



TUGAS AKHIR - MO141326

**ANALISIS OPERABILITAS SERTA EVALUASI
ASPEK *SLAMMING* DAN *GREENWATER* PADA
TUGBOAT - STUDI KASUS *TOWING FSO*
ARCO ARDJUNA DARI *JURONG PORT*
MENUJU *ARDJUNA MARINE TERMINAL***

RAINHART GABRIEL

NRP. 4312 100 113

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, Msc., PhD.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2016



FINAL PROJECT - MO141326

OPERABILITY ANALYSIS AND EVALUATION ASPECTS *SLAMMING* AND *GREENWATER* TUGBOAT - STUDY CASE OF FSO ARCO ARDJUNA TOWING FROM JURONG PORT TO ARDJUNA MARINE TERMINAL

RAINHART GABRIEL

NRP. 4312 100 113

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, Msc., PhD.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Marine Techopember Institute of Technology

Sepuluh Nopember Institue of Technology

Surabaya

2016

ANALISA OPERABILITAS SERTA EVALUASI ASPEK *SLAMMING* DAN *GREENWATER* PADA TUGBOAT – STUDI KASUS *TOWING FSO ARCO ARDJUNA* DARI *JURONG PORT* MENUJU *ARDJUNA MARINE TERMINAL*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

RAINHART GABRIEL

NRP. 4312100113

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Ir. Mas Mardjo, M.Eng (Pembimbing 2)

3. Dr.Eng Rudi Waljo Prastianto, S.T., M.T. (Penguji 1)

4. Ir. Joswan Joesoef Soedjono, M.Sc (Penguji 2)

5. Agro Wisudawan, S.T., M.T. (Penguji 3)

6. Sujantoko, S.T., M.T. (Penguji 4)

SURABAYA, JULI 2016

**ANALISA OPERABILITAS SERTA EVALUASI ASPEK *SLAMMING* DAN
GREENWATER PADA TUGBOAT – STUDI KASUS *TOWING* FSO *ARCO*
ARDJUNA DARI *JURONG PORT* MENUJU *ARDJUNA MARINE*
*TERMINAL***

Nama : Rainhart Gabriel
NRP : 4312 100 113
Jurusan : Teknik Kelautan FTK – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, Msc., PhD.,
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

Abstrak

Tugas akhir ini menjelaskan analisa AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) *MP Premier*, sebagai wahana yang digunakan dalam operasi *towing* FSO *Arco Ardjuna* dari Jurong Port di Singapura ke Arjuna Marine Terminal di Laut Jawa. Analisa yang dilakukan adalah gerakan AHTS selama melakukan proses *towing*, dilanjutkan dengan evaluasi kemungkinan terjadinya *slamming* dan *greenwater*. Berdasarkan aspek tersebut kemudian ditinjau operabilitas dari AHTS selama proses *towing* berlangsung. Analisis dimulai dari pemodelan AHTS dengan bantuan *software* *MAXSURF* guna mendapatkan *linesplan*. *Offset data* yang diperoleh kemudian digunakan sebagai masukan dalam melakukan analisa gerak AHTS saat melaju di gelombang *reguler*, dan hasilnya dinyatakan dalam bentuk grafik RAO. Berikutnya AHTS saat operasi *towing* FSO dianalisa dalam simulasi *time domain* untuk mendapatkan respon geraknya. Dengan melakukan analisa gerak relatif vertikal haluan berdasarkan RAO *heave* dan *pitch* serta mempertimbangkan spektra gelombang kondisi operasi akan didapat respon spektra relatif vertikal haluan AHTS. Berdasarkan respon tersebut dapat dilakukan analisa *probability slamming* dan *greenwater*. Aspek-aspek tersebut dibandingkan dengan kriteria *seakeeping* untuk mengetahui kemampuan AHTS dalam melakukan operasi *towing*. Hasil pada analisa menunjukkan respon maksimum untuk setiap gerakan berada pada kondisi 85% fuel tank dengan arah datang gelombang masing-masing. Didapatkan nilai rata-rata roll terbesar mencapai 4,53° pada arah gelombang 120°, nilai rata-rata *pitch* terbesar 3,42° arah datang gelombang 180°, nilai signifikan percepatan *heave* terbesar 1,98 m/s² arah datang gelombang 180°, nilai *double signifikan roll* terbesar 14,48° pada arah datang gelombang 120°, nilai *double heave* terbesar 6,03 m pada arah datang gelombang 180°, dan nilai *signifikan* kecepatan *heave* terbesar 2,36 m/s arah datang gelombang 180°. Sedangkan *probability slamming* terbesar 0,01259 pada kondisi 85% *fuel tank* dengan arah datang gelombang 180° dan *probability greenwater* terbesar 0,01741 pada kondisi *full load* dengan *heading* 180°. Memperhatikan hasil-hasil tersebut didapatkan bahwa AHTS *MP Premier* saat proses *towing* FSO *Arco Ardjuna* dapat mencapai tingkat operabilitas sebesar 98,99% dengan mengacu pada kriteria umum terkait serta batas tinggi gelombang signifikan sebesar 4,0 m.

Kata kunci: AHTS, FSO *towing*, *seakeeping*, *slamming*, *greenwater*, *operability*

**OPERABILITY ANALYSIS AND EVALUATION ASPECTS OF
SLAMMING AND GREENWATER TUGBOAT - STUDY CASE OF FSO
ARCO ARDJUNA TOWING FROM JURONG PORT TO ARDJUNA
MARINE TERMINAL.**

Name : Rainhart Gabriel
Reg. Number : 4312 100 113
Department : Ocean Engineering, FTK – ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, Msc., PhD.,
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

Abstract

This final year project discusses an analysis carried out on AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*) *MP Premier*, as a vessel employed in the towing operation of FSO *Arco Ardjuna* from Jurong Port in Singapore to Arjuna Marine Terminal at Java Sea. The analysis is carried out on the motion of AHTS during the towing process, followed by the evaluation on the possibility of slamming and greenwater. Based on those aspects further the AHTS operability is investigated during the time towing process. Analysis is commenced by modelling the AHTS with the aid of MAXSURF software to obtain the linesplan. The offset data so generated is then used as the input data to analyse the AHTS when propagating in regular waves, and the results are presented in the form of RAO graphs. Next AHTS during the FSO towing operation is analysed in time domain simulation to derived its motion responses. By conducting the relative vertical bow motion analysis on the basis of heave and pitch RAOs combined with the wave spectra for operational condition hence the spectral responses of AHTS' relative vertical bow motion will be attained. Based on these responses the analysis of slamming and greenwater probability could be performed. The aforementioned aspects are then correlated to the seakeeping criteria to find out the capacity of the AHTS to be employed in towing operation. Results of the analyses shows that maximum motion responses occur when the vessel is at 85% fuel tank load. In accordance to the wave propagations it is found that the maximum roll intensity may reach 4.53° at the wave heading of 120° , maximum average pitch motion of 3.42° due to wave heading of 180° , maximum significant heave acceleration of 1.98 m/s^2 at the wave heading of 180° , maximum double significant roll of 14.48° imposed by the wave heading of 120° , maximum significant heave motion of 6.03 m due to the wave heading of 180° , and the maximum significant heave velocity of 2.36 m/s at the wave heading of 180° . Whereas the slamming probability reaches 0.01259 at the 85% fuel tank load and the greenwater probability of 0.01741 at full load condition, both are due to the wave heading 180° . Considering those results it is found that AHTS *MP Premier* when operated in the towing process of FSO *Arco Ardjuna* may reach an operability level as high as 98.99% by referring to the corresponding general criteria and the limiting significant wave height of 4.0 m.

Keywords: AHTS, FSO towing, seakeeping, slamming, greenwater, operability

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	4
1.3. Tujuan	4
1.4. Manfaat	4
1.5. Batasan Masalah	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka	7
2.2. Dasar Teori	8
2.2.1. Tugboat	8
2.2.2. Floating Storage and Offloading System (FSO)	10
2.2.3. Gerakan <i>Sway</i> Murni	13
2.2.4. Gerakan <i>Heave</i> Murni	13
2.2.5. Gerakan <i>Roll</i> Murni	15
2.2.6. Gerakan <i>Pitch</i> Murni	16
2.2.7. Gerakan <i>Yaw</i> Murni	19
2.2.8. Gerakan Struktur Terapung dalam 6 Derajat Kebebasan	20
2.2.9. Gerakan Coupled Heave dan Pitch	20
2.2.1. Gerak Vertikal Haluan	29
2.2.2. Gerak Relatif Vertikal Haluan	31
2.2.3. Response Amplitude Operator (RAO)	31
2.2.4. Karakteristik RAO Gerak Relatif Vertikal Haluan	34
2.2.1. Spektra Gelombang	35
2.2.2. Respon Spektra	36
2.3. Teori Greenwater	37
2.3.1. Peluang Kejadian Greenwater	38
2.4. Teori Slamming	39
2.4.1. Peluang Kejadian Slamming	39
2.5. Prediksi Operabilitas Bangunan Apung	41

BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	43
3.1.	Diagram Alir	43
3.2.	Prosedur Penelitian.....	45
3.2.1.	Pengumpulan Data	45
3.2.2.	Pemodelan Struktur.....	49
3.2.3.	Validasi Struktur	50
3.2.4.	Komputasi Gerakan di Atas Gelombang Reguler	50
3.2.5.	Perhitungan gerakan Relatif Vertikal.....	50
3.2.6.	Perhitungan Spektrum Gelombang	50
3.2.7.	Menghitung Respon Spektra	51
3.2.8.	Menghitung Peluang <i>Greenwater</i> dan <i>Slamming</i>	51
3.2.9.	Perhitungan Operabilitas.....	51
BAB IV	ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1.	Pemodelan Struktur.....	53
4.1.1.	Pemodelan FSO <i>Arco Ardjuna</i>	53
4.1.2.	Pemodelan AHTS <i>MP Premier</i>	54
4.1.3.	<i>Lines Plan</i>	54
4.1.4.	Hidrostatik.....	56
4.2.	<i>Response Amplitude Operator</i> (RAO) pada kondisi <i>Free Floating</i>	57
4.2.1.	RAO FSO <i>Arco Ardjuna Free Floating</i> kondisi <i>towing load</i>	58
4.2.2.	RAO AHTS <i>MP Premier Free Floating</i> kondisi <i>Full Load</i>	60
4.2.3.	RAO AHTS <i>MP Premier Free Floating</i> kondisi <i>85% Fuel Tank</i>	62
4.2.4.	RAO AHTS <i>MP Premier Free Floating</i> kondisi <i>69% Fuel Tank</i> ...	64
4.3.	Pemodelan Sistem <i>Towing</i>	66
4.4.	Analisa Gerakan AHTS <i>MP Premier</i> pada Operasi <i>Towing</i>	68
4.4.1.	Analisa Gerakan <i>Roll</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada Operasi <i>Towing</i> ...	69
4.4.2.	Analisa Gerakan <i>Pitch</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada Operasi <i>Towing</i> ..	70
4.4.3.	Analisa Gerakan <i>Heave</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada Operasi <i>Towing</i> ..	72
4.5.	Analisa <i>slamming</i> dan <i>greenwater</i> AHTS <i>MP Premier</i> Operasi <i>Towing</i>	75
4.5.1.	Analisa Gerakan Relatif Haluan Vertikal AHTS <i>MP Premier</i>	76
4.5.2.	Analisa Spektrum Gelombang JONSWAP	78
4.5.3.	Analisa Respon Gerakan AHTS <i>MP Premier</i> pada Operasi <i>Towing</i>	79
4.5.4.	Peluang Kejadian <i>Slamming</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada Operasi <i>Towing</i>	82

4.5.5.	Peluang Kejadian <i>Greenwater AHTS MP Premier</i> pada Operasi <i>Towing</i>	83
4.6.	Evaluasi Kriteria <i>Seakeeping</i>	84
4.6.1.	Evaluasi Kriteria <i>Seakeeping</i> AHTS MP Premier pada operasi <i>towing</i>	84
4.6.2.	Evaluasi Kriteria <i>Seakeeping</i> AHTS <i>MP Premier</i>	86
4.7.	Operabilitas AHTS MP Premier.....	94
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	97
5.1.	Kesimpulan.....	97
5.2.	Saran.....	98
	DAFTAR PUSTAKA.....	99
	LAMPIRAN	
	BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum (Prasiwi, 2014).....	36
Tabel 2. 2 Kriteria <i>seakeeping</i> untuk kapal militer (Olson, 1978)	41
Tabel 2. 3 Kriteria <i>seakeeping</i> pada <i>greenwater</i> dan <i>slamming</i> (Lloyd, 1989)	42
Tabel 3. 1 <i>Principle Dimension</i> FSO <i>Arco Ardjuna</i>	45
Tabel 3. 2 Informasi data AHTS <i>MP Premier</i>	47
Tabel 3. 3 Data Lingkungan Laut Jawa.....	48
Tabel 3. 4 Data Lingkungan <i>Belanak Field</i> , Natuna.....	48
Tabel 3. 5 <i>Wave Scatter</i> Diagram <i>Belanak Field</i> , Natuna.....	49
Tabel 4. 1 Validasi hidrostatik FSO <i>Arco Ardjuna</i> data dengan	56
Tabel 4. 2 Validasi hidrostatik AHTS <i>MP Premier</i> data dengan model.....	57
Tabel 4. 3 Nilai maksimum RAO <i>free floating</i> FSO <i>Arco Ardjuna</i> kondisi <i>towing</i> dengan kecepatan 5 Knot	60
Tabel 4. 4 Nilai maksimum RAO <i>free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>Full</i> <i>Load</i> dengan kecepatan 5 Knot	62
Tabel 4. 5 Nilai maksimum RAO <i>free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>85%</i> <i>fuel tank</i> dengan kecepatan 5 Knot	64
Tabel 4. 6 Nilai maksimum RAO <i>free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>69%</i> <i>Fuel Tank</i> dengan kecepatan 5 Knot.....	66
Tabel 4. 7 <i>Roll</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi	70
Tabel 4. 8 <i>Pitch</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi	72
Tabel 4. 9 <i>heave displacement, velocity, dan acceleration</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi	75
Tabel 4. 10 <i>Probability slamming</i> AHTS <i>MP Premier</i> pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi	82
Tabel 4. 11 Tabel Kriteria <i>seakeeping</i>	84
Tabel 4. 12 Tabel Evaluasi <i>seakeeping</i> AHTS <i>MP Premier</i>	85
Tabel 4. 13 Batas H_s berdasarkan kriteria <i>seakeeping</i> AHTS <i>MP Premier</i>	95
Tabel 4. 14 Analisa Operabilitas AHTS <i>MP Premier</i>	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i>	1
Gambar 1. 2 Rute Pelayaran FSO <i>Arco Ardjuna</i> dari <i>Ardjuna Marine Terminal</i> menuju <i>Jurong Singapura</i>	2
Gambar 2. 1 Seagoing tugboat	9
Gambar 2. 2 <i>Floating Storage and Offloading System (FSO)</i>	10
Gambar 2. 3 Enam derajat kebebasan pada struktur bangunan apung	12
Gambar 2. 4 Ilustrasi Gerakan Surge.....	12
Gambar 2. 5 Ilustrasi Gerakan Sway	13
Gambar 2. 6 Ilustrasi Gerakan Heave.....	14
Gambar 2. 7 Ilustrasi Gerakan <i>Roll</i>	16
Gambar 2. 8 Ilustrasi Gerakan <i>Pitch</i>	19
Gambar 2. 9 Ilustrasi Gerakan <i>Yaw</i>	19
Gambar 2. 10 Gerak vertikal struktur terapung.....	31
Gambar 2. 11 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung.....	32
Gambar 2. 12 Pola grafik RAO gerakan relatif vertikal haluan	34
Gambar 2. 13 Struktur pada gelombang panjang	34
Gambar 2. 14 Struktur pada gelombang pendek	35
Gambar 2. 15 Pengaruh perbedaan fase antara gelombang dan gerak	37
Gambar 3. 1 <i>Flow chart</i> metodologi penelitian.....	43
Gambar 3. 2 <i>Flow chart</i> metodologi penelitian (Lanjutan).....	44
Gambar 3. 3 <i>General Arrangement</i> FSO <i>Arco Ardjuna</i>	46
Gambar 3. 4 <i>General Arrangement</i> AHTS <i>MP Premier</i>	47
Gambar 3. 5 Konfigurasi FSO <i>Arco Ardjuna</i>	49
Gambar 4. 1 Pemodelan FSO <i>Arco Ardjuna</i> dengan <i>Maxsurf Modeler</i>	53
Gambar 4. 2 Pemodelan AHTS <i>MP Premier</i> dengan <i>Maxsurf Modeler</i>	54
Gambar 4. 3 <i>Lines Plan</i> AHTS <i>MP Premier</i>	55
Gambar 4. 4 <i>Lines Plan</i> AHTS <i>MP Premier</i>	55
Gambar 4. 5 Grafik RAO <i>Heave free floating</i> FSO <i>Arco Ardjuna</i> kondisi <i>towing load</i> dengan kecepatan 5 Knot	58
Gambar 4. 6 Grafik RAO <i>Roll free floating</i> FSO <i>Arco Ardjuna</i> kondisi <i>towing load</i> dengan kecepatan 5 Knot.	59

Gambar 4. 7 Grafik RAO <i>Pitch free floating</i> FSO <i>Arco Ardjuna</i> kondisi <i>towing load</i> dengan kecepatan 5 Knot.....	59
Gambar 4. 8 Grafik RAO <i>Heave free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>Full Load</i> dengan kecepatan 5 Knot	61
Gambar 4. 9 Grafik RAO <i>Roll free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>Full Load</i> dengan kecepatan 5 knot	61
Gambar 4. 10 Grafik RAO <i>Pitch free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>Full Load</i> dengan kecepatan 5 Knot	62
Gambar 4. 11 Grafik RAO <i>Heave free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>85% Fuel Tank</i> dengan kecepatan 5 Knot	63
Gambar 4. 12 Grafik RAO <i>Roll free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>85% Fuel Tank</i> dengan kecepatan 5 Knot	63
Gambar 4. 13 Grafik RAO <i>Pitch free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>85% Fuel Tank</i> dengan kecepatan 5 Knot	64
Gambar 4. 14 Grafik RAO <i>Heave free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>69% Fuel Tank</i> dengan kecepatan 5 Knot	65
Gambar 4. 15 Grafik RAO <i>Roll free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>69% Fuel Tank</i> dengan kecepatan 5 Knot	65
Gambar 4. 16 Grafik RAO <i>Pitch free floating</i> AHTS <i>MP Premier</i> kondisi <i>69% Fuel Tank</i> dengan kecepatan 5 Knot	66
Gambar 4. 17 Pemodelan sistem <i>towing</i> pada <i>Software</i> simulasi <i>time domain</i> tampak samping.....	67
Gambar 4. 18 Model AHTS <i>MP Premier</i> pada <i>software</i> simulasi <i>time domain</i> tampak samping.....	67
Gambar 4. 19 Rekaman motion <i>roll</i> AHTS <i>MP Premier 85%fuel tank</i> pada laut cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 120°	69
Gambar 4. 20 Pembesaran pada nilai maksimum rekaman motion <i>roll</i> AHTS <i>MP Premier 85%fuel tank</i> pada laut cina selatan dengan <i>heading</i> 120°.....	69
Gambar 4. 21 Rekaman motion <i>pitch</i> AHTS <i>MP Premier 85%fuel tank</i> pada laut cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 180°	71
Gambar 4. 22 Pembesaran Rekaman motion <i>pitch</i> AHTS <i>MP Premier 85%fuel tank</i> pada laut cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 180°	71

Gambar 4. 23 Rekaman <i>heave displacement</i> AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut Cina selatan kondisi operasi <i>towing heading</i> 180°	73
Gambar 4. 24 Pembesaran grafik <i>heave displacement</i> AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut Cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 180°	73
Gambar 4. 25 Rekaman <i>heave velocity</i> AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut Cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 180°	73
Gambar 4. 26 Pembesaran Rekaman <i>heave velocity</i> AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut Cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 180°	74
Gambar 4. 27 Rekaman <i>heave acceleration</i> AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut Cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 180°	74
Gambar 4. 28 Pembesaran Rekaman <i>heave acceleration</i> AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut Cina selatan kondisi operasi <i>towing</i> dengan <i>heading</i> 180°	74
Gambar 4. 29 Grafik RAO gerakan relatif haluan vertikal AHTS MP Premier 85% fuel tank Kecepatan 5 Knot.....	77
Gambar 4. 30 Grafik RAO gerakan relatif haluan vertikal AHTS MP Premier 69% Fuel Tank Kecepatan 5 Knot	78
Gambar 4. 31 Spektrum Gelombang JONSWAP.....	79
Gambar 4. 32 Respon Spektra Gerak Relatif Vertikal Haluan AHTS MP Premier Full Load kecepatan 5 Knot pada Perairan Laut Cina Selatan	80
Gambar 4. 33 Respon Spektra Gerak Relatif Vertikal Haluan AHTS MP Premier 85% Fuel Tank kecepatan 5 Knot pada Perairan Laut Cina Selatan	80
Gambar 4. 34 Respon Spektra Gerak Relatif Vertikal Haluan AHTS MP Premier 69% Fuel Tank kecepatan 5 Knot pada Perairan Laut Jawa.....	81
Gambar 4. 35 Grafik Average Roll AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 120 deg dengan batas average roll kriteria oslon	87
Gambar 4. 36 Grafik Average Pitch AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg dengan batas average pitch kriteria oslon.....	88
Gambar 4. 37 Grafik Significant Heave Acceleration AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg dengan batas Significant Heave Acceleration	89
Gambar 4. 38 double amplitude significant roll AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 120 deg dengan batas double amplitude significant roll.....	90

Gambar 4. 39	Grafik <i>double significant heave displacement</i> AHTS MP Premier 85% Fuel heading 180 deg dengan batas <i>double significant heave displacement</i>	91
Gambar 4. 40	Grafik <i>Significant Heave Velocity</i> AHTS MP Premier 85% Fuel heading 180 deg dengan batas <i>Significant Heave Velocity</i>	92
Gambar 4. 41	Grafik <i>Probability Slamming</i> AHTS MP Premier 85% Fuel heading 180 deg dengan batas <i>Probability Slamming</i> berdasarkan Yamamoto. ..	93
Gambar 4. 42	Grafik <i>Probability Greenwater</i> AHTS MP Premier Full Load 180 deg dengan batas <i>Probability Greenwater</i> berdasarkan Yamamoto.	94

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

FSO *Arco Ardjuna* adalah fasilitas apung berbendera Indonesia yang dimiliki oleh PT. Pertamina Hulu Energi Offshore Northwest Java (PHE ONWJ). Ximenes (1997) menyatakan pada penelitiannya, FSO *Arco Ardjuna* merupakan salah satu FSO tertua yang mulai beroperasi pada tahun 1978. Daerah operasi FSO *Arco Ardjuna* berada di *Ardjuna Marine Terminal* yaitu wilayah aset timur dari PHE ONWJ. FSO *Arco Ardjuna* berfungsi sebagai fasilitas penerima, penyimpanan, dan penyalur *crude oil* untuk mendukung proses produksi pada ladang minyak tersebut. FSO *Arco Ardjuna* merupakan kapal produksi *Mitsubishi Heavy Industries* dengan *class ABS*, akan tetapi berdasarkan Keputusan Menteri Perhubungan No. 20 thn. 2006, FSO *Arco Ardjuna* berganti *class* menjadi BKI dan resmi menggunakan *class BKI* pada tahun 2012.



Gambar 1. 1 *Floating Storage and Offloading System (FSO)*
(PT. PHE ONWJ, 2015)

Pada saat ini, FSO *Arco Ardjuna* sedang dilakukan reparasi *dry docking* di Jurong, Singapore. *Dry dock* adalah aktivitas rutin kapal dalam periode waktu tertentu guna membersihkan badan kapal, memeriksa kerusakan-kerusakan pada kapal, memperbaiki kapal. Setelah proses *docking* selesai, FSO *Arco Ardjuna* akan kembali dibawa menuju daerah operasi yaitu *Ardjuna Marine Terminal*.

Seperti yang telah diketahui, FSO merupakan struktur terapung yang berfungsi sebagai penampung *crude oil* dan beroperasi pada waktu yang lama di

daerah operasi. Oleh karena itu, FSO tidak lagi mempunyai sistem penggerak. Sehingga untuk dapat dipindahkan kembali menuju *Ardjuna Marine Terminal*, FSO *Arco Ardjuna* perlu dilakukan proses *towing* dengan menggunakan *tugboat* menuju daerah operasi. Rute pelayaran untuk FSO *Arco Ardjuna* dari Jurong Singapura kembali menuju *Ardjuna Marine Terminal* melewati beberapa jenis perairan yaitu Laut Cina Selatan dan Laut Jawa dengan perkiraan jarak tempuh sejauh 808 nm. Berdasarkan laporan sebelumnya, proses *towing* FSO *Arco Ardjuna* dari *Ardjuna Marine Terminal* menuju Jurong Singapura membutuhkan waktu selama 161 jam dengan kecepatan rata-rata 5 knot.



Gambar 1. 2 Rute Pelayaran FSO *Arco Ardjuna* dari *Ardjuna Marine Terminal* menuju *Jurong Singapura* (PHE ONWJ, 2014)

Berdasarkan lamanya proses *towing* dan jarak tempuh, peluang keberhasilan *towing* terletak pada kemampuan *tugboat* sebagai struktur yang membawa FSO *Arco Ardjuna*. Walaupun umumnya perairan Indonesia memiliki tinggi gelombang yang cukup kecil, perubahan cuaca yang tidak terduga tetap memungkinkan terciptanya gelombang besar secara tiba-tiba yang mengakibatkan perubahan drastis pada gerakan yang dialami *tugboat* nantinya. Oleh karena itu, kesuksesan pada operasi *towing* dapat dilihat pada kemampuan *tugboat* selama proses *towing* berlangsung. Pada proses *towing*, gerakan *tugboat* dipengaruhi oleh gelombang yang ada di sekitarnya. Gerakan-gerakan kapal seperti *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* akan timbul dikarenakan adanya gelombang yang datang dan mengakibatkan gaya-gaya bekerja pada FSO dan *tugboat*. Selain dikarenakan oleh

beban lingkungan, *tugboat* juga dipengaruhi oleh *towingline* pada FSO *Arco Ardjuna* sehingga perlu dilakukan analisa lebih lanjut mengenai pengaruh beban *towing* yang ditanggung *tugboat* selama melakukan operasi. *Tugboat* yang baik harus memiliki operabilitas yang baik. Operabilitas merupakan kemampuan struktur untuk beroperasi pada suatu lingkungan tertentu. Dengan begitu semakin baik operabilitas *tugboat* terhadap rute pelayaran maka peluang berhasilnya proses *towing* semakin tinggi dikarenakan *tugboat* akan mampu beroperasi pada gelombang relatif tinggi.

Besarnya gelombang laut mengakibatkan gerakan *tugboat* yang lebih besar pula terutama pada bagian haluan. Gerakan relatif haluan vertikal yang berlebihan akan mengakibatkan terjadinya *slamming* dan *greenwater*. Berdasarkan penjelasan sebelumnya, walaupun keadaan perairan Indonesia relatif tenang namun pada musim tertentu gelombang yang dihasilkan akan cukup besar untuk menggerakkan haluan secara signifikan sehingga mengakibatkan *slamming* dan *greenwater* terjadi.

Greenwater adalah kondisi yang dipengaruhi oleh ketinggian *freeboard* dimana gelombang laut masuk atau naik ke bagian atas haluan kapal. *greenwater* terjadi ketika tinggi gelombang lebih besar daripada tinggi haluan yang mengakibatkan struktur haluan terbenam (*bow submergence*) serta mengakibatkan terjadinya fenomena *greenwater*. Sedangkan *slamming* adalah kondisi haluan kapal terangkat dan terhempas kembali pada permukaan air laut dalam kecepatan tertentu. Fenomena *slamming* terjadi pada saat dasar haluan naik melewati (*bow emergence*) gelombang dan jatuh dengan kecepatan relatif besar sehingga memberikan tekanan yang besar pada struktur haluan bagian bawah.

Berdasarkan pembahasan diatas, Tugas Akhir ini disusun. Tugas akhir ini akan menyampaikan evaluasi gerakan dan operabilitas pada saat *tugboat* melakukan proses *towing* terhadap FSO *Arco Ardjuna*. Sehingga, dapat diketahui kemampuan *tugboat* terhadap lingkungan pelayaran dari Jurong Singapura menuju *Ardjuna Marine Terminal*. Selain itu aspek *greenwater* dan *slamming* juga akan dianalisis pada tugas akhir ini untuk mengetahui apakah gerakan vertikal yang terjadi pada *tugboat* pada rute pelayaran dapat menyebabkan terjadinya *greenwater* dan *slamming* dan mengetahui peluang terjadinya pada kondisi lingkungan pelayaran.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan pada tugas akhir ini antara lain :

1. Bagaimana karakteristik gerakan *tugboat* di gelombang acak saat kondisi badai ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal* ?
2. Berapa peluang terjadinya *slamming* pada *tugboat* ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal* ?
3. Berapa peluang terjadinya *greenwater* pada *tugboat* ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal* ?
4. Bagaimana operabilitas *tugboat* ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal* ?

1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini antara lain :

1. Melakukan komputasi dan mengidentifikasi karakteristik gerakan *tugboat* dan FSO di gelombang acak saat kondisi badai ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal*
2. Menghitung peluang terjadinya *slamming* pada *tugboat* ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal*
3. menghitung peluang terjadinya *greenwater* pada *tugboat* ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal*
4. Menghitung operabilitas *tugboat* ketika dioperasikan dalam proses *towing* dari *Jurong Port* Menuju *Ardjuna Marine Terminal*

1.4. Manfaat

Manfaat pada tugas akhir ini adalah mengetahui gerakan *tugboat* ketika beroperasi serta peluang dan intensitas dari *greenwater* dan *slamming* pada struktur haluan *tugboat*. Selain itu, berdasarkan aspek *greenwater*, *slamming*, dan gerakan *tugboat* ketika beroperasi, akan diketahui operabilitas *tugboat* ketika dioperasikan dalam proses *towing* FSO Arco Ardjuna dari *Jurong Port* menuju *Ardjuna Marine Terminal*.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini menggunakan FSO (*Floating storage and offloading*) Arco Ardjuna dan AHTS MP Premier.
2. Beban angin dan arus diabaikan.
3. Analisa RAO pada FSO (*Floating storage and offloading*) dan *tugboat* menggunakan software Maxsurf dengan variasi arah datang gelombang (*heading*) 180°, 150°, dan 120°.
4. Kecepatan operasi *towing* adalah 5 knot.
5. Gerak yang ditinjau pada evaluasi *greenwater* dan *slamming* adalah gerakan kopel *heave* dan *pitch* dengan arah datang gelombang (*heading*) 180°, 150°, 120°.
6. Selama Proses *towing*, FSO Arco Ardjuna memiliki satu *towing condition* dengan sarat 4,4 m dan AHTS MP Premier memiliki tiga *loading condition* yaitu *full load* (Sarat 5,5 m), *85% fuel tank* (Sarat 5,409 m), dan *69% Fuel Tank* (Sarat 5,303 m).
7. Rute perairan *towing* berada pada Laut Cina Selatan dan Laut Jawa dengan Hs 4.60 m dan 3.89 m
8. Operabilitas ditinjau berdasarkan aspek kondisi lingkungan.
9. AHTS MP Premier berada di depan FSO Arco Ardjuna dan *escort tug* pada bagian belakang dengan bantuan *towing line* sebagai penghubung.
10. Analisa hanya meninjau pada satu *tugboat* saja.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

FSO yang digunakan pada tugas akhir ini adalah FSO *Arco Ardjuna*. Dalam Pratiwi (2012) disebutkan FSO (*Floating Storage and Offloading*) adalah struktur terapung yang beroperasi dilepas pantai yang berfungsi untuk menerima, menyimpan, dan menyalurkan minyak dan gas bumi ke *carrier* atau *shuttle tanker*. Utomo (2012) pada penelitiannya menyebutkan FSO didesain tidak memiliki sistem penggerak dikarenakan FSO beroperasi dalam kondisi *fix* tau tidak berpindah-pindah. Oleh karena itu, diperlukan proses *towing* dengan menggunakan *tugboat* guna memindahkan FSO menuju daerah operasi.

Banyak faktor yang perlu diteliti pada proses *towing*. Jiang (1998) melakukan penelitian dengan ranah *time domain* pada operasi *towing* tanker menggunakan *tugboat*, diketahui posisi *towing line* mempengaruhi gerakan. proses *towing*. Pada *Ecogreen Barge* oleh Prasetyo (2012) menyatakan bahwa proses *towing* mengakibatkan *Ecogreen Barge* dalam keadaan yang tidak stabil. Kondisi tersebut sangat mengkhawatirkan, apabila terjadi keolengan yang luar biasa maka *Barge* akan terbalik dan minyak bisa saja tumpah. Respon gerak yang ditimbulkan pada saat *towing* pada *tugboat* juga perlu diperhatikan. Pada penelitian Kareka (2014) dinyatakan bahwa tinggi gelombang dan karakteristik gerakan bangunan lepas pantai akan sangat mempengaruhi operabilitas. Untuk dapat menciptakan operabilitas yang baik pada *tugboat*, penelitian mengenai respon gerak *tugboat* pada lingkungan pelayaran saat proses *towing* perlu diteliti.

Pada proses *towing*, beban gelombang akan menimbulkan respon gerak pada FSO. Pada penelitian Bales (1976) untuk analisa *slamming* dan *greenwater* untuk kapal perang Amerika, beban gelombang yang digunakan mengacu pada gelombang signifikan. Nakayama (2012) melakukan eksperimen operasi *towing* untuk melihat gerakan pada *tugboat* maupun kapal yang ditarik, penelitian tersebut meninjau gerakan haluan vertikal tepatnya pada gerakan *heave* dan *pitch*. Hal ini sesuai dengan analisa pada Tugas Akhir ini dimana *slamming* dan *greenwater* ditinjau untuk gerakan *heave* dan *pitch*.

Respon gerak yang berlebihan akan membuat gerak haluan vertikal kapal meningkat yang akan menyebabkan terjadinya *greenwater* atau *slamming*. Pada penelitian Bustamin (2012) terhadap *Offshore Security Vessel*, Peristiwa *greenwater* terjadi ketika tinggi gelombang laut yang besar melampaui tinggi *freeboard* kapal. penyebab *greenwater* disebabkan karena gerakan relatif deck, terutama gerak relatif deck haluan pada permukaan gelombang. Iswara (2012) meneliti aspek *greenwater* pada *drillship* menemukan bahwa *greenwater* akan semakin signifikan seiring dengan meningkatnya kecepatan serta tinggi gelombang pada lingkungan.

Begitu juga dengan *slamming*. Pada penelitian yang dilakukan oleh Perwitasari (2007), ia melakukan analisa *slamming* pada *offshore supply vessel* menyatakan bahwa *slamming* dapat mengganggu tolok ukur kinerja struktur kapal yaitu *seaworthiness* dan *seakindliness*. Keadaan tersebut berpengaruh pada keselamatan operasi dan kekuatan struktur dari *offshore supply vessel*. Pada tugas akhir ini, berdasarkan *report* yang didapat struktur yang digunakan sebagai *tow master* adalah AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*). Pada tesis Chen (2013) dinyatakan AHTS merupakan struktur sejenis *offshore supply vessel* namun memiliki fungsi tambahan *towing* sehingga sangat cocok digunakan untuk operasi *towing* pada laut terbuka. Pernyataan tersebut mendukung pada pemilihan AHTS sebagai struktur yang menarik FSO *Arco Ardjuna*.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, penulis akan melakukan analisa operabilitas *tugboat* yang digunakan pada saat melakukan proses *towing* FSO *Arco Ardjuna* menuju daerah operasi. serta evaluasi aspek *greenwater* dan *slamming* pada *tugboat* saat terjadinya proses *towing* menuju daerah operasi.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Tugboat

Tugboat atau disebut juga Kapal Tunda merupakan kapal dengan fungsi utama dalam sistem operasi kelautan adalah kapal untuk menarik ataupun mendorong kapal lain baik dalam keperluan berlabuh, *towing*, dan lain sebagainya.

Berdasarkan daerah kerjanya *tugboat* dibagi kedalam tiga macam yaitu *river tugboat*, *harbour tugboat*, dan *seagoing tugboat*. *River tugboat* merupakan jenias

kapal tunda yang memiliki daerah operasi pada sungai-sungai, memiliki desain hull yang rendah dan kotak sehingga tidak memiliki kemampuan untuk memecah ombak serta rentan terhadap gelombang jika dioperasikan di laut lepas. *Harbour tugboat* memiliki daerah kerja pada pelabuhan dengan fungsi pada umumnya untuk melayani kapal-kapal untuk berlabuh, memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan *seagoing tugboat*. *Seagoing tugboat* merupakan kapal yang digunakan pada operasi *towing* FSO *Arco ardjuna*, dikarenakan daerah operasi berada di laut lepas. Operasi yang umum dilakukan oleh *seagoing tugboat* adalah membantu operasi *mooring* dan *unmooring*. *Seagoing tugboat* memiliki kemampuan untuk memecah ombak dikarenakan memiliki bentuk *fore*. Selain itu, *seagoing tugboat* memiliki ukuran kapal yang besar dengan tenaga yang lebih besar juga dibandingkan kapal *tugboat* dengan daerah operasi lainnya.

Pada dasarnya, mesin yang digunakan pada *tugboat* adalah mesin berbahan bakar diesel yang terdapat di lokomotif kereta api, bedanya pada mesin lokomotif kereta api menggerakkan roda, mesin pada tug boat menggerakkan propeller.

Kebanyakan *tugboat* menggunakan 2 mesin induk, untuk menghasilkan tenaga yang berlipat ganda. Mesin penggerak *tugboat* dapat menghasilkan 500 – 2.500 kW (680 – 3400 hp), setara dengan kekuatan sebuah lokomotif kereta api. Tetapi jenis *Seagoing tugboat* dapat menghasilkan tenaga 20.000 kW (27.200 hp). Setara dengan 8 lokomotif kereta api. Untuk kapal seukurannya, tug boat memiliki tenaga yang sangat besar. Hal ini disebabkan karena *tugboat* memang diperuntukkan untuk menggerakkan kapal-kapal yang ukurannya ratusan kali ukuran dirinya sendiri.



Gambar 2. 1 *Seagoing tugboat* (marinetraffic.com)

2.2.2. Floating Storage and Offloading System (FSO)

Floating Storage and Offloading (FSO), merupakan wahana penyimpanan sementara minyak mentah atau gas. *Crude oil* pada FPS atau FPU di daerah lokasi ditransfer menuju FSO melalui sistem *submerged turret loading* (STL), kemudian di *export / offload* ke *shuttle tanker* melalui *flexible hoses* pada bagian belakang. FSO umumnya dibuat baru namun FSO memungkinkan berasal dari konversi kapal *tanker* yang besar atau dikenal sebagai *supertanker*. Ciri utama dari FSO memiliki lambung/tempat penyimpanan yang sangat besar. Hal yang membedakan FSO dengan kapal *tanker* adalah sistem operasinya dimana FSO tidak berlayar seperti *tanker* melainkan keadaannya tertambat.

Wahana apung ini digunakan dilokasi lepas pantai dan disertai dengan fasilitas *offloading*. Berbeda dengan *floating production, storage and offloading* (FPSO), FSO tidak memiliki unit pengolahan minyak dan hanya berfokus pada penyimpanan, penampungan, dan penyaluran kembali sehingga FSO tidak membutuhkan konstruksi yang kuat dibandingkan dengan FPSO. FSO tidak memiliki fasilitas akomodasi yang besar, dikarenakan fungsinya yang cenderung tidak membutuhkan awak yang banyak untuk pengoperasiannya.



Gambar 2. 2 *Floating Storage and Offloading System* (FSO)
(PT. PHE ONWJ, 2004)

Pada dasarnya setiap struktur terapung yang berada di laut akan mengalami gerakan osilasi. Gerakan osilasi merupakan gerak bolak balik benda di sekitar suatu

titik setimbang dengan lintasan yang sama secara periodik (berulang dalam rentang waktu yang sama). Namun pada gerakan osilasi kapal hanya terdapat 3 gerakan yang memiliki gerakan osilasi murni yaitu *heave*, *roll*, dan *pitch*. Ketiga gerakan tersebut bekerja di bawah gaya atau momen pengembali ketika struktur itu terganggu dari posisi kesetimbangannya.

Gerakan osilasi kapal berjumlah 6 gerakan yang dapat dibedakan menjadi 2 macam yaitu gerakan translasional dan gerakan rotasional. Macam gerakan itu meliputi:

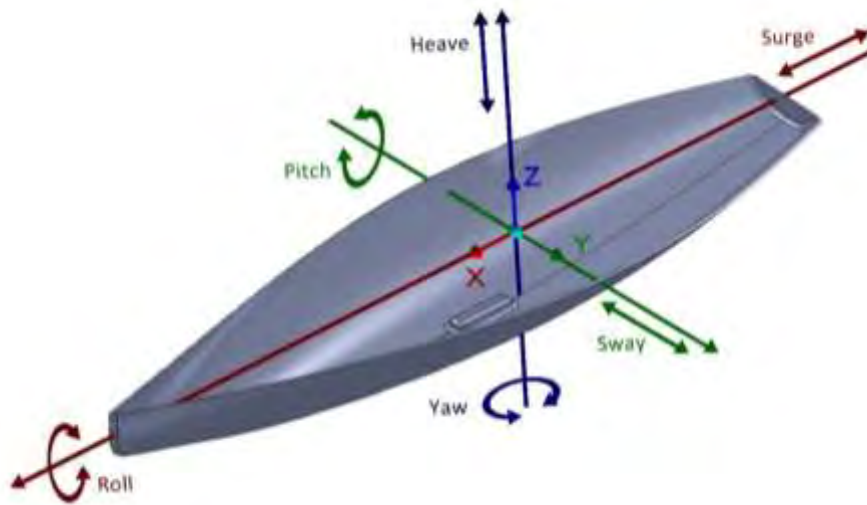
Moda Gerak Translasional

1. *Surge* : gerakan osilasi translasional terhadap sumbu longitudinal (sumbu x).
2. *Sway* : gerakan osilasi translasional terhadap sumbu transversal (sumbu y).
3. *Heave* : gerakan osilasi translasional terhadap sumbu vertical (sumbu z).

Moda Gerak Rotasional

1. *Roll* : gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu longitudinal (sumbu x).
2. *Pitch* : gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu transversal (sumbu y).
3. *Yaw* : gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu vertical (sumbu z).

Moda gerakan tersebut dapat dilihat pada gambar 2.3 Dengan memakai konversi sumbu tangan kanan tiga gerakan translasi pada arah sumbu x, y dan z, adalah masing-masing *surge* (x), *sway* (y) dan *heave* (z), sedangkan untuk gerakan rotasi terhadap ketiga sumbu adalah *roll* (Φ), *pitch* (θ) dan *yaw* (φ).



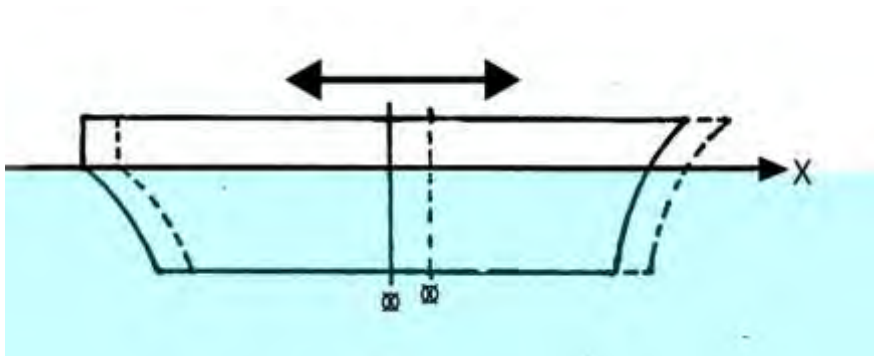
Gambar 2. 3 Enam derajat kebebasan pada struktur bangunan apung
(sumber: Dokumentasi Pribadi)

Surge adalah gerakan osilasi translasi pada kapal yang bekerja pada sumbu x sebagai pusat gerak. Persamaan untuk gerak *surge* adalah :

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_{0x}\cos\omega_e t \quad (2.1)$$

Dimana :

- $a\ddot{x}$: *Surge inertial force* (N)
- $b\dot{x}$: *Surge damping force* (N)
- cx : *Surge restoring force* (N)
- F_{0x} : *Amplitude surge exciting force* (N)
- ω_e : *Encountering frequency* (rad/s)
- t : waktu (s)



Gambar 2. 4 Ilustrasi Gerakan Surge (Murtedjo, 1990)

2.2.3. Gerakan *Sway* Murni

Sway adalah gerakan osilasi translasi pada kapal yang bekerja pada sumbu *y* (melintang) sebagai pusat gerak. Persamaan untuk gerak *sway* adalah

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_{oy}\cos\omega_e t \quad (2.2)$$

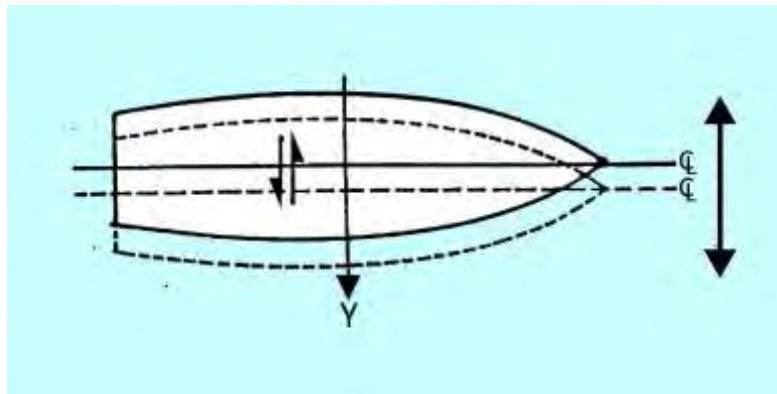
Dimana :

$a\ddot{y}$: *Sway inertial force* (N)

$b\dot{y}$: *Sway damping force* (N)

cy : *Sway restoring force* (N)

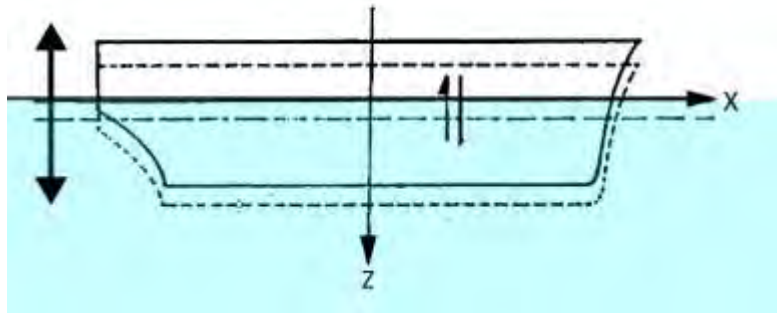
F_{oy} : *Amplitude sway exciting force* (N)



Gambar 2. 5 Ilustrasi Gerakan *Sway* (Murtedjo, 1990)

2.2.4. Gerakan *Heave* Murni

Heave adalah gerakan osilasi translasi pada kapal yang bekerja pada sumbu *z* (vertikal) sebagai pusat gerak. Gerakan *heave* membuat kapal tercelup ke air lebih dalam dan kembali ke awal hingga memperoleh kesetimbangan kapal. Hal ini diakibatkan oleh gaya ke bawah yang berasal dari berat kapal. Ketika gaya *bouyancy* lebih besar saat kapal tercelup, kapal akan bergerak ke atas secara vertikal, dan ketika berada di posisi setimbang kapal akan tetap naik dikarenakan adanya pengaruh dari momentum. Ilustrasi gerakan *heave* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Ilustrasi Gerakan Heave (Murtedjo, 1990)

Kejadian tersebut terjadi berulang-ulang. Maka, dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi *heave* adalah:

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_{oz}\cos\omega_e t \quad (2.3)$$

Pada persamaan tersebut, terdapat empat elemen utama dalam gerakan *heave*, antara lain:

- *Inertial Force* ($Fa = a\ddot{z}$)

Inertial Force merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang memiliki gaya lebih besar dari massa percepatan waktu kapal. (Bhatacarya, 1977)

$$a \frac{d^2z}{dt^2} = M \frac{d^2z}{dt^2} + a_z \frac{d^2z}{dt^2} \quad (2.4)$$

Dengan :

M : massa tambah kapal

a_z : massa tambah akibat gerakan *heave*

- *Damping Force* ($Fb = b\dot{z}$)

Damping Force akan selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal sehingga menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitudo gerakan.

$$Fb = b \frac{dz}{dt} \quad (2.5)$$

Pada persamaan diatas b merupakan koefisien pada gaya *damping* pada kondisi *heave*. Koefisien redaman tersebut akan bergantung pada faktor-faktor sebagai berikut:

- Tipe dari gerakan osilasi
- Frekuensi *encountering*

c. Bentuk struktur terapung

- *Restoring Force* ($F_c = cz$)

Restoring Force pada gerakan *heave* diberikan sebagai tambahan pada gaya angkat kapal ketika dibawah permukaan air. Oleh karena itu, gaya pengembali diberikan sebagai jumlah *displacement* air, atau berat tamabahn spesifik pada volume tercelup.

$$C_z = \rho g A_{wp} Z = \rho g L B C_{wp} Z \quad (2.6)$$

Dimana :

A_{wp} : Luas bidang garis air (m^2)

Z : Simpangan gerak *heave*

C_{wp} : Koefisien luas bidang garis air

P : Massa jenis air laut ($1.025 \text{ ton}/m^3$)

g : Kecepatan gravitasi (m/s^2)

- *Exciting Force* ($F = F_o \cos \omega_e t$)

Exciting Force pada gerak *heave* adalah pengintegrasian dari penambahan gaya angkat dikarenakan gelombang yang melewati sepanjang kapal. Sehingga dapat dituli persamaan sebagai berikut:

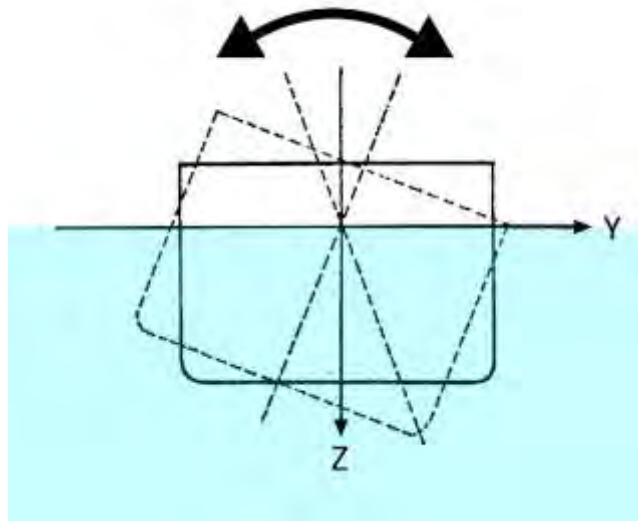
$$F = F_{oz} \cos \omega_e t \quad (2.7)$$

Dimana :

F_{oz} : *Amplitude heave exciting force* (N)

2.2.5. Gerakan *Roll* Murni

Roll adalah gerakan osilasi rotasional pada kapal yang bekerja dengan sumbu x sebagai pusat geraknya. Ilustrasi gerakan roll dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Ilustrasi Gerakan *Roll* (Murtedjo, 1990)

Rumus umum dari persamaan gerak akibat *rolling* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_{o\phi}\cos\omega_e t \quad (2.8)$$

Dimana :

- $a\ddot{\phi}$: *Roll inertial moment* (N/m)
- $b\dot{\phi}$: *Roll damping moment* (N/m)
- $c\phi$: *Roll restoring moment* (N/m)
- $M_{o\phi}$: *Amplitude roll exciting Moment* (N/m)

2.2.6. Gerakan *Pitch* Murni

Pitch adalah gerakan osilasi rotasional pada kapal yang bekerja dengan sumbu y sebagai pusat geraknya. Berbeda dengan *heave*, gerakan yang ditimbulkan akibat *pitch* adalah gerak rotasional yang menimbulkan momen. Gerak *pitch* juga berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, oleh karena itu momen yang terjadi akibat *pitch* perlu diperhitungkan. Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_{o\theta}\cos\omega_e t \quad (2.9)$$

Dimana :

- $a\ddot{\theta}$: *Pitch inertial Moment* (N/m)
- $b\dot{\theta}$: *Pitch damping Moment* (N/m)

$c\theta$: *Pitch restoring Moment* (N/m)

$M_{o\theta}$: *Amplitude pitch exciting Moment* (N/m)

Pada persamaan tersebut, terdapat empat elemen utama dalam gerakan *heave*, antara lain:

- *Inertial Moment* ($a \frac{d^2\theta}{dt^2}$)

Konstanta a adalah massa virtual dari momen *inertia* dan $d \frac{d^2\theta}{dt^2}$ merupakan percepatan sudut yang ditimbulkan dari gerakan *pitch*. Massa dari momen *inertia* kondisi *pitch* adalah momen *inertia* kapal ditambah dengan massa tambah momen *inertia* dari gerak *pitch*.

$$d = I_{yy} + \delta I_{yy}$$

$$d = \frac{\Delta}{g} K_{yy}^2 + \delta I_{yy} \quad (2.10)$$

Dimana :

δI_{yy} : Massa tambah momen *inertia* dari kapal untuk gerak *pitch*

K_{yy}^2 : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi gerak *pitch*

I_{yy} : Momen inersia massa struktur

Diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi vertikal tidak begitu berpengaruh. Titik CG (pusat gravitasi) dari kapal diasumsikan berada di tengah struktur yaitu pada *midship* (Bhattacharya, 1977). Secara pendekatan, jari-jari girasi gerakan *pitch* adalah:

$$K_{yy} = 0.24L \text{ to } 0.26 L \quad (2.11)$$

- *Damping Moment* ($b \frac{d\theta}{dt}$)

Koefisien redaman pada gerakan *pitch* dapat dihitung dengan melakukan pendekatan *trip theory* yang ditentukan oleh setiap station dan diintegrasikan sebanyak station yang ada di sepanjang struktur.

- *Restoring Moment* ($c\theta$)

Perhitungan untuk *Restoring Moment* pada gerakan *pitch* dapat dihitung dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 h\theta &= \rho g \theta \int_{-L/2}^{L/2} x^2 y(x) dx \\
 &= \rho g \theta I_y
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

Dimana :

- h : Koefisien *restoring moment*
- I_y : Momen inersia dari beban *water plan area*
- ρ : Massa jenis air laut (1.025 *ton/m³*)
- g : Kecepatan gravitasi (*m/s²*)
- ∇ : Volume *displacement*
- Δ : *Displacement*
- \overline{MB}_l : Jari-jari metacenter memanjang
- \overline{MG}_l : Tinggi metacenter memanjang

Dikarenakan

$$\overline{MB}_l \cong \frac{I_y}{\nabla}$$

$$\Delta = \rho g \nabla$$

Sehingga,

$$\begin{aligned}
 h\theta &= \rho g \overline{MB}_l \nabla \theta \\
 &= \rho g \overline{MG}_l \nabla \theta \\
 &= \Delta \overline{MG}_l \theta
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

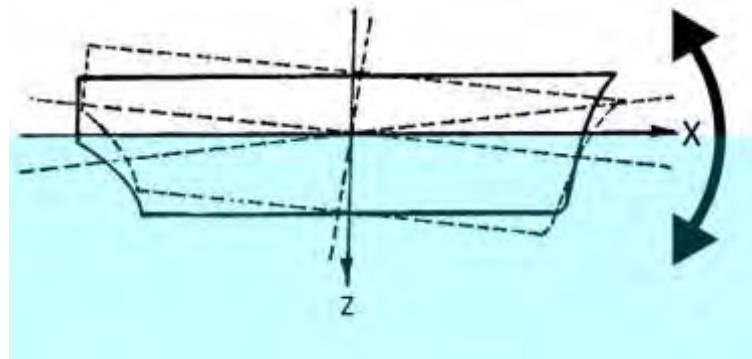
- *Exciting Force* ($F = M_{o\theta} \cos \omega_e t$)

Exciting Force pada gerak *pitch* diakibatkan oleh tidak seimbangnya moemnn akibat gelombang dari sudut melintang kapal. Sehingga, momen dalam gerak *pitch* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$M_\theta = M_{o\theta} \cos \omega_e t \tag{2.14}$$

Dimana :

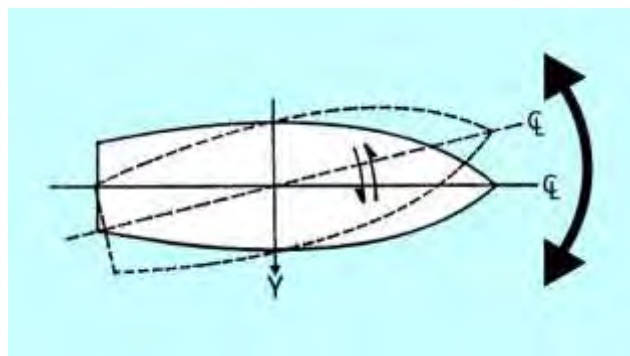
- $M_{o\theta}$: *Amplitude pitch exciting moment* (N/m)



Gambar 2. 8 Ilustrasi Gerakan *Pitch* (Murtedjo, 1990)

2.2.7. Gerakan *Yaw* Murni

Gerak *yaw* adalah gerakan osilasi rotational pada kapal yang bekerja pada sumbu z sebagai pusat gerak. gerak *yaw* juga berpengaruh pada kesetimbangan posisi kapal seperti gerak gerak lainnya.



