



**TUGAS AKHIR – MO184804**

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIS RESPON GERAK SPAR  
PENGARUH PEMASANGAN VARIASI DIAMETER HEAVE PLATE  
PADA GELOMBANG ACAK**

Nur Muhammad Hanif

NRP. 04311540000095

Dosen Pembimbing :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, M.Sc., Eng.

Baharuddin Ali S.T., M. Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2019



**FINAL PROJECT – MO184804**

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON THE EFFECTS OF  
HEAVE PLATE WITH DIAMETER VARIATION ON SPAR MOTION  
RESPONSE IN RANDOM WAVES**

Nur Muhammad Hanif

NRP. 04311540000095

Supervisors :

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Ir. Murdjito, M.Sc., Eng.

Baharuddin Ali S.T., M. Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2019

**Studi Eksperimen Dan Numeris Respon Gerak Spar Pengaruh  
Pemasangan Variasi Diameter Heave Plate Pada Gelombang  
Acak**

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

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

Oleh:

**Nur Muhammad Hanif**

NRP. 0451154000095



Disetujui Oleh:

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

Ir. Murdjito, M.Sc.Eng. .... (Pembimbing 2)

Baharuddin Ali S.T., M. Eng. .... (Pembimbing 3)

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

Ir. Wisnu Wardhana, S.E., M.Sc., Ph.D. .... (Penguji 2)

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. .... (Penguji 3)

Surabaya, Juli 2019

# **Studi Eksperimen Dan Numeris Respon Gerak Spar Pengaruh Pemasangan Variasi Diameter Heave Plate Pada Gelombang Acak**

Nama : Nur Muhammad Hanif  
NRP : 0431154000095  
Departemen : Teknik Kelautan FTK -ITS  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.  
Baharuddin Ali S.T., M. Eng.

## **ABSTRAK**

Tugas akhir ini membahas pengaruh pemasangan variasi diameter *heave plate* terhadap respon gerak SPAR pada gelombang acak. Studi dilakukan secara eksperimen dan numeris. Studi eksperimen dilakukan pada fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB), Balai Teknologi Hidrodinamika. Studi eksperimen dilakukan dengan menggunakan model *classic mini SPAR* dengan skala 1:125. Pengujian model SPAR secara eksperimen maupun numeris dilakukan dengan menggunakan gelombang acak dengan spektrum JONSWAP secara *time domain*. Ukuran diameter daripada *heave plate* divariasikan berdasarkan rasionya terhadap diameter SPAR ( $D_p/D_s$ ). Terdapat 4 Variasi  $D_p/D_s$ , yaitu 1 (SPAR tanpa *heave plate*), 1.3, 1.4, dan 1.5. Hasil pengujian berupa nilai-nilai stokastik respon gerak yang dibandingkan *trendline* reduksinya akibat pengaruh variasi rasio diameter *heave plate*. Untuk mode gerak *surge* dan *pitch*, pemasangan *heave plate* dengan berbagai variasi tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon gerak SPAR. Fenomena berbeda terjadi pada mode gerak *heave*, pemasangan *heave plate* berpengaruh secara signifikan terhadap reduksi daripada respon gerak *heave*. Variasi diameter rasio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) yang paling optimum dalam mereduksi respon gerak *heave* adalah rasio 1.3, dengan besaran reduksi sebesar -27,122% pada analisis eksperimen, dan -12,910% pada analisis numeris.

Kata Kunci: SPAR, *heave plate*, *time domain*, gelombang acak, respon gerak

# **Experimental and Numerical Study on the Effects of Heave Plate with Diameter Variation on SPAR Motion Response in Random Waves**

Name : Nur Muhammad Hanif  
NRP : 04311540000095  
Department : Ocean Engineering FTK -ITS  
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.  
Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.  
Baharuddin Ali S.T., M. Eng.

## **ABSTRACT**

This paper presents the effects of heave plate utilization with diameter variation on SPAR motion response in random waves. The studies were conducted in experimental and numerical method. Experimental investigation has been carried out using 1:125 scale model of classic mini SPAR in Maneuvering and Ocean Engineering Basin (MOB) Facility, Balai Teknologi Hidrodinamika. In this paper, heave plate diameter has been varied based on the ratio between diameter of heave plate to diameter of SPAR ( $D_p/D_s$ ). There are 4 variations of  $D_p/D_s$  ratio, namely 1 (SPAR without heave plate), 1.3, 1.4, and 1.5. In numerical investigation, SPAR with variation of heave plate diameter was subjected by random waves with JONSWAP spectrum in time domain simulation. In order to obtain the effects of heave plate utilization with diameter variation on SPAR motion response, the stochastic values of motion response and their trend line had been compared and analyzed. Results show that the utilization of heave plate with various diameter ratio does not give a significant effect on SPAR surge and pitch response. Different results were found in heave response, the attachment of heave plate with various diameter ratio could significantly reduce the heave response of SPAR. Furthermore, the heave plate diameter ratio ( $D_p/D_s$ ) 1.3 is the optimum choice for reducing the heave response, it is produce -27,122% reduction in experimental method, and -12,910% reduction in numerical method.

Keywords: SPAR, heave plate, time domain, random waves, motion response

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan baik.

Tugas akhir ini berjudul **“STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIS RESPON GERAK SPAR PENGARUH PEMASANGAN VARIASI DIAMETER HEAVE PLATE PADA GELOMBANG ACAK”**. Tugas akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan studi pada jenjang Strata-1 (S1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Tugas akhir secara khusus membahas mengenai respon gerak dari anjungan lepas pantai terapung jenis SPAR. Respon gerak diteliti secara eksperimen pada laboratorium dan numeris dengan bantuan perangkat lunak. Tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi referensi dan menambah wawasan bagi setiap pembacanya.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwasanya masih terdapat kekurangan dalam laporan Tugas Akhir ini. Maka dari itu, besar harapan penulis untuk mendapatkan kritik dan saran dari pembaca sekalian guna meningkatkan kemampuan penulis dalam menyusun laporan. Akhir kata, penulis berharap bahwasanya Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan menjadi sumbangsih terhadap perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 2019

Nur Muhammad Hanif

## UCAPAN TERIMAKASIH

Kegiatan penelitian Tugas Akhir ini dimungkinkan karena dukungan, bimbingan, serta doa dari banyak pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih sebanyak-banyaknya kepada pihak yang telah terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam pengerjaan Tugas Akhir ini. Penulis secara khusus menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dari penulis yang telah mencurahkan dukungan secara moril maupun materi sepanjang masa perkuliahan.
2. Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph. D, Bapak Ir. Murdjito, M. Sc, Eng. dan Bapak Baharuddin Ali S.T., M. Eng. yang telah banyak membimbing, dan memberi bantuan, kritik, serta saran selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Balai Teknologi Hidrodinamika beserta jajaran staffnya yang telah memberikan kesempatan dan bantuan kepada penulis untuk melakukan uji laboratorium.
4. Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M. Sc selaku dosen wali selalu memberikan bimbingan dan saran selama masa perkuliahan.
5. Rekan-rekan seperjuangan dalam Tugas Akhir eksperimen SPAR, yaitu: Gilrandi, Fikri, dan Brian yang telah saling mendukung dalam segala kondisi selama pengerjaan Tugas Akhir.
6. Teman-teman angkatan Tritonous yang telah menemani dalam suka dan duka selama masa perkuliahan.

Serta pihak-pihak lain yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
UCAPAN TERIMAKASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1    LATAR BELAKANG.....	1
1.2    PERUMUSAN MASALAH.....	3
1.3    TUJUAN.....	3
1.4    MANFAAT.....	4
1.5    BATASAN MASALAH.....	4
1.6    SISTEMATIKA PENULISAN.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1    TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.2    DASAR TEORI.....	8
2.2.1    SPAR <i>Platform</i> .....	8
2.2.2    Teori Dasar Gerakan Bangunan Apung.....	11
2.2.3    Gaya Reaksi Hidromekamik.....	11
2.2.4    Persamaan Gerak Bangunan Laut Terapung.....	14
2.2.5    Spektrum Gelombang JONSWAP.....	15
2.2.6    Respon Gerak Bangunan Laut di Gelombang Acak.....	16
2.2.7    Teori Pemodelan.....	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1    DIAGRAM ALIR.....	21
3.2    PENJELASAN DIAGRAM ALIR.....	24
3.2.1    Studi Literatur dan Pengumpulan Data.....	24
3.2.2    Pemodelan.....	25
3.2.3    Perancangan <i>Scale Model</i> .....	27
3.2.4    Validasi Model.....	29
3.2.5    Persiapan Instrumen Laboratorium.....	29
3.2.6    Pengujian Model.....	31



3.2.7	Persiapan Pengolahan Data.....	31
3.2.8	Pengolahan Data .....	31
3.2.9	Simulasi Numeris <i>Time Domain</i> .....	31
3.2.10	Analisis dan Perbandingan Hasil Numeris dan Eksperimen.....	31
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>33</b>
4.1	<b>PEMODELAN STRUKTUR .....</b>	<b>33</b>
4.1.1	Pemodelan Eksperimen.....	33
4.1.2	Pemodelan Numeris.....	37
4.2	<b>PEMODELAN SISTEM TAMBAT .....</b>	<b>39</b>
4.2.1	Perhitungan Kekakuan Tali Tambat .....	40
4.2.2	Perhitungan Pre-Tension .....	45
4.3	<b>VALIDASI MODEL EKSPERIMEN DAN NUMERIS .....</b>	<b>46</b>
4.4	<b>DATA DAN PROPERTI SECARA KESELURUHAN.....</b>	<b>47</b>
4.5	<b>KALIBRASI INSTRUMEN PENGUKURAN.....</b>	<b>48</b>
4.4.1	Kalibrasi Perangkat <i>Qualysis</i> .....	48
4.4.2	Kalibrasi Gelombang .....	49
4.6	<b>PERSIAPAN PENGOLAHAN DATA EKSPERIMEN.....</b>	<b>52</b>
4.7	<b>ANALISIS HASIL EKSPERIMEN .....</b>	<b>52</b>
4.7.1	Mode Gerak <i>Surge</i> .....	53
4.7.2	Mode Gerak <i>Heave</i> .....	56
4.7.3	Mode Gerak <i>Pitch</i> .....	58
4.8	<b>ANALISIS HASIL NUMERIS .....</b>	<b>60</b>
4.8.1	Analisis Hidrodinamika menggunakan MOSES .....	60
4.8.2	Simulasi Numeris <i>Time Domain</i> pada ORCAFLEX 9.2A.....	62
4.8.3	Mode Gerak <i>Surge</i> .....	63
4.8.4	Mode Gerak <i>Heave</i> .....	65
4.8.5	Mode Gerak <i>Pitch</i> .....	69
4.9	<b>ANALISIS PERBANDINGAN HASIL EKSPERIMEN DAN NUMERIS.....</b>	<b>71</b>
4.9.1	Mode Gerak <i>Surge</i> .....	72
4.9.2	Mode Gerak <i>Heave</i> .....	77
4.9.3	Mode Gerak <i>Pitch</i> .....	85
4.10	<b>ANALISIS KETIDAKTENTUAN.....</b>	<b>90</b>
4.10.1	Ketidaktentuan dalam Pemodelan Kekakuan Tali Tambat .....	90
4.10.2	Ketidaktentuan dalam Simulasi Numeris .....	91

BAB V PENUTUP .....	93
5.1 Kesimpulan .....	93
5.2 Saran .....	94
DAFTAR PUSTAKA.....	95

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1. 1</b> Model SPAR yang dilengkapi dengan heave plate .....	2
<b>Gambar 2. 1</b> Classic dan Truss SPAR (Chakrabarti, 2005) .....	9
<b>Gambar 2. 2</b> Layout Deck SPAR .....	9
<b>Gambar 2. 3</b> Hard Tank structural arrangement .....	10
<b>Gambar 2. 4</b> Gerakan Bangunan Apung dalam 6 derajat kebebasan. (Journee & Massie, 2001) .....	11
<b>Gambar 2. 5</b> Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder (Sarpkaya, 2010) .....	13
<b>Gambar 2. 6</b> Spectral Analysis: Transformasi spektrum gelombang menjadi respon spektrum .....	17
<b>Gambar 3. 1:</b> Diagram Alir Penelitian .....	21
<b>Gambar 3. 2</b> Model SPAR dengan heave plate tampak samping .....	26
<b>Gambar 3. 3</b> Model SPAR dengan heave plate tampak atas .....	26
<b>Gambar 3. 4</b> Konfigurasi Mooring Line .....	28
<b>Gambar 3. 5</b> Tampak Atas Konfigurasi Sistem Tambat .....	28
<b>Gambar 3. 6</b> Qualysis Motion Capture Camera .....	30
<b>Gambar 3. 7</b> Passive Markers (www.qualisys.com) .....	30
<b>Gambar 3. 8</b> Calibration Kit .....	30
<b>Gambar 4. 1</b> Besi dan ulir di dalam lambung model SPAR .....	34
<b>Gambar 4. 2</b> Model Fisik .....	34
<b>Gambar 4. 3</b> Variasi Diameter Heave Plate .....	34
<b>Gambar 4. 4</b> Konfigurasi Ballast .....	35
<b>Gambar 4. 5</b> Proses Kalibrasi KG .....	36
<b>Gambar 4. 6</b> Model SPAR dalam MOSES (a) SPAR tanpa heave plate (b) SPAR dengan heave plate. ....	38
<b>Gambar 4. 7</b> Model SPAR tanpa heave plate dalam ORCAFLEX 9.2A .....	38
<b>Gambar 4. 8</b> Model SPAR dengan heave plate dalam ORCAFLEX 9.2A .....	39
<b>Gambar 4. 9</b> Stainless Steel Wire Sling .....	40
<b>Gambar 4. 10</b> Konfigurasi Tali Tambat .....	40
<b>Gambar 4. 11</b> Kalibrasi Kekakuan Sistem Tambat .....	41
<b>Gambar 4. 12</b> Keterangan properti dari tali polyester .....	43
<b>Gambar 4. 13</b> Ilustrasi tali polyester dalam ORCAFLEX 9.2A .....	43
<b>Gambar 4. 14</b> Ilustrasi 6x19 wire with fibre core pada ORCAFLEX .....	45
<b>Gambar 4. 15</b> Keterangan Properti 6x19 wire with fibre core .....	45
<b>Gambar 4. 16</b> Kalibrasi QUALYSIS .....	49
<b>Gambar 4. 17</b> Wave Probe .....	49
<b>Gambar 4. 18</b> Perbandingan antara spektrum gelombang teoritis dan eksperimen .....	51
<b>Gambar 4. 19</b> Potret Kondisi saat Pengujian .....	53
<b>Gambar 4. 20</b> Kurva Spektrum Gerak Surge Variasi Pemasangan .....	54
<b>Gambar 4. 21</b> Grafik Surge Signifikan .....	55
<b>Gambar 4. 22</b> Kurva Spektrum Gerak Heave SPAR pada semua Kondisi Pemasangan Heave Plate .....	56

<b>Gambar 4. 23</b> Grafik Heave Signifikan .....	57
<b>Gambar 4. 24</b> Kurva RAO Heave SPAR pada semua Kondisi Pemasangan Heave Plate Metode Eksperimen .....	58
<b>Gambar 4. 25</b> Kurva Spektrum Gerak Pitch SPAR pada semua Kondisi Pemasangan Heave Plate .....	59
<b>Gambar 4. 26</b> Grafik Pitch Signifikan .....	60
<b>Gambar 4. 27</b> Panel Wave Frequency pada output MOSES.....	61
<b>Gambar 4. 28</b> Matriks massa tambah dan kekakuan.....	62
<b>Gambar 4. 29</b> Time history mode gerak surge hasil simulasi numeris .....	63
<b>Gambar 4. 30</b> Kurva spektrum respon surge SPAR pada semua variasi pemasangan heave plate .....	63
<b>Gambar 4. 31</b> Grafik surge significant responses .....	65
<b>Gambar 4. 32</b> Kurva spektrum respon heave SPAR pada semua variasi pemasangan heave plate .....	66
<b>Gambar 4. 33</b> Grafik heave significant responses.....	67
<b>Gambar 4. 34</b> Kurva RAO Heave SPAR pada semua Kondisi Pemasangan Heave Plate Metode Numeris .....	68
<b>Gambar 4. 35</b> Puncak RAO heave pengaruh variasi diameter heave plate (Sudhakar & Nallayarasu, 2011) .....	69
<b>Gambar 4. 36</b> Kurva spektrum respon pitch SPAR pada semua variasi pemasangan heave plate .....	69
<b>Gambar 4. 37</b> Grafik pitch significant responses .....	71
<b>Gambar 4. 38</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Surge Eksperimen dan Numeris .....	72
<b>Gambar 4. 39</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Surge SPAR dengan Heave Plate 1.3 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	73
<b>Gambar 4. 40</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Surge SPAR dengan Heave Plate 1.4 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	74
<b>Gambar 4. 41</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Surge SPAR dengan Heave Plate 1.5 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	75
<b>Gambar 4. 42</b> Trendline Perbandingan Surge Signifikan Seluruh Variasi Heave Plate Metode Eksperimen dan Numeris .....	76
<b>Gambar 4. 43</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Heave SPAR tanpa Heave Plate Hasil Eksperimen dan Numeris .....	78
<b>Gambar 4. 44</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Heave SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.3 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	79
<b>Gambar 4. 45</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Heave SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.4 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	80
<b>Gambar 4. 46</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Heave SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.5 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	81
<b>Gambar 4. 47</b> Trendline Perbandingan Heave Signifikan Seluruh Variasi Heave Plate Metode Eksperimen dan Numeris .....	82
<b>Gambar 4. 48</b> Pola aliran atau <i>vortex formation</i> di sekitar <i>heave plate</i> (a) $D_p/D_s$ 1.33 (b) $D_p/D_s$ 2.0.....	84
<b>Gambar 4. 49</b> <i>Damping ratio</i> terhadap $D_p/D_s$ pada nilai KC yang berbeda .....	84

<b>Gambar 4. 50</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Pitch SPAR tanpa Heave Plate Hasil Eksperimen dan Numeris .....	85
<b>Gambar 4. 51</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Heave SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.3 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	86
<b>Gambar 4. 52</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Heave SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.4 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	87
<b>Gambar 4. 53</b> Perbandingan Spektrum Respon Gerak Heave SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.5 Hasil Eksperimen dan Numeris .....	88
<b>Gambar 4. 54</b> Trendline Perbandingan Pitch Signifikan Seluruh Variasi Heave Plate Metode Eksperimen dan Numeris.....	89

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994) .....	19
<b>Tabel 3. 1</b> Data Dimensi Mini SPAR.....	24
<b>Tabel 3. 2</b> Variasi dimensi heave plate .....	25
<b>Tabel 3. 3</b> Data kolam MOB BTH-BPPT (bth.bppt.go.id).....	25
<b>Tabel 4. 1</b> Penskalaan model SPAR .....	33
<b>Tabel 4. 2</b> Perhitungan massa total model .....	35
<b>Tabel 4. 3</b> Distribusi Massa pada Ballast.....	35
<b>Tabel 4. 4</b> Tabel Perhitungan KG secara Analitis.....	36
<b>Tabel 4. 5</b> Jari-jari girasi model .....	37
<b>Tabel 4. 6</b> Data struktur SPAR dalam full scale .....	39
<b>Tabel 4. 7</b> Tabel Perhitungan Kekakuan Tali Tambat .....	41
<b>Tabel 4. 8</b> Validasi antara Model Eksperimen dan Model Numeris.....	47
<b>Tabel 4. 9</b> Data dan Properti secara keseluruhan .....	47
<b>Tabel 4. 10</b> Data Lingkungan pada eksperimen dan full scale .....	50
<b>Tabel 4. 11</b> Validasi Kalibrasi Gelombang Uji.....	51
<b>Tabel 4. 12</b> Parameter Stokastik Gerak Surge SPAR Metode Eksperimen .....	54
<b>Tabel 4. 13</b> Surge Significant Amplitude Responses Metode Eksperimen .....	55
<b>Tabel 4. 14</b> Parameter Stokastik Gerak Heave SPAR Metode Eksperimen .....	56
<b>Tabel 4. 15</b> Heave Significant Responses .....	57
<b>Tabel 4. 16</b> Parameter Stokastik Gerak Pitch SPAR Metode Eksperimen .....	59
<b>Tabel 4. 17</b> Pitch Signifikan.....	60
<b>Tabel 4. 18</b> Parameter Stokastik Gerak Surge SPAR Metode Numeris .....	64
<b>Tabel 4. 19</b> Perbandingan surge significant responses .....	64
<b>Tabel 4. 20</b> Parameter Stokastik Gerak Heave SPAR Metode Numeris .....	66
<b>Tabel 4. 21</b> Perbandingan heave significant responses.....	67
<b>Tabel 4. 22</b> Parameter Stokastik Gerak Pitch SPAR Metode Numeris .....	70
<b>Tabel 4. 23</b> Perbandingan pitch Significant Responses .....	70
<b>Tabel 4. 24</b> Perbandingan Nilai Stokastik Surge Signifikan SPAR tanpa pemasangan heave plate .....	72
<b>Tabel 4. 25</b> Perbandingan Nilai Stokastik Surge Signifikan SPAR dengan pemasangan heave plate rasio $D_p/D_s$ 1.3 .....	73
<b>Tabel 4. 26</b> Perbandingan Nilai Stokastik Surge Signifikan SPAR dengan pemasangan heave plate rasio $D_p/D_s$ 1.4 .....	74
<b>Tabel 4. 27</b> Perbandingan Nilai Stokastik Surge Signifikan SPAR dengan pemasangan heave plate rasio $D_p/D_s$ 1.5 .....	75
<b>Tabel 4. 28</b> Perbandingan Nilai Surge Signifikan Metode Eksperimen dan Numeris Seluruh Variasi Pemasangan Heave Plate .....	76
<b>Tabel 4. 29</b> Perbandingan Nilai Stokastik Heave Signifikan SPAR tanpa Pemasangan Heave Plate .....	78
<b>Tabel 4. 30</b> Perbandingan Nilai Stokastik Heave Signifikan SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.3 .....	79

<b>Tabel 4. 31</b> Perbandingan Nilai Stokastik Heave Signifikan SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.4 .....	80
<b>Tabel 4. 32</b> Perbandingan Nilai Stokastik Heave Signifikan SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.5 .....	81
<b>Tabel 4. 33</b> Perbandingan Nilai Heave Signifikan Metode Eksperimen dan Numeris Seluruh Variasi Pemasangan Heave Plate.....	82
<b>Tabel 4. 34</b> Perbandingan Nilai Stokastik Pitch Signifikan SPAR tanpa Pemasangan Heave Plate .....	85
<b>Tabel 4. 35</b> Perbandingan Nilai Stokastik Pitch Signifikan SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.3 .....	86
<b>Tabel 4. 36</b> Perbandingan Nilai Stokastik Pitch Signifikan SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.4 .....	87
<b>Tabel 4. 37</b> Perbandingan Nilai Stokastik Pitch Signifikan SPAR dengan Pemasangan Heave Plate 1.5 .....	88
<b>Tabel 4. 38</b> Perbandingan Nilai Pitch Signifikan Metode Eksperimen dan Numeris Seluruh Variasi Pemasangan Heave Plate.....	89

**DAFTAR LAMPIRAN**

**LAMPIRAN A (KALKULASI JARI-JARI GIRASI)**

**LAMPIRAN B (SCRIPT FAST FOURIER TRANSFORM PADA MATLAB)**

**LAMPIRAN C (PERHITUNGAN VALIDASI GELOMBANG UJI)**

**LAMPIRAN D (OUTPUT MOSES)**

**LAMPIRAN E (TIME HISTORY)**



# BAB I PENDAHULUAN

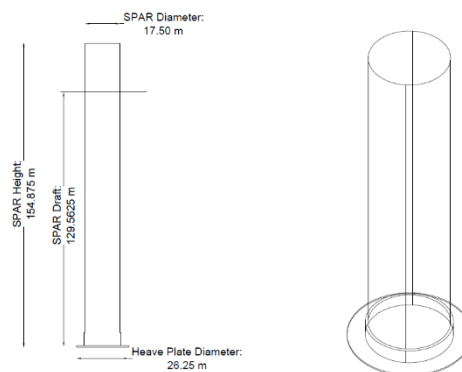
## 1.1 LATAR BELAKANG

Isu perubahan iklim yang semakin memburuk dengan pencemaran lingkungan merupakan hasil daripada penggunaan energi berbahan fosil. Di sisi lain, kebutuhan akan energi di dalam negeri semakin meningkat. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Dewan Energi Nasional, proyeksi kebutuhan konsumsi listrik nasional pada tahun 2025 mencapai 628 terawatt hour (TW-h). Melihat besarnya angka kebutuhan tersebut, pemerintah melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 menargetkan terwujudnya energi (primer) mix yang optimal pada tahun 2025, dengan porsi untuk energi terbarukan mencapai 17% (Mukhtasor, 2012). Oleh karenanya, riset mengenai pengembangan teknologi untuk energy terbarukan khususnya di laut, menjadi sangat relevan dan berkembang pesat dalam dekade terakhir ini.

