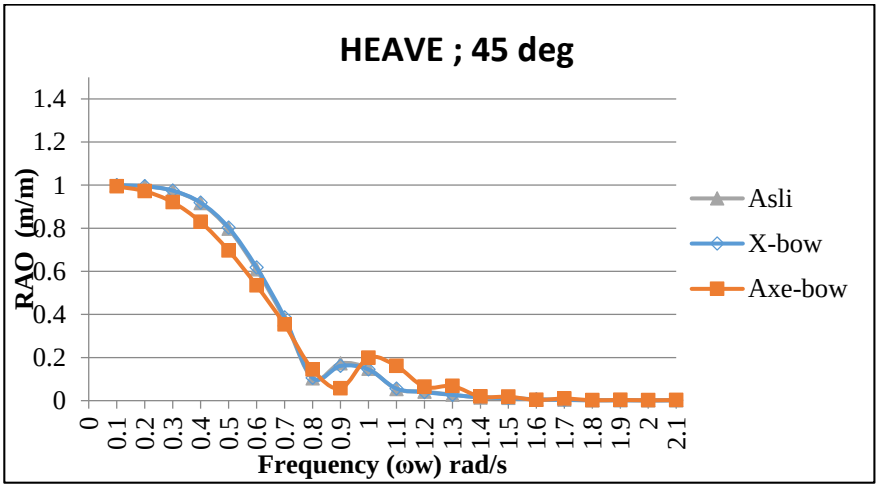
Hasil RAO model kapal hasil modifikasi untuk gerakan *heave* pada kondisi kapal diam dapat dilihat pada Gambar 6.13 sampai Gambar 6.17. Dapat dilihat pada Gambar 6.13 untuk sudut hadap 0^{o} nilai RAO *heave* antara frekuensi 0.1 rad/s sampai 1 rad/s untuk bentuk lambung Asli dan X-bow lebih besar dari RAO bentuk lambung Axe-bow dengan nilai RAO terbesar 0.99906 m/m dan 0.99908 m/m tepat pada frekuensi 0.1 rad/s. Sebaliknya pada frekuensi 1.1 rad/s keatas nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung Axe-bow cenderung lebih besar dari bentuk lambung Asli dan X-bow dengan nilai RAO terbesar 0.99370 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s.



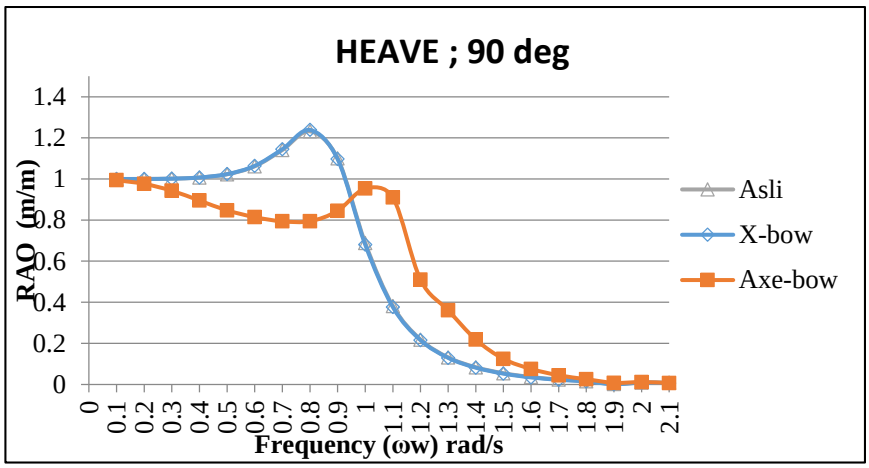
Gambar 6.13 RAO Gerakan *Heave* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 0^{o}

Hal yang sama juga terjadi pada sudut hadap 45º, 90º, 135º dan 180º dimana nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung Asli masing-masing adalah 0.99955 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s, 1.23222 m/m pada frekuensi 0.8 rad/s, 0.99954 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s, dan 0.99906 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s. Nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung X-bow masing-masing adalah 0.99956 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s, 1.23882 m/m pada frekuensi 0.8 rad/s, 0.99956 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s, dan 0.99909 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s. Sedangkan nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung Axe-bow masing-masing adalah 0.99412 m/m, 0.99454 m/m, 0.99412 m/m, dan 0.99370 m/m yang semua terjadi pada frekuensi 0.1 rad/s.

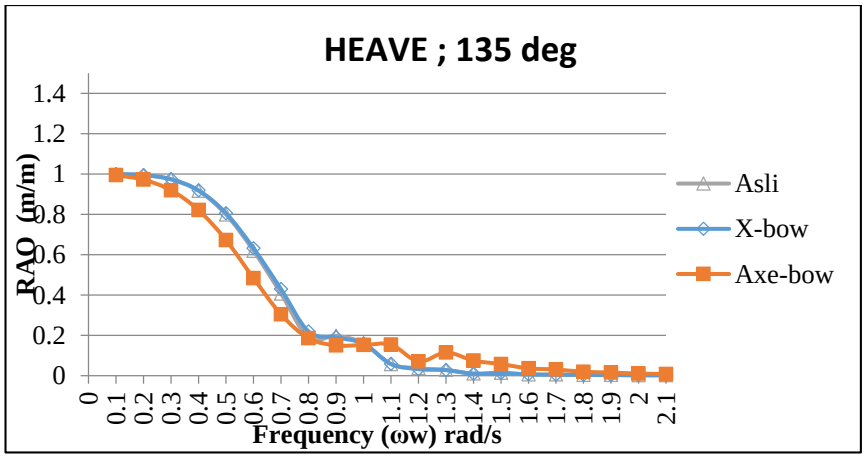
Nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung Axe-bow paling kecil dibandingkan bentuk lambung asli dan X-bow untuk semua posisi sudut hadap dengan perbedaan yang telihat cukup signifikan pada sudut hadap 90º. Sedangkan nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung asli dan X-bow besarnya tidak jauh berbeda sehingga pada Gambar 6.13 sampai Gambar 6.17 kedua kurvanya terlihat berimpit. Nilai RAO *heave* bentuk lambung X-bow paling besar dibandingkan dua bentuk lambung lainnya.



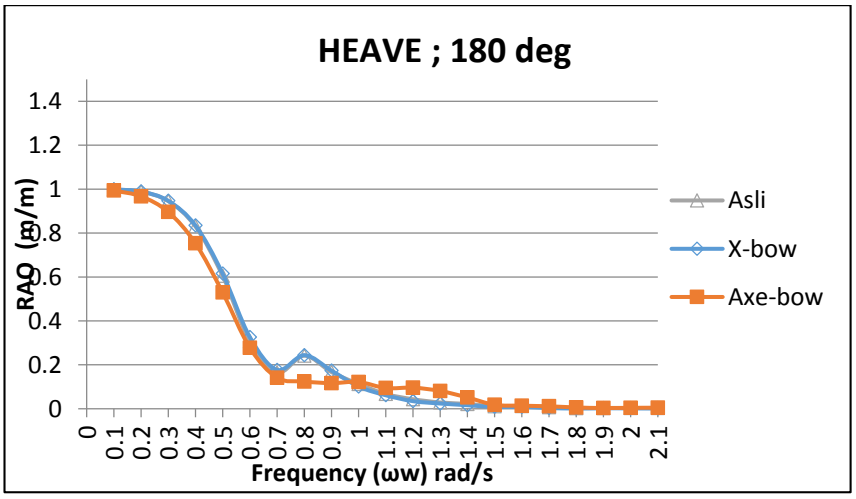
Gambar 6.14 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 45º



Gambar 6.15 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 90^{o}

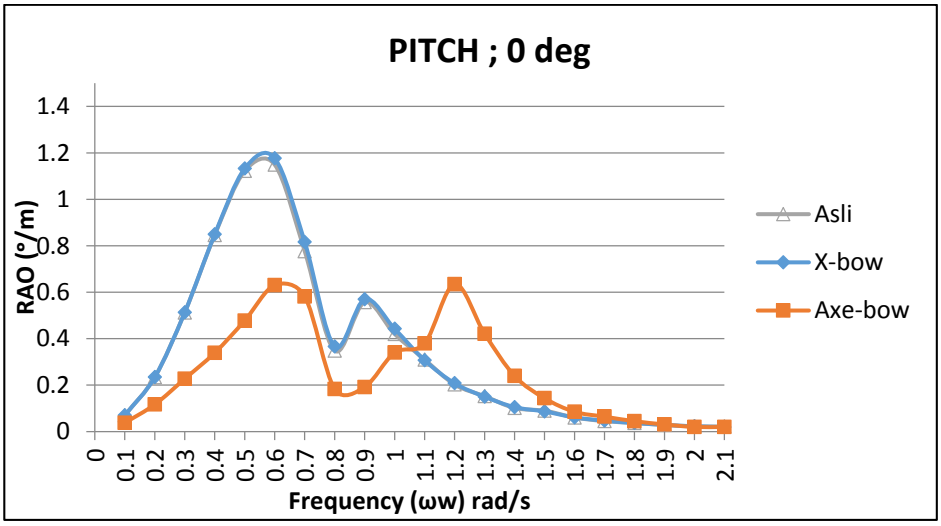


Gambar 6.16 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 135^{o}



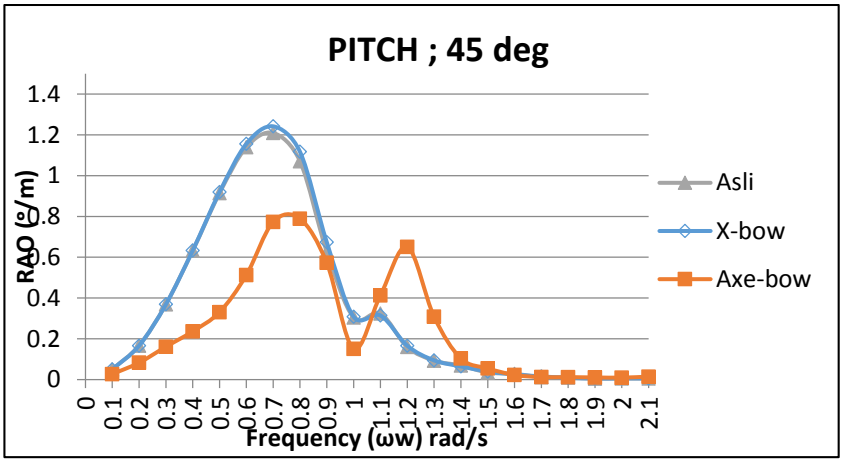
Gambar 6.17 RAO Gerakan Heave Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 180^{o}

Sedangkan hasil RAO model kapal hasil modifikasi untuk gerakan *pitch* pada kondisi kapal diam dapat dilihat pada Gambar 6.18 sampai Gambar 6.21. Dapat dilihat pada Gambar 6.13 untuk sudut hadap 0º nilai RAO *pitch* antara frekuensi 0.1 rad/s sampai 1.1 rad/s untuk bentuk lambung Asli dan X-bow lebih besar dari RAO bentuk lambung Axe-bow dengan nilai RAO terbesar 1.14947 m/m dan 1.17670 º/m tepat pada frekuensi 0.1 rad/s. Sebaliknya pada frekuensi 1.2 rad/s keatas nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung Axe-bow cenderung lebih besar dari bentuk lambung Asli dan X-bow dengan nilai RAO terbesar 0.63464 º/m pada frekuensi 1.2 rad/s.

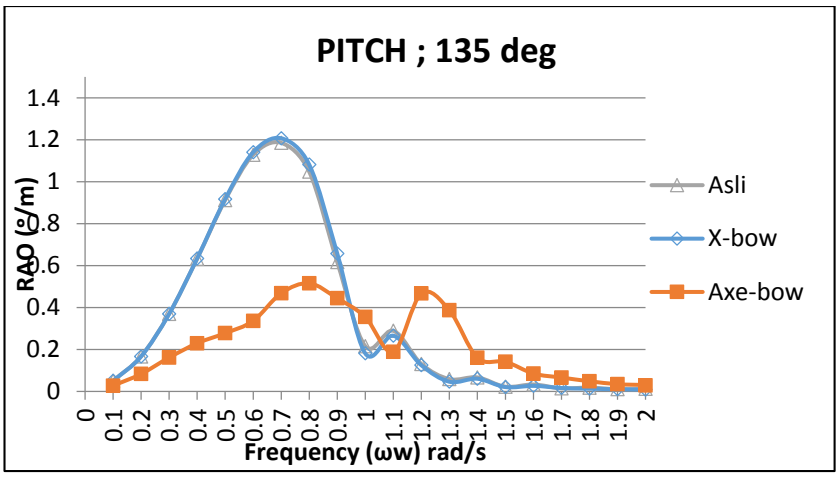


Gambar 6.18 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 0º

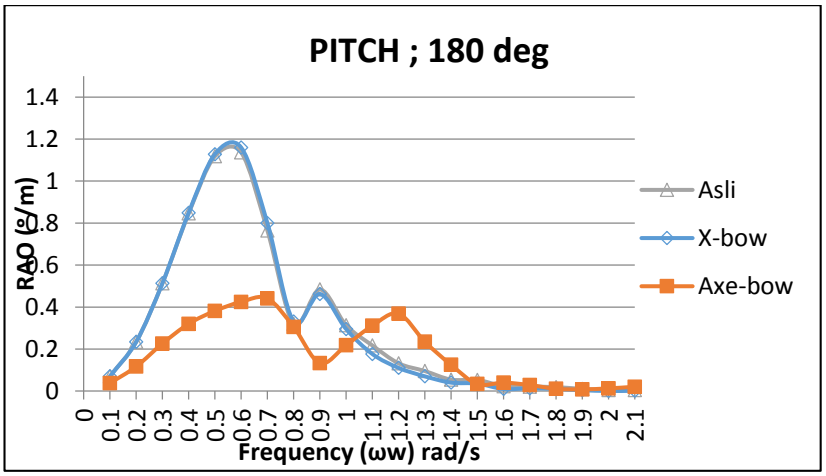
Hal yang sama juga terjadi pada sudut hadap 45º, 135º dan 180º dimana nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung Asli masing-masing adalah 1.20939 º/m pada frekuensi 0.7 rad/s, 1.18497 º/m pada frekuensi 0.7 rad/s, dan 1.13693 º/m pada frekuensi 0.6 rad/s. Nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung X-bow masing-masing adalah 1.24227 m/m pada frekuensi 0.7 rad/s, 1.20679 m/m pada frekuensi 0.7 rad/s, dan 1.15954 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s. Sedangkan nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung Axe-bow masing-masing adalah 0.78865 º/m pada frekuensi 0.8 rad/s, 0.51511 º/m pada frekuensi 0.8 rad/s, dan 0.44089 º/m pada frekuensi 0.7 rad/s.



Gambar 6.19 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 45º

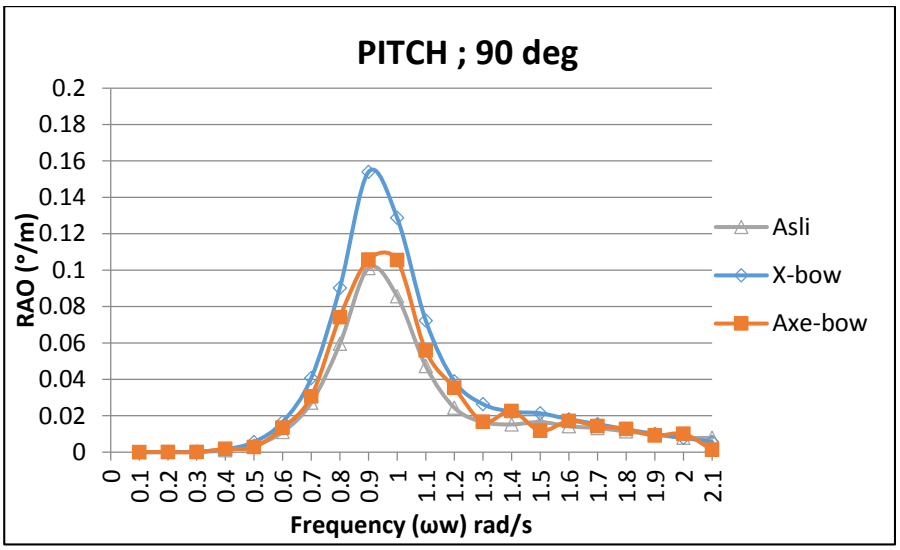


Gambar 6.20 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 135º



Gambar 6.21 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 180º

Sedangkan nilai RAO *pitch* pada sudut hadap 90º berbeda, dimana bentuk lambung X-bow memiliki nilai RAO paling besar dan nilai RAO bentuk lambung asli paling kecil dibandingkan bentuk lambung lainnya. Nilai RAO *pitch* bentuk lambung asli, X-bow, dan Axe-bow pada sudut hadap 90º masing-masing adalah 0.10110 º/m, 0.15393 º/m, dan 0.10576 º/m yang semunya terjadi pada frekuensi 0.9 rad/s.

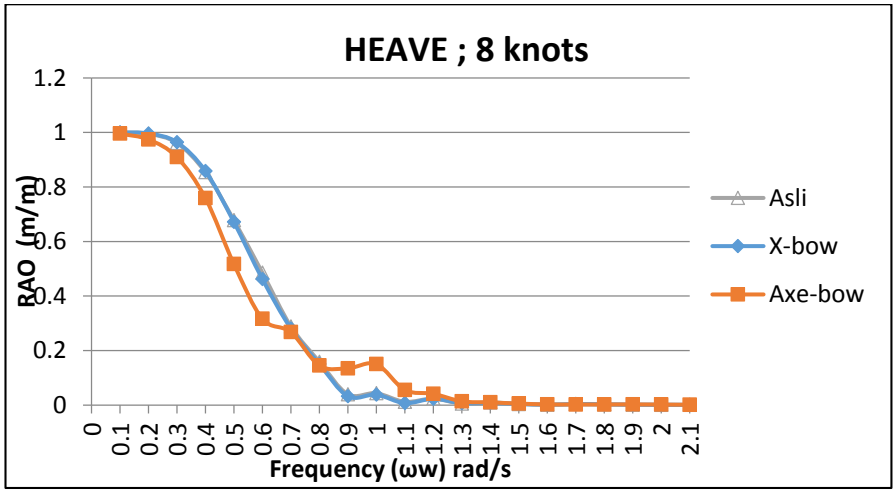


Gambar 6.22 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Diam Dengan Sudut Hadap 90º

6.3.4 RAO Model Hasil Modifikasi Kondisi Bergerak

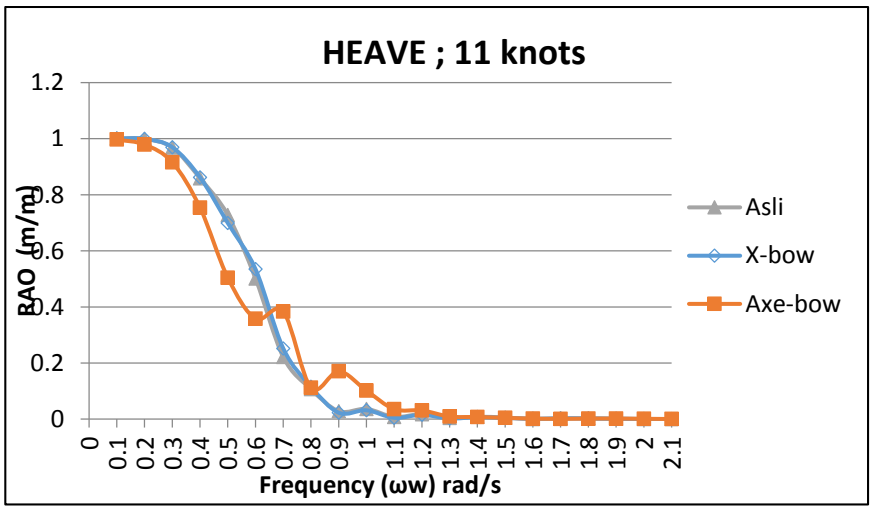
Hasil RAO model kapal hasil modifikasi untuk gerakan *heave* pada kondisi kapal bergerak pada kecepatan 8 knots dapat dilihat pada Gambar 6.23. Nilai RAO *heave* antara frekuensi 0.1 rad/s sampai 0.8 rad/s untuk bentuk lambung Asli dan X-bow lebih besar dari RAO bentuk lambung Axe-bow dengan nilai RAO terbesar 1.00021 m/m dan 1.00033 m/m tepat pada frekuensi 0.1 rad/s. Sebaliknya pada frekuensi 0.9 rad/s keatas nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung Axe-bow

cenderung lebih besar dari bentuk lambung Asli dan X-bow dengan nilai RAO terbesar 0.996 m/m pada frekuensi 0.1 rad/s.