Gambar 2. 9 Ilustrasi Gerakan *Yaw* (Murtedjo, 1990)

Persamaan gerak kapal untuk *yaw* adalah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_{o\phi} \cos \omega_e t \quad (2.15)$$

Dimana :

- $a\ddot{\phi}$: *Yaw inertial moment* (N/m)
- $b\dot{\phi}$: *Yaw damping moment* (N/m)
- $c\phi$: *Yaw restoring moment* (N/m)
- $M_{o\phi}$: *Amplitude yaw exciting Moment* (N/m)

2.2.8. Gerakan Struktur Terapung dalam 6 Derajat Kebebasan

Karena bangunan apung yang ditinjau terdiri dari enam mode gerakan bebas (*six degree of freedom*), dengan asumsi bahwa gerakan-gerakan osilasi tersebut adalah linier dan harmonik, maka persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\xi}_k + B_{jk}\dot{\xi}_k + C_{jk}\xi_k] = F_j e^{i\omega t}, j = 1 \quad (2.16)$$

Dimana :

- M_{jk} : Komponen matriks massa kapal
- A_{jk}, B_{jk} : Matriks koefisien massa tambah dan redaman
- C_{jk} : Koefisien-koefisien gaya hidrostatis pengembali
- F_j : Amplitudo gaya eksitasi dalam besaran kompleks
- F_1 : Amplitudo gaya-gaya eksitasi yang *mengakibatkan surge*
- F_2 : Amplitudo gaya-gaya eksitasi yang *mengakibatkan sway*
- F_3 : Amplitudo gaya-gaya eksitasi yang *mengakibatkan heave*
- F_4 : Amplitudo momen eksitasi untuk *roll*
- F_5 : Amplitudo momen eksitasi untuk *pitch*
- F_6 : Amplitudo momen eksitasi untuk *yaw*

Persamaan di atas menunjukkan hubungan antara gaya aksi dan reaksi. Gaya aksi direpresentasikan oleh variabel pada ruas kanan, yang merupakan eksitasi gelombang terhadap bangunan apung. Gaya reaksi ditunjukkan oleh variabel kiri pada persamaan, yang terdiri dari gaya inersia, gaya redaman dan gaya pengembali, yang masing-masing berkorelasi dengan percepatan gerak, kecepatan gerak dan simpangan atau displasemen gerakan (Djarmiko, 2012)

2.2.9. Gerakan Coupled Heave dan Pitch.

Metode *strip* digunakan pada perhitungan amplitude gerakan kapal yang diakibatkan *coupled heave* dan *pitch*, dimana struktur dibagi secara transversal menjadi beberapa bagian. Pada Hukum Newton II disebutkan bahwa gaya yang bekerja pada sebuah benda (*strip*) sama dengan perkalian antara massa benda terhadap percepatannya. Persamaan untuk *heave* adalah :

$$m \cdot \ddot{Z} = \Sigma F \quad (2.17)$$

Dan persamaan *pitch* adalah :

$$I \cdot \ddot{\theta} = \Sigma M \quad (2.18)$$

Dimana :

ΣF : Total gaya yang bekerja pada strip akibat gerak relatif terhadap gelombang

ΣM : Total moment gaya yang bekerja pada strip akibat gerak relatif terhadap gelombang

\ddot{Z} : Percepatan *heave*

$\ddot{\theta}$: Percepatan *pitch*

Dikarenakan suatu benda bergerak relatif terhadap fluida, maka benda tersebut akan menerima massa tambah yang dapat ditulis menjadi :

$$\Sigma F = (m + a_z) \ddot{z} \quad (2.19)$$

Dimana :

m : massa dari kapal

a : massa tambah pada gerakan *heave*

Ketika benda bergerak di dalam fluida, benda akan mengalami gaya reaksi yang diakibatkan oleh tekanan hidrodinamika yang disebut dengan gaya redaman. Sehingga dapat dirumuskan :

$$c_z = (m + a_z) \ddot{z} + b \dot{z} \quad (2.20)$$

Konstanta b merupakan koefisien gaya redam sedangkan konstanta c merupakan koefisien dari gaya pengembali. Jika diasumsikan *displacement* ke bawah bernilai positif dan kecepatan serta percepatan keatas bernilai negatif, maka persamaan menjadi:

$$c_z = (m + a_z)(-\ddot{z}) + b(-\dot{z}) \quad (2.21)$$

Dikarenakan nilai $= \frac{\Delta}{g}$, maka persamaan sebelumnya menjadi

$$c_z = \left(\frac{\Delta}{g} + a_z\right)(-\ddot{z}) + b(-\dot{z}) \quad (2.22)$$

Dan dapat ditulis menjadi :

$$\left(\frac{\Delta}{g} + a_z\right) \ddot{z} + b \dot{z} + c_z = 0 \quad (2.23)$$

Jika *strip* mendapatkan beban gelombang dengan amplitudo ζa maka akan terjadi perubahan gaya inersia yang disebabkan oleh perbedaan pada *water level* (sarat air). Fluktuasi pada sarat air yang terus menerus terjadi akan menimbulkan

exciting force yang bernilai sama dengan jumlah dari percepatan vertikal absolut, kecepatan, dan posisi permukaan air. Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$m\ddot{z} = F = ma_z(-\ddot{z} + \ddot{\xi}) + b(-\dot{z} + \dot{\xi}) + c(-z + \xi) \quad (2.24.1)$$

Atau

$$m\ddot{z} + a_z(\ddot{z} - \ddot{\xi}) + b(\dot{z} - \dot{\xi}) + c(z - \xi) = 0 \quad (2.24.2)$$

$$(m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = a_z\ddot{\xi} + b\dot{\xi} + c\xi \quad (2.24.3)$$

Dimana :

$\ddot{\xi}$: percepatan vertikal dari permukaan air.

$\dot{\xi}$: kecepatan vertikal dari permukaan air

ξ : posisi vertikal dari permukaan air

Ruas kanan pada persamaan diatas adalah *exciting force*. Dalam mempertimbangkan gerakan kapal pada gelombang, salah satu yang perlu digambarkan yaitu relatif motion antara kapal dengan gelombang. Posisi vertikal absolut pada setiap titik di sepanjang *strip* dinyatakan dengan $z - \xi\theta$. Sehingga, posisi vertikal relatif strip terhadap gelombang dirumuskan sebagai berikut :

$$z_r = z - \xi\theta - \xi \quad (2.25)$$

Persamaan diatas bisa digunakan untuk mencari kecepatan vertikal relatif dengan menurunkan terhadap waktu menjadi sebagai berikut :

$$\dot{w}_r = \dot{z}_r = \dot{z} - (\xi\dot{\theta} + \theta\dot{\xi}) - \dot{\xi} \quad (2.26)$$

Ketika kapal bergerak ke depan sepanjang air, kapal akan memiliki kecepatan u ,

$$\frac{d\xi}{dt} = \dot{\xi} = -u \quad (2.27)$$

Sehingga percepatan relatifnya menjadi :

$$\begin{aligned} \ddot{w}_r &= \ddot{z} - \xi\ddot{\theta} - \dot{\theta}(-u) + u\dot{\theta} - \ddot{\xi} \\ &= \ddot{z} - \xi\ddot{\theta} + 2u\dot{\theta} - \ddot{\xi} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Persamaan di atas akan dipengaruhi gaya geser pada tiap-tiap *strip*. Nilai gaya geser

$\left(\frac{df_n}{d\xi}\right)$ dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\delta f_n}{\delta \xi} = -m_n\ddot{z}_n - (a_n\dot{w}_r + b_n\dot{w}_r) - c_n z_r \quad (2.29)$$

Dimana :

$m_n\ddot{z}_n$: Gaya inersia yang diperlukan untuk menggerakkan massa strip

$a_n\dot{w}_r$: Gaya hidrodinamik yang diperlukan untuk menggerakkan madat tambah

$b_n \dot{w}_r$: Gaya redaman hydrodinamik akibat kecepatan relatif

$c_n z_r$: Gaya hidrostatik akibat perubahan posisi relatif

Pada persamaan diatas, a_n , b_n , dan c_n dihitung pada tiap-tiap bagian station. Dikarenakan nilai a_n , b_n , dan c_n merupakan fungsi dari bentuk badan kapal. Nilai a_n berubah pada tiap bagian terhadap waktu sedangkan dengan gelombang linear akan menghasilkan bentuk *strip* yang akan mendekati *waterline*, maka turunan $\frac{d(a_n w_r)}{dt}$ harus diperhatikan untuk mendapatkan $a_n w_r$ sehingga:

$$\begin{aligned} \frac{d(a_n w_r)}{dt} &= w_r \frac{da_n}{dt} + a_n \frac{dw_r}{dt} \\ &= w_r \frac{da_n}{dt} + a_n \dot{w}_r \end{aligned} \quad (2.30)$$

Dengan melakukan substitusi pada persamaan dengan persamaan $\frac{\delta f_n}{\delta \xi}$, maka didapatkan persamaan baru sebagai berikut :

$$\frac{\delta f_n}{\delta \xi} = -m_n \ddot{z}_n - a_n \dot{w}_r - (b_n + \frac{da_n}{dt}) \dot{w}_r - c_n z_r \quad (2.31)$$

Untuk menentukan total semua gaya *strip*, persamaan $\frac{\delta f_n}{\delta t}$ diatas harus diintegrasikan terhadap x guna mendapat total semua gaya *strip*. Maka :

$$\frac{\delta f_n}{\delta t} dx = 0 \quad (2.32)$$

Selain itu, *displacement horizontal* yang terjadi adalah :

$$x = \xi + ut$$

Dimana :

ut : displacement antara sumbu utama dengan titik pangkal benda untuk waktu tertentu

ξ : jarak dari origin kapal ke titik dari persamaan yang ditinjau

Pada waktu tertentu, nilai ut akan bernilai konstan sehingga :

$$dx = d\xi + d(ut) = d\xi \quad (2.33)$$

Sehingga, penjumlahan gaya menjadi :

$$\int \frac{df_n}{d\xi} d\xi = 0$$

Atau dengan melakukan integral pada persamaan $\frac{\delta f_n}{\delta t}$ menjadi :

$$-\int \frac{\delta f_n}{\delta \xi} d\xi = \int m_n \ddot{z}_n d\xi + \int a_n \dot{w}_r d\xi +$$

$$\left(\int b_n w_r d\xi - u \int \frac{da_n}{dt} w_r d\xi \right) + \int c_n z_n d\xi \quad (2.34)$$

Dimana :

$$\ddot{z} = \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} \quad (2.35)$$

Dikarenakan adanya efek tekanan air dinamis diatas puncak gelombang berkurang secara eksponensial menurut kedalaman. Efek penurunan tersebut akan mempengaruhi posisi vertikal relatif sehingga :

$$z_r = z - \xi \theta - \xi e^{-kz} \quad (2.36)$$

Dimana :

e^{-kz} : Faktor penurunan tekanan.

Dengan memperhatikan faktor penurunan tekanan maka dapat diperoleh persamaan untuk kecepatan relatif dan percepatan relatif sebagai berikut :

$$w_r = \frac{dz_r}{dt} = \dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta - \xi^{-kz} \quad (2.37)$$

$$\dot{w}_r = \frac{dw_r}{dt} = \ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + u\dot{\theta} - \xi^{-kz} \quad (2.38)$$

Untuk penyederhanaan, suku-suku pada gerakan absolut kapal ($z, \dot{z}, \ddot{z}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$) dipisahkan dari suku-suku gerakan gelombang ($\xi, \dot{\xi}, \ddot{\xi}$). Ruas kiri merupakan persamaan yang dinyatakan sebagai respon natural pada *displacement* awal dalam *still water* sedangkan ruas kanan dinyatakan sebagai kondisi gelombang yang disebut dengan *force function*. Dengan melakukan substitusi pada persamaan $\frac{dw_r}{dt}, \frac{dz_r}{dt}, z_r$, dan \ddot{z} diperoleh :

$$\int m_n (\ddot{z} - \xi \ddot{\theta}) d\xi + \int a_n (\ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + 2u\dot{\theta} - \xi e^{-kz}) d\xi + \left(\int b_n (\dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta - \xi e^{-kz}) d\xi \right) - \left(\int \frac{dq}{d\xi} (\dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta - \xi e^{-kz}) \int c_n (z - \xi \theta - \xi e^{-kz}) d\xi \right) = 0 \quad (2.39)$$

Dilakukan penyusunan kembali dengan mengelompokkan persamaan sisi kiri dan sisi kanan, sehingga menghasilkan :

$$\begin{aligned} m_n (\ddot{z} - \xi \ddot{\theta}) + a_n (\ddot{z} - \xi \ddot{\theta} + 2u\dot{\theta}) + \frac{dq}{d\xi} (\dot{z} - \xi \dot{\theta} + u\theta) + c_n (z - \xi \theta) \\ = \ddot{\xi}^{-kz} a_n - \dot{\xi} e^{-kz} b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \xi e^{-kz} + \xi e^{-kz} c_n \end{aligned} \quad (2.40)$$

Pada persamaan diatas, ruas kanan menyatakan *exciting force* untuk masing-masing strip yang disebabkan oleh gelombang $\frac{df}{dx}$. Dengan mengasumsikan terjadinya gelombang reguler dan harmonik maka :

$$\xi = \xi \text{ asink } (x - v_w t) \quad (2.41)$$

Dengan mengombinasikan persamaan $x = \xi + ut$ dengan persamaan diatas didapatkan:

$$\xi = \xi a \sin k (\xi + (u - v_w)t) \quad (2.42)$$

Karena $-k(u - v_w) = \omega e$ dan ωe merupakan frekuensi *encounter*, maka kecepatan dan percepatan elevasi dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\xi = \xi \text{ asink } (k\xi - \omega e t) \quad (2.43)$$

$$\dot{\xi} = \xi \text{ asink } (k\xi - \omega e t) \quad (2.44)$$

$$\ddot{\xi} = \xi \text{ asink } (k\xi - \omega e t) \quad (2.45)$$

Sehingga didapatkan persamaan dasar gerakan kopel *heave* dan *pitch* yaitu :

$$(m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} + cz + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + h\theta = F(t) \quad (2.46)$$

Dimana :

$$m = \int m_n d\xi$$

$$a_z = \int a_n d\xi$$

$$b = \int b_n d\xi$$

Hal ini dikarenakan asumsi bahwa $u \int (da_n/d\xi) d\xi = 0$ maka :

$$c = \int c_n d\xi$$

Dapat dinyatakan juga sebagai $\rho g \int B_n d\xi$, dimana B_n adalah *breadth* pada masing-masing seksi.

$$d = - \int a_n \xi d\xi$$

Dengan momen massa total di dekat CG harus bernilai 0 ($\int M_n \xi d\xi = 0$)

$$\begin{aligned} e &= - \int b_n \xi d\xi + 2u \int a_n d\xi + u \int (da_n/d\xi) \xi d\xi \\ &= - \int b_n \xi d\xi + ua_z \end{aligned} \quad (2.47)$$

Dengan :

$$\int \xi (da_n/d\xi) d\xi = \int \xi d a_n = -a_z$$

Maka :

$$h = - \int c_n \xi d\xi + u \int b_n d\xi = - \int c_n \xi d\xi + ub$$

Karena :

$$u^2 \int \left(\frac{da_n}{d\xi} \right) d\xi = 0$$

dan

$$\begin{aligned} F(t) &= \int \left(\frac{dF}{dx} \right) dx \\ &= \zeta_a e^{-kz} \int (-\omega_e^2 + c_n) x \sin(k\xi - \omega_e t) d\xi \\ &\quad - \zeta_a e^{-kz} \omega_e \int \left(b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \right) \cos(k\xi - \omega_e t) d\xi \end{aligned}$$

Exciting force (f) merupakan sinusoidal natural dan secara umum dinyatakan sebagai berikut:

$$F_0 = F_1 \cos \omega_e t + F_2 \sin \omega_e t = F_0 \cos(\omega_e t + \sigma) \quad (2.48)$$

F_0 merupakan amplitudo *exciting force* yang dinyatakan sebagai berikut ini:

$$F_0 = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

Seangkan σ merupakan sudut fase antara gaya eksitasi relatif terhadap gerakan gelombang.

$$\sigma = -\tan^{-1} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)$$

F_0 dan σ diperoleh berdasarkan penyelesaian *forcing force*, F_1 dan F_2 didapat dengan persamaan:

$$F_1 = \int \left(\frac{dF_1}{dx} \right) dx$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \frac{dF_1}{dx} &= \zeta_a e^{-kz} (-\omega_e^2 a_n + c_n) \sin k\xi - \zeta_a e^{-kz} \omega_e \\ &\quad \left(b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \right) \cos k\xi \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \frac{dF_2}{dx} &= \zeta_a e^{-kz} (-\omega_e^2 a_n + c_n) \cos k\xi - \zeta_a e^{-kz} \omega_e \\ &\quad \left(b_n - u \frac{da_n}{d\xi} \right) \sin k\xi \end{aligned} \quad (2.50)$$

Persamaan $(m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} + cz + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + h\theta = F(t)$ merupakan persamaan gerak pertama yang sudah dijelaskan sebelumnya yang dipengaruhi oleh semua gaya. Maka, pada persamaan kedua ini merupakan gerakan angular yang berlawanan dengan persamaan pertama yang dituliskan sebagai berikut :

$$(I_{yy} + A_{yy})\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{z} + E\dot{z} + Hz = M(t) \quad (2.51)$$

Dimana :

$$A_{yy} \quad : \text{massa tambah moment inersia} \quad : \int a_n \xi^2 d\xi$$

$$B \quad : \text{moment perendam} \quad : \int b_n \xi^2 d\xi \text{ karena}$$

$$2u \int a_n \xi d\xi = -u \int \frac{da_n}{d\xi} \xi^2 d\xi$$

$$C \quad : \text{moment pengembali} \quad : \int c_n \xi^2 d\xi - uE$$

Sedangkan D, E, dan H merupakan bentuk kopel yang dinyatakan sebagai :

$$D \quad : d$$

$$E \quad : - \int b_n \xi d\xi - uaz$$

$$F \quad : \int c_n \xi d\xi$$

$$M \quad : \text{momen eksitasi} \quad : M_o \cos(\omega e + \tau) = \int \frac{dF}{d\xi} \xi d\xi$$

M_o pada persamaan diatas merupakan amplitudo *exciting moment*

$$M_o = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}$$

Sedangkan τ merupakan selisih fase dari *exciting moment* terhadap gerakan gelombang.

$$\tau = -\tan^{-1}(M_2/M_1)$$

Persamaan untuk M_1 adalah :

$$M_1 = \int \frac{dM_1}{dx} d\xi$$

Dimana,

$$\frac{dM_1}{dx} = \xi \left(\frac{dF_1}{dx} \right)$$

Persamaan untuk M_2 adalah :

$$M_2 = \int \frac{dM_2}{dx} d\xi$$

Dimana,

$$\frac{dM_2}{dx} = \xi \left(\frac{dF_2}{dx} \right)$$

Solusi persamaan gerak termasuk di dalamnya amplitudo dan beda fase, keduanya dapat ditulis dalam bentuk kompleks :

$$\bar{F} = F_o e^{i\sigma} \quad (2.52)$$

$$\bar{M} = M_o e^{i\tau} \quad (2.53)$$

Nilai \bar{F} dan \bar{M} merepresentasikan fungsi gaya dalam bentuk kompleks. Pada persamaan gerak satu dan kedua yang sudah di paparkan sebelumnya terdapat bentuk kompleks untuk persamaan tersebut dibagi menjadi P , Q , R , dan S dimana berasal dari persamaan gerak satu didapat :

$$P = -(m + a_z)\omega^2 + iB\omega + c \quad (2.54)$$

$$Q = -d\omega^2 + ie\omega + h \quad (2.55)$$

Berasal dari persamaan gerak kedua :

$$S = -(I_{yy} + A_{yy})\omega^2 + iB\omega + c \quad (2.56)$$

$$R = -D\omega^2 + iE\omega + H \quad (2.57)$$

Jika dalam persamaan gerak *heave* dan *pitch* \bar{z} merupakan turunan dari z dan $\bar{\theta}$ merupakan turunan dari θ . Maka dapat dituliskan persamaan gerak dalam bentuk umum

$$\text{Persamaan pertama (heave)} : P\bar{z} + Q\bar{\theta} = \bar{F} \quad (2.58)$$

$$\text{Persamaan kedua (pitch)} : R\bar{z} + S\bar{\theta} = \bar{M} \quad (2.59)$$

Nilai \bar{z} dan $\bar{\theta}$ merupakan *complex amplitudes of motion*, memiliki persamaan sebagai berikut :

$$\bar{z} = z_a e^{i\delta}$$

$$\bar{\theta} = \theta_a e^{i\varepsilon}$$

Berdasarkan persamaan e yang sudah di jelaskan sebelumnya kita dapat menyelesaikan persamaan \bar{z} dan $\bar{\theta}$ yaitu sebagai berikut untuk persamaan *heave* :

$$\bar{z} = \frac{\bar{F} - Q\bar{\theta}}{P} \quad (2.60)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{F} - P\bar{z}}{Q} \quad (2.61)$$

Untuk persamaan *pitch* :

$$\bar{z} = \frac{\bar{M} - S\bar{\theta}}{R} \quad (2.62)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{M} - R\bar{z}}{S} \quad (2.63)$$

Dengan persamaan kesebandingan \bar{z} dan $\bar{\theta}$ dapat diperoleh persamaan :

$$\frac{\bar{F} - Q\bar{\theta}}{P} = \frac{\bar{M} - S\bar{\theta}}{R}$$

$$\frac{\bar{F} - P\bar{z}}{Q} = \frac{\bar{M} - R\bar{z}}{S}$$

Penyelesaian untuk persamaan \bar{z} dan $\bar{\theta}$ digunakan untuk memperoleh solusi untuk

heave dan *pitch* yang kompleks yaitu :

$$\bar{z} = \frac{\bar{M}Q - S\bar{F}}{QR - PS} \quad (2.64)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{F}R - \bar{M}P}{QR - PS} \quad (2.65)$$

Diperoleh untuk penyelesaian final mendapatkan amplitudo dan beda fase untuk \bar{z} dan $\bar{\theta}$:

$$\bar{z} = z_a e^{i\delta} = z_a (\cos\delta + i \sin\delta) \quad (2.66)$$

$$\bar{\theta} = \theta_a e^{i\varepsilon} = \theta_a (\cos\varepsilon + i \sin\varepsilon) \quad (2.67)$$

Dimana nilai Z_a adalah amplitudo *heave* dan δ adalah beda fase, sedangkan untuk θ_a dan ε untuk gerakan *pitch*.

2.2.1. Gerak Vertikal Haluan.

Gerakan vertikal di sepanjang bangunan apung pada gelombang reguler merupakan gerakan harmonik. Persamaan gerak vertikal pada *center of gravity* (CG) adalah :

$$Z = Z_a \sin \omega_e t \quad (2.71)$$

Sedangkan persamaan gerak pada setiap titik yang berjarak ξ dari CG :

$$Z_\xi = (Z_\xi)_a \sin \omega_e t \quad (2.72)$$

Jika diasumsikan kapal bergerak pada gelombang reguler, gerakan haluan dinotasikan dengan Z_b akan membuat persamaan diatas menjadi :

$$Z_b = Z + \xi \sin \theta \quad (2.73)$$

$$Z_b = Z + \xi\theta \text{ (untuk harga } \theta \text{ kecil)} \quad (2.74)$$

Bila titik b (*bow*) terletak pada perpotongan antara haluan dan garis air tenang (*waterline*) maka dapat dikatakan tidak ada gerakan haluan dimana harga $Z_b = 0$. Ketika Z_b berada di atas garis air tenang maka $Z_b > 0$. Sedangkan ketika Z_b berada di bawah garis air tenang, harga $Z_b < 0$. Untuk fenomena terjadinya *bow emerge* yaitu dimana haluan terangkat, kejadian tersebut akan terjadi bilamana $Z_b > T$. Sedangkan untuk kejadian *bow submerge* atau haluan terbenam akan terjadi ketika $Z_b < f_b$ (*freeboard*) (Bhattacharya, 1978).

Dalam gelombang reguler, persamaan pada gerak *heave* dan *pitch* dinyatakan dalam bentuk :

$$Z = Z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z) \quad (2.75)$$

$$\theta = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta) \quad (2.76)$$

Dimana :

ε_z : Sudut fase gerakan *heave* terhadap gelombang

ε_θ : Sudut fase gerakan *pitch* terhadap gelombang

Sehingga gerakan haluan Z_b dapat dituiskan menjadi :

$$Z_b = Z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z) + \xi \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta) \quad (2.77)$$

$$Z_b = (Z_b)_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_b) \quad (2.78)$$

Dimana :

Z_b : Gerakan relatif gabungan (m)

$(Z_b)_a$: Amplitudo gerak titik b (m)

ε_b : Sudut fase terkait (rad)

Dimana :

$$(Z_b)_a = \sqrt{Z_a^2 + \xi \theta_a^2 + 2Z_a \xi \theta_a \cos(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)} \quad (2.79)$$

Dan,

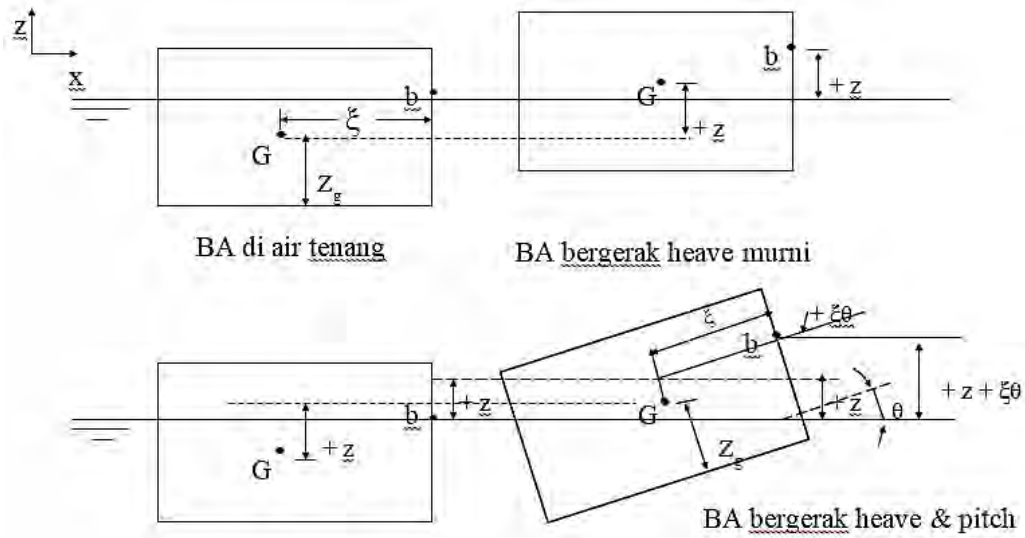
$$\tan \varepsilon_b = \frac{Z_a \sin \varepsilon_z + \xi \theta_a \sin \varepsilon_\theta}{Z_a \cos \varepsilon_z + \xi \theta_a \cos \varepsilon_\theta} \quad (2.80)$$

Kecepatan gerak vertikal (*vertical velocity*) bangunan apung pada gelombang regular bersifat harmonik dan dinyatakan dalam persamaan :

$$\frac{dZ_\xi}{dt} = \omega_e (Z_\xi)_a \cos \omega_e t \quad (2.81)$$

Percepatan gerak vertikal (*vertical acceleration*) bangunan apung pada gelombang regular bersifat harmonik dan dinyatakan dalam persamaan :

$$(\ddot{Z})_a = \omega_e^2 (Z_a) \quad (2.82)$$



Gambar 2. 10 Gerak vertikal struktur terapung (Djatkiko, 2003)

2.2.2. Gerak Relatif Vertikal Haluan

Gerak relatif vertikal haluan merupakan salah satu aspek penilaian pada *seakeeping* dikarenakan dapat berguna dalam memprediksi terjadinya *greenwater* dan *slamming*. Gerakan ini ditentukan dari jarak vertikal antara permukaan gelombang pada satu titik baik pada buritan maupun pada haluan dengan garis air pada area yang sama. Ketika amplitudo dan sudut fase pada gerak *heave* dan *pitch* diketahui hubungannya dengan permukaan gelombang, maka gerak relatif haluan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Z_{br} = Z_b - \zeta_b \quad (2.83)$$

$$Z_{br} = (Z_{br})_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{br}) \quad (2.84)$$

Dimana :

$$(Z_{br})_a = \sqrt{(Z_b)_a^2 + \zeta_a^2 + 2(Z_b)_a \xi \theta_a \cos(k_e \zeta - \varepsilon_b)} \quad (2.85)$$

Dan

$$\tan \varepsilon_{br} = \frac{\zeta_a \sin k_e \xi + \xi \theta_a \sin \varepsilon_b}{\zeta_a \cos k_e \xi + \xi \theta_a \cos \varepsilon_b} \quad (2.86)$$

2.2.3. Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan alat untuk mentransfer beban luar dalam hal ini gelombang dalam rentang frekuensi menjadi bentuk respon yang diterima pada suatu struktur. Sehingga umumnya RAO juga dikenal sebagai

transfer function (Chakrabarty, 1987). Selain itu RAO juga bisa diartikan sebagai hubungan antara amplitudo respon terhadap amplitudo gelombang ($\zeta_{\text{respon}}/\zeta_{\text{gelombang}}$). Amplitudo respon bisa berupa gerakan, tegangan, maupun getaran.

Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan struktur dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan elevasi panjang) (Djtmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sebagai berikut :

$$RAO(\omega) = \left(\frac{\text{Amplitudo Respon Gerakan}}{\text{Amplitudo Gelombang}} \right) = \left(\frac{A(X,Y,Z)(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \right) (m/m) \quad (2.68)$$

dimana :

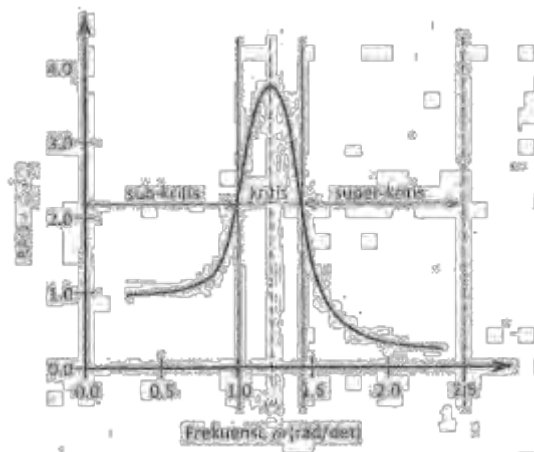
$A(\omega)$: Amplitudo struktur (m)

ζ_0 : Amplitudo gelombang (m)

Sedangkan untuk respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang. (Djtmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\theta(\phi, \theta, \varphi)}{K_w \zeta_0} (rad/m) \quad (2.69)$$

Bentuk Umum grafik respon bangunan apung dapat dilihat dalam gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung
(Djtmiko, 2012)

Mengacu pada Gambar 2.11, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

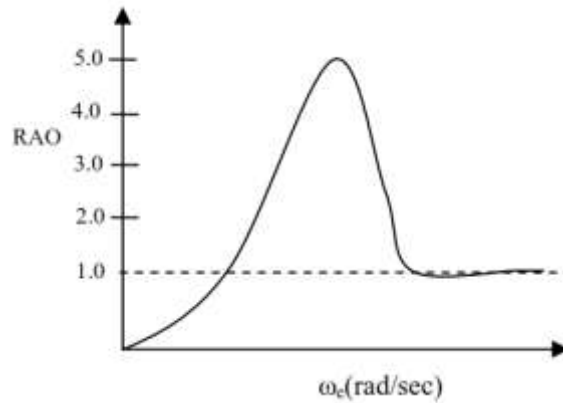
Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau ω^2 kurang dari $k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.

Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.

Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu, gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana ω^2 kurang dari k/a , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djarmiko, 2012).

2.2.4. Karakteristik RAO Gerak Relatif Vertikal Haluan

Grafik RAO gerakan relatif vertikal haluan mempunyai bentuk sebagai berikut :



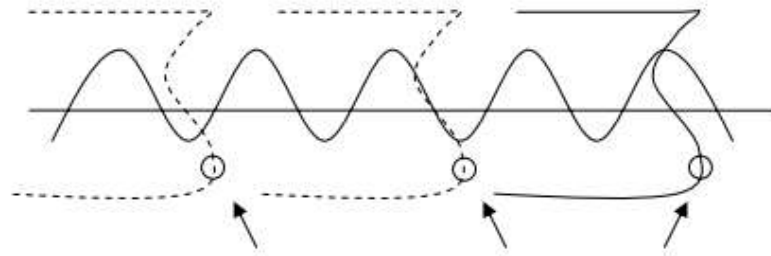
Gambar 2. 12 Pola grafik RAO gerakan relatif vertikal haluan (Ratna, 2008)

Dapat dilihat pada gambar, grafik RAO gerakan relatif vertikal haluan mempunyai pola yang berlawanan dibandingkan dengan grafik RAO gerakan heave. Pada frekuensi rendah RAO-Zbr mempunyai harga mendekati nol, dan naik bersamaan dengan kenaikan frekuensi sampai dengan puncaknya pada frekuensi alami gerakan vertikal, kemudian secara gradual menurun pada frekuensi tertentu (tinggi) dengan harga konstan sekitar 1.0 (unity). Pada frekuensi rendah (gelombang panjang) bangunan apung bergerak mengikuti gerakan gelombang (*conturing*), sehingga gerakan relatif vertikal titik-titik di haluan mempunyai gerakan sangat kecil (bahkan sering tidak bergerak) relatif terhadap permukaan gelombang.



Gambar 2. 13 Struktur pada gelombang panjang (Ratna, 2008)

Sedangkan pada frekuensi tinggi (gelombang pendek) bangunan apung bergerak rata *platforming*. Sehingga gerakan relatif haluan bernilai sama dengan fluktuasi gelombang itu sendiri.



Gambar 2. 14 Struktur pada gelombang pendek (Ratna, 2008)

2.2.1. Spektra Gelombang

Formulasi persamaan umum spektra pada dasarnya dilakukan dengan menurunkan persamaan spektra rata-rata pada perairan tertentu melalui manipulasi matematis yang sesuai. Pada umumnya spektra gelombang untuk bangunan laut harus sesuai dengan spektra gelombang yang dihasilkan dari data gelombang setempat. Apabila spektra gelombang tidak tersedia, maka spektra gelombang disesuaikan dengan spektra gelombang yang tersedia berdasarkan hasil analisa publikasi lain yang menyerupai dengan keadaan lingkungan yang diingkan (perairan terbuka, perairan tertutup, efek angin, geografis, kedalaman perairan, panjang *fetch*, dan lain-lain).

Persamaan spektra gelombang yang direkomendasikan untuk perairan Indonesia adalah Spektra JONSWAP, mengingat spektra JONSWAP umumnya digunakan pada perairan tertutup dan kepulauan yang sesuai dengan perairan Indonesia (Djarmiko, 2012). Dimana persamaan untuk spektra JONSWAP adalah :

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \text{EXP} \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma \text{EXP} \left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right] \quad (2.70)$$

Dimana :

γ : Parameter puncak (*peakedness parameter*)

τ : Parameter bentuk (*shape parameter*)

Harga $\tau = 0.07$ untuk $\omega \leq \omega_0$ dan 0.09 untuk $\omega \geq \omega_0$ sedangkan harga $\gamma = 3.3$ biasanya diterapkan untuk analisis gelombang di laut utara. Untuk perairan Indonesia dilakukan penyesuaian dengan mengambil harga γ yang lebih rendah dengan kisaran antara 2 hingga 2.5

Berdasarkan spektra gelombang yang ditentukan dapat diketahui parameter-parameter gelombang:

Tabel 2. 1 Amplitudo dan tinggi gelombang pada spektrum (Prasiwi, 2014)

Profil Gelombang	Amplitudo	Tinggi
Gelombang rata-rata	$1.25\sqrt{mo}$	$2.5\sqrt{mo}$
Gelombang signifikan	$2.00\sqrt{mo}$	$4.00\sqrt{mo}$
Rata-rata 1/10 gelombang tertinggi	$2.55\sqrt{mo}$	$5.00\sqrt{mo}$
Rata-rata 1/1000 gelombang tertinggi	$3.44\sqrt{mo}$	$6.67\sqrt{mo}$

2.2.2. Respon Spektra

Spektra respon didefinisikan sebagai *density* respon energi dari struktur akibat *input* energi gelombang dan *density* spektrum energi. Pada sistem linear, respon spektra didapat dari hasil kuadrat RAO dikalikan dengan spektrum gelombang, persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut :

$$SR(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.87)$$

Dimana :

- $SR(\omega)$: Respon struktur (ft²-sec)
- $S(\omega)$: Spektrum gelombang (ft²-sec)
- RAO : *Response Amplitude Operator*
- ω : Frekuensi Gelombang (rad/sec)
- ωe : Frekuensi *encountering* (rad/sec)

Untuk perhitungan kecepatan vertikal pada gelombang reguler, ordinat dari kurva RAO untuk kecepatan relatif vertikal dapat ditentukan dari RAO gerak relatif vertikal dengan mengalikan ordinat pada masing-masing frekuensi dengan kuadrat frekuensi.

$$RAO(\text{percepatan}) = RAO(\text{gerak})\omega e^2$$

Kedua RAO merupakan fungsi dari ωe . Sehingga untuk luasan di bawah spektrum kecepatan dapat juga dituliskan dengan :

$$\int \omega_e^2 S_{\xi}(\omega e) d\omega e = m_2 \quad (2.88)$$

Sedangkan untuk menghitung percepatan pada gelombang irregular

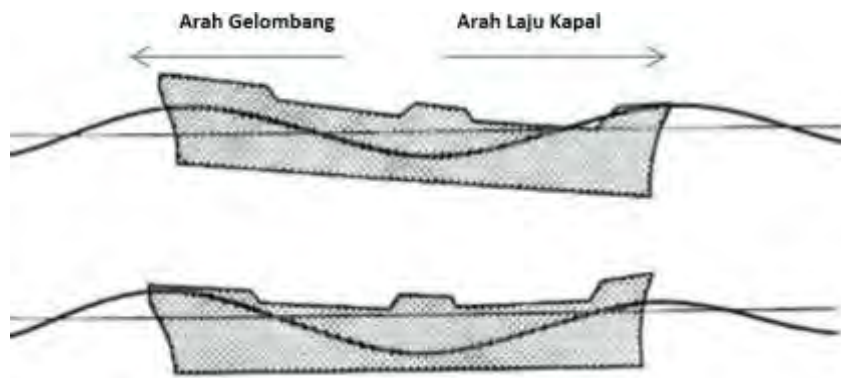
nantinya dapat ditentukan dengan mengalikan ordinat dari RAO gerak dengan pangkat empat dari frekuensi, atau dapat dituliskan menjadi :

$$\int \omega_e^4 S_{\xi}(\omega_e) d\omega_e = m_4 \quad (2.89)$$

Harga m_2 dan harga m_4 merupakan harga yang digunakan dalam mencari peluang terjadinya *greenwater* dan *slamming*.

2.3. Teori Greenwater

Pengertian *greenwater* adalah kondisi melimpahnya air masuk ke dalam *deck* kapal yang biasanya terjadi ketika badai besar atau gelombang tinggi yang menyebabkan gelombang masuk ke dalam geladak haluan. *Greenwater* juga dikenal dengan nama *deckwetness*, dikarenakan ketika terjadinya *greenwater* kondisi haluan akan terbenam dikarenakan adanya gerak relatif haluan yang besar. Posisi relatif kapal saat berada di gelombang menentukan terjadinya *greenwater* pada kapal.



Gambar 2. 15 Pengaruh perbedaan fase antara gelombang dan gerak pada haluan terbenam (Bhattacharya, 1972)

Pada gambar diatas bisa dilihat bahwa kapal bergerak pada gelombang reguler. Kondisi gerakan *pitch* pada kapal yang berukuran sama dan memiliki kondisi lingkungan sama bisa mengalami perbedaan. Hal ini disebabkan oleh adanya hubungan fase antara gerak kapal dan profil pada gelombang. Haluan pada model pertama tidak tenggelam sedangkan pada model kedua mengalami *greenwater* pada bagian geladak.

Dampak dari *greenwater* adalah memberikan beban tambahan bagi *deck* secara tiba-tiba ketika terjadi. Selain itu, menurut Buchner (2003) alasan diperlukannya analisa *greenwater* adalah beban yang diberikan saat *greenwater*

terjadi memungkinkan untuk merusak modul-modul pada struktur yang memiliki banyak modul di bagian *deck* seperti FPSO.

2.3.1. Peluang Kejadian Greenwater

Greenwater dianggap terjadi bilamana tinggi gelombang melampaui tinggi *freeboard*. Maka perlu diperhatikan dan diketahui seberapa besar tinggi gelombang yang dialami nantinya ketika beroperasi. Menurut Djatmiko (1994) harga respon ekstrem, \check{z}_R (dalam m), dapat dihitung memakai persamaan :

$$\check{z}_R = [2 \ln N]^{1/2} \sqrt{M_{OR}} CF$$

Dalam persamaan berikut, nilai N menunjukkan jumlah siklus gelombang acak ketika kapal beroperasi. Distribusi amplitudo kapal yang memiliki kecenderungan didekati dengan distribusi *rayleigh* dapat diperkirakan harga untuk N dengan mempertimbangkan momen spektra respon dan jangka waktu terjadinya gelombang T (jam), sebagai berikut :

$$N = \frac{60^2 T}{2\pi} \sqrt{\frac{m^{2R}}{m^{0R}}} \quad (2.91)$$

Nilai pada variabel m^{2R} dan m^{0R} merupakan luasan dan momen kedua dari luasan di bawah dari spektra respon. Yang dapat dihitung dengan persamaan :

$$m^{0R} = \int_0^\infty S_R(\omega e) d\omega e \quad (2.92)$$

$$m^{2R} = \int_0^\infty \omega e^2 S_R(\omega e) d\omega e \quad (2.93)$$

Nilai CF pada persamaan \check{z}_R menunjukkan koreksi karakteristik lebar spektrum atau *spectral bandwidthness*, yang dapat diperoleh melalui persamaan :

$$CF = \sqrt{1 - \varepsilon^2} = \sqrt{1 - \frac{m_{0R}m_{4R} - m_{2R}^2}{m_{0R}m_{4R}}} \quad (2.94)$$

Nilai m_{4R} pada perhitungan diatas merupakan momen keempat pada luasan dibawah spektra respon dengan persamaan sebagai berikut :

$$m^{4R} = \int_0^\infty \omega e^4 S_R(\omega e) d\omega e \quad (2.95)$$

Jika tinggi *freeboard* efektif didefinisikan sebagai $f^1(1)$, yakni tinggi *freeboard* pada lokasi tertentu sepanjang kapal, maka *greenwater* akan terjadi bila tinggi gelombang ekstrem $\check{z}_R \geq f^1(1)$, dengan mempertimbangkan luasan dibawah kurva spektra respons :

$$p \{ \check{z}_R \geq f^1(1) \} = e^{-\frac{(f^1(1))^2}{2m_0}} \quad (2.96)$$

Persamaan ini dapat diinterpretasikan sebagai berapa kali kapal mengalami *greenwater* pada saat melaju di atas N siklus gelombang acak yang terjadi dalam operasi T jam.

2.4. Teori Slamming

Pengertian *slamming* adalah kondisi dimana haluan pada kapal terangkat keluar dari permukaan air dan jatuh kembali ke permukaan air dalam kecepatan tertentu. Terjadinya *slamming* umumnya pada kondisi badai atau gelombang besar sehingga gerakan vertikal kapal cukup besar sehingga membuat Haluan pada kapal terangkat.

Dalam terjadinya *slamming* pada bangunan laut, terdapat dua syarat khusus bahwa struktur mengalami *slamming* yaitu dasar haluan naik melewati (*emerge*) gelombang, atau dengan kata lain gerakan relatif vertikal haluan melampaui sarat air bagian haluan, dan Kecepatan relatif vertikal haluan mempunyai harga yang melewati harga kecepatan ambang batas *slamming* atau *threshold velocity*. Perlu dicatat disini, efek *slamming* yang sebenarnya hanya terjadi atau dialami oleh bangunan laut bilamana pada saat dasar haluan masuk kembali ke dalam air atau gelombang mempunyai kecepatan tertentu. Bilamana kecepatan terlalu rendah maka haluan dapat dikatakan hanya mencelup kembali ke dalam air, sehingga efek *slamming* atau hempasan tidak akan terasa.

2.4.1. Peluang Kejadian Slamming

Berdasarkan pengertian diatas, peluang terjadinya *slamming* harus memenuhi syarat-syarat tersebut. Diperlukan perhitungan peluang gerakan vertikal haluan relatif yang lebih besar dari sarat air bagian haluan, dalam matematis ditulis sebagai berikut :

$$\Pr(\text{haluan terangkat}) = \Pr(Z_{br} > T_b) = \exp\left(-\frac{T_b^2}{2m_{0Zbr}}\right) \quad (2.99)$$

kecepatan relatif vertikal haluan lebih besar dari kecepatan ambang batas *slamming* perlu diketahui juga dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Pr(\text{kec. ambang batas terlampaui}) = \Pr(V_{br} > V_{th}) = \exp\left(-\frac{V_{th}^2}{2m_{0Vbr}}\right) \quad (2.100)$$

Dimana:

- Z_{br} : Gerakan relatif vertikal haluan
- $V_{br} = \dot{Z}_{br}$: Kecepatan relatif vertikal haluan
- T_b : Sarat air di haluan (posisi slamming ditinjau)
- V_{th} : Kecepatan ambang batas slamming
- m_{0Zbr} : Varian atau luasan di bawah spektra respons gerakan relatif vertikal haluan
- m_{0Vbr} : Varian atau luasan di bawah spektra respons kecepatan relatif vertikal haluan
- $m_{0Vbr} = m_{2Zbr}$: Momen kedua luasan di bawah spektra respons gerakan relatif vertikal haluan.

Dari dua persamaan diatas, dapat dikombinasikan untuk mendapatkan peluang terjadinya *slamming* dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Pr(\text{slam}) = \Pr(Z_{br} > T_b \text{ dan } V_{br} > V_{th}) = \exp\left(-\frac{T_b^2}{2m_{0Zbr}} - \frac{V_{th}^2}{2m_{0Vbr}}\right) \quad (2.101)$$

Untuk kecepatan ambang batas atau lebih dikenal dengan *threshold velocity* dapat diperoleh dengan mengambil acuan sebagai berikut :

- **Tasai** menyarankan harga $V_{th} = 0.5$ m/det sebagai harga rata-rata bila bangunan laut melaju dengan kecepatan sekitar $Fn = 0.10$. Bila kecepatan rendah ($Fn = 0.05$) dapat diambil $V_{th} = 0.775$ m/det, atau bila kecepatan lebih tinggi ($Fn = 0.145$) dapat diambil $V_{th} = 0.20$ m/det.

- **Bhattacharyya** memberikan acuan $V_{th} = 12.0$ ft/det (= 3.65 m/det) untuk kapal dengan panjang (L_{ref}) 520 ft (= 158.5 m), bila panjang kapal mempunyai harga (L_s) berbeda maka V_{th} dapat diperoleh dengan memperhitungkan hukum skala,

yakni $V_{th} = 12\sqrt{Ls/Lref}$ ft/det. Sebagai misal kapal yang dikaji mempunyai $Ls = 550$ ft (= 167.6 m) maka kecepatan ambang batasnya adalah $V_{th} = 12\sqrt{550/520} = 12.6$ ft/det (= 3.84 m/det).

Dalam analisis slamming m_{0zbr} dan m_{0vbr} dapat diperoleh dengan melakukan analisis spektra respons gerakan (dan kecepatan) relatif vertikal haluan, yakni dengan terlebih dulu melakukan komputasi RAO Z_{br} dan V_{br} .

2.5. Prediksi Operabilitas Bangunan Apung

Karakteristik operabilitas dapat dilihat dengan membandingkan harga-harga dalam grafik yang menghubungkan harga stokastik gerakan dan tinggi gelombang signifikan dengan kriteria *seakeeping* yang telah ditetapkan. *Seakeeping* merupakan prosedur umum yang diterapkan untuk melakukan evaluasi operabilitas dengan mengintegrasikan hasil prediksi respons gerakan di laut rill dengan sistem konstrain operasional. Tabel 2.1 merupakan kriteria *seakeeping* menurut olson

Tabel 2. 2 Kriteria *seakeeping* untuk kapal militer (Olson, 1978)

General Criteria:	
1.	12° single amplitude average roll
2.	3° single amplitude average pitch
3.	Significant heave acceleration $\leq 0.4g$ (no people working on deck)
4.	Significant heave acceleration $\leq 0.2g$ (people working on deck)
Helicopter Criteria:	
5.	12.8° double amplitude significant roll
6.	2.55m double amplitude significant vertical displacement at the flight deck due to pitch
7.	2.13m/s significant vertical velocity at the flight deck

Olson membagi kriteria *seakeeping* menjadi dua bagian yaitu *general criteria* dan *helicopter criteria*. *General criteria* pada olson dikhususkan pada operasi secara garis besar suatu struktur sedangkan *helicopter criteria* dikhususkan pada aktivitas khusus seperti aktivitas pendaratan helikopter ataupun operasi pemuatan yang melibatkan awak kapal untuk bergerak aktif di atas kapal. Selain itu kriteria *seakeeping* pada tugas akhir ini juga meninjau pada aspek *slamming* dan *greenwater* yang tersaji pada tabel 2.2

Tabel 2. 3 Kriteria *seakeeping* pada *greenwater* dan *slamming* (Lloyd, 1989)

Table 22.4 — Seakeeping criteria for speed in rough weather

Author	Ship type	Slamming	Wetness	Propeller emergence	Vertical acceleration
Kehoe (1973)	Warship	60/hour at 0.15L	60/hour at FP		
Ochi and Motter (1974)	Merchant	Probability 0.03	Probability 0.07		
Shipbuilding Research Association of Japan (1975)	Merchant	Probability 0.01	Probability 0.02	Probability 0.1	
Lloyd and Andrew (1977)	Warship		36/hour		$\overline{SM} = 15$
Lloyd and Andrew (1977)	Merchant			120/hour	
Aertssen (1963, 1966, 1968, 1972)	Merchant	Probability 0.03 or 0.04		Probability 0.25	
Andrew and Lloyd (1981)	Warship		90/hour		$\overline{SM} = 12$
Comstock <i>et al.</i> (1982)	Warship	20/hour	30/hour		0.2g rms at bridge
Yamamoto (1984)	Merchant	Probability 0.02	Probability 0.02 at FP		Probability of exceeding 0.4g at bridge = 0.05
Walden and Grundmann (1985)	Warship	Probability 0.03	Probability 0.07		

Kriteria *seakeeping* pada aspek *slamming* dan *greenwater* mengacu pada kriteria *probability* yang ditentukan oleh Yamamoto (1984). Operabilitas dapat diartikan sebagai gambaran dari kemampuan struktur dalam beroperasi dengan membandingkan peluang struktur bekerja dengan data gelombang daerah operasi. Operabilitas dapat dicapai jika batasan kriteria tidak terlampaui. Berdasarkan Djatmiko (2012), langkah pertama dalam melakukan evaluasi operabilitas adalah menetapkan skenario pengoperasian bangunan laut. Skenario harus memuat semua faktor yang akan terkait, baik secara langsung maupun tidak langsung

$$\text{Operabilitas} = \frac{TOH - WOW}{TOH} \times 100\% \quad (90)$$

Dimana :

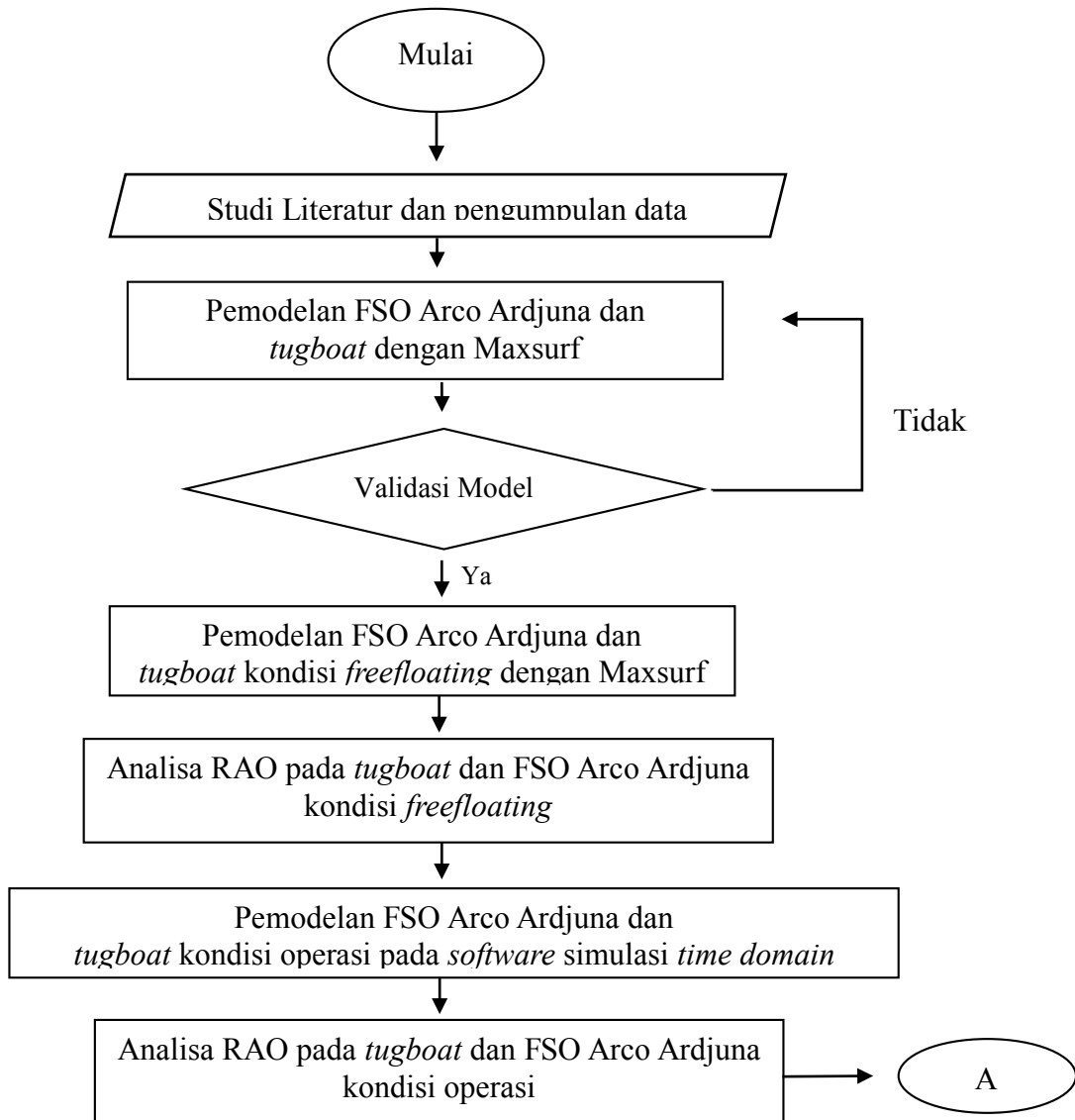
TOH : *Time on hire*

WOW : *Waiting on weathe*

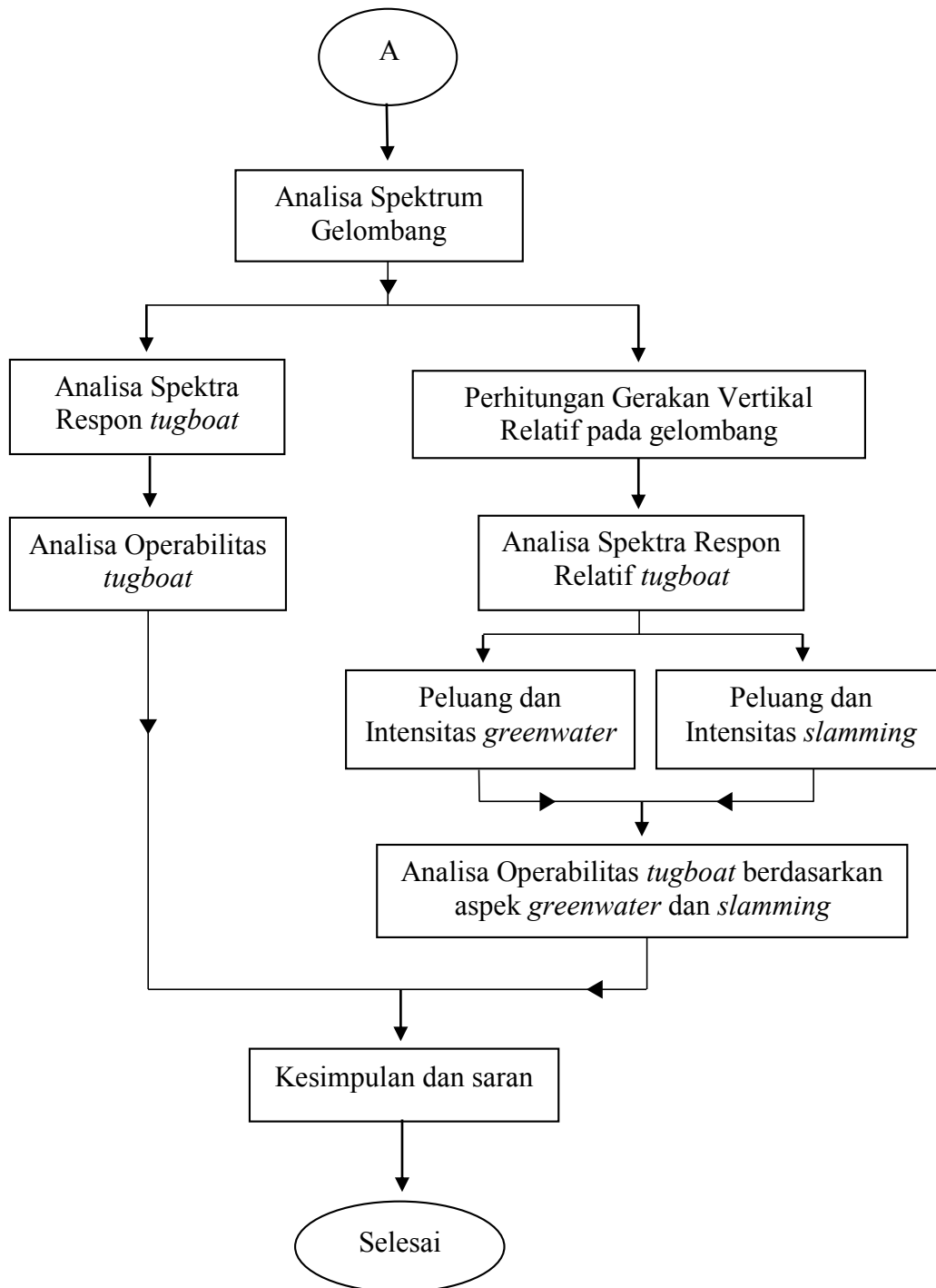
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir

Dalam penelitian ini, metodologi penelitian yang digunakan secara umum dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) seperti pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 *Flow chart* metodologi penelitian