SPAR banyak dipilih menjadi struktur yang digunakan dalam berbagai macam teknologi pembangkit listrik yang berada di laut, baik angin maupun gelombang laut. Berbagai riset dan pengembangan tentang hal ini telah dilakukan, antara lain Gomes (2012) memperkenalkan konsep *spar buoy oscillating-water-column*, yang terdiri dari *buoy* dan SPAR yang berongga sehingga memungkinkan air untuk berosilasi di dalam SPAR. Selain itu, Muliawan (2012) juga melakukan riset yang menggabungkan SPAR Floating Offshore Wind Turbine (FOWT) dengan *buoy* berbentuk Torus (silinder melingkar) yang dapat bergerak naik-turun sepanjang SPAR untuk mengekstrak energi dari gelombang laut. SPAR merupakan struktur terapung lepas pantai berbentuk silinder yang memiliki *draft* yang dalam di bawah permukaan air. Pemilihan SPAR sebagai struktur penopang dalam berbagai kebutuhan di laut lepas dikarenakan salah satu keunggulan yang dimiliki oleh SPAR, yaitu respon gerakan *heave* dan *pitch* yang kecil. Pada umumnya, periode natural *heave* dari SPAR berkisar antara 20-25 detik yang mana nilai tersebut jauh dari nilai periode natural gelombang. Hal ini menunjukkan bahwasanya respon *heave* dari SPAR akan bernilai rendah pada gelombang dengan periode pendek, namun periode gelombang yang panjang, respon *heave* dari SPAR akan menjadi

tinggi dikarenakan kondisi resonansi (periode gelombang bernilai sama dengan periode natural *heave* dari SPAR), atau gaya ekstasi orde kedua (Subbulakshmi & Sundaravadivelu, 2016). Pada kondisi tersebut, amplitudo dari gerak *heave* akan berosilasi dan bernilai tinggi sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada *riser* atau *mooring system* (Sudhakar & Nallayarasu, 2011).

Pentingnya memahami perilaku struktur terapung pada laut lepas merupakan syarat utama guna mengembangkan teknologi laut dalam yang berkelanjutan (Prasiwi, 2014). Setiap tipe bangunan atau struktur terapung memiliki karakteristik gerakan masing-masing. Gerakan (*motion*) pada suatu struktur saat beroperasi sangat dipengaruhi oleh beban lingkungan di sekitarnya. Untuk mengurangi respon *heave* dari SPAR terutama saat terjadi resonansi, diperlukan mekanisme redaman (*damping*) yang lebih besar dari sistem. Salah satu cara untuk meningkatkan mekanisme redaman maka diperlukan suatu perangkat eksternal berupa *heave plate* yang berbetuk seperti piringan. *Heave plate* yang ditempelkan pada bagian bawah dari *keel* memiliki kegunaan untuk membatasi *viscous excitation* dari gelombang yang disebabkan oleh *exponential decay* secara vertikal. Selain dapat meningkatkan *heave damping*, juga dapat menambah *added mass* dari struktur sehingga periode natural *heave* struktur menjadi lebih tinggi diatas periode natural gelombang dan dapat mengurangi *motion* dari struktur (Sudhakar & Nallayarasu, 2014).



**Gambar 1. 1** Model SPAR yang dilengkapi dengan heave plate

Pada Tugas Akhir ini, dilakukan studi numeris dan eksperimen model *mini-SPAR*. Model tersebut dimodifikasi dengan tambahan *heave plate* di bagian bawah *keel* (Gambar 1.1). Diameter daripada *heave plate* divariasikan dengan rasio perbandingan ( $D_p/D_s$ ) antara diameter *heave plate* ( $D_p$ ) dan diameter SPAR ( $D_s$ ) sebesar 1.3, 1.4, 1.5. Pemilihan variasi rasio  $D_p/D_s$  ini berdasarkan pada studi yang

dilakukan oleh Subbulakshmi pada tahun 2016. Dalam penelitiannya, Subbulakshmi menyebutkan bahwasanya rasio  $D_p/D_s$  yang optimum dalam mereduksi respon gerak *heave* adalah di antara rasio 1.2 dan 1.4. Studi dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi pemasangan *heave plate* terhadap respon gerak dari SPAR di atas gelombang acak. Studi eksperimen dilakukan di fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika. Model SPAR menggunakan konfigurasi sistem tambat taut yang berjumlah 4 tali. Konfigurasi tali tambat SPAR memiliki sudut kemiringan sebesar  $30^\circ$  terhadap *fairlead*, dan  $45^\circ$  terhadap *centerline* struktur. Arah datang gelombang akan dianalisa dari 1 arah, yaitu pada sudut  $0^\circ$ . Untuk studi numeris digunakan analisa *time domain* untuk memperoleh spektra respon gerak struktur SPAR dengan bantuan perangkat lunak ORCAFLEX 9.2A.

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil eksperimen nilai stokastik respon gerak struktur SPAR yang dilengkapi dengan *heave plate* dengan rasio antara diameter *heave plate* dengan diameter SPAR ( $D_p/D_s$ ) sebesar 1 (NHP), 1.3, 1.4, 1.5?
2. Bagaimana hasil numeris nilai stokastik respon gerak struktur SPAR yang dilengkapi *heave plate* dengan rasio diameter rasio antara diameter *heave plate* dengan diameter SPAR ( $D_p/D_s$ ) sebesar 1 (NHP), 1.3, 1.4, 1.5?
3. Bagaimana perbandingan nilai stokastik respon gerak struktur SPAR hasil eksperimen dan numeris akibat pemasangan *heave plate* untuk 3 derajat kebebasan?

## 1.3 TUJUAN

Untuk menjawab rumusan masalah di atas, maka penulis menetapkan tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini sebagaimana berikut:

1. Untuk mengetahui hasil eksperimen nilai stokastik respon gerak struktur SPAR yang dilengkapi dengan *heave plate* dengan rasio diameter rasio antara diameter *heave plate* dengan diameter SPAR ( $D_p/D_s$ ) sebesar 1 (NHP), 1.3, 1.4, 1.5.

2. Untuk mengetahui hasil numeris nilai stokastik respon gerak struktur SPAR yang dilengkapi *heave plate* dengan rasio diameter rasio antara diameter *heave plate* dengan diameter SPAR ( $D_p/D_s$ ) sebesar 1 (NHP), 1.3, 1.4, 1.5.
3. Untuk mengetahui perbandingan nilai stokastik respon gerak struktur SPAR hasil eksperimen dan numeris akibat pemasangan *heave plate* untuk 3 derajat kebebasan.

#### **1.4 MANFAAT**

Manfaat yang dapat diambil dari Tugas Akhir ini adalah mengetahui nilai stokastik respon gerak struktur SPAR di atas gelombang acak dengan variasi diameter ukuran *heave plate* yang dianalisis secara numeris dan eksperimen.

#### **1.5 BATASAN MASALAH**

Batasan-batasan yang diberlakukan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Studi numeris dan eksperimen dilakukan pada model mini SPAR.
- b. Studi eksperimen dilakukan dengan menyesuaikan keadaan pada fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika.
- c. Fasilitas MOB Balai Teknologi Hidrodinamika tidak bisa memodelkan kondisi *swell*.
- d. Studi analitis dan eksperimen dilakukan pada SPAR dengan *heading*  $0^\circ$ .
- e. SPAR berada dalam 3 derajat kebebasan (*Surge*, *Heave* dan *Pitch*)
- f. Gelombang yang digunakan merupakan gelombang acak.
- g. Spektrum gelombang yang dipakai adalah JONSWAP.
- h. Beban yang diperhitungkan hanya beban gelombang.
- i. Efek hidrodinamika dari sub-struktur tidak diperhitungkan.
- j. Interaksi sistem tambat dengan tanah diabaikan.
- k. Tidak meninjau biaya pada struktur Sistemika Penulisan.

## **1.6 SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika penulisan laporan yang dipakai pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab I berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, serta batasan masalah yang akan dibahas pada laporan tugas akhir kali ini. Selain itu, terdapat juga Sistematika Penulisan yang memuat penjelasan mengenai laporan ini agar memudahkan pembaca dalam memahami laporan secara keseluruhan.

### **BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori**

Bab ini memaparkan tentang Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori yang digunakan sebagai acuan dan referensi pada tugas akhir. Referensi tersebut dapat berupa jurnal, buku, *rules* dan *codes*, serta informasi-informasi lainnya yang dapat menunjang tugas akhir ini.

### **BAB III Metodologi Penelitian**

Pada bab ini terdapat diagram alir beserta penjelasan mengenai alur dan prosedur pelaksanaan penelitian agar lebih mudah dipahami dan tersusun sistematis.

### **BAB IV Analisa dan Pembahasan**

Dalam bab keempat ini, penulis memaparkan hasil-hasil perhitungan, dan analisis yang dilakukan secara numeris dan eksperimen. Penulis memaparkan hasil analisis dengan tabel, gambar, maupun grafik sebagai medium pendukung.

### **BAB V Kesimpulan dan Saran**

Bab terakhir dari laporan ini berisi tentang kesimpulan yang diambil dari analisis pada tugas akhir ini. Selain itu, terdapat saran yang diberikan penulis untuk peneliti selanjutnya yang akan meneliti mengenai topik terkait.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 TINJAUAN PUSTAKA**

Sebagai salah satu struktur terapung yang banyak digunakan di laut lepas, penelitian mengenai respon gerak dari struktur SPAR telah banyak dilakukan. Kurian (2013) telah meneliti mengenai *classic* SPAR yang dikenai beban gelombang dengan puncak yang pendek, pada penelitiannya didapatkan kesimpulan bahwa RAO dari SPAR mempunyai nilai yang besar pada frekuensi gelombang rendah namun RAO mengalami penurunan secara gradual saat frekuensi gelombang mengalami kenaikan. Agarwal (2003) juga meneliti tentang perilaku dinamis dari SPAR yang diberi beban gelombang reguler, perilaku dinamis dari SPAR terpengaruh dari matriks kopel kekakuan struktur, dan respon gerak yang paling terpengaruh oleh matriks kopel kekakuan adalah respon *heave*. Studi mengenai pentingnya respon gerak struktur semakin diperkuat oleh Fischer, et al. (1998) yang meneliti tentang pentingnya karakteristik *heave* dari SPAR secara eksperimen, numeris, dan gabungan dari keduanya.

Salah satu upaya untuk mengurangi respon gerak dari struktur SPAR adalah dengan memasang sistem tambat. Analisis mengenai pengaruh sistem tambat terhadap gerak SPAR telah banyak dilakukan. Anastasia (2009) dalam tugas akhirnya, menganalisis gerak struktur SPAR secara numerik dengan variasi sistem tambat *catenary* dan sistem tambat *taut*. Herdayanditya (2017) juga dalam tugas akhirnya, melakukan studi analitis, numeris, dan eksperimen pada olah gerak *classic* SPAR dan dinamika tegangan tali tambat dengan variasi *heading* gelombang. Dalam tugas akhir tersebut disimpulkan bahwa arah gelombang tidak memengaruhi gerak *heave* dari struktur, dan penurunan nilai *heave* dari kondisi *free floating* ke kondisi tertambat. Studi serupa juga telah dilakukan Priambodo (2018) yang meneliti olah gerak dan dinamika tegangan tali SPAR dengan *helical strakes* variasi *heading* gelombang, dari hasilnya didapatkan kesimpulan bahwasanya *helical strakes* dapat menurunkan nilai *heave* dari SPAR.

Upaya lainnya untuk mengurangi dan mengontrol respon gerak dari SPAR adalah dengan penambahan *heave plate*. Tao (2003a, 2003b) telah meneliti

penekanan gerak *heave* dari SPAR yang dipasang *heave plate* secara numeris. *Heave plate* memiliki pengaruh terhadap mode *vortex shedding* dan property hidrodinamika terkait seperti redaman hidrodinamis, serta koefisien massa tambah. Dimana kedua hal tersebut berpengaruh kepada performa gerak *heave* dari struktur. Li, et al. (2013) telah melakukan studi atas pengaruh *heave plate* dalam 4 konfigurasi yang berbeda (tanpa *plate*, *single higher plate*, *single lower plate*, *2 plates*). SPAR dianalisis dengan berbagai tes, *free decay*, gelombang regular, dan gelombang irreguler. Dari studi tersebut dihasilkan kesimpulan bahwasanya tidak ada jaminan pemasangan 2 *heave plate* memberikan hasil yang lebih baik terhadap performa gerak struktur SPAR, hal ini dikarenakan kompleksivitas dari perilaku hidrodinamis pada *heave plate* dan sensitivitas pada kondisi laut. Efektifitas dari penggunaan *heave plate* juga dipengaruhi oleh ukuran dari *heave plate* itu sendiri. Suddakar (2011) telah melakukan analisis mengenai pengaruh *heave plate* terhadap gerak struktur SPAR. Terdapat beberapa variasi perbandingan rasio antara diameter *heave plate* ( $D_d$ ) dan diameter SPAR ( $D_s$ ), antara lain 1.0, 1.3, dan 1.5. Kenaikan rasio ( $D_d/D_s$ ) berpengaruh pada berkurangnya besar RAO *heave* sebesar 19% untuk rasio 1.3, dan 24% untuk rasio 1.5. Sehingga dapat disimpulkan bahwasanya rasio perbandingan diameter *heave plate* dengan diameter SPAR ( $D_d/D_s$ ) yang dapat mengurangi gerak *heave* yang optimum adalah 1.3. Namun, patut dicatat bahwasanya dalam penelitian ini SPAR diberi beban gelombang regular, sedangkan apabila diberi beban gelombang acak maka hasil yang didapatkan akan berbeda.

Oleh karena itu, pada tugas akhir kali ini, SPAR akan dipasangi *heave plate* dengan variasi rasio perbandingan diameter ( $D_d/D_s$ ) 1.3, 1.4, dan 1.5, kemudian diuji diatas gelombang acak, agar dapat diketahui spektral respon struktur akibat pemasangan variasi *heave plate*.

## **2.2 DASAR TEORI**

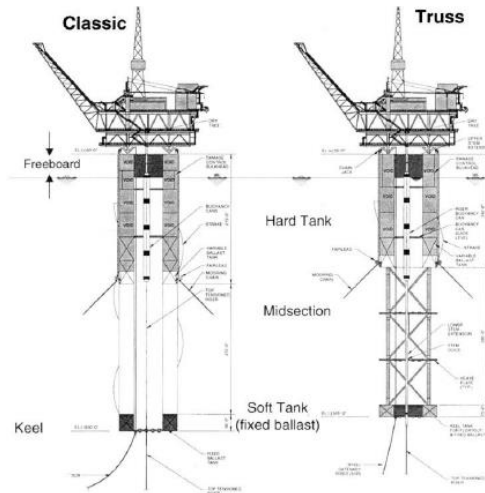
### **2.2.1 SPAR Platform**

SPAR merupakan struktur terapung yang terdiri dari silinder vertikal yang menopang *topsides* dengan diameter yang besar, dan *draught* yang sangat dalam (*deep-draught*). Silinder diberi beban di bagian bawah dengan mengisi ruangan dengan material yang rapat dibandingkan dengan air laut sehingga dapat



menurunkan *Center of Gravity* (CoG) dari struktur sampai berada di bawah *Center of Bouyancy* (CoB) dan memberi stabilitas pada struktur.

Sejauh ini sudah ada 3 tipe SPAR yang telah dibangun: *Classic SPAR*, *Truss SPAR*, dan *Cell SPAR* (Finn & Maher, 2003). Tipe Spar tersebut (*Classic* dan *Truss*) dapat dilihat pada Gambar 2.1.

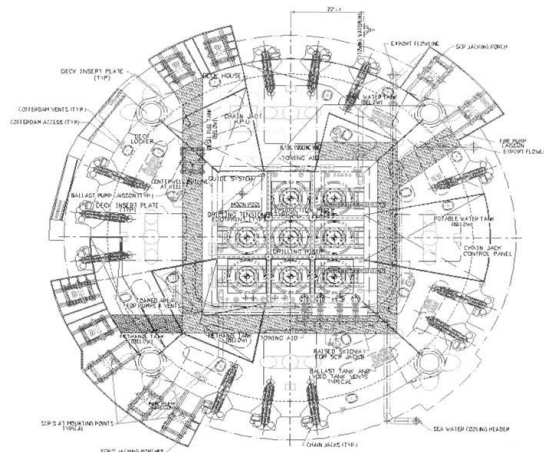


**Gambar 2. 1** Classic dan Truss SPAR (Chakrabarti, 2005)

Bagian-bagian dasar dari SPAR adalah sebagai berikut (Chakrabarti, 2005):

### 1. Deck

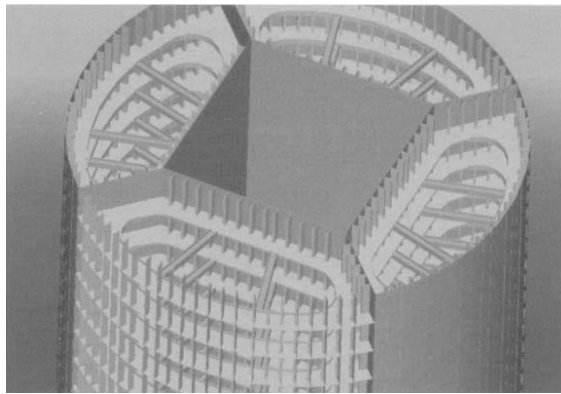
*Topside Deck* secara khusus berupa struktur multi-level yang bertujuan untuk meminimalkan kebutuhan akan kantilever. Untuk *deck* dengan berat sampai dengan 18.000 Ton, berat *deck* ditopang oleh 4 kolom yang menyambungkan *hard tank* pada perpotongan dari *radial bulkhead* dengan bagian paling luar dari pelat.



**Gambar 2. 2** Layout Deck SPAR

## 2. *Hard Tank*

Bagian *Hard Tank* memberikan *buoyancy* untuk menopang *deck*, lambung, *ballast*, dan tegangan vertikal. Istilah “*Hard Tank*” memiliki arti bahwasanya kompartemen didesain untuk menahan tekanan hidrostatik secara keseluruhan. Biasanya terdapat 5 sampai 6 level dari tangka diantara *deck SPAR* dengan bagian bawah dari *hard tank*, setiap level dipisahkan oleh *deck* yang kedap air. Pada setiap level tersebut kemudian dibagi menjadi 4 kompartemen yang dibatasi dengan *radial bulkhead* yang berasal dari sudut *centerwell*.



**Gambar 2. 3** *Hard Tank structural arrangement*

## 3. *Midsection*

*Midsection* memperpanjang bagian bawah *hard tank* untuk memberi *SPAR draft* yang dalam. Dalam generasi awal *SPAR “classic”*, *midsection* hanya sebagai perpanjangan dari pelat terluar dari *hard tank*. Tidak ada struktur internal, kecuali jika diperlukan untuk memberikan *support* pada *riser* dibagian tengah *SPAR*.

## 4. *Soft Tank*

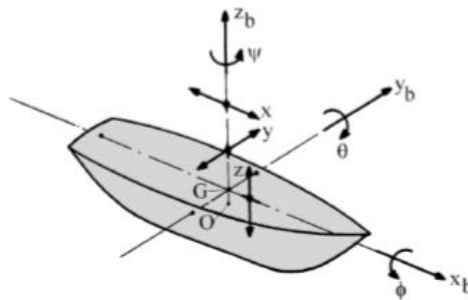
*Soft Tank* di bagian bawah *spar* dirancang untuk memberikan pengapungan selama tahap pemasangan saat *spar* mengapung secara horizontal. Ini juga menyediakan kompartemen untuk penempatan *ballast* tetap setelah *spar* ditanggihkan. Tangki lunak memiliki *centrewell* dan *keel guide* yang memusatkan anak tangga pada saat itu.

### 2.2.2 Teori Dasar Gerakan Bangunan Apung.

Setiap kapal dan bangunan terapung memiliki gerakan dasar dalam 6 derajat kebebasan. Dalam bukunya, Journee dan Massie (2001) menyebutkan 6 gerakan kapal dalam sistem koordinat stasioner didefinisikan sebagai berikut:

1. 3 gerak translasi pada titik berat kapal (CoG) yang searah dengan sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ :
  - *Surge* dalam arah longitudinal sumbu  $x$ .
  - *Sway* dalam arah lateral sumbu  $y$ .
  - *Heave* dalam arah vertikal sumbu  $z$ .
2. 3 gerak rotasi terhadap sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ :
  - *Roll* berotasi terhadap sumbu  $x$ .
  - *Pitch* berotasi terhadap sumbu  $y$ .
  - *Yaw* berotasi terhadap sumbu  $z$ .

Keenam gerakan tersebut diilustrasikan seperti pada Gambar 2.4.