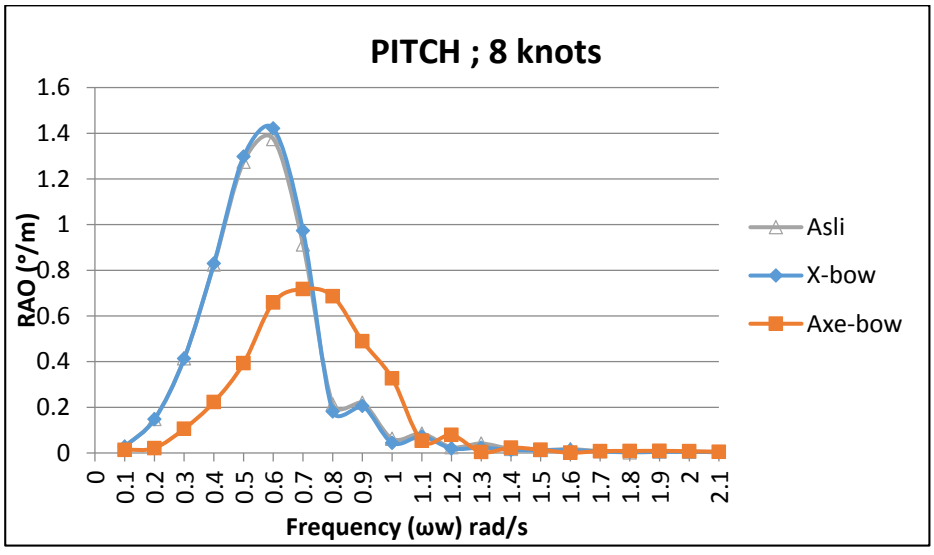
Gambar 6.23 RAO Gerakan *Heave* Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 8 Knots

Hal yang sama juga terjadi pada kecepatan 11 knots dimana nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung asli, X-bow, dan Axe-bow masing-masing adalah 1.00111 m/m, 1.00091 m/m, dan 0.99738 m/m yang semuanya terjadi pada frekuensi 0.1 rad/s. Nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung Axe-bow paling kecil dibandingkan bentuk lambung asli dan X-bow untuk semua tingkat kecepatan. Sedangkan nilai RAO *heave* untuk bentuk lambung asli dan X-bow besarnya tidak jauh berbeda sehingga pada Gambar 6.23 dan Gambar 6.24 kedua kurvanya terlihat berimpit. Nilai RAO *heave* bentuk lambung asli paling besar dibandingkan dua bentuk lambung lainnya.



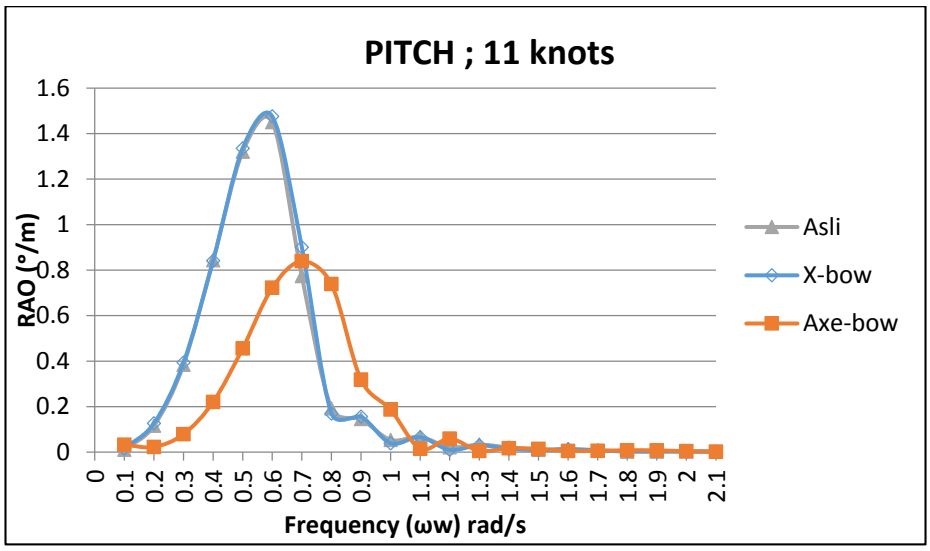
Gambar 6.24 RAO Gerakan *Heave* Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 11 Knots

Sedangkan hasil RAO model kapal hasil modifikasi untuk gerakan *pitch* pada kondisi kapal bergerak pada kecepatan 8 knots dapat dilihat pada Gambar 6.25. Nilai RAO *pitch* antara frekuensi 0.1 rad/s sampai 0.7 rad/s untuk bentuk lambung Asli dan X-bow lebih besar dari RAO bentuk lambung Axe-bow dengan nilai RAO terbesar 1.37474 m/m dan 1.42125 m/m tepat pada frekuensi 0.6 rad/s. Sebaliknya pada frekuensi 0.8 rad/s keatas nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung Axe-bow cenderung lebih besar dari bentuk lambung Asli dan X-bow dengan nilai RAO terbesar 0.71758 m/m pada frekuensi 0.7 rad/s.



Gambar 6.25 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 8 Knots

Hal yang sama juga terjadi pada kecepatan 11 knots dimana nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung asli, X-bow, dan Axe-bow masing-masing adalah 1.45091 °/m pada frekuensi 0.6 rad/s, 1.47572 °/m pada frekuensi 0.6 rad/s, dan 0.83921 °/m pada frekuensi 0.7 rad/s. Nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung Axe-bow paling kecil dibandingkan bentuk lambung asli dan X-bow untuk semua tingkat kecepatan. Sedangkan nilai RAO *pitch* untuk bentuk lambung asli dan X-bow besarnya tidak jauh berbeda sehingga pada Gambar 6.25dan Gambar 6.26 kedua kurvanya terlihat berimpit. Nilai RAO *pitch* bentuk lambung asli paling besar dibandingkan dua bentuk lambung lainnya.

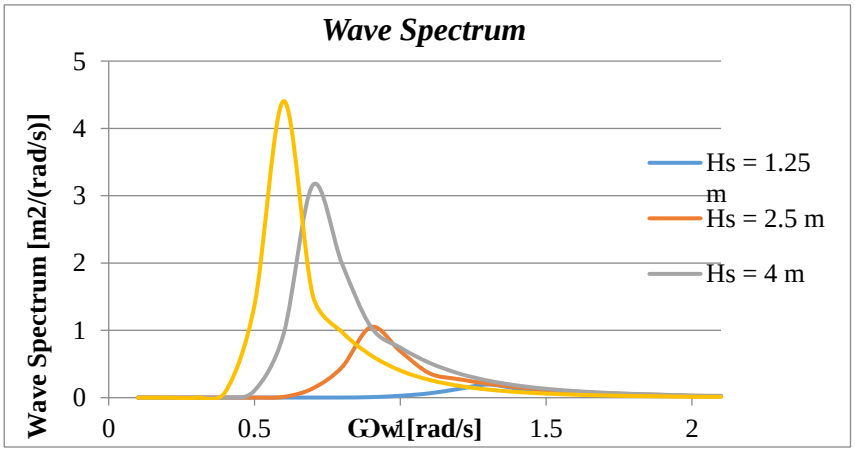


Gambar 6.26 RAO Gerakan *Pitch* Pada Kondisi Kapal Bergerak Dengan Kecepatan 11 Knots

6.3.5 *Wave Spectrum*

Spektrum gelombang yang dipakai pada analisis *seakeeping* untuk kapal ini adalah spektrum *JOint North Sea WAve Project* atau biasa disingkat menjadi JONSWAP. Spektrum JONSWAP dipilih karena perairan Indonesia merupakan perairan kepulauan atau perairan tertutup yang mirip dengan Laut Utara dan bukan perairan laut lepas. Spektrum ini merepresentasikan laut yang dihasilkan angin dengan batasan *fetch*. Formula ini lebih umum dan lebih global dibandingkan dengan spektrum *Pierson Moskowitz* (PM) (Ahadyanti, 2015).

Terdapat satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap spektrum gelombang JONSWAP yaitu nilai γ (gamma) atau faktor puncak tambahan *(peak enhancement).* Untuk perairan Indonesia, diberikan nilai γ (gamma) sebesar 2,0-2,5. Pada analisis ini, nilai γ (gamma) diberikan harga 2,5. Perhitungan *wave spectrum* ini didasarkan pada persamaan 2.28 yang telah dijelaskan di BAB 2. Hasil dari perhitungan dengan menggunakan spektrum gelombang JONSWAP dengan variasi *significant wave height* (Hs) 1,25; 2,5; 4 dan 6 meter dapat dilihat di Lampiran. Sedangkan hasil plot kurva *wave spectrum* JONSWAP dapat dilihat pada Gambar 6.27.



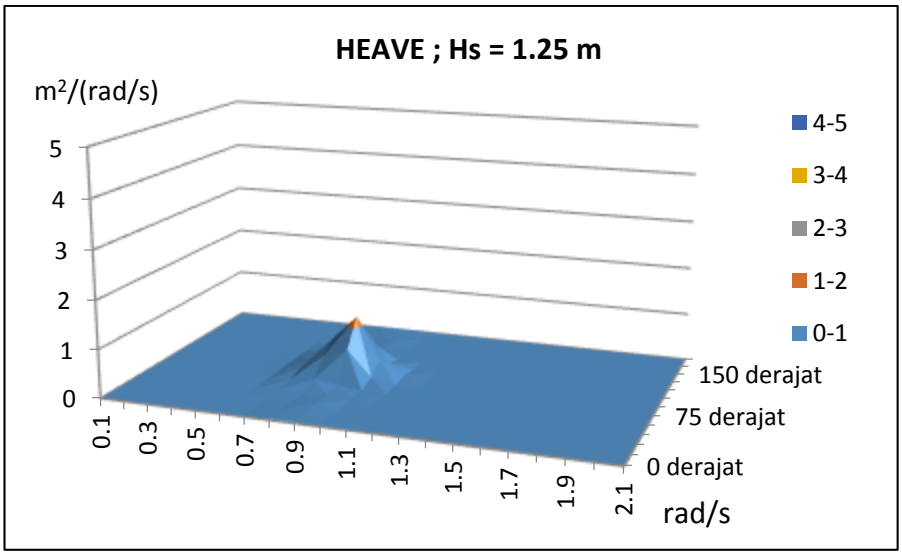
Gambar 6.27 *Wave Spectrum* JONSWAP untuk Empat Tinggi Gelombang Berbeda

Dari Gambar 6.27 dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan *wave spectrum* seiring dengan kenaikan *significant wave height* (Hs). Dimulai dari Hs 1,25; 2,5; 4 dan 6 meter berturut-turut didapatkan nilai puncak *wave spectrum* sebesar 0.196, 1.05, 3.159, dan 4.407 m^2/(rad/s). Sedangkan apabila dilihat dari posisi puncak spektrum, ada pergeseran dari frekuensi besar menuju frekuensi kecil. Perubahan frekuensi posisi puncak spectrum cukup besar pada harga Hs kecil, namun perubahan frekuensi menurun drastis pada Hs besar. Kenaikan dari Hs yaitu 1,25; 2,5; 4 dan 6 meter membawa perubahan posisi frekuensi berturut-turut menjadi lebih kecil. Hal ini berarti bahwa pada harga Hs kecil energi gelombang dikontribusikan oleh gelombang-gelombang dalam rentang frekuensi yang lebih besar bila dibandingkan dengan dalam hal Hs besar (Djatmiko, 2012).

6.3.6 *Response Spectrum*

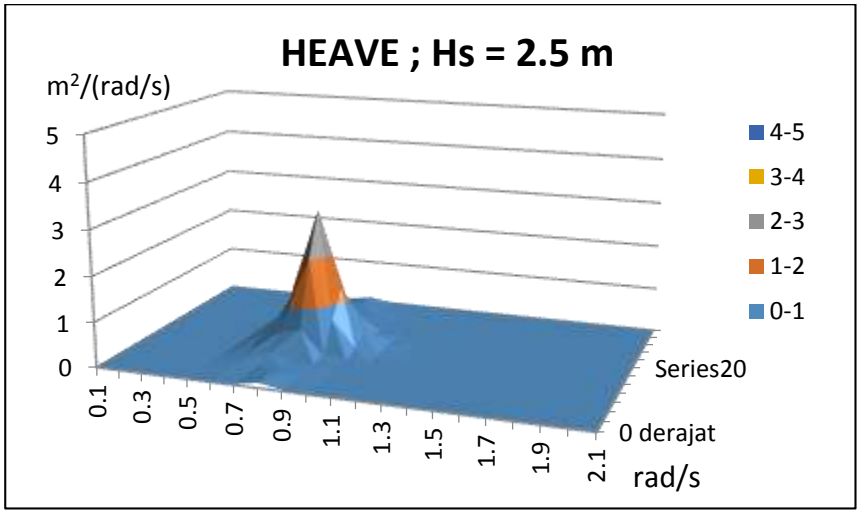
Setelah perhitungan RAO dan *wave spectrum* RAO untuk ketiga model kapal, selanjutnya dapat diketahui kualitas olah gerak kapal berdasarkan response dari masing-masing model, lambung asli, X-bow, dan Axe-bow. Kualitas gerakan tidak bisa dinilai hanya berdasarkan RAO atau parameter lainnya secara spontan, perlu ada analisa *spectrum response* dari model kapal. Hal ini sangat tergantung pada posisi di mana kapal tersebut harus berlayar, karena sangat berkaitan dengan kondisi lingkungan seperti tinggi gelombang tahunan. Dengan kata lain baik buruknya kualitas gerakan sangat tergantung kondisi lingkungannya (Anggara, 2013).

Perhitungan respon spektrum dilakukan dengan cara mengalikan harga RAO kuadrat dengan persamaan spektrum gelombang (di sini adalah spektrum JONSWAP) seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada Bab 2. Pada analisis respon spektrum ini, kurva diplot dalam bentuk 3 dimensi agar perbedaan antara ketiga variasi *significant wave height* (Hs) yang diteliti lebih terlihat. *Significant wave height* (Hs) divariasikan menjadi 1,25; 2,5; 4 dan 6 meter. Kurva respon spektrum 3 dimensi diplot dengan respon spektrum sebagai ordinat serta frekuensi puncak (ωp) dan sudut hadap gelombang. Kurva respon spektrum dibuat dalam 3 dimensiyang menampilkan perbandingan nilai respon spektrum (S_R), frekuensi (ω), dan *wave heading* (θ) sesuai buku Bhattacharyya (1978).

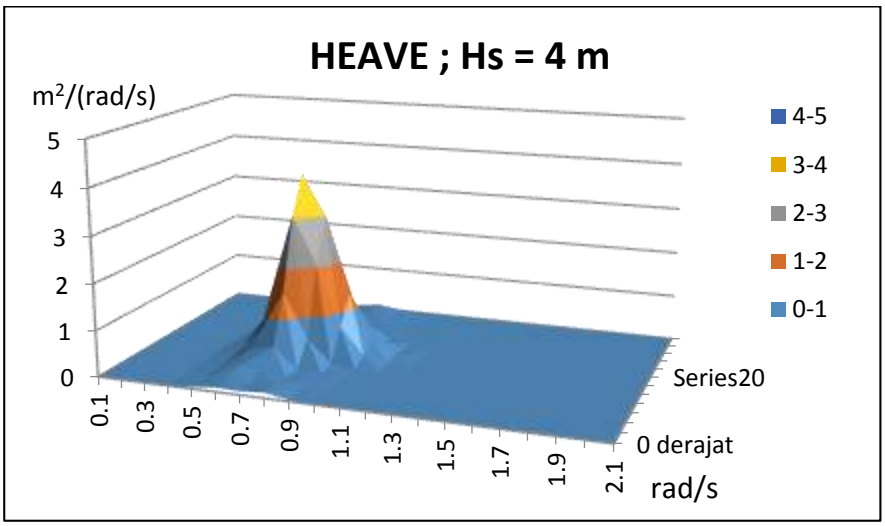


Gambar 6.28 Respon Spektrum Gerakan *Heave* pada Hs = 1.25 m

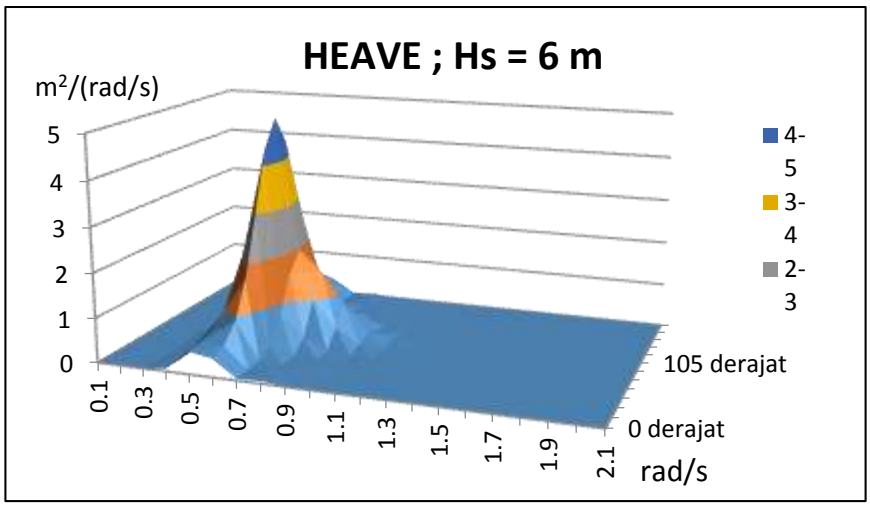
Gambar 6.28 menunjukkan kurva dari respon spektrum gerakan *heave* pada Hs = 1.25 meter. Kurva respon spektrum dihitung dari kenaikan frekuensi mulai dari 1 sampai 2,1 rad/s dengan berbagai sudut datang gelombang dari 0^o sampai 180^o. Dari hasil perhitungan, respon spektrum *heave* maksimum pada Hs = 1.25 meter berada pada sudut arah datang gelombang 90^o sebesar 1.1995 m^2/(rad/s). Hal yang sama juga terjadi untuk Hs 2.5, 4, dan 6 m dimana besarnya respon spectrum paling tinggi masing-masing adalah 3.00035, 3.9021, dan 4.967 m^2/(rad/s). Semakin tinggi Hs semakin tinggi respon spectrum maksimumnya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.28 sampai Gambar 6.31.



Gambar 6.29 Respon Spektrum Gerakan *Heave* pada Hs 2.5 m

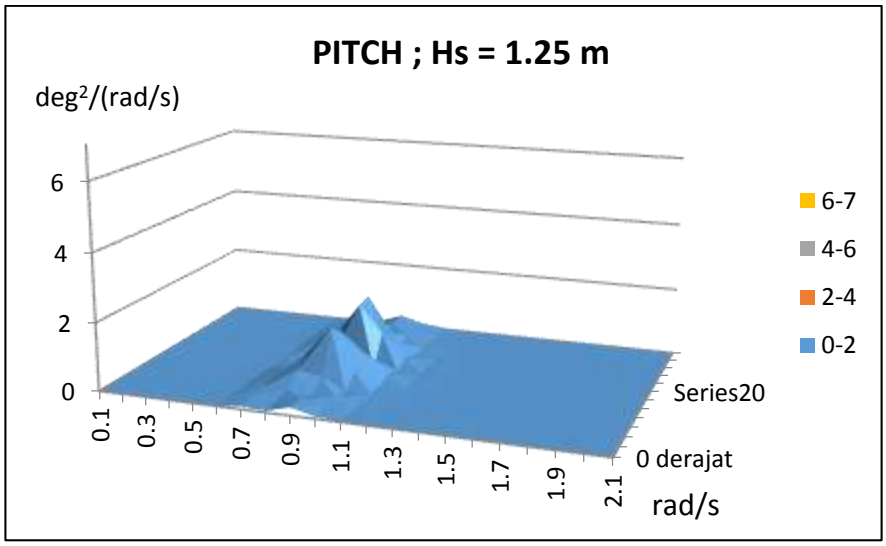


Gambar 6.30 Respon Spektrum Gerakan *Heave* pada Hs = 4 m

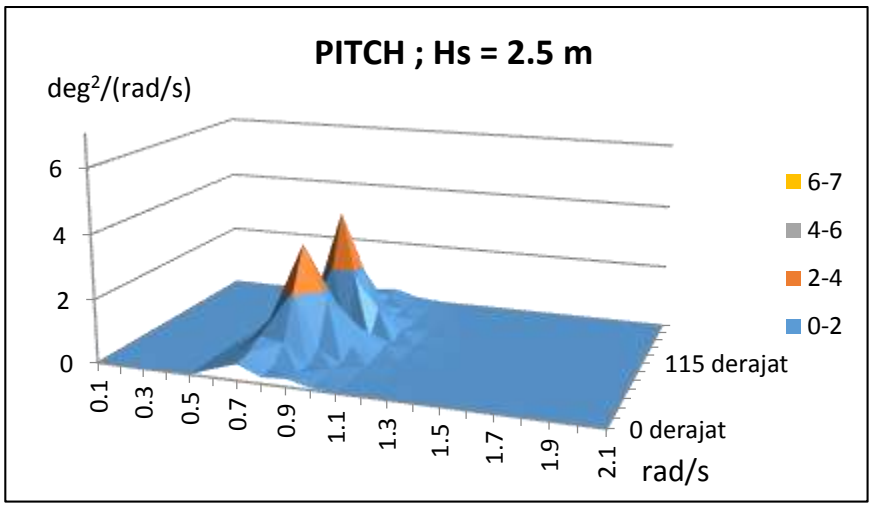


Gambar 6.31 Respon Spektrum Gerakan *Heave* pada Hs = 6 m

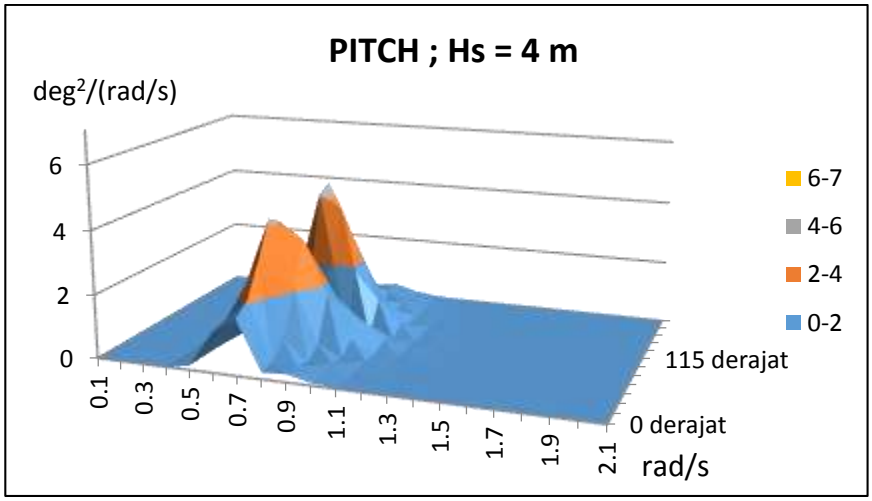
Sedangkan Gambar 6.32 menunjukkan kurva dari respon spektrum gerakan *heave* pada Hs = 1.25 meter. Kurva respon spektrum dihitung dari kenaikan frekuensi mulai dari 1 sampai 2,1 rad/s dengan berbagai sudut datang gelombang dari 0^o sampai 180^o. Dari hasil perhitungan, respon spektrum *heave* maksimum pada Hs = 1.25 meter berada pada sudut arah datang gelombang 135^o sebesar 1.7489 $deg^2/(rad/s)$. Hal yang sama juga terjadi untuk Hs 2.5, 4, dan 6 m dimana besarnya respon spectrum paling tinggi masing-masing adalah 3.6971, 4.3841, dan 6.1943 $deg^2/(rad/s)$. Semakin tinggi Hs semakin tinggi respon spectrum maksimumnya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.32 sampai Gambar 6.35.