Gambar 3. 2 Flow chart metodologi penelitian (Lanjutan)

3.2. Prosedur Penelitian

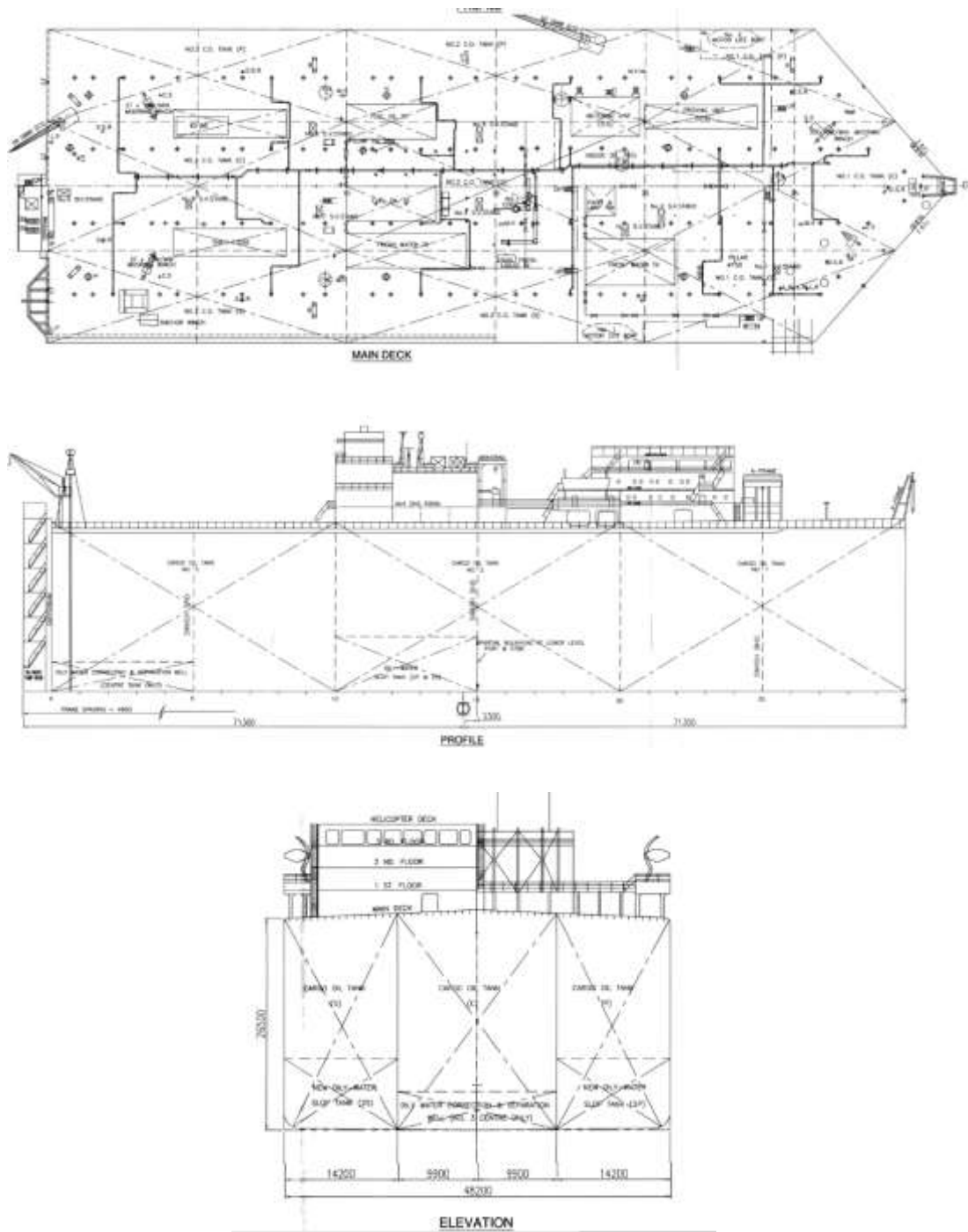
Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini beberapa tahap pengerjaan. Tahapan-tahapan tersebut merupakan langkah-langkah guna mencapai tujuan dalam Tugas akhir ini. Tahapan-tahapan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

3.2.1. Pengumpulan Data

Pada tahapan ini dilakukan pengumpulan referensi berdasarkan makalah-makalah ilmiah serta buku-buku yang mendukung dalam pengembangan materi yang relevan dengan pengerjaan Tugas Akhir. Begitu juga dengan pengumpulan data-data objek yang diteliti nantinya untuk mempermudah keakuratan dalam penelitian. Data yang dibutuhkan untuk analisis ini adalah data struktur dan data lingkungan. Data struktur terdiri dari *principle dimension* dan data hidrostatis FSO Arco Ardjuna dan *tugboat*. *Principle Dimension* dan *General Arrangement* FSO Arco Ardjuna. dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 *Principle Dimension* FSO Arco Ardjuna (PT. PHE ONWJ, 2013)

<i>Designation</i>	<i>Units</i>	<i>Minimum Operating Draft</i>	<i>Maximum Operating Draft</i>
<i>Length, LBP</i>	m		142,6
<i>Breadth, B</i>	m		48,2
<i>Depth, D</i>	m		26,5
<i>Draft to Baseline, T</i>	m	2,5	24
<i>Displacement</i>	t	15.529	153.202
WSA	m ²	6.681	12.813
<i>Max. Cross Sect. Area</i>	m ²	114,34	1.150,63
<i>Waterplan Area</i>	m ²	6.239	6.239
Cb		0,87	0,9
Cwp		0,91	0,91
LCB from zero pt.	m	-2,69	-2,78
LCF from zero pt.	m	-2,79	-2,79
LCG	m	1,29	2,17
KB	m	1,26	12,02
KMt	m	78	19,73
KMI	m	590,8	71,3
Yaw Radius of Gyration	m	34,5	34,5

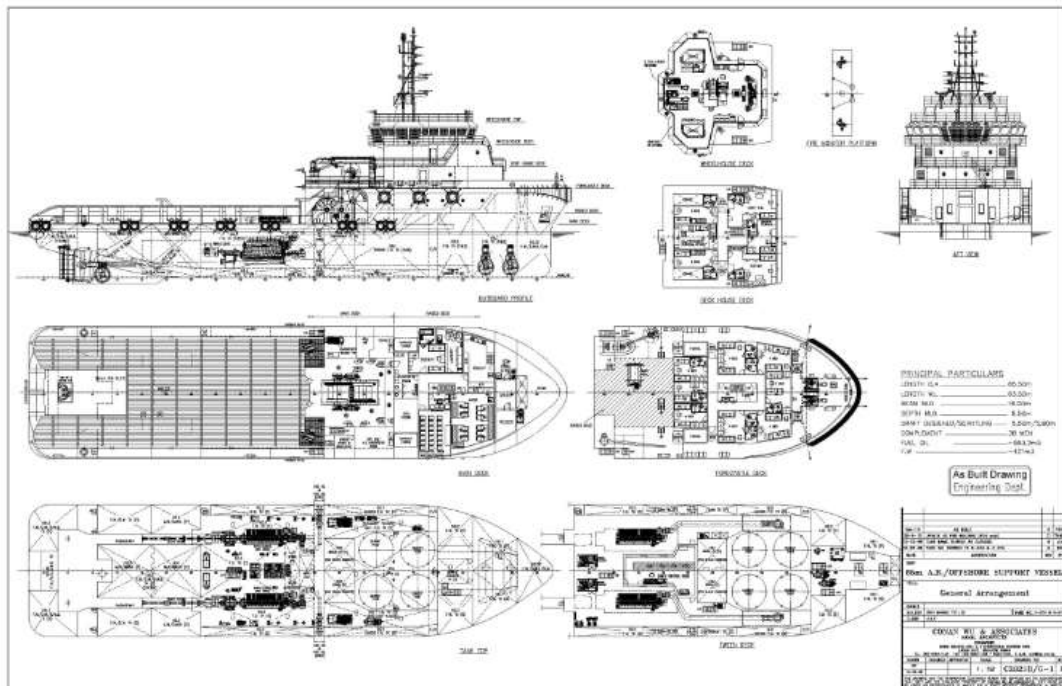


Gambar 3.3 *General Arrangement FSO Arco Ardjuna*
(PT. PHE ONWJ, 2013)

Berikut adalah data dari *tugboat*,

Tabel 3. 2 Informasi data AHTS *MP Premier* (PT Marcopolo Shipyard, 2011)

<i>Designation</i>	<i>Units</i>	<i>Maximum Operating Draft</i>
<i>Length, LWL</i>	m	63,5
<i>Breadth, B</i>	m	16
<i>Depth, D</i>	m	6,5
<i>Draft to Baseline, T</i>	m	5,5
<i>Displacement</i>	tonne	3991,95
<i>Waterplan Area</i>	m ²	907
Cb		0,698
KB	m	3,033
LCB from zero pt.	m	-1,423
LCF from zero pt.	M	-4,771



Gambar 3. 4 *General Arrangement* AHTS *MP Premier*
(PT Marcopolo Shipyard, 2011)

Data lingkungan yang digunakan adalah data lingkungan dengan periode ulang sepuluh tahun sesuai dengan IMO (1998) untuk operasi *towing* dengan lama operasi lebih dari 5 hari. Berikut adalah data lingkungan dan konfigurasi *towing*:

Tabel 3. 3 Data Lingkungan Laut Jawa

Parameter	10 - years period
Kedalaman	45 m
Tinggi Gelombang Maksimum (Hm)	6.57 m
Periode Gelombang Maksimum (Tm)	10.04 s
Tinggi Gelombang Signifikan (Hs)	3.89 m
Periode Gelombang Signifikan (Ts)	7.97 s
Spektrum	JONSWAP

(Sumber: Rekayasa Industri)

Tabel 3. 4 Data Lingkungan *Belanak Field*, Natuna (PT. GM, 2012)

Parameter	10 - years period
Kedalaman	90 m
Tinggi Gelombang Maksimum (Hm)	8.4 m
Periode Gelombang Maksimum (Tm)	10.1 s
Tinggi Gelombang Signifikan (Hs)	4.6 m
Periode Gelombang Signifikan (Ts)	8.4 s
Spektrum	Jonswap

Tabel 3. 5 Wave Scatter Diagram Belanak Field, Natuna (PT. GM, 2012)

Tp (s)		Hs (m)											
Lower	Upper	0 - 0,49	0,5 - 0,99	1 - 1,49	1,5 - 1,99	2 - 2,49	2,5 - 2,99	3 - 3,49	3,5 - 3,99	4 - 4,49	4,5 - 4,99	5 - 5,49	5,5 - 5,99
0	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1,9	0,0008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2,9	0,0210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	3,9	0,1079	0,0863	0,0050	0,0018	0,0002	-	-	-	-	-	-	-
4	4,9	0,0183	0,1529	0,0143	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	5,9	0,0060	0,0370	0,0771	0,0047	-	-	-	-	-	-	-	-
6	6,9	0,0043	0,0177	0,0409	0,0257	0,0010	-	-	-	-	-	-	-
7	7,9	0,0023	0,0079	0,0280	0,0382	0,0105	0,0002	-	-	-	-	-	-
8	8,9	0,0020	0,0058	0,0103	0,0247	0,0334	0,0119	0,0009	-	-	-	-	-
9	9,9	0,0007	0,0041	0,0062	0,0158	0,0176	0,0255	0,0129	0,0012	-	-	-	-
10	10,9	-	0,0037	0,0051	0,0067	0,0095	0,0113	0,0114	0,0080	0,0017	-	-	-
11	11,9	0,0001	0,0027	0,0034	0,0034	0,0043	0,0059	0,0047	0,0049	0,0025	0,0022	0,0003	-
12	12,9	-	0,0020	0,0022	0,0016	0,0009	0,0020	0,0019	0,0018	0,0010	0,0009	0,0005	0,0003
13	13,9	-	0,0007	0,0010	0,0004	0,0006	0,0002	0,0004	0,0011	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001
14	14,9	-	0,0002	0,0009	0,0004	0,0004	0,0003	0,0001	-	-	-	-	-
15	15,9	0,0001	0,0001	0,0002	0,0006	0,0004	0,0007	0,0001	-	-	-	-	-
16	16,9	-	0,0001	-	0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-
17	17,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		0,1636	0,3212	0,1947	0,1243	0,0789	0,0580	0,0324	0,0169	0,0055	0,0033	0,0009	0,0004



Gambar 3. 5 Konfigurasi FSO *Arco Ardjuna* (PT PHE ONWJ, 2015)

3.2.2. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur pada penelitian ini mengacu pada data yang sudah dikumpulkan. Objek yang akan dimodelkan terdiri dari FSO Arco Ardjuna sebagai obyek yang akan dilakukan proses *towing* menuju daerah operasi serta *tugboat* sebagai objek yang akan melakukan proses *towing* nantinya terhadap FSO Arco Ardjuna. Kedua struktur dimodelkan menggunakan *software* MAXSURF terhadap *principal dimension* yang sudah ada berdasarkan data yang dikumpulkan meliputi: panjang keseluruhan, lebar, displasemen, tinggi struktur, sarat air kondisi yang diinginkan, dan lain sebagainya).

3.2.3. Validasi Struktur

Setelah proses pemodelan selesai dilakukan, maka dilakukan validasi dengan cara menganalisis hidrostatis guna mendapatkan parameter-parameter yang *constraint* pada tiap struktur. Parameter-parameter tersebut akan dibandingkan dengan data yang sudah dikumpulkan untuk mengetahui apakah model yang telah dibuat layak atau tidak untuk dilakukan proses selanjutnya.

3.2.4. Komputasi Gerakan di Atas Gelombang Reguler

Struktur yang sudah di validasi dapat dilanjutkan pada proses selanjutnya yaitu menganalisa gerakan struktur pada kondisi gelombang reguler. Analisa ini dilakukan untuk mendapatkan RAO gerakan struktur dari arah datang gelombang yang telah ditentukan serta kondisi lainya yang sudah ditetapkan. Hasil dari analisa ini adalah mendapatkan gerakan struktur di gelombang reguler dengan keadaan sudah dipengaruhi oleh pengaruh *towingline* yang nantinya digunakan untuk perhitungan selanjutnya untuk analisis pada gelombang acak.

3.2.5. Perhitungan gerakan Relatif Vertikal

Analisa gerakan relatif vertikal dilakukan dengan melakukan perhitungan gerakan vertikal akibat gerakan *heave* dan *pitch*. Analisa gerakan ini akan mendapatkan RAO dengan titik acuan relatif yang digunakan untuk analisa *greenwater* dan *slamming*. Sedangkan pada analisa operabilitas tidak menggunakan analisa gerakan relatif tetapi langsung menggunakan RAO dengan titik referensi *midship* yang sudah dihitung sebelumnya.

3.2.6. Perhitungan Spektrum Gelombang

Perhitungan spektrum gelombang menggunakan Spektra Gelombang JONSWAP yaitu dengan persamaan (2.70). Penggunaan spektra JONSWAP didasari pada kesamaan terhadap kriteria-kriteria yang digunakan pada operasi *towing* FSO Arco Ardjuna. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, Spektra JONSWAP sesuai dengan perairan Indonesia dikarenakan Indonesia merupakan negara kepulauan dan lautan tertutup sesuai dengan syarat penggunaan spektra tersebut.

3.2.7. Menghitung Respon Spektra

Respon spektra dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.87). Pada pengerjaan Tugas Akhir terdapat dua jenis respon spektra yang berbeda. Spektra respon pertama digunakan pada analisa operabilitas dimana pada perhitungan spektra respon, RAO yang digunakan adalah RAO dengan titik referensi *midship*. Sedangkan pada analisa *greenwater* dan *slamming*, analisa spektra respon menggunakan RAO relatif dengan perhitungan gerakan relatif vertikal haluan yang sudah di ketahui pada analisis sebelumnya.

3.2.8. Menghitung Peluang *Greenwater* dan *Slamming*

Peluang *slamming* dianalisis dengan menggunakan persamaan (2.101) Sedangkan untuk mencari peluang *greenwater* menggunakan persamaan (2.96). Nilai untuk m_0 serta m_2 didapat pada perhitungan spektra respon pada spektra respon realtif.

3.2.9. Perhitungan Operabilitas

Jenis-jenis harga statistik yang diperoleh untuk masing-masing mode gerakan disesuaikan dengan kriteria operasi yang dipakai sebagai batasan. Dengan membandingkan antara kenaikan intensitas statistik gerakan sebagai fungsi kenaikan tinggi gelombang (sginifikan), dengan batasan kriteria, maka akan dapat ditentukan sampai ketinggian dengan keadaan gelombang berapakah *tugboat* masih mampu untuk beroperasi melakukan proses *towing*.

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

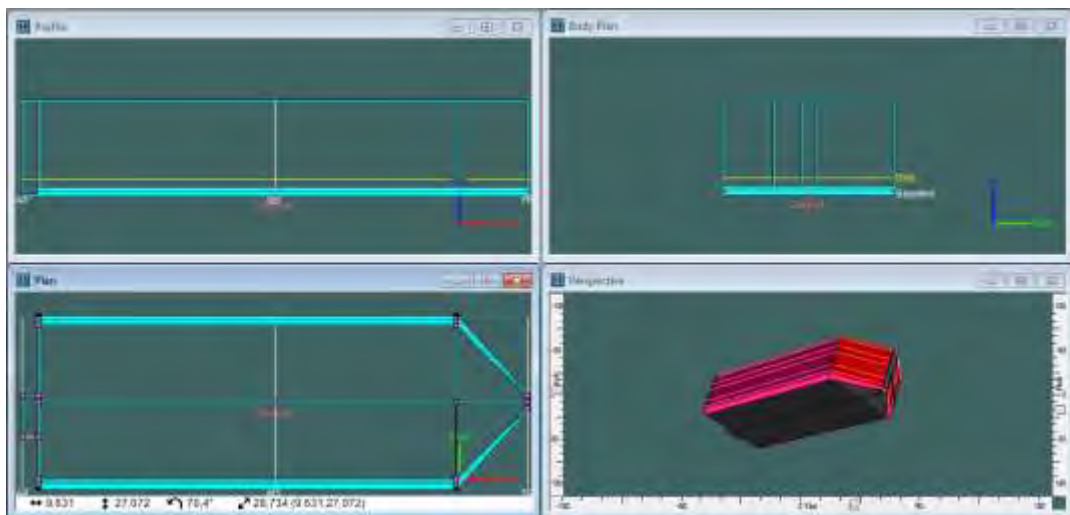
4.1. Pemodelan Struktur

Pada Tugas Akhir ini, terdapat dua struktur yang di modelkan yaitu FSO *Arco Ardjuna* dan AHTS *MP Premier*. Pemodelan struktur baik FSO *Arco Ardjuna* dan AHTS *MP Premier* dilakukan dengan menggunakan *software Maxsurf Modeler*. Pemodelan yang dibuat mengacu dengan data-data yang sudah dikumpulkan sebelumnya seperti *General Arrangement (GA)* dan *Principal Dimension*.

4.1.1. Pemodelan FSO *Arco Ardjuna*

FSO *Arco Ardjuna* adalah struktur yang ditarik oleh AHTS *MP Premier* dari *Jurong Port Singapore* menuju *Ardjuna Marine terminal*. FSO *Arco Ardjuna* dimodelkan dengan *software Maxsurf Modeler* dengan mengacu pada data yang sudah dikumpulkan pada tabel 3.1 dan *general arrangement* pada gambar 3.3.

Hasil pemodelan FSO *Arco Ardjuna* dengan menggunakan *software Maxsurf Modeler* dapat dilihat pada Gambar 4.1.

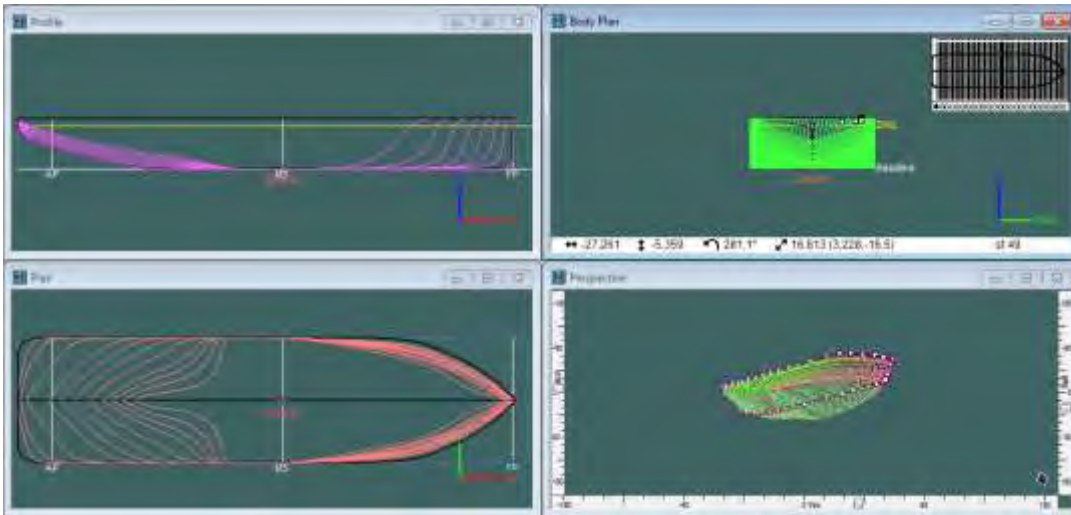


Gambar 4. 1 Pemodelan FSO *Arco Ardjuna* dengan *Maxsurf Modeler*

4.1.2. Pemodelan AHTS *MP Premier*

Pada operasi *towing*, FSO *Arco Ardjuna* ditarik oleh AHTS *MP Premier*. *MP Premier* merupakan kapal tipe *Anchor Handling Tug Supply* yang umumnya digunakan dalam operasi lepas pantai khususnya operasi yang berkaitan dengan jangkar dan *Buoy*. Namun untuk kasus ini AHTS digunakan pada operasi *towing* FSO *Arco Ardjuna*. AHTS *MP Premier* juga dimodelkan dengan *software* Maxsurf Modeler dengan mengacu pada data yang sudah dikumpulkan pada tabel 3.2 dan *general arrangement* pada gambar 3.4.

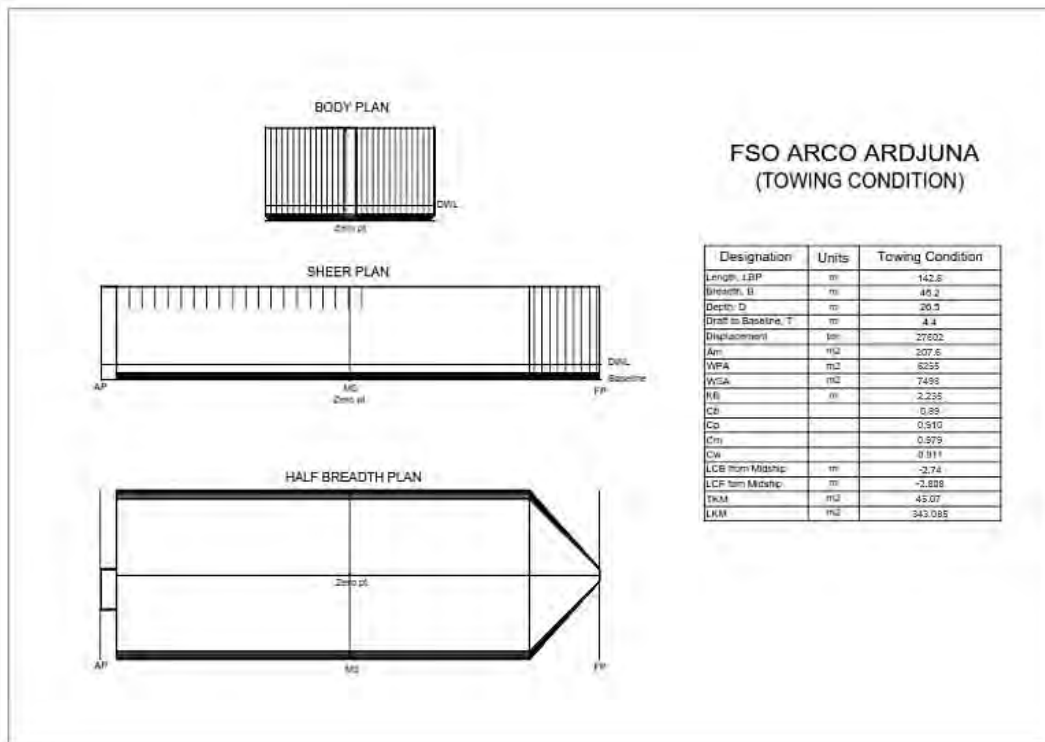
Berdasarkan data tersebut, Hasil pemodelan AHTS *MP Premier* dengan menggunakan *software* Maxsurf Modeler dapat dilihat pada Gambar 4.2



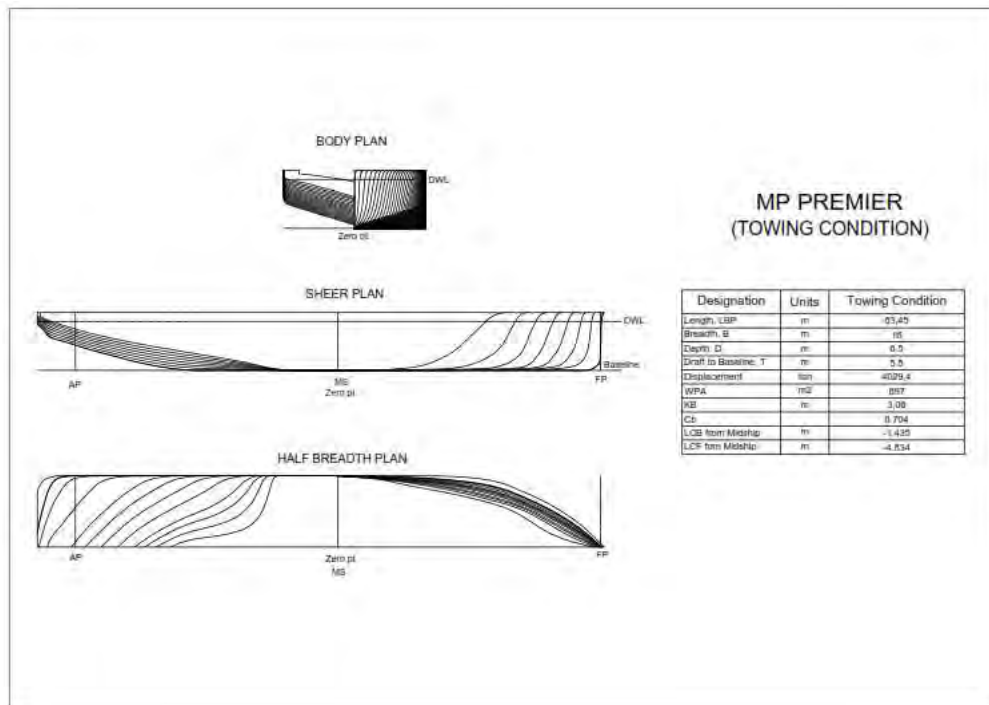
Gambar 4. 2 Pemodelan AHTS *MP Premier* dengan *Maxsurf Modeler*

4.1.3. *Lines Plan*

Berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan, didapatlah *linesplan* untuk tiap struktur baik FSO *Arco Ardjuna* maupun AHTS *MP Premier*. *Offset* kedua struktur yang telah dimodelkan, digunakan untuk membuat *lines plan* kedua struktur tersebut. Berikut adalah gambar *lines plan* dari FSO *Arco Ardjuna* dan AHTS *MP Premier* pada gambar 4.3 dan 4.4. kedua *linesplan* yang telah dibuat perlu dilakukan validasi untuk mengetahui apakah *linesplan* yang telah kita buat sudah menyerupai bentuk sebenarnya. Validasi dilakukan pada analisa selanjutnya



Gambar 4.3 Lines Plan AHTS MP Premier



Gambar 4.4 Lines Plan AHTS MP Premier

4.1.4. Hidrostatik

Dalam melakukan pemodelan, setiap *linesplan* yang telah kita buat harus divalidasi untuk melihat kesesuaian model yang kita buat dengan dengan keadaan sebenarnya. Validasi dilakukan dengan membandingkan data-data hidrostatik hasil dari keluaran Maxsurf modeler dengan data hidrostatik struktur yang sebenarnya.

Dalam Tugas Akhir ini, besaran hidrostatik kedua model baik FSO *Arco Ardjuna* dan AHTS *MP Premier* dibandingkan dengan data asli masing masing kapal. Besaran hidrostatik yang dibandingkan diantaranya : *displacement, Lwl, beam, draft, Wetted Surface Area, max cross sect are*, Koefisien Bentuk (Cp, Cb, Cm, dan Cwp), dan lain sebagainya. Pada tabel 4.1 ditunjukkan validasi FSO *Arco Ardjuna* dengan data aslinya dan pada tabel 4.2 validasi AHTS *MP Premier* dengan data aslinya.

Tabel 4. 1 Validasi hidrostatik FSO *Arco Ardjuna* data dengan Model *Maxsurf* kondisi *towing load contion*.

No	Data	Unit	FSO	Maxsurf Modeler	Koreksi (%)	Status
1	Displacement	ton	27975	27602	1,33	Memenuhi
2	Length, Lwl	m	142,6	142,6	0,00	Memenuhi
3	Beam, B	m	48,2	48,2	0,00	Memenuhi
4	Draft, T	m	4,4	4,4	0,00	Memenuhi
5	WSA	m ²	7359,3	7498	1,88	Memenuhi
6	Am	m ²	206,778	207,638	0,42	Memenuhi
7	WPA	m ²	6239	6255	0,26	Memenuhi
8	Cb		0,896	0,89	0,67	Memenuhi
9	Cp		0,919	0,910	0,98	Memenuhi
10	Cm		0,975	0,979	0,41	Memenuhi
11	Cw		0,921	0,911	1,09	Memenuhi
12	KB	m	2,243	2,235	0,36	Memenuhi
13	LCB	m	-2,699	-2,74	1,52	Memenuhi
14	LCF	m	-2,801	-2,808	0,25	Memenuhi
15	TKM	m	45,379	45,074	0,67	Memenuhi
16	LKM	m	340,064	343,085	0,89	Memenuhi

Tabel 4. 2 Validasi hidrostatik AHTS *MP Premier* data dengan model Maxsurf kondisi *full load*.

No	Data	Unit	MP PREMIER	Maxsurf Modeler	Koreksi (%)	Status
1	Displacement	Ton	3991,95	4029,4	0,94	Memenuhi
2	Length, LWL	m	63,5	63,45	0,08	Memenuhi
3	Beam, B	m	16	16	0,00	Memenuhi
4	Depth, D	m	6,5	6,5	0,00	Memenuhi
5	Draft, T	m	5,5	5,5	0,00	Memenuhi
6	WPA	m ²	907	897	1,08	Memenuhi
7	Cb		0,698	0,704	0,86	Memenuhi
8	KB	m	3,033	3,06	0,89	Memenuhi
9	LCB	m	-1,423	-1,435	0,84	Memenuhi
10	LCF	m	-4,771	-4,834	1,32	Memenuhi

Dapat dilihat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2, kedua struktur baik FSO Arco Ardjuna dan AHTS MP Premier sudah menunjukkan kesesuaian data hidrostatik dengan masing-masing data sebenarnya. Tiap besaran hidrostatik pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 memiliki nilai toleransi/ faktor *error* kurang dari 2 persen (< 2%). Dengan demikian hasil pemodelan kedua struktur baik FSO *Arco Ardjuna* dan AHTS *MP Premier* valid untuk digunakan sebagai *input* dalam melakukan analisa-analisa selanjutnya.

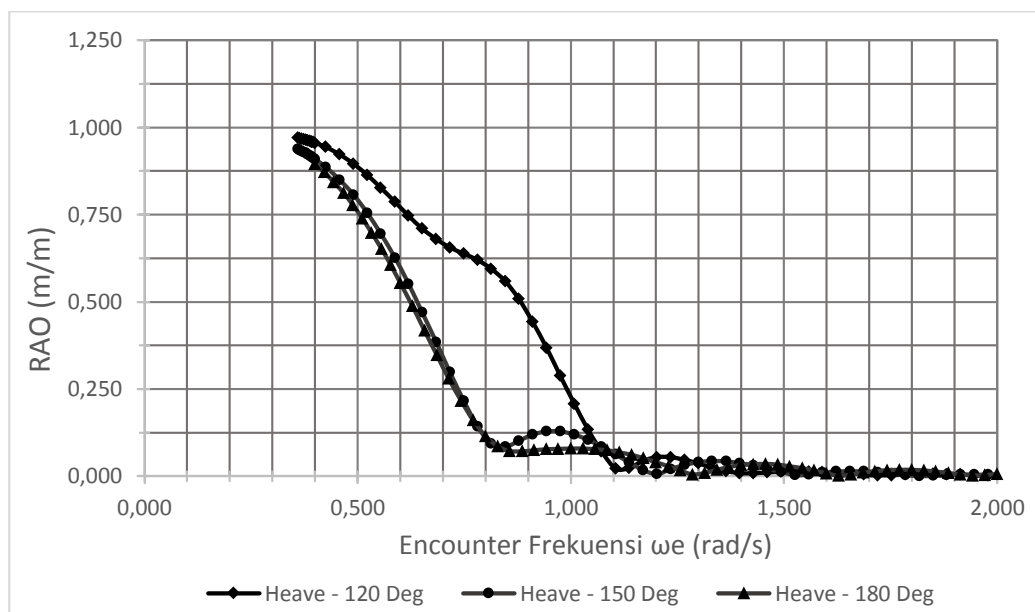
4.2. Response Amplitude Operator (RAO) pada kondisi *Free Floating*.

Perilaku gerakan FSO dan AHTS pada kondisi *free floating* ditinjau dengan kecepatan operasi sebesar 5 Knot untuk arah pembebanan 120⁰, 150⁰, dan 180⁰ dalam tiga derajat kebebasan yaitu *Heave*, *Roll* dan *Pitch*. Kedua struktur akan mempunyai RAO pada tiap *loading condition*nya masing-masing. FSO *Arco Ardjuna* memiliki RAO dengan *towing load condition*, sedangkan AHTS *MP Premier* memiliki RAO AHTS *MP Premier* dengan kondisi *full load*, 85% *fuel tank capacity*, dan 69% *fuel tank capacity*. Analisa RAO dilakukan sesuai dengan kondisi operasi *towing*.

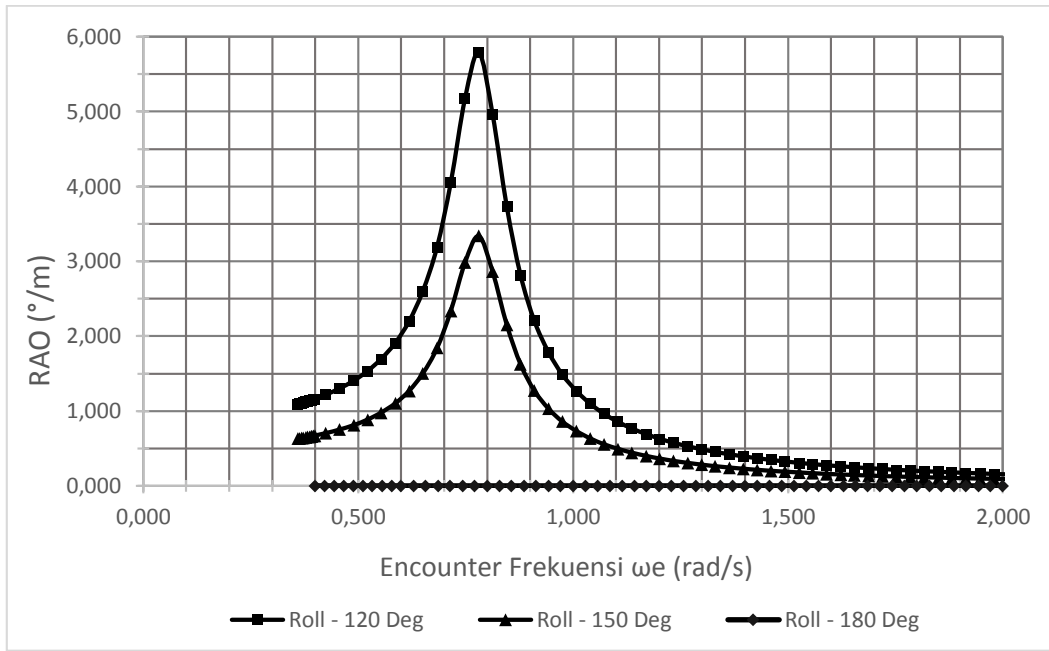
Grafik fungsi transfer (RAO) kedua struktur baik FSO *Arco Ardjuna* dan AHTS *MP Premier* dalam kondisi terapung bebas (*free floating*) tanpa ada *towing line* yang menghubungkan kedua struktur.

4.2.1. RAO FSO *Arco Ardjuna Free Floating* kondisi *towing load*

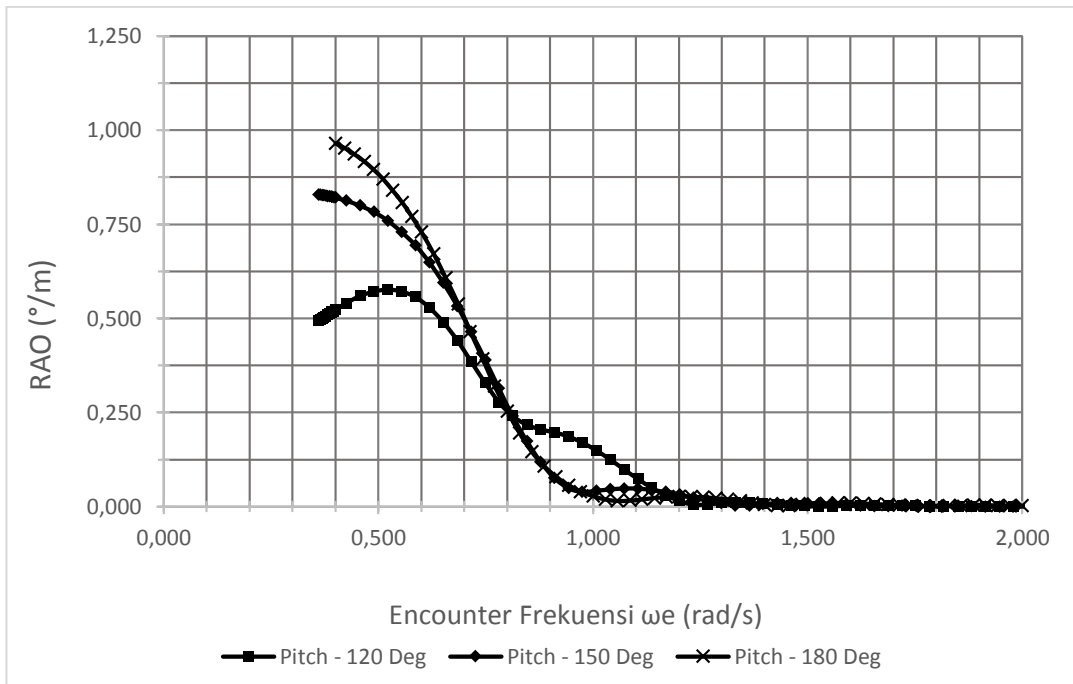
Analisa RAO pada FSO *Arco Ardjuna* memiliki satu *loading condition* seperti yang di jelaskan sebelumnya. Sarat pada *towing condition* sebesar 4,4 m dengan kecepatan tempuh operasi sebesar 5 Knot. Gerakan yang dihasilkan pada analisa RAO adalah *heave*, *roll*, dan *pitch*. Grafik disajikan dalam setiap moda gerakan agar dapat dibandingkan perubahan yang terjadi akibat perbedaan *heading*. Grafik RAO FSO *Arco Ardjuna Free Floating* kondisi *towing* adalah sebagai berikut



Gambar 4. 5 Grafik RAO *Heave free floating* FSO *Arco Ardjuna* kondisi *towing load* dengan kecepatan 5 Knot



Gambar 4. 6 Grafik RAO Roll *free floating* FSO Arco Ardjuna kondisi *towing load* dengan kecepatan 5 Knot.



Gambar 4. 7 Grafik RAO Pitch *free floating* FSO Arco Ardjuna kondisi *towing load* dengan kecepatan 5 Knot

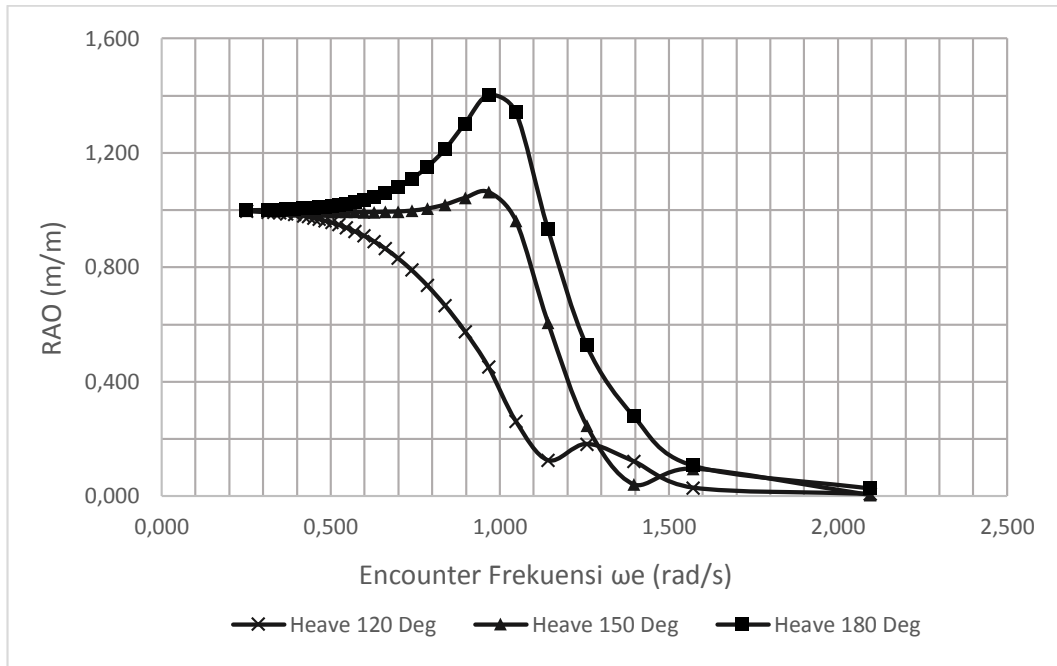
Tabel 4. 3 Nilai maksimum RAO *free floating* FSO Arco Ardjuna kondisi *towing* dengan kecepatan 5 Knot

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum			Max
		120 deg	150 deg	180 deg	
<i>Heave</i>	m/m	0,970	0,938	0,896	0,970
<i>Roll</i>	deg/m	5,786	3,340	0,000	5,786
<i>Pitch</i>	deg/m	0,576	0,829	0,965	0,965

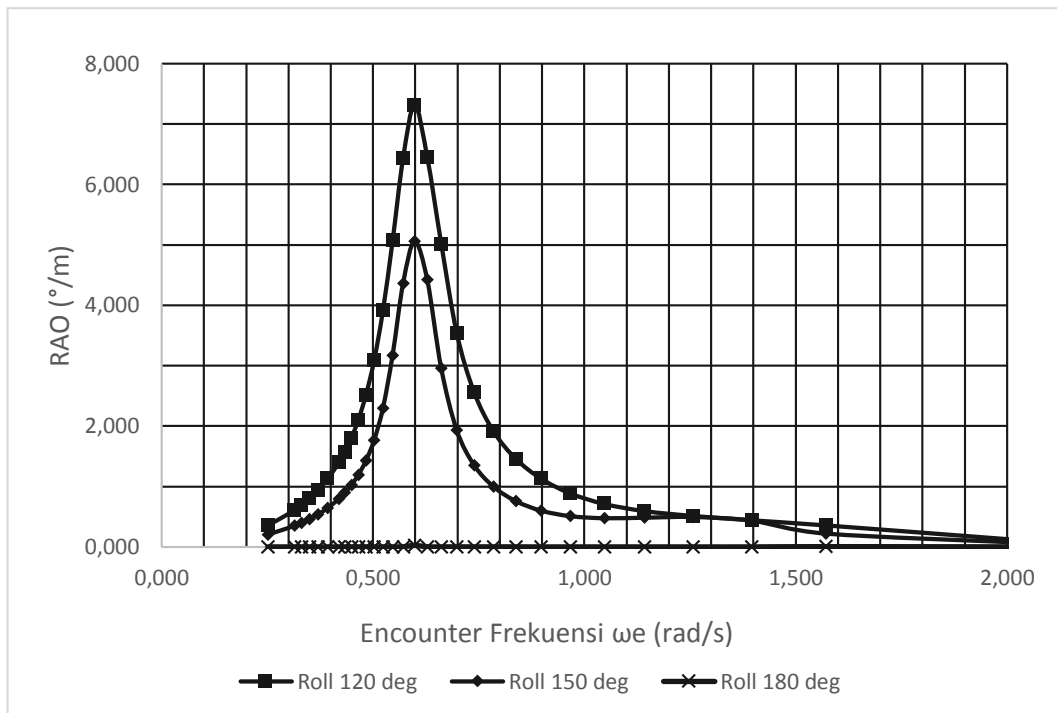
Berdasarkan grafik dan tabel yang tersaji sebelumnya, dapat dilihat bahwa pada setiap moda gerakan RAO maksimum terdapat pada frekuensi kecil yaitu dibawah 1 rad/sec. Berdasarkan grafik juga dapat diketahui seiring bertambahnya nilai frekuensi, RAO semakin mengecil mendekati 0. Pada moda gerakan *heave*, nilai tertinggi terdapat pada *heading* 120⁰ dengan nilai sebesar 0,970 (m/m), sedangkan pada moda gerakan *roll* terdapat nilai tertinggi sebesar 5,740 (deg/m) pada *heading* 120⁰, untuk gerak rotasional *pitch* sebesar 0,966 pada *heading* 180⁰.

4.2.2. RAO AHTS MP Premier Free Floating kondisi Full Load

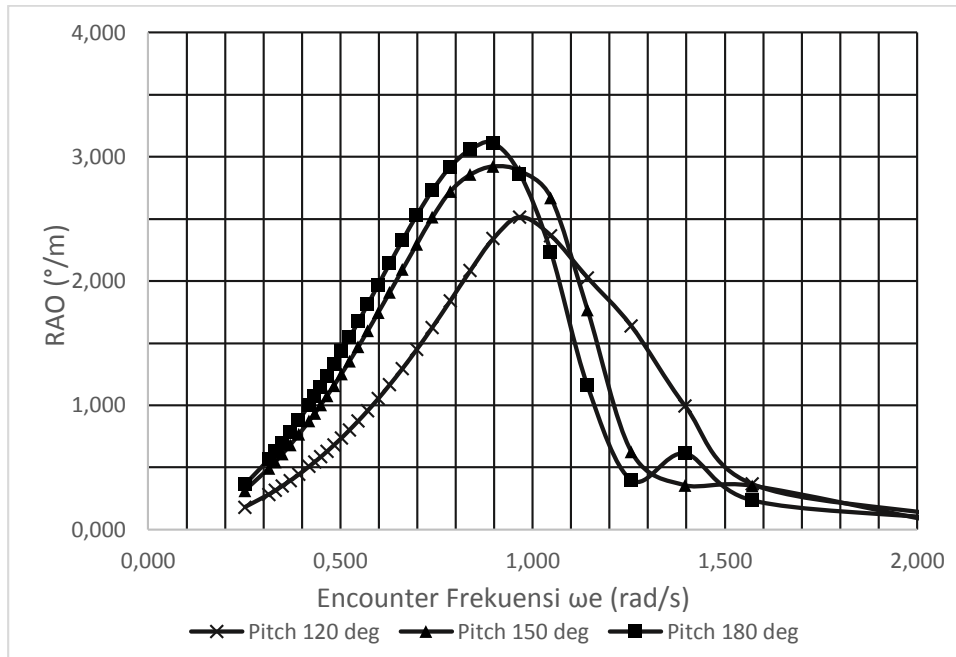
Pada AHTS MP Premier, analisa RAO dilakukan pada 3 *loading condition*. Sesuai dengan operasi *towing* yang dilakukan, AHTS MP Premier sebagai *tow master* mengakibatkan kondisi dari AHTS seiring perjalanan akan berubah-ubah. Salah satu *loading condition* yang dianalisa adalah *full load*., kondisi *full load* memiliki sarat sebesar 5,5 m. RAO AHTS MP Premier tersaji dalam 3 moda gerak yaitu *heave*, *roll*, dan *pitch* sama dengan FSO Arco Ardjuna pada kondisi *free floating* dengan kecepatan tempuh 5 knot sesuai dengan operasi *towing*. Grafik RAO AHTS MP Premier tersaji sebagai berikut.



Gambar 4. 8 Grafik RAO *Heave free floating* AHTS MP Premier kondisi *Full Load* dengan kecepatan 5 Knot



Gambar 4. 9 Grafik RAO *Roll free floating* AHTS MP Premier kondisi *Full Load* dengan kecepatan 5 knot



Gambar 4. 10 Grafik RAO *Pitch free floating* AHTS MP Premier kondisi *Full Load* dengan kecepatan 5 Knot

Tabel 4. 4 Nilai maksimum RAO *free floating* AHTS MP Premier kondisi *Full Load* dengan kecepatan 5 Knot

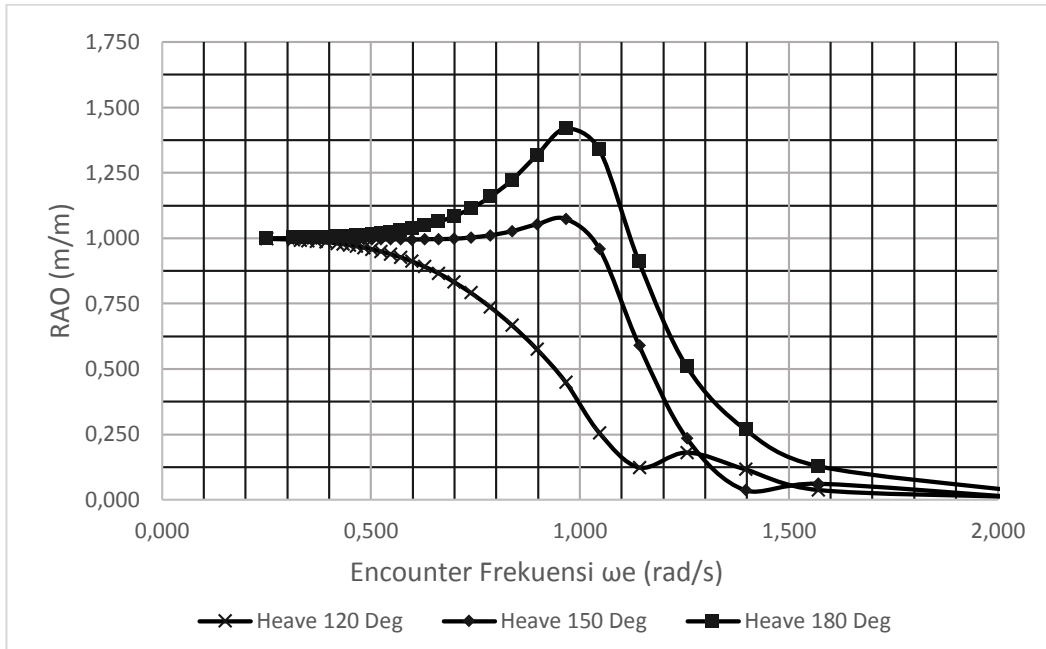
Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum			Max
		120 deg	150 deg	180 deg	
<i>Heave</i>	m/m	0,997	1,063	1,402	1,402
<i>Roll</i>	deg/m	7,311	5,055	0,023	7,311
<i>Pitch</i>	deg/m	2,516	2,923	3,110	3,110

Berdasarkan grafik dan tabel yang tersaji sebelumnya, dapat dilihat bahwa pada moda gerakan *heave* memiliki nilai tertinggi pada *heading* 180⁰ dengan nilai sebesar 1,402 (m/m), sedangkan pada moda gerakan *roll* terdapat nilai tertinggi sebesar 7,311 (deg/m) pada *heading* 120⁰, untuk gerak rotasional maksimum *pitch* sebesar 3,110 pada *heading* 180⁰

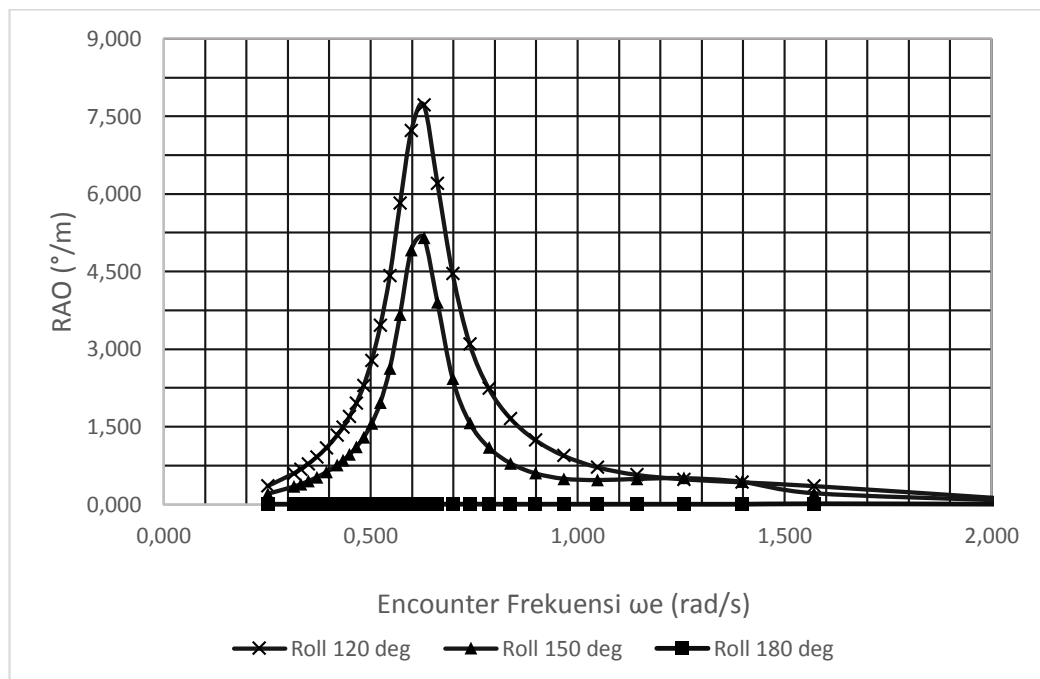
4.2.3. RAO AHTS MP Premier *Free Floating* kondisi 85% *Fuel Tank*

Loading condition kedua yang dianalisa pada AHTS MP Premier adalah kondisi dimana *fuel tank* yang awalnya penuh sudah terpakai dan tersisa 85% seiring proses *towing* berlangsung. Pada kondisi 85% *fuel tank*, AHTS MP Premier berada pada sarat 5,409 m dan sudah menempuh jarak perjalanan sejauh 393,4 nm.

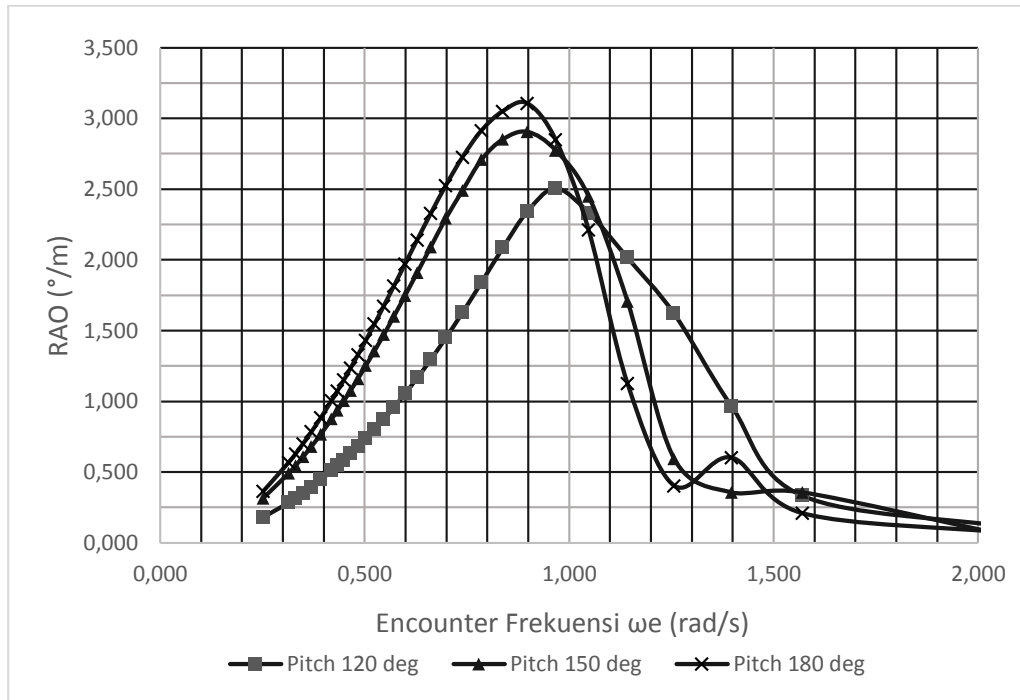
RAO AHTS MP Premier pada kondisi 85% *fuel tank* akan memiliki 3 moda gerak *heave*, *roll*, dan *pitch* pada kondisi *free floating* dengan kecepatan tempuh 5 knot sesuai dengan operasi *towing*. Grafik tersaji sebagai berikut.