**Gambar 2. 4** Gerakan Bangunan Apung dalam 6 derajat kebebasan.

(*Journee & Massie, 2001*)

### 2.2.3 Gaya Reaksi Hidromekamik

Ketika SPAR dicelupkan ke dalam air yang tenang, SPAR akan mendapatkan beban-beban hidromekamik yang mengenai struktur. Menurut Journee dan Massie (2001), uji *free decay* pada kondisi air tenang (*still water*) harus dipertimbangkan. Uji *free decay* dapat dilakukan dengan memberi simpangan awal vertikal pada silinder, kemudian silinder dilepaskan sampai gerak dari silinder yang berkurang secara gradual akan menghilang secara total. Dengan mengaplikasikan hukum II Newton untuk silinder yang bergerak secara *heaving*, persamaan dapat diuraikan sebagaimana berikut:

$$\begin{aligned}
m\ddot{z} &= \text{Jumlah dari seluruh gaya yang mengenai silinder} \\
&= -P + \rho A_w - b\dot{z} - \alpha\ddot{z} \\
&= -P + \rho g (T - z) A_w - b\dot{z} - \alpha\ddot{z} \qquad (2.1)
\end{aligned}$$

Dengan hukum Archimedes  $P = \rho g T A_w$ , maka persamaan linear dari gerak *heave* menjadi:

$$(m + \alpha)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0 \qquad (2.2)$$

Keterangan:

- $z$  = vertical displacement (m)
- $P = mg$  = Gaya berat ke arah bawah (N)
- $m = \rho A_w T$  = Massa Silinder (kg)
- $\alpha$  = koefisien massa hidrodinamis atau massa tambah (Ns<sup>2</sup>/m = kg)
- $b$  = koefisien redaman (Ns/m = kg)
- $c = \rho g A_w$  = koefisien kekakuan pengembali (N/m = kg/s<sup>2</sup>)
- $A_w = \frac{\pi}{4} D^2$  = luasan garis air (m<sup>2</sup>)
- $D$  = Diameter silinder (m)
- $T$  = Garis sarat air (draft) silinder (s)

Dari persamaan (2.1), kita dapat mengetahui bahwasanya gaya reaksi hidromekanik selain dipengaruhi massa juga dipengaruhi oleh massa tambah, redaman, dan kekakuan. Selanjutnya penulis akan menjelaskan masing-masing komponen tersebut.

a. Massa tambah (*Added Mass*)

Dalam gaya reaksi hidromekanik terdapat komponen gaya  $\alpha\ddot{z}$  yang bekerja secara proporsional terhadap percepatan vertikal pada silinder dalam sistem linear. Gaya ini disebabkan oleh percepatan yang diberikan kepada partikel air disekitar silinder. Bagian dari gaya ini tidak menghilangkan energy. Koefisien  $\alpha$  mempunyai dimensi sebagai massa, dan disebut juga dengan massa tambah (*added mass*). Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak. Sarpkaya (2010) menyebutkan beberapa nilai massa tambah untuk bentuk-bentuk yang sederhana. Untuk gerak *heave* dan *surge* dari silinder dapat dilihat pada Gambar 2.5, dan persamaan gaya massa tambah adalah perkalian antara massa tambah dan

percepatan gerak benda sesuai dengan arah gerak benda, sehingga persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

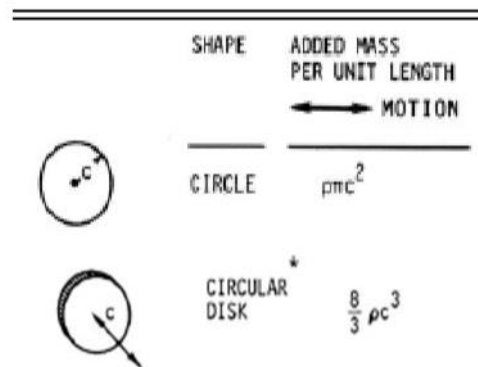
$$F = \alpha_i \ddot{\zeta}_i \quad (2.3)$$

Dengan:

$i$  = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

$\alpha$  = massa tambah (kg)

$\zeta$  = percepatan gerak struktur (m/s<sup>2</sup>)



**Gambar 2.5** Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder (*Sarpkaya, 2010*)

b. Redaman (*Damping*)

Gerak osilasi vertikal pada silinder dapat menimbulkan gelombang yang berpropagasi dari silinder secara radial. Gelombang tersebut membawa energi, dan menarik energi dari silinder yang berosilasi sehingga gerakannya akan berkurang secara gradual. Fenomena ini yang dinamakan dengan redaman (*damping*) yang dipandankan dengan kecepatan pada silinder ( $\dot{z}$ ). Nilai koefisien redaman dapat didapat dengan persamaan 2.4 (*Chakrabarti, 1994*):

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.4)$$

Di mana:

$i$  = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

$b$  = redaman sistem (N s/m)

$\xi$  = kecepatan gerak struktur (m/s)

c. Kekakuan

Dalam bukunya, Djatmiko (2012) mengatakan bahwasanya untuk bangunan laut terapung di permukaan bebas akan memiliki kekakuan untuk mengembalikan posisinya ke posisi semula. Koefisien-koefisien hidrostatis pengembali tersebut tidak sama dengan nol dalam mode gerak *heave*, *roll*, dan *pitch*. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.3). Persamaan berikut ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak:

$$F.c = c_i \xi_i \quad (2.5)$$

Dengan:

$i$  = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

$c$  = kekakuan struktur (N/m)

$\xi$  = respon gerak struktur (m)

Nilai  $c$  dari *heave*, *roll* dan *pitch* adalah sebagai berikut:

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.6)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GMT} \quad (2.7)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GML} \quad (2.8)$$

Dengan:

$\rho$  = massa jenis air sekitar struktur (kg/m)

$g$  = percepatan gravitasi struktur (m/s<sup>2</sup>)

$A_{wp}$  = luas permukaan di garis air (m<sup>2</sup>)

$V$  = volume displacement struktur (m<sup>3</sup>)

$\overline{GMT}$  = panjang metacentre melintang (m)

$\overline{GML}$  = panjang metacentre memanjang (m)

#### 2.2.4 Persamaan Gerak Bangunan Laut Terapung

Persamaan gerak bangunan laut adalah aplikasi dari hukum II Newton, yang merupakan resultan gaya antara gaya aksi atau disebut juga eksitasi dari gelombang dengan gaya reaksi hidromekanik. Gaya aksi memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang dilakukan oleh struktur (Fahcruddin, 2018).

$$m_i \ddot{\xi}_i = \Sigma F \quad (2.9)$$

Dengan:

$i$  = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

$\sum F$  = resultan gaya (N)

$m$  = massa struktur (kg)

$\ddot{\xi}$  = percepatan struktur (m/s<sup>2</sup>)

Resultan gaya pada sisi kiri persamaan 2.9 dapat ditulis menjadi gaya eksitasi dikurangi gaya reaksi, dan selanjutnya dapat ditulis menjadi berikut:

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.10)$$

$$\sum F = (a\ddot{\xi}^* + b\dot{\xi}^* + c\xi^*) - ((m+a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz) \quad (2.11)$$

Dengan menggunakan prinsip gerak relatif, maka total gerak relatif partikel air ( $\ddot{\xi}^*$ ,  $\dot{\xi}^*$ ,  $\xi^*$ ) pada silinder yang bergerak *heave* dalam gelombang menjadi

$$m\ddot{z} = a(\ddot{\xi}^* - \ddot{z}) + b(\dot{\xi}^* - \dot{z}) + c(\xi^* - z) \quad (2.12)$$

### 2.2.5 Spektrum Gelombang JONSWAP

Pada tahun 1968 dan 1969, telah dilakukan program pengukuran gelombang ekstensif yang dilakukan sepanjang garis 100 mil yang ditarik dari Pulau Sylt sampai Laut Utara. Program tersebut dinamakan *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) (*Journee & Massie, 2001*). Formulasi spectrum JONSWAP merupakan modifikasi dari spectrum Pierson-Moskowitz (P-M), dengan memasukkan parameter-parameter yang akan mengakomodasi perairan tertutup atau kepulauan (*Hasselmann, 1973*). Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis sebagai berikut:

$$S_{\zeta}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp\{-1.25(\omega/\omega_0)^{-4}\} \gamma^{\exp\{\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\tau(\omega_0)^2}\}} \quad (2.13)$$

Keterangan:

$\alpha$  =  $0.076(X_0)^{-0.22}$

$X_0$  =  $gX/U_w^2$

$X$  = panjang fetch

$U_w$  = kecepatan angin

$\alpha$  = 0.0081 jika X tidak diketahui

- $\gamma$  = parameter ketinggian atau *peakedness parameter*, yang harganya dapat bervariasi antara 1.0 sampai dengan 7.0. Untuk Laut Utara mempunyai harga 3.3
- $\tau$  = parameter bentuk atau *shape parameter*
- $\tau$  = 0,07 jika  $\omega \leq \omega_0$
- $\tau$  = 0,07 jika  $\omega > \omega_0$
- $\omega_0$  =  $2\pi (g/U_w)(X_0)^{-0.33}$

Menurut Djatmiko (2012) dalam bukunya, persamaan spektrum JONSWAP banyak dipakai dalam perancangan dan analisis bangunan pantai yang dioperasikan di Indonesia. Hal ini cukup dapat dimengerti karena perairan Indonesia dimana kebanyakan bangunan lepas pantai untuk kegiatan migas dioperasikan dalam perairan kepulauan atau perairan tertutup. Namun, dalam sejumlah kajian untuk perairan Indonesia disarankan memakai parameter  $\gamma$  yang lebih kecil, atau sekitar 2.0 sampai 2.5.

### 2.2.6 Respon Gerak Bangunan Laut di Gelombang Acak

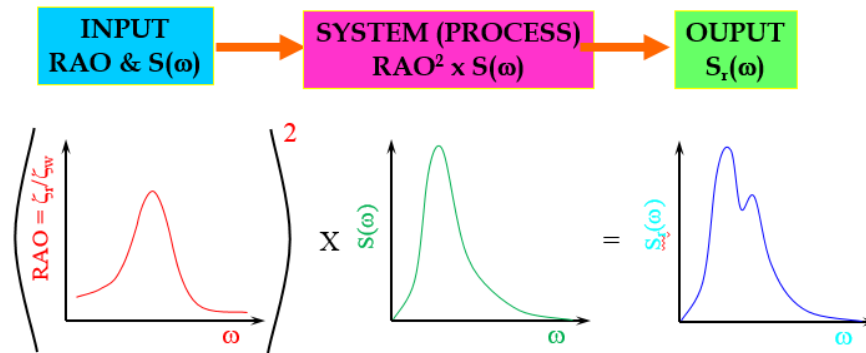
Dalam kondisi ideal, gerakan bangunan apung dapat dihitung sebagai reaksi dari adanya eksitasi gelombang sinusoidal, dengan karakteristik amplitudo dan frekuensi tertentu. Perubahan respon akan linear apabila amplitudo konstan dan frekuensi tetap, namun perubahan respon menjadi tidak linear apabila frekuensi divariasikan pada amplitudo yang tetap. Fenomena ini ditunjukkan oleh fluktuasi RAO seperti yang dijelaskan oleh Djatmiko (2012) dalam bukunya.

Selain itu, gelombang acak merupakan superposisi dari komponen-komponen gelombang sinusoidal yang masing-masing komponen memiliki tingkat energi tertentu. Tingkat energi tersebut diakumulasikan dalam bentuk spektrum energi gelombang. Maka untuk mengetahui karakteristik bangunan apung terhadap gelombang acak, pertama-tama gelombang acak tersebut harus didekomposisi menjadi komponen-komponen gelombang regular, kemudian komponen tersebut digunakan untuk menghasilkan eksitasi terhadap gelombang laut. Hasil eksitasi berupa respon sinusoidal, dan keseluruhan respon sinusoidal disuperposisikan kembali menjadi respon acak bangunan laut.

Maka dari itu, respon bangunan apung pada gelombang acak dapat didapat dengan mengalikan nilai spektrum gelombang  $S_\zeta$  dengan  $RAO^2$ . Proses ini adalah mengubah spectrum gelombang menjadi spektrum respon.



$$S_{\zeta_r}(\omega) = \text{RAO}^2 \cdot S_{\zeta}(\omega) \quad (2.14)$$



**Gambar 2. 6** *Spectral Analysis*: Transformasi spektrum gelombang menjadi respon spektrum (Djatkiko, 2012)

Luasan di bawah respon spektrum merupakan nilai varians ( $m_0$ ), nilai tersebut dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\zeta_r}(\omega) d\omega \quad (2.14)$$

Beberapa parameter-parameter statistik lainnya adalah amplitudo rata-rata dari respon ( $S_{avg}$ ), amplitudo signifikan respon ( $S_{max}$ ), amplitudo rata-rata 1/10 tertinggi respon ( $S_{rms}$ ), amplitudo respon ekstrem yang paling mungkin terjadi ( $S_s$ ), amplitudo respon ekstrem dengan peluang tidak terjadi 0,99. Persamaan parameter-parameter tersebut diberikan sebagaimana berikut:

- amplitudo respon rata-rata

$$\zeta_{n\text{avg}} = 1,25\sqrt{m_0} \quad (2.15)$$

- amplitudo respon signifikan

$$\zeta_{ns} = 2\sqrt{m_0} \quad (2.16)$$

- amplitudo rata-rata 1/10 tertinggi respon

$$\zeta_{n1/10} = 2,54\sqrt{m_0} \quad (2.17)$$

- amplitudo respon ekstrem yang paling mungkin terjadi

$$\hat{S} = \sqrt{m_0} \times \sqrt{\left\{2\ln\left(\frac{60^2 T}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}\right)\right\}} \quad (2.18)$$

- amplitudo respon ekstrem dengan peluang tidak terjadi 0,99

$$\hat{S}_{\alpha} = \sqrt{m_0} \times \sqrt{\left\{2\ln\left(\frac{60^2 T}{2\pi\alpha} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}\right)\right\}} \quad (2.19)$$

### 2.2.7 Teori Pemodelan

Apabila model bangunan apung akan diuji pada towink tank atau wave basin, maka pertanyaan berikutnya adalah bagaimana memastikan bahwasanya kondisi pada saat pengujian yang diskalakan dapat secara akurat merepresentasikan kondisi sesungguhnya yang akan diterima oleh bangunan apung. Untuk menjawab pertanyaan ini, kondisi saat pengujian harus disamakan secara geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya (Munson, et al., 2013).

#### 1. Kesamaan Geometri

Dalam pengujian eksperimen, model yang dibuat haruslah indentik terhadap struktur aslinya dalam hal geometri. Perbedaan dimensi antara model dan struktur asli dapat dilakukan dengan penskalaan sehingga model dapat dikatakan sebanding dengan struktur asli. Untuk suatu satuan yang memiliki komponen panjang (meter) maka penskalaan dapat dilakukan sebagaimana berikut:

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} \quad (2.20)$$

Dimana  $L_s$  dan  $L_m$  dua dimensi (diameter, panjang, dll) yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan  $\lambda$  merupakan rasio skala diantara keduanya. Adapun untuk satuan Inersia yang memiliki komponen berat (ton) dan luas ( $m^2$ ), maka faktor skala menjadi berubah sebagaimana berikut:

$$\lambda^5 = \frac{I_s}{I_m} \quad (2.21)$$

#### 2. Kesamaan Kinematik

Dalam hal kesamaan kinematika, rasio dari kecepatan dan percepatan yang digunakan dalam eksperimen konstan. Hal ini berlaku pada seluruh kecepatan termasuk kecepatan partikel fluida, angin, towing, model pada arah tertentu (Herdayanditya, 2017). Sama seperti sebelumnya, rasio dari percepatan model harus sama dengan struktur asli, tetapi dengan rasio yang berbeda dengan kecepatan. Ketika percepatan dan kecepatan model sudah sama dengan struktur asli, maka keduanya dapat dikatakan memiliki kesamaan kinematik.

#### 3. Kesamaan Hidrodinamik

Rasio dari gaya merupakan hal yang menentukan dalam penentuan hukum skala hidrodinamik. Beberapa hal yang meliputi ini adalah konstanta pegas pada sistem,

dan faktor redaman. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut.

#### 4. Bilangan Froude

Bilangan Froude adalah suatu ukuran dari hubungan gaya inersia, gravitasi, dan *viscous* yang bekerja pada aliran di sekitar kapal atau bangunan apung dan modelnya (Lloyd, 1989). Bilangan Froude didefinisikan sebagaimana berikut:

$$F_N = \sqrt{\frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya gravitasi}}} \quad (2.22)$$

$$F_N = \frac{U}{\sqrt{(gL)}} \quad (2.23)$$

Rasio antara gaya inersia dengan gaya *viscous* adalah berikut:

$$\frac{\rho U^2 L^2}{\mu_w UL} = \frac{\rho UL}{\mu_w} \quad (2.24)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah  $\lambda$ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel berikut merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude

**Tabel 2. 1** *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994)*

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIT</b>	<b>SCALE FACTOR</b>	<b>REMARKS</b>
<b>GEOMETRY</b>			
<i>Length</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Any Characteristic dimension of the object</i>
<i>Volume</i>	$L^3$	$\lambda^3$	<i>For any portion of the object</i>
<i>Angle</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>e.g., between members or solid angle</i>
<i>Radius of Gyration</i>	<i>L</i>	$\lambda$	<i>Measured from a fixed point</i>

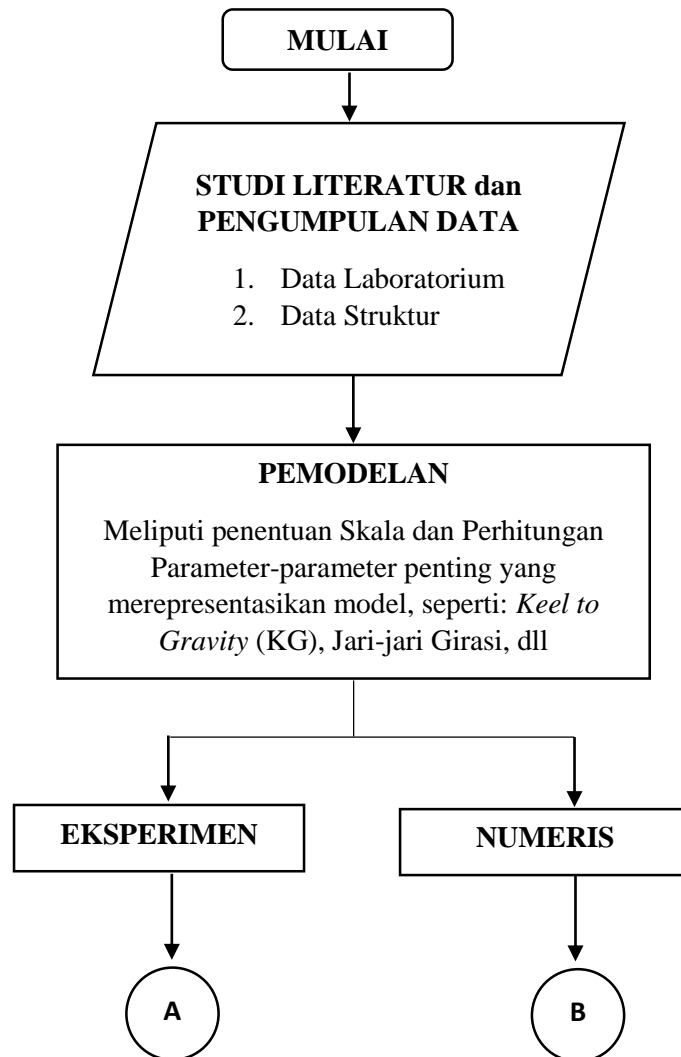
**Tabel 2. 1 Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994)(lanjutan)**

<b>VARIABEL</b>	<b>UNIT</b>	<b>SCALE FACTOR</b>	<b>REMARKS</b>
<i>Moment of Inertia Mass</i>	$ML^2$	$\lambda^5$	<i>Taken about fixed point</i>
<i>Center of Gravity</i>	$L$	$\lambda$	<i>Measured from a reference point</i>
<i>Natural Period</i>	$T$	$\lambda^{1/2}$	<i>Period at which inertia force = restoring force</i>
<b>WAVE MECHANICS</b>			
<i>Wave Height</i>	$L$	$\lambda$	<i>Consecutive crest to trough Distance</i>
<i>Wave Period</i>	$T$	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	$L$	$\lambda$	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>
<i>Wave Elevation</i>	$L$	$\lambda$	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
<b>KINEMATICS &amp; DYNAMICS</b>			
<i>Time</i>	$T$	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Displacement</i>	$L$	$\lambda$	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	$MT^{-2}$	$\lambda^2$	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Factor</i>	<i>None</i>	$1$	<i>Ratio of damping and critical damping coefficient</i>

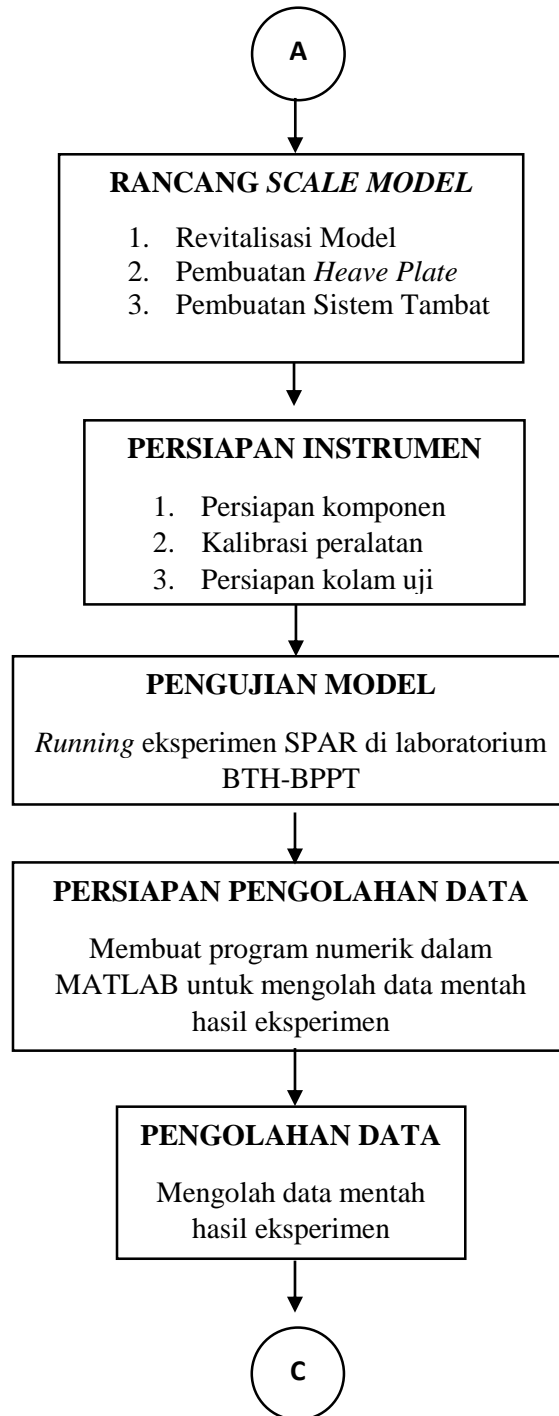
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 DIAGRAM ALIR