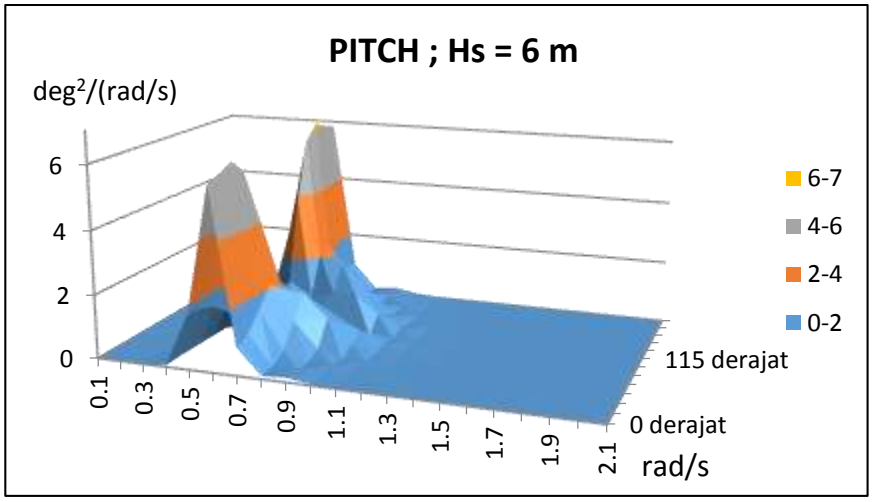
Gambar 6.32Respon Spektrum Gerakan *Pitch* pada Hs = 1.25 m



Gambar 6.33 Respon Spektrum Gerakan Pitch pada Hs = 2.5 m



Gambar 6.34 Respon Spektrum Gerakan Pitch pada Hs = 4 m



Gambar 6.35 Respon Spektrum Gerakan *Pitch* pada Hs = 6 m

6.3.7 Analisis *Significant Amplitude* pada Respon Spektrum

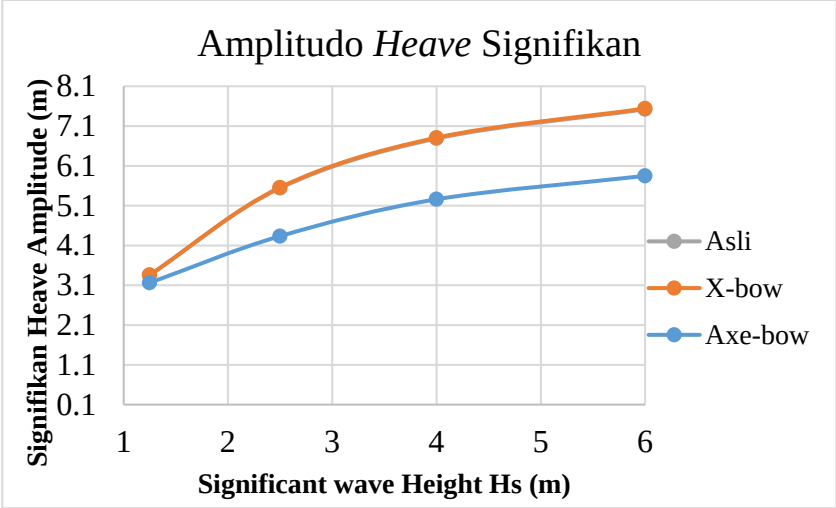
Setelah didapatkan hasil respon spectrum selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap *significant amplitude* untuk ketiga bentuk lambung. Dari kurva respon spektrum kemudian dapat dihitung luasan di bawah kurva respon spektrum (*mr0*), momen pertama luasan di bawah kurva respon spektrum (*mr1*), momen kedua luasan di bawah kurva respon spektrum (*mr2*), dan momen keempat luasan di bawah kurva respon spektrum (*mr4*).

Dengan diperolehnya luasan dan sejumlah momen respon spektrum kemudian dapat dihitung harga-harga stokastik periode dan frekuensi serta amplitudo spesifiknyam. Selanjutnya dapatlah dilihat karakteristik dari gerakan ketiga model *Self Propelled Barge* saat berada di gelombang *irreguler* dengan cara membuat grafik perubahan intensitas gerakan sebagai fungsi kenaikan tinggi gelombang signifikan (Hs) pada sebuah grafik untuk mengetahui karakteristik dari amplitudo signifikan untuk gerakan *heave* dan *pitch*. Rekap hasil perhitungan *significant heave amplitude* dapat dilihat pada Tabel 6.3 dan perhitungan keseluruhannya dapat dilihat di Lampiran.

Tabel 6.3 Hasil Perhitungan *Significant Heave Amplitude*

Hs (m)	***Significant Heave Amplitude* (m)**		
	Lambung Asli	**Lambung X-bow**	**Lambung Axe-bow**
1,25	3,360	3,356	3,164
2,50	5,543	5,557	4,334
4,00	6,789	6,807	5,259
6,00	7,524	7,540	5,847

Dari Tabel 6.3 dapat dilihat bahwa nilai *significant heave amplitude* untuk lambung Axe-bow paling kecil dibandingkan bentuk lambung lainnya yang nilainya hampir sama. Sedangkan untuk bentuk lambung X-bow memiliki nilai *significant heave amplitude* paling besar. Untuk mengetahui lebih jelas perbandingan *significant heave amplitude* dari ketiga model lambung data pada Tabel 6.3 diplot dalam bentuk kurva seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.36. Dapat dilihat bahwa kurva untuk bentuk lambung asli dan X–bow berimpit karena nilainya berdekatan.



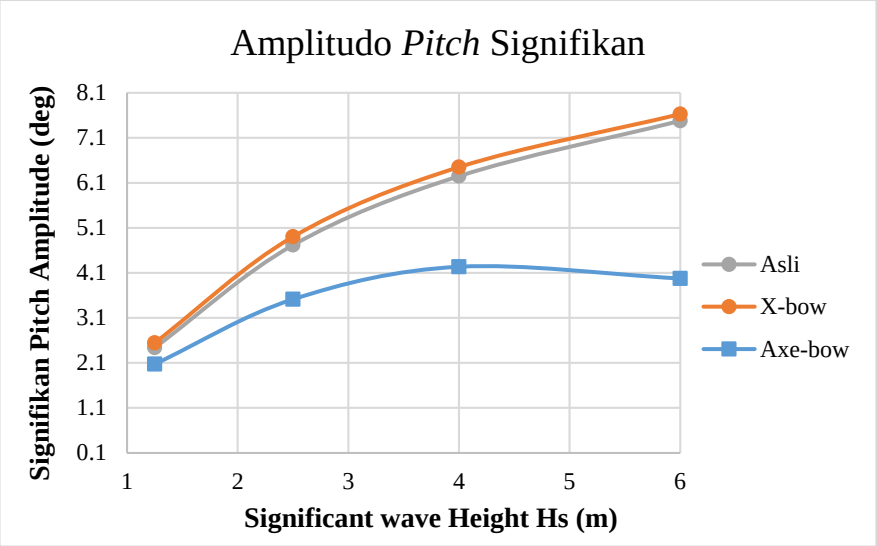
Gambar 6.36 *Significant Heave Amplitude* untuk Ketiga Bentuk Lambung

Sedangkan untuk rekap hasil perhitungan *significant pitch amplitude* dapat dilihat pada Tabel 6.4 dan perhitungan keseluruhannya dapat dilihat di Lampiran.

Tabel 6.4 Hasil Perhitungan *Significant Pitch Amplitude*

Hs (m)	***Significant Pitch Amplitude* (deg)**		
	Lambung Asli	**Lambung X-bow**	**Lambung Axe-bow**
1,25	2,439	2,547	2,074
2,50	4,717	4,902	3,514
4,00	6,250	6.449	4,237
6,00	7,480	7.626	3,976

Dari Tabel 6.4 dapat dilihat bahwa nilai *significant pitch amplitude* untuk lambung Axe-bow paling kecil dibandingkan bentuk lambung lainnya yang nilainya hampir sama. Sedangkan untuk bentuk lambung X-bow memiliki nilai *significant pitch amplitude* paling besar. Untuk mengetahui lebih jelas perbandingan *significant pitch amplitude* dari ketiga model lambung data pada Tabel 6.4 diplot dalam bentuk kurva seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.37 Dapat dilihat bahwa kurva untuk bentuk lambung asli dan –bow hampir berimpit karena nilainya cukup berdekatan.



Gambar 6.37 *Significant Pitch Amplitude* untuk Ketiga Bentuk Lambung

6.3.8 Batasan Kriteria Analisis *Seakeeping Self Propelled Barge*

Batasan kriteria yang digunakan untuk analsisis *seakeeping* kapal *self propelled barge* ini adalah kriteria NORDFORSK 1987 untuk *heavy manual work*, dimana batasan maksimum untuk *lateral acceleration* adalah 0.07g (0.687 m/s^2) dan gerakan *pitch* motion adalah 1.5^0. Batasan *lateral acceleration* ini digunakan untuk kriteria gerakan *heave*. Perhitungan nilai maksimum *lateral acceleration* untuk gerakan *heave* dan motion untuk gerakan *pitch* dilakukan dengan menganalisis *position* dan *acceleration response* dari kapal ini selama 7200 sekon atau 2 jam atau biasa disebut simulai *time response*. Hasil nilai maksimum untuk gerakan *heave* dan *pitch* dapat dilihat pada Tabel 6.5.Untuk semua bentuk lambung hasilnya memenuhi kriteria NORDFORSK 1987 dimana bentuk lambung Axe-bow memiliki nilai terkecil dari bentuk lambung lainnya.

Tabel 6.5 Analisis Batasan Kriteria

Bentuk Lambung	***Wave Height* (Hs)**	***Heave Acceleration* (m/s^2)**	***Pitch motion* (^{0})**	**Kriteria Batasan**		**Ket.**
				***Acceleration* (m/s^2)**	***Motion* (^{0})**	
Asli	1.25	0.043	0.030	1.472	1.5^o	✓
	2.50	0.085	0.067	1.472	1.5^o	✓
	4.00	0.132	0.102	1.472	1.5^o	✓
	6.00	0.197	0.169	1.472	1.5^o	✓

X-bow	1.25	0.057	0.036	1.472	1.5°	✓
	2.50	0.109	0.074	1.472	1.5°	✓
	4.00	0.160	0.112	1.472	1.5°	✓
	6.00	0.233	0.179	1.472	1.5°	✓
Axe-bow	1.25	0.039	0.014	1.472	1.5°	✓
	2.50	0.076	0.030	1.472	1.5°	✓
	4.00	0.108	0.042	1.472	1.5°	✓
	6.00	0.163	0.054	1.472	1.5°	✓

Sedangkan bentuk lambung asli memiliki nilai maksimum untuk *heave acceleration* pada Hs 1.25, 2.5, 4, dan 6 m masing-masing adalah 0.043, 0.085, 0.132, dan 0.197 m/s^2, serta untuk nilai *pitch motion* masing-masing adalah 0.030°, 0.067 °, 0.102 °, dan 0.169 °. Sedangkan untuk bentuk lambung hasil modifikasi, X-bow dan Axe-bow masing-masing nilainya dapat dilihat pada Tabel 6.5.

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis alternatif *hull form self propelled barge* yang bertujuan untuk meningkatkan performa hidrodinamika yang meliputi menurunkan hambatan kapal dan memperbaiki *seakeeping* untuk gerakan *heave* dan *pitch* didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan memodifikasi bentuk lambung asli SPUB Pusri Indonesia I menjadi bentuk X-bow dapat menurunkan hambatan total mulai dari kecepatan 8, 9, 10, dan 11 knots masing-masing sebesar 3.98%, 4.47%, 4.07%, dan 6.60%. Jika dirata-rata maka penurunan hambatan total yang didapatkan sekitar 4.78% dari hambatan total kapal asli atau sebesar 8.91 kN. Sedangkan modifikasi menjadi bentuk Axe-bow dapat menurunkan hambatan total mulai dari kecepatan 8, 9, 10, dan 11 knots masing-masing sebesar 3.38%, 4.76%, 7.50%, dan 9.22%. Jika dirata-rata maka penurunan hambatan total yang didapatkan sekitar 6.22% dari hambatan total kapal asli atau sebesar 12.01 kN.
2. Analisis *seakeeping* untuk *significant amplitude* baik gerakan *heave* ataupun *pitch* dari bentuk lambung Axe-bow menghasilkan nilai lebih kecil dari pada bentuk lambung asli. Sedangkan bentuk lambung X-bow memiliki nilai lebih besar dari bentuk lambung asli. Sedangkan analisis batasan kriteria *seakeeping*

bentuk lambung Axe-bow menghasilkan nilai maksimum *acceleration* untuk gerakan *heave* dan *motion* untuk gerakan *pitch* lebih kecil dari bentuk lambung asli. Sedangkan bentuk lambung X-bow memiliki nilai maksimum lebih besar dari bentuk lambung asli. Tetapi nilai maksimum untuk semua bentuk lambung memenuhi batasan kriteria NORDFORSK 1987.

3. Hasil modifikasi bentuk lambung *self propelled barge* menjadi bentuk Axe-bow merupakan bentuk lambung yang paling baik dari segi hambatan total dan juga *seakeeping*, dimana dapat menurunkan hambatan total kapal dan memberbaiki kualitas *seakeeping.* Sedangkan untuk hasil modifikasi bentuk lambung X-bow dapat menurunkan hambatan total kapal tetapi tidak menghasilkan kulalitas *seakeeping* yang lebih baik.

7.2 Saran

Di luar seluruh pekerjaan yang telah dilaukan masih banyak permasalahan yang belum bisa diselesaikan pada penelitian ini. Kendala utama disebabkan karena keterbatasan waktu dan fasilitas yang digunakan. Diharapkan hal tersebut dapat diperbaiki pada penelitian selanjutnya. Oleh karena itu terdapat beberapa saran untuk penelitian lebih lanjut sebagai berikut:

1. Penelitian ini merupakan tahap *preliminary* untuk mengoptimasi bentuk lambung *self propelled barge* yang hanya dilakukan dengan cara memodifikasi bagian haluan kapal menjadi 2 variasi bentuk lambung. Sedangkan pada tahap optimasi desain sebenarnya diperlukan variasi yang lebih banyak, apalagi mengingat perubahan bentuk buritan kapal juga berpengaruh terhadap hambatan dan *seakeeping* kapal. Sehingga diharapkan dapat dijadikan pertimbangan pada penelitian yang serupa.
2. Analisis hambatan total untuk bentuk lambung modifikasi hanya dilakukan dengan metode CFD sehingga masih perlu validasi memalui eksperimen atau *towing test.* Demikian juga untuk analisis *seakeeping* juga hanya dilakukan dengan simulasi CFD, sehingga perlu dilakukan validasi melalui eksperimen di MOB.

DAFTAR PUSTAKA

Ahadyanti, G.M., 2015. Studi Optimasi Hull Form FSO di Laut Jawa (Tesis). ITS.

Ahadyanti, G.M., 2014. Modifikasi Bentuk Lambung pada Shallow Draft Bulk Carrier untuk Menurunkan Konsumsi Bahan Bakar (Tugas Akhir). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Anggara, S., 2013. Studi Komperatif Performa Hidrodinamik Kapal Bertipe Shallow Draft Barge pada Kondisi Perairan Dangkal, Sedang dan Dalam (Tugas Akhir). ITS.

Baidowi, A., Aryawan, W.D., 2015. Pengembangan Series Bentuk Lambung Self-Propelled Barge. J. Sain Dan Teknol. 10, 31–43.

Djatmiko, E.B., 2012. Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di atas Gelombang Acak. ITS Press, Surabaya.

Harvald, S A, 1992. Resistance and Propulsion of Ships. Melbourne, FL USA.

ITTC, 2014. Recommended Procedures and Guidelines.

ITTC, 1999. Prediction of Resistance Using Model Tests.

Lewis, E.V., 1988. Principles of Naval Architecture Second Revision, II. ed. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ.

Perwira, B.A., 2014. Analisa Perbandingan Hambatan Kapal Antara Ulstein X-Bow Dan Bulb Konvensional Dengan Studi Eksperimen. J. Tek. POMITS.

Prastyawan, A., 2013. Analisa Penerapan Bow Tipe Axe untuk Mengurangi Konsumsi Bahan Bakar pada Utility Vessel 48 Meter. J. Tek. POMITS 2, G-166-168.

Sholihin, A.R., 2015. Analisis Gerakan kapal FLNG pada Kondisi Free Floating di Gelombang Reguler dengan Computational Fluid Dynamics (Tugas Akhir). ITS, Surabaya.

Sidabalok, A.P., 2016. Analisa Perbandingan Ulstein X-Bow dengan Bulbous Bow Konvensional Terhadap Nilai Hambatan Total dan Seakeeping Kapal Menggunakan Metode CFD. J. Tek. Perkapalan 4, 141–151.

Temam, R., 1984. Navier-stokes equations Vol. 2. North-Holland, Amsterdam.

Twiasyuni, T., 2016. Desain Submarine 28 M Berbasis Analisis Seakeeping (Tugas Akhir). ITS, Surabaya.

Wendt, J.F., 2008. Computational fluid dynamics: an introduction. Springer Science & Business Media.

Wilcox, D.C., 1998. Turbulence modeling for CFD. DCW industries, Canada.