Gambar 4.11 Grafik RAO *Heave free floating* AHTS MP Premier kondisi 85% *Fuel Tank* dengan kecepatan 5 Knot



Gambar 4.12 Grafik RAO *Roll free floating* AHTS MP Premier kondisi 85% *Fuel Tank* dengan kecepatan 5 Knot



Gambar 4.13 Grafik RAO *Pitch free floating* AHTS MP Premier kondisi 85% *Fuel Tank* dengan kecepatan 5 Knot

Tabel 4.5 Nilai maksimum RAO *free floating* AHTS MP Premier kondisi 85% *fuel tank* dengan kecepatan 5 Knot

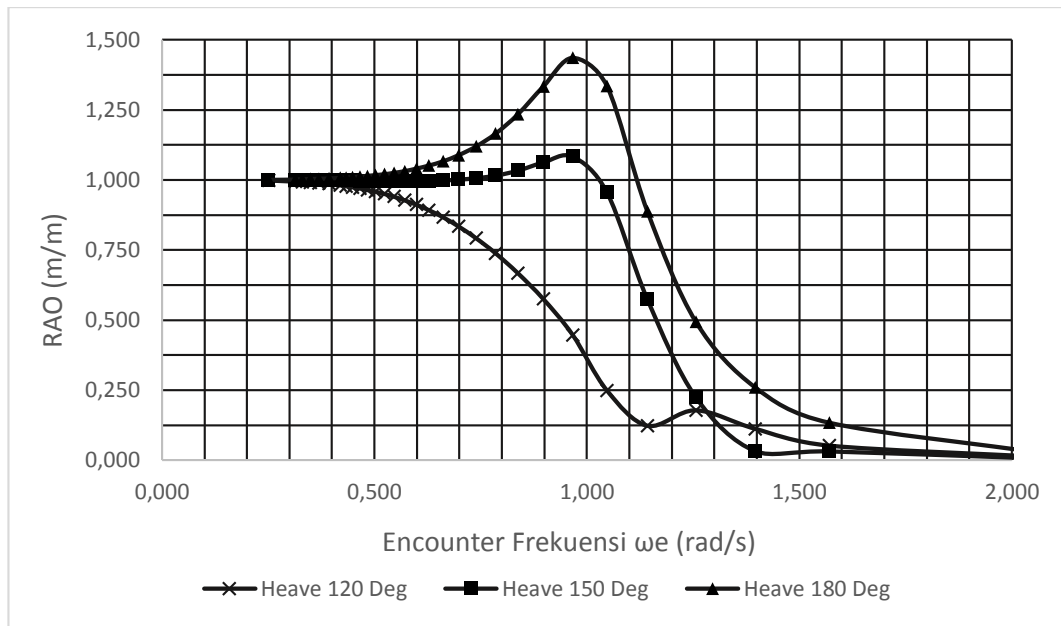
Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum			Max
		120 deg	150 deg	180 deg	
<i>Heave</i>	m/m	0,997	1,073	1,420	1,420
<i>Roll</i>	deg/m	7,224	5,151	0,006	7,224
<i>Pitch</i>	deg/m	2,506	2,905	3,105	3,105

Berdasarkan grafik dan tabel yang tersaji sebelumnya, dapat dilihat bahwa pada moda gerakan *heave* memiliki nilai tertinggi pada *heading* 180⁰ dengan nilai sebesar 1,420 (m/m), sedangkan pada moda gerakan *roll* terdapat nilai tertinggi sebesar 7,224 (deg/m) pada *heading* 120⁰, untuk gerak rotasional maksimum *pitch* sebesar 3,105 pada *heading* 180⁰.

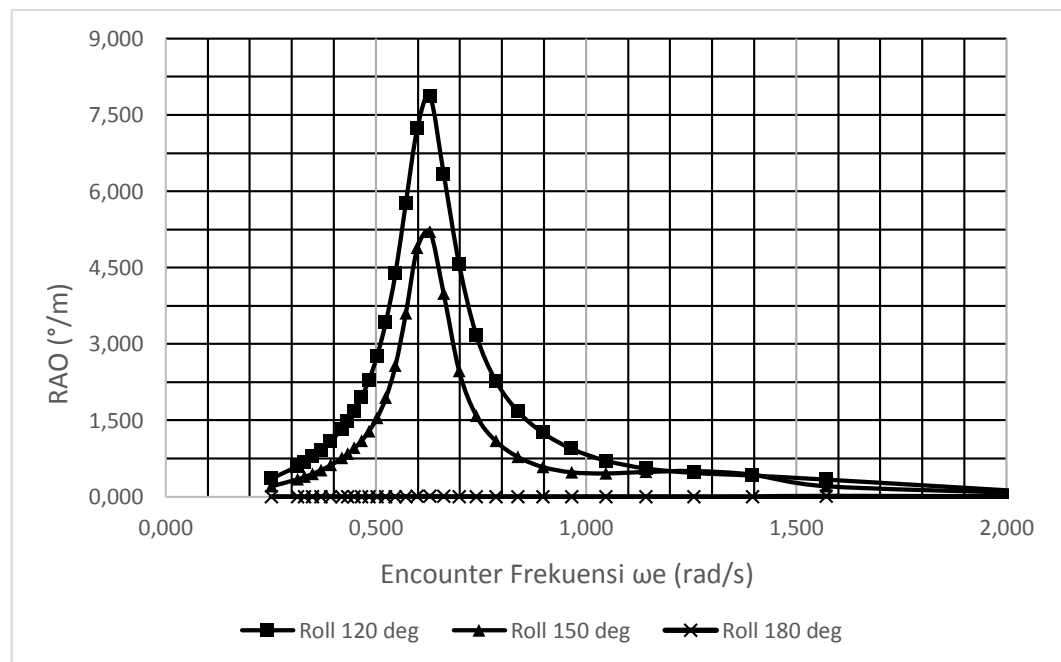
4.2.4. RAO AHTS MP Premier Free Floating kondisi 69% Fuel Tank

Loading condition ketiga yang dianalisa pada AHTS MP Premier adalah kondisi dimana *fuel tank* yang awalnya penuh sudah terpakai dan tersisa 69% berada pada kondisi FSO Arco Ardjuna sudah sampai di tujuan yaitu Ardjuna Marine Terminal. Pada kondisi 69%

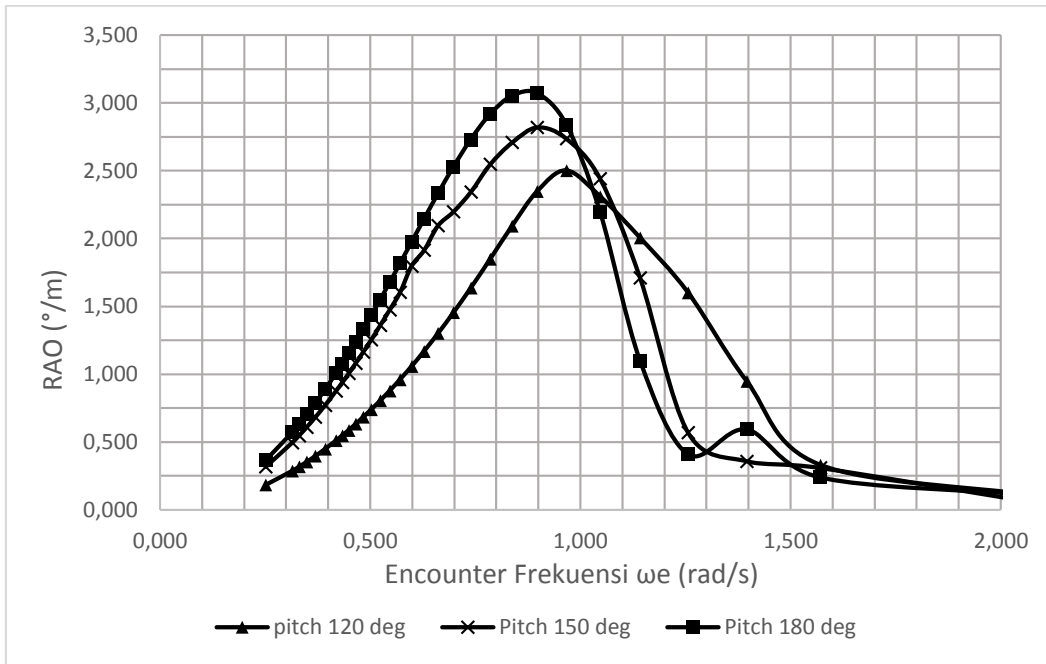
fuel tank, AHTS *MP Premier* berada pada sarat 5,303 m dan sudah menempuh jarak perjalanan sejauh 808 nm. RAO AHTS *MP Premier* pada kondisi 69% *fuel tank* akan memiliki 3 moda gerak *heave*, *roll*, dan *pitch* pada kondisi *free floating* dengan kecepatan tempuh 5 knot sesuai dengan operasi *towing*. Grafik RAO AHTS *MP Premier* tersaji.



Gambar 4. 14 Grafik RAO *Heave free floating* AHTS *MP Premier* kondisi 69% *Fuel Tank* dengan kecepatan 5 Knot



Gambar 4. 15 Grafik RAO *Roll free floating* AHTS *MP Premier* kondisi 69% *Fuel Tank* dengan kecepatan 5 Knot



Gambar 4. 16 Grafik RAO *Pitch free floating* AHTS MP Premier kondisi 69% Fuel Tank dengan kecepatan 5 Knot

Tabel 4. 6 Nilai maksimum RAO *free floating* AHTS MP Premier kondisi 69% Fuel Tank dengan kecepatan 5 Knot

Moda Gerakan	Unit	RAO Maksimum			Max
		120 deg	150 deg	180 deg	
<i>Heave</i>	m/m	0,999	1,083	1,435	1,435
<i>Roll</i>	deg/m	7,857	5,204	0,003	7,857
<i>Pitch</i>	deg/m	2,501	2,821	3,071	3,071

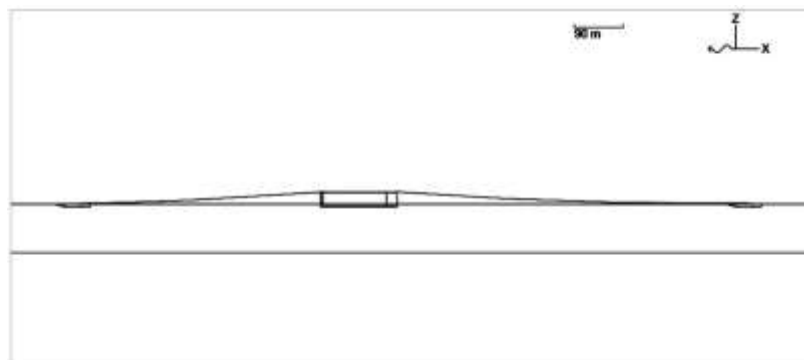
Berdasarkan grafik dan tabel yang tersaji sebelumnya, dapat dilihat bahwa pada moda gerakan *heave* memiliki nilai tertinggi pada *heading* 180⁰ dengan nilai sebesar 1,435 (m/m), sedangkan pada moda gerakan *roll* terdapat nilai tertinggi sebesar 7,857 (deg/m) pada *heading* 120⁰, untuk gerak rotasional maksimum *pitch* sebesar 3,071 pada *heading* 180⁰.

4.3. Pemodelan Sistem *Towing*

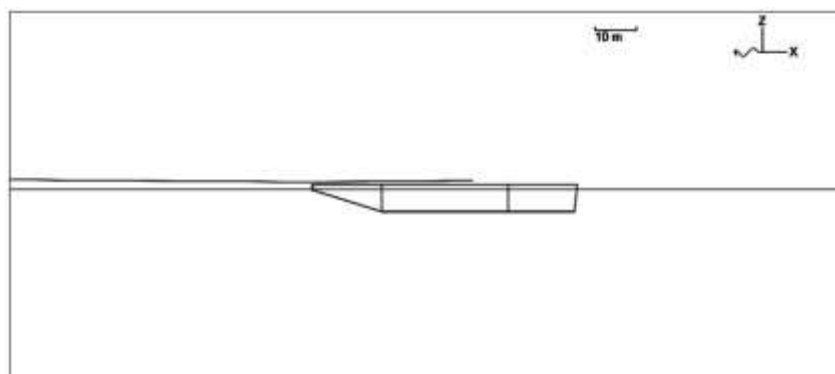
Tahap pemodelan sistem *towing* dilakukan untuk melakukan analisa lanjutan guna mengetahui pengaruh sistem *towing* pada struktur khususnya AHTS MP Premier. Pemodelan sistem *towing* dibantu dengan *software* simulasi *time domain*..

Pemodelan sistem *towing* dilakukan dengan melakukan *input* data struktur, data *towing line*, spektra gelombang, dan data ligkungan sesuai dengan kondisi *towing* nantinya.

Sesuai dengan penjelasan sebelumnya analisa dilakukan dalam 3 kondisi. Pada Kondisi pertama, FSO *Arco Ardjuna* dalam kondisi *towing load* dan AHTS *MP Premier* dalam kondisi *full load*. Kondisi pertama berada pada perairan Laut Cina Selatan dengan kondisi Tinggi gelombang signifikan 4,6 m dengan Periode signifikan 8,4 s. Kondisi kedua sama dengan Kondisi pertama kecuali *loading condition* AHTS *MP Premier* berubah menjadi *85% fuel load Condition*. Kondisi ketiga, AHTS *MP Premier* tetap dalam kondisi *towing load condition* dan FSO *Arco Ardjuna* menjadi *69% Fuel Load Condition* sudah berada di laut jawa dengan kondisi perairan dengan tinggi gelombang signifikan 3,89 m dan periode gelombang signifikan 7,89 s. Gambar *towing* dengan *software* simulasi *time domain*. pada 4.17 dan 4.18.



Gambar 4. 17 Pemodelan sistem *towing* pada *Software software simulasi time domain* tampak samping



Gambar 4. 18 Model AHTS *MP Premier* pada *Software software simulasi time domain* tampak samping

Gambar 4.17 dan gambar 4.18 menunjukkan pemodelan sistem towing dimana AHTS *MP Premier* dan FSO *Arco Ardjuna* terhubung oleh *towing line*. Sesuai dengan batasan masalah pada tugas akhir ini, struktur yang berada pada paling belakang dianggap sebagai AHTS dengan tipe yang sama dimana fungsi dari AHTS pada bagian belakang menjaga kecepatan dari FSO *Arco Ardjuna*.

Pada pemodelan *towing, surface* yang ditampilkan gambar 4.17 dan 4.18 hanya *hull* dari masing-masing struktur saja. Perlu diketahui, *inputan* struktur seperti RAO Struktur, *principal dimension, displacement*, dan lain sebagainya yang dibutuhkan dalam pemodelan dengan *Software software* simulasi *time domain* tidak dipengaruhi oleh visual yang disajikan. tampilan visual pada *software* hanya digunakan sebagai visualisasi tanpa mempengaruhi analisa.

4.4. Analisa Gerakan AHTS *MP Premier* pada Operasi *Towing*

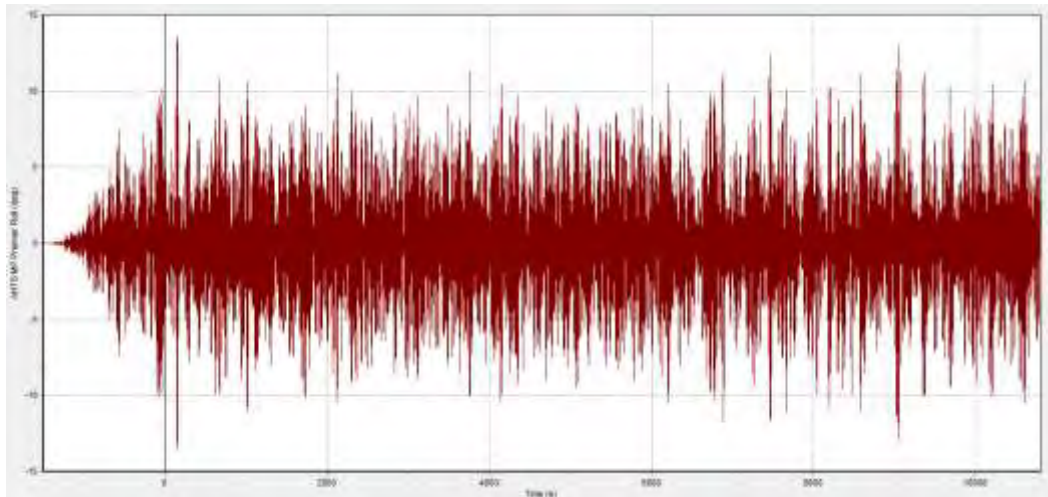
Setelah pemodelan sistem operasi towing, langkah selanjutnya adalah menganalisa gerakan dari AHTS *MP Premier* pada kondisi tersebut. Analisa gerakan AHTS *MP Premier* dibantu dengan menggunakan *software simulasi time domain* dimana akan diketahui gerakan AHTS *MP Premier* yang dipengaruhi oleh keadaan lingkungan dan sistem *towing*.

Analisa gerakan AHTS *MP Premier* selama melakukan operasi *towing* ditinjau dalam 3 arah pembebanan, yaitu 180°, 150°, dan 120°. Dikarenakan AHTS *MP Premier* melaju, diharapkan ketiga arah pembebanan tersebut memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap gerakan yang ditimbulkan. Gerakan yang dianalisa dari AHTS *MP Premier* berdasar pada kriteria *seakeeping* dari olson (1978) yaitu *roll, pitch, dan heave (displacement, velocity, acceleration)*.

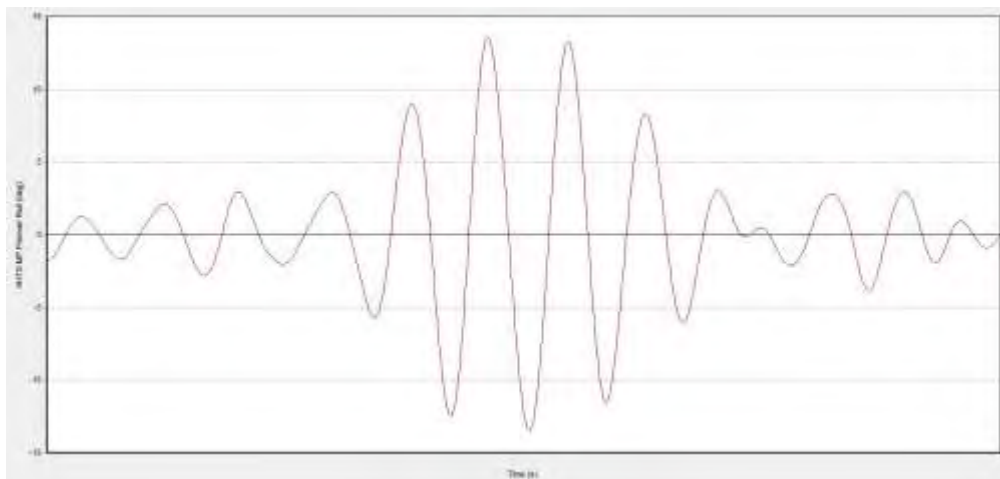
Metode yang digunakan dalam melakukan analisa gerakan AHTS *MP Premier* menggunakan simulasi *time domain*. Output *time domain* adalah respon pada AHTS *MP Premier* yang terjadi pada tiap waktu yang fluktuatif pada tiap waktunya. nilai yang dihasilkan akan menyerupai pola gelombang acak sehingga perlu dilakukan pengolahan data kembali dengan metode statistik untuk melihat nilai rata-rata ataupun nilai signifikan pada tiap gerakan yang dihasilkan.

4.4.1. Analisa Gerakan *Roll* AHTS *MP Premier* pada Operasi *Towing*

Gambar *output time history* yang ditampilkan hanya pada gerakan *roll* maksimum saja. Pada gerakan *roll* AHTS *MP Premier* selama beroperasi, gerakan yang terbesar berada pada arah pembebanan 120° dengan kondisi AHTS *MP Premier* 85% *fuel tank* ketika berada di laut cina selatan sesuai dengan gambar 4.19.



Gambar 4. 19 Rekaman motion *roll* AHTS *MP Premier* 85% *fuel tank* pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading* 120°



Gambar 4. 20 Pembesaran pada nilai maksimum rekaman motion *roll* AHTS *MP Premier* 85% *fuel tank* pada laut cina selatan dengan *heading* 120°

Rekaman gerakan *roll* pada gambar 4.19 tercatat memiliki nilai amplitude pada tiap waktu dalam kurun 10800 detik. Rekaman tersebut diolah kembali dengan metode statistik untuk mendapatkan nilai *amplitude average roll* dan *amplitude significant roll* pada kondisi tersebut. Setelah data tersebut diolah didapat nilai signifikan dan rata-rata pada kondisi operasi AHTS MP Premier pada tabel 4.7

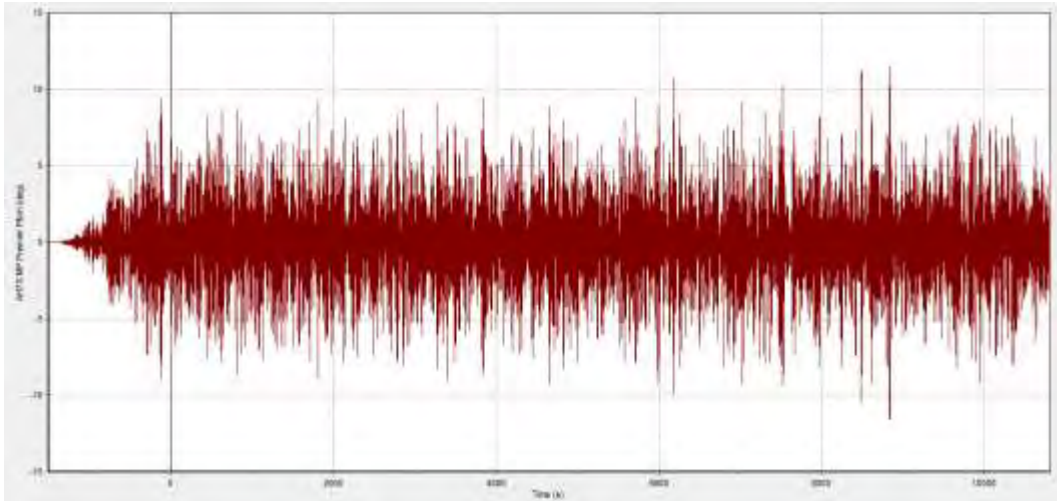
Tabel 4. 7 Roll AHTS MP Premier
pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi

Loading Condition	Full Load			85% Load Condition			69% Load Condition		
	180°	150°	120°	180°	150°	120°	180°	150°	120°
Sea	Laut Cina Selatan			Laut Cina Selatan			Laut Cina Selatan		
Amplitude Average Roll ($\zeta\Phi_{av}$) deg	0,002	2,625	4,466	0,003	2,64	4,526	0,002	1,474	2,488
Amplitude Significant Roll ($\zeta\Phi_s$) deg	0,003	4,200	7,145	0,004	4,224	7,241	0,003	2,359	3,985

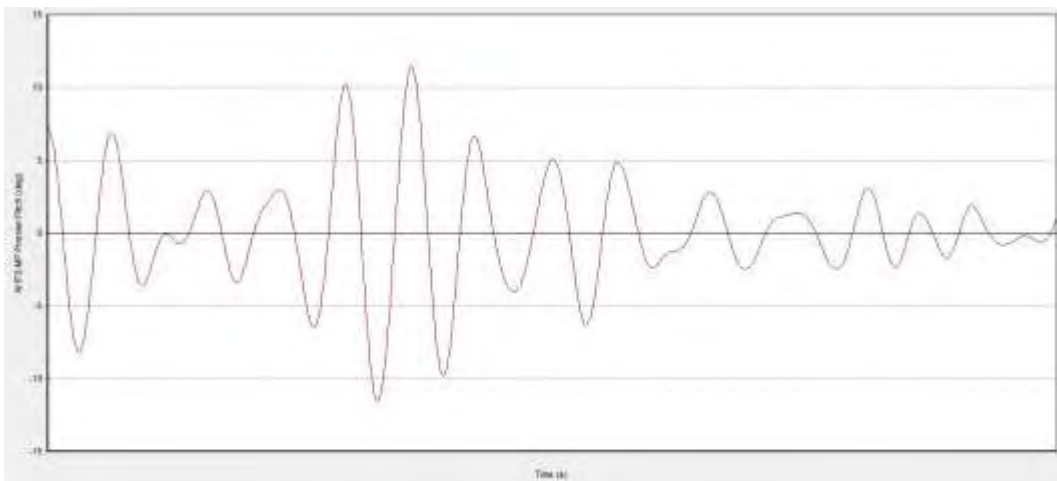
Amplitude Average Roll terbesar AHTS MP Premier berada pada kondisi *85% load condition* ketika beroperasi di perairan laut cina selatan dengan *heading* 120° sebesar 4,526 deg sedangkan untuk nilai signifikan sebesar 7,241 deg pada kondisi yang sama. Nilai rata rata dan signifikan gerakan *roll* digunakan dalam penilaian seakeeping pada analisa selanjutnya.

4.4.2. Analisa Gerakan *Pitch* AHTS MP Premier pada Operasi *Towing*

Pada gerakan *pitch*, AHTS MP Premier mengalami gerakan terbesar pada loading condition *85% load condition* dengan rekaman grafik gerakan *pitch* pada gambar 4.21



Gambar 4. 21 Rekaman motion *pitch* AHTS *MP Premier 85% fuel tank* pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading* 180°



Gambar 4. 22 Pembesaran Rekaman motion *pitch* AHTS *MP Premier 85% fuel tank* pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading* 180°

analisa gerakan *pitch* yang ditinjau hanyalah gerakan rata-rata saja tidak meninjau nilai signifikan dari gerak *pitch* tersebut hal ini disesuaikan dengan kriteria *seakeeping* olson dimana pada kriteria tersebut *pitch* hanya ditinjau pada gerakan rata-rata saja. Berikut nilai gerakan *pitch* pada setiap kondisi operasi AHTS *MP Premier*.

Tabel 4. 8 Pitch AHTS MP Premier
pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi

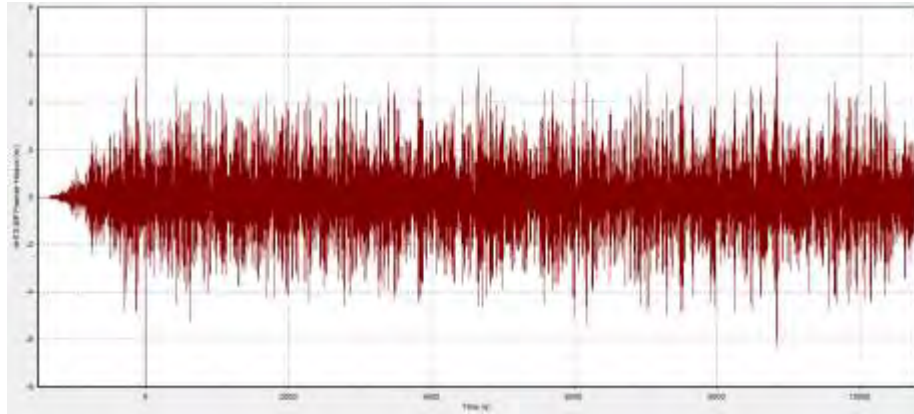
Loading Condition	Full Load			85% Load Condition			69% Load Condition		
Heading	180°	150°	120°	180°	150°	120°	180°	150°	120°
Sea	Laut Cina Selatan			Laut Cina Selatan			Laut Cina Selatan		
Amplitude Average Pitch ($\zeta_{\theta av}$) deg	3,415	3,142	2,550	3,421	3,261	2,552	2,890	2,819	2,275

Gerakan *pitch* terbesar terdapat pada AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading* 180° sesuai dengan gambar 4.22. berdasarkan rekaman tersebut dengan mengolah amplitude pada tiap waktu dengan metode statistik didapat rata-rata gerakan *pitch* sebesar 3,421 deg. Berikut tabel gerakan rata-rata *pitch* pada tiap kondisi lainnya.

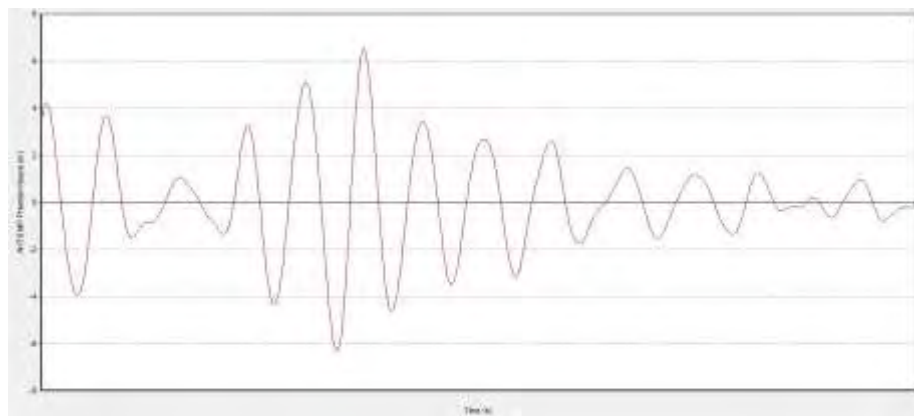
4.4.3. Analisa Gerakan Heave AHTS MP Premier pada Operasi Towing

Gerakan *heave* yang ditinjau pada AHTS MP Premier ketika melakukan operasi tidak hanya dilihat pada *displacement* saja seperti *roll* dan *pitch*. Pada moda gerakan *heave* mengacu pada *olson*, analisa yang ditinjau adalah *displacement*, *velocity*, dan *acceleration* Analisa *velocity* dan *acceleration* dilakukan berdasarkan simulasi *time domain*. Baik *heave displacement*, *velocity*, dan *acceleration* memiliki rekaman motion tersendiri. Setiap *output* diolah dengan metode statistik untuk mendapatkan nilai rata-rata maupun nilai signifikan untuk *heave displacement*, *velocity*, dan *acceleration*.

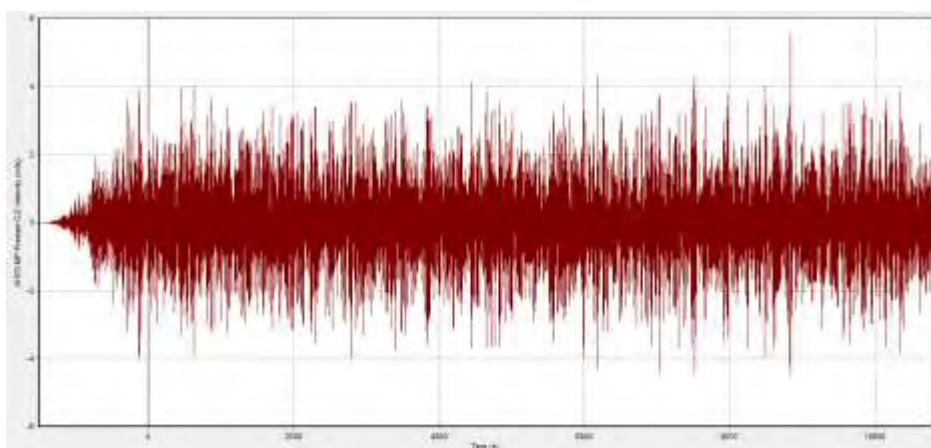
Nilai terbesar untuk *heave displacement*, *velocity*, dan *acceleration* terdapat pada AHTS 85% fuel tank ketika berada di laut cina selatan saat kondisi operasi *towing* dengan *heading* 180°. Berikut rekaman nilai elevasi pada tiap analisa untuk gerakan *heave*.



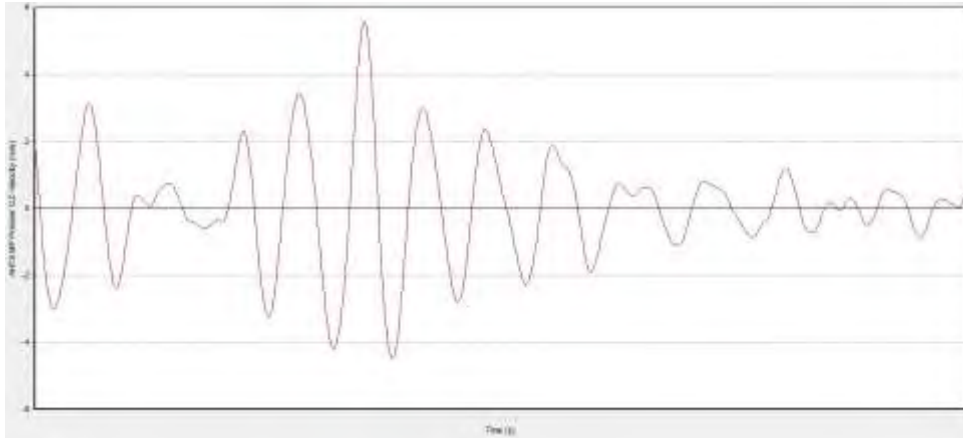
Gambar 4. 23 Rekaman *heave displacement* AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut cina selatan kondisi operasi *towing heading 180°*



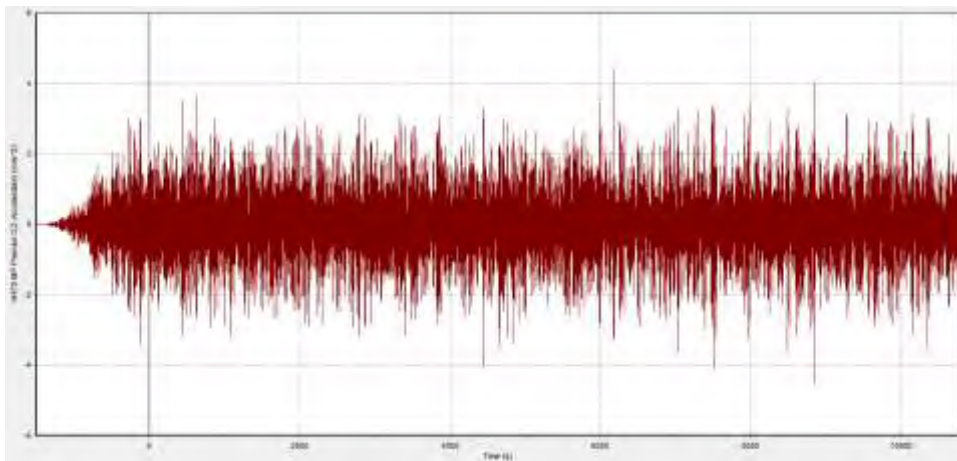
Gambar 4. 24 Pembesaran grafik *heave displacement* AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading 180°*



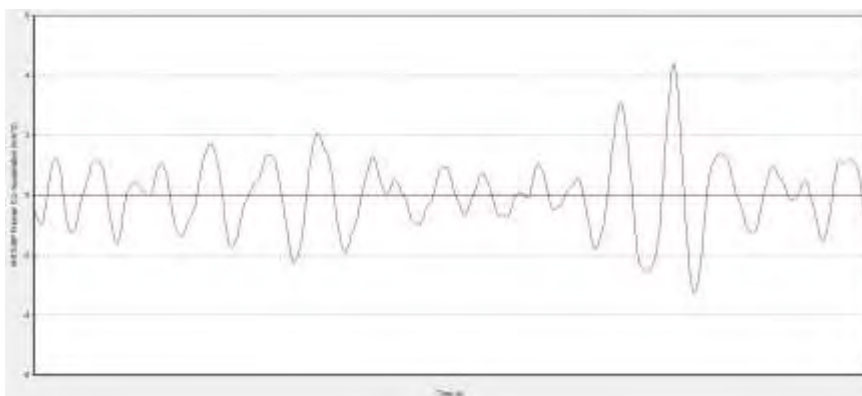
Gambar 4. 25 Rekaman *heave velocity* AHTS MP Premier 85% fuel tank pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading 180°*



Gambar 4. 26 Pembesaran Rekaman *heave velocity* AHTS *MP Premier 85% fuel tank* pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading 180°*



Gambar 4. 27 Rekaman *heave acceleration* AHTS *MP Premier 85% fuel tank* pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading 180°*



Gambar 4. 28 Pembesaran Rekaman *heave acceleration* AHTS *MP Premier 85% fuel tank* pada laut cina selatan kondisi operasi *towing* dengan *heading 180°*

Berdasarkan rekaman pada gambar 4.23 hingga 4.28 dapat ditentukan nilai rata-rata dan nilai signifikan untuk *heave displacement*, *velocity*, dan *acceleration*. Nilai *significant heave displacement* pada AHTS MP Premier terbesar didapat pada kondisi 85% *fuel tank* ketika berada di perairan laut cina selatan dengan *heading* 180° sebesar 3,017 m. Nilai *significant heave velocity* pada AHTS MP Premier terbesar didapat pada kondisi 85% *fuel tank* ketika berada di perairan laut cina selatan dengan *heading* 180° sebesar 2,362 m/s. Nilai *significant heave acceleration* pada AHTS MP Premier terbesar didapat pada kondisi 85% *fuel tank* ketika berada di perairan laut cina selatan dengan *heading* 180° sebesar 1,980 m/s². Berikut adalah nilai signifikan untuk *heave displacement*, *velocity*, dan *acceleration* pada kondisi, perairan, dan *heading* lainnya.

Tabel 4. 9 *heave displacement*, *velocity*, dan *acceleration* AHTS MP Premier pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi

Loading Condition	Full Load			85% Load Condition			69% Load Condition		
	180°	150°	120°	180°	150°	120°	180°	150°	120°
Heading	180°	150°	120°	180°	150°	120°	180°	150°	120°
Sea	Laut Cina Selatan			Laut Cina Selatan			Laut Cina Selatan		
Significant Heave Displacement ζΦzs m	2,992	2,787	2,389	3,017	2,872	2,409	2,3756	2,338	2,012
Significant Heave Velocity ζΦzs m/s	2,361	2,21	2,064	2,362	2,278	2,068	1,979	1,954	1,836
Significant Heave Acceleration ζΦzs m/s ²	1,977	1,836	1,831	1,980	1,891	1,834	1,741	1,694	1,693

4.5. Analisa slamming dan greenwater AHTS MP Premier Operasi Towing

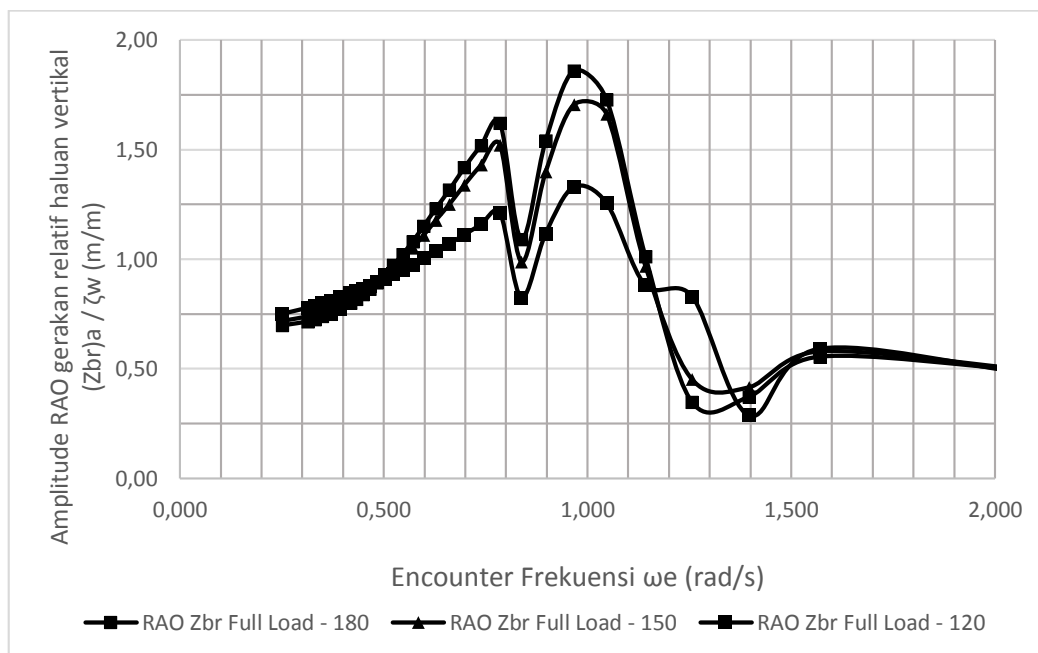
Dalam melakukan operasi *towing* dari *Jurong port singapore* menuju *ardjuna marine terminal*, analisa *slamming dan greenwater* AHTS MP Premier juga ditinjau dalam tugas akhir ini. Analisa *slamming dan greenwater* pada AHTS MP Premier dibagi dalam 3 kondisi disesuaikan dengan analisa gerakan sebelumnya yaitu pada kondisi AHTS MP Premier *full load* ketika berada di laut cina selatan, AHTS MP Premier *85% Fuel tank* ketika berada di laut cina selatan,

dan AHTS *MP Premier* 69% fuel tank ketika berada di perairan laut Jawa. Pada tiap skenario juga terbagi lagi dalam 3 *heading* yaitu 180°, 150°, dan 120°.

Analisa *slamming* dan *greenwater* pada tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui *probability slamming* dan *greenwater* pada AHTS *MP Premier*. Nilai *probability* nantinya akan digunakan pada analisa selanjutnya dalam mengetahui kelayakan AHTS *MP Premier* selama operasi berlangsung dalam memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

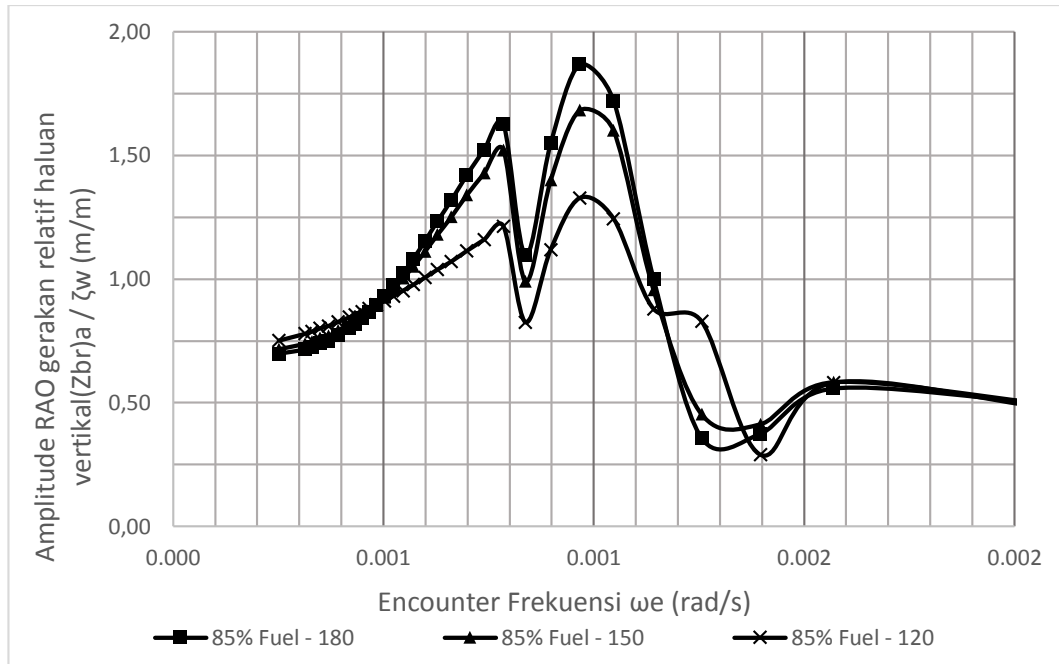
4.5.1. Analisa Gerakan Relatif Haluan Vertikal AHTS *MP Premier*

Pada analisa sebelumnya, telah didapat RAO Pada AHTS *MP Premier* pada gelombang reguler. Langkah selanjutnya adalah menghitung gerak vertikal haluan dari AHTS *MP Premier*. Posisi tinjau pada analisa *slamming* dan *greenwater* pada semua kondisi baik *full load*, 85% *fuel tank*, dan 69% *fuel tank* berada pada tiap FP sesuai dengan kriteria ABS *guide for slamming loads and strength assessment for vessels*. Berikut grafik RAO gerakan relatif haluan vertikal pada tiap *loading condition*.



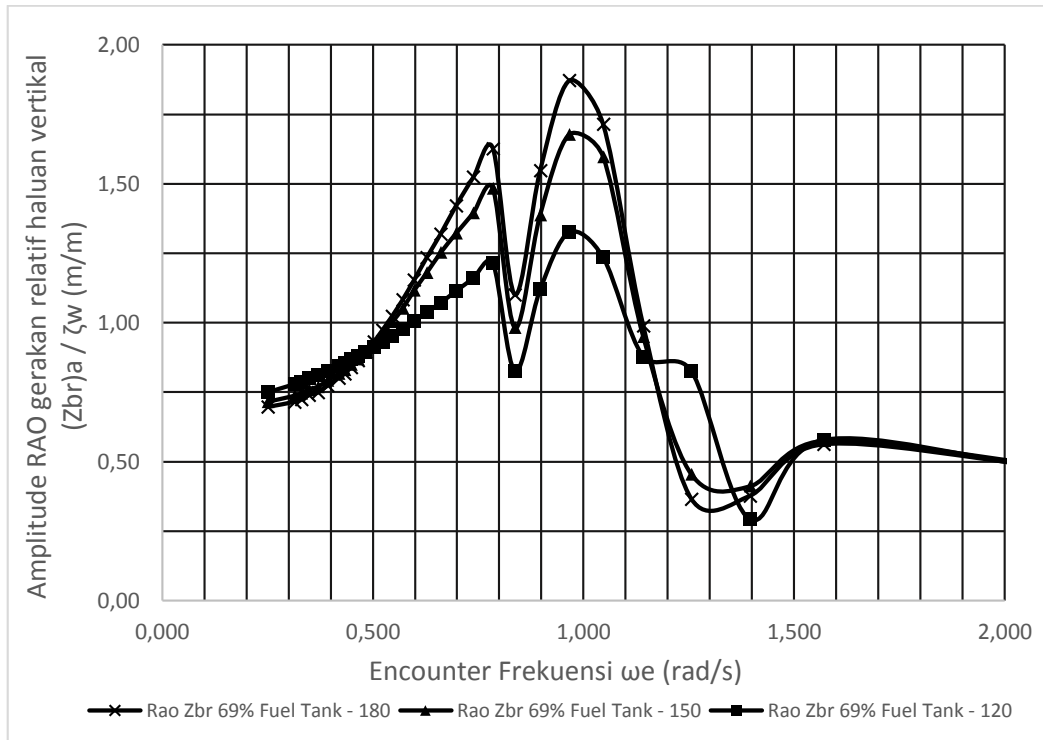
Gambar 4.26 Grafik RAO gerakan relatif haluan vertikal
AHTS *MP Premier* Full Load Kecepatan 5 Knot

Pada AHTS *MP Premier Full Load* gerakan relatif vertikal haluan terbesar didapat pada *heading* 180 deg sebesar 1,860 m/m. Sedangkan gerakan relatif vertikal haluan pada *heading* 150 deg sebesar 1,483 m/m dan 120 deg sebesar 1,324 m/m.



**Gambar 4. 29 Grafik RAO gerakan relatif haluan vertikal
AHTS *MP Premier* 85% fuel tank Kecepatan 5 Knot**

Nilai gerakan relatif vertikal haluan AHTS *MP Premier* pada kondisi 85% *fuel tank* mengalami kenaikan namun tidak signifikan dikarenakan perbedaan sarat antar *full load* dan 85% *fuel tank* tidak signifikan. Nilai gerak relatif vertikal haluan AHTS *MP Premier* 85% *fuel tank* terbesar terdapat pada *heading* 180 deg sebesar 1,865 m/m. Nilai gerakan relatif vertikal pada *heading* 150 deg adalah 1,682 m/m sedangkan pada *heading* 120 deg adalah 1,326 m/m.



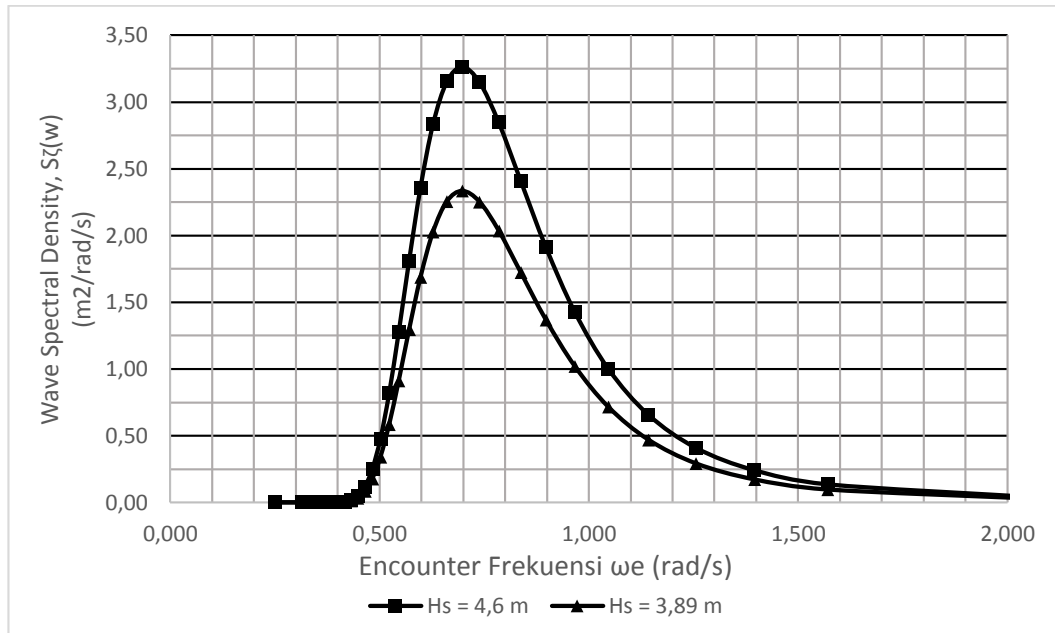
**Gambar 4. 30 Grafik RAO gerakan relatif haluan vertikal
AHTS MP Premier 69% Fuel Tank Kecepatan 5 Knot**

Nilai gerakan relatif vertikal haluan pada AHTS MP Premier 69% fuel tank terbesar terdapat pada *heading* 180 deg sebesar 1,871 m/m. Sedangkan nilai gerakan relatif vertikal haluan 150 deg sebesar 1,705 m/m dan pada 120 deg sebesar 1,330 m/m

Berdasarkan RAO gerakan relatif vertikal haluan pada tiap *heading* dengan mengkombinasikan dengan spektra gelombang maka akan didapat respon gerakan AHTS MP Premier selama beroperasi nantinya.

4.5.2. Analisa Spektrum Gelombang JONSWAP

Spektrum gelombang yang digunakan pada analisa operasi towing adalah spektra JONSWAP. Spektra gelombang yang diperlukan adalah spektra pada Hs 4,6 m sesuai dengan daerah operasi pada laut selatan dan Hs 3,89 sesuai dengan operasi pada perairan laut jawa. Berikut spektrum gelombang JONSWAP pada Hs tersebut.



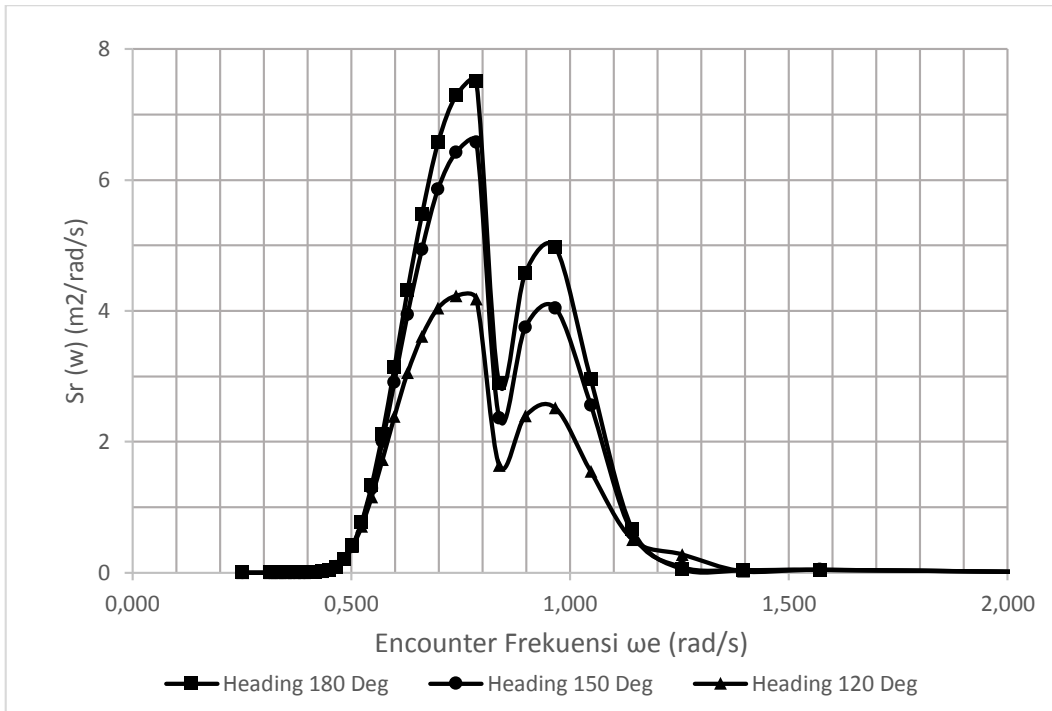
Gambar 4. 31 Spektrum Gelombang JONSWAP

4.5.3. Analisa Respon Gerakan AHTS MP Premier pada Operasi Towing

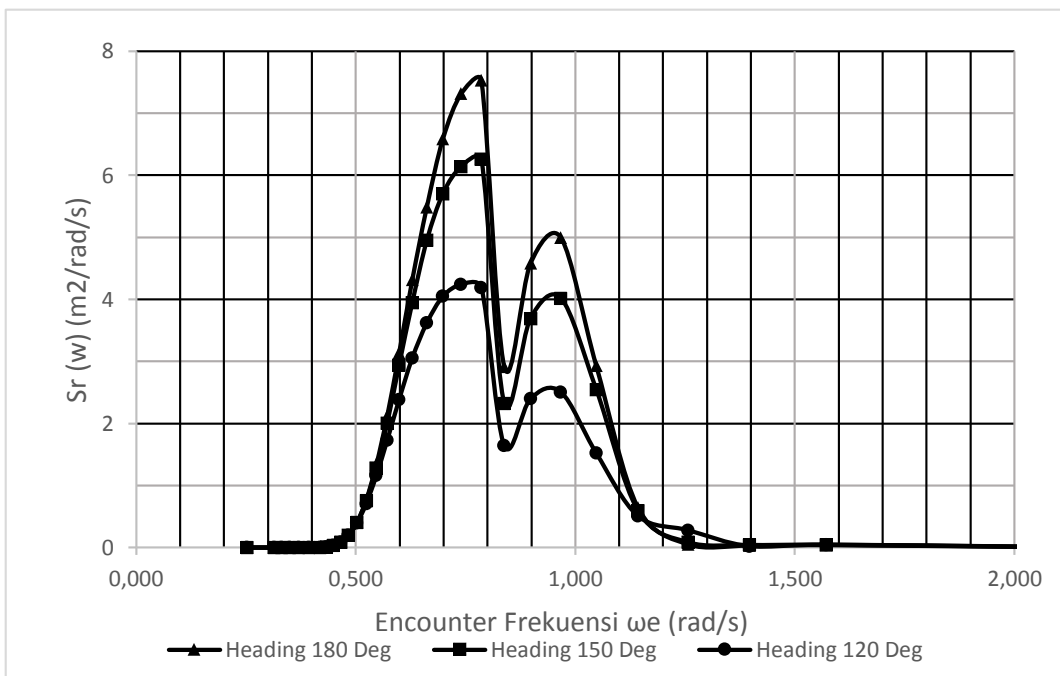
Setelah didapat RAO gerak relatif vertikal haluan AHTS MP Premier pada gelombang reguler dan spektra gelombang JONSWAP pada tiap H_s daerah operasi *towing* maka kita dapat melakukan analisa respon spektra AHTS MP Premier selama beroperasi nantinya.

Respon spektra AHTS MP Premier pada tiap skenario diperoleh berdasarkan hasil perkalian kuadrat RAO gerak relatif vertikal haluan dengan spektra gelombang sesuai kondisi. Untuk RAO AHTS MP Premier *Full Load* dan *85% fuel tank* dikalikan dengan spektra gelombang JONSWAP pada H_s 4,6 m sesuai dengan daerah operasi *loading condition* tersebut yang berada di laut cina selatan. Sedangkan pada AHTS MP Premier 69% fuel tank, hasil analisa RAO dikalikan dengan spektra JONSWAP dengan H_s 3,89 sesuai dengan operasi pada perairan laut jawa.

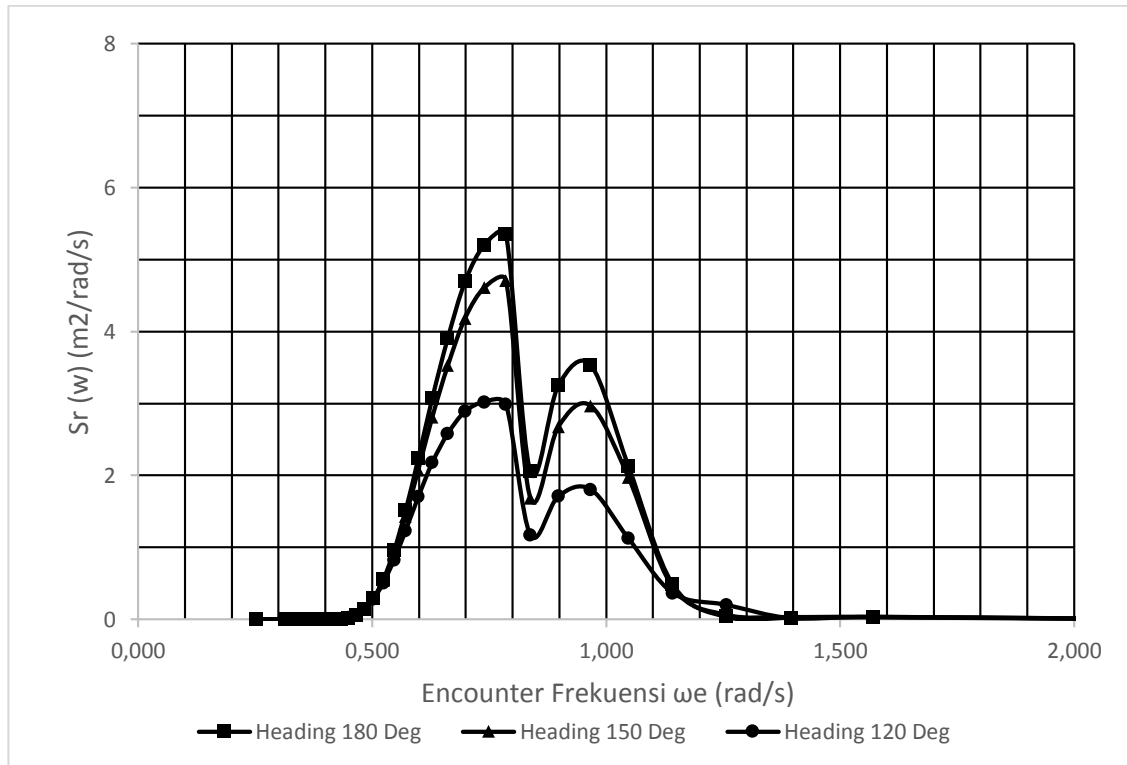
Berdasarkan spektra respon maka didapat nilai varian spektra respon gerak relatif vertikal haluan, varian spektra respon kecepatan reatif vertikal haluan, dan varian spektra respon percepatan realatif vertikal haluan. Hasil tersebut digunakan dalam perhitungan *greenwater* dan *slamming* nantinya.