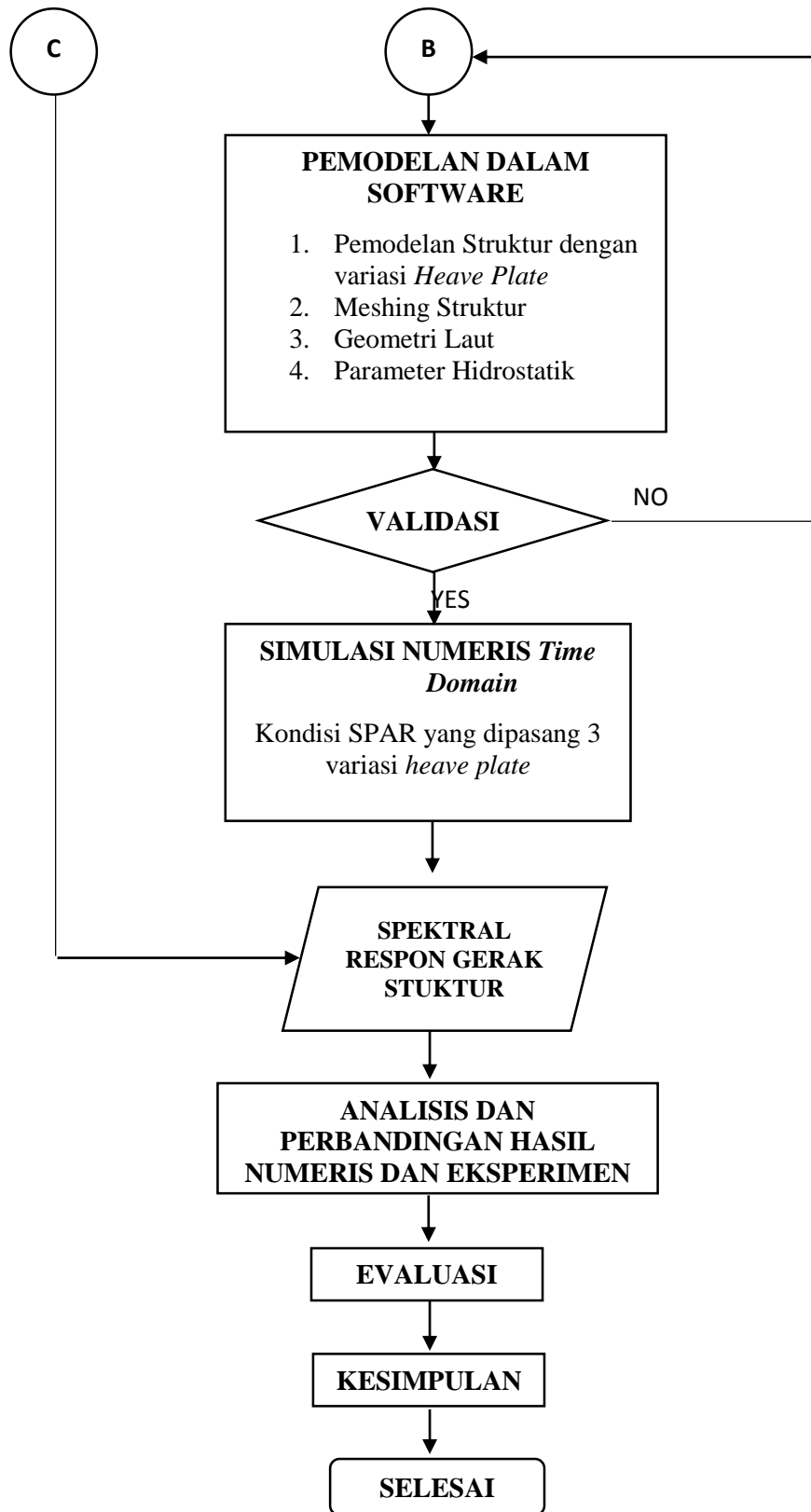
Metodologi penelitian yang digunakan selama pengerjaan tugas akhir ini diwujudkan dengan diagram alir pada gambar di bawah ini:



**Gambar 3. 1a** Gambar Alir Pengerjaan Tugas Akhir



**Gambar 3. 1b** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (cont.)



**Gambar 3. 1c:** Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (cont.)

### 3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR

#### 3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Untuk mendukung tugas akhir ini, studi literatur dilakukan dilakukan dari berbagai sumber literatur seperti jurnal, buku, dan tugas akhir. Literatur yang berhubungan dengan studi numeris dan eksperimen dari SPAR, pengaruh penggunaan *heave plate*, dan teori dasar mengenai hidrodinamika digunakan dalam tugas akhir ini. Selain itu, pada tahap ini dikumpulkan data struktur SPAR yang akan diuji di fasilitas *Maneuvering and Ocean Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika dan dianalisis secara numerik. Data yang didapat berupa struktur Mini SPAR. Selain data struktur SPAR, terdapat juga data fasilitas kolam yang digunakan dan data variasi *heave plate*. Kumpulan data tersebut tercantum sebagaimana berikut:

**Tabel 3. 1** Data Dimensi Mini SPAR

Mini SPAR		
Deskripsi	Besaran	Satuan
Lambung		
Diameter (Ds)	17,50	m
Draft/Sarat	129,25	m
Tinggi	154,25	m
Posisi <i>Fairlead</i> diukur dari <i>keel</i>	146,25	m
Deck		
Panjang	50,29	m
Lebar	50,29	m
Tinggi	19,57	m
<i>Weight</i>	31949218,75	kg



**Tabel 3. 2** Variasi dimensi heave plate

Deskripsi	Ukuran	Satuan	Rasio Dp/Ds
Diameter Heave Plate (Dp)	22,75	m	1,3
Diameter Heave Plate (Dp)	24,5	m	1,4
Diameter Heave Plate (Dp)	26,25	m	1,5

**Tabel 3. 3** Data kolam MOB BTH-BPPT (*bth.bppt.go.id*)

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Panjang	60	m
Lebar	35	m
Kedalaman (penuh)	2.5	m
Kedalaman (operasi)	2.5	m
<i>Maximum Waves Period</i>	0.5 - 3	s
<i>Waves Direction</i>	0° - 90°	<i>Degree</i>
Hs	0 – 0.3	m

### 3.2.2 Pemodelan

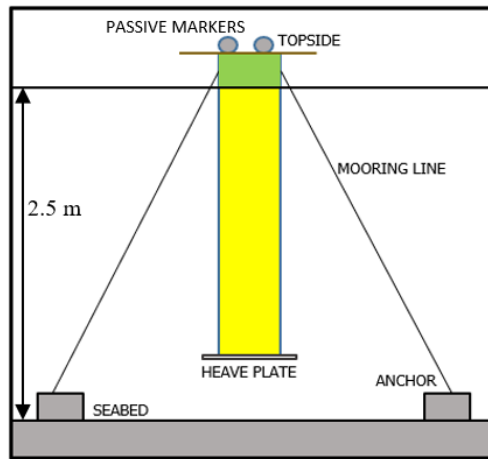
Data yang telah dikumpulkan berupa dimensi, dan distribusi berat dari SPAR, serta properti tali tambat akan digunakan sebagai acuan dalam model. Pemodelan akan dilakukan dengan 2 cara, yaitu pemodelan eksperimen dan pemodelan numeris.

- Pemodelan eksperimen

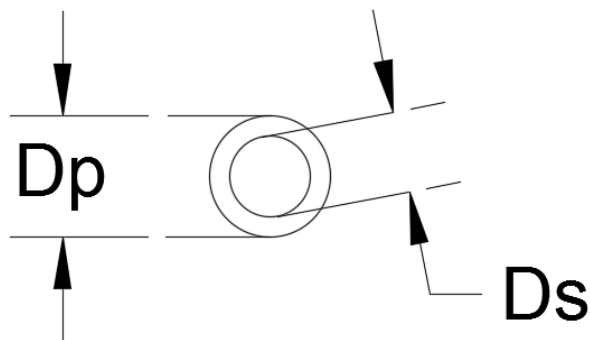
Struktur SPAR dimodelkan secara fisik dengan menskala parameter dimensi dan distribusi berat SPAR. Skala ditentukan atas pertimbangan aspek kesamaan geometri, kinematis, dan dinamis. Selain itu, kondisi fasilitas kolam MOB Balai Teknologi Hidrodinamika dan ketersediaan barang di pasar menjadi faktor lain yang menjadi pertimbangan. Sehingga, berangkat dari faktor-faktor tersebut skala yang ditentukan pada tugas akhir ini adalah 1:125.

- Pemodelan Numeris

Model numeris dibuat dengan bantuan perangkat lunak ORCAFLEX 9.2A. Pertama-tama lambung dari SPAR dimodelkan dengan memasukkan koordinat yang sesuai dengan dimensi utama SPAR. Selanjutnya *heave plate* dibuat dengan menambah koordinat di bawah *keel* dan membuat lingkaran yang diameternya lebih besar daripada diameter SPAR itu sendiri. Dengan memasukkan massa, titik *keel to gravity* (KG), dan jari-jari girasi, model kemudian divalidasi dimensi utama dan parameter hidrostatis berupa *displacement*. Selain pembuatan model, tali tambat juga dimodelkan sesuai dengan tali tambat yang digunakan saat eksperimen.



**Gambar 3. 2:** Diagram Alir PenelitianMULAI



**Gambar 3. 3** Model SPAR dengan heave plate tampak atas

### 3.2.3 Perancangan *Scale Model*

Tahapan dari perancangan *scale model* ini terbagi menjadi 3 tahap:

#### 1. Revitalisasi Model

Pada tahap ini, model SPAR yang telah dibuat Ivandito dkk pada tahun 2017 kembali digunakan namun dengan berbagai perubahan. Model mini SPAR polos tersebut diberi tambahan perangkat peredam gerak, yaitu *heave plate* yang berbentuk lingkaran pipih dan diletakkan di bagian bawah *keel* SPAR. Bahan untuk membuat model antara lain, pipa PVC untuk bagian lambung, akrilik untuk bagian *keel* sekaligus menjadi penutup, besi pemberat (*ballast*), dan besi ulir. Selanjutnya dilakukan pengaturan ulang dalam pendistribusian berat karena ditemukan kesalahan pada posisi titik KG lama yang menyebabkan model tidak bisa mengapung dengan stabil saat berada di air. Pengaturan ulang distribusi berat ini bertujuan untuk mencari posisi KG dan jari-jari girasi yang baru.

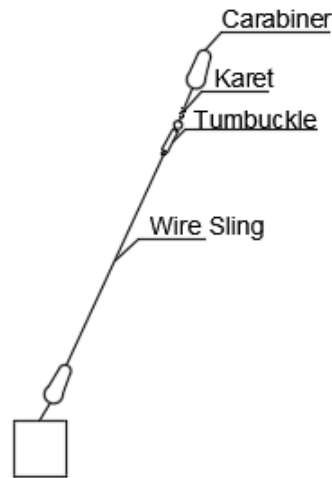
#### 2. Pembuatan *Heave Plate*

*Heave Plate* dimodelkan sebagai piringan pipih berbentuk lingkaran yang berfungsi sebagai perangkat tambahan untuk menambah redaman. Akrilik dipilih sebagai bahan untuk *heave plate* karena bahannya yang ringan sehingga posisi titik KG dan jari-jari girasi tidak berubah akibat pemasangan *heave plate* pada SPAR. *Heave plate* dipasang pada bagian *keel* dari SPAR. Diameter *heave plate* yang digunakan memiliki variasi sebesar 18,2 cm, 19,6 cm, dan 21 cm dengan ketebalan sebesar 0,5 cm.

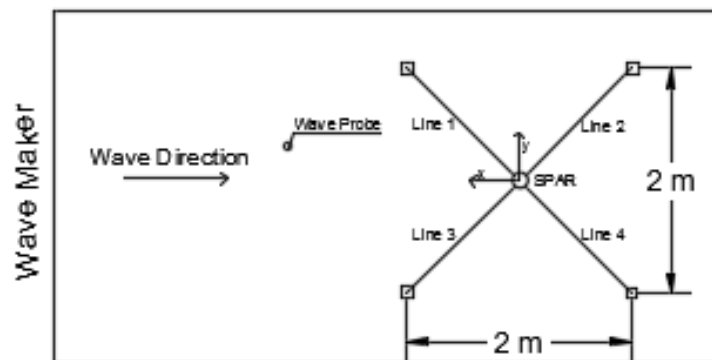
#### 3. Pembuatan Sistem Tambat

Pada tahap ini, sistem tambat dimodelkan di fasilitas MOB dengan berbagai aspek pertimbangan seperti kemudahan pekerjaan, ketersediaan bahan di pasar, dan sebagainya. Hal pertama yang dilakukan adalah menentukan konfigurasi sistem yang akan digunakan. Konfigurasi sistem tambat yang dipilih adalah 4x1. SPAR akan ditambat dari *fairlead* ke dasar kolam dengan 4 *mooring line* secara *Taut*. *Mooring line* dibuat menggunakan kombinasi antara karet pegas dan *nylon coated wire* yang disambungkan ke karabiner lalu dikaitkan ke *Fairlead*. Di dasar kolam, masing-masing tali tambat dikaitkan ke pemberat seberat 50 Kg yang

ditenggelamkan di dasar kolam. Konfigurasi tali tambat pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan 3.5 berikut.



**Gambar 3. 4** Konfigurasi Mooring Line



**Gambar 3. 5** Tampak Atas Konfigurasi Sistem Tambat

Dalam membuat model sistem tambat, perlu memperhatikan beberapa parameter yang mempengaruhi fungsi dari sistem tambat. Parameter-parameter tersebut adalah

- Kekakuan Tali Tambat

Pemodelan dari tali tambat menggunakan senar nylon. Kekakuan dari senar akan diwakilkan oleh karet yang dipasang pada setiap konfigurasi *mooring line*. Penggunaan karet ini diperlukan untuk mengetahui *pre-tension* mooring dan menghindari terjadinya *slack* pada senar.

- Posisi *fairlead*  
Posisi *fairlead* disesuaikan dengan data asli yang ada pada Tabel 3.1 dan disesuaikan dengan skala model. Posisi *fairlead* berada diatas muka air dan di atas titik pusat massa total model (*center of gravity (COG)*).
- Sudut tali tambat dengan model pada *fairlead*  
Sudut tali tambat dengan *fairlead* akan menyesuaikan kedalaman Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) yaitu sebesar 30°. Hal ini disebabkan tidak ada data mengenai sudut tali tambat pada laporan JIP (1995),
- Jenis sistem tambat  
Jenis sistem tambat yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *Taut mooring*.

### 3.2.4 Validasi Model

Model yang telah dibuat secara numeris maupun fisik perlu divalidasi agar hasil dari simulasi maupun percobaan tidak melenceng jauh. Perbedaan hasil pemodelan numeris dan eksperimen disyaratkan sebesar 5 %. Parameter yang perlu divalidasi antara lain: *displacement*, KG, jari-jari girasi, dan posisi *fairlead*.

### 3.2.5 Persiapan Instrumen Laboratorium

Instrumen yang digunakan dalam eksperimen SPAR adalah seperangkat sistem penangkap gerak dari *QUALISYS*. Secara garis besar dalam sistem ini terdapat beberapa komponen utama yang dapat digunakan untuk menangkap gerak dari SPAR dalam 6 mode gerakan. Komponen-komponen tersebut adalah:

#### 1. *Motion Capture Camera*

Kamera ini dapat menangkap posisi daripada *marker* yang dipasang pada bagian *deck* SPAR. Posisi *marker* yang berubah-ubah dapat ditangkap kamera dengan *frame rate* sekitar 180-1750 fps.



**Gambar 3. 6** *Qualysis Motion Capture Camera*

## 2. *Passive Marker*

*Marker* ini khusus digunakan untuk menandakan posisi titik dimana SPAR itu berada. Ketika SPAR dikenai gelombang selama periode waktu eksperimen, posisi *marker* di setiap detiknya akan ditangkap oleh kamera, dan dikumpulkan menjadi *time history*.



**Gambar 3. 7** *Passive Markers* ([www.qualisys.com](http://www.qualisys.com))

## 3. *Calibration Kit*

Alat ini digunakan untuk mengkalibrasi posisi sumbu x dan y agar sesuai dengan keinginan pengguna. Kalibrasi posisi sumbu penting untuk dilakukan agar tidak terjadi kesalahan dalam membaca gerak dari SPAR.



**Gambar 3. 8** *Calibration Kit*

### **3.2.6 Pengujian Model**

Model akan diuji di fasilitas MOB BTH-BPPT. 3 variasi *heave plate* akan dipasang pada SPAR dan masing-masing akan diuji dengan gelombang acak pada periode waktu tertentu. Spektrum gelombang yang digunakan adalah spektrum JONSWAP dengan nilai  $\gamma = 3.3$ ,  $H_s = 6.35$  m, dan  $T_p = 14.5$  s. Hasil dari pengujian berupa *time history* yang akan diolah pada tahap selanjutnya menjadi spektral respon gerak struktur.

### **3.2.7 Persiapan Pengolahan Data**

Untuk mengolah data mentah (*raw data*) hasil dari pengujian model, diperlukan program tambahan yang perlu disiapkan. Program tersebut dibuat dengan bantuan perangkat lunak MATLAB dengan menerapkan metode *Fast Fourier Transform*.

### **3.2.8 Pengolahan Data**

Pengolahan data dilakukan menggunakan program yang telah dibuat dengan bantuan perangkat lunak MATLAB. Dari hasil olahan ini akan grafik spektrum gelombang, dan spektral respon gerak pada mode gerak *heave*, *pitch*, dan *surge*.

### **3.2.9 Simulasi Numeris Time Domain**

Model yang telah dibuat secara numeris di ORCAFLEX 9.2A, akan disimulasi secara *time domain* dengan gelombang acak. Parameter gelombang yang dipakai disamakan dengan parameter yang dipakai pada uji eksperimen. Simulasi numeris *time domain* akan menghasilkan *time history* yang akan diolah menjadi spektral respon gerak struktur.

### **3.2.10 Analisis dan Perbandingan Hasil Numeris dan Eksperimen**

Setelah pengujian secara eksperimen maupun numeris telah dilakukan, langkah selanjutnya adalah menganalisis hasil dari masing-masing metode dan membandingkannya. Analisis yang dilakukan menjawab daripada rumusan-rumusan masalah yang telah dicantumkan pada bagian awal tugas akhir ini. Hal itu meliputi, pengaruh diameter *heave plate* terhadap respon gerak SPAR pada gelombang acak.

### **3.2.11 Kesimpulan**

Semua analisis yang telah dilakukan akan ditarik kesimpulannya dan kesimpulan tersebut harus menjawab daripada rumusan-rumusan masalah pada bagian awal tugas akhir.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 PEMODELAN STRUKTUR

#### 4.1.1 Pemodelan Eksperimen

Untuk melakukan studi eksperimen, SPAR harus dimodelkan secara fisik terlebih dahulu. Penskalaan dilakukan dengan hukum Froude, dengan skala 1:125. Hasil penskalaan tercantum sebagaimana berikut:

**Tabel 4. 1** Penskalaan model SPAR

Deskripsi	<i>Full Scale</i>	Faktor Skala	<i>Scale Model</i>
Massa (kg)	31949218	$\lambda^3$	16,358
Diameter (m)	17,5	$\lambda$	0,14
Sarat SPAR tanpa <i>heave plate</i> (m)	<i>Free Floating</i>	$\lambda$	1,029
	<i>Moored</i>	$\lambda$	1,111
Sarat SPAR dengan <i>heave plate</i> (m)	<i>Free Floating</i>	$\lambda$	1,034
	<i>Moored</i>	$\lambda$	1,116
Tinggi (m)	154,25	$\lambda$	1,234
Tinggi <i>Fairlead</i> diukur dari <i>keel</i> SPAR tanpa <i>heave plate</i> (m)	145,625	$\lambda$	1,165
Tinggi <i>Fairlead</i> diukur dari <i>keel</i> SPAR dengan <i>heave plate</i> (m)	146,25	$\lambda$	1,170
<i>Keel to Gravity</i> (m)	57,125	$\lambda$	0,457
Radius Girasi XX (m)	68,75	$\lambda$	0,55
Radius Girasi YY (m)	68,75	$\lambda$	0,55
Periode Puncak Gelombang (s)	14,5	$\lambda^{1/2}$	1,3

SPAR yang dimodelkan untuk eksperimen menggunakan pipa PVC 5” untuk bagian lambung. Pipa kemudian dipotong menyesuaikan ukuran tinggi model, kemudian bagian bawah pipa ditutup dengan akrilik dan tutup pipa agar tidak bocor. Pipa diisi beban berupa besi ulir dan lempengan besi silinder yang didistribusikan massanya sehingga SPAR dapat stabil di dalam air (Gambar 4.1). Bagian *topside* menggunakan tripleks dan ditempel sensor kamera *qualisys*. Selain itu, bahan

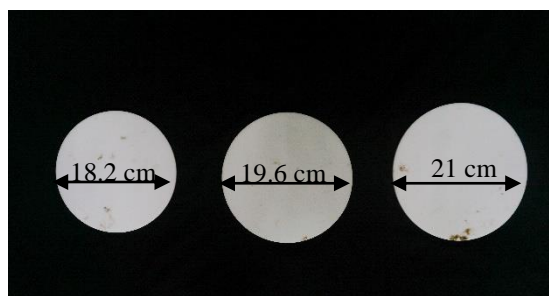
*heave plate* menggunakan akrilik dengan tebal 0.5 cm, dan ditempel dengan *double tape* pada bagian *keel* SPAR. Model fisik dan diameter *heave plate* dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan 4.3.



**Gambar 4. 1** Besi dan ulir di dalam lambung model SPAR



**Gambar 4. 2** Model Fisik



**Gambar 4. 3** Variasi Diameter Heave Plate

Selanjutnya adalah mencari parameter-parameter distribusi massa dari SPAR. Hal tersebut meliputi massa total, titik pusat, dan jari-jari girasi. Berikut adalah penjelasannya:

1. Massa total

Massa total model didapat dengan menjumlahkan seluruh komponen penyusun dari model. Penjumlahan komponen-komponen tersebut ditampilkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2** Perhitungan massa total model

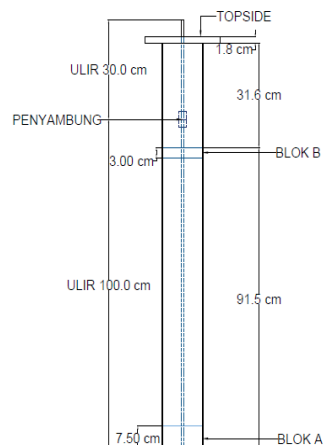
Komponen	Berat (kg)
Ballast+Ulir	10,941
Pipa	4,81
Topside/tripleks	0,607
Heave Plate	0,145
<b>Total</b>	<b>16,503</b>

2. Kalibrasi titik pusat massa (KG)

Kalibrasi dilakukan untuk mendapatkan posisi titik KG. Kalibrasi dilakukan dengan bantuan meja osilator. SPAR dilengkapi dengan *ballast* yang telah didistribusikan massanya agar SPAR dapat stabil pada saat berada di air. Detail daripada distribusi massa dan konfigurasi *ballast* dapat dilihat pada Tabel 4.3. dan Gambar 4.4.

**Tabel 4. 3** Distribusi Massa pada *Ballast*

Komponen		Tebal (cm)	Jumlah	Massa Total (kg)
Blok A	<i>Ballast 1</i>	2	1	10,941
	<i>Ballast 2</i>	2	1	
	<i>Ballast 3</i>	2,5	1	
	<i>Ballast 4</i>	1	1	
Blok B	<i>Ballast 5</i>	2,5	1	
	<i>Ballast 6</i>	0,5	1	
Rangka	Ulir (130 cm)	-	1	



**Gambar 4. 4** Konfigurasi Ballast

Pertama-tama model yang telah dilengkapi *ballast* diletakkan tepat di titik rotasi meja, kemudian *waterpass* diletakkan di permukaan meja osilator untuk mengukur kesetimbangan meja. Posisi dari SPAR digeser hingga dicapai kesetimbangan pada meja. Meja dapat dikatakan setimbang apabila air di dalam *waterpass* juga terlihat setimbang. Selanjutnya jarak antara titik rotasi meja dengan *keel* SPAR diukur, dan dijadikan titik KG dari *scale model* SPAR. Dari kalibrasi didapatkan KG model sebesar **45,7 cm**. Proses kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 4.5.