LAMPIRAN

Lampiran 1 : Hasil RAO

Lampiran 2 : Perhitungan *Wave Spectrum*

Lampiran 3 : Perhitungan *Spectrum Response*

Lampiran 4 : Perhitungan *Significant Amplitude*

Lampiran 5 : Grafik Simulasi *Time Response*

Lampiran 1 : Hasil RAO

Lambung Asli

Heave Global Z Kapal Diam

Frekuensi	0	45	90	135	180
0.1	0.99906	0.99955	1.00003	0.99954	0.99906
0.2	0.98917	0.99466	1.00017	0.99467	0.98918
0.3	0.94583	0.97348	1.0016	0.97348	0.94582
0.4	0.83028	0.91626	1.0069	0.91634	0.83058
0.5	0.60038	0.79722	1.02275	0.7991	0.60516
0.6	0.27758	0.60891	1.06167	0.61952	0.30773
0.7	0.09336	0.37682	1.1408	0.40771	0.16483
0.8	0.21667	0.10331	1.23222	0.18911	0.24172
0.9	0.13759	0.17323	1.10085	0.19757	0.16716
1	0.11353	0.14822	0.68845	0.16156	0.11249
1.1	0.07415	0.05372	0.38126	0.05778	0.06724
1.2	0.05568	0.04177	0.21821	0.03747	0.04333
1.3	0.03737	0.02759	0.13155	0.02914	0.02863
1.4	0.03089	0.01457	0.08343	0.01103	0.02202
1.5	0.02187	0.01304	0.05435	0.01481	0.01156
1.6	0.01706	0.0053839	0.03596	0.0064225	0.01206
1.7	0.01338	0.0043193	0.02396	0.0066477	0.0067802
1.8	0.0095282	0.0014306	0.01552	0.0043987	0.0029719
1.9	0.0078774	0.0019586	0.00181404	0.0045439	0.0037659
2	0.0064272	0.0013997	0.00896371	0.0028012	0.0032098
2.1	0.0064272	0.0013997	0.00896371	0.0028012	0.0032098

Pitch Global RY Kapal Diam

Frekuensi	0	45	90	135	180
0.1	0.07031	0.04973	2.20519E-05	0.04973	0.07031
0.2	0.23442	0.1663	4.36961E-05	0.1663	0.23442
0.3	0.5129	0.36878	0.000148006	0.36878	0.51289
0.4	0.84644	0.63198	0.00100448	0.63183	0.84612
0.5	1.12222	0.91437	0.00369968	0.91204	1.11851
0.6	1.14947	1.13986	0.01107	1.12818	1.13693
0.7	0.77686	1.20939	0.02716	1.18497	0.76492
0.8	0.34848	1.07087	0.05953	1.04742	0.32022
0.9	0.55715	0.62665	0.1011	0.61665	0.48393
1	0.42044	0.30467	0.08568	0.21508	0.31364
1.1	0.31025	0.32392	0.04734	0.28863	0.21735
1.2	0.20279	0.15956	0.02442	0.13032	0.13207

1.3	0.15268	0.09274	0.01659	0.05825	0.09543
1.4	0.10176	0.06849	0.01524	0.06639	0.05449
1.5	0.09009	0.03439	0.0166	0.02181	0.05304
1.6	0.06076	0.02769	0.01424	0.03251	0.02339
1.7	0.04521	0.01166	0.01321	0.01429	0.02115
1.8	0.03718	0.0097701	0.01143	0.01757	0.01873
1.9	0.02898	0.0044676	0.00969455	0.0099829	0.01027
2	0.02279	0.0053401	0.00791335	0.01178	0.0045841
2.1	0.02279	0.0053401	0.00791335	0.01178	0.0045841

Heave Global Z

Frekuensi	8	11
0.1	1.00021	1.00111
0.2	0.99546	0.99979
0.3	0.96148	0.96824
0.4	0.85448	0.85891
0.5	0.67826	0.7281
0.6	0.48576	0.50117
0.7	0.28862	0.22153
0.8	0.15916	0.10693
0.9	0.03979	0.02832
1	0.04366	0.03634
1.1	0.01218	0.007602
1.2	0.02357	0.01764
1.3	0.005569	0.00442
1.4	0.009917	0.008379
1.5	0.003987	0.005597
1.6	0.001538	0.000216
1.7	0.004246	0.003029
1.8	0.002953	0.002692
1.9	0.001589	0.0013
2	0.000882	0.000165
2.1	0.000882	0.000165

Pitch Global RY

Frekuensi	8	11
0.1	0.0279	0.01098
0.2	0.14866	0.1163
0.3	0.414	0.38446
0.4	0.82478	0.84361
0.5	1.27472	1.32037
0.6	1.37474	1.45091
0.7	0.91247	0.77363
0.8	0.2132	0.19199
0.9	0.22026	0.1456
1	0.06232	0.05378
1.1	0.08457	0.06713
1.2	0.02516	0.02132
1.3	0.04123	0.03287
1.4	0.0176	0.02073
1.5	0.01252	0.009628
1.6	0.01653	0.01329
1.7	0.007874	0.008706
1.8	0.002101	0.002255
1.9	0.005303	0.001928
2	0.005032	0.00309
2.1	0.005032	0.00309

Lambung X-Bow

Heave Global Z

Frekuensi	0	45	90	135	180
0.1	0.99908	0.99956	1.00004	0.99956	0.99909
0.2	0.98946	0.99483	1.00021	0.99483	0.98947
0.3	0.94725	0.97428	1.00175	0.97428	0.94723
0.4	0.83475	0.9188	1.00733	0.91891	0.8351
0.5	0.60976	0.803	1.0238	0.8055	0.61581
0.6	0.28769	0.61762	1.06389	0.63205	0.32629
0.7	0.07651	0.38632	1.14506	0.42931	0.17721
0.8	0.20936	0.10578	1.23882	0.21937	0.24412
0.9	0.13281	0.16147	1.09735	0.19069	0.17382
1	0.10757	0.14457	0.68042	0.15876	0.10106
1.1	0.07487	0.05605	0.3764	0.05873	0.06142
1.2	0.05419	0.03968	0.21546	0.03278	0.03464
1.3	0.0381	0.0268	0.12941	0.02768	0.02393
1.4	0.02979	0.01579	0.08149	0.0102	0.01613
1.5	0.02249	0.01179	0.05249	0.01345	0.008281
1.6	0.01691	0.0064178	0.03412	0.0067294	0.0085848
1.7	0.01282	0.0031688	0.02244	0.0052915	0.0031739
1.8	9.56E-03	0.0019457	0.01454	0.0043098	1.21E-03
1.9	7.94E-03	0.0017071	0.0010081	0.0032112	0.0021921
2	6.31E-03	0.0012609	0.0086779	0.0027463	0.0017159
2.1	5.12E-03	0.0018462	5.58E-03	2.35E-03	1.17E-03

Pitch Global RY

Frekuensi	0	45	90	135	180
0.1	0.07033	0.04975	2.74E-05	0.04975	0.07033
0.2	0.23455	0.16638	4.36E-05	0.16638	0.23455
0.3	0.51355	0.36914	2.56E-04	0.36914	0.51354
0.4	0.84933	0.63344	1.53E-03	0.63326	0.84895
0.5	1.13267	0.91979	5.53E-03	0.91675	1.12787
0.6	1.1767	1.15624	0.01652	1.14009	1.15954
0.7	0.81646	1.24227	0.04067	1.20679	0.7996
0.8	0.36661	1.11753	0.09025	1.08129	0.33132
0.9	0.56969	0.67404	0.15393	0.65728	0.46222
1	0.44262	0.30828	0.12877	0.18116	0.29551
1.1	0.30686	0.31446	0.07229	0.26551	0.1766
1.2	0.20827	0.16643	0.03897	0.12461	0.11048
1.3	0.15035	0.09433	0.02633	0.04601	0.07026
1.4	0.10548	0.06456	0.02226	0.06026	0.04023
1.5	0.0868	0.03944	0.02133	0.02061	0.03581

1.6	0.06128	0.02478	0.01805	0.02639	0.01002
1.7	0.04717	0.01568	0.01539	0.01623	0.01318
1.8	0.03725	0.0083321	0.01253	0.01282	0.01037
1.9	0.0289	0.0052982	0.009997	0.01023	0.0042079
2	0.02314	0.0058385	0.0078381	0.0083732	0.0004051
2.1	0.01906	0.0055738	0.0055756	0.0048617	0.0014671

Heave Global Z

Frekuensi	8	11
0.1	1.00033	1.00091
0.2	0.99637	0.99928
0.3	0.96439	0.96954
0.4	0.85867	0.8621
0.5	0.67189	0.69929
0.6	0.4626	0.53481
0.7	0.28122	0.25225
0.8	0.15056	0.11562
0.9	0.03285	0.02309
1	0.03837	0.03168
1.1	0.007473	0.004816
1.2	0.02326	0.01566
1.3	0.007292	0.00235
1.4	0.008228	0.007366
1.5	0.004324	0.004262
1.6	0.00156	0.001774
1.7	0.003172	0.002611
1.8	2.58E-03	0.002282
1.9	1.72E-03	0.00158
2	1.58E-03	0.000808
2.1	9.07E-04	0.000141

Pitch Global RY

Frekuensi	8	11
0.1	0.02738	0.01628
0.2	0.14786	0.12667
0.3	0.41381	0.39392
0.4	0.82956	0.84151
0.5	1.29827	1.33554
0.6	1.42125	1.47572
0.7	0.97385	0.9006
0.8	0.18189	0.16978
0.9	0.20586	0.15636
1	0.04423	0.03907
1.1	0.0724	0.0657
1.2	0.01967	0.009714
1.3	0.02338	0.03002
1.4	0.01318	0.01441
1.5	0.01209	0.009048
1.6	0.01286	0.0127
1.7	0.006636	0.006485
1.8	0.00414	0.003884
1.9	0.00468	0.003559
2	0.005295	0.002176
2.1	0.003144	0.001679

Lambung Axe-bow

Heave Global Z

Frekuensi	0	45	90	135	180
0.1	0.9937	0.99412	0.99454	0.99412	0.9937
0.2	0.96731	0.97197	0.97662	0.97188	0.96717
0.3	0.89838	0.92085	0.94324	0.91941	0.89638
0.4	0.76351	0.8292	0.89546	0.8213	0.75345
0.5	0.55305	0.6966	0.84758	0.67232	0.52957
0.6	0.28922	0.53458	0.81454	0.48359	0.27765
0.7	0.044	0.35326	0.79418	0.30439	0.14135
0.8	0.12179	0.1452	0.79467	0.1857	0.12395
0.9	0.12338	0.05698	0.84507	0.15051	0.11675
1	0.07321	0.19943	0.95389	0.15233	0.12175
1.1	0.10667	0.1609	0.91033	0.15414	0.09426
1.2	0.03177	0.06472	0.51005	0.07068	0.09597
1.3	0.05897	0.0682	0.36145	0.11521	0.08082
1.4	0.0519	0.01914	0.21862	0.07523	0.05131
1.5	0.02565	0.01871	0.12444	0.0578	0.01782
1.6	0.02131	0.00365437	0.07538	0.03657	0.01384
1.7	0.01718	0.01001	0.04434	0.03103	0.01112
1.8	1.12E-02	0.00257957	0.02535	0.01953	5.77E-03
1.9	7.48E-03	0.00372973	0.0076713	0.01587	3.34E-03
2	5.58E-03	0.00204448	0.01141	0.01077	4.23E-03
2.1	4.67E-03	0.00342961	0.0063833	8.53E-03	4.64E-03

Pitch Global RY

Frekuensi	0	45	90	135	180
0.1	0.03739	0.02645	0.00001	0.02645	0.03739
0.2	0.11669	0.08265	0.00005	0.08266	0.11669
0.3	0.22723	0.16086	0.00010	0.16062	0.22593
0.4	0.33917	0.23644	0.00181	0.22897	0.31988
0.5	0.47774	0.33045	0.00277	0.27730	0.38129
0.6	0.63037	0.51253	0.01344	0.33571	0.42438
0.7	0.5818	0.77306	0.03061	0.46795	0.44089
0.8	0.18305	0.78865	0.07416	0.51511	0.30545
0.9	0.19169	0.57258	0.10576	0.44390	0.13271
1	0.3402	0.15025	0.10548	0.35437	0.21830
1.1	0.37965	0.41294	0.05579	0.18831	0.31087
1.2	0.63464	0.65088	0.03533	0.46691	0.36834
1.3	0.42118	0.30829	0.01674	0.38649	0.23485
1.4	0.23932	0.10315	0.02260	0.15991	0.12486

1.5	0.14359	0.05490	0.01177	0.14101	0.03351
1.6	0.08522	0.02233	0.01711	0.08454	0.04000
1.7	0.06426	0.01208	0.01433	0.06553	0.02853
1.8	0.04477	0.01178	0.01274	0.04785	0.01079
1.9	0.03061	0.01023	0.00911	0.03373	0.00786
2	0.01993	0.00939	0.01006	0.02812	0.01267
2.1	0.01993	0.01423	0.00140	0.00654	0.02026

Heave Global Z

Frekuensi	8	11
0.1	0.996	0.99738
0.2	0.97448	0.97932
0.3	0.90985	0.91598
0.4	0.75953	0.75421
0.5	0.51773	0.50453
0.6	0.31689	0.35795
0.7	0.26794	0.3839
0.8	0.14527	0.11225
0.9	0.13506	0.17067
1	0.15061	0.10159
1.1	0.05574	0.03583
1.2	0.0417	0.03108
1.3	0.01399	0.009407
1.4	0.01019	0.007614
1.5	0.005793	0.004703
1.6	0.002625	0.001903
1.7	0.00216	0.00109
1.8	2.34E-03	0.001899
1.9	2.66E-03	0.00208
2	2.09E-03	0.001245
2.1	1.47E-03	0.000567

Pitch Global RY

Frekuensi	8	11
0.1	0.01358	0.0322
0.2	0.02137	0.02258
0.3	0.10598	0.07891
0.4	0.22283	0.21998
0.5	0.39303	0.456
0.6	0.65877	0.72267
0.7	0.71758	0.83921
0.8	0.68637	0.73867
0.9	0.48938	0.31888
1	0.32684	0.18704
1.1	0.053	0.01514
1.2	0.07891	0.05894
1.3	0.003897	0.00518
1.4	0.02326	0.01723
1.5	0.01392	0.01408
1.6	0.001176	0.005039
1.7	0.008058	0.005401
1.8	0.008558	0.007925
1.9	0.0094	0.007394
2	0.007443	0.004051
2.1	0.00503	0.001948

Lampiran 2 : Perhitungan *Wave Spectrum*

$$S_j(\omega) = A_\gamma \, S_{pm}(\omega) \, \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\,\omega_p}\right)^2\right)} \qquad 2.10$$

dengan,

$S_{pm}(\omega)$ = Spektra Pierson-Moskowitz

$$= \frac{5}{16} Hs^2 . \omega_p{}^4 . \omega^{-5} . exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \qquad 2.11$$

γ = parameter puncak (*peakedness parameter*)

σ = parameter bentuk (*shape parameter*) untuk $\omega \leq \omega_0 = 0{,}07$ dan $\omega \geq \omega_0 = 0{,}09$

A_γ = normalizing factor = $1 - 0.287\ ln(\gamma)$

ω = wave frequency (rad/sec)

ω_p = angular spectralpeak frequency (rad/sec)

H_s = tinggi gelombang signifikan (m)

T_p = periode puncak (s)

			Hs =	1.25	m =	4.101049869	ft
Wo	**Wp**	**sigma**	**Gamma**	**A (gamma)**	**Spm**	**Gamma^exp**	**Sj**
0.1	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000000	1.000	0.0000000
0.2	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000000	1.000	0.0000000
0.3	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000000	1.000	0.0000000
0.4	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000000	1.000	0.0000000
0.5	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000000	1.000	0.0000000
0.6	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000000	1.000	0.0000000
0.7	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000002	1.000	0.0000013
0.8	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.000531	1.000	0.0003916
0.9	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.008746	1.002	0.0064598
1	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.035840	1.029	0.0271720
1.1	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.071813	1.203	0.0636504
1.2	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.097612	1.799	0.1294394
1.3	1.311302	0.09	2.5	0.7370246	0.106603	2.490	0.1956010
1.4	1.311302	0.07	2.5	0.7370246	0.102569	1.776	0.1342745
1.5	1.311302	0.07	2.5	0.7370246	0.091615	1.117	0.0754307
1.6	1.311302	0.07	2.5	0.7370246	0.078336	1.007	0.0581129
1.7	1.311302	0.07	2.5	0.7370246	0.065321	1.000	0.0481492
1.8	1.311302	0.07	2.5	0.7370246	0.053730	1.000	0.0396003
1.9	1.311302	0.07	2.5	0.7370246	0.043908	1.000	0.0323616
2	1.311302	0.07	3.5	0.640457	0.035811	1.000	0.0229352
2.1	1.311302	0.07	2.5	0.7370246	0.029232	1.000	0.0215444
							0.8551243

			Hs =	2.5	m =	8.202099738	ft
Wo	**Wp**	**sigma**	**Gamma**	**A (gamma)**	**Spm**	**Gamma^exp**	**Sj**
0.1	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.2	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.3	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.4	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.5	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.000018	1.000	0.0000129
0.6	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.014874	1.000	0.0109674
0.7	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.183102	1.023	0.1380207
0.8	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.461687	1.332	0.4532104
0.9	0.927231	0.09	2.5	0.73702456	0.597940	2.384	1.0506238
1	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.573064	1.630	0.6885679
1.1	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.476913	1.027	0.3609411
1.2	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.371584	1.000	0.2739036
1.3	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.281362	1.000	0.2073710
1.4	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.211050	1.000	0.1555490
1.5	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.158402	1.000	0.1167461
1.6	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.119578	1.000	0.0881320
1.7	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.091032	1.000	0.0670925
1.8	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.069967	1.000	0.0515674
1.9	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.054315	1.000	0.0400317
2	0.927231	0.07	3.5	0.640457028	0.042585	1.000	0.0272736
2.1	0.927231	0.07	2.5	0.73702456	0.033709	1.000	0.0248447
							3.7548558

			Hs =	4	m =	13.12335958	ft
Wo	**Wp**	**sigma**	**Gamma**	**A (gamma)**	**Spm**	**Gamma^exp**	**Sj**
0.1	0.73304	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.2	0.73304	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.3	0.73304	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.4	0.73304	0.09	2.5	0.73702456	0.000106	1.000	0.0000783
0.5	0.73304	0.09	2.5	0.73702456	0.143430	1.002	0.1059010
0.6	0.73304	0.09	2.5	0.73702456	1.146144	1.127	0.9523879
0.7	0.73304	0.09	2.5	0.73702456	1.910473	2.244	3.1598103
0.8	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	1.825335	1.479	1.9891554
0.9	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	1.410452	1.005	1.0443342
1	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	1.006311	1.000	0.7416768
1.1	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.700578	1.000	0.5163429
1.2	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.487509	1.000	0.3593060
1.3	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.342675	1.000	0.2525599
1.4	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.244365	1.000	0.1801027

1.5	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.177036	1.000	0.1304801
1.6	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.130306	1.000	0.0960385
1.7	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.097380	1.000	0.0717714
1.8	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.073822	1.000	0.0544088
1.9	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.056713	1.000	0.0417992
2	0.73304	0.07	3.5	0.640457028	0.044110	1.000	0.0282504
2.1	0.73304	0.07	2.5	0.73702456	0.034700	1.000	0.0255745
							9.7499782

			Hs =	**6**	**m =**	**19.68503937**	**ft**
Wo	**Wp**	**sigma**	**Gamma**	**A (gamma)**	**Spm**	**Gamma^exp**	**Sj**
0.1	0.598525	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.2	0.598525	0.09	2.5	0.73702456	0.000000	1.000	0.0000000
0.3	0.598525	0.09	2.5	0.73702456	0.000001	1.000	0.0000005
0.4	0.598525	0.09	2.5	0.73702456	0.119030	1.001	0.0878181
0.5	0.598525	0.09	2.5	0.73702456	1.576836	1.188	1.3803176
0.6	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	2.393279	2.499	4.4072616
0.7	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	1.957281	1.050	1.5146698
0.8	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	1.323626	1.000	0.9755531
0.9	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.850950	1.000	0.6271709
1	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.546553	1.000	0.4028234
1.1	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.357069	1.000	0.2631689
1.2	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.238669	1.000	0.1759049
1.3	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.163377	1.000	0.1204127
1.4	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.114426	1.000	0.0843347
1.5	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.081862	1.000	0.0603342
1.6	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.059713	1.000	0.0440100
1.7	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.044332	1.000	0.0326735
1.8	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.033443	1.000	0.0246480
1.9	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.025597	1.000	0.0188655
2	0.598525	0.07	3.5	0.640457028	0.019852	1.000	0.0127141
2.1	0.598525	0.07	2.5	0.73702456	0.015582	1.000	0.0114842
							10.2441655

Lampiran 3 : Perhitungan *Spectrum Response*

RAO

Heave Global Z

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	9.99E-01	9.99E-01	9.99E-01	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	9.99E-01	9.99E-01	9.99E-01
0.2	9.89E-01	9.90E-01	9.92E-01	9.95E-01	9.97E-01	9.99E-01	1.00E+00	9.99E-01	9.97E-01	9.95E-01	9.92E-01	9.90E-01	9.89E-01
0.3	9.46E-01	9.49E-01	9.60E-01	9.73E-01	9.87E-01	9.98E-01	1.00E+00	9.98E-01	9.87E-01	9.73E-01	9.60E-01	9.50E-01	9.46E-01
0.4	8.31E-01	8.42E-01	8.73E-01	9.16E-01	9.61E-01	9.94E-01	1.01E+00	9.94E-01	9.61E-01	9.16E-01	8.73E-01	8.42E-01	8.30E-01
0.5	6.05E-01	6.30E-01	6.99E-01	7.99E-01	9.07E-01	9.91E-01	1.02E+00	9.91E-01	9.06E-01	7.97E-01	6.95E-01	6.25E-01	6.00E-01
0.6	3.08E-01	3.42E-01	4.48E-01	6.20E-01	8.23E-01	9.94E-01	1.06E+00	9.93E-01	8.19E-01	6.09E-01	4.29E-01	3.16E-01	2.78E-01
0.7	1.65E-01	1.64E-01	2.15E-01	4.08E-01	7.16E-01	1.02E+00	1.14E+00	1.01E+00	7.03E-01	3.77E-01	1.52E-01	8.45E-02	9.34E-02
0.8	2.42E-01	2.36E-01	1.96E-01	1.89E-01	5.43E-01	1.02E+00	1.23E+00	1.00E+00	5.09E-01	1.03E-01	1.49E-01	2.08E-01	2.17E-01
0.9	1.67E-01	1.87E-01	2.32E-01	1.98E-01	2.61E-01	8.12E-01	1.10E+00	7.63E-01	1.74E-01	1.73E-01	2.09E-01	1.58E-01	1.38E-01
1	1.12E-01	1.02E-01	1.03E-01	1.62E-01	9.74E-02	4.36E-01	6.88E-01	3.77E-01	6.68E-02	1.48E-01	8.85E-02	1.02E-01	1.14E-01
1.1	6.72E-02	7.26E-02	6.69E-02	5.78E-02	8.22E-02	1.86E-01	3.81E-01	1.52E-01	8.17E-02	5.37E-02	7.35E-02	7.72E-02	7.42E-02
1.2	4.33E-02	3.73E-02	4.31E-02	3.75E-02	5.44E-02	7.17E-02	2.18E-01	5.43E-02	4.90E-02	4.18E-02	4.54E-02	5.01E-02	5.57E-02