Gambar 4. 32 Respon Spektra Gerak Relatif Vertikal Haluan AHTS *MP Premier* Full Load kecepatan 5 Knot pada Perairan Laut Cina Selatan



Gambar 4. 33 Respon Spektra Gerak Relatif Vertikal Haluan AHTS *MP Premier* 85% Fuel Tank kecepatan 5 Knot pada Perairan Laut Cina Selatan



Gambar 4. 34 Respon Spektra Gerak Relatif Vertikal Haluan AHTS MP Premier 69% Fuel Tank kecepatan 5 Knot pada Perairan Laut Jawa

Berdasarkan grafik yang tersaji diatas, Respon spektra Aterbesar HTS MP Premier *full load* ketika beroperasi di laut cina selatan ketika melakukan operasi *towing* dengan kecepatan 5 knot pada pada *heading* 180 deg adalah 7,502 m²/(rad/s) . sedangkan pada *heading* 150 deg nilai respon spektra terbesar adalah 6,260 m²/(rad/s) dan pada *heading* 120 deg nilai respon spektra terbesar AHTS MP Premier adalah 4,228 m²/(rad/s).

Pada AHTS MP Premier 85% fuel tank, respon terbesar terdapat pada *heading* 180 deg dengan nilai sebesar 7,532. Respon spektra pada *heading* 150 deg terbesar senilai 6,579 m²/(rad/s) dan respon spektra terbesar pada *heading* 120 deg sebesar 4,237 m²/(rad/s). Nilai spektra respon pada kondisi AHTS MP Premier 85% fuel tank pada tiap *heading* lebih besar dibandingkan pada kondisi *full load* namun perubahan nilai tidak signifikan dikarenakan perbedaan kondisi yang tidak signifikan.

Sedangkan nilai pada AHTS MP Premier 69% fuel tank terbesar terdapat pada *heading* 180 deg sebesar 5,353 m²/(rad/s). Nilai respon spektra terbesar pada

heading 150 deg senilai 4,712 m²/(rad/s). Nilai respon spektra terbesar pada *heading* 120 deg adalah 3,022 m²/(rad/s). Nilai respon spektra pada kondisi 69% *fuel tank* cenderung lebih kecil dikarenakan spektra gelombang yang digunakan adalah spektra gelombang pada Hs 3,89 sesuai dengan daerah operasi pada perairan laut jawa.

4.5.4. Peluang Kejadian *Slamming* AHTS MP Premier pada Operasi Towing

Berdasarkan harga spektra respon AHTS MP Premier pada tiap kondisi dan *heading* maka dapat dilakukan analisa perhitungan kemungkinan terjadinya *slamming* pada AHTS MP Premier selama beroperasi nantinya. Pada perhitungan peluang terjadinya *slamming*, dikarenakan nilai Froude number pada AHTS MP Premier senilai 0,099 dan mengacu pada Tasai dalam menentukan nilai V_{th} maka kecepatan ambang batas atau disebut *threshold velocity* AHTS MP Premier adalah 0,5 m/det.

Hasil perhitungan untuk peluang *slamming* pada titik tinjau FP tiap skenario operasi dan *heading* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. 10 *Probability slamming* AHTS MP Premier pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi

Slamming AHTS MP Premier		
Titik Tinjau FP		
Kecepatan 5 Knot		
Kondisi	Heading	Pr(slam)
Full Load - Hs 4,6 m	180	0,011477
	150	0,005448
	120	0,000745
85% Load - Hs 4,6 m	180	0,012592
	150	0,007030
	120	0,000945
69% Load - Hs 3,89 m	180	0,002608
	150	0,001334
	120	0,000087

Berdasarkan Tabel 4.10 dapat disimpulkan selama AHTS MP Premier melakukan *towing* kemungkinan *slamming* terbesar terjadi pada kondisi *85% fuel tank* ketika berada di laut cina selatan pada *heading* 180 deg sebesar 0,0125.

4.5.5. Peluang Kejadian *Greenwater AHTS MP Premier* pada Operasi *Towing*

Berdasarkan Respon Spektra gerakan haluan vertikal relatif AHTS MP Premier pada tiap skenario operasi *towing* dapat dilakukan analisa peluang kejadian *greenwater* pada tiap *loading condition*. Peluang terjadinya *greenwater* ditinjau pada titik yang sejajar dengan F_p . Dengan didapatkan nilai luasan di bawah spektra respon gerakan relatif dan nilai tinggi *freeboard* pada tiap *loading condition* maka didapat nilai peluang terjadinya *greenwater* sebagai berikut.

Tabel 4. 11 *Probability greenwater AHTS MP Premier* pada tiap arah pembebanan dan kondisi operasi

Greenwater AHTS MP Premier		
Titik Tinjau		
Kecepatan 5 Knot		
Kondisi	Heading	Pf(greenwater)
Full Load - Hs 4,6 m	180	0,0174140
	150	0,0088637
	120	0,0014608
85% Load - Hs 4,6 m	180	0,0143525
	150	0,0081552
	120	0,0011654
69% Load - Hs 3,9 m	180	0,0020709
	150	0,0009609
	120	0,0000546

Berdasarkan Tabel 4.11 dapat disimpulkan selama AHTS MP Premier melakukan *towing* kemungkinan *greenwater* terbesar terjadi pada kondisi *Full Load* ketika berada di laut cina selatan pada *heading* 180 deg sebesar 0,0174.

4.6. Evaluasi Kriteria *Seakeeping*.

Sebelumnya kita telah melakukan analisa *motion*, *slamming*, dan *greenwater* AHTS *MP Premier* selama beroperasi yang terbagi dalam 3 skenario dengan 3 variasi *heading* pada tiap skenario. Nilai-nilai pada tiap analisa pada tahap ini akan dibandingkan dengan kriteria-kriteria *seakeeping* berdasarkan oslon (1978) untuk *motion* dan kriteria *seakeeping* menurut yamamoto (1984). Berikut detail Kriteria *Seakeeping* menurut Olson (1978) dan Yamamoto (1984) sebagai acuan *seakeeping* AHTS *MP Premier* dalam melakukan operasi *towing*

Tabel 4. 12 Tabel Kriteria *seakeeping*

Name	Type Criteria	Detail Criteria
Oslon (1978)	General Criteria	12 deg single amplitude average roll
		3 deg single amplitude average pitch
		Significant Heave Acceleration $\leq 0.4g$ (3,924 m/s ²) no people working on deck
		Significant Heave Acceleration $\leq 0.2g$ (1,962 m/s ²) no people working on deck
	Helicopter Criteria	12,8 deg double amplitude significant roll
		2,55 m double amplitude heave displacement
2,13 m/s significant heave velocity		
Yamamoto (1984)	Slamming and Greenwater	0,2 Probability slamming
		0,2 Probability greenwater

Berdasarkan kriteria-kriteria diatas nantinya akan diketahui apakah AHTS *MP Premier* memiliki kelayakan pada saat beroperasi saat melakukan operasi *towing*.

4.6.1. Evaluasi Kriteria *Seakeeping* AHTS *MP Premier* pada operasi *towing*

Berikut adalah tabel evaluasi kriteria *seakeeping* AHTS *MP Premier* saat melakukan operasi *towing*.

Tabel 4. 13 Tabel Evaluasi *seakeeping* AHTS *MP Premier*

Criteria	Detail Criteria	Unit	Full Load			85% Load Condition			69% Load Condition		
			180°	150°	120°	180°	150°	120°	180°	150°	120°
General Criteria	12 deg single amplitude average roll	deg	0,002	2,625	4,466	0,003	2,64	4,526	0,002	1,474	2,488
	3 deg single amplitude average pitch	deg	3,415	3,142	2,550	3,421	3,261	2,552	2,890	2,819	2,275
	Significant Heave Acceleration $\leq 0.4g$ (3,924 m/s ²)	m/s ²	1,977	1,836	1,831	1,980	1,891	1,834	1,741	1,694	1,693
	Significant Heave Acceleration $\leq 0.2g$ (1,962 m/s ²)	m/s ²	1,977	1,836	1,831	1,980	1,891	1,834	1,741	1,694	1,693
Helicopter Criteria	12,8 deg double amplitude significant roll	deg	0,006	8,400	14,290	0,008	8,448	14,482	0,006	4,718	7,970
	2,55 m double amplitude heave displacement	m	5,984	5,574	4,778	6,034	5,744	4,818	4,7512	4,676	4,024
	2,13 m/s significant heave velocity	m/s	2,361	2,21	2,064	2,362	2,278	2,068	1,979	1,954	1,836
Slamming and Deck Wetness Criteria	0,2 Probability slamming	-	0,01147	0,00544	0,00074	0,01259	0,00702	0,00094	0,00260	0,00133	0,00008
	0,2 Probability greenwater	-	0,01741	0,00886	0,00146	0,01435	0,00815	0,00116	0,00207	0,00096	0,00005

Berdasarkan kriteria-kriteria *seakeeping* yang ditentukan dapat disimpulkan bahwa dalam melakukan operasi *towing*, AHTS *MP Premier* dinyatakan cukup baik beroperasi pada kondisi tersebut. Dapat dilihat berdasarkan pada tabel 4.13 nilai *motion* pada ketentuan *general criteria* tidak melewati batas, terkecuali pada *heading* 180 deg baik *full load* dan *85% fuel tank* perlu diperhatikan dikarenakan pada kondisi tersebut nilai *motion pitch* melebihi kriteria *seakeeping* yang ditentukan walaupun selisih yang dihasilkan tidak begitu besar.

Namun pada *helicopter criteria* dapat disimpulkan bahwa AHTS *MP Premier* selama melakukan operasi *towing* tidak diijinkan untuk melakukan *helicopter criteria*. Perlu diketahui *helicopter criteria* digunakan tidak hanya untuk kriteria pendaratan helikopter ke atas kapal namun dapat juga diasumsikan sebagai kriteria pemuatan, misalnya saat melakukan pemindahan awak kapal ke kapal lain ataupun melakukan operasi pemindahan barang dari kapal ke kapal lain. Pada tabel

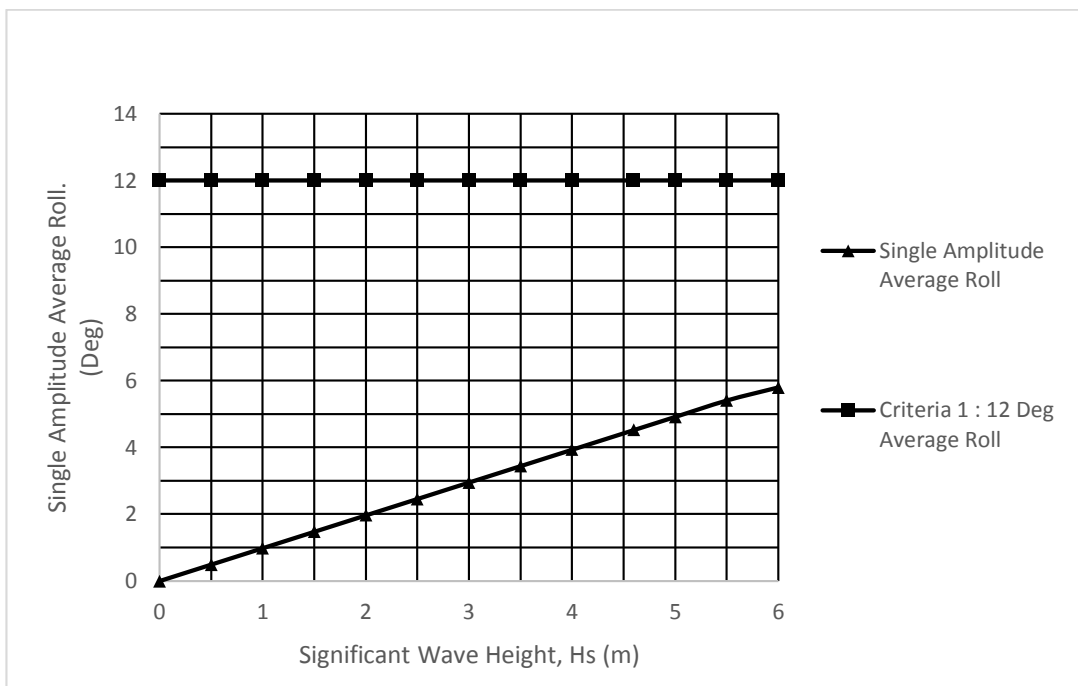
4.13 dipastikan untuk melakukan *helicopter criteria* dapat dilakukan pada saat Hs jauh di bawah nilai yang dianalisa.

Sedangkan pada kriteria *slamming* dan *greenwater* saat AHTS MP Premier melakukan operasi *towing*, peluang terjadinya *slamming* dan *greenwater* AHTS MP Premier pada tiap skenario dan *heading* tidak ada yang melebihi kriteria *seakeeping* yang ditentukan. Dapat disimpulkan bahwa AHTS MP Premier selama beroperasi tidak akan berpeluang mengalami *slamming* dan *greenwater* yang berlebihan.

4.6.2. Evaluasi Kriteria *Seakeeping* AHTS MP Premier

Berdasarkan evaluasi kriteria *seakeeping* AHTS MP Premier pada saat beroperasi, dapat dilihat tabel kuning merupakan kondisi-kondisi terjadinya nilai maksimum pada tiap kriteria. Mengacu pada kondisi-kondisi tersebut dilakukan analisa lanjutan dengan variasi Hs guna mengetahui kemampuan AHTS pada tiap kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

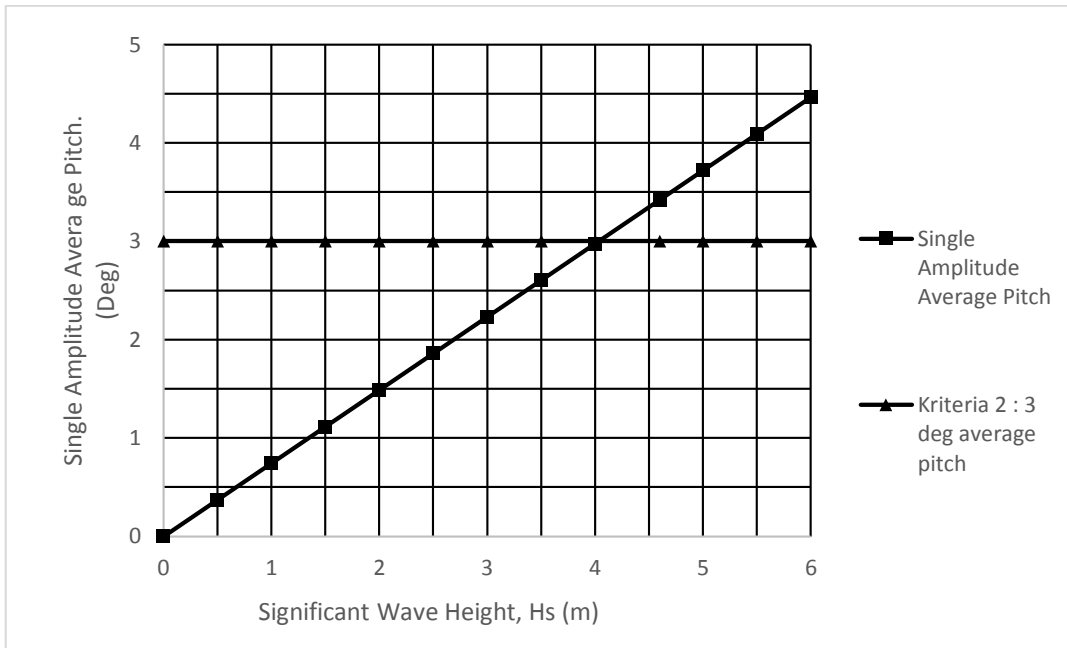
Pada *general criteria* pertama untuk *average roll*, diketahui bahwa AHTS MP Premier terbesar terdapat *heading* 120 deg pada 85% *fuel tank*. Maka dari itu disimpulkan AHTS MP Premier dapat melakukan operasinya baik di laut Cina selatan dengan Hs 4,6 m dan Laut Cina Selatan dengan Hs 3,89 m. Dengan metode yang sama pada variasi Hs 0,5 m – 6 m mengacu pada skenario yang menghasilkan nilai *average roll* maksimum AHTS MP Premier *heading* 120 deg pada 85% *fuel tank* dapat ditentukan batas *average roll* AHTS MP Premier pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada gambar 4.35.



Gambar 4. 35 Grafik Average Roll AHTS *MP Premier 85% Fuel Tank heading* 120 deg dengan batas average roll kriteria oslon

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa AHTS *MP Premier 85% Fuel Tank heading* 120 deg memiliki *average roll* yang baik. Hal ini dikarenakan nilai *average roll* hingga variasi Hs 6 m sebesar 5,804 m tidak melebihi batas kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

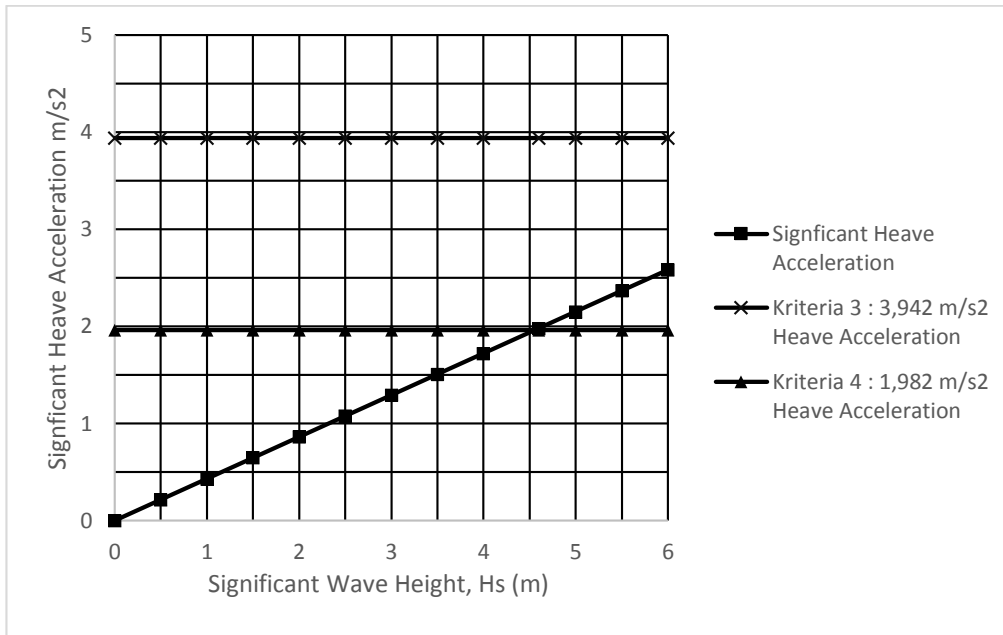
Pada kriteria kedua *3 deg single amplitude average pitch*, AHTS *MP Premier* selama melakukan operasi *towing* memiliki nilai *average pitch* terbesar pada kondisi AHTS *MP Premier 85%fuel tank* pada *heading* 180 deg sebesar 3,421 deg. dengan melakukan variasi Hs 0,5 m – 6 m dengan metode yang sama dapat ditentukan batas *average pitch* AHTS *MP Premier* pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada grafik 4.36.



Gambar 4. 36 Grafik Average Pitch AHTS *MP Premier 85% Fuel Tank heading* 180 deg dengan batas average pitch kriteria oslon

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa batas AHTS *MP Premier 85% Fuel Tank heading* 180 deg dapat memenuhi kriteria *average roll* hingga batas analisa terdekat Hs 4 m dengan nilai 2,97 deg. Selibhnya pada analisa Hs diatas 4 m dinyatakan AHTS *MP Premier* tidak dapat memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

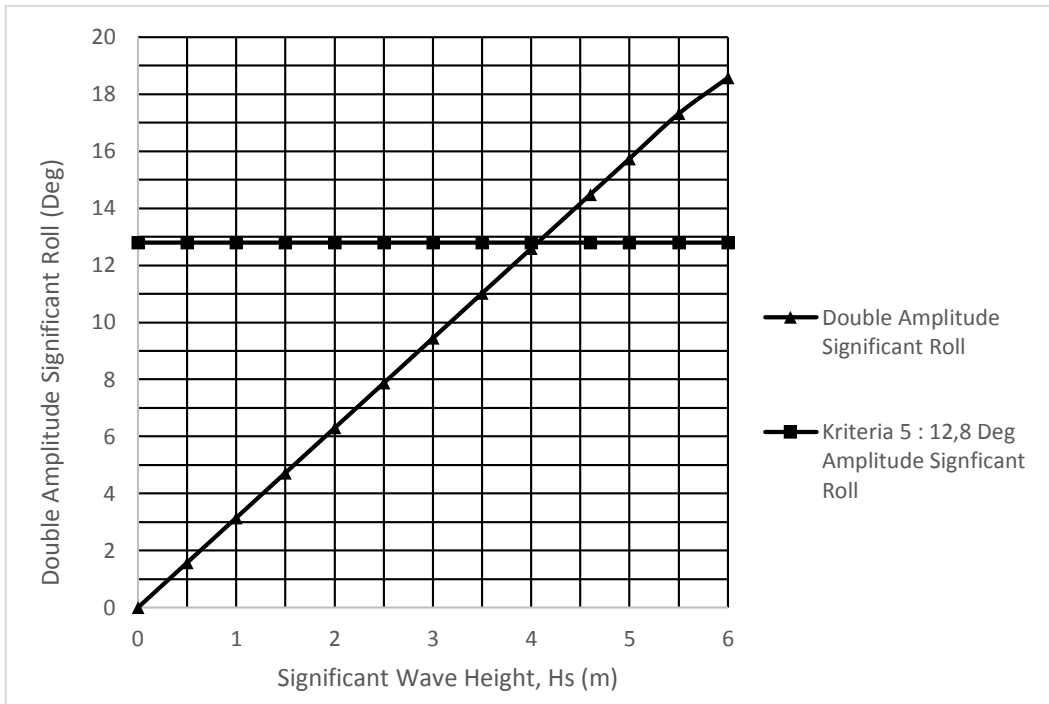
Pada kriteria ketiga dan keempat, 3,942 m/s² *Significant Heave Acceleration* dan 1,962 m/s² *Significant Heave Acceleration* dan, AHTS *MP Premier* selama melakukan operasi *towing* memiliki nilai *Significant Heave Acceleration* terbesar pada kondisi AHTS *MP Premier 85%fuel tank* pada *heading* 180 deg sebesar 1,980 m/s² . dengan melakukan variasi Hs 0,5 m – 6 m dengan metode yang sama dapat ditentukan batas *Significant Heave Acceleration* AHTS *MP Premier* pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada grafik 4.37.



Gambar 4. 37 Grafik *Significant Heave Acceleration* AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg dengan batas *Significant Heave Acceleration*

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa batas AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg dapat memenuhi kriteria 3,942 m/s2 *Significant Heave Acceleration* hingga Hs melebihi 6 m. Berdasarkan grafik diatas juga dapat disimpulkan bahwa batas AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg dapat memenuhi kriteria 1,982 m/s2 *Significant Heave Acceleration* hingga batas analisa terdekat Hs 4,6 dengan nilai 1,979 m/s2. Selebihnya pada analisa diatas Hs 4,6 m dinyatakan AHTS MP Premier tidak dapat memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

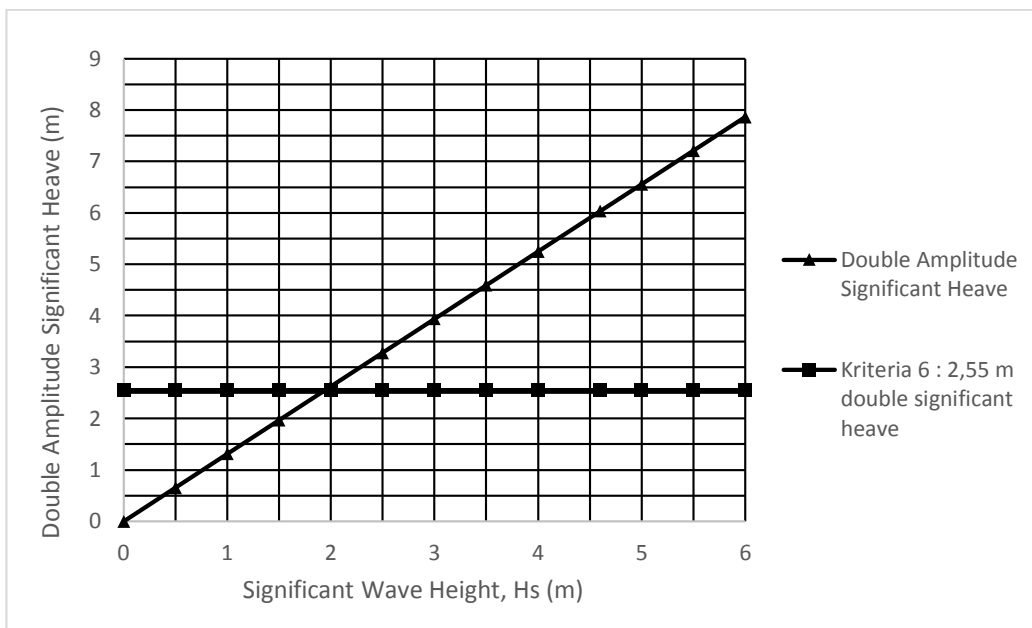
Pada kriteria kelima, 12,8 deg *double amplitude significant roll*, AHTS MP Premier selama melakukan operasi *towing* memiliki nilai *double amplitude significant roll* terbesar pada kondisi AHTS MP Premier 85% fuel tank pada heading 120 deg sebesar 14,482 deg . dengan melakukan variasi Hs 0,5 m – 6 m dengan metode yang sama dapat ditentukan batas *double amplitude significant roll* AHTS MP Premier pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada gambar 4.38.



Gambar 4. 38 *double amplitude significant roll AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 120 deg dengan batas double amplitude significant roll.*

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa batas AHTS *MP Premier 85% Fuel Tank heading 120 deg* dapat memenuhi kriteria *double amplitude significant roll* hingga batas analisa terdekat yaitu Hs 4 m dengan nilai 12,59 deg. Selebihnya pada analisa Hs diatas 4 m dinyatakan AHTS *MP Premier* tidak dapat memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

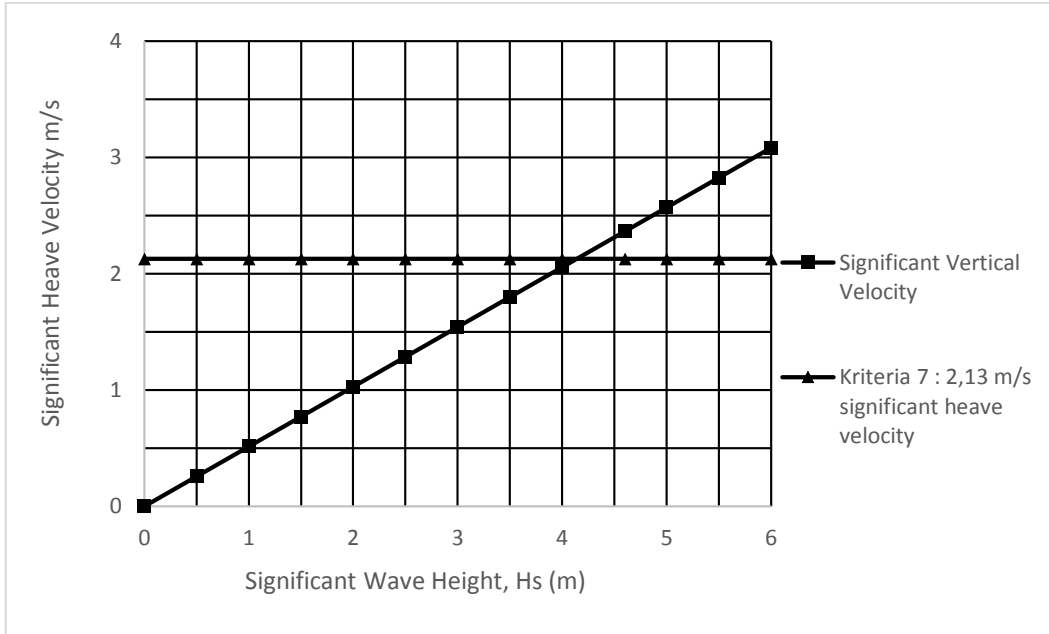
Pada kriteria keenam, 2,55 m *double significant heave displacement*, AHTS *MP Premier* selama melakukan operasi *towing* memiliki nilai *double significant heave displacement* terbesar pada kondisi AHTS *MP Premier 85% fuel tank* pada *heading 180 deg* sebesar 6,034 deg . dengan melakukan variasi Hs 0,5 m – 6 m dengan metode yang sama dapat ditentukan batas *double significant heave displacement* AHTS *MP Premier* pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada grafik 4.39.



Gambar 4. 39 Grafik *double significant heave displacement* AHTS MP Premier 85% Fuel heading 180 deg dengan batas *double significant heave displacement*

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa batas AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg dapat memenuhi kriteria *double amplitude significant roll* hingga batas analisa terdekat yaitu Hs 1,5 m dengan nilai 1,969 m. Selebihnya pada analisa Hs diatas 1,5 m dinyatakan AHTS MP Premier tidak dapat memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

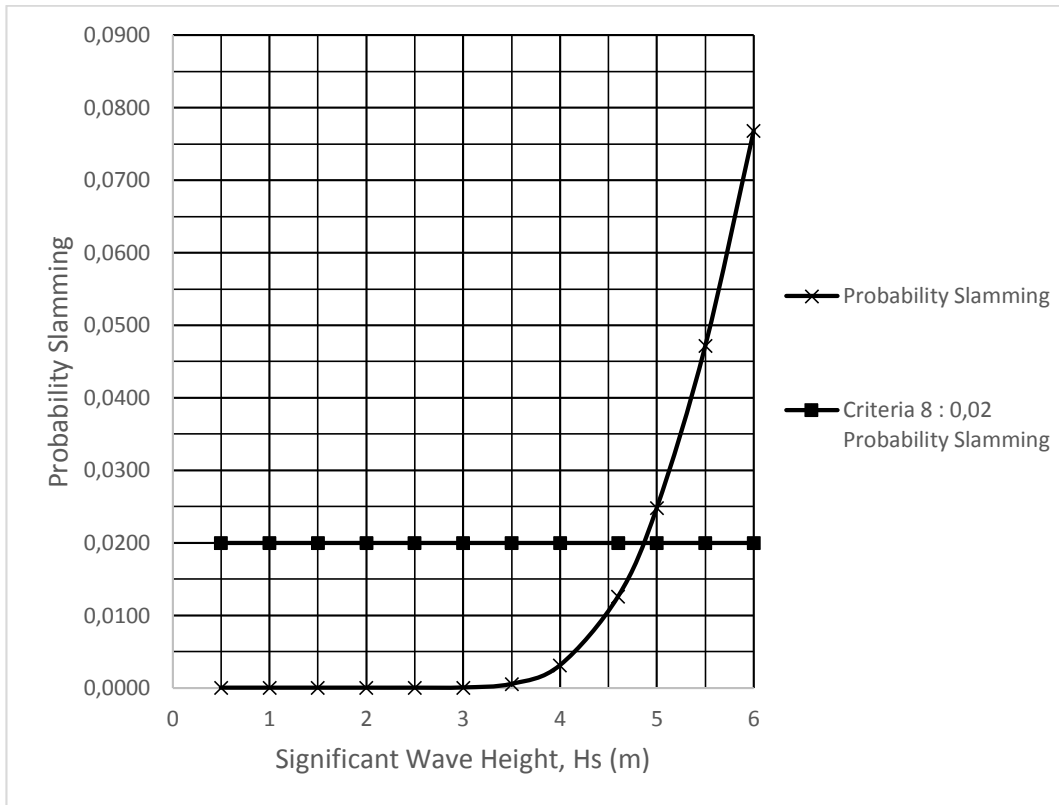
Pada kriteria ketujuh, 2,13 m/s *significant heave velocity*, AHTS MP Premier selama melakukan operasi *towing* memiliki nilai *significant heave velocity* terbesar pada kondisi AHTS MP Premier 85% fuel tank pada heading 180 deg sebesar 2,362 m/s. dengan melakukan variasi Hs 0,5 m – 6 m dengan metode yang sama dapat ditentukan batas *significant heave velocity* AHTS MP Premier pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada grafik 4.40.



Gambar 4. 40 Grafik *Significant Heave Velocity* AHTS *MP Premier 85% Fuel heading 180 deg* dengan batas *Significant Heave Velocity*.

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa batas AHTS *MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg* dapat memenuhi kriteria *double amplitude significant roll* hingga batas analisa terdekat yaitu Hs 4 m dengan nilai 2,05 m/s. Selbihnya pada analisa Hs diatas 4 m dinyatakan AHTS *MP Premier* tidak dapat memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

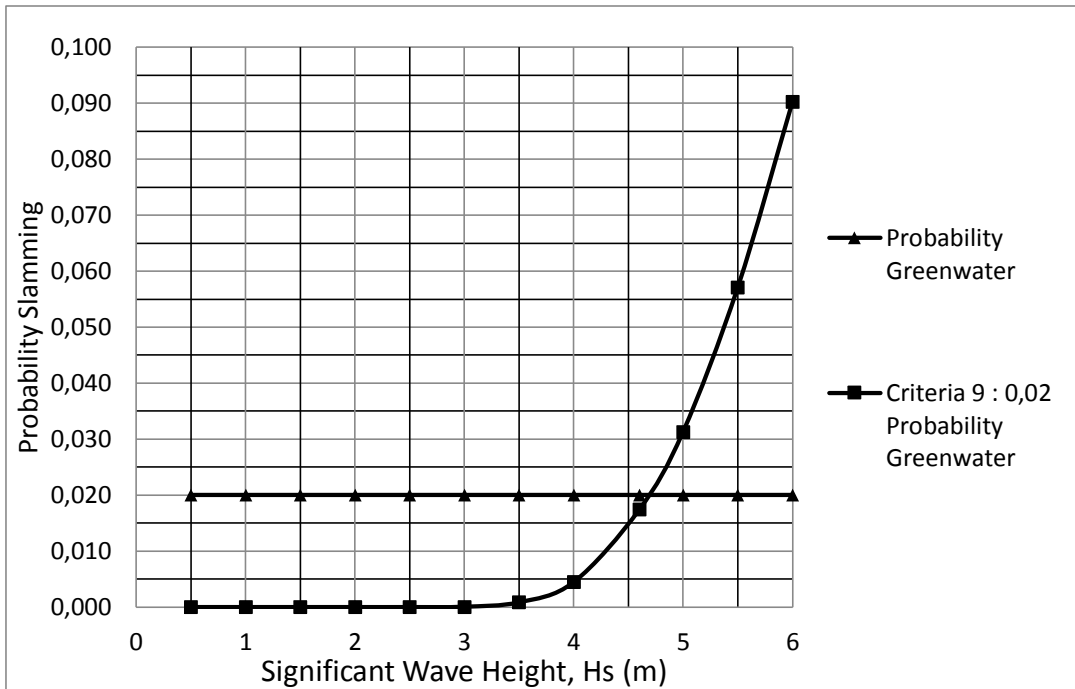
Pada kriteria ketujuh, *0,02 probability slamming*, AHTS *MP Premier* selama melakukan operasi *towing* memiliki nilai *probability slamming* terbesar pada kondisi AHTS *MP Premier 85% fuel tank* pada *heading 180 deg* sebesar 0,01259. dengan melakukan variasi Hs 0,5 m – 6 m dengan metode yang sama dapat ditentukan batas *probability slamming* AHTS *MP Premier* pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada grafik 4.41.



Gambar 4. 41 Grafik *Probability Slamming* AHTS MP Premier 85% Fuel heading 180 deg dengan batas *Probability Slamming* berdasarkan Yamamoto.

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa batas AHTS MP Premier 85% Fuel Tank heading 180 deg dapat memenuhi kriteria *Probability Slamming* hingga batas analisa terdekat yaitu H_s 4,6 m dengan nilai 0,0125. Selebihnya pada analisa H_s diatas 4,6 m dinyatakan AHTS MP Premier tidak dapat memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

Pada kriteria kedelapan, 0,02 *probability greenwater*, AHTS MP Premier selama melakukan operasi *towing* memiliki nilai *probability greenwater* terbesar pada kondisi AHTS MP Premier full load pada heading 180 deg sebesar 0,0174. dengan melakukan variasi H_s 0,5 m – 6 m dengan metode yang sama dapat ditentukan batas *probability greenwater* AHTS MP Premier pada kondisi tersebut seperti yang tersaji pada grafik 4.42.



Gambar 4. 42 Grafik *Probability Greenwater* AHTS MP Premier *Full Load* 180 deg dengan batas *Probability Greenwater* berdasarkan Yamamoto.

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa batas AHTS MP Premier *Full Load heading* 180 deg dapat memenuhi kriteria *Probability Slamming* hingga batas analisa terdekat yaitu Hs 4,6 m dengan nilai 0,0174. Selibhnya pada analisa Hs diatas 4,6 m dinyatakan AHTS MP Premier tidak dapat memenuhi kriteria *seakeeping* yang ditentukan.

4.7. Operabilitas AHTS MP Premier

Pada analisa sebelumnya telah diketahui batas kondisi gelombang maksimum AHTS MP Premier dalam mencapai aspek-aspek *seakeeping* yang ditentukan. Batas gelombang maksimum dapat dilihat pada tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Batas Hs berdasarkan kriteria *seakeeping* AHTS MP Premier

Criteria	Detail Criteria	Hs Maksimum
General Criteria	12 deg single amplitude average roll	> 6 m
	3 deg single amplitude average pitch	4 m
	Significant Heave Acceleration $\leq 0.4g$ (3,924 m/s ²)	> 6 m
	Significant Heave Acceleration $\leq 0.2g$ (1,962 m/s ²)	4,5 m
Helicopter Criteria	12,8 deg double amplitude significant roll	4 m
	2,55 m double amplitude heave displacement	1,5 m
	2,13 m/s significant heave velocity	4 m
Slamming and Deck Wetness Criteria	0,2 Probability slamming	4,5 m
	0,2 Probability greenwater	4,5 m

berdasarkan nilai tersebut dapat diketahui nilai operabilitas AHTS MP Premier selama melakukan operasi *towing* dengan membandingkan nilai-nilai pada tabel 4.14 dengan sebaran data gelombang pada gambar 3.5. berdasarkan hal tersebut diketahui nilai operabilitas yang tersaji pada tabel 4.15

Tabel 4. 15 Analisa Operabilitas AHTS MP Premier

Tp (s)		Hs (m)											
Lower	Upper	0 - 0,49	0,5 - 0,99	1 - 1,49	1,5 - 1,99	2 - 2,49	2,5 - 2,99	3 - 3,49	3,5 - 3,99	4 - 4,49	4,5 - 4,99	5 - 5,49	5,5 - 5,99
0	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1,9	0,0008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2,9	0,0210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	3,9	0,1079	0,0863	0,0050	0,0018	0,0002	-	-	-	-	-	-	-
4	4,9	0,0183	0,1529	0,0143	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	5,9	0,0060	0,0370	0,0771	0,0047	-	-	-	-	-	-	-	-
6	6,9	0,0043	0,0177	0,0409	0,0257	0,0010	-	-	-	-	-	-	-
7	7,9	0,0023	0,0079	0,0280	0,0382	0,0105	0,0002	-	-	-	-	-	-
8	8,9	0,0020	0,0058	0,0103	0,0247	0,0334	0,0119	0,0009	-	-	-	-	-
9	9,9	0,0007	0,0041	0,0062	0,0158	0,0176	0,0255	0,0129	0,0012	-	-	-	-
10	10,9	-	0,0037	0,0051	0,0067	0,0095	0,0113	0,0114	0,0080	0,0017	-	-	-
11	11,9	0,0001	0,0027	0,0034	0,0034	0,0043	0,0059	0,0047	0,0049	0,0025	0,0022	0,0003	-
12	12,9	-	0,0020	0,0022	0,0016	0,0009	0,0020	0,0019	0,0018	0,0010	0,0009	0,0005	0,0003
13	13,9	-	0,0007	0,0010	0,0004	0,0006	0,0002	0,0004	0,0011	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001
14	14,9	-	0,0002	0,0009	0,0004	0,0004	0,0003	0,0001	-	-	-	-	-
15	15,9	0,0001	0,0001	0,0002	0,0006	0,0004	0,0007	0,0001	-	-	-	-	-
16	16,9	-	0,0001	-	0,0001	-	-	-	-	-	-	-	-
17	17,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	18,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total		0,1636	0,3212	0,1947	0,1243	0,0789	0,0580	0,0324	0,0169	0,0055	0,0033	0,0009	0,0004

Aspek *general criteria* dari olson serta kriteria slamming AHST *MP Premier* memiliki batas ketinggian Hs 4 m. Kedua aspek tersebut dijadikan acuan batas ketinggian gelombang pada tabel 4.15 dalam menentukan operabilitas. Hal ini dikarenakan ketika beroperasi, AHTS *MP Premier* tidak selamanya melakukan *helicopter criteria* ataupun aktivitas pemindahan muatan. Batas tersebut dijadikan batasan pada sebaran data gelombang sehingga didapat operabilitas AHTS *MP Premier* dalam melakukan operasi *towing* sebesar 98,99%. Nilai operabilitas tersebut merupakan nilai operabilitas dengan aspek tinjauan *general criteria* serta tinjauan *probability slamming* dan *greenwater*. Sedangkan untuk kegiatan pemindahan kru ataupun logistik ditenga operai *towing*, AHTS harus menunggu gelombang turun hingga Hs menjadi 1,5 m agar memungkinkan melakukan operasi sesuai kriteria *seakeeping* yang ditentukan

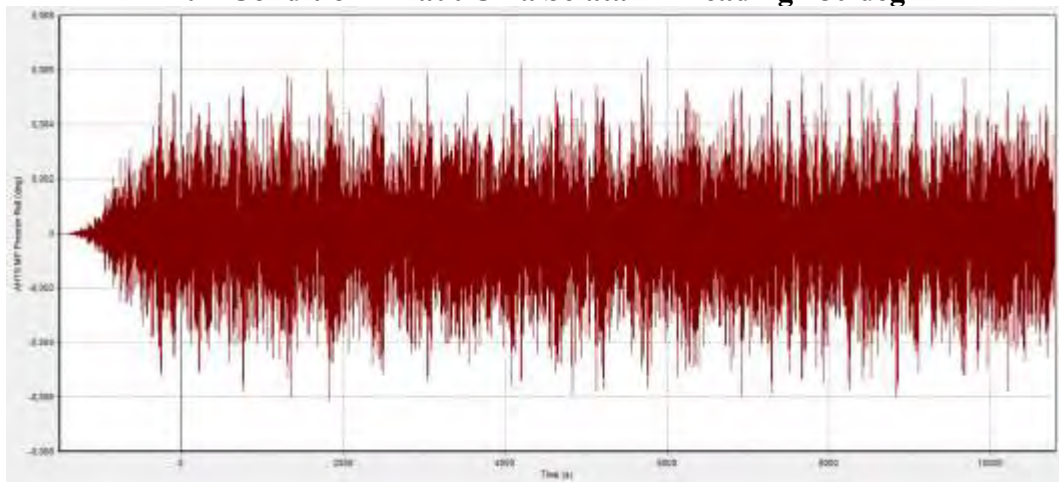
LAMPIRAN
GRAFIK *TIME DOMAIN MOTION*

Perhitungan varian pada elevasi rekaman ranah *time domain* mengacu pada analisa gelombang dengan kurun waktu sebagai berikut:

$$m_0 = \frac{\sum_{n=1}^N (\zeta_n - \bar{\zeta})^2}{N}$$

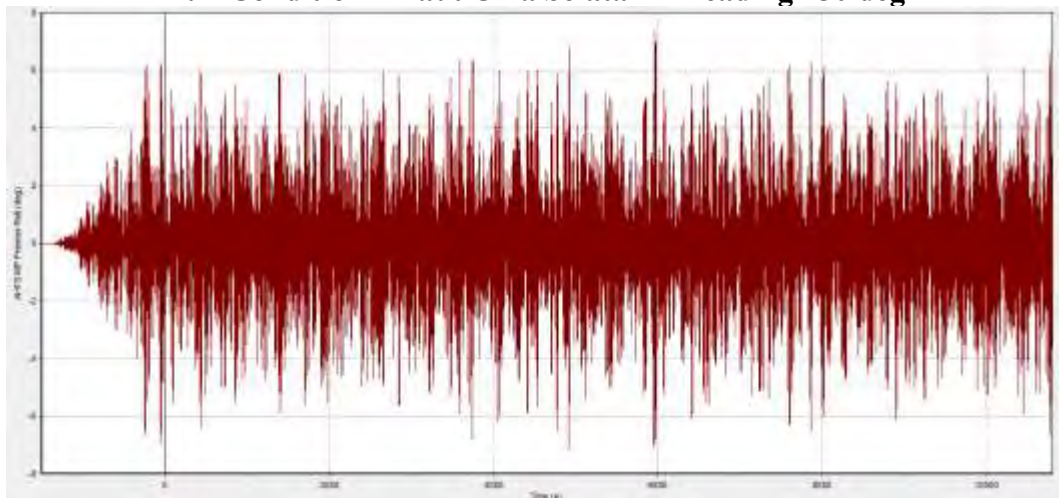
Roll AHTS MP Premier pada Operasi Towing

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



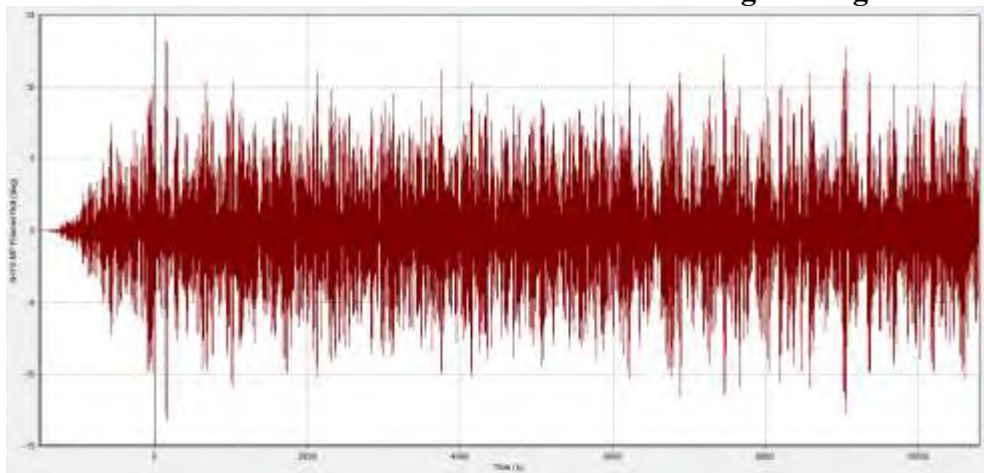
$m_0 = 3,02 \cdot 10^{-6}$ Roll Average = 0,002 deg Roll Significant = 0,003 deg

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



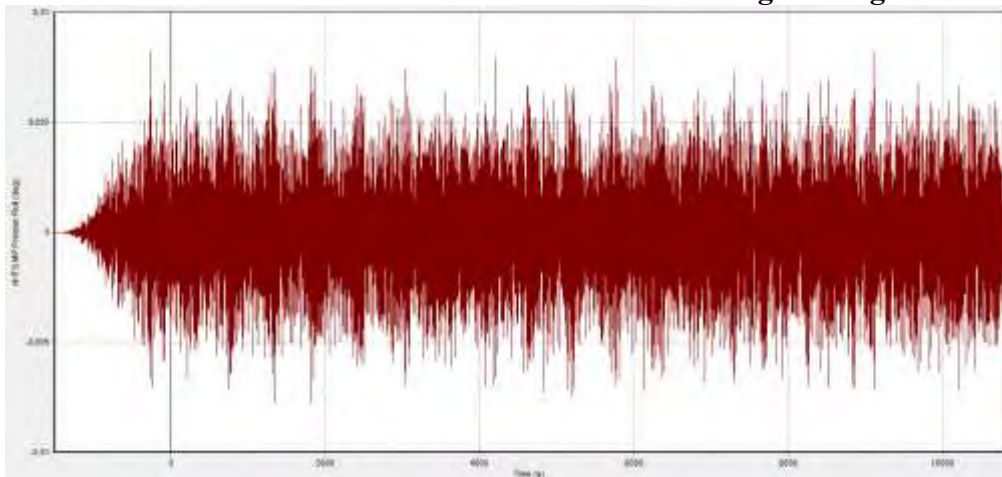
$m_0 = 4,4$ Roll Average = 2,62 deg Roll Significant = 4,2 deg

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



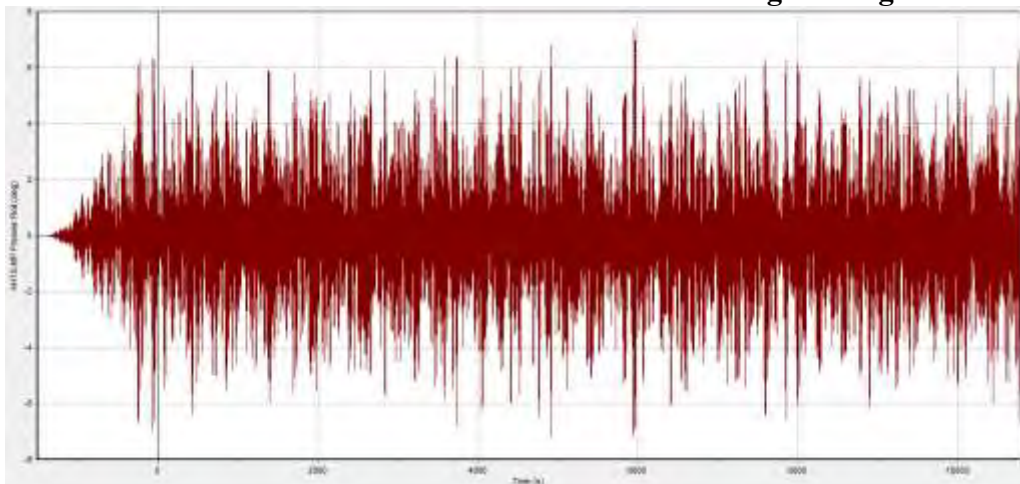
$m_0 = 12,76$ Roll Average = 4,46 deg Roll Significant = 7,14 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



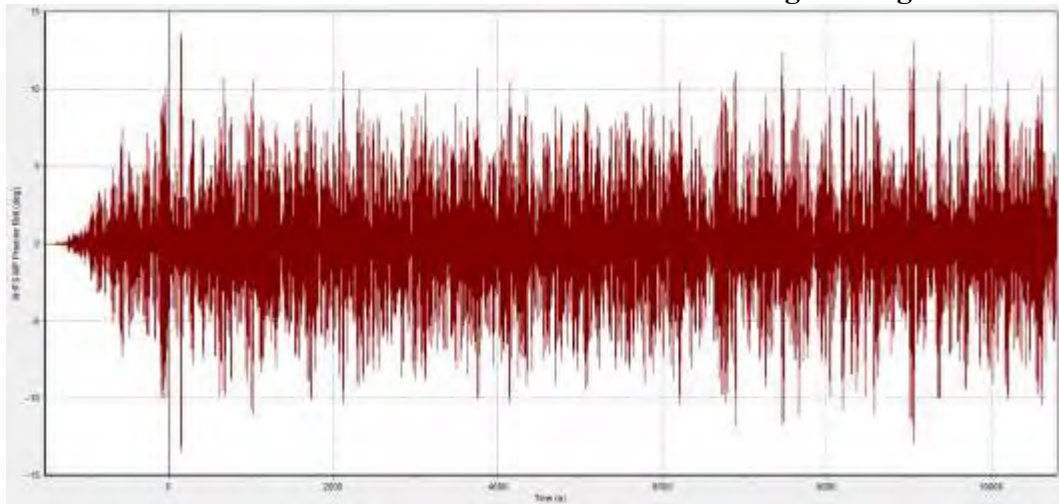
$m_0 = 5,02 \cdot 10^{-6}$ Roll Average = 0,002 deg Roll Significant = 0,004 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



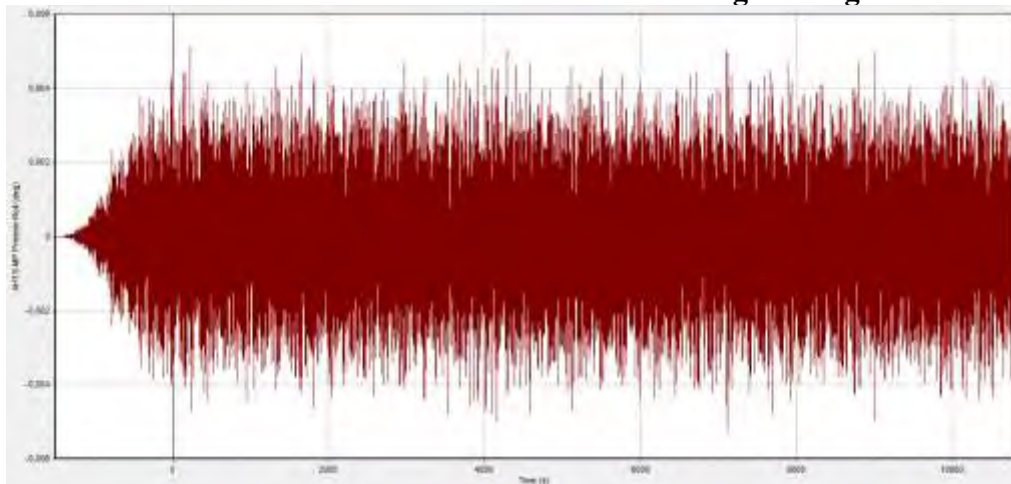
$m_0 = 4,46$ Roll Average = 2,63 deg Roll Significant = 4,22 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



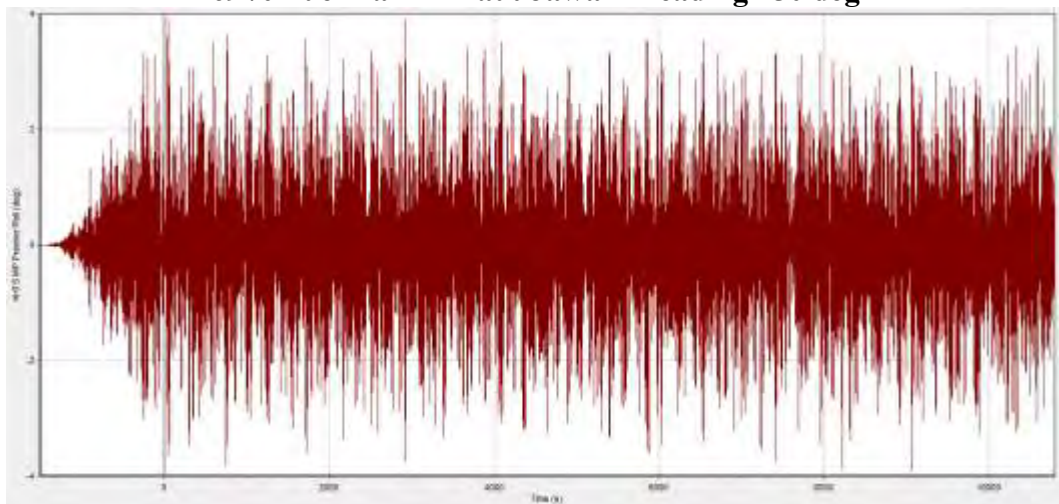
$m_0 = 13,11$ Roll Average = 4,52 deg Roll Significant = 7,24 deg

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 180 deg



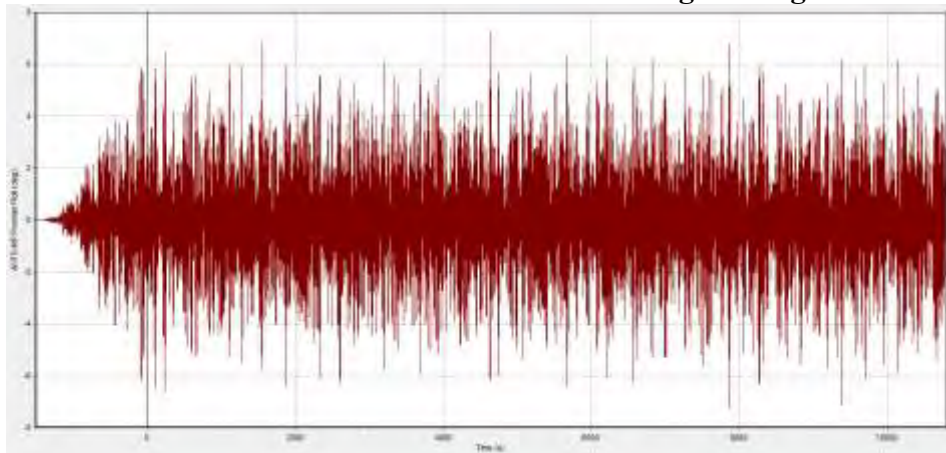
$m_0 = 2,94 \cdot 10^{-6}$ Roll Average = 0,002 deg Roll Significant = 0,003 deg