**Gambar 4. 5** Proses Kalibrasi KG

**Tabel 4. 4** Tabel Perhitungan KG secara Analitis

<i>Weight Distribution Table</i>				
Nama	Massa (gr)	KG (z) (cm)	Mz (gr.cm)	
PVC	4810	61.55	296055.5	
Topside	607	124	75268	
Ulir	352.09	65	22885.85	
Heave Plate	0.145	-0.25	-0.03625	
Ballast 1A	1901.1719	6.5	12357.62	
Ballast 2A	1901.1719	4.5	8555.273	
Ballast 3A	2376.4648	3	7129.395	
Ballast 4A	475.29297	1.25	594.1162	
Ballast 1B	2376.4648	89.25	212099.5	
Ballast 2B	950.58594	88.25	83889.21	
		KG Analitis	45.63916	cm
		KG Pengamatan	45.7	Cm
		Error	-0.13331	%

Nilai KG model yang didapat dari pengamatan menggunakan meja osilator kemudian divalidasi dengan perhitungan secara analitis sebagaimana Tabel 4.4, dan didapat error sebesar -0,1331%.

### 3. Kalibrasi jari-jari girasi

Kalibrasi jari-jari girasi dilakukan selanjutnya untuk mencari jari-jari girasi dari *scale model*. Jari-jari girasi yang diukur hanya pada sumbu  $R_{xx}$  (*roll*) dan sumbu  $R_{yy}$  (*pitch*), dikarenakan bentuk SPAR yang merupakan silinder. Besaran dari jari-jari girasi *roll* dan *pitch* juga sama dikarenakan bentuk model yang simetris.

Pengukuran jari-jari girasi dilakukan secara manual dengan menggunakan *stopwatch* dan meja osilator. Pertama-tama meja osilator diberi simpangan sehingga berosilasi, kemudian periode osilasi atau periode natural dari meja diukur dengan *stopwatch*. Selanjutnya model diletakkan di atas meja, dan diukur periode osilasinya dengan cara yang sama seperti sebelumnya.

Periode natural dari meja kosong dan meja dengan model selanjutnya digunakan untuk perhitungan inersia. Inersia antara meja dengan model kemudian dikurangi dengan inersia meja kosong, sehingga didapat inersia model. Inersia mode tersebut kemudian dibagi dengan massa model, sehingga didapat nilai jari-jari girasi seperti pada Tabel 4.5. Selengkapnya, perhitungan jari-jari girasi model dapat dilihat pada **Lampiran A**.

**Tabel 4. 5** Jari-jari girasi model

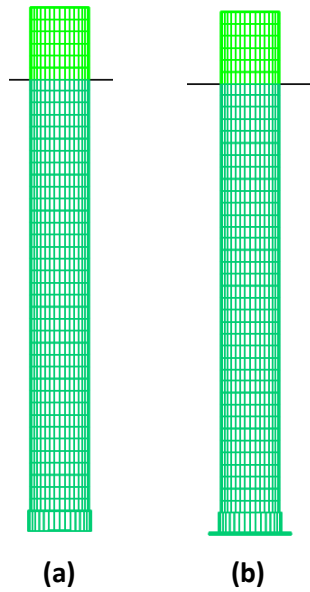
$R_{xx}$ (m)	$R_{yy}$ (m)
0,55	0,55

#### 4.1.2 Pemodelan Numeris

Permodelan numeris dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MOSES, dan ORCAFLEX 9.2A. Fungsi daripada perangkat MOSES adalah untuk memodelkan struktur SPAR serta melakukan analisis hidrodinamika dengan *3D diffraction theory*. Analisis hidrodinamika dilakukan untuk mendapatkan nilai-nilai *wave load RAO*, matriks massa tambah, dan matriks redaman. Nilai-nilai tersebut yang selanjutnya dijadikan *input* pada perangkat ORCAFLEX 9.2A dan kemudian dilakukan simulasi *time domain* pada model SPAR.

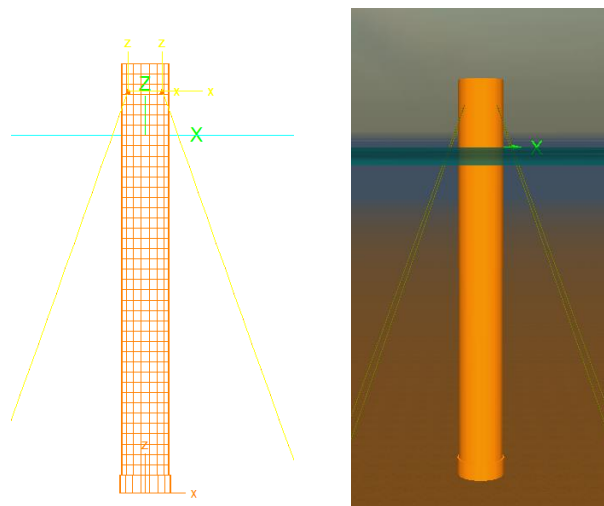
Pemodelan dalam MOSES dilakukan dengan membentuk perintah pada ekstensi .dat untuk membentuk silinder dengan variasi 3 diameter, yaitu diameter SPAR, diameter *cap*, dan diameter *heave plate*. Model kemudian di-meshing

dengan ukuran panel sebesar 3,5 m. Model yang dibuat pada MOSES dapat dilihat pada Gambar 4.6.

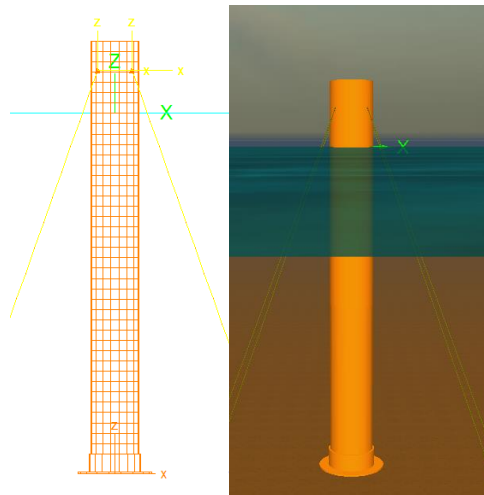


**Gambar 4. 6** Model SPAR dalam MOSES (a) SPAR tanpa *heave plate* (b) SPAR dengan *heave plate*.

Sedangkan, pemodelan yang dilakukan pada ORCAFLEX 9.2A dilakukan dengan menggunakan *tool 6D SPAR Buoy*. Model yang dimodelkan di ORCAFLEX 9.2A terdapat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8. Properti dari SPAR seperti dimensi, massa, serta jari-jari girasi adalah sama pada kedua model di MOSES maupun ORCAFLEX 9.2A. Selengkapnya mengenai data properti SPAR dapat dilihat pada Tabel 4.6.



**Gambar 4. 7** Model SPAR tanpa *heave plate* dalam ORCAFLEX 9.2A



**Gambar 4. 8** Model SPAR dengan *heave plate* dalam ORCAFLEX 9.2A

**Tabel 4. 6** Data struktur SPAR dalam full scale

Deskripsi		Besaran
Massa (kg)		31949218
Diameter (m)		17,5
Sarat SPAR tanpa <i>heave plate</i> (m)	<i>Free Floating</i>	128,681
	<i>Moored</i>	138,896
Sarat SPAR dengan <i>heave plate</i> (m)	<i>Free Floating</i>	129,305
	<i>Moored</i>	139,520
Tinggi (m)		154,25
Tinggi <i>Fairlead</i> diukur dari <i>keel</i> SPAR tanpa <i>heave plate</i> (m)		145,625
Tinggi <i>Fairlead</i> diukur dari <i>keel</i> SPAR dengan <i>heave plate</i> (m)		146,25
<i>Keel to Gravity</i> (m)		57,125
Radius Girasi XX (m)		68,75
Radius Girasi YY (m)		68,75
Periode Puncak Gelombang (s)		14,5

#### 4.2 PEMODELAN SISTEM TAMBAT

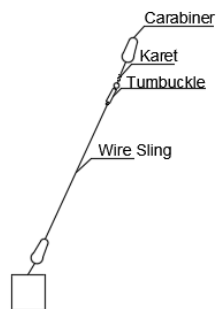
Sub-bab ini akan menjelaskan langkah-langkah memodelkan sistem tambat pada analisis eksperimen maupun numeris. Pada uji eksperimen, model SPAR ditambat pada dasar kolam. Tali tambat yang digunakan harus mampu menahan beban saat struktur diuji pada kolam, agar struktur tidak bergerak terlalu jauh dari

posisi awalnya. Tali tambat yang dipilih untuk eksperimen adalah *steel wire sling* dengan kapasitas 20 lbs seperti pada Gambar 4.9.



**Gambar 4. 9** *Stainless Steel Wire Sling*

Sistem tambat dimodelkan dengan merangkai beberapa komponen seperti karet, *steel wire*, tumbuckle, dan property lainnya. Konfigurasi rangkaian tali mooring dapat dilihat pada gambar 4.10.



**Gambar 4. 10** Konfigurasi Tali Tambat

#### 4.2.1 Perhitungan Kekakuan Tali Tambat

Selanjutnya, untuk menghitung kekakuan tali tambat, maka perhitungan dibagi menjadi 2 bagian, yaitu kekakuan karet dan kekakuan *steel wire*.

a. Kekakuan Karet

Nilai daripada kekakuan karet dikalibrasi dengan cara menggantung karet pada neraca gantung, kemudian karet diberi beban yang bertambah secara linear. Untuk memastikan akurasi dari pengukuran, kalibrasi dilakukan 2 kali, pertama karet diberi penambahan beban secara berkala, kemudian beban dikurangi secara berkala. Proses kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 4.11.





**Gambar 4. 11** Kalibrasi Kekakuan Sistem Tambat

Pada proses kalibrasi, nilai kekakuan karet dapat dihitung dengan menggunakan hukum *Hooke*, sebagaimana persamaan berikut:

$$F = (E.A / l) dx = K dx \quad (4.1)$$

$$K = F / dx \quad (4.2)$$

Di mana:

$F$  = Gaya beban (N)

$E$  = Modulus young ( $\text{kg/ms}^2$ )

$dx$  = Penambahan panjang tali (m)

$K$  = Kekakuan (N/m)

$l$  = Panjang tali (m)

$A$  = Luas penampang tali ( $\text{m}^2$ )

Perhitungan kekakuan tali tambat dapat dilihat pada Tabel 4.7 di bawah.

**Tabel 4. 7** Tabel Perhitungan Kekakuan Tali Tambat

massa (kg)	F (N)	Uji coba 1	Uji coba 2	dx (m)	K (N/m)
		x (cm)	x (cm)		
0,02	0,1962	20	20	0,002	98,1
0,04	0,3924	20,2	20,2	0,004	98,1
0,06	0,5886	20,4	20,4	0,006	98,1
0,08	0,7848	20,6	20,6	0,008	98,1
0,1	0,981	20,8	20,8	0,01	98,1
Kavg					98,1

Dari Tabel 4.4 dapat diambil kesimpulan bahwasanya besaran kekakuan rata-rata ( $K_{avg}$ ) dari tali tambat sebesar **98,1 N/m**.

Selanjutnya besaran  $K$  yang didapat dari perhitungan kemudian dipakai untuk mencari besaran *axial stiffness* ( $EA$ ). Persamaan untuk menghitung  $EA$  adalah sebagai berikut:

$$EA = K.l \quad (4.3)$$

Keterangan:

$E$  = Modulus young ( $N/m^2$ )

$A$  = Luas penampang karet ( $m^2$ )

$K$  = Kekakuan karet ( $N/m$ )

$l$  = Panjang karet (m), dari pengukuran didapatkan panjang total tali sebesar 0,02 m.

Dengan menggunakan persamaan 4.3, besaran  $EA$  dapat didapatkan sebagaimana perhitungan berikut:

$$EA = 98,1 \times 0,02$$

$$EA = 19,62 \text{ N}$$

Besaran *axial stiffness* yang telah didapat merupakan *axial stiffness* dari model karet pada air tawar di fasilitas MOB. Selanjutnya, dikarenakan besaran *axial stiffness* akan digunakan pada analisis numeris, maka *axial stiffness* harus dikonversi dengan mengalikan  $EA$  dengan ratio antara massa jenis air tawar dan air laut, yaitu sebesar 1,025. Sehingga didapat besaran  $EA$  dalam air laut sebesar 20,11 N.

Langkah berikutnya yaitu besaran *axial stiffness* dari karet diubah menjadi besaran *full scale* dengan dikali skala  $\lambda^3$ , sesuai dengan hukum Froude. Besaran *axial stiffness* dalam *full scale* inilah yang akan digunakan pada analisis numeris. Perhitungan konversi besaran *axial stiffness* ke dalam besaran *full scale* dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

$$EA_{fullscale} = EA_{model} \times \lambda^3 \quad (4.4)$$

$$= 20,11 \times (125)^3$$

$$= 39278320,31 \text{ N}$$

$$EA_{fullscale} = 39,27832031 \text{ MN}$$

Setelah didapatkan besaran *axial stiffness* dalam kondisi *full scale*, langkah selanjutnya adalah memodelkan karet yang digunakan saat uji eksperimen ke dalam bentuk tali yang dapat dipakai pada perangkat ORCAFLEX 9.2A. Tali yang

digunakan adalah jenis *polyester* (8-strand Multiplait), dengan kategori *wire/rope*. Diameter tali disesuaikan sehingga besaran *axial stiffness*-nya sama dengan yang didapat pada persamaan 4.4. Keterangan dari properti tali tambat serta ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan 4.13.

2. Set the associated Rope/Wire Data. Then click NEXT to proceed.

Rope/Wire Data

Rope/Wire Nominal Diameter (m):

The derived line type outer diameter is less than this nominal diameter, in order to give the correct buoyancy. Cd and Ca values may require adjustment. Select Rope/Wire Nominal Diameter and press F1 for details.

Construction: Polyester (8-strand Multiplait) ▾

Derived Line Type Data

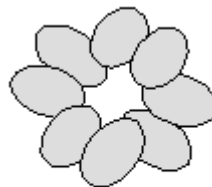
Geometry, Mass:

Diameters (m)		Mass per Unit Length (te/m)
Outer	Inner	
0.163	0.000	0.029

Tension, Bending:

Bending Stiffness (kN.m <sup>2</sup> )		Axial Stiffness (kN)	Compression is limited
x	y		
0.000	~	39.278E3	Yes

**Gambar 4. 12** Keterangan properti dari tali *polyester*



Fibre rope

**Gambar 4. 13** Ilustrasi tali *polyester* dalam ORCAFLEX 9.2A

b. Kekakuan *steel wire sling*

Jenis material kedua yang digunakan sebagai tali tambat dalam tugas akhir kali ini adalah *steel wire sling*. Sebagaimana yang telah dicantumkan pada Gambar 4.13, *wire* yang digunakan pada uji eksperimen memiliki kapasitas 20 lbs dan diameter 0,15 mm.

Untuk menghitung besaran *axial stiffness* dari *wire sling* yang digunakan pada eksperimen, diperlukan variabel-variabel yang mempengaruhi *axial stiffness*. Variabel-variabel tersebut antara lain, modulus young *stainless steel* (E), luas

penampang, dan diameter dari *wire sling*. Perhitungan *axial stiffness* secara lengkap dapat dilihat pada persamaan 4.5.

$$\begin{aligned} \text{Axial Stiffness}_{\text{Seksperimen}} &= E.A & (4.5) \\ &= E.(\pi.D^2) \end{aligned}$$

Dengan:

E = Modulus young (N/m<sup>2</sup>), besaran E *stainless steel* adalah  $200 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup> yang didapatkan dari katalog pada website [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)

A = Luas penampang karet (m<sup>2</sup>)

D = Diameter *wire sling* (m), besar diameter dari pengukuran adalah sebesar 0,00015 m.

Variabel-variabel yang telah diketahui besarnya dimasukkan ke persamaan 4.5, sehingga perhitungan *axial stiffness* (EA) dapat dilakukan sebagaimana berikut:

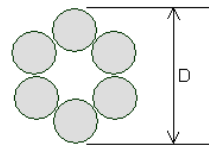
$$\begin{aligned} EA_{\text{eksperimen}} &= 2 \times 10^{11} \cdot (\pi(0,00015)^2) \\ &= 2 \times 10^{11} \cdot 1,767 \times 10^{-8} \\ &= 3534,292 \text{ N} \end{aligned}$$

Selanjutnya, besaran *axial stiffness* yang digunakan dalam uji eksperimen diubah ke dalam bentuk *full scale*. Dan dikalikan dengan rasio antara massa jenis air laut dan air tawar Penskalaan dilakukan dengan mengalikan besaran *axial stiffness* dengan skala  $\lambda^3$ , sesuai dengan hukum Froude. *Axial stiffness* dalam bentuk *full scale* inilah yang akan digunakan dalam analisis numeris. Perhitungan konversi *axial stiffness* (EA) dari skala model menjadi *full scale* dapat dilihat pada perhitungan di bawah ini:

$$\begin{aligned} EA_{\text{full scale}} &= EA_{\text{eksperimen}} \cdot \lambda^3 \cdot 1,025 & (4.6) \\ &= 3534,292 \times (125^3) \times 1,025 \\ &= 7075486384 \text{ N} \\ &= 7075,486384 \text{ MN} \end{aligned}$$

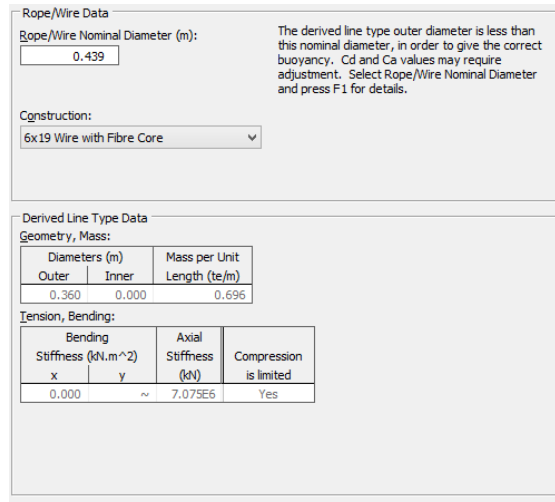
Langkah selanjutnya yaitu memodelkan *wire sling* yang digunakan saat uji eksperimen ke dalam perangkat ORCAFLEX 9.2A untuk analisis numeris. Tali yang digunakan adalah jenis 6x19 *wire with fibre core*. Parameter yang disesuaikan antara model eksperimen dan numeris adalah besaran *axial stiffness*. Adapun untuk diameter dari tali disesuaikan hingga didapat *axial stiffness* yang sama dengan

perhitungan persamaan 4.6. Ilustrasi dari tali tambat 6x19 *wire with fibre core* serta keterangannya terdapat pada Gambar 4.14 dan 4.15.



Wire with Fibre core

**Gambar 4. 14** Ilustrasi 6x19 *wire with fibre core* pada ORCAFLEX



**Gambar 4. 15** Keterangan Properti 6x19 *wire with fibre core*

#### 4.2.2 Perhitungan Pre-Tension

Seperti yang telah disebutkan pada bagian 3.2.3, tali tambat dimodelkan secara *taut*. Untuk membuat tali tambat *taut* diperlukan *pre-tension* yang cukup besar agar tali dapat berada dalam kondisi tegang. Nilai *pre-tension* disesuaikan dengan kondisi di fasilitas MOB BTH-BPPT. Pengukuran *pre-tension* dilakukan dengan cara menghitung selisih perbedaan sarat air SPAR saat kondisi *free floating* dan tertambat. Selisih sarat tersebut selanjutnya dikali dengan diameter SPAR sehingga didapat volume, volume kemudian dikali dengan massa jenis air menjadi *displacement*. *Displacement* tersebut dianggap mewakili sebagai *pre-tension* pada tali. Patut dicatat bahwasanya 4 tali tambat identik, sehingga nilai *displacement* dibagi 4 untuk mencari *pre-tension* masing-masing tali. Persamaan untuk menghitung *pre-tension* dapat dilihat pada persamaan di bawah ini:

$$F = (\rho_{sea} \pi D^2 \Delta T) / (16 \cos(\Theta)) \quad (4.7)$$

$$T_m = mg \quad (4.8)$$

Di mana:

$F$  = *Pre-tension* (Ton)  
 $\rho_{sea}$  = Massa jenis air laut (Ton/m<sup>3</sup>)  
 $\Delta T$  = Selisih sarat air struktur (m), dari pengukuran didapatkan sebesar 0.08 m  
 $D$  = *Outer diameter SPAR* (m)  
 $T_m$  = *Pre-tension* (KN)  
 $m$  = Massa (Ton)  
 $g$  = *Gravity* (m/s<sup>2</sup>)  
 $\theta$  = sudut antara tali tambat dan struktur. Dengan kedalaman kolam 2.5 m dan konfigurasi pada Gambar 3.5, didapatkan sudut  $\theta$  sebesar 30°.

Dari persamaan 4.4 nilai *pre-tension* dari model SPAR dapat didapatkan sebagaimana berikut:

$$F_{eksperimen} = \frac{1,025\pi(0.14^2)0,08}{16\cos(30)}$$

$$F_{eksperimen} = 0,000357 \text{ Ton}$$

Nilai *pre-tension* dari model SPAR eksperimen kemudian dikonversi ke dalam bentuk *full scale* dengan dikali faktor skala  $\lambda^3$ , sehingga didapat:

$$\begin{aligned}
 F_{full\ scale} &= F_{eksperimen} \times \lambda^3 \\
 &= 0,000357 \times (125^3) \\
 &= 696,815 \text{ Ton}
 \end{aligned}$$

Nilai *pre-tension* dalam satuan diubah menjadi kN dengan persamaan 4.8

$$T_m = 6835,759301 \text{ kN}$$

Sehingga nilai *pre-tension full scale* dalam kN adalah = 6835,759301 kN.

### 4.3 VALIDASI MODEL EKSPERIMEN DAN NUMERIS

Demi mendapatkan hasil yang merepresentasikan kondisi saat uji eksperimen dalam simulasi numeris pada perangkat MOSES dan ORCAFLEX 9.2A, maka validasi antara model eksperimen dan numeris perlu dilakukan. Parameter-parameter yang perlu divalidasi antara lain, dimensi utama SPAR dan distribusi massa SPAR. Selengkapnya mengenai parameter yang divalidasi tercantum pada Tabel 4.8.

**Tabel 4. 8** Validasi antara Model Eksperimen dan Model Numeris

Parameter	Satuan	Nilai Eksperimen ( <i>full scale</i> )	Nilai Numeris (MOSES)	Error	Nilai Numeris (ORCAFLEX)	Error
<i>Displacement</i>	Ton	31949,219	31967,04	0,056%	31949,219	0%
Diameter	m	17,5	17,5	0%	17,5	0%
Sarat	m	128,68	128,68	0%	128,68	0%
Tinggi	m	154,25	154,25	0%	154,25	0%
<i>Keel to Gravity</i>	m	57,125	57,125	0%	57,125	0%
Radius Girasi XX	m	68.75	68.75	0%	68.75	0%
Radius Girasi YY	m	68.75	68.75	0%	68.75	0%

#### 4.4 DATA DAN PROPERTI SECARA KESELURUHAN

Pada sub-bab ini, keseluruhan data yang digunakan untuk eksperimen maupun numeris akan ditampilkan pada Tabel 4.9. Data tersebut meliputi: SPAR, *heave plate*, dan tali tambat.