1.3	2.86E-02	3.17E-02	2.33E-02	2.92E-02	2.19E-02	2.31E-02	1.32E-01	1.53E-02	1.91E-02	2.76E-02	3.31E-02	3.82E-02	3.74E-02
1.4	2.20E-02	1.69E-02	2.10E-02	1.10E-02	1.16E-02	1.19E-02	8.34E-02	9.99E-03	1.23E-02	1.46E-02	2.18E-02	2.69E-02	3.09E-02
1.5	1.16E-02	1.54E-02	1.09E-02	1.48E-02	1.74E-02	1.38E-02	5.44E-02	9.78E-03	1.08E-02	1.30E-02	1.75E-02	2.08E-02	2.19E-02
1.6	1.21E-02	9.61E-03	9.55E-03	6.42E-03	8.10E-03	1.29E-02	3.60E-02	5.19E-03	2.20E-03	5.37E-03	1.01E-02	1.60E-02	1.71E-02
1.7	6.78E-03	5.41E-03	7.46E-03	6.65E-03	3.96E-03	8.24E-03	2.40E-02	2.05E-03	3.61E-03	4.34E-03	8.81E-03	1.06E-02	1.34E-02
1.8	2.97E-03	6.03E-03	2.59E-03	4.39E-03	6.51E-03	3.53E-03	1.56E-02	2.88E-03	2.32E-03	1.41E-03	5.66E-03	8.56E-03	9.53E-03
1.9	3.77E-03	3.78E-03	4.26E-03	4.55E-03	3.76E-03	1.96E-03	1.82E-03	4.23E-03	2.30E-03	1.93E-03	3.74E-03	6.81E-03	7.88E-03
2	3.21E-03	1.33E-03	2.35E-03	2.79E-03	2.81E-03	2.92E-03	8.96E-03	2.00E-03	2.98E-03	1.37E-03	1.85E-03	5.02E-03	6.43E-03
2.1	2.12E-03	1.51E-03	1.96E-03	3.36E-03	3.86E-03	3.34E-03	5.61E-03	1.45E-03	2.15E-03	1.68E-03	9.06E-04	3.96E-03	5.25E-03

RAO^2

Heave

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0.998121	0.998261	0.9986	0.99908	0.99956	0.99994	1.00006	0.99992	0.99958	0.99908	0.9986	0.998221	0.998121
0.2	0.978477	0.979922	0.983905	0.989368	0.994847	0.99886	1.00034	0.99886	0.994827	0.989349	0.983905	0.979922	0.978457
0.3	0.894575	0.901531	0.920813	0.947663	0.975097	0.995625	1.003203	0.995605	0.975117	0.947663	0.920851	0.90155	0.894594
0.4	0.689863	0.708644	0.761919	0.839679	0.92354	0.98899	1.013848	0.98899	0.923483	0.839514	0.761588	0.708173	0.689365
0.5	0.366219	0.39627	0.488014	0.638561	0.822703	0.982022	1.046018	0.981605	0.821271	0.635544	0.483526	0.39085	0.360456
0.6	0.094698	0.117073	0.200632	0.383793	0.677971	0.988811	1.127079	0.986109	0.670319	0.370747	0.184256	0.099584	0.077051
0.7	0.027169	0.026968	0.046152	0.166244	0.513286	1.031403	1.30179	1.022445	0.494251	0.142008	0.023183	0.007139	0.008716

0.8	0.058429	0.055767	0.038228	0.035774	0.294925	1.030997	1.518514	1.00134	0.259529	0.010675	0.022073	0.043368	0.046946
0.9	0.027942	0.034905	0.053782	0.039066	0.068043	0.659685	1.211937	0.581605	0.030245	0.030009	0.043873	0.025043	0.018931
1	0.012654	0.010476	0.010611	0.026111	0.009491	0.189678	0.473977	0.142182	0.004466	0.021972	0.007823	0.010418	0.012889
1.1	0.004521	0.005271	0.004476	0.00334	0.006762	0.034503	0.145359	0.023071	0.006672	0.002888	0.005404	0.005961	0.005498
1.2	0.001877	0.001392	0.001858	0.001407	0.002963	0.005147	0.047616	0.00295	0.002398	0.001743	0.002057	0.00251	0.0031
1.3	0.00082	0.001007	0.000541	0.00085	0.000479	0.000533	0.017308	0.000235	0.000364	0.000761	0.001096	0.001456	0.001397
1.4	0.000485	0.000285	0.00044	0.000122	0.000135	0.000141	0.006961	9.98E-05	0.000152	0.000212	0.000474	0.000726	0.000954
1.5	0.000134	0.000238	0.000118	0.00022	0.000303	0.000191	0.002955	9.56E-05	0.000117	0.00017	0.000306	0.000431	0.000478
1.6	0.000145	9.23E-05	9.12E-05	4.12E-05	6.57E-05	0.000166	0.001293	2.69E-05	4.85E-06	2.88E-05	0.000102	0.000254	0.000291
1.7	4.6E-05	2.92E-05	5.56E-05	4.42E-05	1.57E-05	6.78E-05	0.000575	4.21E-06	1.3E-05	1.88E-05	7.76E-05	0.000112	0.000179
1.8	8.83E-06	3.64E-05	6.69E-06	1.93E-05	4.24E-05	1.24E-05	0.000242	8.29E-06	5.37E-06	1.98E-06	3.2E-05	7.33E-05	9.08E-05
1.9	1.42E-05	1.43E-05	1.81E-05	2.07E-05	1.42E-05	3.85E-06	3.33E-06	1.79E-05	5.28E-06	3.72E-06	1.4E-05	4.64E-05	6.21E-05
2	1.03E-05	1.76E-06	5.54E-06	7.79E-06	7.89E-06	8.55E-06	8.03E-05	3.99E-06	8.87E-06	1.87E-06	3.43E-06	2.52E-05	4.13E-05
2.1	4.5E-06	2.28E-06	3.84E-06	1.13E-05	1.49E-05	1.11E-05	3.15E-05	2.11E-06	4.62E-06	2.83E-06	8.21E-07	1.57E-05	2.75E-05

Respon Spektrum

Hs = 1.25

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	5.38E-248	5.4E-248	5.4E-248	5.4E-248	5.5E-248	5.5E-248	5.5E-248	5.5E-248	5.5E-248	5.4E-248	5.4E-248	5.4E-248	5.4E-248
0.3	1.1746E-47	1.18E-47	1.21E-47	1.24E-47	1.28E-47	1.31E-47	1.32E-47	1.31E-47	1.28E-47	1.24E-47	1.21E-47	1.18E-47	1.17E-47
0.4	1.5774E-14	1.62E-14	1.74E-14	1.92E-14	2.11E-14	2.26E-14	2.32E-14	2.26E-14	2.11E-14	1.92E-14	1.74E-14	1.62E-14	1.58E-14
0.5	4.9302E-06	5.33E-06	6.57E-06	8.6E-06	1.11E-05	1.32E-05	1.41E-05	1.32E-05	1.11E-05	8.56E-06	6.51E-06	5.26E-06	4.85E-06
0.6	0.00108115	0.001337	0.002291	0.004382	0.00774	0.011289	0.012868	0.011258	0.007653	0.004233	0.002104	0.001137	0.00088
0.7	0.00389364	0.003865	0.006614	0.023825	0.07356	0.147813	0.186562	0.146529	0.070832	0.020352	0.003322	0.001023	0.001249
0.8	0.0266732	0.025458	0.017451	0.016331	0.134636	0.47066	0.693216	0.457121	0.118478	0.004873	0.010077	0.019798	0.021431
0.9	0.02765599	0.034548	0.053231	0.038665	0.067345	0.652922	1.199512	0.575642	0.029935	0.029701	0.043424	0.024786	0.018737

1	0.00857492	0.007099	0.007191	0.017694	0.006431	0.128534	0.321188	0.096349	0.003027	0.014889	0.005301	0.00706	0.008734
1.1	0.00169367	0.001974	0.001677	0.001251	0.002533	0.012925	0.054452	0.008642	0.002499	0.001082	0.002024	0.002233	0.00206
1.2	0.00053534	0.000397	0.00053	0.000401	0.000845	0.001467	0.013577	0.000841	0.000684	0.000497	0.000586	0.000716	0.000884
1.3	0.00017695	0.000217	0.000117	0.000183	0.000103	0.000115	0.003736	5.07E-05	7.86E-05	0.000164	0.000237	0.000314	0.000301
1.4	7.8517E-05	4.62E-05	7.12E-05	1.97E-05	2.19E-05	2.29E-05	0.001127	1.62E-05	2.46E-05	3.43E-05	7.67E-05	0.000118	0.000155
1.5	1.6241E-05	2.89E-05	1.44E-05	2.67E-05	3.68E-05	2.32E-05	0.000359	1.16E-05	1.43E-05	2.06E-05	3.71E-05	5.23E-05	5.81E-05
1.6	1.3344E-05	8.47E-06	8.37E-06	3.78E-06	6.03E-06	1.52E-05	0.000119	2.47E-06	4.45E-07	2.65E-06	9.36E-06	2.33E-05	2.67E-05
1.7	3.2109E-06	2.04E-06	3.88E-06	3.09E-06	1.09E-06	4.74E-06	4.01E-05	2.94E-07	9.11E-07	1.31E-06	5.42E-06	7.82E-06	1.25E-05
1.8	4.7415E-07	1.95E-06	3.59E-07	1.04E-06	2.28E-06	6.68E-07	1.3E-05	4.45E-07	2.88E-07	1.06E-07	1.72E-06	3.94E-06	4.87E-06
1.9	5.9101E-07	5.96E-07	7.56E-07	8.62E-07	5.91E-07	1.6E-07	1.39E-07	7.46E-07	2.2E-07	1.55E-07	5.83E-07	1.93E-06	2.59E-06
2	3.3663E-07	5.75E-08	1.81E-07	2.54E-07	2.58E-07	2.79E-07	2.63E-06	1.3E-07	2.9E-07	6.12E-08	1.12E-07	8.25E-07	1.35E-06
2.1	1.1631E-07	5.91E-08	9.94E-08	2.93E-07	3.85E-07	2.88E-07	8.15E-07	5.47E-08	1.2E-07	7.32E-08	2.12E-08	4.05E-07	7.12E-07

Hs = 2.5

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	1.3428E-145	1.3E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.4E-145	1.3E-145	1.3E-145
0.3	1.97924E-27	1.99E-27	2.04E-27	2.1E-27	2.16E-27	2.2E-27	2.22E-27	2.2E-27	2.16E-27	2.1E-27	2.04E-27	1.99E-27	1.98E-27
0.4	3.96073E-08	4.07E-08	4.37E-08	4.82E-08	5.3E-08	5.68E-08	5.82E-08	5.68E-08	5.3E-08	4.82E-08	4.37E-08	4.07E-08	3.96E-08
0.5	0.002061897	0.002231	0.002748	0.003595	0.004632	0.005529	0.005889	0.005527	0.004624	0.003578	0.002722	0.002201	0.002029
0.6	0.020088257	0.024835	0.04256	0.081414	0.143818	0.209757	0.239088	0.209183	0.142195	0.078647	0.039086	0.021125	0.016345
0.7	0.023468848	0.023295	0.039867	0.143603	0.443383	0.890938	1.124502	0.8832	0.42694	0.122669	0.020026	0.006166	0.007529
0.8	0.115445675	0.110187	0.075533	0.070684	0.582726	2.037088	3.000346	1.978492	0.512789	0.021092	0.043613	0.085688	0.092758
0.9	0.029363913	0.036681	0.056518	0.041053	0.071504	0.693244	1.273589	0.611191	0.031783	0.031535	0.046105	0.026317	0.019894
1	0.008143866	0.006742	0.006829	0.016805	0.006108	0.122073	0.305042	0.091505	0.002874	0.014141	0.005035	0.006705	0.008295
1.1	0.002140633	0.002496	0.002119	0.001581	0.003201	0.016336	0.068822	0.010923	0.003159	0.001367	0.002558	0.002822	0.002603
1.2	0.00064208	0.000476	0.000635	0.000481	0.001013	0.00176	0.016284	0.001009	0.00082	0.000596	0.000703	0.000858	0.00106

1.3	0.000201937	0.000248	0.000133	0.000209	0.000118	0.000131	0.004264	5.79E-05	8.97E-05	0.000187	0.00027	0.000359	0.000344
1.4	8.66188E-05	5.1E-05	7.86E-05	2.18E-05	2.42E-05	2.52E-05	0.001243	1.78E-05	2.72E-05	3.79E-05	8.47E-05	0.00013	0.00017
1.5	1.74978E-05	3.11E-05	1.55E-05	2.88E-05	3.97E-05	2.5E-05	0.000387	1.25E-05	1.54E-05	2.22E-05	4E-05	5.64E-05	6.26E-05
1.6	1.41348E-05	8.97E-06	8.86E-06	4.01E-06	6.38E-06	1.61E-05	0.000126	2.61E-06	4.71E-07	2.8E-06	9.91E-06	2.47E-05	2.83E-05
1.7	3.35921E-06	2.13E-06	4.06E-06	3.23E-06	1.15E-06	4.96E-06	4.2E-05	3.08E-07	9.53E-07	1.38E-06	5.67E-06	8.18E-06	1.31E-05
1.8	4.91501E-07	2.02E-06	3.72E-07	1.07E-06	2.36E-06	6.92E-07	1.35E-05	4.61E-07	2.99E-07	1.1E-07	1.78E-06	4.08E-06	5.05E-06
1.9	6.08371E-07	6.13E-07	7.78E-07	8.87E-07	6.08E-07	1.65E-07	1.43E-07	7.68E-07	2.27E-07	1.6E-07	6E-07	1.99E-06	2.66E-06
2	3.44656E-07	5.89E-08	1.85E-07	2.6E-07	2.64E-07	2.86E-07	2.69E-06	1.33E-07	2.97E-07	6.26E-08	1.15E-07	8.44E-07	1.38E-06
2.1	1.18593E-07	6.03E-08	1.01E-07	2.98E-07	3.92E-07	2.94E-07	8.31E-07	5.58E-08	1.22E-07	7.46E-08	2.16E-08	4.13E-07	7.26E-07

Hs = 4

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	3.64E-95	3.65E-95	3.66E-95	3.68E-95	3.7E-95	3.72E-95	3.72E-95	3.72E-95	3.7E-95	3.68E-95	3.66E-95	3.65E-95	3.64E-95
0.3	1.81E-17	1.83E-17	1.87E-17	1.92E-17	1.98E-17	2.02E-17	2.03E-17	2.02E-17	1.98E-17	1.92E-17	1.87E-17	1.83E-17	1.81E-17
0.4	5.62E-05	5.77E-05	6.21E-05	6.84E-05	7.53E-05	8.06E-05	8.26E-05	8.06E-05	7.53E-05	6.84E-05	6.21E-05	5.77E-05	5.62E-05
0.5	0.040366	0.043678	0.05379	0.070384	0.090681	0.108242	0.115295	0.108196	0.090523	0.070052	0.053296	0.043081	0.039731
0.6	0.092603	0.114484	0.196195	0.375304	0.662975	0.96694	1.10215	0.964297	0.655492	0.362547	0.18018	0.097382	0.075346
0.7	0.081439	0.080837	0.13834	0.498315	1.538574	3.091627	3.902112	3.064775	1.481517	0.42567	0.069491	0.021398	0.026126
0.8	0.115672	0.110402	0.07568	0.070822	0.583866	2.041073	3.006216	1.982363	0.513792	0.021133	0.043698	0.085856	0.092939
0.9	0.030362	0.037928	0.05844	0.042449	0.073936	0.716817	1.316897	0.631975	0.032864	0.032608	0.047673	0.027212	0.020571
1	0.00977	0.008088	0.008193	0.020161	0.007328	0.146451	0.365961	0.109779	0.003448	0.016965	0.00604	0.008044	0.009952
1.1	0.00243	0.002833	0.002406	0.001795	0.003635	0.018546	0.078135	0.012401	0.003586	0.001552	0.002905	0.003204	0.002955
1.2	0.000702	0.000521	0.000695	0.000526	0.001108	0.001925	0.01781	0.001103	0.000897	0.000652	0.000769	0.000939	0.00116
1.3	0.000216	0.000265	0.000142	0.000223	0.000126	0.00014	0.004551	6.18E-05	9.57E-05	0.0002	0.000288	0.000383	0.000367
1.4	9.09E-05	5.35E-05	8.24E-05	2.29E-05	2.54E-05	2.65E-05	0.001305	1.87E-05	2.85E-05	3.97E-05	8.89E-05	0.000136	0.000179
1.5	1.82E-05	3.23E-05	1.61E-05	2.99E-05	4.12E-05	2.59E-05	0.000401	1.3E-05	1.59E-05	2.3E-05	4.15E-05	5.85E-05	6.5E-05
1.6	1.45E-05	9.23E-06	9.12E-06	4.12E-06	6.57E-06	1.66E-05	0.000129	2.69E-06	4.85E-07	2.88E-06	1.02E-05	2.54E-05	2.91E-05
1.7	3.43E-06	2.18E-06	4.15E-06	3.3E-06	1.17E-06	5.07E-06	4.29E-05	3.15E-07	9.74E-07	1.41E-06	5.79E-06	8.36E-06	1.34E-05

1.8	5E-07	2.06E-06	3.79E-07	1.09E-06	2.4E-06	7.05E-07	1.37E-05	4.69E-07	3.04E-07	1.12E-07	1.81E-06	4.15E-06	5.14E-06
1.9	6.17E-07	6.22E-07	7.89E-07	9E-07	6.17E-07	1.67E-07	1.45E-07	7.79E-07	2.3E-07	1.62E-07	6.09E-07	2.02E-06	2.7E-06
2	3.49E-07	5.96E-08	1.88E-07	2.64E-07	2.67E-07	2.89E-07	2.72E-06	1.35E-07	3E-07	6.33E-08	1.16E-07	8.54E-07	1.4E-06
2.1	1.2E-07	6.08E-08	1.02E-07	3.01E-07	3.96E-07	2.97E-07	8.39E-07	5.63E-08	1.23E-07	7.54E-08	2.19E-08	4.17E-07	7.33E-07

Hs = 6

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	4.15603E-41	4.16E-41	4.18E-41	4.2E-41	4.23E-41	4.24E-41	4.25E-41	4.24E-41	4.23E-41	4.2E-41	4.18E-41	4.16E-41	4.16E-41
0.3	4.36517E-07	4.4E-07	4.49E-07	4.62E-07	4.76E-07	4.86E-07	4.9E-07	4.86E-07	4.76E-07	4.62E-07	4.49E-07	4.4E-07	4.37E-07
0.4	0.060582497	0.062232	0.06691	0.073739	0.081104	0.086851	0.089034	0.086851	0.081099	0.073725	0.066881	0.06219	0.060539
0.5	0.505498025	0.546979	0.673614	0.881417	1.135592	1.355502	1.443836	1.354927	1.133615	0.877252	0.667419	0.539497	0.497544
0.6	0.41735777	0.515973	0.884239	1.691475	2.987996	4.357951	4.967334	4.346038	2.95427	1.633979	0.812062	0.438895	0.339582
0.7	0.041151956	0.040848	0.069905	0.251804	0.777459	1.562235	1.971782	1.548666	0.748627	0.215096	0.035115	0.010813	0.013202
0.8	0.057000159	0.054403	0.037294	0.034899	0.287715	1.005792	1.481391	0.976861	0.253184	0.010414	0.021533	0.042308	0.045798
0.9	0.017524701	0.021892	0.033731	0.024501	0.042674	0.413735	0.760091	0.364765	0.018969	0.018821	0.027516	0.015706	0.011873
1	0.005097327	0.00422	0.004274	0.010518	0.003823	0.076407	0.190929	0.057274	0.001799	0.008851	0.003151	0.004197	0.005192
1.1	0.001189844	0.001387	0.001178	0.000879	0.001779	0.00908	0.038254	0.006071	0.001756	0.00076	0.001422	0.001569	0.001447
1.2	0.00033026	0.000245	0.000327	0.000247	0.000521	0.000905	0.008376	0.000519	0.000422	0.000307	0.000362	0.000442	0.000545
1.3	9.86995E-05	0.000121	6.51E-05	0.000102	5.77E-05	6.41E-05	0.002084	2.83E-05	4.38E-05	9.16E-05	0.000132	0.000175	0.000168
1.4	4.08922E-05	2.41E-05	3.71E-05	1.03E-05	1.14E-05	1.19E-05	0.000587	8.41E-06	1.28E-05	1.79E-05	4E-05	6.12E-05	8.05E-05
1.5	8.06267E-06	1.43E-05	7.14E-06	1.33E-05	1.83E-05	1.15E-05	0.000178	5.77E-06	7.08E-06	1.02E-05	1.84E-05	2.6E-05	2.89E-05
1.6	6.40097E-06	4.06E-06	4.01E-06	1.82E-06	2.89E-06	7.3E-06	5.69E-05	1.18E-06	2.13E-07	1.27E-06	4.49E-06	1.12E-05	1.28E-05
1.7	1.50204E-06	9.55E-07	1.82E-06	1.44E-06	5.12E-07	2.22E-06	1.88E-05	1.38E-07	4.26E-07	6.15E-07	2.53E-06	3.66E-06	5.85E-06
1.8	2.17702E-07	8.96E-07	1.65E-07	4.76E-07	1.04E-06	3.07E-07	5.96E-06	2.04E-07	1.32E-07	4.87E-08	7.89E-07	1.81E-06	2.24E-06
1.9	2.67546E-07	2.7E-07	3.42E-07	3.9E-07	2.67E-07	7.26E-08	6.28E-08	3.38E-07	9.97E-08	7.03E-08	2.64E-07	8.75E-07	1.17E-06
2	1.30989E-07	2.24E-08	7.05E-08	9.9E-08	1E-07	1.09E-07	1.02E-06	5.07E-08	1.13E-07	2.38E-08	4.36E-08	3.21E-07	5.25E-07
2.1	5.16464E-08	2.62E-08	4.41E-08	1.3E-07	1.71E-07	1.28E-07	3.62E-07	2.43E-08	5.31E-08	3.25E-08	9.43E-09	1.8E-07	3.16E-07