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 150 deg



$m_0 = 1,39$ Roll Average = 1,47 deg Roll Significant = 2,35 deg

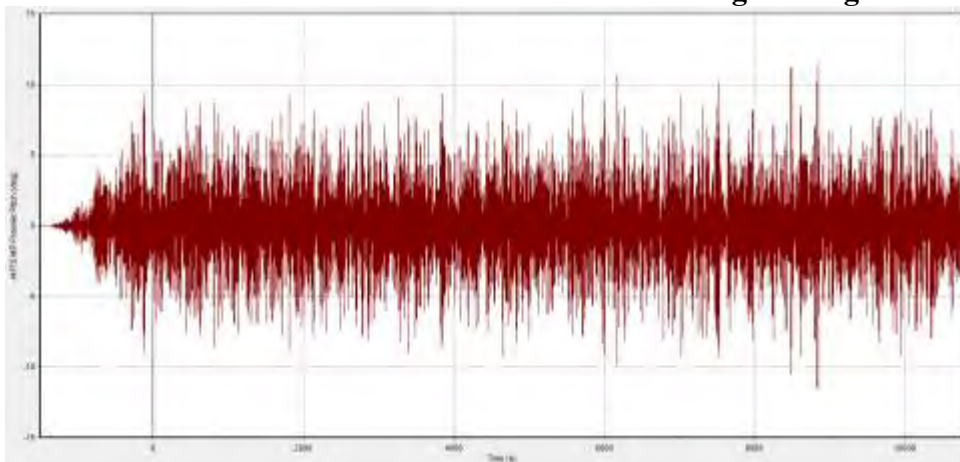
69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 120 deg



$m_0 = 3,96$ Roll Average = 2,48 deg Roll Significant = 3,98 deg

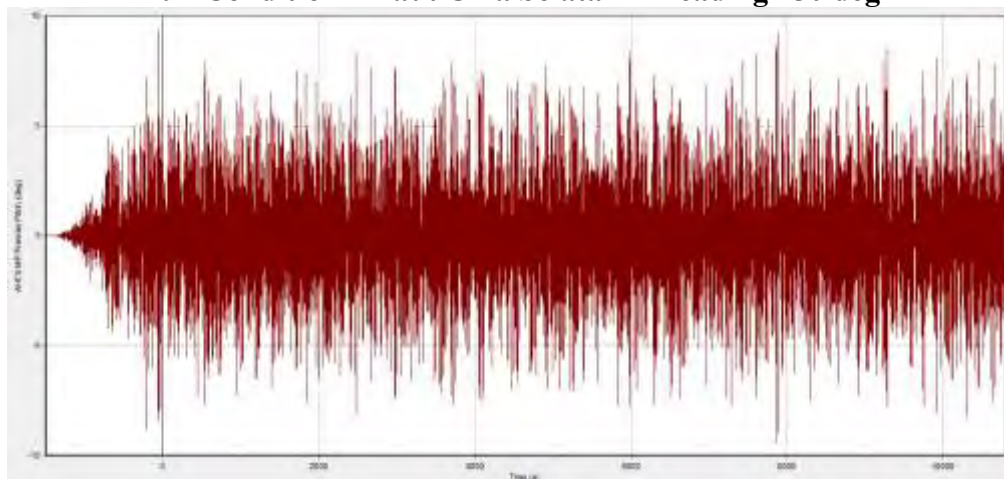
Pitch AHTS MP Premier pada Operasi Towing

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



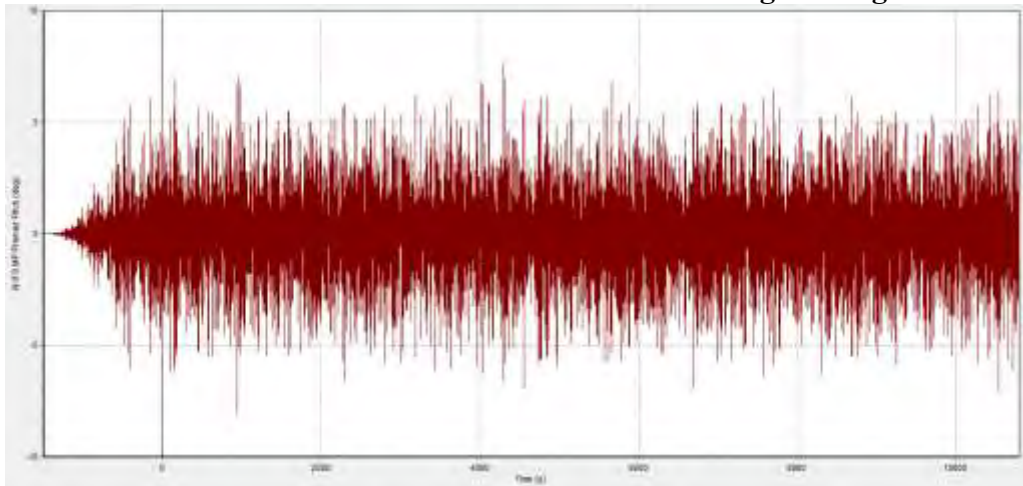
$m_0 = 7,46$ Pitch Average = 3,41 deg Pitch Significant = 5,46 deg

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



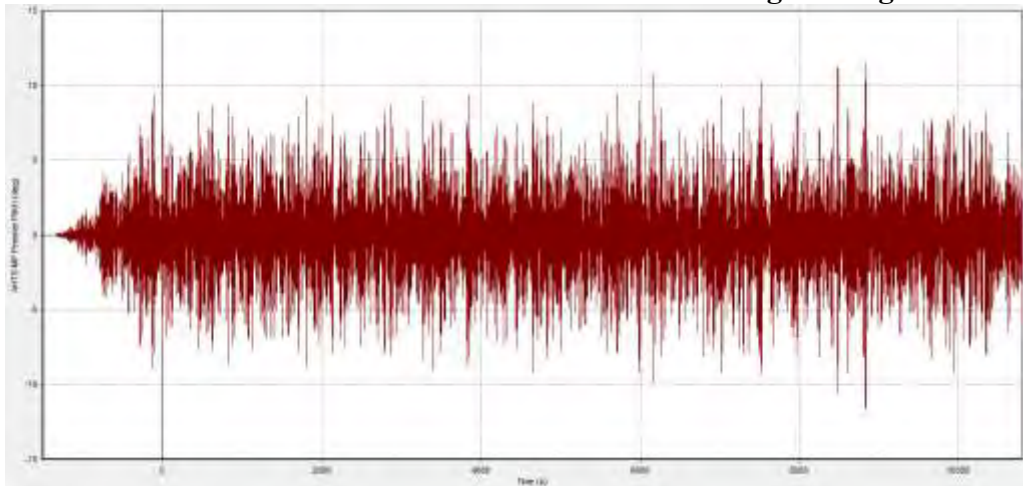
$m_0 = 6,31$ Pitch Average = 3,14 deg Pitch Significant = 5,02 deg

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



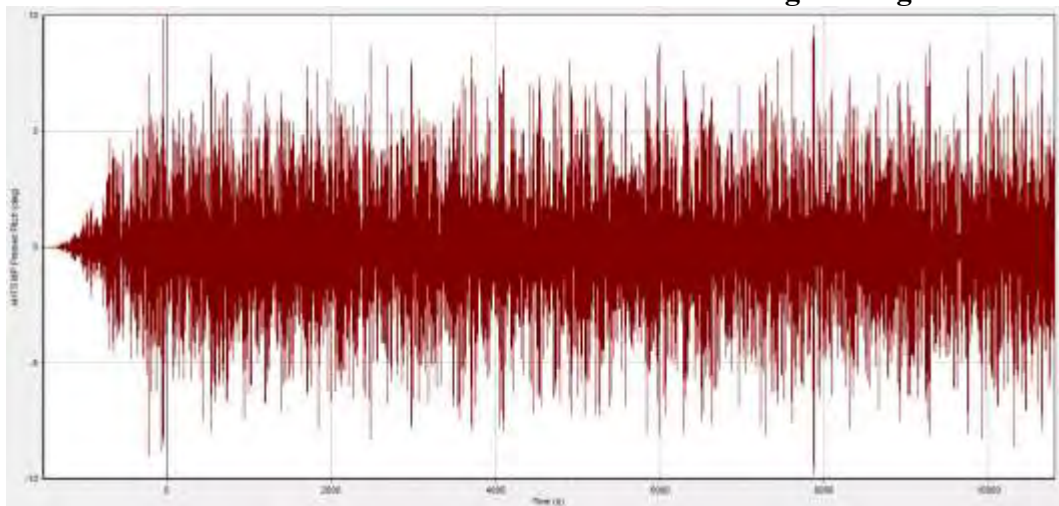
$m_0 = 4,16$ Pitch Average = 2,55 deg Pitch Significant = 4,08 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



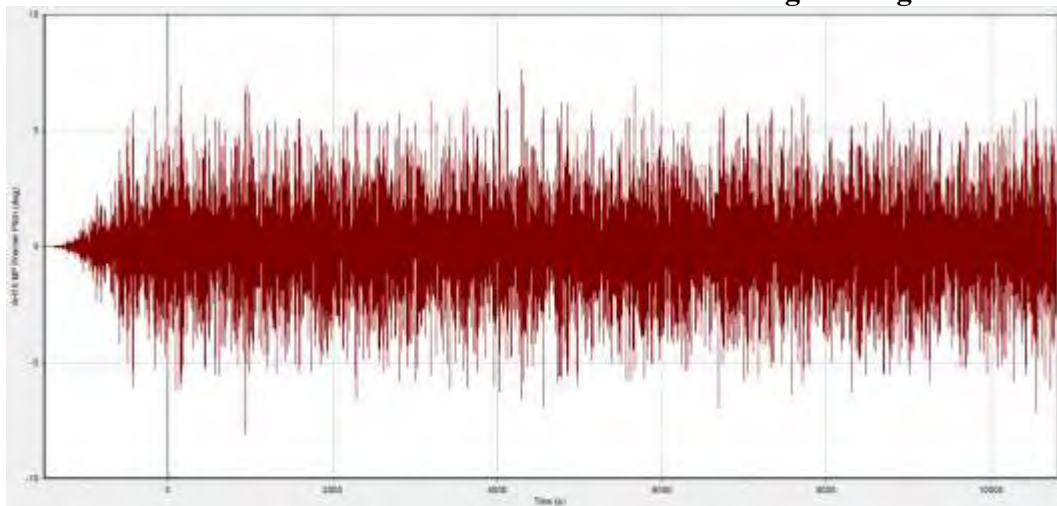
$m_0 = 7,49$ Pitch Average = 3,42 deg Pitch Significant = 5,47 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



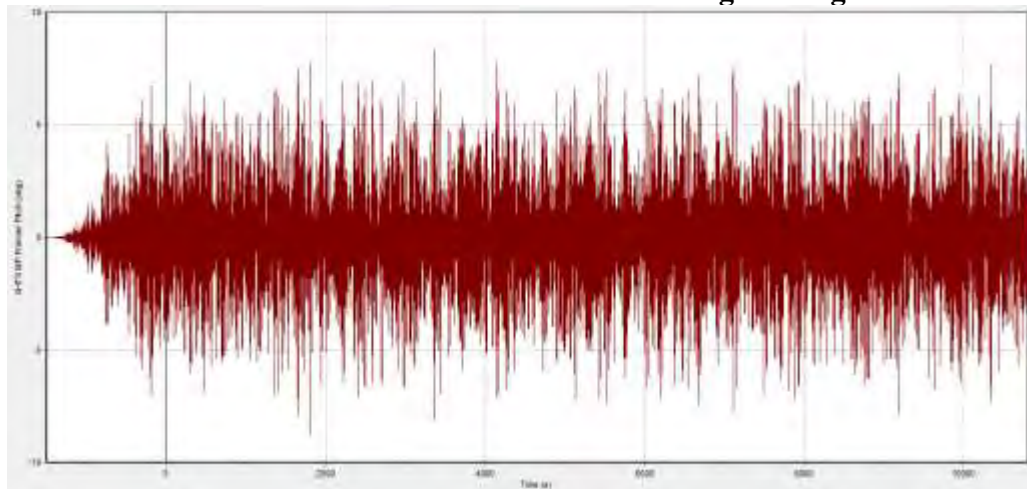
$m_0 = 6,80$ Pitch Average = 3,26 deg Pitch Significant = 5,21 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



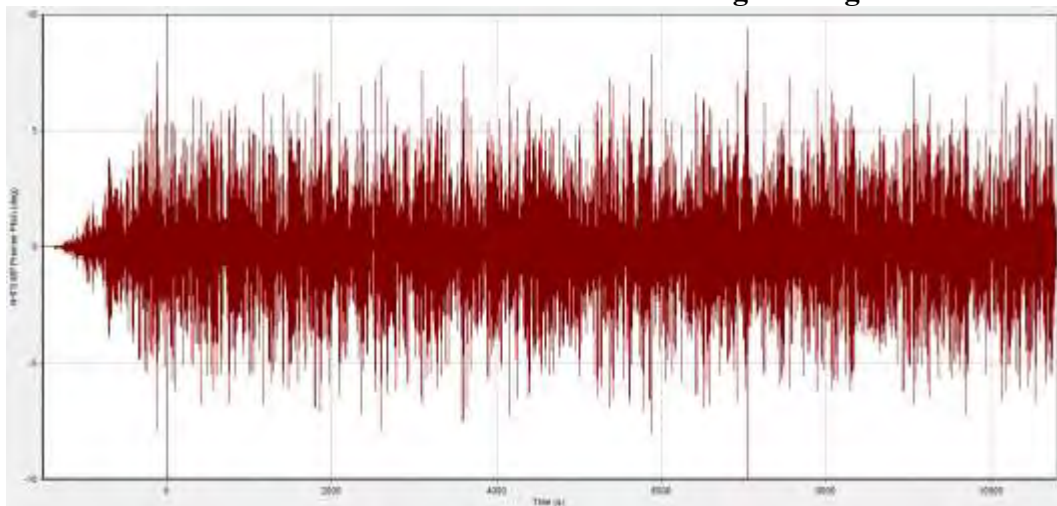
$m_0 = 4,16$ Pitch Average = 2,55 deg Pitch Significant = 4,08 deg

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 180 deg



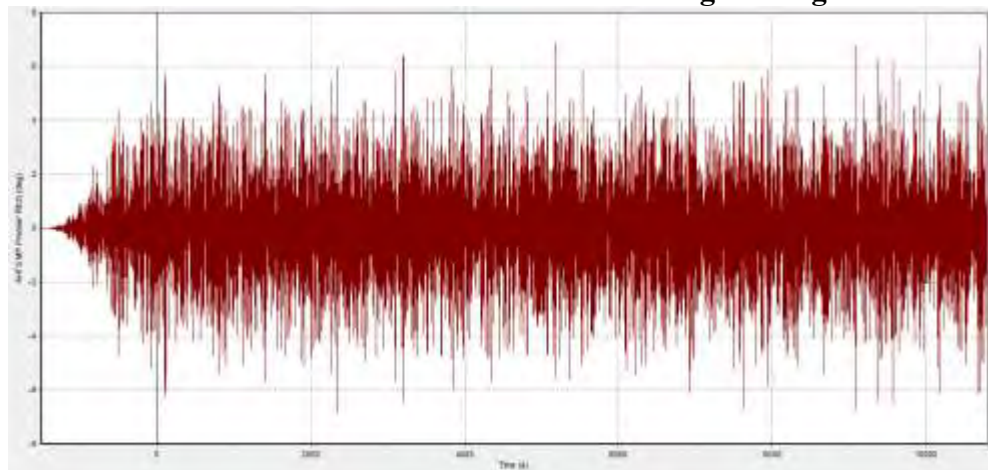
$m_0 = 5,34$ Pitch Average = 2,89 deg Pitch Significant = 4,62 deg

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 150 deg



$m_0 = 5,08$ Pitch Average = 2,81 deg Pitch Significant = 4,5 deg

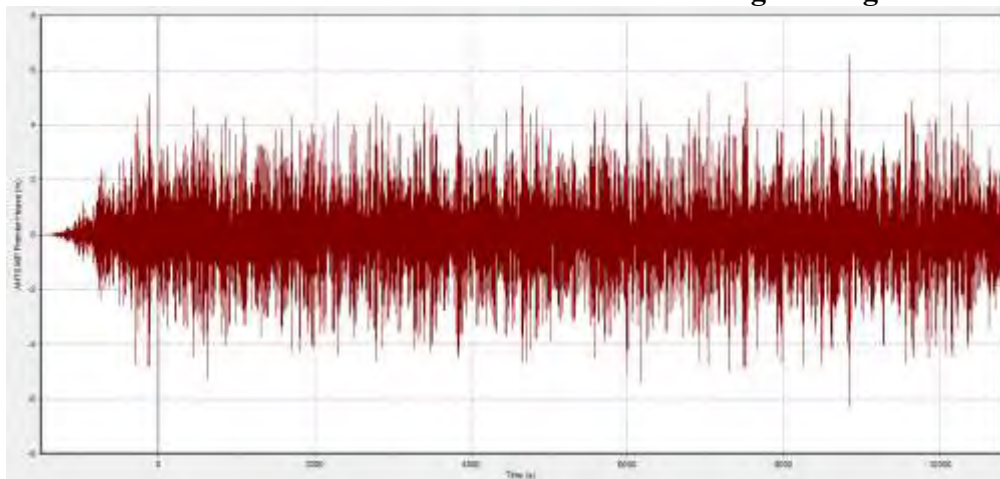
69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 120 deg



$m_0 = 3,31$ Pitch Average = 2,27 deg Pitch Significant = 3,64 deg

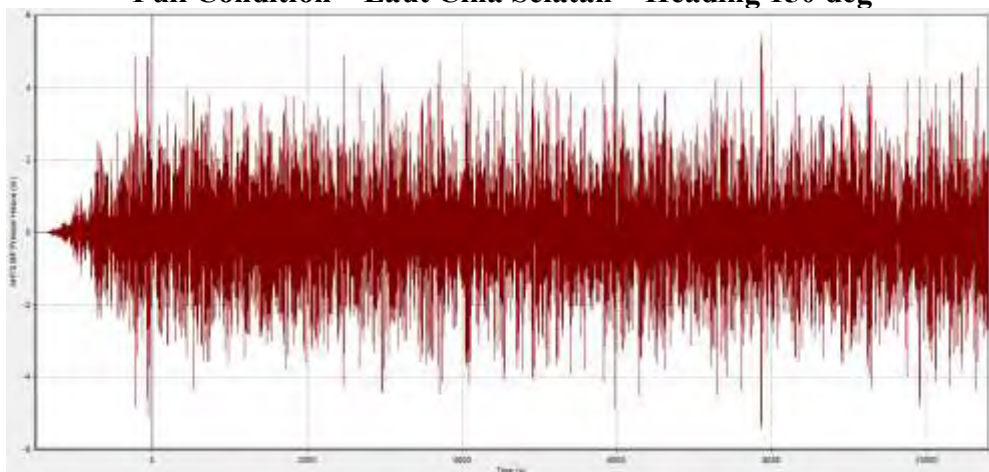
Heave Displacement AHTS MP Premier pada Operasi Towing

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



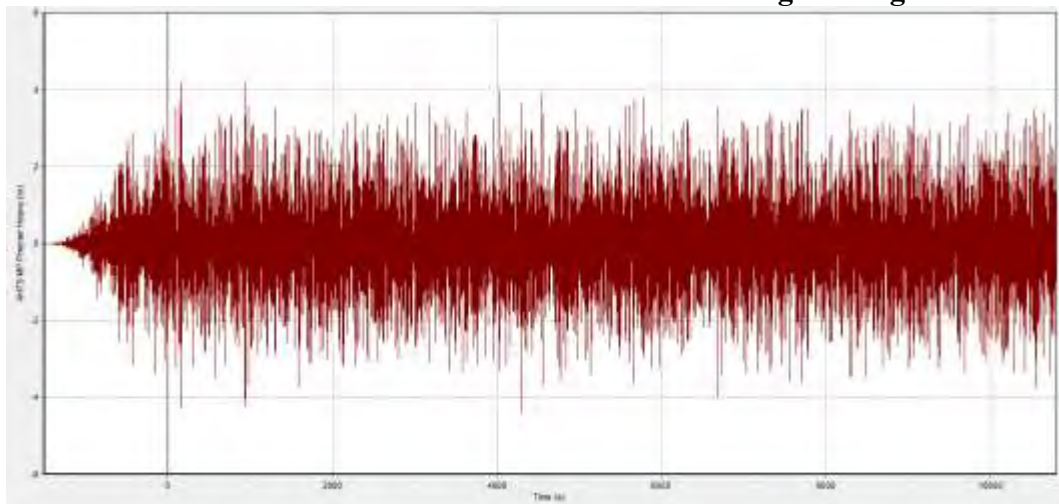
$m_0 = 2,23$ Heave Average = 1,86 m Heave Significant = 2,99 m

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



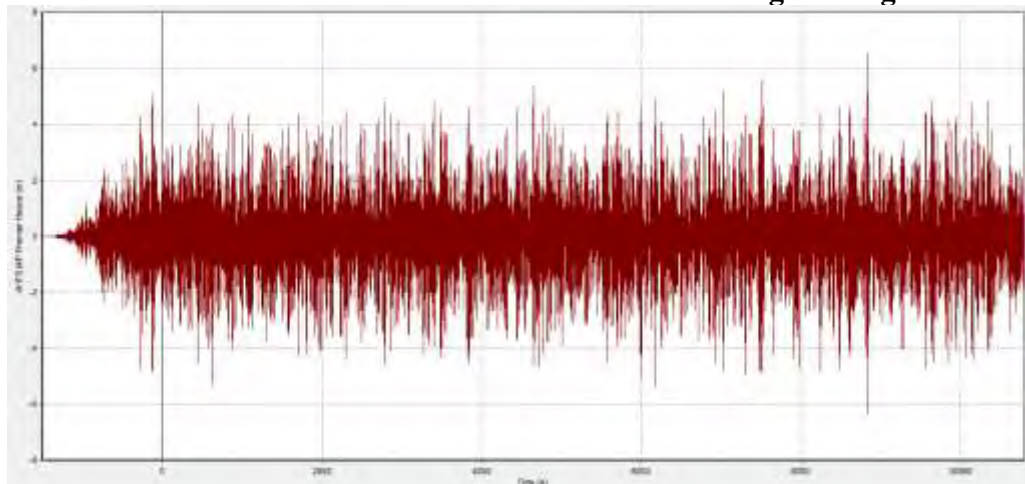
$m_0 = 1,94$ Heave Average = 1,74 m Heave Significant = 2,78 m

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



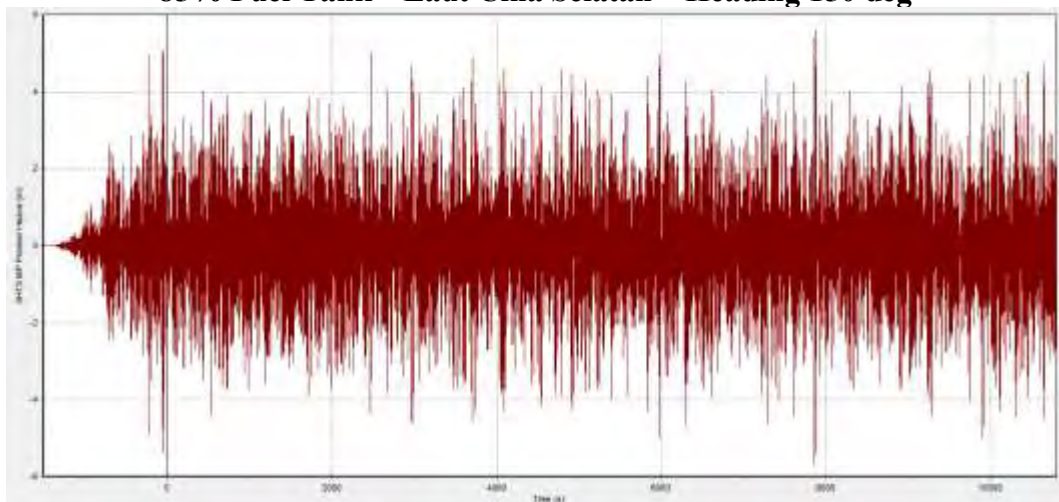
$m_0 = 1,42$ Heave Average = 1,49 m Heave Significant = 2,38 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



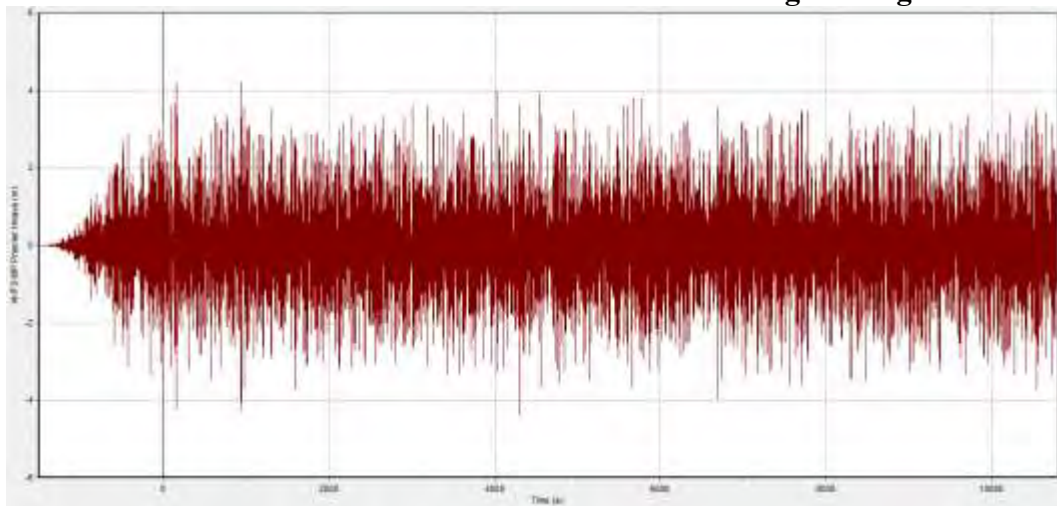
$m_0 = 2,27$ Heave Average = 1,88 m Heave Significant = 3,01 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



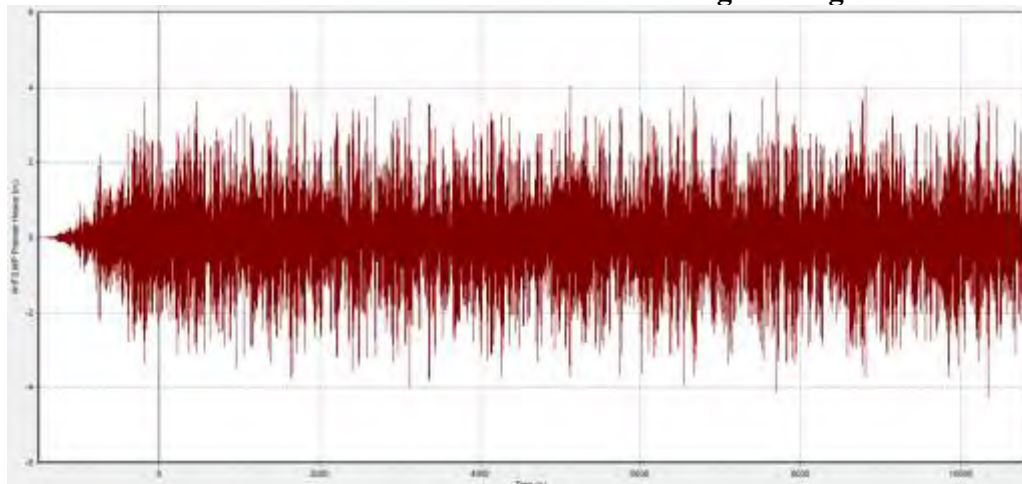
$m_0 = 2,06$ Heave Average = 1,79 m Heave Significant = 2,87 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



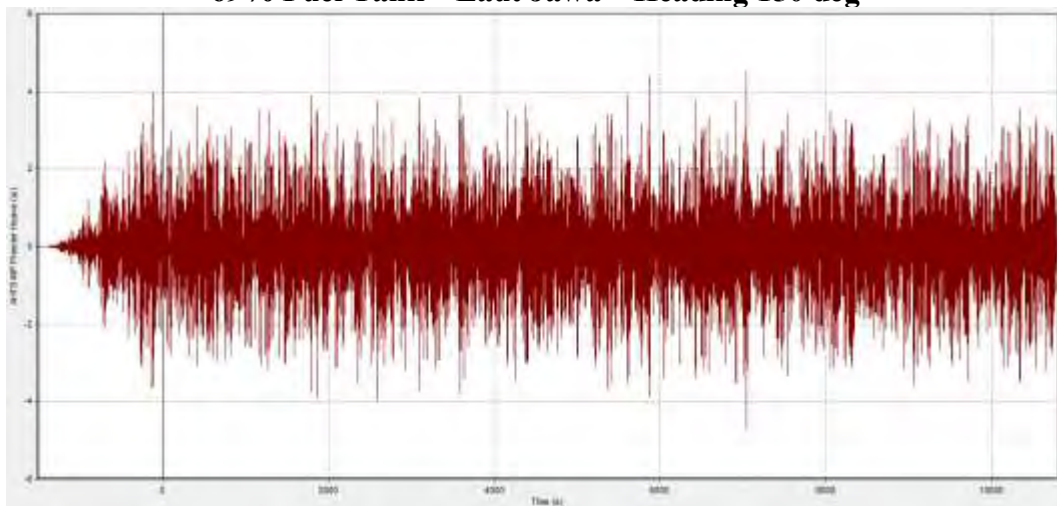
$m_0 = 1,45$ Heave Average = 1,5 m Heave Significant = 2,4 m

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 180 deg



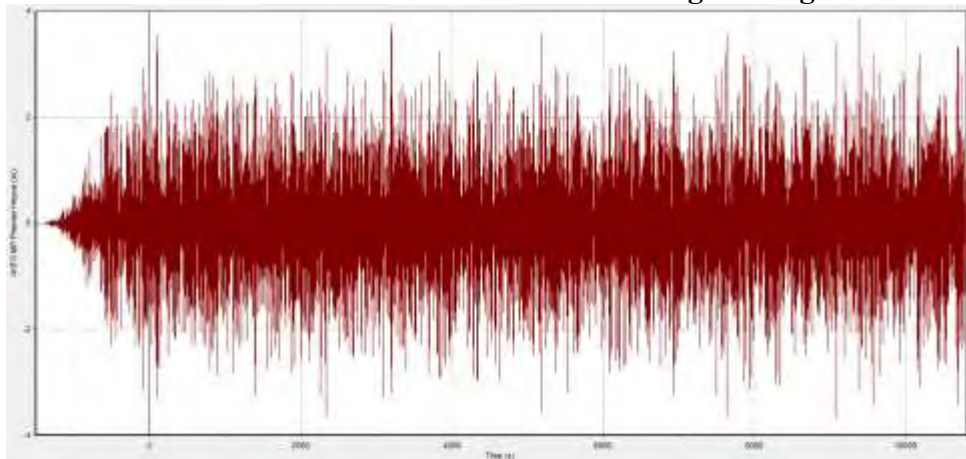
$m_0 = 1,41$ Heave Average = 1,48 m Heave Significant = 2,37 m

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 150 deg



$m_0 = 1,36$ Heave Average = 1,46 m Heave Significant = 2,33 m

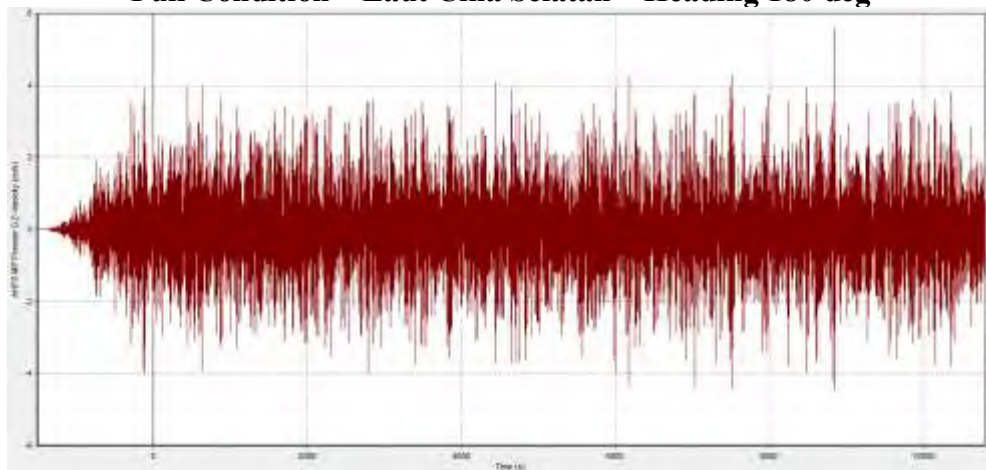
69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 120 deg



$m_0 = 1,01$ Heave Average = 1,25 m Heave Significant = 2,01 m

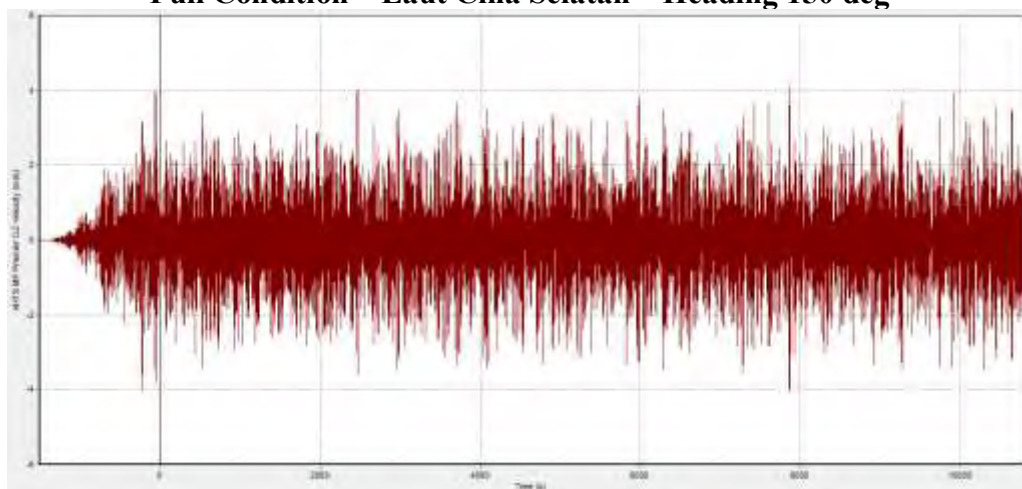
Heave Velocity AHTS MP Premier pada Operasi Towing

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



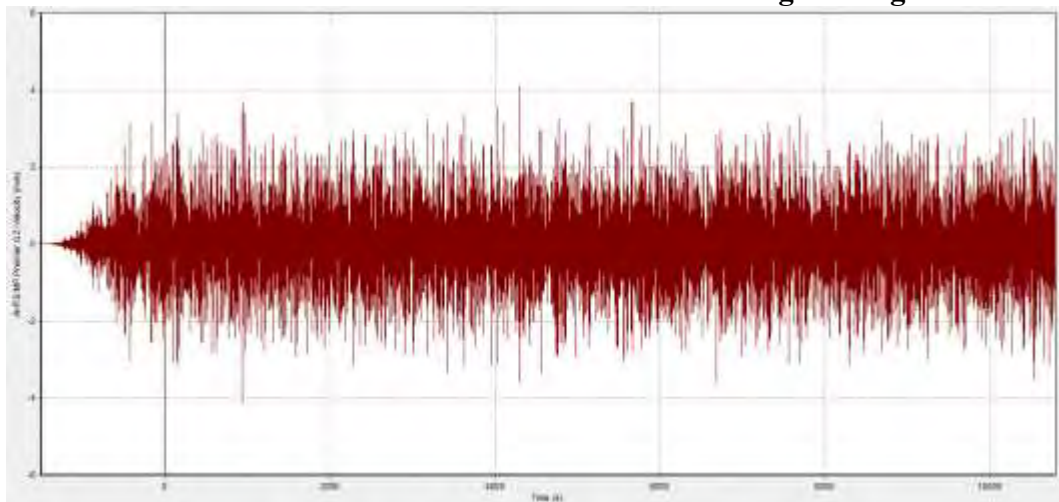
$m_0 = 1,39$ Heave Average = 1,47 m/s Heave Significant = 2,36 m/s

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



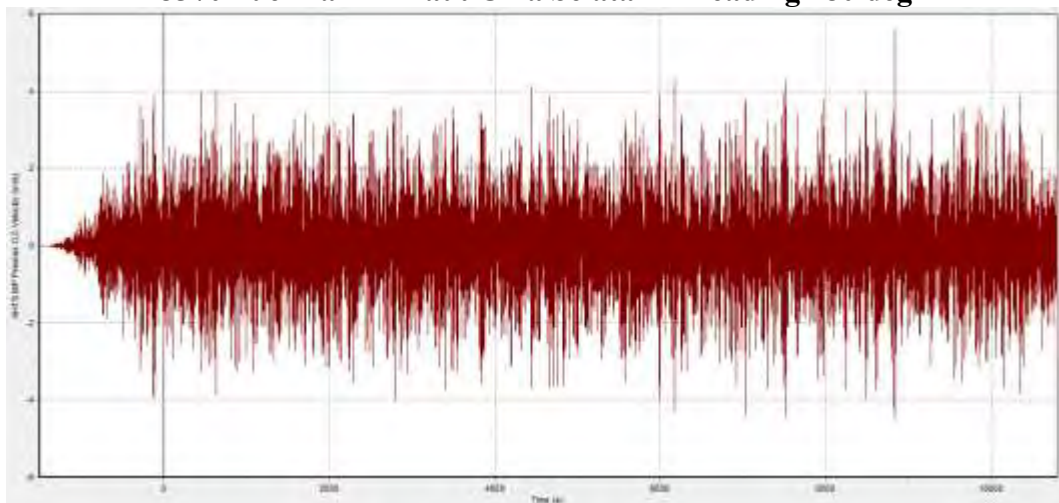
$m_0 = 1,22$ Heave Average = 1,38 m/s Heave Significant = 2,21 m/s

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



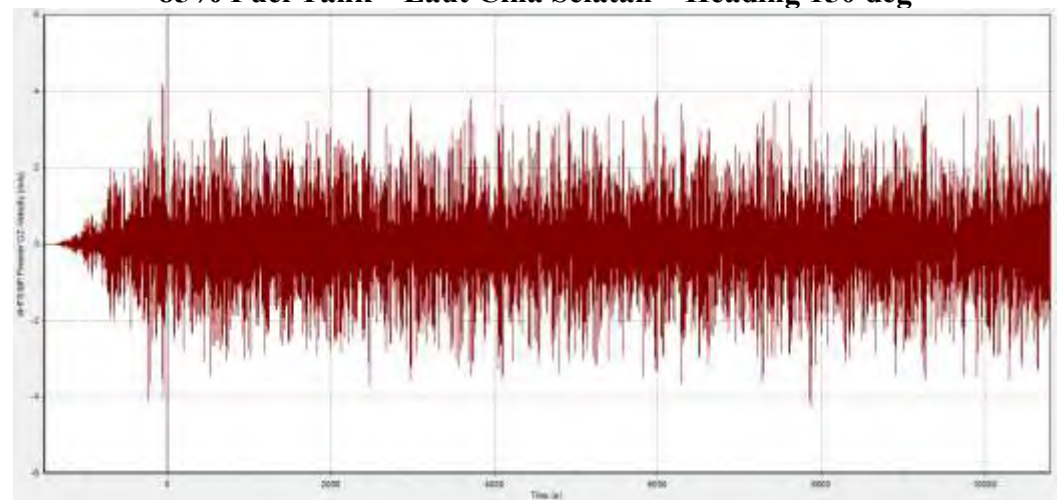
$m_0 = 1,06$ Heave Average = 1,28 m/s Heave Significant = 2,06 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



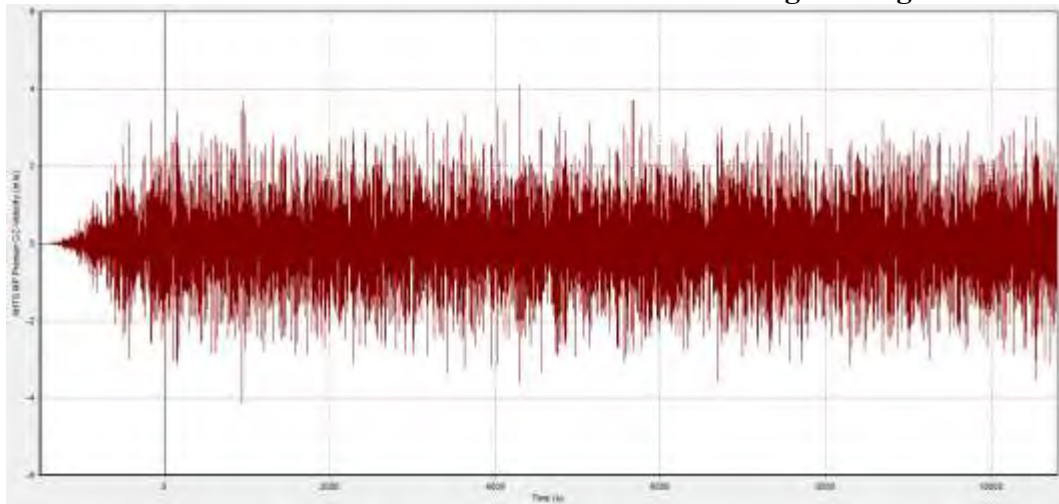
$m_0 = 1,39$ Heave Average = 1,47 m/s Heave Significant = 2,36 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



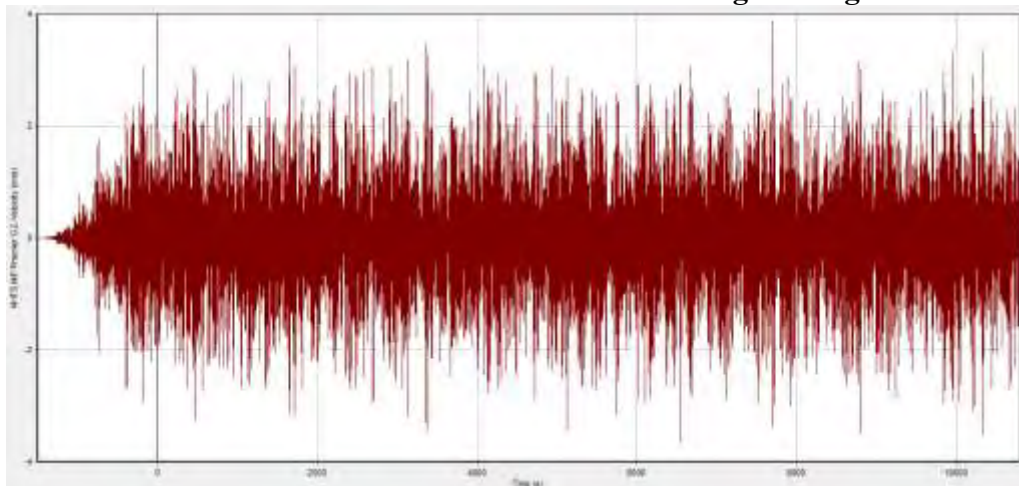
$m_0 = 1,29$ Heave Average = 1,42 m/s Heave Significant = 2,27 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



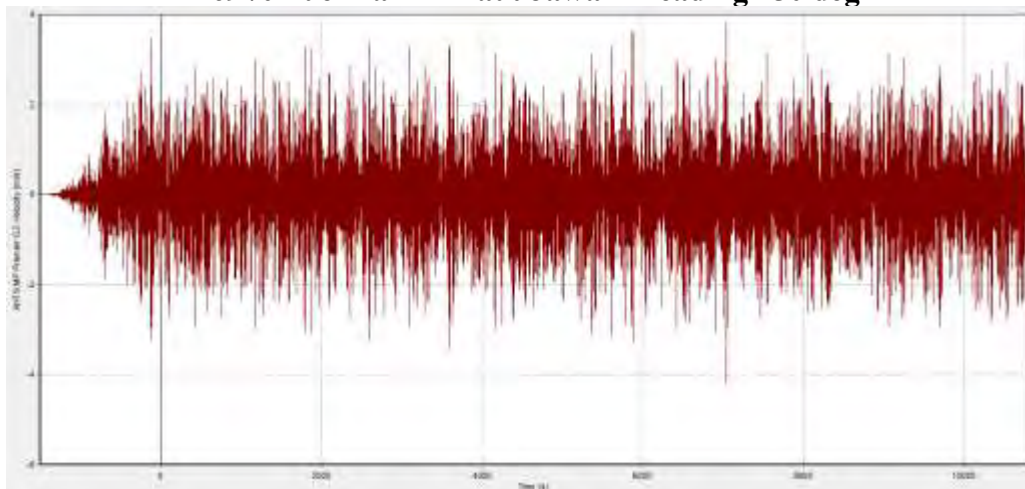
$m_0 = 1,06$ Heave Average = 1,29 m/s Heave Significant = 2,06 m/s

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 180 deg



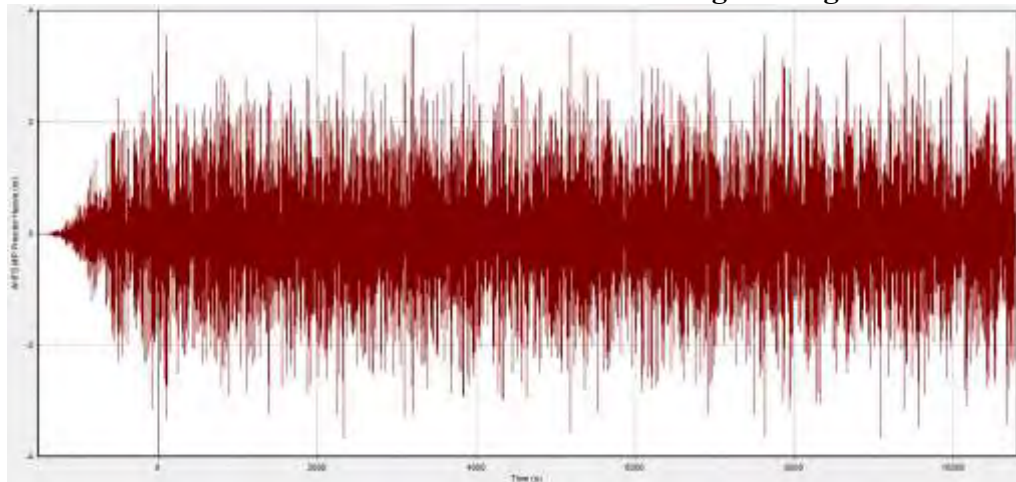
$m_0 = 0,97$ Heave Average = 1,23 m/s Heave Significant = 1,97 m/s

69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 150 deg



$m_0 = 0,95$ Heave Average = 1,22 m/s Heave Significant = 1,95 m/s

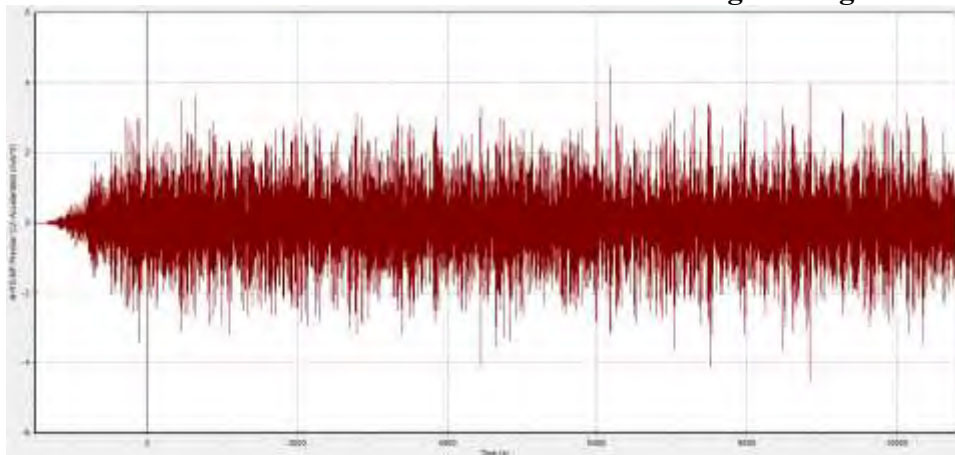
69% Fuel Tank – Laut Jawa – Heading 120 deg



$m_0 = 0,84$ Heave Average = 1,14 m/s Heave Significant = 1,83 m/s

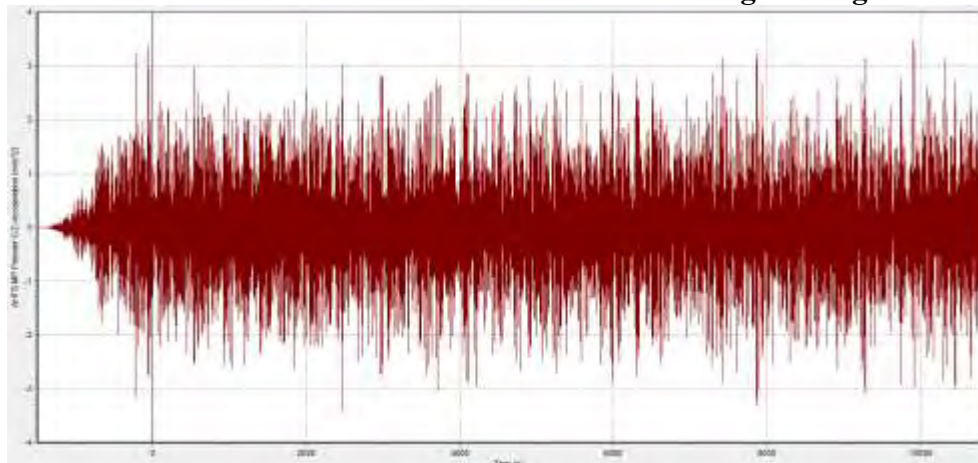
Heave Acceleration AHTS MP Premier pada Operasi Towing

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



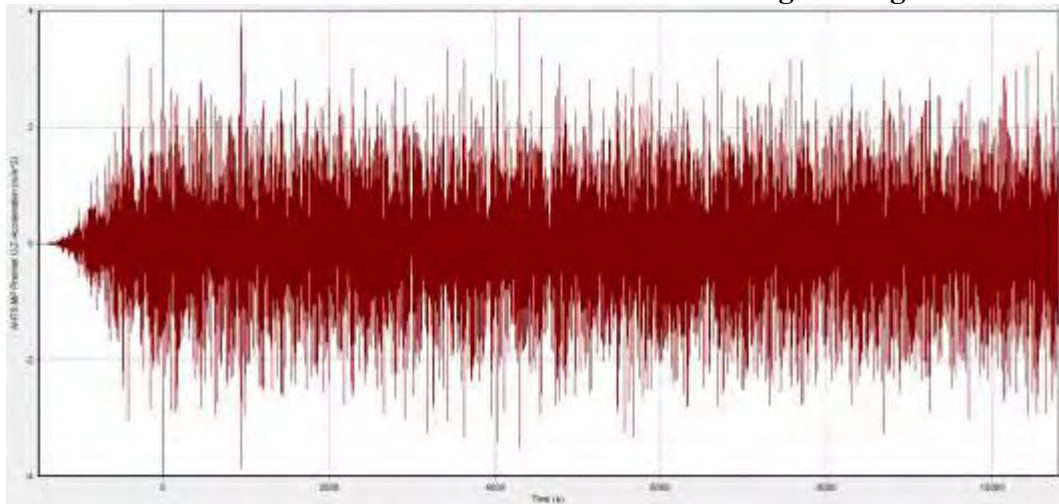
$m_0 = 0,97$ Heave Average = 1,23 m/s² Heave Significant = 1,97 m/s²

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



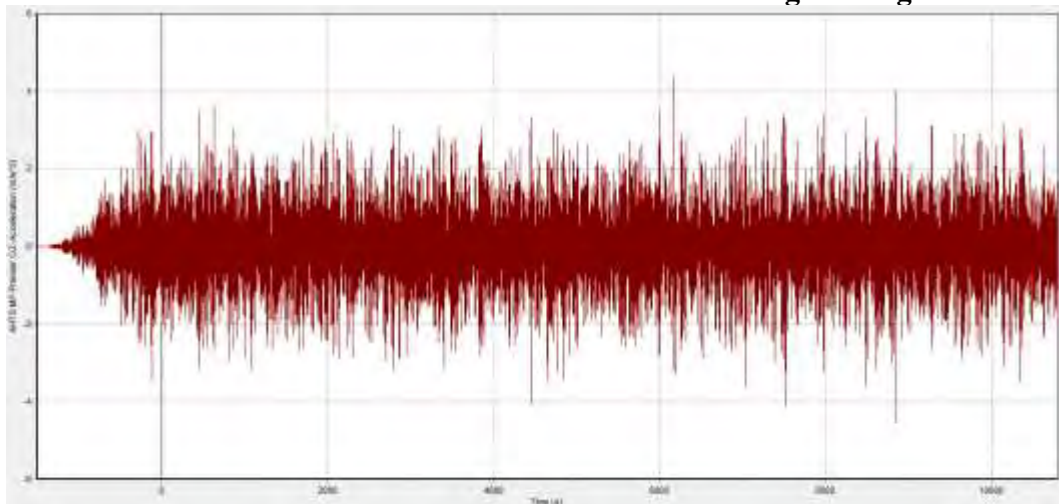
$m_0 = 0,84$ Heave Average = 1,14 m/s² Heave Significant = 1,83 m/s²

Full Condition – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



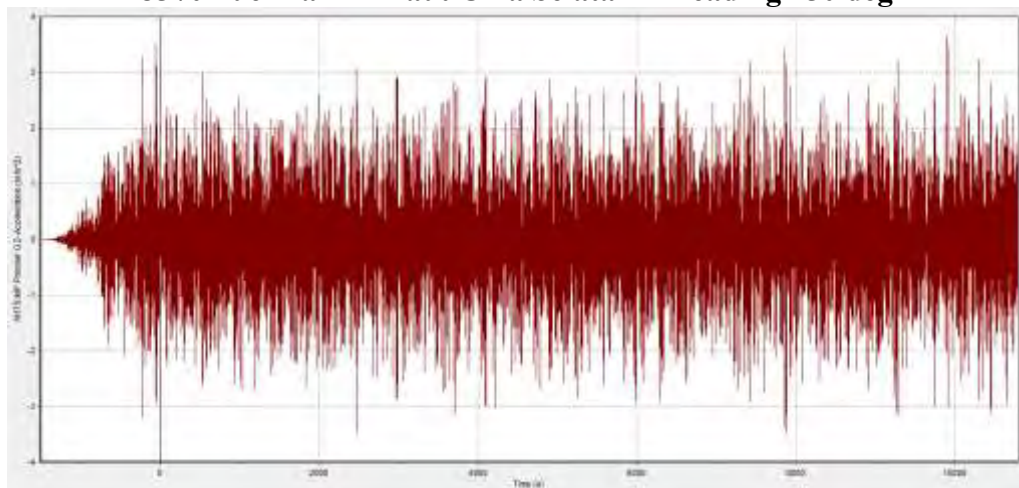
$m_0 = 0,83$ Heave Average = $1,14 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,83 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg



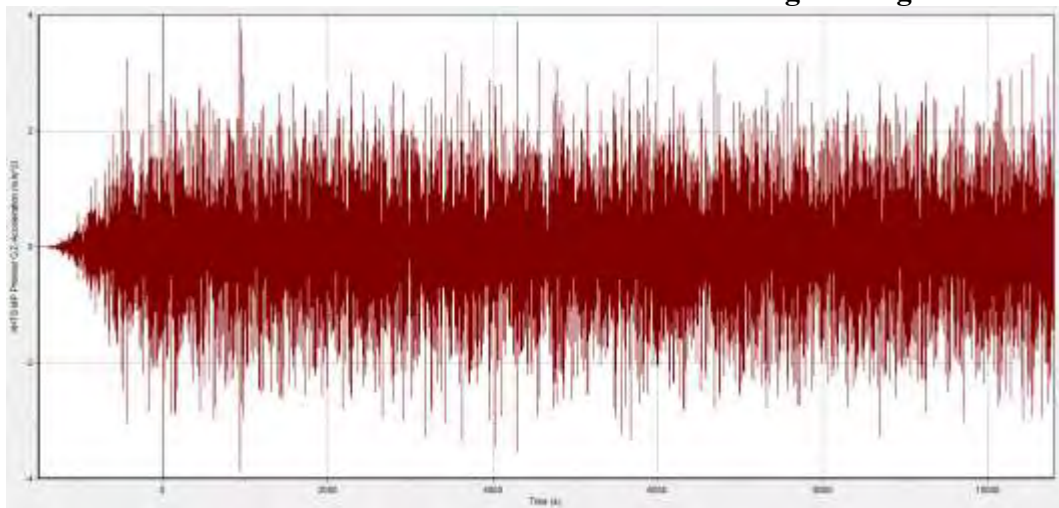
$m_0 = 0,97$ Heave Average = $1,23 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,97 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 150 deg



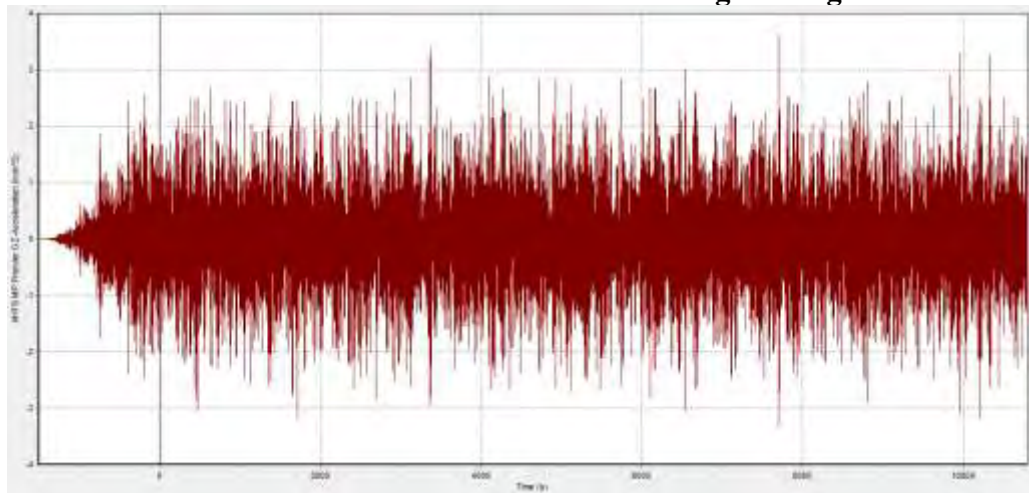
$m_0 = 0,89$ Heave Average = $1,18 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,89 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg



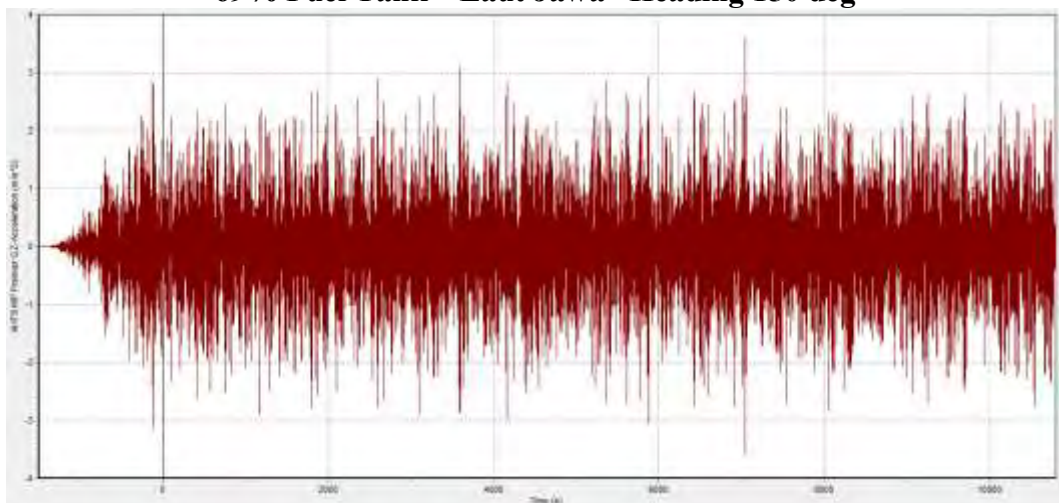
$m_0 = 0,84$ Heave Average = $1,14 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,83 \text{ m/s}^2$

69% Fuel Tank – Laut Jawa– Heading 180 deg



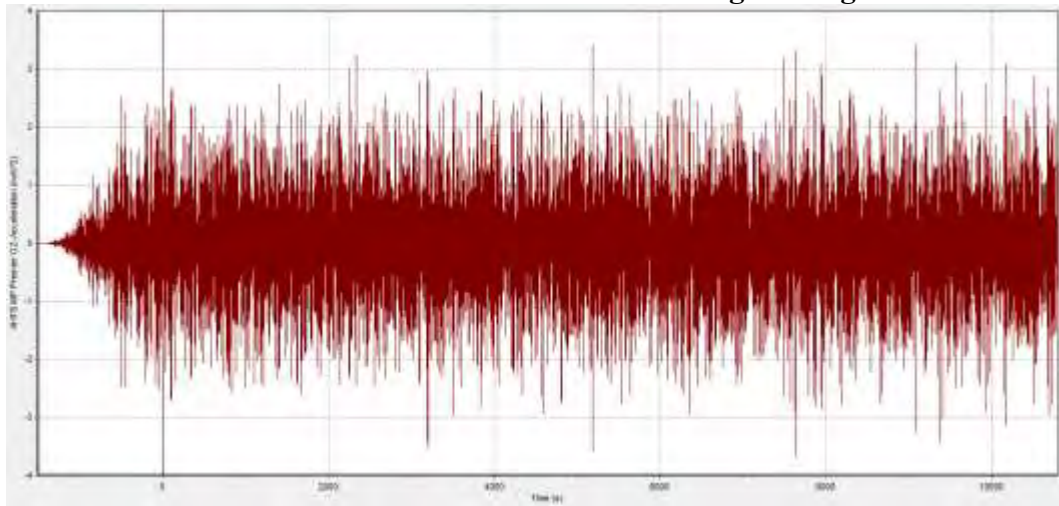
$m_0 = 0,75$ Heave Average = $1,08 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,74 \text{ m/s}^2$

69% Fuel Tank – Laut Jawa– Heading 150 deg



$m_0 = 0,71$ Heave Average = $1,05 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,69 \text{ m/s}^2$

69% Fuel Tank – Laut Jawa– Heading 120 deg

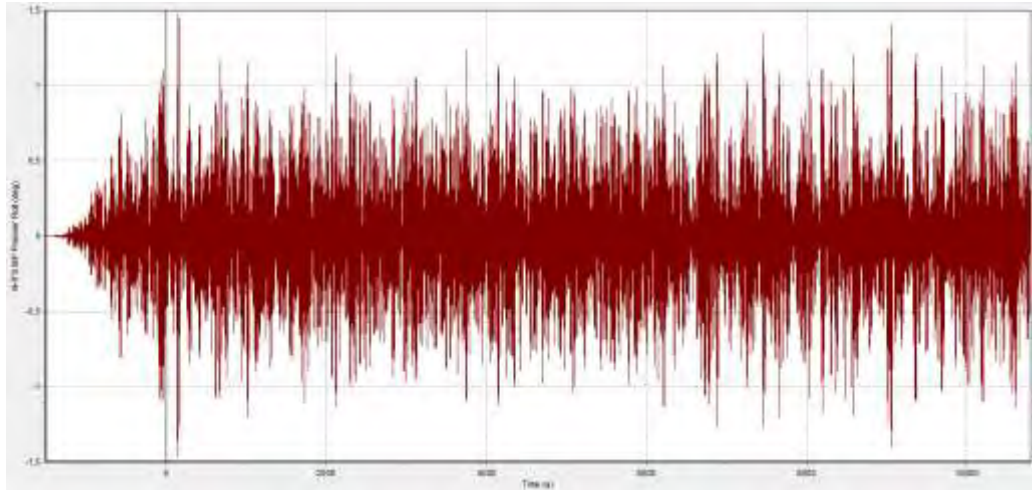


$m_0 = 0,71$ Heave Average = $1,05 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,69 \text{ m/s}^2$

LAMPIRAN
GRAFIK TIME DOMAIN MOTION
MAKSIMUM DENGAN VARIASI HS

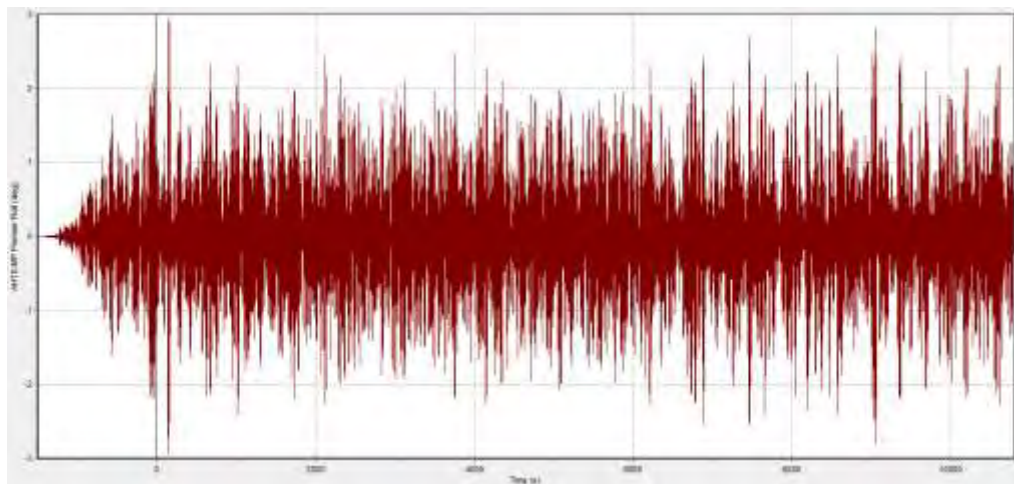
Roll AHTS MP Premier pada Operasi Towing

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 0,5 m



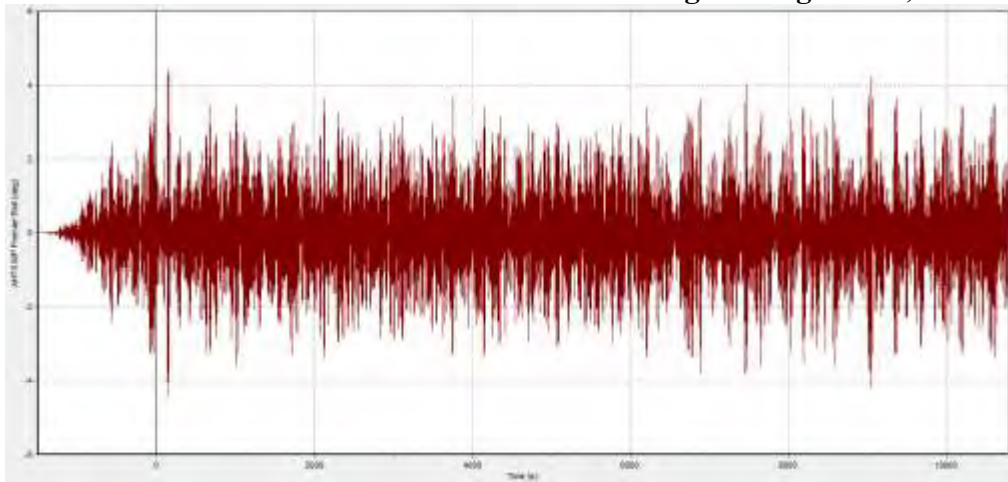
$m_0 = 0,154$ Roll Average = 0,491 deg Roll Significant = 0,787 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 1,0 m



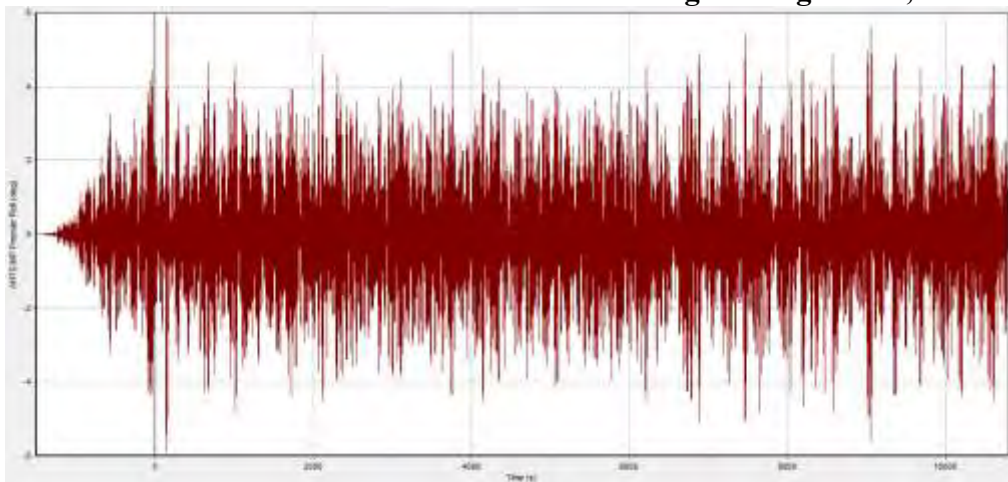
$m_0 = 0,619$ Roll Average = 0,983 deg Roll Significant = 1,574 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 1,5 m



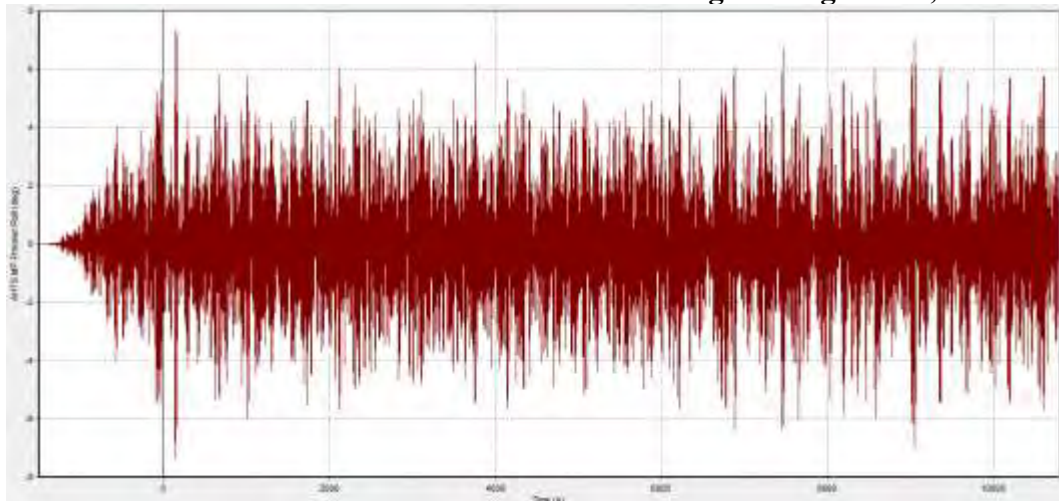
$m_0 = 1,394$ Roll Average = 1,475 deg Roll Significant = 2,361 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 2,0 m



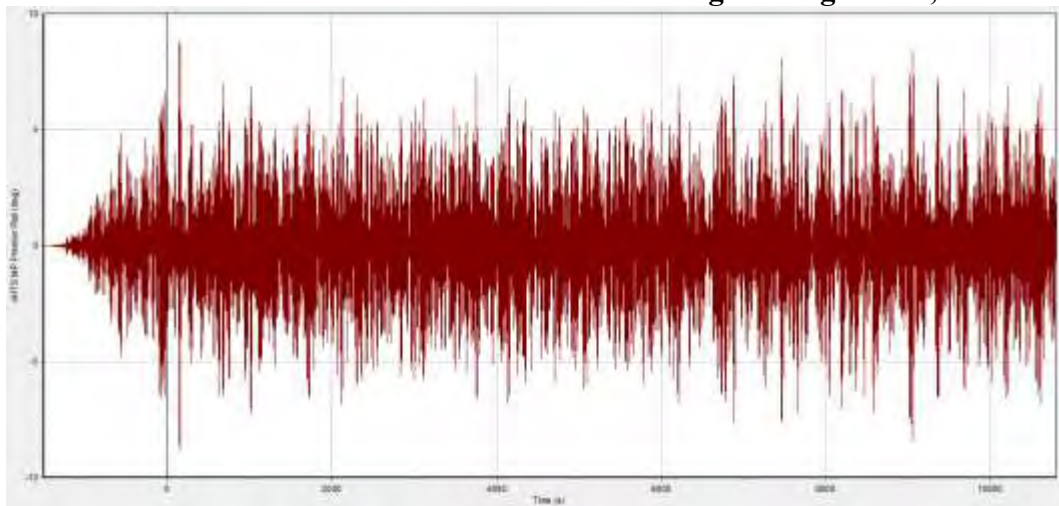
$m_0 = 2,478$ Roll Average = 1,967 deg Roll Significant = 3,148 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 2,5 m



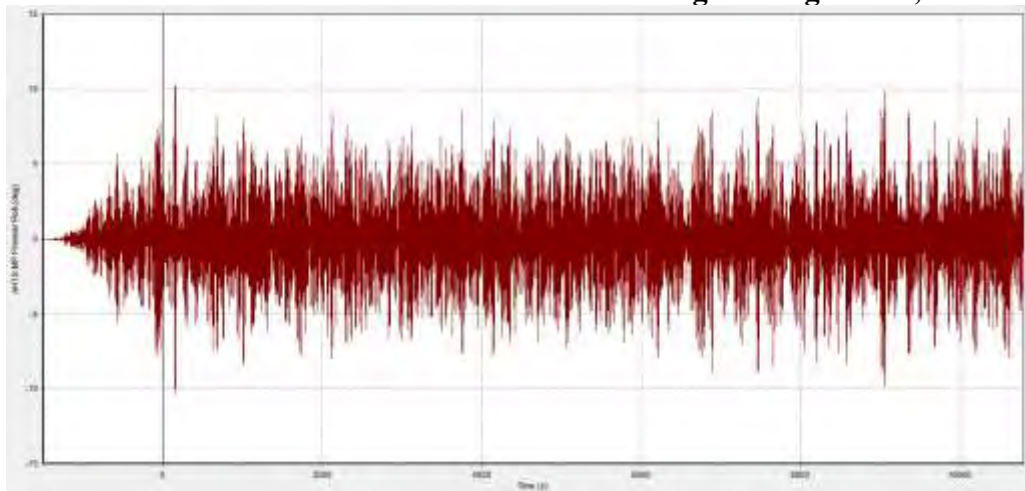
$m_0 = 3,872$ Roll Average = 2,459 deg Roll Significant = 3,935 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 3,0 m



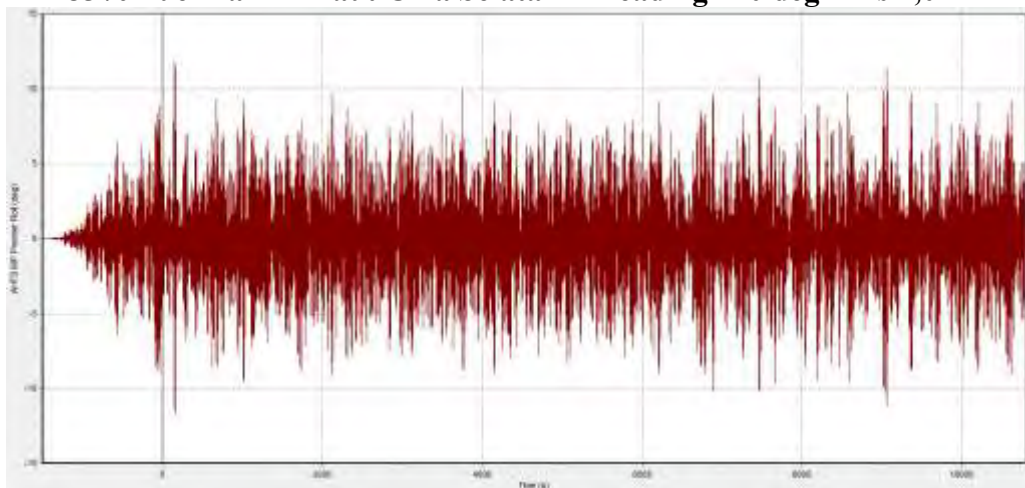
$m_0 = 5,576$ Roll Average = 2,951 deg Roll Significant = 4,722 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 3,5 m



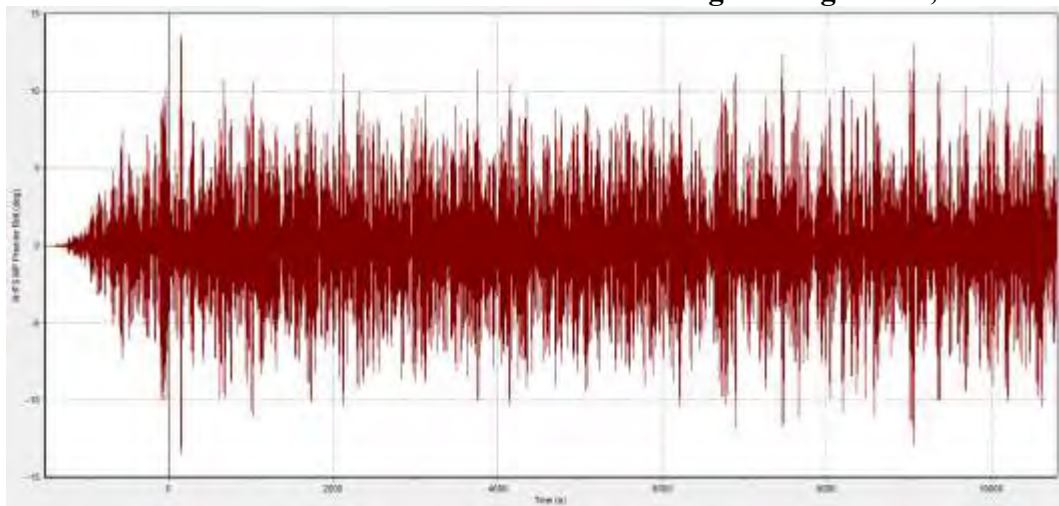
$m_0 = 7,589$ Roll Average = 3,443 deg Roll Significant = 5,509 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 4,0 m



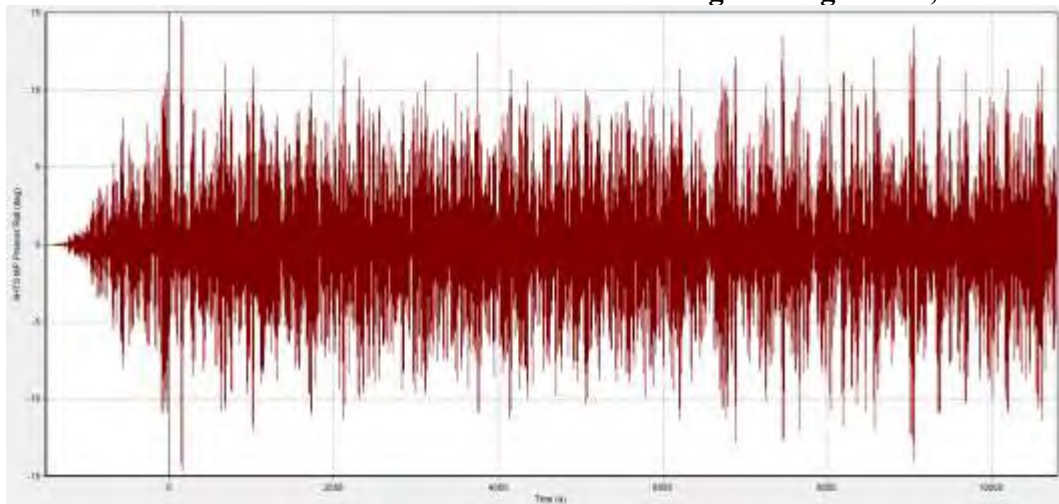
$m_0 = 9,912$ Roll Average = 3,935 deg Roll Significant = 6,296 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 4,6 m



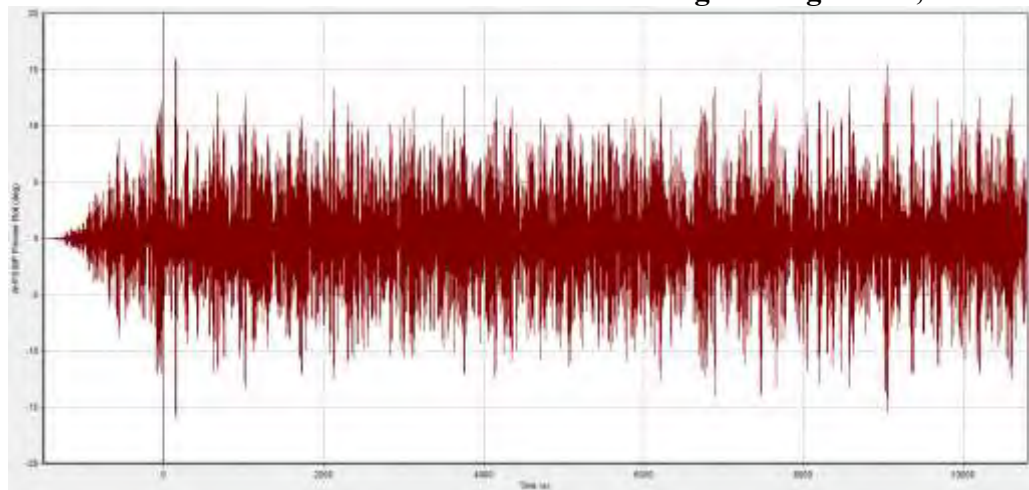
$m_0 = 13,11$ Roll Average = 4,52 deg Roll Significant = 7,24 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 5,0 m



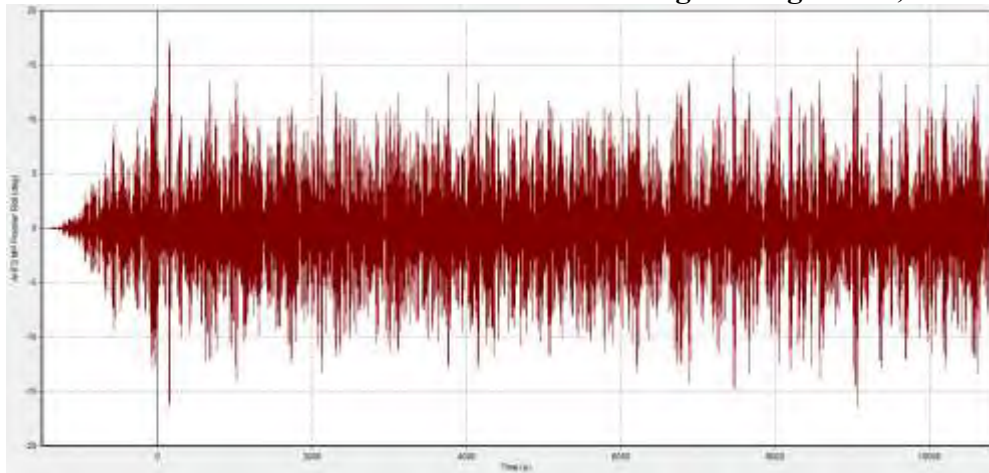
$m_0 = 15,488$ Roll Average = 4,919 deg Roll Significant = 7,871 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 5,5 m



$m_0 = 18,741$ Roll Average = 5,411 deg Roll Significant = 8,658 deg

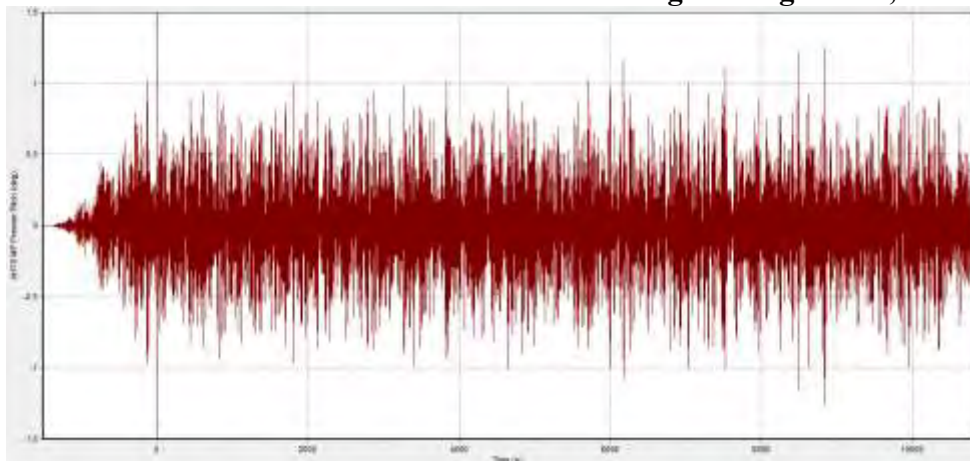
85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 120 deg – Hs 6,0 m



$m_0 = 21,564$ Roll Average = 5,804 deg Roll Significant = 9,287 deg

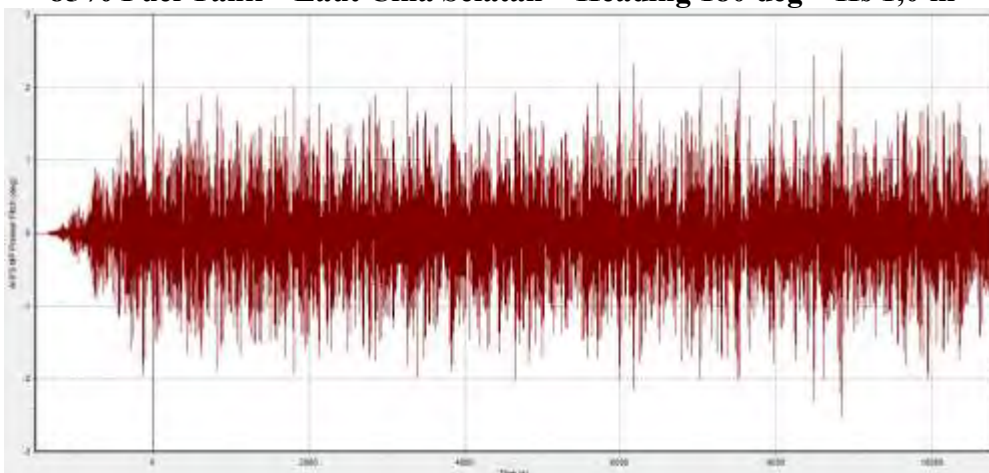
Pitch AHTS MP Premier pada Operasi Towing

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 0,5 m



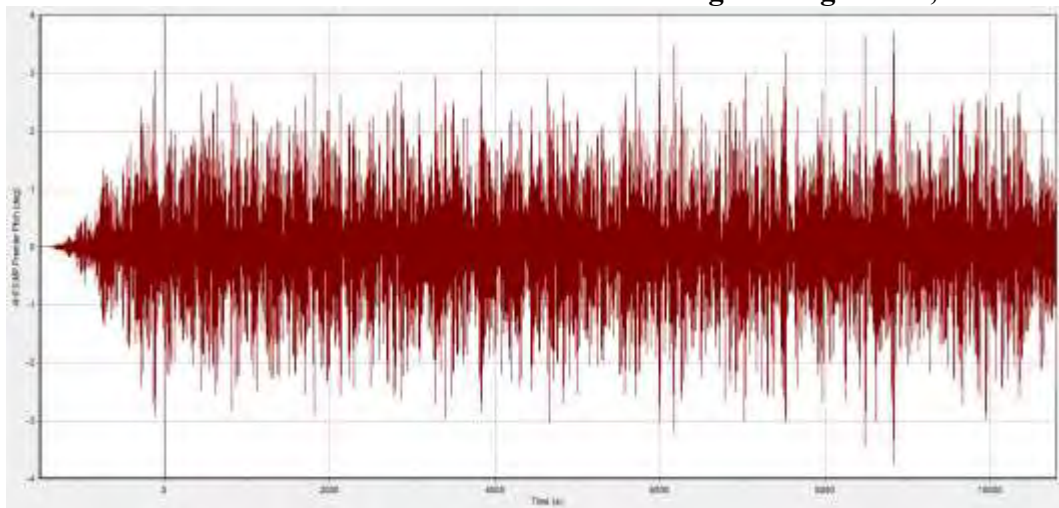
$m_0 = 0,088$ Pitch Average = 0,371 deg Pitch Significant = 0,595 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,0 m



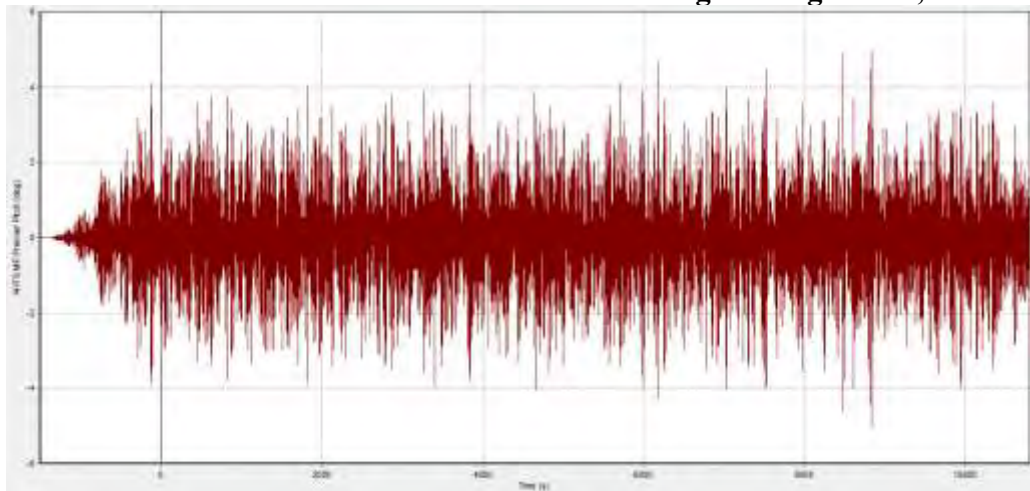
$m_0 = 0,354$ Pitch Average = 0,743 deg Pitch Significant = 1,19 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,5 m



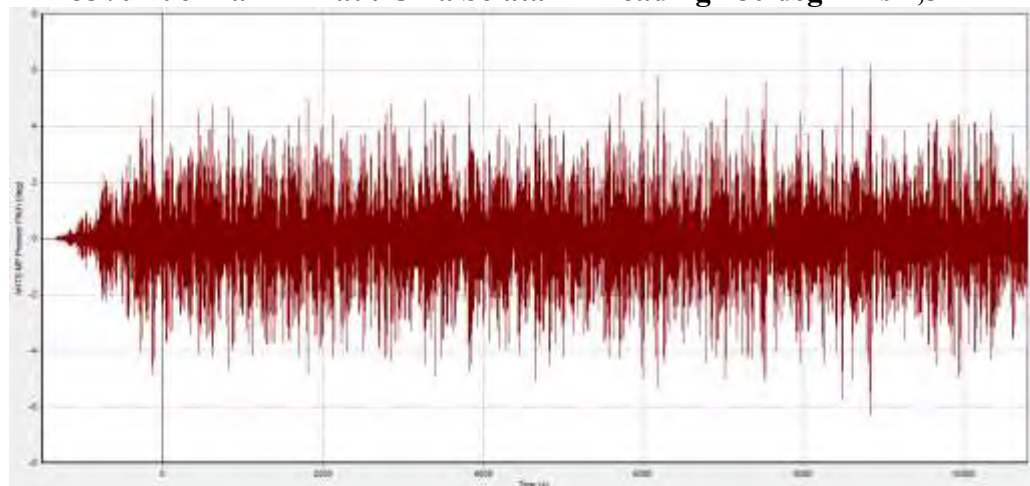
$m_0 = 0,796$ Pitch Average = 1,115 deg Pitch Significant = 1,785 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,0 m



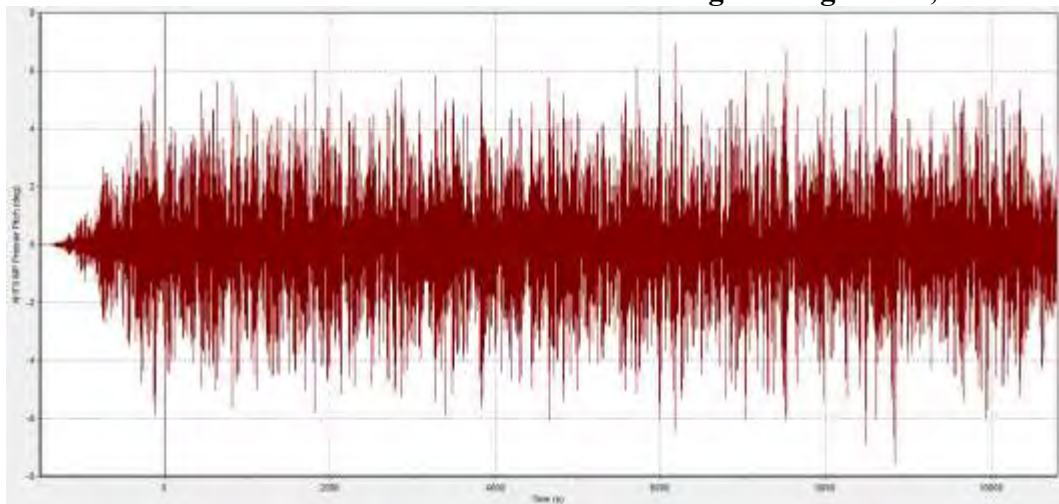
$m_0 = 1,416$ Pitch Average = 1,487 deg Pitch Significant = 2,38 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,5 m



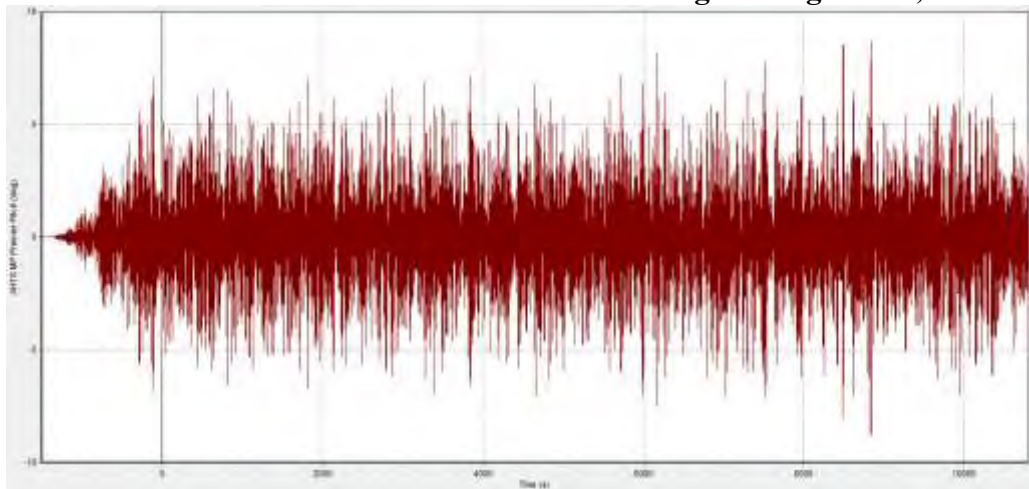
$m_0 = 2,212$ Pitch Average = 1,859 deg Pitch Significant = 2,975 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,0 m



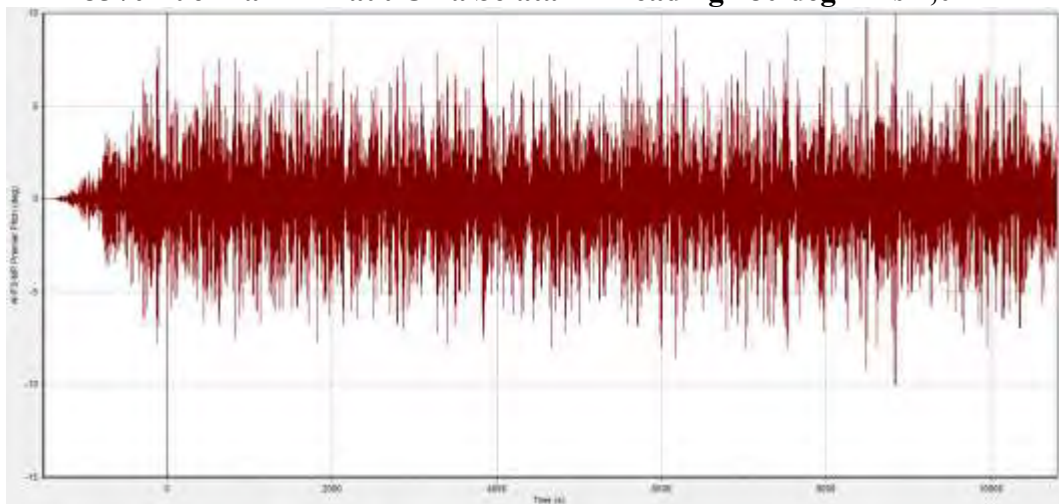
$m_0 = 3,186$ Pitch Average = 2,231 deg Pitch Significant = 3,57 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,5 m



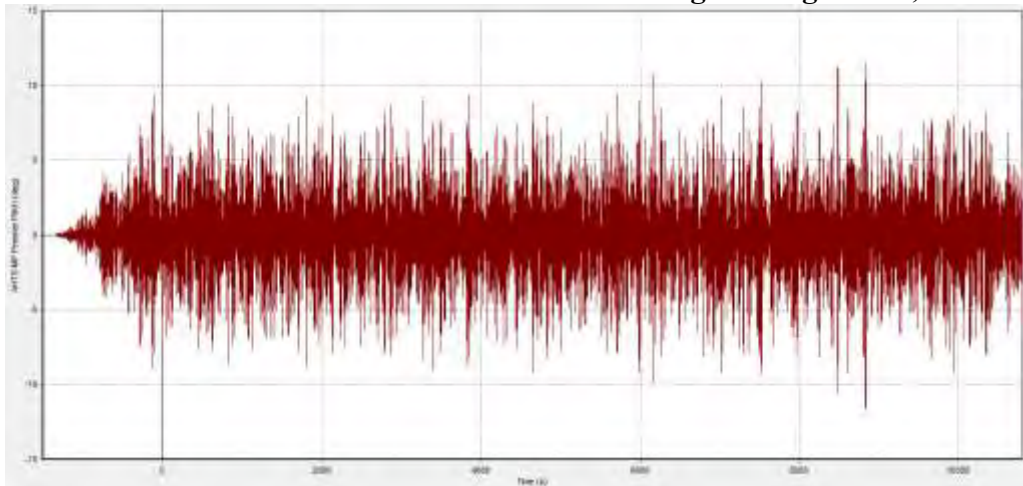
$m_0 = 4,337$ Pitch Average = 2,603 deg Pitch Significant = 4,165 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,0 m



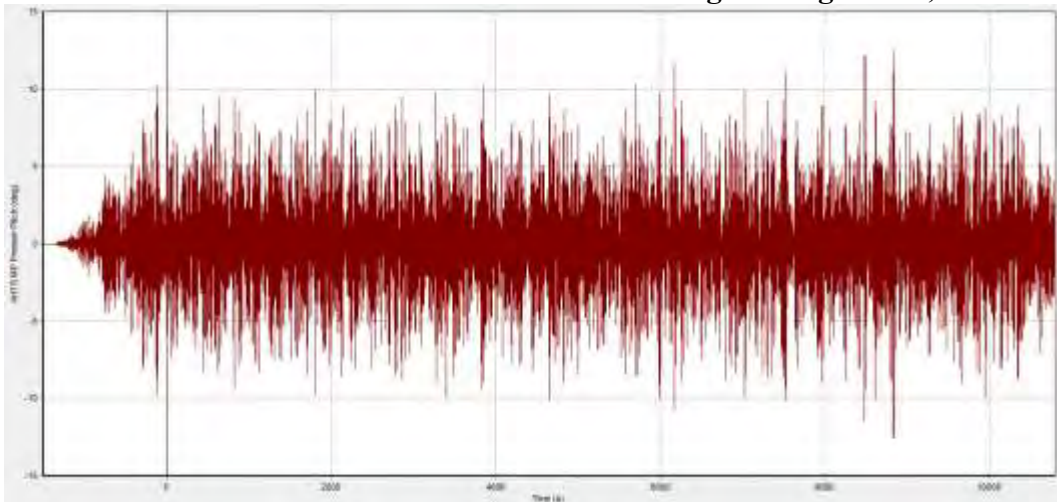
$m_0 = 5,664$ Pitch Average = 2,975 deg Pitch Significant = 4,76 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,6 m



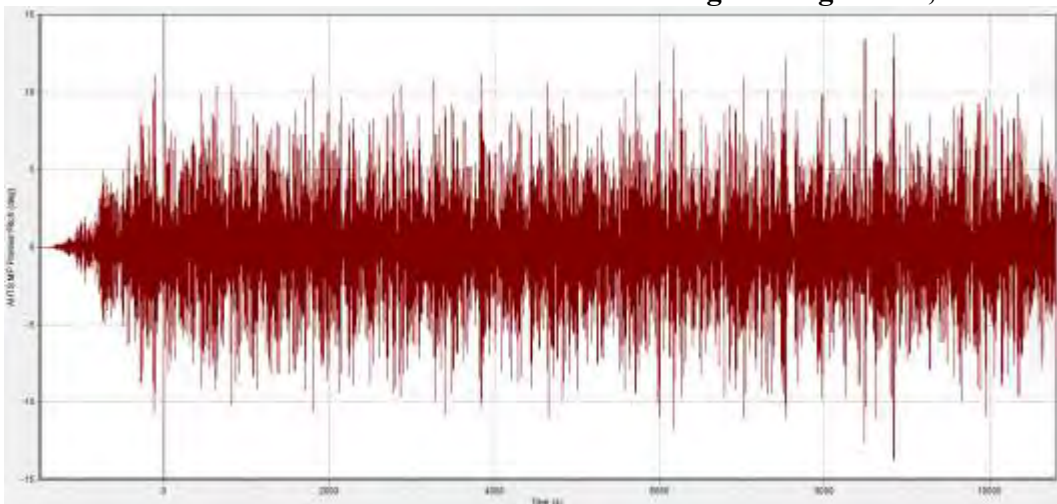
$m_0 = 7,491$ Pitch Average = 3,421 deg Pitch Significant = 5,474 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,0 m



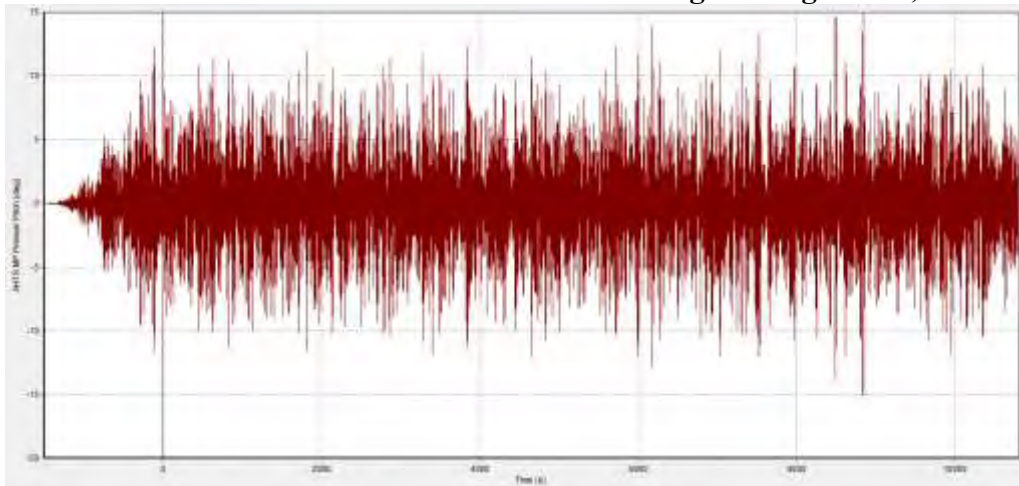
$m_0 = 8,851$ Pitch Average = 3,718 deg Pitch Significant = 5,95 deg

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,5 m



$m_0 = 10,71$ Pitch Average = 4,09 deg Pitch Significant = 6,545 deg

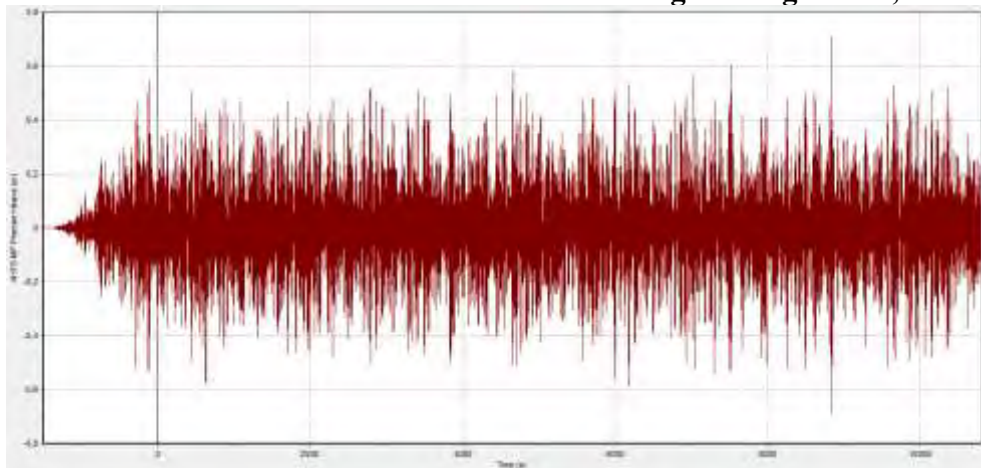
85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 6,0 m



$m_0 = 12,746$ Pitch Average = 4,462 deg Pitch Significant = 7,14 deg

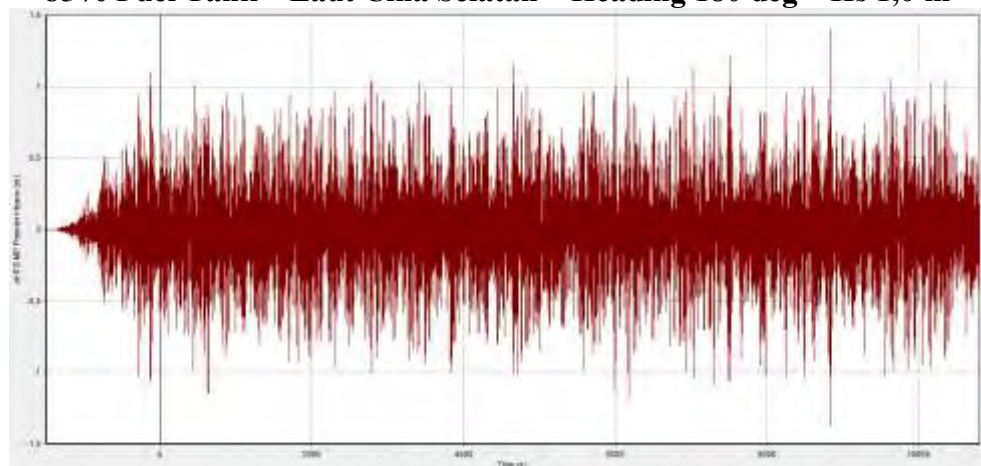
Heave Displacement AHTS MP Premier pada Operasi Towing

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 0,5 m



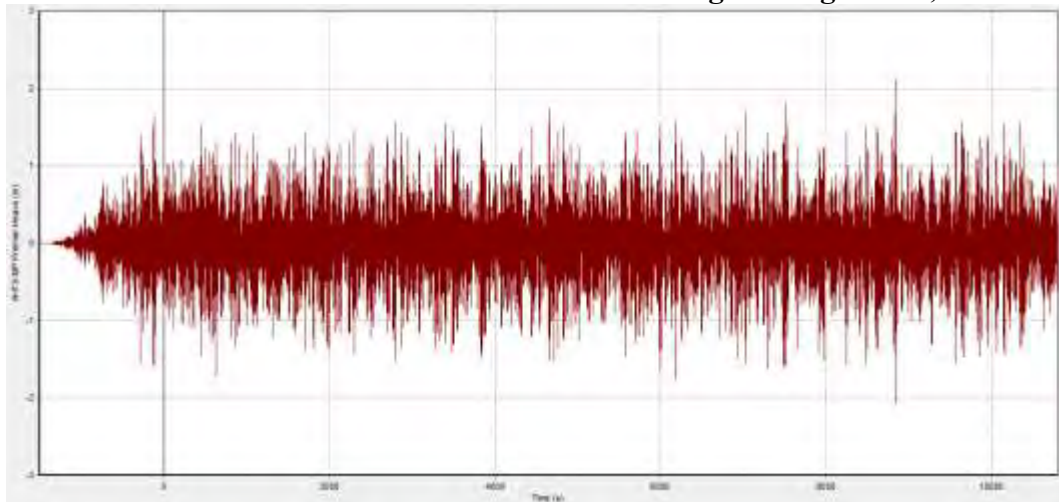
$m_0 = 0,026$ Heave Average = 0,205 m Heave Significant = 0,328 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,0 m



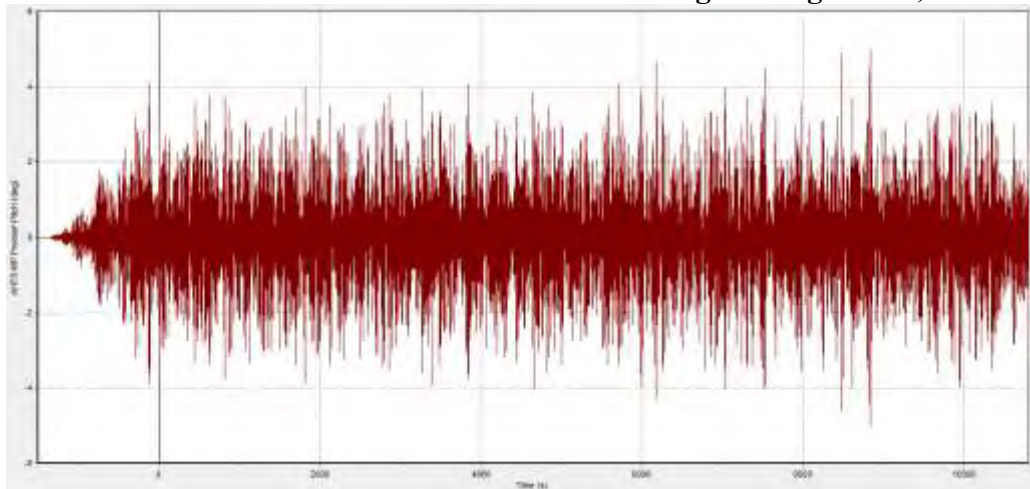
$m_0 = 0,107$ Heave Average = 0,41 m Heave Significant = 0,656 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,5 m



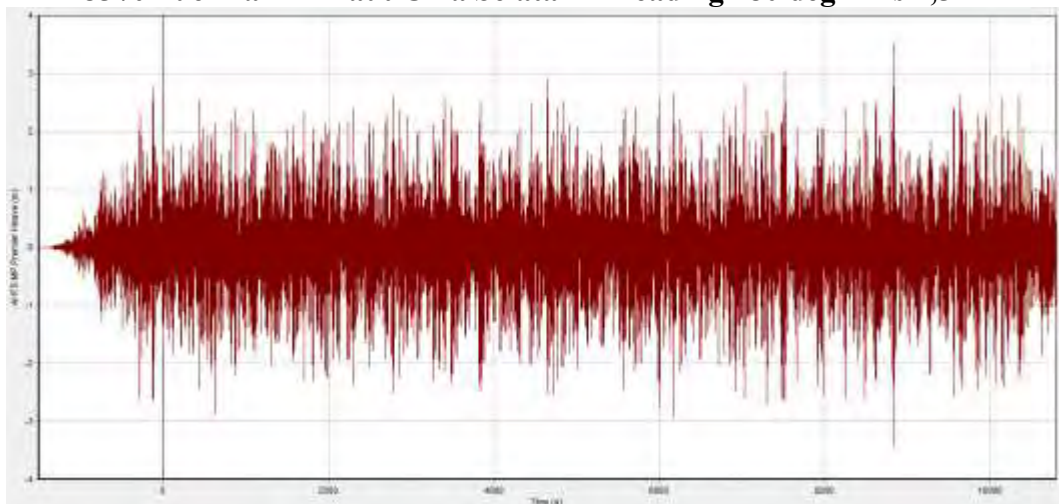
$m_0 = 0,242$ Heave Average = 0,615 m Heave Significant = 0,984 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,0 m



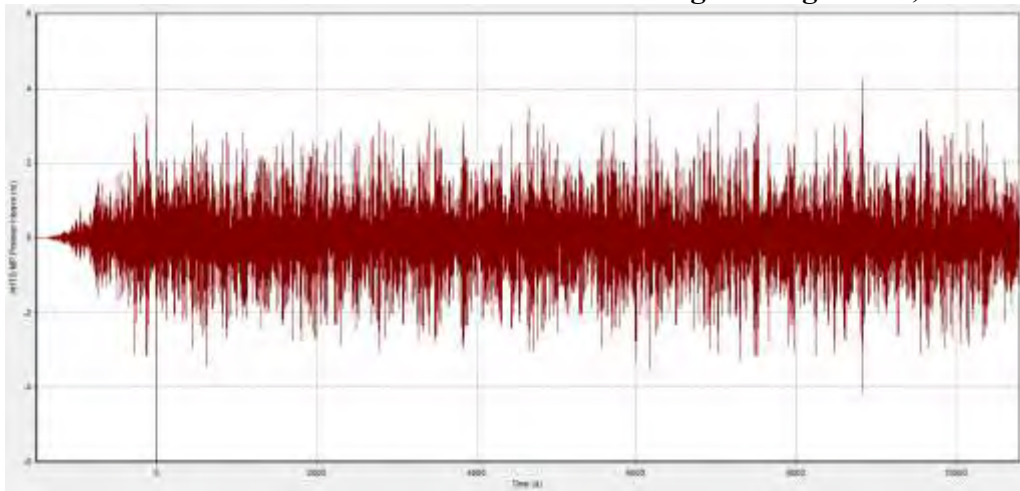
$m_0 = 0,43$ Heave Average = 0,82 m Heave Significant = 1,312 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,5 m



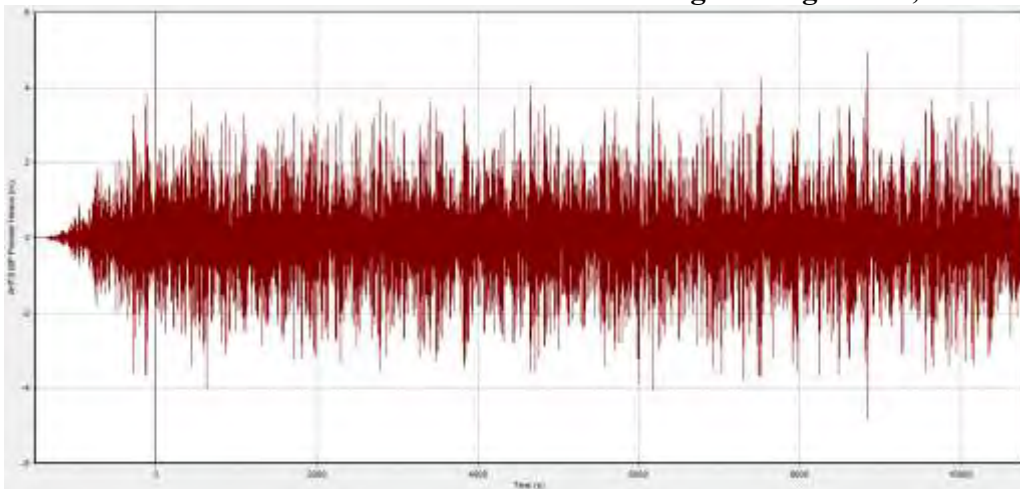
$m_0 = 0,673$ Heave Average = 1,025 m Heave Significant = 1,64 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,0 m



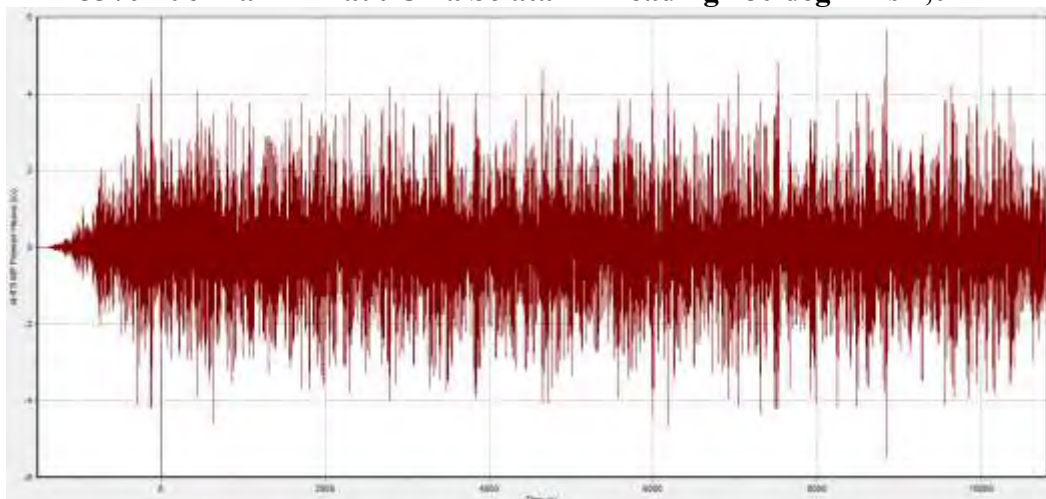
$m_0 = 0,969$ Heave Average = 1,23 m Heave Significant = 1,968 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,5 m