**Tabel 4. 9** Data dan Properti secara keseluruhan

Deskripsi	Satuan	<i>Full Scale</i>	Faktor Skala	<i>Scale Model</i>
Massa	Kg	31949218	$\lambda^3$	16,358
Diameter	m	17,5	$\lambda$	0,14
Sarat SPAR tanpa <i>heave plate</i>	<i>Free Floating</i>	m	$\lambda$	1,029
	<i>Moored</i>	m	$\lambda$	1,111
Sarat SPAR dengan <i>heave plate</i>	<i>Free Floating</i>	m	$\lambda$	1,034
	<i>Moored</i>	m	$\lambda$	1,116
Tinggi <i>Fairlead</i> diukur dari <i>keel</i> SPAR tanpa <i>heave plate</i> (m)	m	145,625	$\lambda$	1,165

Tinggi <i>Fairlead</i> diukur dari <i>keel</i> SPAR dengan <i>heave plate</i> (m)	m	146,25	$\lambda$	1,170
Tinggi	m	154,25	$\lambda$	1,234
<i>Keel to Gravity</i>	m	57,125	$\lambda$	0,457
Radius Girasi XX	m	68,75	$\lambda$	0,55
Radius Girasi YY	m	68,75	$\lambda$	0,55
<b><i>Mooring Line Properties</i></b>				
<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Full Scale</b>	<b>Faktor Skala</b>	<b>Scale Model</b>
<i>Axial Stiffness</i> (EA) Karet	MN	39,278	$\lambda^3$	2,011e-5
<i>Axial Stiffness</i> (EA) Wire Sling	MN	7075	$\lambda^3$	0,00353
<i>Pre-Tension</i>	kN	0,003575	$\lambda^3$	6981,813
<b><i>Heave Plate 1.3 Properties</i></b>				
<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Full Scale</b>	<b>Faktor Skala</b>	<b>Scale Model</b>
Diameter	m	22,75	$\lambda$	18,2
<i>Thickness</i>	m	0,05	$\lambda$	6,25
<b><i>Heave Plate 1.4 Properties</i></b>				
Diameter	m	24,5	$\lambda$	19,6
<i>Thickness</i>	m	0,05	$\lambda$	6,25
<b><i>Heave Plate 1.5 Properties</i></b>				
Diameter	m	26,25	$\lambda$	21
<i>Thickness</i>	m	0,05	$\lambda$	6,25

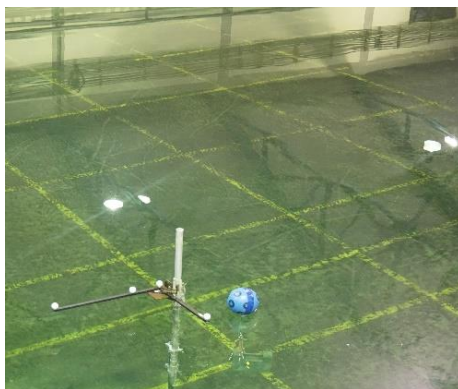
## 4.5 KALIBRASI INSTRUMEN PENGUKURAN

### 4.4.1 Kalibrasi Perangkat *Qualysis*

Pengukuran gerakan respon SPAR saat eksperimen, dilakukan dengan menggunakan perangkat *QUALYSIS*. Perangkat *QUALYSIS* dapat merekam gerakan respon dari SPAR pada koordinat x, y, dan z.

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada bab 3.2.5, perangkat *QUALYSIS* terdiri dari *motion capture camera*, *passive marker*, dan *calibration kit*. Untuk menangkap gerak respon SPAR, pertama-tama *passive marker* ditempelkan di batang besi *calibration kit*, kemudian posisi *calibration kit* diatur sampai posisi koordinat x,y, dan z dari marker sudah pada posisi 0 yang ditentukan. Posisi koordinat marker ditangkap oleh *motion capture camera*. Proses kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 4.16.





**Gambar 4. 16** Kalibrasi QUALYSIS

#### **4.4.2 Kalibrasi Gelombang**

Instrumen yang digunakan selanjutnya adalah *wave probe*. *Wave probe* digunakan untuk mengukur tinggi gelombang yang dibangkitkan pada saat uji eksperimen. Ketika gelombang dibangkitkan, *wave probe* digunakan untuk mengukur tinggi gelombang dan mengkalibrasi agar profil gelombang yang dibangkitkan sesuai dengan *input* pada ruang kontrol.



**Gambar 4. 17** Wave Probe

Profil gelombang yang digunakan pada tahap eksperimen akhir tugas ini dapat dilihat pada Tabel 4.10.

**Tabel 4. 10** Data Lingkungan pada eksperimen dan full scale

<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Full Scale</b>	<b>Faktor Skala</b>	<b>Scale Model (1:125)</b>
Teori Spektrum Gelombang	-	JONSWAP	-	JONSWAP
Hs	M	6,35	$\lambda$	0,0508
Tp	S	14,5	$\lambda^{1/2}$	1,297
$\gamma$	-	3,3	-	3,3
Heading Gelombang	Deg	0	-	0

Dari hasil perekaman tinggi gelombang oleh *wave probe*, didapatkan grafik *time history* gelombang. *Time history* kemudian dikonversi menjadi spektrum energy gelombang.

Menurut Djatmiko (2012), spektrum gelombang dalam gelombang acak, merupakan kurva yang merepresentasikan resultan dari energi gelombang-gelombang regular yang bersuperposisi membentuk karakteristik dari gelombang acak, dimana energy-energi gelombang yang diidentifikasi pada setiap unit atau satuan luas permukaannya adalah ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya. Untuk membuat spektrum gelombang, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah mentransformasi data elevasi gelombang dalam domain waktu (*time history*) menjadi domain frekuensi menggunakan *fast fourier transform* (FFT). Pada tugas akhir ini, transformasi dengan FFT dilakukan dengan MATLAB yang sudah memiliki fungsi FFT di dalamnya. Selanjutnya kurva spektrum gelombang dapat dibentuk dengan mengplot besar ordinat spektrum gelombang dengan frekuensi gelombang sebagai absis. Besaran ordinat spektrum gelombang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$S_{\zeta}(\omega) = \zeta_0^2 / 2\delta\omega \quad (4.8)$$

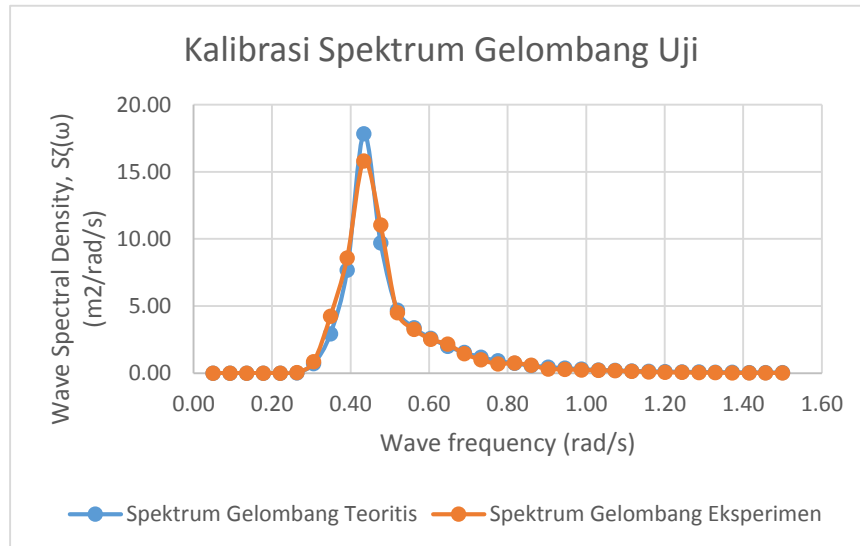
Keterangan:

$S_{\zeta}(\omega)$  = Ordinat spektrum gelombang ( $m^2/(\text{rad/s})$ )

$\delta\omega$  = frekuensi incremental ( $\text{rad/s}$ )

$\zeta_0$  = Amplitudo gelombang (m)

Spektrum gelombang yang digunakan untuk eksperimen kemudian divalidasi dengan spektrum gelombang teoritis. Perbandingan keduanya dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4. 18** Perbandingan antara spektrum gelombang teoritis dan eksperimen

Dari Gambar 4.18 dapat dilihat bahwasanya spektrum gelombang eksperimen berhimpit, dan mirip dengan spektrum gelombang hasil perhitungan teoritis. Hal ini menunjukkan gelombang uji yang dibangkitkan pada kolam MOB dapat dianggap mewakili profil gelombang yang sesuai dengan *input* di awal. Selain itu, spektrum gelombang juga dapat dicari parameter stokastiknya dengan persamaan berikut:

$$H_s = 4,00\sqrt{m_0} \quad (4.9)$$

Di mana:

$H_s$  = Tinggi gelombang signifikan (m)

$m_0$  = Luasan di bawah kurv spektrum atau disebut varians ( $m^2$ )

Kurva pada Gambar 4.18 dihitung luasannya, kemudian didapatkan nilai  $H_s$  sebagaimana pada tabel 4.11. Detail perhitungan validasi gelombang dapat dilihat pada Lampiran D.

**Tabel 4. 11** Validasi Kalibrasi Gelombang Uji

Parameter	Gelombang Teoritis	Gelombang Terukur	Error
Tinggi gelombang signifikan, $H_s$ (m)	6,35	6,39	0,63%

Dari Tabel 4.11, dapat dilihat bahwasanya nilai  $H_s$  yang divalidasi antara perhitungan gelombang teoritis dan gelombang terukur memiliki *error* 0,63%. Besaran *error* ini dapat diterima mengingat batas maksimal untuk *error* pada Tugas Akhir ini sebesar 5%.

#### **4.6 PERSIAPAN PENGOLAHAN DATA EKSPERIMEN**

Setelah melakukan uji eksperimen pada model SPAR, didapatkan data rekaman respon gerak yang berupa sinyal acak. Sinyal tersebut perlu ditransformasi menjadi kurva spektrum respon agar dapat dicari parameter stokastiknya. Untuk melakukan transformasi perlu beberapa persiapan yang harus dilakukan terlebih dahulu.

Pertama-tama, rekaman sinyal dibagi menjadi segmen-segmen, yang selanjutnya pada segmen-segmen tersebut ditetapkan sejumlah titik data dengan jumlah yang sama, sesuai interval pengukuran. Titik-titik yang dibaca adalah elevasi. Selanjutnya ditentukan juga frekuensi *incremental* dan rentang frekuensi, atau dikenal *Nyquist frequency* (Djarmiko, 2012). Pada tugas akhir ini *nyquist frequency* yang digunakan adalah 50.

Setelah rekaman sinyal dibagi menjadi segmen-segmen, selanjutnya proses FFT dapat dilakukan secara numerik dengan *software* MATLAB. Hasil yang diperoleh dari proses FFT masih perlu diolah karena bentuk kurva yang belum halus, masih banyak berfluktuasi. Proses pengolahan pertama yaitu penghalusan atau *smoothing* disebut dengan *spectral window*. Proses ini dilakukan untuk menghilangkan *noise* yang terdapat pada kurva spektra. Selanjutnya, pengolahan kedua adalah penyaringan atau *filtering*, yang berguna untuk mengeliminasi komponen-komponen menjadi efek komplementer terhadap spektra. Selengkapannya mengenai algoritma proses FFT di MATLAB dapat dilihat pada Lampiran B,

#### **4.7 ANALISIS HASIL EKSPERIMEN**

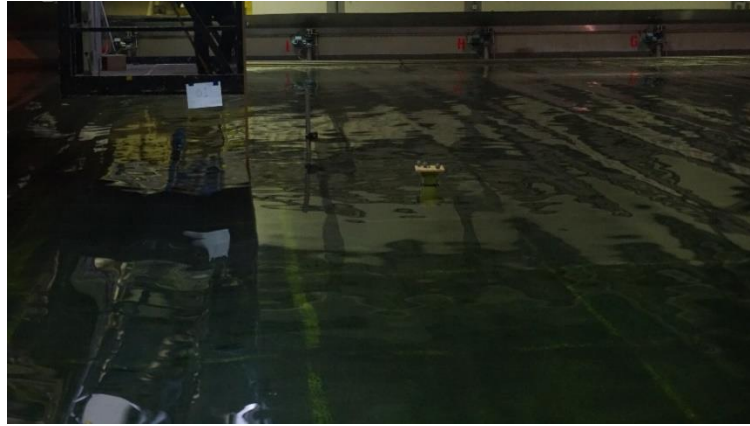
Uji eksperimen model SPAR dilakukan pada fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH)-BPPT. Dimensi dari MOB dapat dilihat pada Tabel 3.3.

SPAR ditambah dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.19. Eksperimen dilakukan dalam beberapa skenario sebagaimana berikut:

1. SPAR tanpa *Heave Plate*
2. SPAR dengan pemasangan *Heave Plate* 1,3

3. SPAR dengan pemasangan *Heave Plate* 1,4
4. SPAR dengan pemasangan *Heave Plate* 1,5

Skenario uji eksperimen di atas dilakukan dengan durasi selama 6 menit untuk masing-masing skenario.

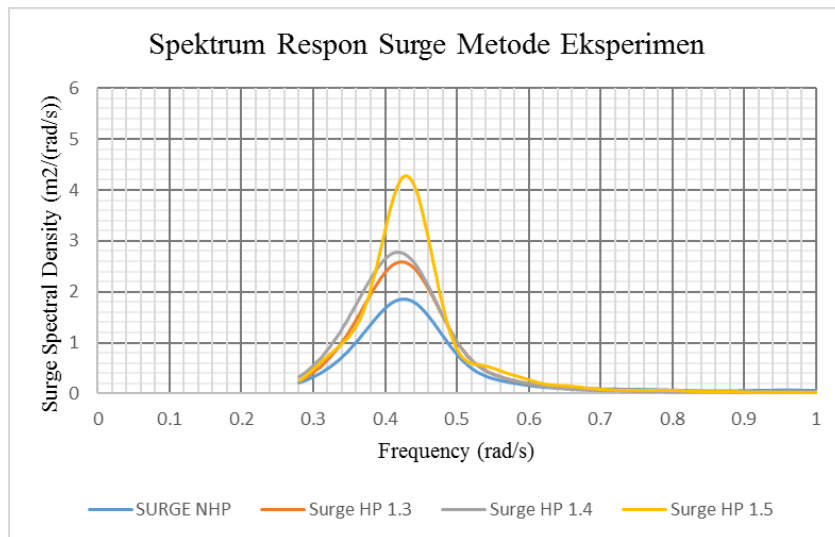


**Gambar 4. 19** Potret Kondisi saat Pengujian

Dalam uji eksperimen, terdapat 2 data yang perlu diamati. Data pertama adalah data karakteristik gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker*. Sebagaimana yang telah dibahas pada sub-bab 4.4.2, gelombang yang dibangkitkan kemudian dikalibrasi agar sesuai dengan input gelombang yang diinginkan. Data kedua adalah data respon gerak SPAR dalam 6 mode gerak. Namun, pada tugas akhir kali ini respon yang diamati hanya pada mode *surge*, *heave*, dan *pitch*. Hasil pengamatan dari kedua data tersebut berupa *time history*, yang selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran C.

#### **4.7.1 Mode Gerak *Surge***

Pada tahap ini, spektrum respon SPAR pada gerak *surge* dianalisis. Sama halnya seperti spektrum gelombang, spektrum respon SPAR didapat dengan cara mentransformasi *time history* gerak SPAR menjadi spektrum respon. Spektrum respon gerak *surge*, pada setiap kondisi pemasangan variasi *heave plate*, dapat dilihat pada Gambar 4.20.



**Gambar 4. 20** Kurva Spektrum Gerak Surge Variasi Pemasangan *Heave Plate* Metode Eksperimen

Dari spektrum respon gerak *surge* kemudian dicari parameter stokastiknya, dengan cara menghitung luasan di bawah kurva spektrum. Parameter-parameter stokastik yang dicari adalah sebagaimana berikut:

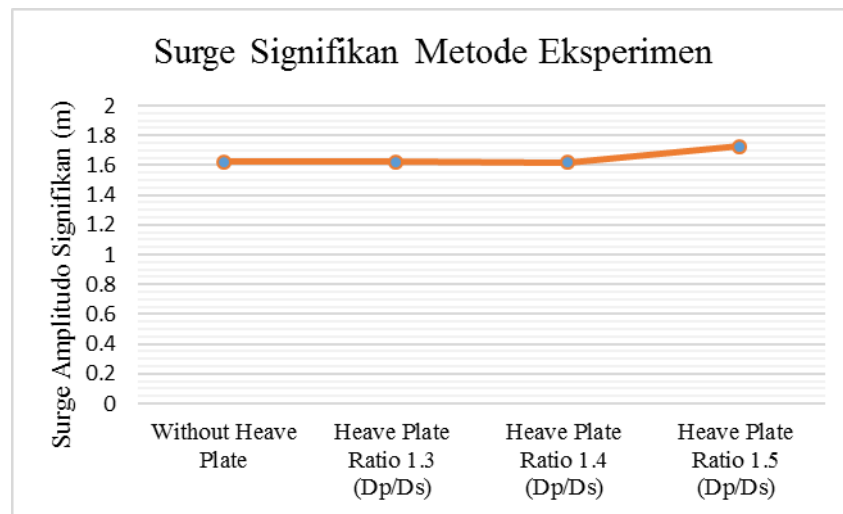
**Tabel 4. 12** Parameter Stokastik Gerak *Surge* SPAR Metode Eksperimen

PARAMETER STOKASTIK	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
	<b><i>Surge Response Experimental Method</i></b>			
m0	0,658	0,660	0,655	0,745
m1	2,220	1,799	1,503	1,525
m2	17,402	14,194	11,306	10,886
m4	1874,559	1553,556	1227,213	1173,093
Significant Amplitude Response (m)	1,622	1,625	1,619	1,727
Average Amplitude Response (m)	1,014	1,016	1,033	1,079
1/10 Amplitude Response (m)	2,060	2,063	2,056	2,193
the most probable extreme amplitude responses (m)	3,458	3,443	3,409	3,620
the most probable extreme amplitude response with 0.99 confidence (m)	4,245	4,235	4,202	4,468

Parameter stokastik yang menjadi bahasan utama dalam tugas akhir ini adalah *significant amplitude responses*. Nilai *surge significant amplitude responses* ini yang kemudian dibandingkan nilainya. Tabel dan grafik perbandingan dari nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan Gambar 4.21.

**Tabel 4. 13** *Surge Significant Amplitude Responses* Metode Eksperimen

	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
<i>Surge significant amplitude (m)</i>	1,622	1,625	1,619	1,727
Reduksi (%)	0	0,154	-0,213	6,444

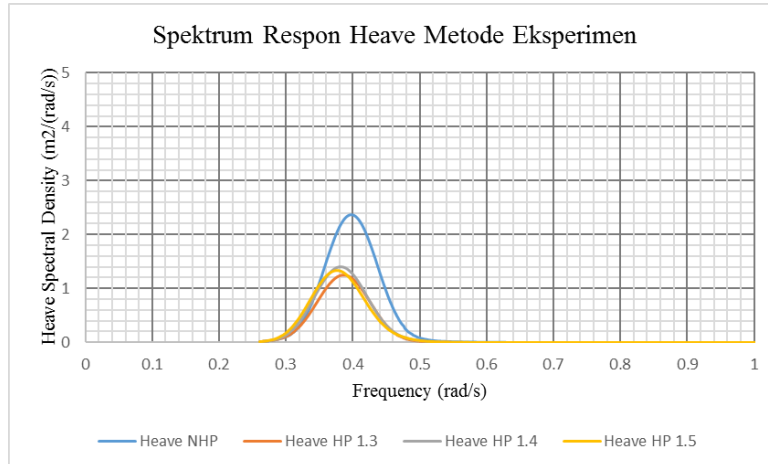


**Gambar 4. 21** Grafik Surge Signifikan

Pada variasi SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio Dp/Ds 1.3, nilai amplitudo *surge* signifikan mengalami sedikit kenaikan sebesar 0,154% apabila dibandingkan dengan amplitudo *surge* signifikan SPAR tanpa *heave plate*. Adapun ketika SPAR dipasang *heave plate* rasio Dp/Ds 1.4, nilai amplitudo *surge* signifikan turun sebesar -0,213% terhadap pembanding yang sama. Selanjutnya, untuk variasi SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio Dp/Ds 1.5, nilai amplitudo *surge* signifikan kembali mengalami kenaikan sebesar 6,444% terhadap amplitudo *surge* signifikan SPAR tanpa *heave plate*. Dari fenomena yang telah didapat tersebut, dapat disimpulkan bahwasanya penggunaan *heave plate* secara keseluruhan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap respon gerak signifikan dari *surge*. Hal ini dikarenakan perubahan nilai reduksi pada setiap variasi penggunaan *heave plate* cenderung bernilai kecil.

#### 4.7.2 Mode Gerak *Heave*

Mode gerak yang dibahas selanjutnya adalah mode gerak *heave*. *Time history* yang didapat dari uji eksperimen ditransformasi menjadi spektrum respon gerak menggunakan FFT. Spektrum respon *heave*, pada setiap kondisi pemasangan variasi *heave plate*, dapat dilihat pada Gambar 4.22.



**Gambar 4. 22** Kurva Spektrum Gerak Heave SPAR pada semua Kondisi Pemasangan *Heave Plate*

Luasan di bawah kurva spektrum dipakai dalam perhitungan mencari nilai-nilai stokastik seperti pada Tabel 4.14.

**Tabel 4. 14** Parameter Stokastik Gerak *Heave* SPAR Metode Eksperimen

PARAMETER STOKASTIK	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
	<b><i>Heave Response Experimental Method</i></b>			
m0	0,234	0,124	0,139	0,135
m1	0,097	0,049	0,054	0,052
m2	0,067	0,025	0,029	0,029
m4	3,209	0,727	0,905	1,007
Significant Amplitude Response (m)	0.968	0.706	0.745	0.734
Average Amplitude Response (m)	0.605	0.441	0.466	0.459
1/10 Amplitude Response (m)	1.230	0.896	0.947	0.932
the most probable extreme amplitude responses (m)	1.788	1.286	1.360	1.341
the most probable extreme amplitude response with 0.99 confidence (m)	2.314	1.674	1.769	1.743

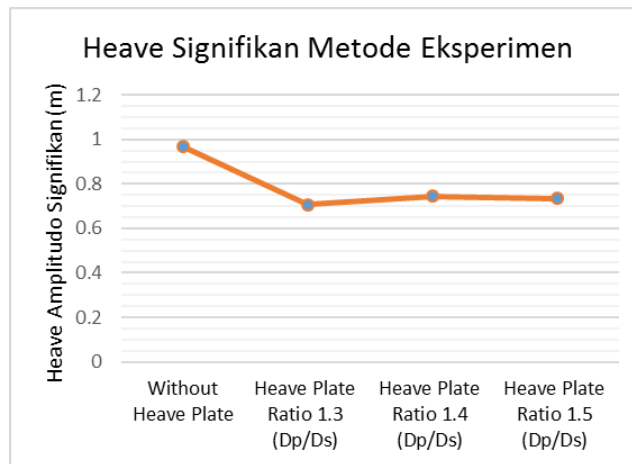


Sebagaimana yang dilakukan pada analisis mode gerak *surge*, parameter *heave significant responses* adalah bahasan utama pada tugas akhir ini. Parameter tersebut kemudian dibandingkan sebagaimana pada Tabel 4.15 di bawah ini:

**Tabel 4. 15 Heave Significant Responses**

	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
<i>Heave significant amplitude</i> (m)	0,968	0,706	0,745	0,734
Reduksi (%)	0,000	-27,122	-23,020	-24,200

Grafik dan Tabel di atas menunjukkan besaran *heave* signifikan pada SPAR



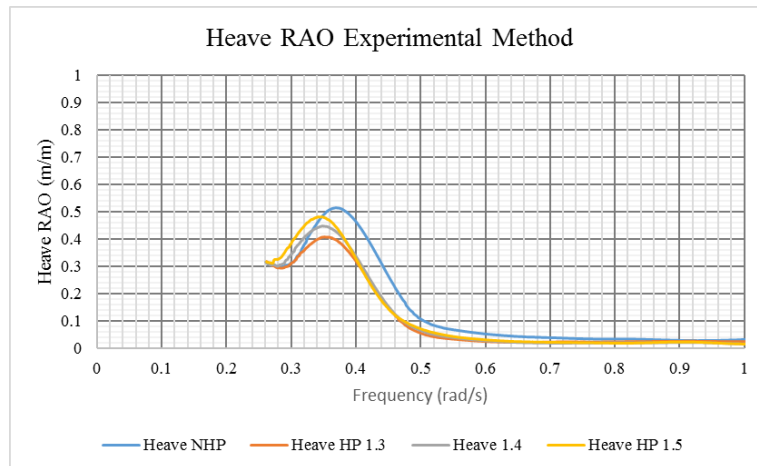
**Gambar 4. 20** Grafik Heave Signifikan

tanpa *heave plate* dan dengan variasi pemasangan diameter *heave plate*. Saat SPAR dipasang dengan *heave plate* yang mempunyai rasio diameter (Dp/Ds) 1,3, *heave* signifikan dari *heave* mengalami penurunan sebesar -27,122% terhadap *heave* signifikan SPAR tanpa *heave plate*. Ketika SPAR dipasang dengan *heave plate* 1,4, *heave* signifikan SPAR mengalami sedikit penurunan sebesar -23,020% dibandingkan dengan *heave* signifikan SPAR tanpa pemasangan *heave plate*. Adapun ketika dipasang *heave plate* 1,5, *heave* signifikan mengalami penurunan sebesar -24,200% terhadap *heave* signifikan SPAR tanpa *heave plate*.