RAO

Pitch Global RY

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	7.03E-02	6.79E-02	6.09E-02	4.97E-02	3.52E-02	1.82E-02	2.20E-05	1.82E-02	3.52E-02	4.97E-02	6.09E-02	6.79E-02	7.03E-02
0.2	2.34E-01	2.27E-01	2.03E-01	1.66E-01	1.18E-01	6.10E-02	4.37E-05	6.10E-02	1.18E-01	1.66E-01	2.03E-01	2.27E-01	2.34E-01
0.3	5.13E-01	4.97E-01	4.48E-01	3.69E-01	2.63E-01	1.37E-01	1.48E-04	1.37E-01	2.63E-01	3.69E-01	4.48E-01	4.97E-01	5.13E-01
0.4	8.46E-01	8.23E-01	7.53E-01	6.32E-01	4.59E-01	2.42E-01	1.00E-03	2.42E-01	4.59E-01	6.32E-01	7.53E-01	8.24E-01	8.46E-01
0.5	1.12E+00	1.10E+00	1.04E+00	9.12E-01	6.91E-01	3.76E-01	3.69E-03	3.76E-01	6.92E-01	9.14E-01	1.04E+00	1.11E+00	1.12E+00
0.6	1.14E+00	1.15E+00	1.17E+00	1.13E+00	9.31E-01	5.37E-01	1.10E-02	5.43E-01	9.40E-01	1.14E+00	1.19E+00	1.16E+00	1.15E+00
0.7	7.65E-01	8.35E-01	1.01E+00	1.19E+00	1.15E+00	7.28E-01	2.74E-02	7.55E-01	1.17E+00	1.21E+00	1.03E+00	8.49E-01	7.77E-01
0.8	3.20E-01	3.68E-01	6.15E-01	1.05E+00	1.32E+00	9.59E-01	5.96E-02	1.04E+00	1.37E+00	1.07E+00	6.26E-01	3.88E-01	3.48E-01
0.9	4.84E-01	4.43E-01	2.99E-01	6.17E-01	1.27E+00	1.15E+00	1.01E-01	1.30E+00	1.33E+00	6.27E-01	3.71E-01	5.19E-01	5.57E-01
1	3.14E-01	3.63E-01	4.29E-01	2.15E-01	7.34E-01	1.01E+00	8.57E-02	1.12E+00	7.61E-01	3.05E-01	5.01E-01	4.53E-01	4.20E-01
1.1	2.17E-01	1.84E-01	1.98E-01	2.89E-01	2.23E-01	6.47E-01	4.73E-02	6.87E-01	2.49E-01	3.24E-01	2.69E-01	2.84E-01	3.10E-01
1.2	1.32E-01	1.49E-01	1.26E-01	1.30E-01	8.84E-02	3.61E-01	2.44E-02	3.68E-01	1.20E-01	1.60E-01	1.84E-01	2.06E-01	2.03E-01
1.3	9.54E-02	7.46E-02	9.36E-02	5.83E-02	1.03E-01	1.96E-01	1.66E-02	1.85E-01	1.03E-01	9.27E-02	1.19E-01	1.36E-01	1.53E-01

1.4	5.45E-02	6.78E-02	4.78E-02	6.64E-02	6.43E-02	9.94E-02	1.52E-02	8.07E-02	5.27E-02	6.84E-02	8.45E-02	1.01E-01	1.02E-01
1.5	5.30E-02	3.57E-02	4.79E-02	2.18E-02	2.62E-02	5.15E-02	1.66E-02	3.72E-02	3.53E-02	3.44E-02	6.14E-02	7.95E-02	9.01E-02
1.6	2.34E-02	2.91E-02	2.72E-02	3.26E-02	2.81E-02	1.01E-02	1.43E-02	1.41E-02	1.97E-02	2.76E-02	4.25E-02	5.24E-02	6.08E-02
1.7	2.12E-02	2.44E-02	1.76E-02	1.43E-02	2.54E-02	1.81E-02	1.32E-02	1.61E-02	7.17E-03	1.16E-02	2.38E-02	4.30E-02	4.52E-02
1.8	1.87E-02	1.00E-02	1.68E-02	1.76E-02	6.76E-03	2.20E-02	1.14E-02	1.13E-02	1.00E-02	9.78E-03	1.76E-02	3.10E-02	3.72E-02
1.9	1.03E-02	1.05E-02	6.40E-03	9.97E-03	1.48E-02	1.76E-02	9.67E-03	7.33E-03	9.33E-03	4.53E-03	1.06E-02	2.30E-02	2.90E-02
2	4.58E-03	1.05E-02	1.08E-02	1.19E-02	9.91E-03	1.12E-02	7.93E-03	8.13E-03	7.68E-03	5.46E-03	6.84E-03	1.79E-02	2.28E-02
2.1	4.04E-03	7.15E-03	8.76E-03	4.75E-03	3.99E-03	3.35E-03	6.26E-03	6.35E-03	6.28E-03	5.99E-03	4.15E-03	1.34E-02	1.85E-02

RAO^2

Pitch

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0.004943	0.004613	0.003709	0.002473	0.001237	0.000332	4.86E-10	0.000332	0.001237	0.002473	0.003709	0.004613	0.004943
0.2	0.054953	0.051316	0.041347	0.027656	0.013872	0.003726	1.91E-09	0.003726	0.013874	0.027656	0.041351	0.051316	0.054953
0.3	0.263056	0.246532	0.200623	0.135999	0.069137	0.018753	2.19E-08	0.018753	0.069143	0.135999	0.200623	0.246542	0.263066
0.4	0.715902	0.677872	0.56716	0.399197	0.210644	0.0587	1E-06	0.0587	0.210699	0.399399	0.567521	0.678366	0.716461
0.5	1.251065	1.213677	1.083868	0.831835	0.477315	0.141218	1.36E-05	0.141602	0.479196	0.836072	1.090333	1.221533	1.259378
0.6	1.29261	1.32768	1.375436	1.272858	0.867338	0.288122	0.000121	0.294436	0.884183	1.299326	1.405481	1.357132	1.321281
0.7	0.585103	0.696991	1.026959	1.404272	1.315655	0.530115	0.000749	0.570357	1.379662	1.4626	1.06488	0.720003	0.603511
0.8	0.102541	0.135365	0.37852	1.097193	1.731619	0.918761	0.003552	1.079085	1.87115	1.146805	0.391576	0.150296	0.121438
0.9	0.234188	0.196382	0.089275	0.380282	1.613942	1.316435	0.010227	1.690156	1.767038	0.39279	0.137537	0.269122	0.310416

1	0.09837	0.13211	0.183775	0.046324	0.538374	1.029799	0.007339	1.256439	0.578741	0.092848	0.25056	0.205644	0.17677
1.1	0.047241	0.033841	0.039335	0.083377	0.049671	0.41914	0.00224	0.471529	0.062245	0.104898	0.07228	0.080724	0.096255
1.2	0.017442	0.022252	0.015876	0.016989	0.007816	0.130502	0.000597	0.135741	0.014426	0.025459	0.033771	0.042617	0.041124
1.3	0.009107	0.005564	0.008753	0.0034	0.010517	0.038396	0.000276	0.034377	0.010603	0.008593	0.014249	0.018621	0.023311
1.4	0.002969	0.004594	0.002283	0.004414	0.004137	0.009882	0.000232	0.006516	0.00278	0.004684	0.007137	0.010134	0.010355
1.5	0.002813	0.001274	0.002295	0.000476	0.000686	0.00265	0.000276	0.001385	0.001245	0.00118	0.003768	0.006312	0.008116
1.6	0.000547	0.000849	0.000742	0.00106	0.00079	0.000102	0.000203	0.000198	0.000388	0.000764	0.001805	0.002745	0.003692
1.7	0.000447	0.000595	0.000311	0.000203	0.000644	0.000328	0.000173	0.000258	5.14E-05	0.000133	0.000566	0.001852	0.002044
1.8	0.000351	0.000101	0.000283	0.00031	4.57E-05	0.000485	0.000129	0.000127	0.0001	9.56E-05	0.000309	0.00096	0.001382
1.9	0.000105	0.00011	4.1E-05	9.93E-05	0.000219	0.00031	9.36E-05	5.37E-05	8.71E-05	2.05E-05	0.000112	0.000527	0.00084
2	2.1E-05	0.00011	0.000116	0.000142	9.83E-05	0.000126	6.29E-05	6.6E-05	5.9E-05	2.98E-05	4.68E-05	0.00032	0.000519
2.1	1.63E-05	5.12E-05	7.67E-05	2.25E-05	1.59E-05	1.12E-05	3.92E-05	4.03E-05	3.94E-05	3.58E-05	1.73E-05	0.000178	0.000343

Respon Spektrum

Hs = 1.25

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	3.021E-249	2.8E-249	2.3E-249	1.5E-249	7.6E-250	2E-250	1E-256	2E-250	7.6E-250	1.5E-249	2.3E-249	2.8E-249	3E-249
0.3	3.4539E-48	3.24E-48	2.63E-48	1.79E-48	9.08E-49	2.46E-49	2.87E-55	2.46E-49	9.08E-49	1.79E-48	2.63E-48	3.24E-48	3.45E-48
0.4	1.637E-14	1.55E-14	1.3E-14	9.13E-15	4.82E-15	1.34E-15	2.29E-20	1.34E-15	4.82E-15	9.13E-15	1.3E-14	1.55E-14	1.64E-14
0.5	1.6842E-05	1.63E-05	1.46E-05	1.12E-05	6.43E-06	1.9E-06	1.83E-10	1.91E-06	6.45E-06	1.13E-05	1.47E-05	1.64E-05	1.7E-05
0.6	0.01475753	0.015158	0.015703	0.014532	0.009902	0.003289	1.38E-06	0.003362	0.010095	0.014834	0.016046	0.015494	0.015085
0.7	0.08385235	0.099887	0.147176	0.201249	0.188549	0.075972	0.000107	0.081739	0.197722	0.209608	0.15261	0.103185	0.086491
0.8	0.04681088	0.061795	0.172798	0.500879	0.790501	0.419423	0.001622	0.492612	0.854198	0.523528	0.178758	0.068611	0.055438
0.9	0.23178725	0.194369	0.08836	0.376383	1.597395	1.302938	0.010122	1.672828	1.748922	0.388763	0.136127	0.266363	0.307234
1	0.06665994	0.089524	0.124534	0.031391	0.364827	0.697838	0.004973	0.851419	0.39218	0.062918	0.169791	0.139354	0.119787
1.1	0.01769677	0.012677	0.014735	0.031233	0.018607	0.157012	0.000839	0.176638	0.023317	0.039296	0.027077	0.03024	0.036058
1.2	0.0049735	0.006345	0.004527	0.004844	0.002229	0.037211	0.00017	0.038705	0.004114	0.007259	0.009629	0.012152	0.011726

1.3	0.00196599	0.001201	0.00189	0.000734	0.00227	0.008289	5.95E-05	0.007421	0.002289	0.001855	0.003076	0.00402	0.005032
1.4	0.0004808	0.000744	0.00037	0.000715	0.00067	0.0016	3.76E-05	0.001055	0.00045	0.000758	0.001156	0.001641	0.001677
1.5	0.00034191	0.000155	0.000279	5.78E-05	8.34E-05	0.000322	3.35E-05	0.000168	0.000151	0.000143	0.000458	0.000767	0.000986
1.6	5.0195E-05	7.79E-05	6.81E-05	9.73E-05	7.24E-05	9.38E-06	1.87E-05	1.81E-05	3.56E-05	7.01E-05	0.000166	0.000252	0.000339
1.7	3.1243E-05	4.15E-05	2.17E-05	1.42E-05	4.5E-05	2.29E-05	1.21E-05	1.8E-05	3.59E-06	9.32E-06	3.96E-05	0.000129	0.000143
1.8	1.8833E-05	5.41E-06	1.52E-05	1.67E-05	2.46E-06	2.61E-05	6.92E-06	6.84E-06	5.39E-06	5.13E-06	1.66E-05	5.15E-05	7.42E-05
1.9	4.3955E-06	4.6E-06	1.71E-06	4.14E-06	9.14E-06	1.29E-05	3.9E-06	2.24E-06	3.63E-06	8.53E-07	4.68E-06	2.2E-05	3.5E-05
2	6.8661E-07	3.6E-06	3.8E-06	4.64E-06	3.21E-06	4.11E-06	2.06E-06	2.16E-06	1.93E-06	9.73E-07	1.53E-06	1.04E-05	1.7E-05
2.1	4.2204E-07	1.32E-06	1.98E-06	5.83E-07	4.12E-07	2.9E-07	1.01E-06	1.04E-06	1.02E-06	9.27E-07	4.46E-07	4.62E-06	8.86E-06

Hs = 2.5

Frekuensi	**0**	**15**	**30**	**45**	**60**	**75**	**90**	**105**	**120**	**135**	**150**	**165**	**180**
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	7.5414E-147	7E-147	5.7E-147	3.8E-147	1.9E-147	5.1E-148	2.6E-154	5.1E-148	1.9E-147	3.8E-147	5.7E-147	7E-147	7.5E-147
0.3	5.8201E-28	5.45E-28	4.44E-28	3.01E-28	1.53E-28	4.15E-29	4.84E-35	4.15E-29	1.53E-28	3.01E-28	4.44E-28	5.45E-28	5.82E-28
0.4	4.11023E-08	3.89E-08	3.26E-08	2.29E-08	1.21E-08	3.37E-09	5.76E-14	3.37E-09	1.21E-08	2.29E-08	3.26E-08	3.89E-08	4.11E-08
0.5	0.007043789	0.006833	0.006102	0.004683	0.002687	0.000795	7.67E-08	0.000797	0.002698	0.004707	0.006139	0.006878	0.007091
0.6	0.274201631	0.281641	0.291772	0.270012	0.183989	0.061119	2.57E-05	0.062459	0.187562	0.275626	0.298145	0.287889	0.280284
0.7	0.505418669	0.602069	0.8871	1.213027	1.136479	0.45792	0.000647	0.492681	1.191768	1.263411	0.919856	0.621947	0.52132
0.8	0.202604648	0.26746	0.747897	2.167882	3.421408	1.815327	0.007019	2.132102	3.6971	2.265908	0.773692	0.296961	0.239943
0.9	0.24610152	0.206372	0.093817	0.399627	1.696044	1.383403	0.010748	1.776135	1.856929	0.412772	0.144534	0.282813	0.326207
1	0.063309032	0.085024	0.118274	0.029813	0.346487	0.662758	0.004723	0.80862	0.372466	0.059755	0.161256	0.132349	0.113766
1.1	0.022366917	0.016023	0.018624	0.039476	0.023517	0.198448	0.001061	0.223252	0.029471	0.049666	0.034222	0.03822	0.045573
1.2	0.005965137	0.00761	0.005429	0.00581	0.002673	0.04463	0.000204	0.046422	0.004934	0.008707	0.011549	0.014575	0.014064
1.3	0.002243591	0.001371	0.002157	0.000838	0.002591	0.009459	6.79E-05	0.008469	0.002612	0.002117	0.00351	0.004588	0.005743
1.4	0.000530409	0.000821	0.000408	0.000789	0.000739	0.001765	4.15E-05	0.001164	0.000497	0.000837	0.001275	0.00181	0.00185
1.5	0.000368362	0.000167	0.000301	6.23E-05	8.99E-05	0.000347	3.61E-05	0.000181	0.000163	0.000154	0.000493	0.000827	0.001063
1.6	5.31686E-05	8.25E-05	7.21E-05	0.000103	7.67E-05	9.93E-06	1.98E-05	1.92E-05	3.77E-05	7.42E-05	0.000175	0.000267	0.000359

1.7	3.26868E-05	4.35E-05	2.27E-05	1.49E-05	4.7E-05	2.39E-05	1.26E-05	1.88E-05	3.76E-06	9.75E-06	4.14E-05	0.000135	0.000149
1.8	1.95218E-05	5.61E-06	1.58E-05	1.73E-05	2.54E-06	2.7E-05	7.17E-06	7.09E-06	5.59E-06	5.32E-06	1.72E-05	5.34E-05	7.69E-05
1.9	4.52459E-06	4.74E-06	1.76E-06	4.26E-06	9.41E-06	1.33E-05	4.01E-06	2.3E-06	3.74E-06	8.78E-07	4.82E-06	2.26E-05	3.6E-05
2	7.02991E-07	3.69E-06	3.89E-06	4.75E-06	3.29E-06	4.2E-06	2.11E-06	2.21E-06	1.97E-06	9.97E-07	1.57E-06	1.07E-05	1.74E-05
2.1	4.30306E-07	1.35E-06	2.02E-06	5.94E-07	4.2E-07	2.96E-07	1.03E-06	1.06E-06	1.04E-06	9.45E-07	4.55E-07	4.71E-06	9.04E-06

Hs = 4

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	2.05E-96	1.91E-96	1.54E-96	1.03E-96	5.16E-97	1.39E-97	7.1E-104	1.39E-97	5.17E-97	1.03E-96	1.54E-96	1.91E-96	2.05E-96
0.3	5.33E-18	5E-18	4.07E-18	2.76E-18	1.4E-18	3.8E-19	4.44E-25	3.8E-19	1.4E-18	2.76E-18	4.07E-18	5E-18	5.33E-18
0.4	5.83E-05	5.52E-05	4.62E-05	3.25E-05	1.72E-05	4.78E-06	8.17E-11	4.78E-06	1.72E-05	3.25E-05	4.62E-05	5.53E-05	5.84E-05
0.5	0.137896	0.133775	0.119467	0.091688	0.052611	0.015566	1.5E-06	0.015608	0.052819	0.092155	0.12018	0.134641	0.138813
0.6	1.264019	1.298314	1.345014	1.244704	0.848154	0.281749	0.000118	0.287924	0.864626	1.270587	1.374394	1.327114	1.292057
0.7	1.753844	2.08923	3.078308	4.209303	3.943673	1.589019	0.002245	1.709645	4.135533	4.38414	3.191974	2.158208	1.809024
0.8	0.203001	0.267984	0.74936	2.172124	3.428102	1.818879	0.007032	2.136274	3.704333	2.270341	0.775206	0.297542	0.240413
0.9	0.25447	0.21339	0.097007	0.413216	1.753718	1.430446	0.011113	1.836533	1.920074	0.426808	0.149449	0.29243	0.3373
1	0.075952	0.102003	0.141894	0.035767	0.415682	0.795114	0.005667	0.970104	0.446849	0.071689	0.193459	0.158779	0.136485
1.1	0.025393	0.018191	0.021144	0.044817	0.0267	0.225299	0.001204	0.25346	0.033459	0.056386	0.038853	0.043391	0.05174
1.2	0.006524	0.008323	0.005938	0.006355	0.002924	0.048814	0.000223	0.050773	0.005396	0.009523	0.012632	0.015941	0.015382
1.3	0.002394	0.001463	0.002301	0.000894	0.002765	0.010095	7.25E-05	0.009038	0.002788	0.002259	0.003746	0.004896	0.006129
1.4	0.000557	0.000861	0.000428	0.000828	0.000776	0.001853	4.35E-05	0.001222	0.000521	0.000878	0.001338	0.0019	0.001941
1.5	0.000382	0.000173	0.000312	6.46E-05	9.32E-05	0.00036	3.74E-05	0.000188	0.000169	0.00016	0.000512	0.000857	0.001102
1.6	5.47E-05	8.48E-05	7.42E-05	0.000106	7.89E-05	1.02E-05	2.03E-05	1.98E-05	3.88E-05	7.64E-05	0.000181	0.000274	0.000369
1.7	3.34E-05	4.44E-05	2.32E-05	1.52E-05	4.81E-05	2.45E-05	1.29E-05	1.93E-05	3.84E-06	9.97E-06	4.23E-05	0.000138	0.000153
1.8	1.99E-05	5.71E-06	1.6E-05	1.76E-05	2.59E-06	2.75E-05	7.3E-06	7.22E-06	5.69E-06	5.42E-06	1.75E-05	5.44E-05	7.83E-05
1.9	4.59E-06	4.81E-06	1.78E-06	4.32E-06	9.54E-06	1.35E-05	4.07E-06	2.34E-06	3.79E-06	8.91E-07	4.89E-06	2.29E-05	3.65E-05
2	7.11E-07	3.73E-06	3.94E-06	4.81E-06	3.33E-06	4.25E-06	2.13E-06	2.23E-06	2E-06	1.01E-06	1.58E-06	1.08E-05	1.76E-05
2.1	4.34E-07	1.36E-06	2.04E-06	6E-07	4.24E-07	2.98E-07	1.04E-06	1.07E-06	1.05E-06	9.54E-07	4.59E-07	4.75E-06	9.12E-06