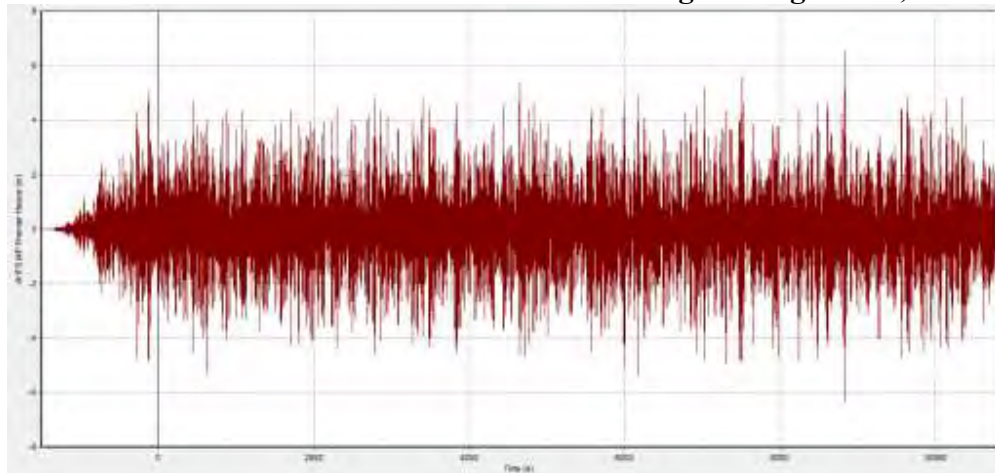
$m_0 = 1,318$ Heave Average = 1,435 m Heave Significant = 2,296 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,0 m



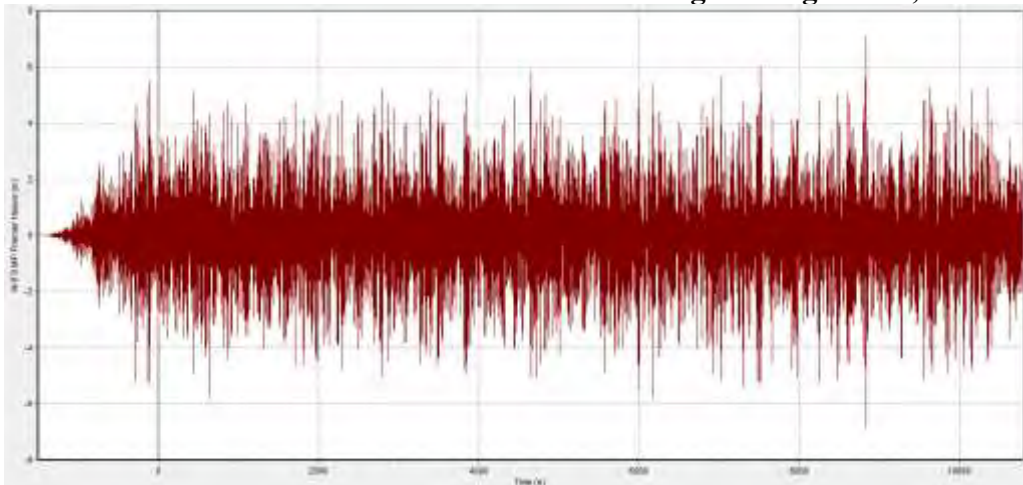
$m_0 = 1,722$ Heave Average = 1,64 m Heave Significant = 2,624 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,6 m



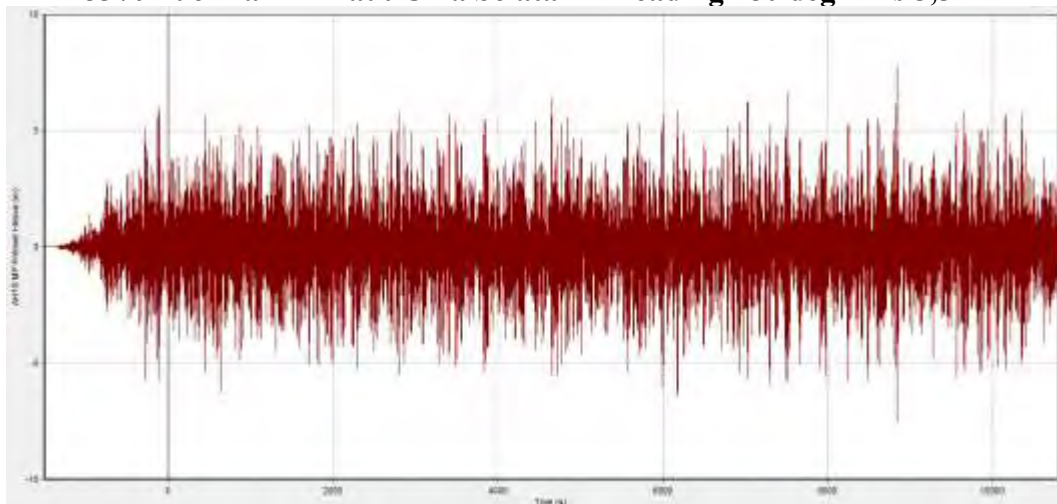
$m_0 = 2,276$ Heave Average = 1,886 m Heave Significant = 3,017 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,0 m



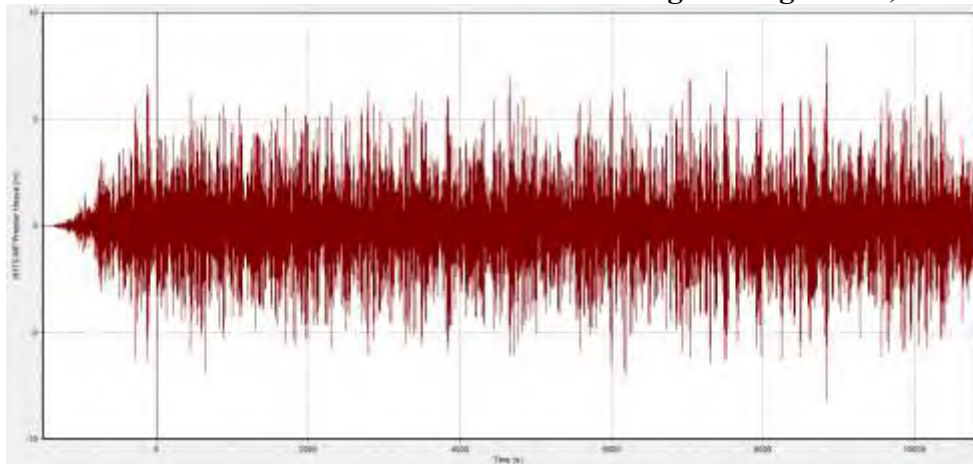
$m_0 = 02,688$ Heave Average = 2,04 m Heave Significant = 3,279 m

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,5 m



$m_0 = 3,252$ Heave Average = 2,254 m Heave Significant = 3,606 m

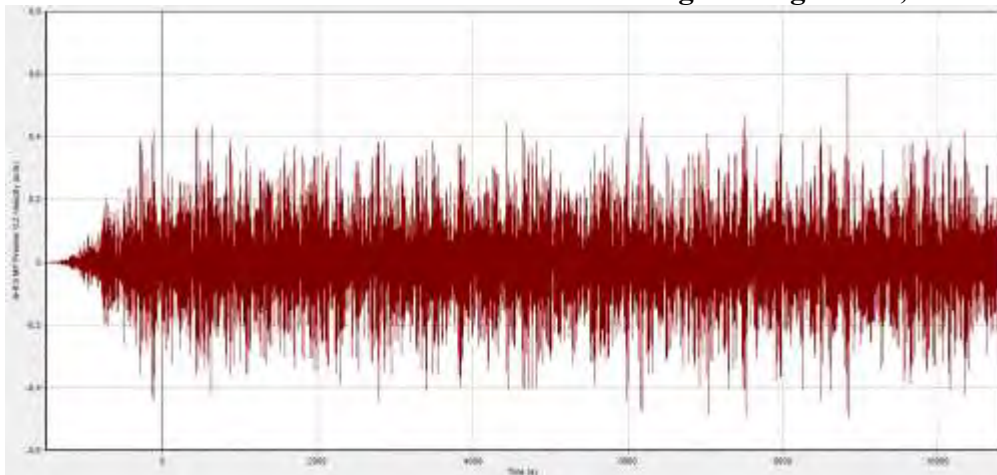
85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 6,0 m



$m_0 = 3,869$ Heave Average = 2,45 m Heave Significant = 3,933 m

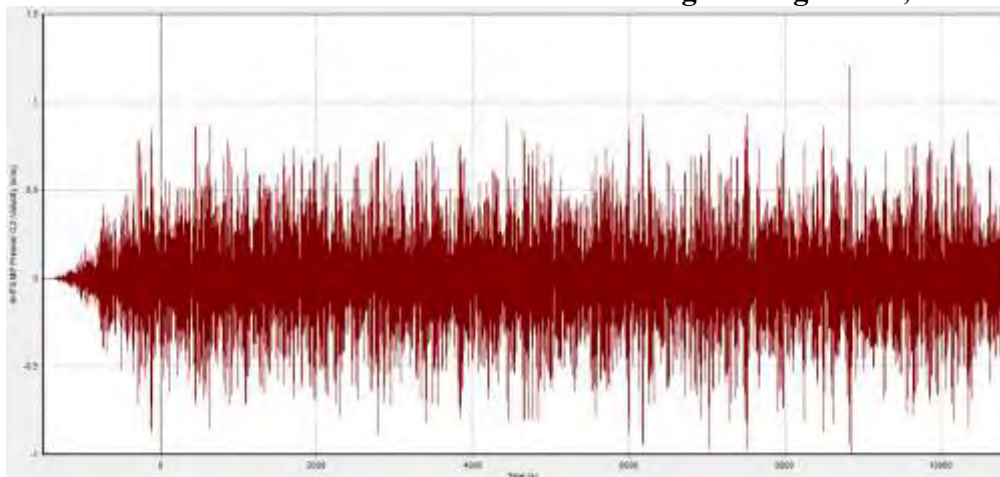
Heave Velocity AHTS MP Premier pada Operasi Towing

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 0,5 m



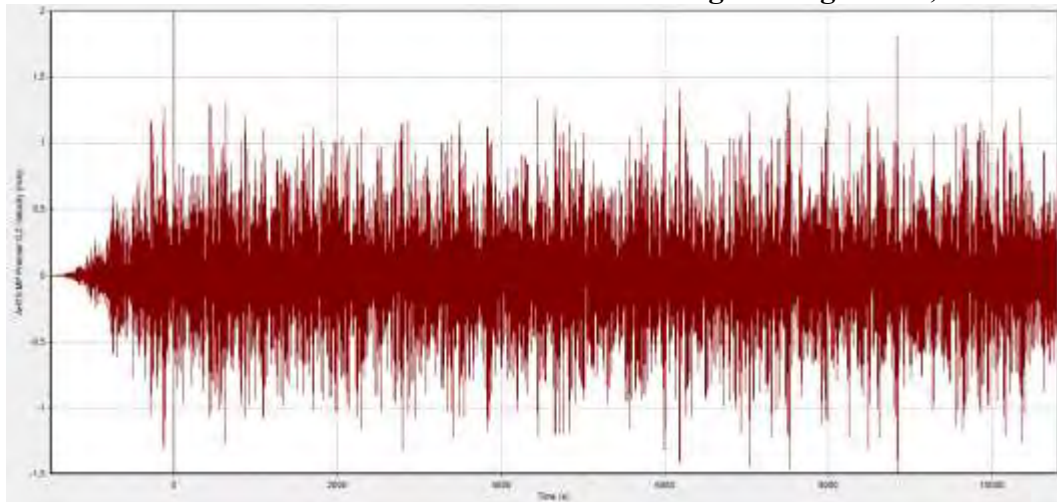
$m_0 = 0,016$ Heave Average = 0,16 m/s Heave Significant = 0,256 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,0 m



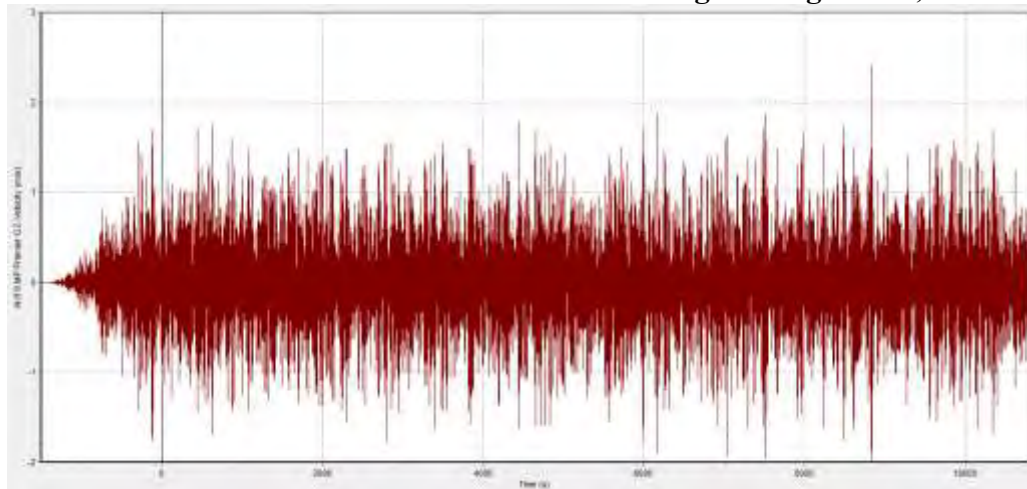
$m_0 = 0,066$ Heave Average = 0,321 m/s Heave Significant = 0,513 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,5 m



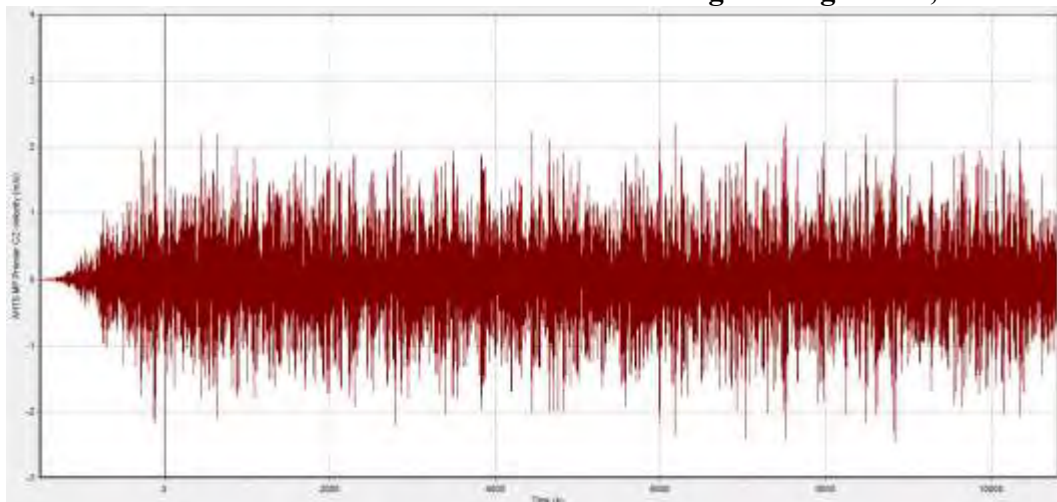
$m_0 = 0,148$ Heave Average = 0,481 m/s Heave Significant = 0,77 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,0 m



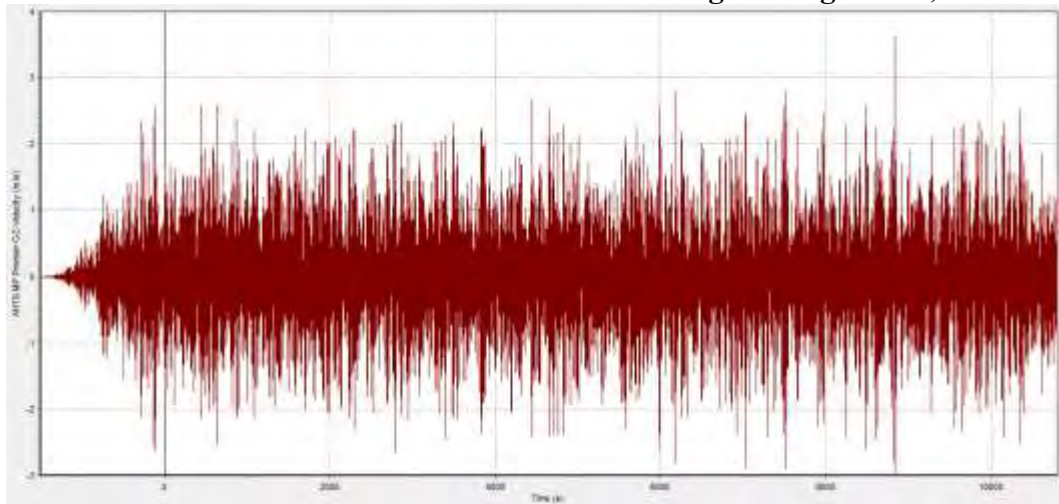
$m_0 = 0,264$ Heave Average = 0,642 m/s Heave Significant = 1,027 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,5 m



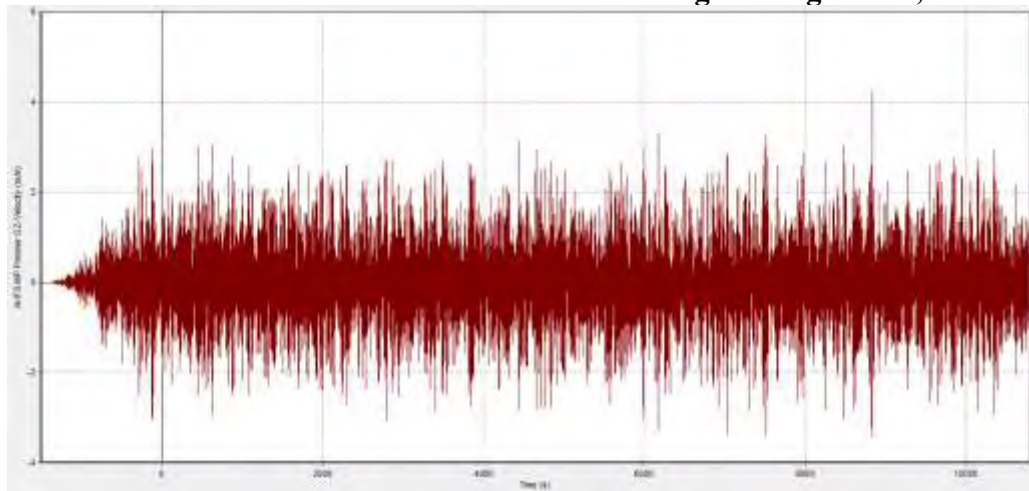
$m_0 = 0,412$ Heave Average = 0,802 m/s Heave Significant = 1,284 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,0 m



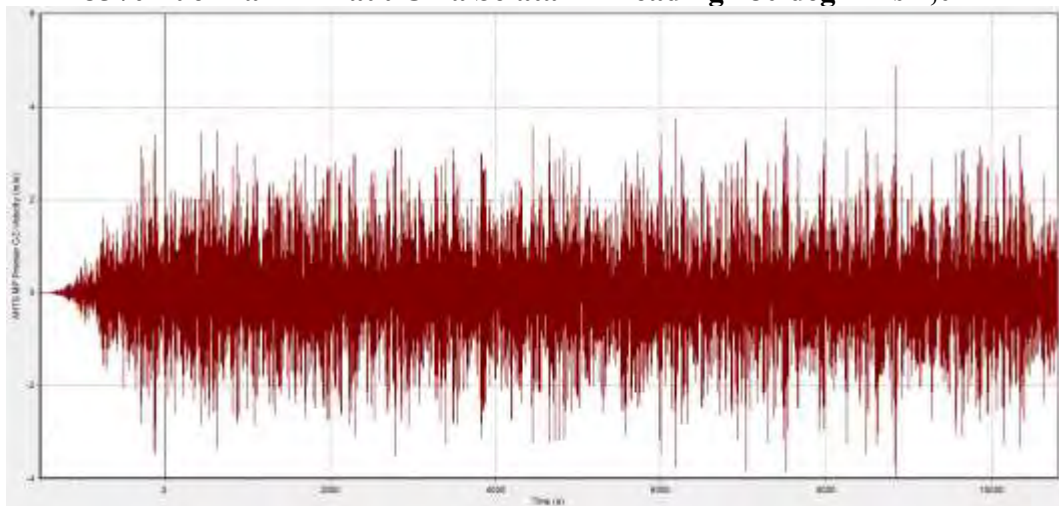
$m_0 = 0,593$ Heave Average = 0,963 m/s Heave Significant = 1,541 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,5 m



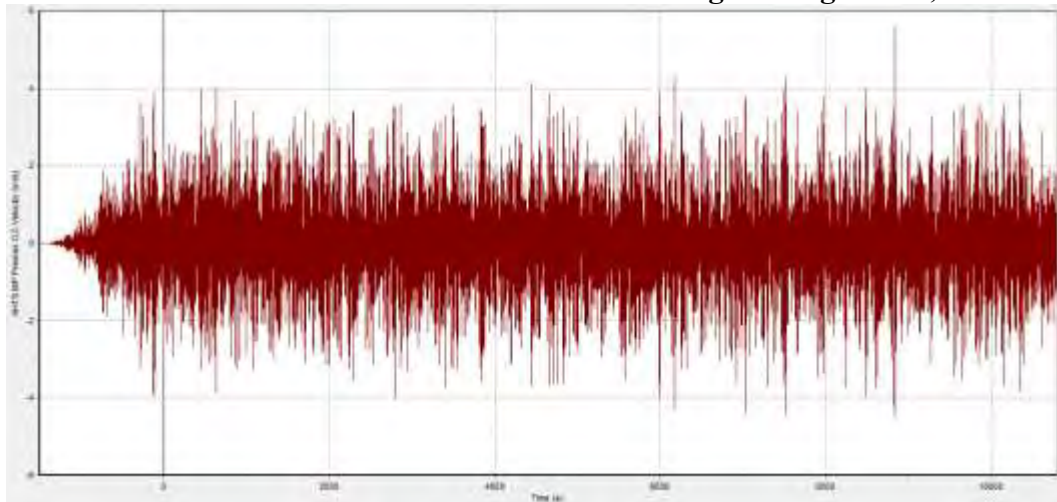
$m_0 = 0,808$ Heave Average = 1,123 m/s Heave Significant = 1,798 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,0 m



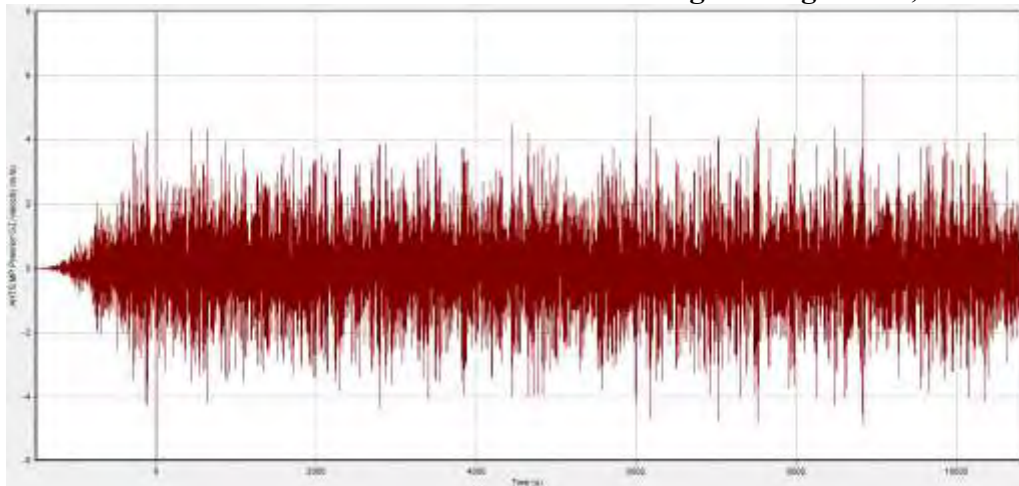
$m_0 = 1,055$ Heave Average = 1,284 m/s Heave Significant = 2,054 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,6 m



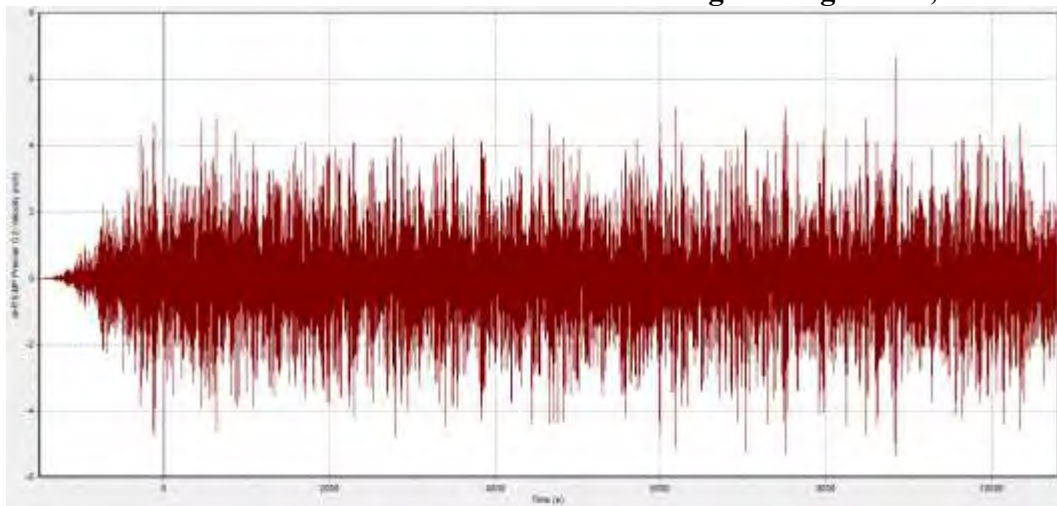
$m_0 = 1,395$ Heave Average = 1,476 m/s Heave Significant = 2,362 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,0 m



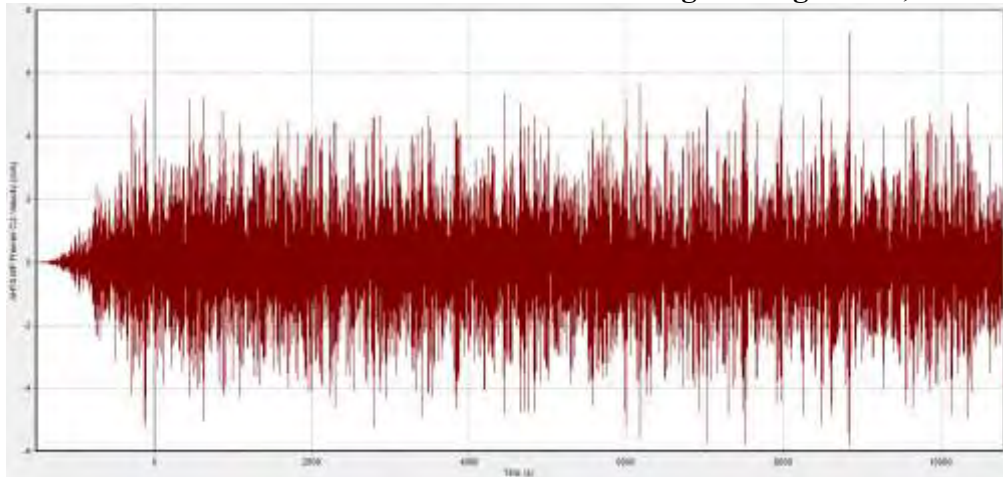
$m_0 = 1,648$ Heave Average = 1,604 m/s Heave Significant = 2,567 m/s

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,5 m



$m_0 = 1,993$ Heave Average = 1,764 m/s Heave Significant = 2,823 m/s

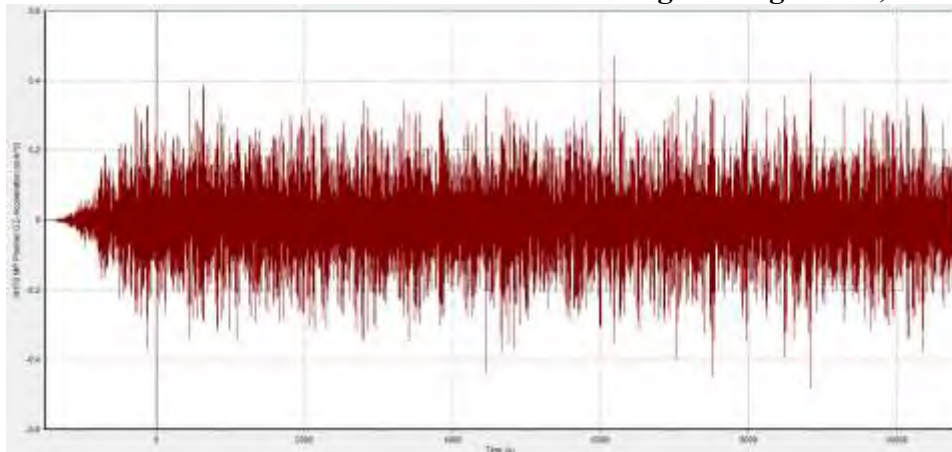
85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 6,0 m



$m_0 = 2,371$ Heave Average = 1,924 m/s Heave Significant = 3,079 m/s

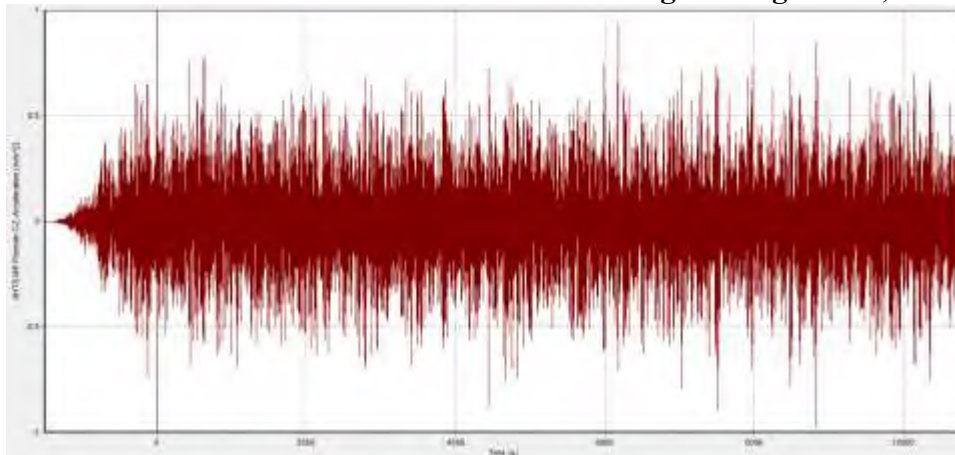
Heave Acceleration AHTS MP Premier pada Operasi Towing

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 0,5 m



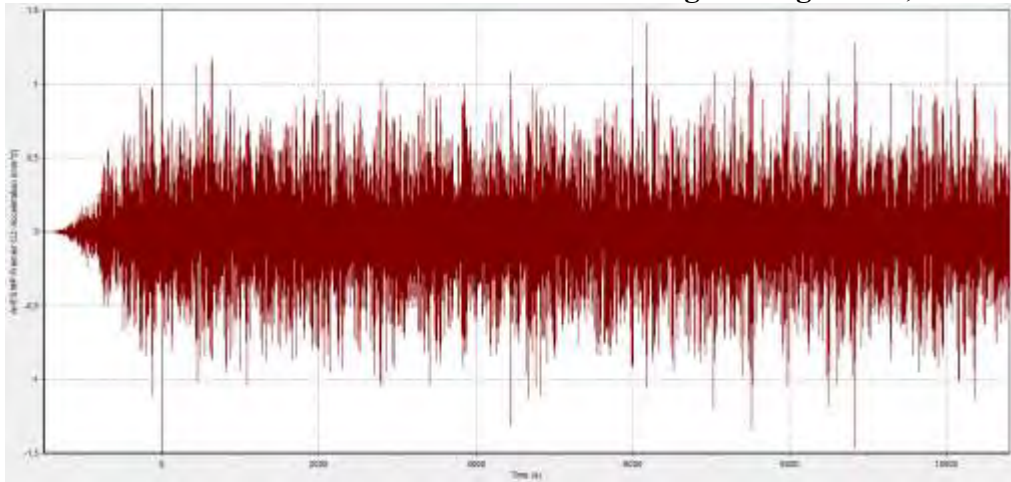
$m_0 = 0,011$ Heave Average = 0,134 m/s² Heave Significant = 0,215 m/s²

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,0 m



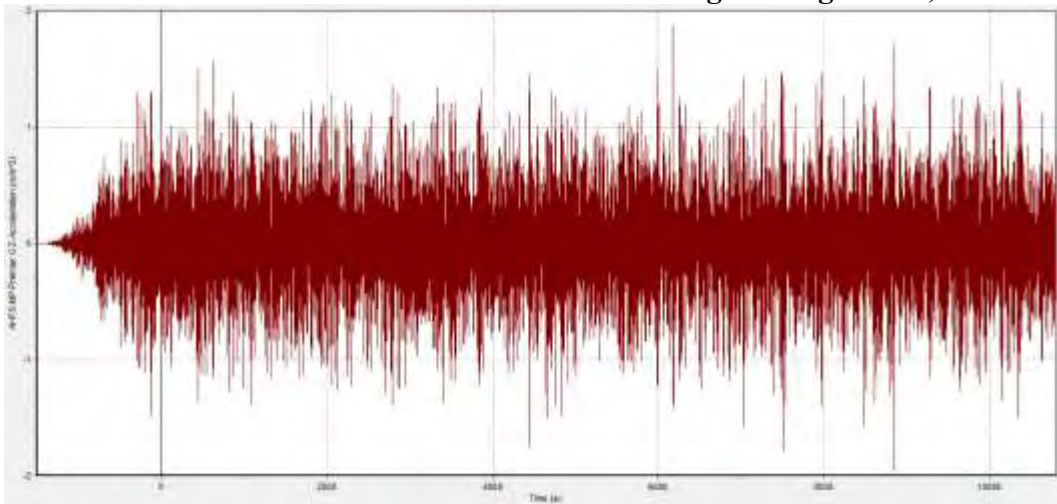
$m_0 = 0,046$ Heave Average = 0,269 m/s² Heave Significant = 0,43 m/s²

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 1,5 m



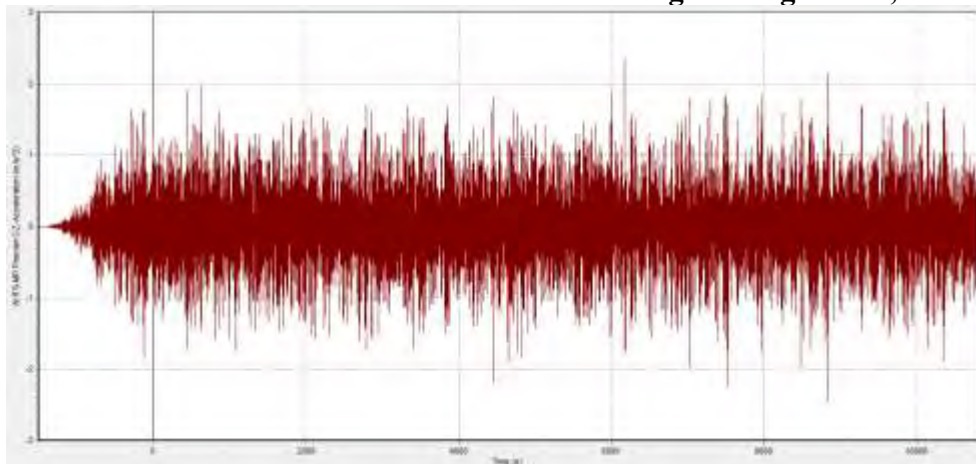
$m_0 = 0,104$ Heave Average = $0,403 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $0,645 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,0 m



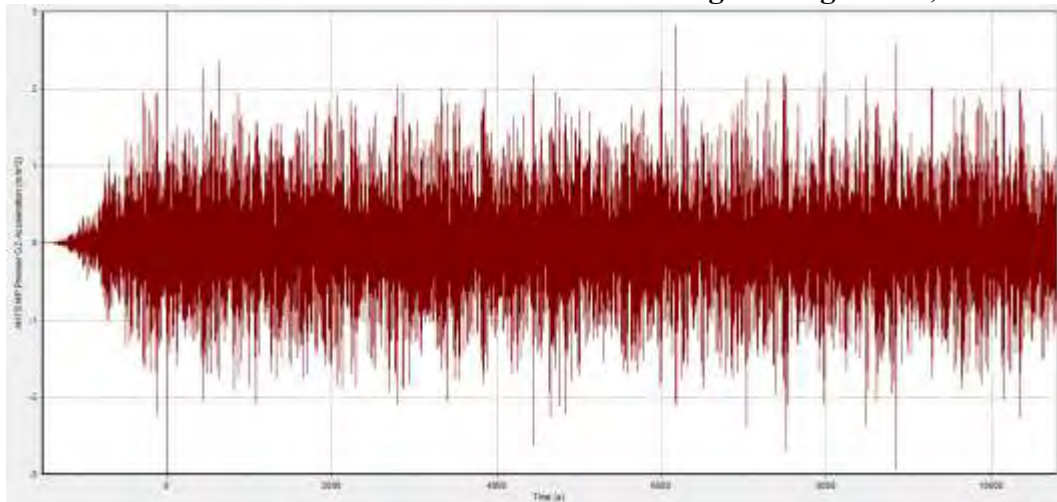
$m_0 = 0,185$ Heave Average = $0,538 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $0,861 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 2,5 m



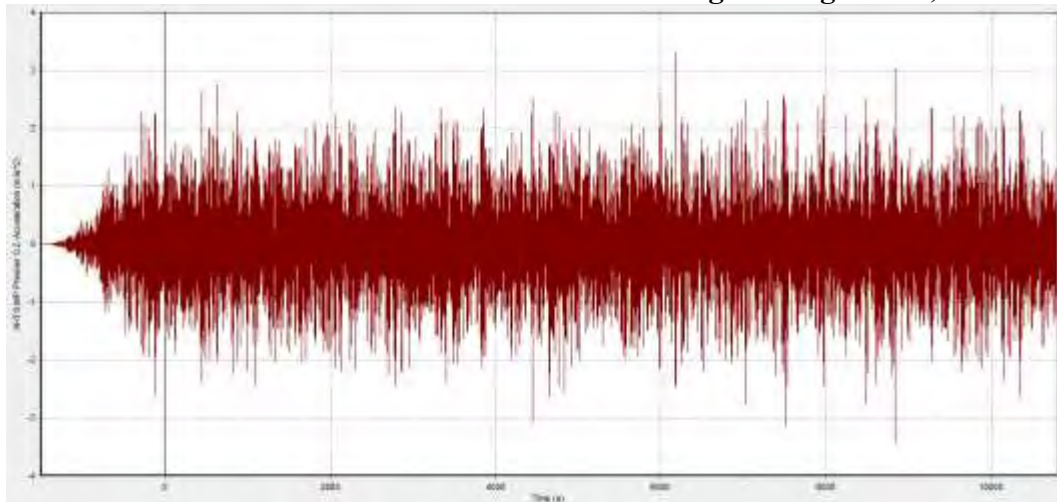
$m_0 = 0,289$ Heave Average = $0,672 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,076 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,0 m



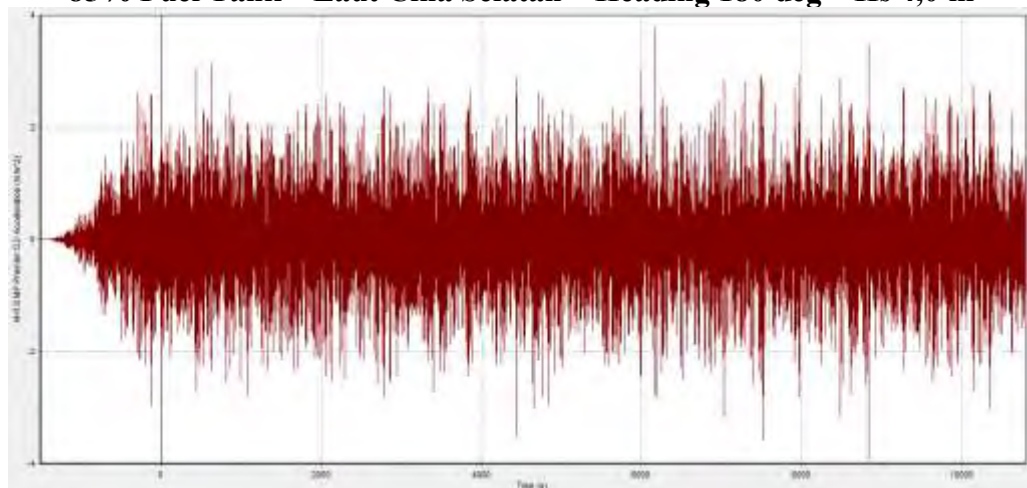
$m_0 = 0,416$ Heave Average = $0,807 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,291 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 3,5 m



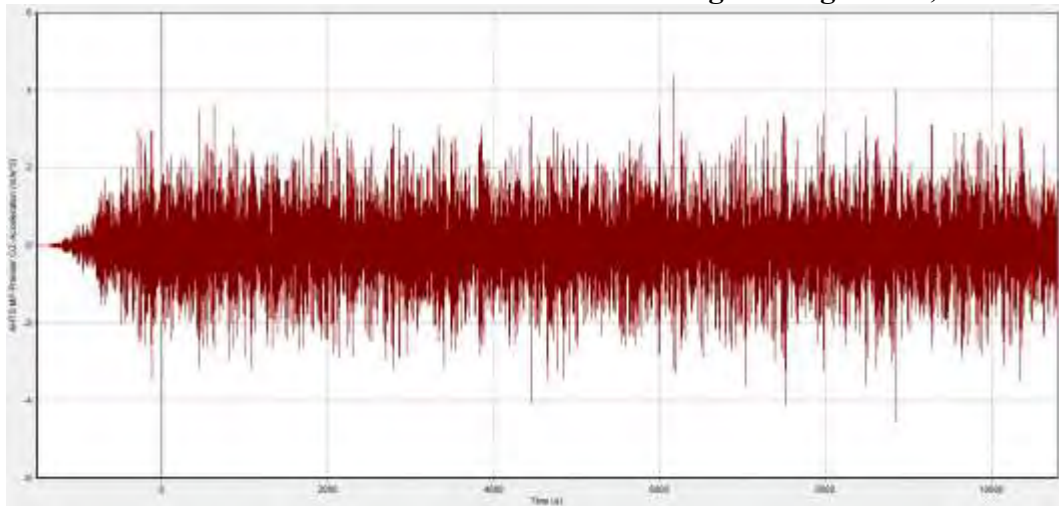
$m_0 = 0,567$ Heave Average = $0,941 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,506 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,0 m



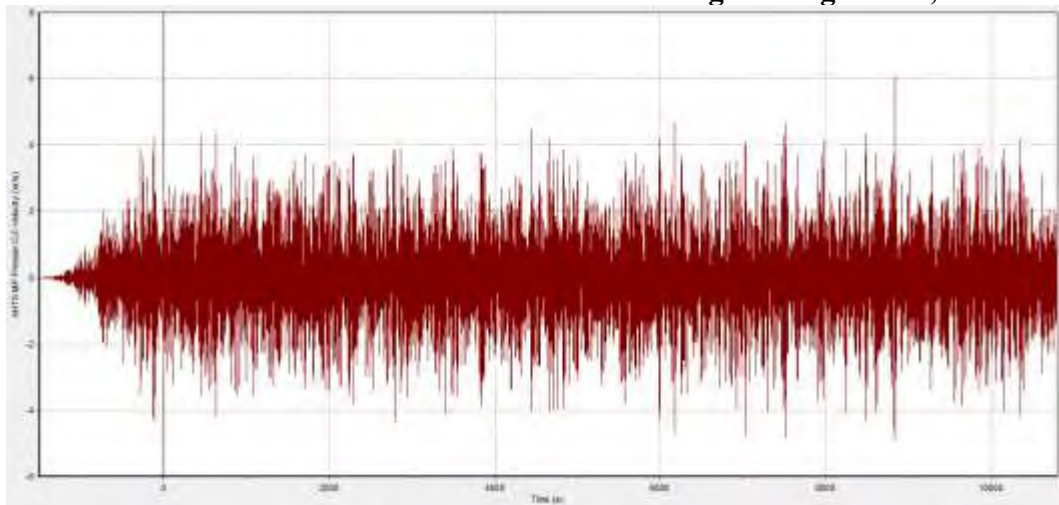
$m_0 = 0,741$ Heave Average = $1,076 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,721 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 4,6 m



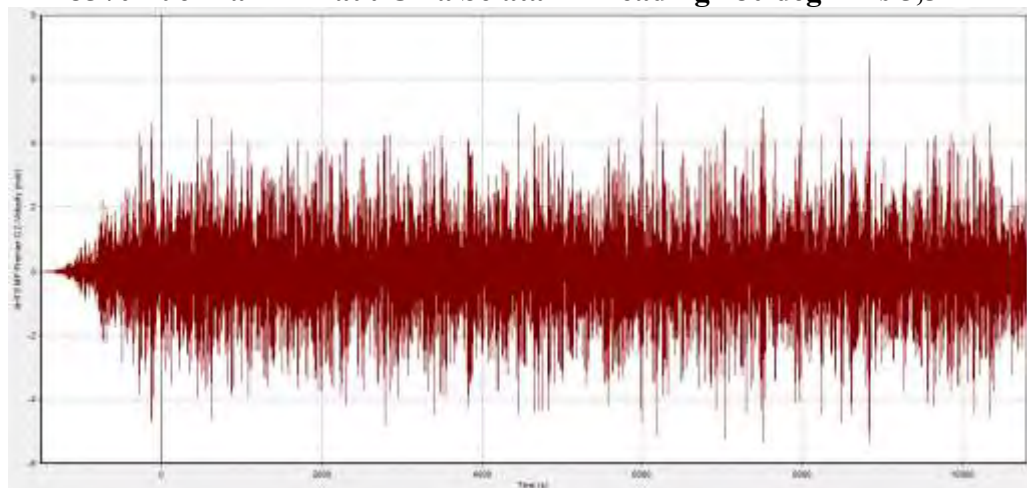
$m_0 = 0,979$ Heave Average = $1,23 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $1,979 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,0 m



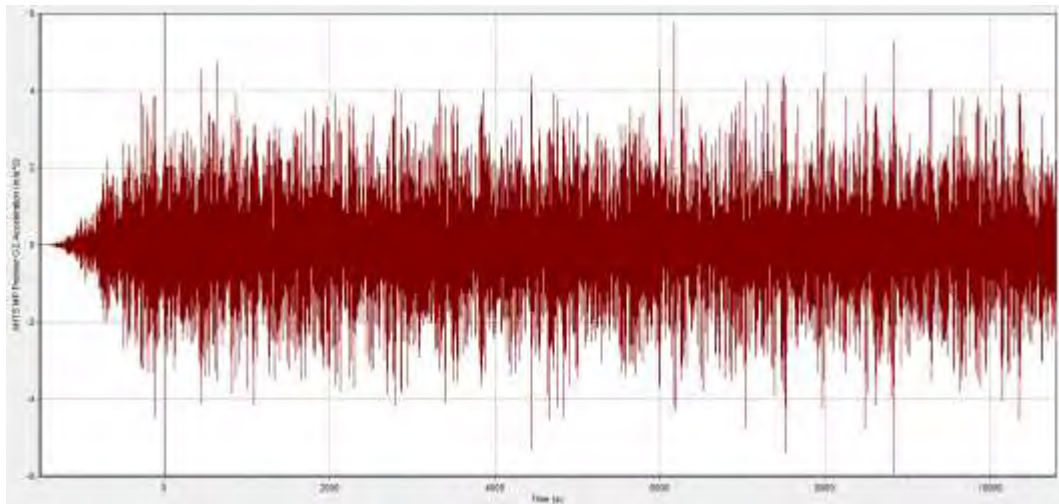
$m_0 = 1,157$ Heave Average = $1,344 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $2,151 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 5,5 m



$m_0 = 1,399$ Heave Average = $1,479 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $2,366 \text{ m/s}^2$

85% Fuel Tank – Laut Cina Selatan – Heading 180 deg – Hs 6,0 m



$m_0 = 1,665$ Heave Average = $1,613 \text{ m/s}^2$ Heave Significant = $2,581 \text{ m/s}^2$

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan kemampuan AHTS MP Premier selama melakukan *towing* FSO Arco Ardjuna baik dalam *motion*, *slamming*, dan *greenwater*.

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

1. AHTS MP Premier sebagai *tow master* dalam melakukan operasi *towing* FSO ARCO Ardjuna mengalami maksimum rata-rata *roll* sebesar $4,526^\circ$ pada kondisi *85% fuel tank* dengan *heading* 120° , maksimum rata-rata *pitch* sebesar $3,421$ deg pada kondisi *85% fuel tank* dengan *heading* 180° , maksimum signifikan *heave acc.* sebesar $1,980$ m/s² pada kondisi *85% fuel tank* dengan *heading* 180° , maksimum *double signifikan roll* sebesar $14,482^\circ$ pada kondisi *85% fuel tank* dengan *heading* 120° , maksimum *double heave* sebesar $6,034$ m pada kondisi *85% fuel tank* dengan *heading* 180° , dan maksimum *signifikan heave velocity* sebesar $2,362$ m/s pada kondisi *85% fuel tank* dengan *heading* 180° .
2. AHTS MP Premier sebagai *tow master* dalam melakukan operasi *towing* FSO ARCO Ardjuna akan mendapatkan *probability slamming* pada kondisi *full load* dengan *heading* 180° sebesar $0,01147$, *full load* dengan *heading* 150° sebesar $0,00544$, *full load* dengan *heading* 120° sebesar $0,00074$, *85% fuel tank* dengan *heading* 180° sebesar $0,01259$, *85% fuel tank* dengan *heading* 150° sebesar $0,00702$, *85% fuel tank* dengan *heading* 120° sebesar $0,00094$, *69% fuel tank* dengan *heading* 180° sebesar $0,00260$, *69% fuel tank* dengan *heading* 150° sebesar $0,00133$, dan *69% fuel tank* dengan *heading* 120° sebesar $0,00008$.
3. AHTS MP Premier sebagai *tow master* dalam melakukan operasi *towing* FSO ARCO Ardjuna akan mendapatkan *probability greenwater* pada kondisi *full load* dengan *heading* 180° sebesar $0,01741$, *full load* dengan *heading* 150° sebesar $0,00886$, *full load* dengan *heading* 120° sebesar $0,00146$, *85% fuel tank* dengan *heading* 180° sebesar $0,01435$, *85% fuel tank* dengan *heading* 150°

sebesar 0,00815, 85% *fuel tank* dengan *heading* 120° sebesar 0,00116, 69% *fuel tank* dengan *heading* 180° sebesar 0,00207, 69% *fuel tank* dengan *heading* 150° sebesar 0,00096, dan 69% *fuel tank* dengan *heading* 120° sebesar 0,00005.

4. Batas Hs yang memungkinkan aspek *general criteria* dan *probability slamming* serta *greenwater* terpenuhi adalah pada kondisi operasi Hs 4 m. Berdasarkan hal tersebut didapat nilai operabilitas AHTS MP Premier selama melakukan operasi *towing* sebesar 98,99%. Selain itu batas gelombang untuk AHTS MP Premier melakukan operasi pemindahan muatan/*helicopter criteria* adalah Hs 1,5 m.

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan dari hasil analisis ini adalah

1. Prediksi gerakan relatif vertikal yang ditinjau diharapkan tidak hanya *heave* dan *pitch* saja. Disarankan memasukan efek gerakan *roll* sehingga akan lebih realistis dalam menismulasikan perilaku AHTS.
2. Melakukan tinjauan *slamming* dan *greenwater* tidak pada satu titik tinjauan saja, bisa menambahkan titik tinjauan lain sehingga dapat dilihat pengaruh perbedaan titik tinjau tersebut.
3. Pengkajian terhadap arah datang (*heading*) gelombang lain seperti *beam sea* (90 deg) dan *head quarter sea* (135 deg).
4. Pemodelan struktur AHTS pendamping untuk menciptakan operasi yang lebih *detail*.
5. Meninjau gerakan pada FSO Arco Ardjuna dan AHTS Pendamping saat operasi *towing* berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Bales, N. K. 1976. *Slamming and Deck Wetness Characteristic of a United States Coast Guard Medium Endurance Cutter in Long-crested, Head Seas*. David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center. Washington, D. C., USA.
- Bhattacharyya, R. 1972. *Dynamics of Marine Vehicles*. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Buchner, Bas. 2003. “*Design Aspects of Greenwater Loading on FPSO*”. The 22nd International Conference on OMAE 2003. Cancun, Mexico.
- Bustamin, Maulidya Octaviani. 2012. “*Analisa Greenwater Akibat Gerakan Offshore Security Vessel*”. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Chakrabarti, S. K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Computational Mechanics Publications Southampton. USA.
- Chakrabarti, S. K. 2005. *Handbook of Offshore Engineering, Volume II, Offshore Structure Analysis*, Plainfield Illinois. USA.
- Chen, Wenming. 2013. *Design and Operation of Anchor Handling Tug Supply Vessels*. Master’s Thesis on Faculty of Science and Technology in University of Stavanger. Norway.
- Darmawan, Iwan. 2012. “*Analisa Slamming Offshore Patrol Boat*”. Jurusan Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya. Indonesia.
- Dawson, Thomas H. 1983. *Offshore Structural Engineering*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey.
- Djatmiko, E.B., 2012. “*Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*”, ITS Press. Surabaya, Indonesia.
- Faltinsen, O.M., 1990. “*Sea Loads and Ships and Offshore Structure*”. Cambridge University Press. Cambridge. UK.
- International Maritime Organization. 1998. *Guidelines for Safe Ocean Towing*. Albert Embankment. London.
- Iswara, I.D.G Ngurah Krishna., 2013. “*Evaluasi Aspek Greenwater pada Perancangan Drillship Displacemen 35.000 Ton*”. Tugas Akhir Jurusan

- Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Jiang Tao. 1998. *Dynamic Behavior of a Tow System under an Autopilot on the Tug*. International Symposium and Workshop on Forces Acting on a Manoeuvring Vessel MAN'98. Val de Reuil, France.
- Journee, J.M.J dan Massie, W.W. 2001. "*Offshore Hydromechanics – First Edition*". Delft University of Technology.
- Kareka, M. Y. 2014. "*Studi Parametrik dan Operabilitas Akibat Pengaruh Kemiringan Kolom pada Semi-submersible dengan Konfigurasi Enam kaki dan Ponton Berpenampang Persegi Empat*". Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Llyod, A.R.J.M. 1989. "*Seakeeping : Ship Behaviour in rough weather*". Ellis Horwood Series in Marine Technology. California, USA.
- Murtedjo, M. 1990. *Teori Gerak*. Jurusan Teknik Kelautan ITS. Surabaya.
- Nakayama Yoshiyuki. 2012. *Time Domain Simulation of Wave-Induced Motions of Tow and Towed Ships in Head Seas*. Journal of Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 15, p. 91-100. Japan.
- ND 0021. 2015. "*Guidelines for The Approval of Towing Vessels*". Norway.
- ND 0030. 2015. "*Guidelines for Marine Transportations*". Norway.
- Perwitasari, Ratna Nita. 2008. "*Karakteristik Slamming Offshore Supply Vessel*". Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- PHE ONWJ. 2014. "*Shipping and Ardjuna Marine Terminal Presentation for PDP*". Jakarta.
- PHE ONWJ , 2014. "*FSO Arco Ardjuna Dry Docking – Project Overview*". Jakarta.
- Prasetyo, Novan Anugrah. 2012. "*Analisa Stabilitas Dinamis Ecogreen Barge Pada Operasi Towing*". Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
- Pratiwi, Hanna Indah. 2012. "*Analisa Kekuatan Struktur Sistem Tandem FSO Arco Ardjuna pada saat Offloading dengan Shuttle Tanker 85000 DWT*".

Jurnal Teknik POMITS Vol. 1. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

Utomo, Prasetyanto. 2012. "***Perancangan Awal FSO untuk Lapangan Minyak Kakap di Laut Natuna***" Jurnal Teknik POMITS Vol. 1. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

Wartsila. 2011. "***MP Premier 65m A.H. / Offshore Support Vessel - Lightship Survey & Intact Stability Report (Final)***". Singapore.

Ximenes, M., C. 1997. ***Design and Construction of a Floating Storage and Offloading Vessel Escravos LPG FSO***. SNAME Transaction, Vol. 105, 1997, pp. 455-489. USA

BIODATA PENULIS



Rainhart Gabriel Simangunsong, dilahirkan di Jakarta pada tanggal 15 Januari 1995, merupakan anak pertama dari tiga bersaduaara. Menempuh pendidikan formal SD, SMP, dan SMA di Jakarta. Lulus SMA Negeri 85 Jakarta pada tahun 2012 dan melanjutkan studi S1 di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan – Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Selama masa perkuliahan di Jurusan Teknik Kelautan, penulis aktif menjadi staff Departemen Media Informasi 13/14 dan kepala Departemen Media Informasi HIMATEKLA 14/15. Penulis juga aktif di berbagai kegiatan yang diadakan Jurusan, Fakultas, maupun Institut sebagai panitia maupun peserta dalam rangka pengembangan diri. Penulis pernah menjadi panitia dalam kegiatan *International Conference of Marine Technology (MARTECH)* 2014 dan *International Seminar on Ocean and Coastal Engineering Enviromental and Natural Disaster Management (ISOCEEN)* 2014. Selain itu, penulis beserta tim juga berkesempatan meraih *first runner up* pada *International oil rig competition* yang diadakan PETROLIDA-SPE pada tahun 2015. Penulis pada tahun 2015 melakukan kerja praktek di PT.ZEE Engineering selama 2 bulan. Penulis memiliki minat di bidang hidrodinamika struktur lepas pantai terapung sehingga pada Juli 2016 penulis menyelesaikan tugas akhirnya dengan mengangkat permasalahan olah gerak bangunan apung dan operabilitas.