Dari penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwasanya pemasangan *heave plate* 1,3 adalah yang paling optimal dalam mengurangi *heave* signifikan *heave* dalam studi eksperimen. Pengaruh perubahan diameter ini juga telah dilakukan oleh Subbulakshmi (2016), dalam jurnalnya disebutkan bahwasanya redaman *heave* dan periode natural *heave* dari SPAR bertambah seiring dengan bertambah besarnya

rasio diameter *heave plate*. Masih dalam penelitian Subbulakshmi, diameter rasio *heave plate* yang paling optimum dalam mengurangi respon gerak *heave* adalah berada diantara rasio  $D_p/D_s$  1.2 dan 1.4.

Selain itu, fenomena mengenai redaman *heave* dan periode natural *heave* dari SPAR juga dapat dilihat dari kurva *Response Amplitude Operator* (RAO). Kurva RAO seluruh variasi pemasangan *heave plate* dibandingkan pada Gambar 4.24.

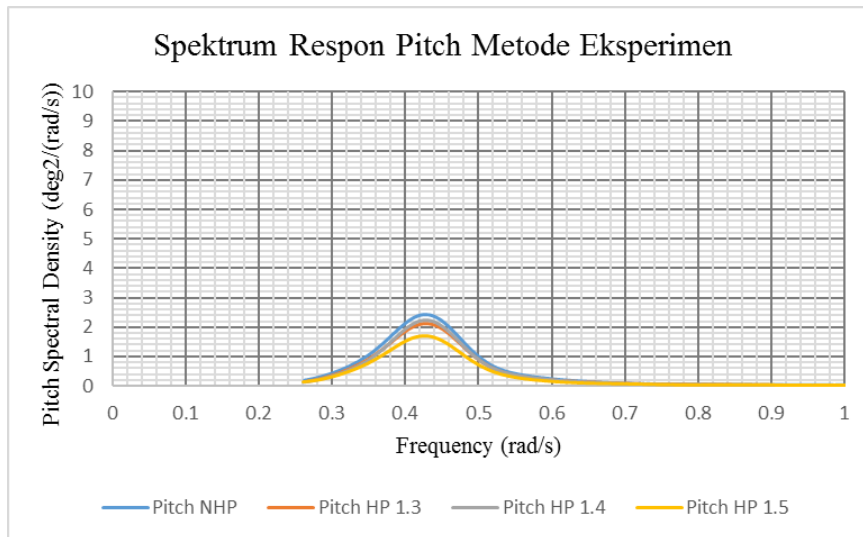


**Gambar 4. 23** Kurva RAO *Heave* SPAR pada semua Kondisi Pemasangan *Heave Plate* Metode Eksperimen

Dari kurva RAO pada Gambar 4.24, pengaruh diameter rasio *heave plate* terhadap kenaikan periode natural dapat dijelaskan dengan fenomena semakin bergesernya puncak kurva RAO ke arah frekuensi rendah atau periode yang besar, seiring dengan bertambahnya rasio diameter *heave plate* ( $D_p/D_s$ ). Adapun argumen mengenai rasio diameter ( $D_p/D_s$ ) yang optimum dalam mengurangi redaman adalah di antara 1.2 dan 1.4, dapat dijelaskan dengan bukti bahwasanya puncak kurva RAO yang paling rendah pada Gambar 4.24 adalah ketika SPAR dipasangi *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3.

#### 4.7.3 Mode Gerak *Pitch*

Analisa eksperimen selanjutnya dilakukan pada mode gerak *pitch*. Rekaman data atau *time history* pada gerakan *pitch* didapatkan dari uji eksperimen model SPAR. *Time history* kemudian ditransformasikan menjadi spektrum respon dengan menggunakan metode FFT. Spektrum respon dapat dilihat pada Gambar 4.25.



**Gambar 4. 25** Kurva Spektrum Gerak *Pitch* SPAR pada semua Kondisi Pemasangan *Heave Plate*

Untuk membuat perbandingan pengaruh dari penggunaan *heave plate*, spektrum respon tidak dapat digunakan secara langsung. Oleh karena itu, spektrum respon perlu dihitung parameter stokastiknya. Menghitung parameter stokastik dapat dilakukan dengan persamaan-persamaan yang terdapat pada bab 2.2.6. Parameter-parameter stokastik yang dihitung dalam tugas akhir ini selengkapnya terdapat pada Tabel 4. 16.

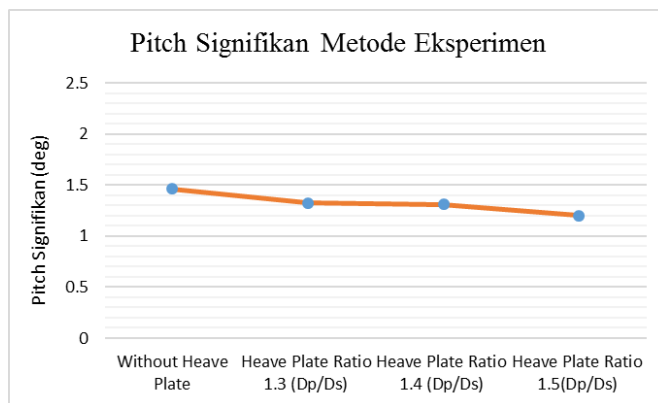
**Tabel 4. 16** Parameter Stokastik Gerak *Pitch* SPAR Metode Eksperimen

PARAMETER STOKASTIK	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
	<b><i>Pitch Response Experimental Method</i></b>			
m0	0,533	0,436	0,428	0,362
m1	0,997	0,788	0,675	0,625
m2	6,958	5,666	4,556	4,255
m4	746,094	620,919	649,382	454,656
Significant Amplitude Response (deg)	1,462	1,322	1,309	1,203
Average Amplitude Response (deg)	0,914	0,826	0,818	0,752
1/10 Amplitude Response (deg)	1,857	1,679	1,663	1,528
the most probable extreme amplitude responses (deg)	3,056	2,763	2,720	2,506
the most probable extreme amplitude response with 0.99 confidence (deg)	3,777	3,414	3,368	3,101

Parameter stokastik yang menjadi perhatian utama adalah *pitch* signifikan. Parameter inilah yang dapat digunakan sebagai perbandingan sebagaimana Tabel 4.17.

**Tabel 4. 17** Pitch Signifikan

	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5(Dp/Ds)
<i>Pitch Significant Amplitude</i> (deg)	1,462	1,322	1,309	1,203
Reduksi (%)	0,000	-9,591	-10,489	-17,747



**Gambar 4. 26** Grafik *Pitch* Signifikan

Pada mode gerak *pitch*, secara keseluruhan penggunaan variasi *heave plate* mempunyai pengaruh dalam penurunan nilai stokastik dari spektrum respon. SPAR dengan *heave plate* 1,3 mempunyai penurunan *pitch* signifikan sebesar -9,591% apabila dibandingkan dengan SPAR tanpa *heave plate*. Pada saat SPAR dipasang dengan *heave plate* 1,4 nilai *pitch* signifikan mengalami penurunan -10,489%. Sedangkan ketika SPAR dipasang *heave plate* 1,5, penurunan nilai *pitch* signifikannya menjadi -17,747%. Dari ketiga fenomena tersebut, dapat disimpulkan bahwasanya *heave plate* 1,3 menjadi yang paling optimal dalam mengurangi respon gerak *pitch*.

## 4.8 ANALISIS HASIL NUMERIS

### 4.8.1 Analisis Hidrodinamika menggunakan MOSES

Pada tugas akhir ini, analisis numeris dilakukan dengan bantuan 2 perangkat, yaitu MOSES dan ORCAFLEX 9.2A. Analisis dalam MOSES menggunakan *frequency domain analysis*. Analisis *frequency domain* pada dasarnya adalah untuk menghasilkan fungsi transformasi atau disebut *response amplitude operator* (RAO)

untuk gaya eksitasi yang dependen terhadap frekuensi, massa tambah, dan kekakuan.

Langkah awal yang dilakukan adalah memodelkan SPAR sebagai silinder yang kemudian dianalisis dengan menggunakan teori 3D *diffraction*. Teori ini merupakan metode untuk menghitung aliran (*potential*) di sekitar lambung struktur, yang didasarkan pada teorema integral Green (Journée & Massie, 2001). Teorema ini memungkinkan kita untuk mentransformasikan persamaan Laplace 3-dimensional menjadi persamaan *surface integral*, yang biasa disebut dengan identitas Green. Untuk menyelesaikan persamaan ini, permukaan *body* dari SPAR dibagi kedalam panel-panel yang kecil atau biasa disebut meshing seperti pada Gambar 4.6.

Setelah analisa *frequency domain* telah dilakukan oleh MOSES, langkah selanjutnya adalah memilah dan memilih data-data *output* dari MOSES yang akan digunakan sebagai *input* dalam ORCAFLEX 9.2A. Data-data tersebut meliputi, *load RAOs*, matriks *added mass*, dan matriks *damping*.

*Load RAOs* dapat didapatkan dalam file out00001.txt pada MOSES. Nilai dari *load RAOs* adalah sama dengan nilai yang terdapat pada bagian *panel wave frequency* di *output* MOSES.

```

+++ PANEL WAVE FREQUENCY FORCES FOR SPAR +++
-----
                Pressure Name = SPAR           Heading = 0.00
                Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified
-----
  ENCOUNTER  Surge Force /  Sway Force /  Heave Force /  Roll Moment /  Pitch Moment /  Yaw Moment /
             Wave Ampl.    Wave Ampl.    Wave Ampl.    Wave Ampl.    Wave Ampl.    Wave Ampl.
-----
  Frequency  Period  /-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/
  -(Rad/Sec)-  -(Sec)-  /-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/ /-----/
             Ampl. Phase / Ampl. Phase / Ampl. Phase / Ampl. Phase / Ampl. Phase / Ampl. Phase
-----
    0.2094   30.00   2528  -89     0    0     1292  0     1  -176   194203  -89     0    0
    0.2108   29.80   2545  -89     0    0     1279  0     2  -177   195747  -89     0    0
    0.2123   29.60   2563  -89     0    0     1267  0     0    0     197318  -89     0    0
    0.2137   29.40   2580  -89     0    0     1254  0     1  -176   198916  -89     0    0
    0.2152   29.20   2598  -89     0    0     1241  0     1  -174   200542  -89     0    0
    0.2167   29.00   2615  -89     0    0     1228  0     0    0     202196  -89     0    0
    0.2182   28.80   2634  -89     0    0     1215  0     1  -176   203880  -89     0    0
    0.2197   28.60   2652  -89     0    0     1201  0     1  -175   205595  -89     0    0
-----

```

**Gambar 4. 27** Panel Wave Frequency pada output MOSES

Data lainnya yang akan digunakan adalah matriks massa tambah dan matriks kekakuan. Kedua matriks tersebut berbentuk 6x6, dan didapatkan dari file ppo00001. Matriks yang dikeluarkan oleh MOSES telah diskalakan dengan massa. Namun, karena format dalam ORCAFLEX membutuhkan data *non-normalized*, maka untuk memasukkan matriks ke dalam ORCAFLEX, matriks perlu dikali kembali dengan faktor skala, yaitu massa. Nilai matriks massa tambah dan

kekakuan yang didapat dari perhitungan MOSES, bervariasi berdasarkan domain frekuensi atau periode. Adapun, matriks yang dipakai pada tugas akhir kali ini, adalah matriks pada periode puncak dari gelombang, yaitu sebesar 14,5 s. Matriks tercantum sebagaimana pada Gambar 4.28.

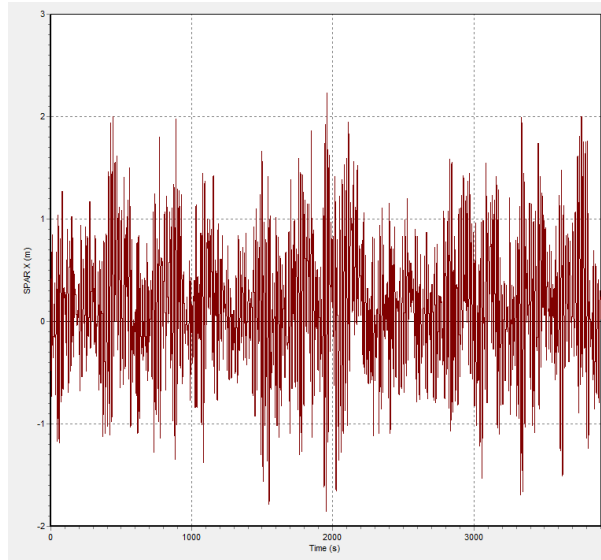
Frequency	0.4333	Period	14.5000			
<b>Added Mass</b>						
9.26122E-01	7.29158E-07	-2.86547E-06	-9.40423E-06	1.53180E+01	8.24243E-07	
-8.49215E-07	9.26122E-01	1.14882E-07	-1.53179E+01	-2.12226E-05	-9.65255E-06	
1.00704E-05	1.10992E-06	1.08968E-01	-9.17323E-06	2.08228E-04	4.76644E-07	
-9.40423E-06	-1.53179E+01	-9.17323E-06	1.77512E+03	5.25750E-03	2.46267E-04	
1.53180E+01	-2.12226E-05	2.08228E-04	-3.21651E-03	1.77512E+03	4.75848E-05	
8.24243E-07	-9.65255E-06	4.76644E-07	2.46169E-04	4.89433E-05	1.27108E-09	
<b>Damping</b>						
6.88355E-02	5.60098E-09	-6.50388E-09	1.06579E-06	-2.65150E+00	1.05496E-07	
-1.62412E-08	6.82473E-02	-6.41086E-10	2.61818E+00	-1.28490E-06	-5.62208E-07	
8.01659E-08	8.70565E-09	1.95180E-03	1.24780E-07	2.61017E-07	6.63708E-09	
1.06579E-06	2.61818E+00	1.24780E-07	4.95081E+02	8.43323E-05	-1.71277E-05	
-2.65150E+00	-1.28490E-06	2.61017E-07	-1.09258E-04	4.99939E+02	-4.22371E-06	
1.05496E-07	-5.62208E-07	6.63708E-09	-1.71466E-05	-4.17115E-06	4.51990E-08	

**Gambar 4. 28** Matriks massa tambah dan kekakuan

#### 4.8.2 Simulasi Numeris *Time Domain* pada ORCAFLEX 9.2A

Dalam menjalankan simulasi *time domain*, ORCAFLEX 9.2A pada dasarnya menggunakan persamaan gerak sebagaimana yang tercantum pada persamaan 2.12 dan sub-bab 2.2.4. ORCAFLEX 9.2A. Durasi simulasi yang digunakan sebesar 4020 detik dengan skema implisit, dan *time step* sebesar 0,2 detik.

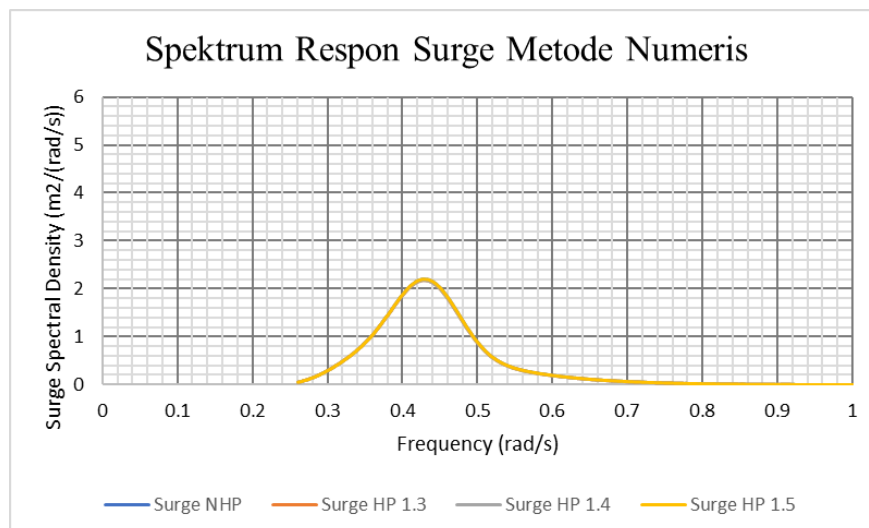
Persamaan gerak dari struktur akan dihitung pada setiap detik daripada *time step*. Hasil perhitungan dari ORCAFLEX adalah berupa *time history* sesuai dengan durasi simulasi yang telah diatur. Setiap mode gerak beserta elevasi gelombang memiliki *time history*-nya masing-masing. Contoh daripada *time history* dari simulasi *time domain* terdapat pada Gambar 4.29, adapun *time history* elevasi gelombang, mode *surge*, *heave*, dan *pitch* secara lengkap dapat dilihat pada lampiran E.



**Gambar 4. 32** Time history mode gerak surge hasil simulasi numeris

#### 4.8.3 Mode Gerak Surge

Pada bab ini nilai-nilai stokastik dari mode gerak surge akan ditampilkan. Untuk mendapatkan nilai stokastik, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah mentransformasikan *time history* menjadi spektrum respon gerak seperti pada Gambar 4.30. Dari spektrum respon kemudian dihitung nilai-nilai stokastiknya. Langkah ini adalah sama dengan yang dilakukan pada analisis eksperimen.



**Gambar 4. 30** Kurva spektrum respon surge SPAR pada semua variasi pemasangan heave plate

Pada dasarnya korelasi antara spektrum respon dengan parameter stokastik adalah bahwasanya luasan di bawah kurva spektrum dapat digunakan untuk menghitung nilai-nilai stokastik. Parameter-parameter stokastik yang dicari selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 4.18.

**Tabel 4. 18** Parameter Stokastik Gerak Surge SPAR Metode Numeris

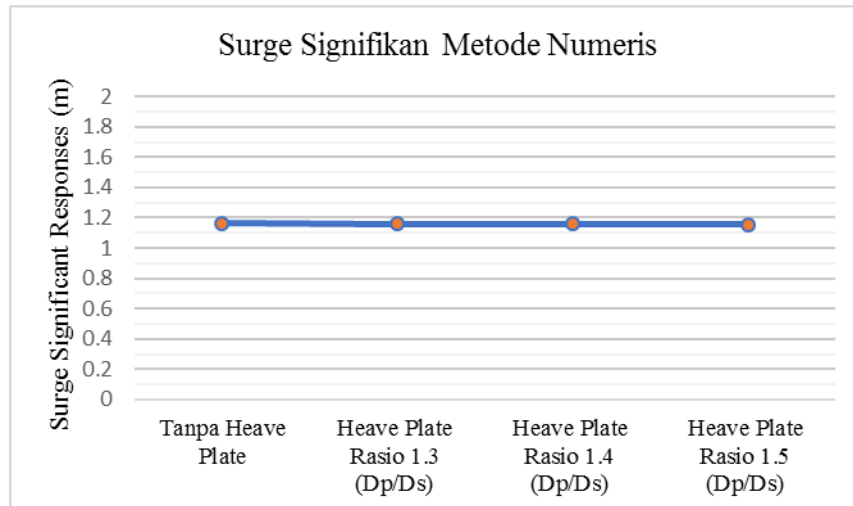
PARAMETER STOKASTIK	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
	<i>Surge Response</i>			
m0	0,339	0,335	0,337	0,333
m1	0,151	0,148	0,149	0,148
m2	0,079	0,071	0,070	0,069
m4	97,941	29,682	11,123	10,481
<i>Significant Amplitude Response (m)</i>	1,164	1,158	1,161	1,155
<i>Average Amplitude Response (m)</i>	0,728	0,723	0,725	0,722
<i>1/10 Amplitude Response (m)</i>	1,479	1,470	1,474	1,466
<i>the most probable extreme amplitude responses (m)</i>	2,134	2,115	2,118	2,107
<i>the most probable extreme amplitude response with 0.99 confidence (m)</i>	2,771	2,749	2,755	2,740

Parameter stokastik yang menjadi fokus utama untuk dianalisis adalah parameter *significant responses* (Hs). Seluruh nilai Hs dari respon gerak *surge* dibandingkan dan dihitung besaran reduksi Hs-nya pada 4 kondisi variasi diameter *heave plate*. Tabel beserta grafik perbandingan nilai Hs dari *surge* adalah sebagaimana berikut:

**Tabel 4. 19** Perbandingan *surge significant responses*

	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
<i>Surge Significant Amplitude (m)</i>	1,164	1,158	1,161	1,155
Reduksi (%)	0,000	-0,583	-0,312	-0,838





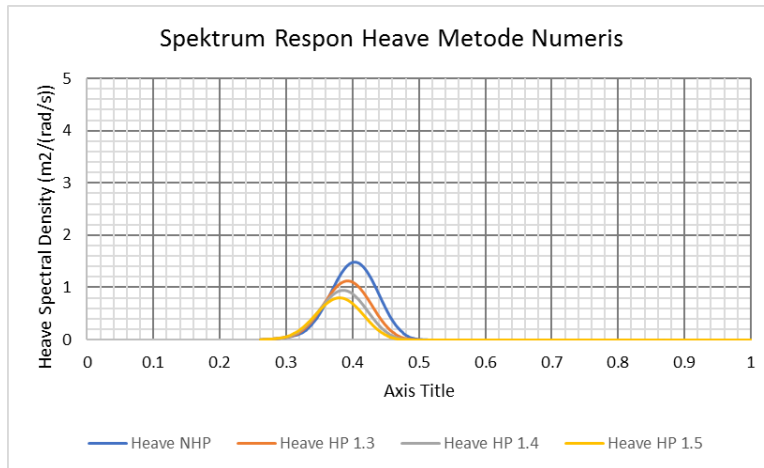
**Gambar 4. 31** Grafik *surge significant responses*

Dari Tabel dan grafik di atas, nilai reduksi didapat dengan membandingkan  $H_s$  yang didapat dari masing-masing variasi diameter *heave plate* dengan  $H_s$  pada saat SPAR tidak dipasang *heave plate*. Pada SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3 reduksi yang terjadi hanya sebesar -0,583%. Reduksi yang tidak jauh berbeda juga didapatkan ketika SPAR dipasang *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.4, reduksi yang didapat bernilai -0,312%. Adapun pada SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5, reduksi yang didapat sebesar -0,838%.