Hs = 6

Frekuensi	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	2.33409E-42	2.18E-42	1.76E-42	1.17E-42	5.89E-43	1.58E-43	8.1E-50	1.58E-43	5.89E-43	1.17E-42	1.76E-42	2.18E-42	2.33E-42
0.3	1.28361E-07	1.2E-07	9.79E-08	6.64E-08	3.37E-08	9.15E-09	1.07E-14	9.15E-09	3.37E-08	6.64E-08	9.79E-08	1.2E-07	1.28E-07
0.4	0.062869193	0.059529	0.049807	0.035057	0.018498	0.005155	8.81E-08	0.005155	0.018503	0.035074	0.049839	0.059573	0.062918
0.5	1.726866551	1.675259	1.496083	1.148197	0.658847	0.194926	1.88E-05	0.195455	0.661443	1.154046	1.505006	1.686104	1.738341
0.6	5.696869645	5.851433	6.061908	5.609817	3.822587	1.269829	0.000533	1.297659	3.896825	5.726471	6.194324	5.981235	5.823232
0.7	0.886237248	1.055712	1.555504	2.127009	1.992783	0.802949	0.001135	0.863903	2.089732	2.215356	1.612941	1.090567	0.914121
0.8	0.100034039	0.132056	0.369267	1.07037	1.689286	0.8963	0.003465	1.052704	1.825407	1.11877	0.382003	0.146622	0.11847
0.9	0.14687605	0.123165	0.055991	0.238502	1.012217	0.82563	0.006414	1.060017	1.108235	0.246347	0.086259	0.168786	0.194684
1	0.039625753	0.053217	0.074029	0.01866	0.21687	0.414827	0.002956	0.506123	0.23313	0.037401	0.100932	0.082838	0.071207
1.1	0.012432367	0.008906	0.010352	0.021942	0.013072	0.110305	0.00059	0.124092	0.016381	0.027606	0.019022	0.021244	0.025331
1.2	0.003068219	0.003914	0.002793	0.002988	0.001375	0.022956	0.000105	0.023877	0.002538	0.004478	0.005941	0.007497	0.007234
1.3	0.001096584	0.00067	0.001054	0.000409	0.001266	0.004623	3.32E-05	0.004139	0.001277	0.001035	0.001716	0.002242	0.002807
1.4	0.000250403	0.000387	0.000193	0.000372	0.000349	0.000833	1.96E-05	0.00055	0.000234	0.000395	0.000602	0.000855	0.000873
1.5	0.000169735	7.69E-05	0.000138	2.87E-05	4.14E-05	0.00016	1.66E-05	8.36E-05	7.51E-05	7.12E-05	0.000227	0.000381	0.00049
1.6	2.40775E-05	3.73E-05	3.27E-05	4.67E-05	3.48E-05	4.5E-06	8.95E-06	8.7E-06	1.71E-05	3.36E-05	7.95E-05	0.000121	0.000162
1.7	1.46156E-05	1.94E-05	1.02E-05	6.64E-06	2.1E-05	1.07E-05	5.65E-06	8.43E-06	1.68E-06	4.36E-06	1.85E-05	6.05E-05	6.68E-05
1.8	8.64684E-06	2.48E-06	6.98E-06	7.65E-06	1.13E-06	1.2E-05	3.18E-06	3.14E-06	2.47E-06	2.36E-06	7.63E-06	2.37E-05	3.41E-05
1.9	1.98979E-06	2.08E-06	7.73E-07	1.87E-06	4.14E-06	5.84E-06	1.77E-06	1.01E-06	1.64E-06	3.86E-07	2.12E-06	9.95E-06	1.58E-05
2	2.67177E-07	1.4E-06	1.48E-06	1.81E-06	1.25E-06	1.6E-06	8E-07	8.4E-07	7.5E-07	3.79E-07	5.95E-07	4.06E-06	6.6E-06
2.1	1.87396E-07	5.88E-07	8.81E-07	2.59E-07	1.83E-07	1.29E-07	4.5E-07	4.63E-07	4.52E-07	4.12E-07	1.98E-07	2.05E-06	3.93E-06

Lampiran 4 : Perhitungan *Significant Amplitude*

RAO

Heave

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	45	90	135	180
0.1	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
0.2	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
0.3	9E-01	1E+00	1E+00	1E+00	9E-01
0.4	8E-01	9E-01	1E+00	9E-01	8E-01
0.5	6E-01	8E-01	1E+00	8E-01	6E-01
0.6	3E-01	6E-01	1E+00	6E-01	3E-01
0.7	9E-02	4E-01	1E+00	4E-01	2E-01
0.8	2E-01	1E-01	1E+00	2E-01	2E-01
0.9	1E-01	2E-01	1E+00	2E-01	2E-01
1	1E-01	1E-01	7E-01	2E-01	1E-01
1.1	7E-02	5E-02	4E-01	6E-02	7E-02
1.2	6E-02	4E-02	2E-01	4E-02	4E-02
1.3	4E-02	3E-02	1E-01	3E-02	3E-02
1.4	3E-02	1E-02	8E-02	1E-02	2E-02
1.5	2E-02	1E-02	5E-02	1E-02	1E-02
1.6	2E-02	5E-03	4E-02	6E-03	1E-02
1.7	1E-02	4E-03	2E-02	7E-03	7E-03
1.8	1E-02	1E-03	2E-02	4E-03	3E-03
1.9	8E-03	2E-03	2E-03	5E-03	4E-03
2	6E-03	1E-03	9E-03	3E-03	3E-03
2.1	6E-03	1E-03	9E-03	3E-03	3E-03

(RAO)^2

Heave

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	45	90	135	180
0.1	0.99812	0.9991	1.00006	0.99908	0.99812
0.2	0.97846	0.98935	1.00034	0.98937	0.97848
0.3	0.89459	0.94766	1.0032	0.94766	0.89458
0.4	0.68936	0.83953	1.01385	0.83968	0.68986
0.5	0.36046	0.63556	1.04602	0.63856	0.36622
0.6	0.07705	0.37077	1.12714	0.38381	0.0947
0.7	0.00872	0.14199	1.30142	0.16623	0.02717
0.8	0.04695	0.01067	1.51837	0.03576	0.05843
0.9	0.01893	0.03001	1.21187	0.03903	0.02794
1	0.01289	0.02197	0.47396	0.0261	0.01265
1.1	0.0055	0.00289	0.14536	0.00334	0.00452
1.2	0.0031	0.00174	0.04762	0.0014	0.00188
1.3	0.0014	0.00076	0.01731	0.00085	0.00082
1.4	0.00095	0.00021	0.00696	0.00012	0.00048
1.5	0.00048	0.00017	0.00295	0.00022	0.00013
1.6	0.00029	2.9E-05	0.00129	4.1E-05	0.00015
1.7	0.00018	1.9E-05	0.00057	4.4E-05	4.6E-05
1.8	9.1E-05	2E-06	0.00024	1.9E-05	8.8E-06
1.9	6.2E-05	3.8E-06	3.3E-06	2.1E-05	1.4E-05
2	4.1E-05	2E-06	8E-05	7.8E-06	1E-05
2.1	4.1E-05	2E-06	8E-05	7.8E-06	1E-05

Spektrum JONSWAP

Significant Wave Height (m)			
2.5	3.25	4	6
0	0	0	0
5E-248	1E-145	4E-95	4E-41
1E-47	2E-27	2E-17	5E-07
2E-14	6E-08	8E-05	0.0878
1E-05	0.0056	0.1102	1.3803
0.0114	0.2121	0.9779	4.4073
0.1433	0.8638	2.9975	1.5147
0.4565	1.9758	1.9797	0.9756
0.9897	1.0509	1.0866	0.6272
0.6776	0.6436	0.7721	0.4028
0.3746	0.4735	0.5375	0.2632
0.2851	0.342	0.374	0.1759
0.2159	0.2464	0.2629	0.1204
0.1619	0.1786	0.1875	0.0843
0.1215	0.1309	0.1358	0.0603
0.0917	0.0972	0.1	0.044
0.0698	0.0731	0.0747	0.0327
0.0537	0.0556	0.0566	0.0246
0.0417	0.0429	0.0435	0.0189
0.0327	0.0335	0.0338	0.0127
0.0259	0.0264	0.0266	0.0115

Respon Spektrum

Hs = 1.25 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	5E-248	5E-248	6E-248	5E-248	5E-248
0.3	1E-47	1.2E-47	1.3E-47	1.2E-47	1E-47
0.4	2E-14	1.9E-14	2.3E-14	1.9E-14	2E-14
0.5	5E-06	8.6E-06	1.4E-05	8.6E-06	5E-06
0.6	0.0009	0.00423	0.01287	0.00438	0.0011
0.7	0.0012	0.02035	0.18651	0.02382	0.0039
0.8	0.0214	0.00487	0.69315	0.01633	0.0267
0.9	0.0187	0.0297	1.19945	0.03863	0.0277
1	0.0087	0.01489	0.32118	0.01769	0.0086
1.1	0.0021	0.00108	0.05445	0.00125	0.0017
1.2	0.0009	0.0005	0.01358	0.0004	0.0005
1.3	0.0003	0.00016	0.00374	0.00018	0.0002
1.4	0.0002	3.4E-05	0.00113	2E-05	8E-05
1.5	6E-05	2.1E-05	0.00036	2.7E-05	2E-05
1.6	3E-05	2.7E-06	0.00012	3.8E-06	1E-05
1.7	1E-05	1.3E-06	4E-05	3.1E-06	3E-06
1.8	5E-06	1.1E-07	1.3E-05	1E-06	5E-07
1.9	3E-06	1.6E-07	1.4E-07	8.6E-07	6E-07
2	1E-06	6.4E-08	2.6E-06	2.6E-07	3E-07
2.1	1E-06	5.1E-08	2.1E-06	2E-07	3E-07

Respon Spektrum

Hs = 2.5 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	1E-145	1E-145	1E-145	1E-145	1E-145
0.3	2E-27	2E-27	2.2E-27	2E-27	2E-27
0.4	4E-08	5E-08	5.8E-08	5E-08	4E-08
0.5	0.002	0.0036	0.00589	0.0036	0.0021
0.6	0.0163	0.0787	0.2391	0.0814	0.0201
0.7	0.0075	0.1227	1.12419	0.1436	0.0235
0.8	0.0928	0.0211	3.00005	0.0707	0.1154
0.9	0.0199	0.0315	1.27352	0.041	0.0294
1	0.0083	0.0141	0.30503	0.0168	0.0081
1.1	0.0026	0.0014	0.06882	0.0016	0.0021
1.2	0.0011	0.0006	0.01628	0.0005	0.0006
1.3	0.0003	0.0002	0.00426	0.0002	0.0002
1.4	0.0002	4E-05	0.00124	2E-05	9E-05
1.5	6E-05	2E-05	0.00039	3E-05	2E-05
1.6	3E-05	3E-06	0.00013	4E-06	1E-05
1.7	1E-05	1E-06	4.2E-05	3E-06	3E-06
1.8	5E-06	1E-07	1.3E-05	1E-06	5E-07
1.9	3E-06	2E-07	1.4E-07	9E-07	6E-07
2	1E-06	7E-08	2.7E-06	3E-07	3E-07
2.1	1E-06	5E-08	2.1E-06	2E-07	3E-07

Respon Spektrum

Hs = 4 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	4E-95	4E-95	4E-95	4E-95	3.6E-95
0.3	2E-17	2E-17	2E-17	2E-17	1.8E-17
0.4	6E-05	7E-05	8E-05	7E-05	5.6E-05
0.5	0.0397	0.0701	0.1153	0.0704	0.04037
0.6	0.0753	0.3626	1.1022	0.3753	0.0926
0.7	0.0261	0.4256	3.901	0.4983	0.08144
0.8	0.0929	0.0211	3.0059	0.0708	0.11567
0.9	0.0206	0.0326	1.3168	0.0424	0.03036
1	0.01	0.017	0.3659	0.0202	0.00977
1.1	0.003	0.0016	0.0781	0.0018	0.00243
1.2	0.0012	0.0007	0.0178	0.0005	0.0007
1.3	0.0004	0.0002	0.0045	0.0002	0.00022
1.4	0.0002	4E-05	0.0013	2E-05	9.1E-05
1.5	6E-05	2E-05	0.0004	3E-05	1.8E-05
1.6	3E-05	3E-06	0.0001	4E-06	1.5E-05
1.7	1E-05	1E-06	4E-05	3E-06	3.4E-06
1.8	5E-06	1E-07	1E-05	1E-06	5E-07
1.9	3E-06	2E-07	1E-07	9E-07	6.2E-07
2	1E-06	7E-08	3E-06	3E-07	3.5E-07
2.1	1E-06	5E-08	2E-06	2E-07	2.7E-07

Respon Spektrum

Hs = 6 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	4.2E-41	4.2E-41	4.2E-41	4.2E-41	4.2E-41
0.3	4.4E-07	4.6E-07	4.9E-07	4.6E-07	4.4E-07
0.4	0.06054	0.07373	0.08903	0.07374	0.06058
0.5	0.49754	0.87727	1.44384	0.88142	0.5055
0.6	0.33958	1.63409	4.96761	1.69153	0.41736
0.7	0.0132	0.21507	1.97123	0.25178	0.04115
0.8	0.0458	0.01041	1.48125	0.03489	0.057
0.9	0.01187	0.01882	0.76005	0.02448	0.01752
1	0.00519	0.00885	0.19092	0.01051	0.0051
1.1	0.00145	0.00076	0.03825	0.00088	0.00119
1.2	0.00055	0.00031	0.00838	0.00025	0.00033
1.3	0.00017	9.2E-05	0.00208	0.0001	9.9E-05
1.4	8E-05	1.8E-05	0.00059	1E-05	4.1E-05
1.5	2.9E-05	1E-05	0.00018	1.3E-05	8.1E-06
1.6	1.3E-05	1.3E-06	5.7E-05	1.8E-06	6.4E-06
1.7	5.8E-06	6.1E-07	1.9E-05	1.4E-06	1.5E-06
1.8	2.2E-06	5E-08	5.9E-06	4.8E-07	2.2E-07
1.9	1.2E-06	7.2E-08	6.2E-08	3.9E-07	2.7E-07
2	5.3E-07	2.5E-08	1E-06	1E-07	1.3E-07
3	5.3E-07	2.5E-08	1E-06	1E-07	1.3E-07

Spektrum Respon

Heave *90 derajat*

Frek. (rad/s)	90 derajat			
	Hs = 2,5 m	Hs = 3,25 m	Hs = 4m	Hs = 6m
0.1	0	0	0	0
0.2	5.5E-248	1.4E-145	3.72E-95	4.25E-41
0.3	1.32E-47	2.22E-27	2.03E-17	4.9E-07
0.4	2.32E-14	5.82E-08	8.26E-05	0.089034
0.5	1.41E-05	0.005889	0.115295	1.443836
0.6	0.012868	0.239101	1.102213	4.967615
0.7	0.18651	1.124186	3.901018	1.971229
0.8	0.693149	3.000054	3.005923	1.481247
0.9	1.199446	1.273519	1.316825	0.76005
1	0.321179	0.305034	0.36595	0.190924
1.1	0.054452	0.068822	0.078135	0.038254
1.2	0.013577	0.016284	0.01781	0.008376
1.3	0.003736	0.004263	0.00455	0.002084
1.4	0.001127	0.001243	0.001305	0.000587
1.5	0.000359	0.000387	0.000401	0.000178
1.6	0.000119	0.000126	0.000129	5.69E-05
1.7	4.01E-05	4.19E-05	4.29E-05	1.88E-05
1.8	1.29E-05	1.34E-05	1.36E-05	5.94E-06
1.9	1.37E-07	1.41E-07	1.43E-07	6.21E-08
2	2.63E-06	2.69E-06	2.72E-06	1.02E-06
2.1	1E-06	2.12E-06	1.1E-06	1.02E-06

SM
1
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
1

SR x SM

	0 derajat			
	Hs = 1.25 m	Hs = 2.5 m	Hs = 4m	Hs = 6m
	0	0	0	0
	2.2E-247	5.5E-145	1.49E-94	1.7E-40
	2.63E-47	4.44E-27	4.07E-17	9.79E-07
	9.27E-14	2.33E-07	0.00033	0.356137
	2.82E-05	0.011779	0.230591	2.887673
	0.051474	0.956405	4.40885	19.87046
	0.37302	2.248373	7.802035	3.942457
	2.772595	12.00021	12.02369	5.924987
	2.398892	2.547038	2.633651	1.5201
	1.284715	1.220134	1.4638	0.763694
	0.108905	0.137645	0.156269	0.076508
	0.054308	0.065136	0.071242	0.033503
	0.007472	0.008527	0.0091	0.004168
	0.004509	0.004974	0.00522	0.002348
	0.000718	0.000774	0.000802	0.000356
	0.000475	0.000503	0.000517	0.000228
	8.02E-05	8.39E-05	8.58E-05	3.75E-05
	5.17E-05	5.36E-05	5.46E-05	2.37E-05
	2.74E-07	2.82E-07	2.86E-07	1.24E-07
	1.05E-05	1.08E-05	1.09E-05	4.09E-06
	1.07E-06	2.12E-06	1.1E-06	1.02E-06
SUM=	7.057252	19.20165	28.80625	35.38269
M_{r0}=	0.705725	1.920165	2.880625	3.538269

Significant SR (R 1/3)

Hs (m)	(R 1/3)
1.25	3.360298
2.5	5.542801
4	6.788962
6	7.524114

RAO

Heave

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	45	90	135	180
0.1	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
0.2	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00	1E+00
0.3	9E-01	1E+00	1E+00	1E+00	9E-01
0.4	8E-01	9E-01	1E+00	9E-01	8E-01
0.5	6E-01	8E-01	1E+00	8E-01	6E-01
0.6	3E-01	6E-01	1E+00	6E-01	3E-01
0.7	9E-02	4E-01	1E+00	4E-01	2E-01
0.8	2E-01	1E-01	1E+00	2E-01	2E-01
0.9	1E-01	2E-01	1E+00	2E-01	2E-01
1	1E-01	1E-01	7E-01	2E-01	1E-01
1.1	7E-02	5E-02	4E-01	6E-02	7E-02
1.2	6E-02	4E-02	2E-01	4E-02	4E-02
1.3	4E-02	3E-02	1E-01	3E-02	3E-02
1.4	3E-02	1E-02	8E-02	1E-02	2E-02
1.5	2E-02	1E-02	5E-02	1E-02	1E-02
1.6	2E-02	5E-03	4E-02	6E-03	1E-02
1.7	1E-02	4E-03	2E-02	7E-03	7E-03
1.8	1E-02	1E-03	2E-02	4E-03	3E-03
1.9	8E-03	2E-03	2E-03	5E-03	4E-03
2	6E-03	1E-03	9E-03	3E-03	3E-03
2.1	6E-03	1E-03	9E-03	3E-03	3E-03

(RAO)^2

Heave

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	45	90	135	180
0.1	0.99812	0.9991	1.00006	0.99908	0.99812
0.2	0.97846	0.98935	1.00034	0.98937	0.97848
0.3	0.89459	0.94766	1.0032	0.94766	0.89458
0.4	0.68936	0.83953	1.01385	0.83968	0.68986
0.5	0.36046	0.63556	1.04602	0.63856	0.36622
0.6	0.07705	0.37077	1.12714	0.38381	0.0947
0.7	0.00872	0.14199	1.30142	0.16623	0.02717
0.8	0.04695	0.01067	1.51837	0.03576	0.05843
0.9	0.01893	0.03001	1.21187	0.03903	0.02794
1	0.01289	0.02197	0.47396	0.0261	0.01265
1.1	0.0055	0.00289	0.14536	0.00334	0.00452
1.2	0.0031	0.00174	0.04762	0.0014	0.00188
1.3	0.0014	0.00076	0.01731	0.00085	0.00082
1.4	0.00095	0.00021	0.00696	0.00012	0.00048
1.5	0.00048	0.00017	0.00295	0.00022	0.00013
1.6	0.00029	2.9E-05	0.00129	4.1E-05	0.00015
1.7	0.00018	1.9E-05	0.00057	4.4E-05	4.6E-05
1.8	9.1E-05	2E-06	0.00024	1.9E-05	8.8E-06
1.9	6.2E-05	3.8E-06	3.3E-06	2.1E-05	1.4E-05
2	4.1E-05	2E-06	8E-05	7.8E-06	1E-05
2.1	4.1E-05	2E-06	8E-05	7.8E-06	1E-05

Spektrum JONSWAP

Significant Wave Height (m)			
2.5	3.25	4	6
0	0	0	0
5E-248	1E-145	4E-95	4E-41
1E-47	2E-27	2E-17	5E-07
2E-14	6E-08	8E-05	0.0878
1E-05	0.0056	0.1102	1.3803
0.0114	0.2121	0.9779	4.4073
0.1433	0.8638	2.9975	1.5147
0.4565	1.9758	1.9797	0.9756
0.9897	1.0509	1.0866	0.6272
0.6776	0.6436	0.7721	0.4028
0.3746	0.4735	0.5375	0.2632
0.2851	0.342	0.374	0.1759
0.2159	0.2464	0.2629	0.1204
0.1619	0.1786	0.1875	0.0843
0.1215	0.1309	0.1358	0.0603
0.0917	0.0972	0.1	0.044
0.0698	0.0731	0.0747	0.0327
0.0537	0.0556	0.0566	0.0246
0.0417	0.0429	0.0435	0.0189
0.0327	0.0335	0.0338	0.0127
0.0259	0.0264	0.0266	0.0115

Respon Spektrum

Hs = 1.25 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	5E-248	5E-248	6E-248	5E-248	5E-248
0.3	1E-47	1.2E-47	1.3E-47	1.2E-47	1E-47
0.4	2E-14	1.9E-14	2.3E-14	1.9E-14	2E-14
0.5	5E-06	8.6E-06	1.4E-05	8.6E-06	5E-06
0.6	0.0009	0.00423	0.01287	0.00438	0.0011
0.7	0.0012	0.02035	0.18651	0.02382	0.0039
0.8	0.0214	0.00487	0.69315	0.01633	0.0267
0.9	0.0187	0.0297	1.19945	0.03863	0.0277
1	0.0087	0.01489	0.32118	0.01769	0.0086
1.1	0.0021	0.00108	0.05445	0.00125	0.0017
1.2	0.0009	0.0005	0.01358	0.0004	0.0005
1.3	0.0003	0.00016	0.00374	0.00018	0.0002
1.4	0.0002	3.4E-05	0.00113	2E-05	8E-05
1.5	6E-05	2.1E-05	0.00036	2.7E-05	2E-05
1.6	3E-05	2.7E-06	0.00012	3.8E-06	1E-05
1.7	1E-05	1.3E-06	4E-05	3.1E-06	3E-06
1.8	5E-06	1.1E-07	1.3E-05	1E-06	5E-07
1.9	3E-06	1.6E-07	1.4E-07	8.6E-07	6E-07
2	1E-06	6.4E-08	2.6E-06	2.6E-07	3E-07
2.1	1E-06	5.1E-08	2.1E-06	2E-07	3E-07

Respon Spektrum

Hs = 2.5 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	1E-145	1E-145	1E-145	1E-145	1E-145
0.3	2E-27	2E-27	2.2E-27	2E-27	2E-27
0.4	4E-08	5E-08	5.8E-08	5E-08	4E-08
0.5	0.002	0.0036	0.00589	0.0036	0.0021
0.6	0.0163	0.0787	0.2391	0.0814	0.0201
0.7	0.0075	0.1227	1.12419	0.1436	0.0235
0.8	0.0928	0.0211	3.00005	0.0707	0.1154
0.9	0.0199	0.0315	1.27352	0.041	0.0294
1	0.0083	0.0141	0.30503	0.0168	0.0081
1.1	0.0026	0.0014	0.06882	0.0016	0.0021
1.2	0.0011	0.0006	0.01628	0.0005	0.0006
1.3	0.0003	0.0002	0.00426	0.0002	0.0002
1.4	0.0002	4E-05	0.00124	2E-05	9E-05
1.5	6E-05	2E-05	0.00039	3E-05	2E-05
1.6	3E-05	3E-06	0.00013	4E-06	1E-05
1.7	1E-05	1E-06	4.2E-05	3E-06	3E-06
1.8	5E-06	1E-07	1.3E-05	1E-06	5E-07
1.9	3E-06	2E-07	1.4E-07	9E-07	6E-07
2	1E-06	7E-08	2.7E-06	3E-07	3E-07
2.1	1E-06	5E-08	2.1E-06	2E-07	3E-07

Respon Spektrum

Hs = 4 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	4E-95	4E-95	4E-95	4E-95	3.6E-95
0.3	2E-17	2E-17	2E-17	2E-17	1.8E-17
0.4	6E-05	7E-05	8E-05	7E-05	5.6E-05
0.5	0.0397	0.0701	0.1153	0.0704	0.04037
0.6	0.0753	0.3626	1.1022	0.3753	0.0926
0.7	0.0261	0.4256	3.901	0.4983	0.08144
0.8	0.0929	0.0211	3.0059	0.0708	0.11567
0.9	0.0206	0.0326	1.3168	0.0424	0.03036
1	0.01	0.017	0.3659	0.0202	0.00977
1.1	0.003	0.0016	0.0781	0.0018	0.00243
1.2	0.0012	0.0007	0.0178	0.0005	0.0007
1.3	0.0004	0.0002	0.0045	0.0002	0.00022
1.4	0.0002	4E-05	0.0013	2E-05	9.1E-05
1.5	6E-05	2E-05	0.0004	3E-05	1.8E-05
1.6	3E-05	3E-06	0.0001	4E-06	1.5E-05
1.7	1E-05	1E-06	4E-05	3E-06	3.4E-06
1.8	5E-06	1E-07	1E-05	1E-06	5E-07
1.9	3E-06	2E-07	1E-07	9E-07	6.2E-07
2	1E-06	7E-08	3E-06	3E-07	3.5E-07
2.1	1E-06	5E-08	2E-06	2E-07	2.7E-07

Respon Spektrum

Hs = 6 m

Frek. (rad/s)	*Heading Angle* (deg)				
	0	**45**	**90**	**135**	**180**
0.1	0	0	0	0	0
0.2	4.2E-41	4.2E-41	4.2E-41	4.2E-41	4.2E-41
0.3	4.4E-07	4.6E-07	4.9E-07	4.6E-07	4.4E-07
0.4	0.06054	0.07373	0.08903	0.07374	0.06058
0.5	0.49754	0.87727	1.44384	0.88142	0.5055
0.6	0.33958	1.63409	4.96761	1.69153	0.41736
0.7	0.0132	0.21507	1.97123	0.25178	0.04115
0.8	0.0458	0.01041	1.48125	0.03489	0.057
0.9	0.01187	0.01882	0.76005	0.02448	0.01752
1	0.00519	0.00885	0.19092	0.01051	0.0051
1.1	0.00145	0.00076	0.03825	0.00088	0.00119
1.2	0.00055	0.00031	0.00838	0.00025	0.00033
1.3	0.00017	9.2E-05	0.00208	0.0001	9.9E-05
1.4	8E-05	1.8E-05	0.00059	1E-05	4.1E-05
1.5	2.9E-05	1E-05	0.00018	1.3E-05	8.1E-06
1.6	1.3E-05	1.3E-06	5.7E-05	1.8E-06	6.4E-06
1.7	5.8E-06	6.1E-07	1.9E-05	1.4E-06	1.5E-06
1.8	2.2E-06	5E-08	5.9E-06	4.8E-07	2.2E-07
1.9	1.2E-06	7.2E-08	6.2E-08	3.9E-07	2.7E-07
2	5.3E-07	2.5E-08	1E-06	1E-07	1.3E-07
3	5.3E-07	2.5E-08	1E-06	1E-07	1.3E-07

Spektrum Respon

Heave *90 derajat*

Frek. (rad/s)	90 derajat			
	Hs = 2,5 m	Hs = 3,25 m	Hs = 4m	Hs = 6m
0.1	0	0	0	0
0.2	5.5E-248	1.4E-145	3.72E-95	4.25E-41
0.3	1.32E-47	2.22E-27	2.03E-17	4.9E-07
0.4	2.32E-14	5.82E-08	8.26E-05	0.089034
0.5	1.41E-05	0.005889	0.115295	1.443836
0.6	0.012868	0.239101	1.102213	4.967615
0.7	0.18651	1.124186	3.901018	1.971229
0.8	0.693149	3.000054	3.005923	1.481247
0.9	1.199446	1.273519	1.316825	0.76005
1	0.321179	0.305034	0.36595	0.190924
1.1	0.054452	0.068822	0.078135	0.038254
1.2	0.013577	0.016284	0.01781	0.008376
1.3	0.003736	0.004263	0.00455	0.002084
1.4	0.001127	0.001243	0.001305	0.000587
1.5	0.000359	0.000387	0.000401	0.000178
1.6	0.000119	0.000126	0.000129	5.69E-05
1.7	4.01E-05	4.19E-05	4.29E-05	1.88E-05
1.8	1.29E-05	1.34E-05	1.36E-05	5.94E-06
1.9	1.37E-07	1.41E-07	1.43E-07	6.21E-08
2	2.63E-06	2.69E-06	2.72E-06	1.02E-06
2.1	1E-06	2.12E-06	1.1E-06	1.02E-06

SM
1
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
2
4
1

SR x SM

	0 derajat			
	Hs = 1.25 m	Hs = 2.5 m	Hs = 4m	Hs = 6m
	0	0	0	0
	2.2E-247	5.5E-145	1.49E-94	1.7E-40
	2.63E-47	4.44E-27	4.07E-17	9.79E-07
	9.27E-14	2.33E-07	0.00033	0.356137
	2.82E-05	0.011779	0.230591	2.887673
	0.051474	0.956405	4.40885	19.87046
	0.37302	2.248373	7.802035	3.942457
	2.772595	12.00021	12.02369	5.924987
	2.398892	2.547038	2.633651	1.5201
	1.284715	1.220134	1.4638	0.763694
	0.108905	0.137645	0.156269	0.076508
	0.054308	0.065136	0.071242	0.033503
	0.007472	0.008527	0.0091	0.004168
	0.004509	0.004974	0.00522	0.002348
	0.000718	0.000774	0.000802	0.000356
	0.000475	0.000503	0.000517	0.000228
	8.02E-05	8.39E-05	8.58E-05	3.75E-05
	5.17E-05	5.36E-05	5.46E-05	2.37E-05
	2.74E-07	2.82E-07	2.86E-07	1.24E-07
	1.05E-05	1.08E-05	1.09E-05	4.09E-06
	1.07E-06	2.12E-06	1.1E-06	1.02E-06
SUM=	7.057252	19.20165	28.80625	35.38269
M_{r0}=	0.705725	1.920165	2.880625	3.538269

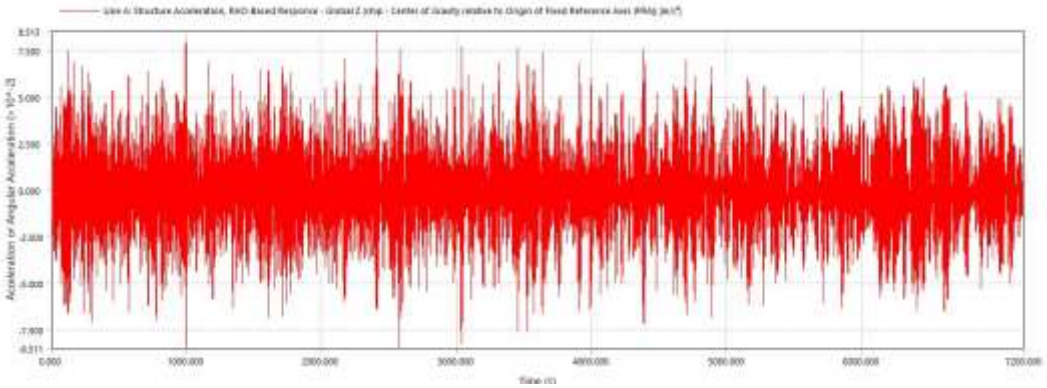
Significant SR (R 1/3)

Hs (m)	(R 1/3)
1.25	3.360298
2.5	5.542801
4	6.788962
6	7.524114

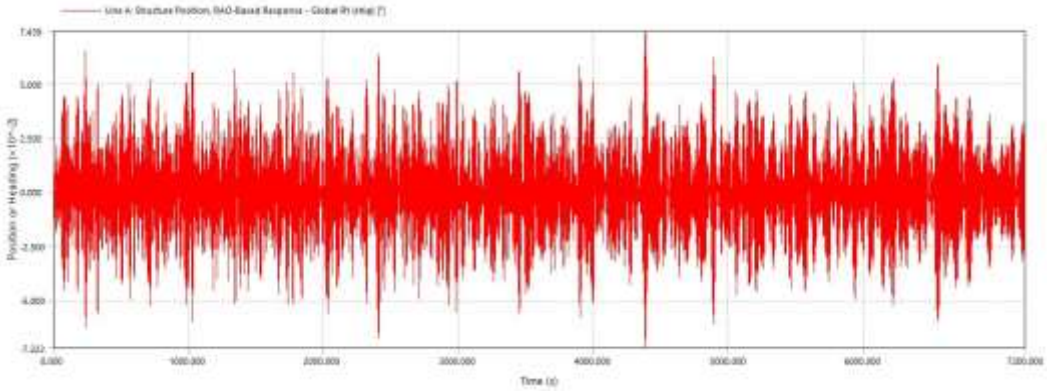
Lampiran 5 : Grafik Simulasi *Time Response*

Bentuk lambung Asli HS = 2.5m

Heave

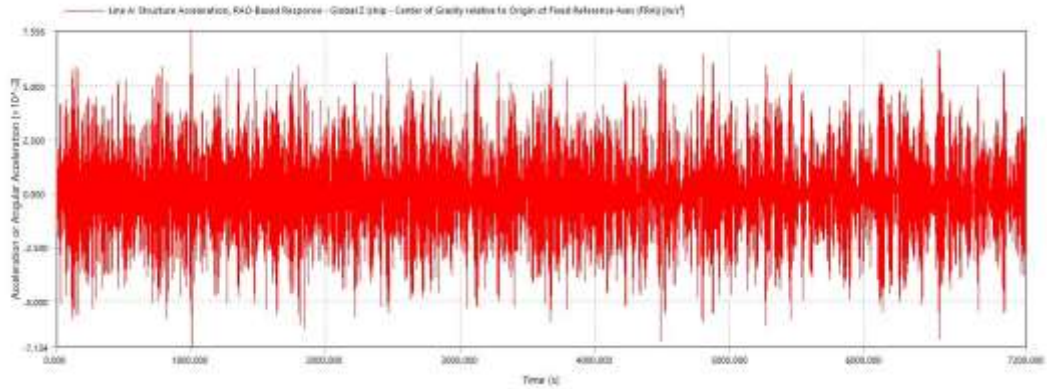


Pitch

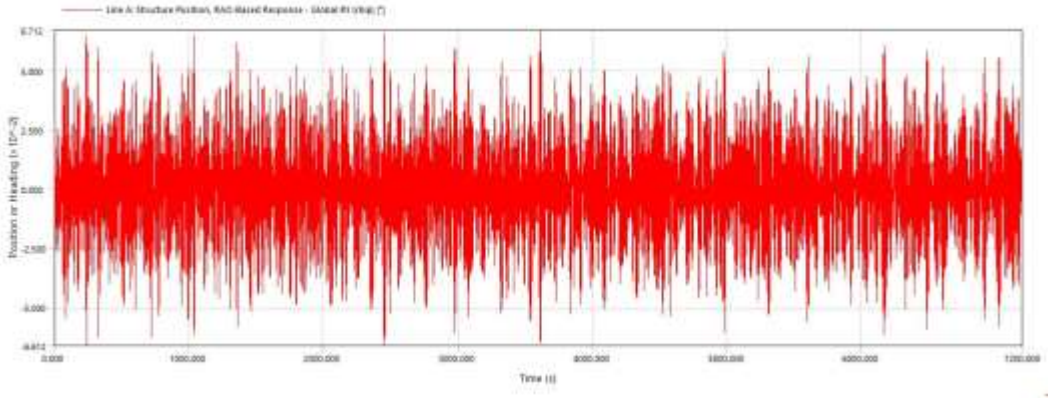


Bentuk lambung X-bow HS=2.5m

Heave

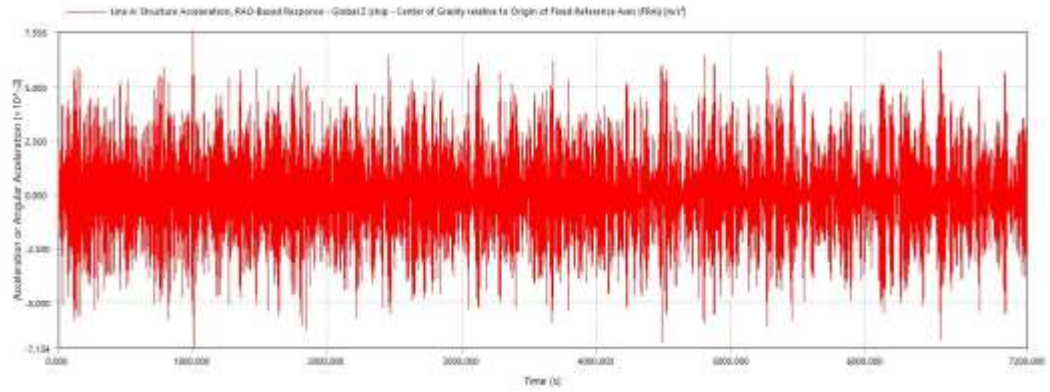


Pitch

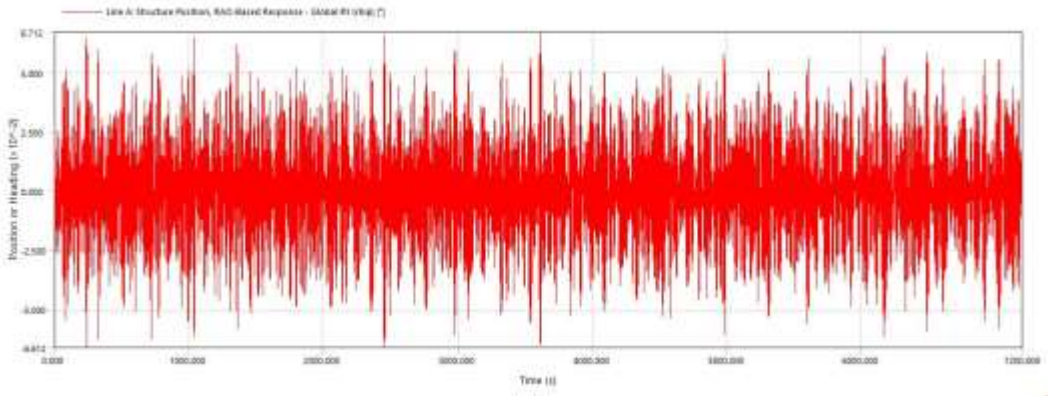


Bentuk lambung Axe-bow HS=2.5m

Heave



Pitch



BIODATA PENULIS

Febriani Rohmadhana. Lahir di Tulungagung pada tanggal 13 Februari 1994, sulung dari pasangan Ibu Utami (Alm.) dan Bapak Sarbini (Alm.) memiliki dua saudara perempuan, Luluk Indrawati dan Ririn Afsusanti. Menempuh pendidikan TK (1999) sampai SMA (2012) di Tulungagung, pada tahun 2012 ia melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Perkapalan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, dan setelah lulus S-1 memutuskan untuk melanjutkan studi S-2 pada jurusan yang sama. Disamping melanjutkan studi S-2 ia juga seorang pembantu peneliti di Laboratorium Desain Kapal ITS sejak tahun 2016 hingga sekarang dan bergabung dalam pengerjaan beberapa penelitian dan *project* antara lain desain kapal LNG *carrier*, kapal angkut ikan dari Kemenristek, dan kapal wisata sungai dari pemerintah Kalimantan Utara. Selain itu ia bergabung dalam pembuatan beberapa paten tentang kapal angkut ikan dan *void tank* kapal penumpang. Selama dua tahun terakhir ini ia juga telah melakukan dua kali publikasi pada seminar internasional yaitu seminar SENTA 2016 dan 2017. Harapan terbesarnya kedepan adalah membuat bangga kedua orang tua yang sudah tenang di sisi-Nya dan kedua kakaknya, serta bermanfaat bagi banyak orang dengan cara mengamalkan ilmu yang telah didapatkan.

Email : febriani.na1221@gmail.com

No. HP : +62 856 4904 510