Dari keseluruhan fenomena mengenai reduksi yang didapat pada setiap variasi *heave plate* rasio, dapat disimpulkan bahwasanya secara analisis numeris, penggunaan *heave plate* dengan variasi rasio  $D_p/D_s$  tidak cukup signifikan dalam mengurangi respon gerak *surge* dari SPAR.

#### 4.8.4 Mode Gerak *Heave*

Selanjutnya, mode gerak yang dianalisis adalah *heave*. Langkah-langkah dalam mendapatkan nilai-nilai stokastik dari gerak *heave* SPAR adalah sama dengan yang telah dilakukan pada mode gerak *surge*. Pertama-tama, *time history* ditransformasikan menjadi spektrum respon *heave* sebagaimana pada Gambar 4.32.



**Gambar 4. 32** Kurva spektrum respon *heave* SPAR pada semua variasi pemasangan *heave plate*

Luasan dari masing-masing kurva kemudian dihitung untuk mendapatkan nilai-nilai stokastik dari respon gerak struktur. Parameter-parameter stokastik yang digunakan adalah sebagaimana Tabel 4.20.

**Tabel 4. 20** Parameter Stokastik Gerak Heave SPAR Metode Numeris

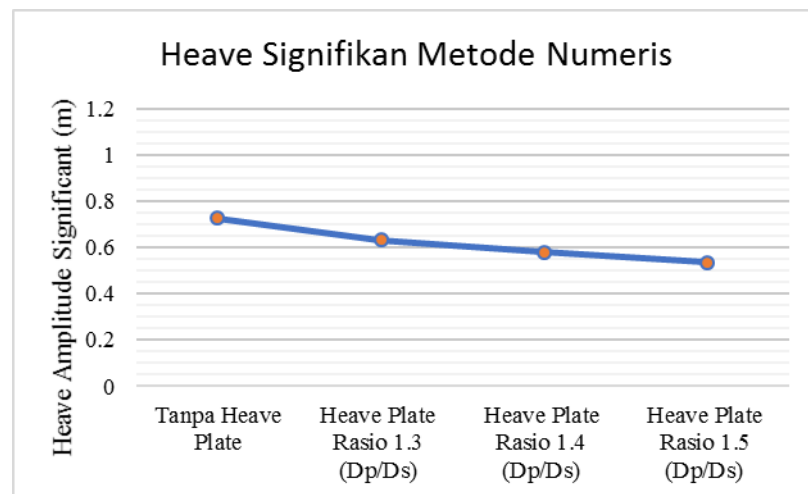
PARAMETER STOKASTIK	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
	<b><i>Heave Response</i></b>			
m0	0,132	0,100	0,084	0,072
m1	0,053	0,039	0,032	0,027
m2	0,022	0,016	0,013	0,011
m4	1,811	2,425	1,432	6,569
<i>Significant Amplitude Response (m)</i>	0,727	0,634	0,580	0,535
<i>Average Amplitude Response (m)</i>	0,455	0,396	0,362	0,335
<i>1/10 Amplitude Response (m)</i>	0,924	0,805	0,737	0,680
<i>the most probable extreme amplitude responses (m)</i>	1,316	1,144	1,046	0,967
<i>the most probable extreme amplitude response with 0.99 confidence (m)</i>	1,718	1,495	1,367	1,263

Selanjutnya, nilai *significant responses* dari gerak *heave* SPAR dari semua variasi pemasangan *heave plate* dibandingkan. *Amplitude significant responses* inilah yang menjadi fokus utama pada tugas akhir ini. Tabel dan grafik

perbandingan *heave significant responses* dapat dilihat pada Tabel 4.20, serta Gambar 4.33.

**Tabel 4. 21** Perbandingan *heave significant responses*

	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
<i>Heave Significant Amplitude</i> (m)	0,727	0,634	0,580	0,535
Reduksi (%)	0.000	-12,910	-20,269	-26,390



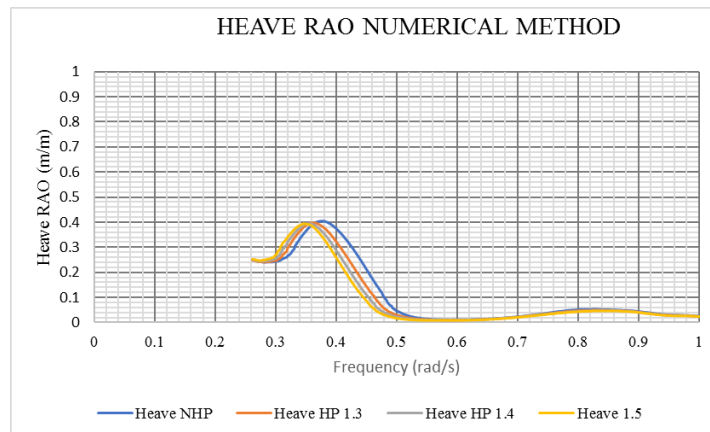
Sebagain **Gambar 4. 33** Grafik *heave significant responses* SPAR

dipasang dengan *heave plate* yang mempunyai rasio diameter (Dp/Ds) 1,3, amplitudo *heave* signifikan dari *heave* mengalami penurunan sebesar -12,910% terhadap amplitudo *heave* signifikan SPAR tanpa *heave plate*. Ketika SPAR dipasang dengan *heave plate* 1,4, amplitudo *heave* signifikan SPAR mengalami penurunan sebesar -20,269% dibandingkan dengan *heave* signifikan SPAR tanpa pemasangan *heave plate*. Adapun ketika dipasang *heave plate* 1,5, amplitudo *heave* signifikan mengalami penurunan sebesar -26,390% terhadap amplitudo *heave* signifikan SPAR tanpa *heave plate*.

Dari fenomena nilai reduksi yang telah didapat, dapat disimpulkan bahwasanya penurunan *heave* signifikan yang paling besar terjadi ketika SPAR dipasangi *heave plate* rasio Dp/Ds 1.3. Untuk *heave plate* rasio Dp/Ds yang lebih besar dari 1.3, reduksi dari *heave* signifikan menjadi tidak terlalu signifikan. Kenaikan daripada

diameter *heave plate* memang meningkatkan besaran massa tambah, namun kenaikan redaman *heave* menjadi minimum (Sudhakar & Nallayarasu, 2011).

Penjelasan tambahan mengenai respon gerak *heave* juga bisa didapatkan dengan menganalisis kurva *Response Amplitude Operator* (RAO) gerak *heave* dari SPAR. Kurva RAO dapat dilihat pada Gambar 4.34.

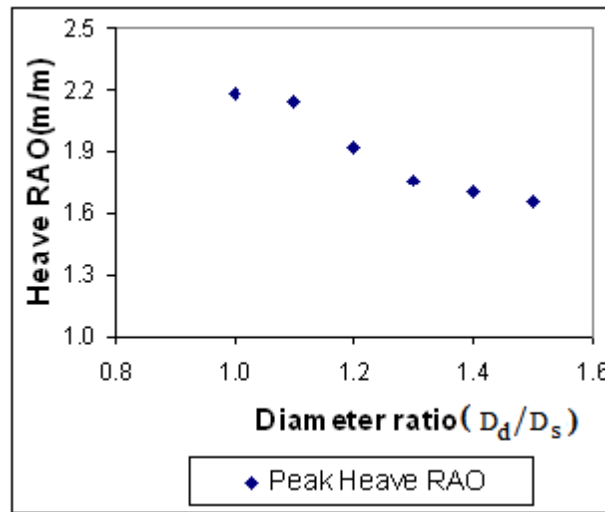


**Gambar 4. 34** Kurva RAO *Heave* SPAR pada semua Kondisi Pemasangan *Heave Plate* Metode Numeris

Kurva RAO pada Gambar 4.34 menjelaskan bahwasanya kenaikan *added mass* daripada SPAR dapat berpengaruh pada kenaikan periode natural *heave* SPAR. Seiring dengan kenaikan ukuran rasio  $D_p/D_s$  dari *heave plate*, periode natural SPAR juga mengalami kenaikan, hal ini ditunjukkan dengan bergesernya puncak kurva RAO *heave* ke arah frekuensi yang lebih rendah atau periode yang lebih tinggi. Adapun pengaruh ukuran rasio  $D_p/D_s$  dari *heave plate* terhadap redaman *heave* SPAR juga dapat ditangkap dari fenomena menurunnya puncak RAO *heave* seiring dengan kenaikan ukuran rasio  $D_p/D_s$  dari *heave plate*, namun penurunan yang paling signifikan hanya terjadi pada variasi ukuran rasio  $D_p/D_s$  1.3 dari *heave plate*.

Trend besaran puncak RAO pada Gambar 4.34 juga didukung oleh penelitian yang telah dilakukan oleh Sudhakar dan Nallarayasu pada tahun 2011. Keduanya melakukan investigasi hampir serupa yaitu pengaruh variasi diameter ratio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) terhadap respon hidrodinamis pada SPAR dalam domain frekuensi. Dengan memakai variasi  $D_p/D_s$  1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, dan 1.5, ditemukan bahwasanya puncak RAO *heave* memiliki trend yang menurun, namun penurunan yang signifikan terjadi hanya sampai variasi diameter ratio 1.3. Pada diameter ratio

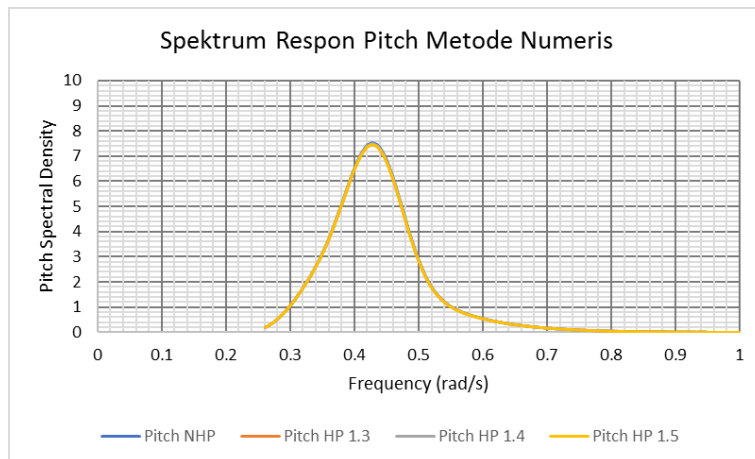
1.4 dan 1.5, trend penurunan cenderung landai. Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.35.



**Gambar 4. 35** Puncak RAO *heave* pengaruh variasi diameter *heave plate* (Sudhakar & Nallayarasu, 2011)

#### 4.8.5 Mode Gerak *Pitch*

Prosedur analisis mode gerak *pitch* adalah sama dengan prosedur dalam analisis *surge* maupun *heave*. *Time history* dari gerak *pitch* ditransformasikan menjadi spektrum respon.



**Gambar 4. 36** Kurva spektrum respon *heave* SPAR pada semua variasi pemasangan *heave plate*

Setelah mendapatkan spektrum respon, sebagaimana pada Gambar 4.36, langkah selanjutnya adalah menghitung luasan di bawah kurva spektrum. Luasan tersebut digunakan untuk menghitung nilai-nilai stokastik dari respon gerak *pitch* SPAR.

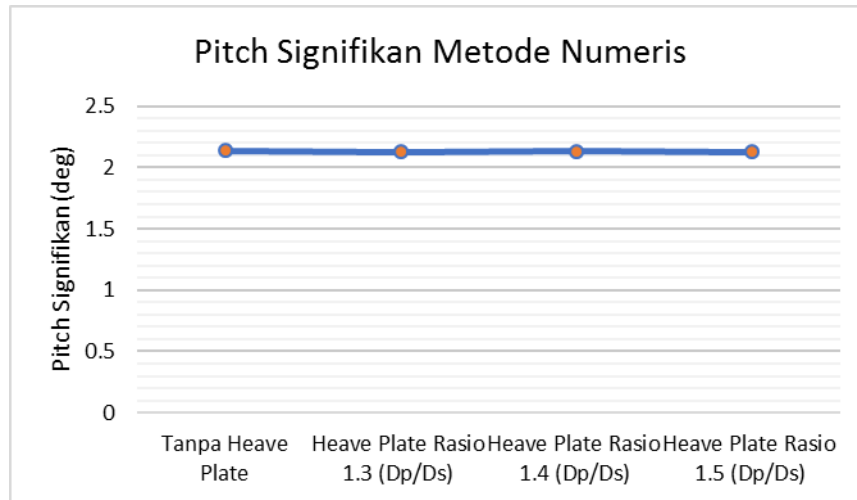
**Tabel 4. 22** Parameter Stokastik Gerak *Pitch* SPAR Metode Numeris

PARAMETER STOKASTIK	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
	<b><i>Pitch Response</i></b>			
m0	1,141	1,132	1,134	1,131
m1	0,499	0,494	0,495	0,494
m2	0,230	0,227	0,227	0,226
m4	47,897	35,270	29,191	28,136
<i>Significant Amplitude Response (deg)</i>	2,136	2,128	2,130	2,127
<i>Average Amplitude Response (deg)</i>	1,335	1,330	1,331	1,329
<i>1/10 Amplitude Response (deg)</i>	2,713	2,702	2,705	2,701
<i>the most probable extreme amplitude responses (deg)</i>	3,895	3,878	3,881	3,877
<i>the most probable extreme amplitude response with 0.99 confidence (deg)</i>	5,068	5,046	5,051	5,045

Kemudian nilai *significant responses* gerak *pitch* dari setiap kondisi variasi *heave* plate dibandingkan. Tabel dan grafik perbandingan nilai *significant responses* gerak *pitch* terdapat pada Tabel 4.23 dan Gambar 4.37.

**Tabel 4. 23** Perbandingan *pitch Significant Responses*

	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
<i>Pitch Significant Amplitude (deg)</i>	2,136	2,128	2,130	2,127
Reduksi (%)	0,000	-0,409	-0,320	-0,437



**Gambar 4. 37** Grafik *pitch significant responses*

Pada analisis numeris mode gerak *pitch*, secara keseluruhan penggunaan variasi *heave plate* mempunyai pengaruh dalam penurunan nilai stokastik dari spektrum respon, namun tidak terlalu signifikan. SPAR dengan *heave plate* 1,3 mempunyai penurunan *pitch* signifikan sebesar -0,409% apabila dibandingkan dengan SPAR tanpa *heave plate*. Pada saat SPAR dipasang dengan *heave plate* 1,4 nilai *pitch* signifikan mengalami penurunan -0,320%. Sedangkan ketika SPAR dipasang *heave plate* 1,5, penurunan nilai amplitudo *pitch* signifikannya menjadi -0,437%. Dari ketiga fenomena tersebut, secara analisis numeris, dapat disimpulkan bahwasanya penggunaan variasi rasio *heave plate*  $D_p/D_s$  tidak berpengaruh secara signifikan dalam mengurangi respon gerak *pitch*.

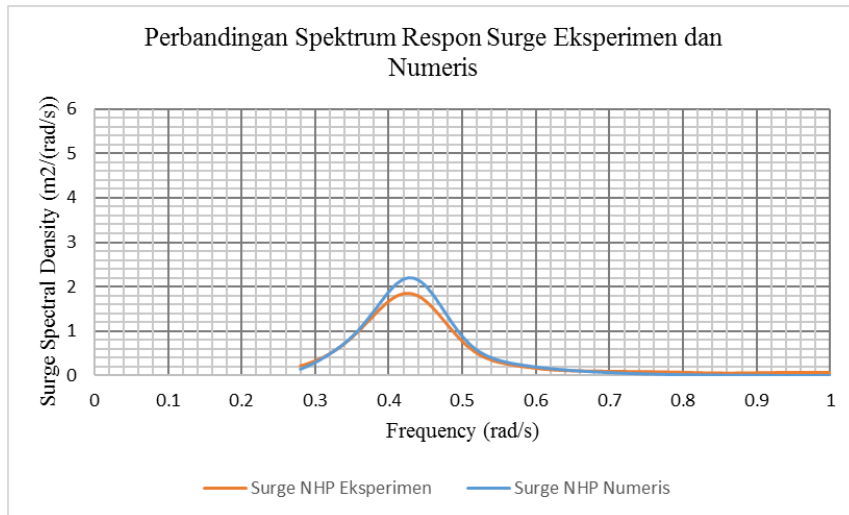
#### **4.9 ANALISIS PERBANDINGAN HASIL EKSPERIMEN DAN NUMERIS**

Sebagaimana yang tercantum pada rumusan masalah tugas akhir ini, bahwasanya nilai-nilai stokastik hasil dari analisa eksperimen dan numeris akan dibandingkan. Namun untuk memudahkan pemahaman pembaca terhadap data yang disajikan, maka penyajian data stokastik setiap mode gerak perlu dibagi menjadi 5 bagian dengan 4 jumlah variasi pemasangan *heave plate*, yaitu SPAR tanpa pemasangan *heave plate* (NHP), SPAR dengan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3, SPAR dengan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.4, dan SPAR dengan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5, serta tambahan 1 bagian yang mencakup perbandingan semua variasi.

#### 4.9.1 Mode Gerak *Surge*

##### 1. SPAR tanpa pemasangan *heave plate* (NHP)

SPAR tanpa pemasangan *heave plate* (NHP) adalah variasi pertama yang dibahas pada bab perbandingan ini. Untuk menambah pemahaman mengenai fenomena respon gerak yang terjadi, maka spektrum gelombang perlu dibandingkan dan dianalisis terlebih dahulu. Perbandingan antara spektrum gelombang metode eksperimen dan metode numeris terdapat pada Gambar 4.38.



**Gambar 4. 38** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Surge* Eksperimen dan Numeris

Dari Gambar 4.38 dapat dilihat bahwasanya bentuk daripada kedua spektrum adalah hampir serupa. Dikatakan hampir serupa karena puncak dari spektrum terletak pada titik absis yang sama, yaitu pada frekuensi 0,425 rad/s. Nilai dari stokastik terdapat pada Tabel 4.24.

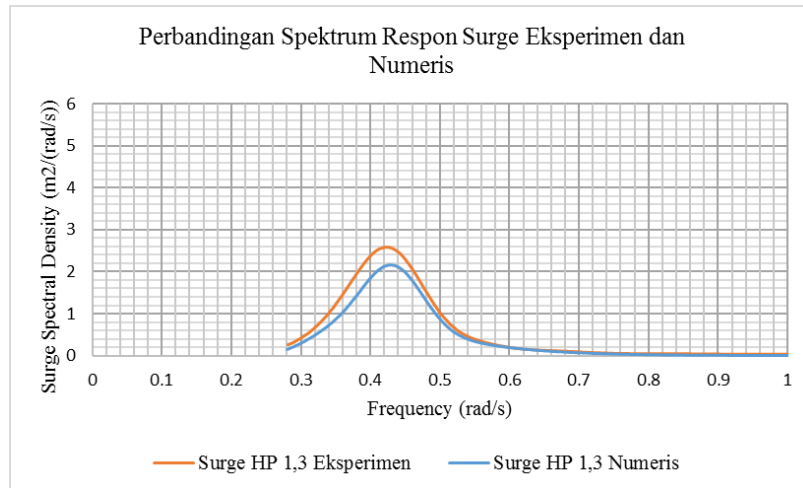
**Tabel 4. 24** Perbandingan Nilai Stokastik *Surge* Signifikan SPAR tanpa pemasangan *heave plate*

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Surge Amplitude</i> (m)	1,622	1,164

##### 2. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio $D_p/D_s$ 1.3 (HP 1.3)

Variasi kedua yang dibahas adalah SPAR dengan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3 (HP 1.3). Sebagaimana pada variasi sebelumnya, spektrum respon gerak *surge* dari SPAR perlu dibandingkan terlebih dahulu menjelaskan fenomena bagaimana nilai stokastik yang didapatkan. Grafik perbandingan spektrum dapat dilihat pada Gambar 4.39.





**Gambar 4. 39** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Surge* SPAR dengan Heave Plate 1.3 Hasil Eksperimen dan Numeris

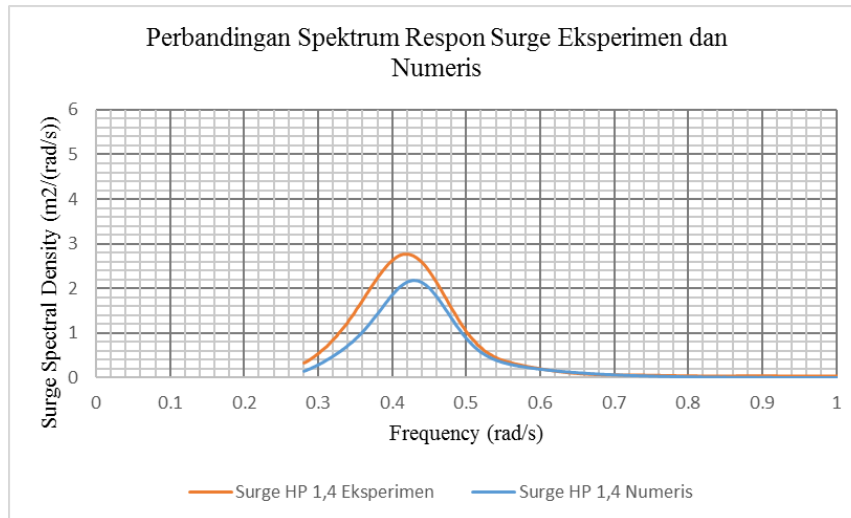
Gambar 4.39 menunjukkan bahwasanya kedua spektrum memiliki bentuk yang hampir identik. Puncak daripada spektrum terletak pada frekuensi yang sama, yaitu 0,431 rad/s. Dengan perbandingan bentuk spektrum inilah dapat dikatakan bahwasanya hasil analisa numeris dapat digunakan sebagai perbandingan hasil dari analisa eksperimen. Selain itu, fenomena lain yang dapat ditangkap adalah luasan di bawah spektrum respon gerak *surge* hasil eksperimen lebih besar daripada spektrum respon hasil numeris. Perbandingan luasan di bawah kurva spektrum ini berbanding lurus dengan hasil stokastik yang didapat, nilai stokastik hasil eksperimen lebih besar daripada nilai stokastik hasil numeris. Nilai stokastik *surge* signifikan dapat dilihat pada Tabel 4.25.

**Tabel 4. 25** Perbandingan Nilai Stokastik *Surge* Signifikan SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Surge Amplitude</i> (m)	1,625	1,158

3. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.4 (HP 1.4)

Sebagaimana pada 2 variasi sebelumnya, spektrum respon gerak *surge* SPAR hasil analisis eksperimen dan numeris akan dibandingkan. Grafik perbandingan spektrum adalah sebagaimana tercantum pada Gambar 4.40.



**Gambar 4. 40** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Surge* SPAR dengan Heave Plate 1.4 Hasil Eksperimen dan Numeris

Kedua grafik spektrum respon gerak *surge* hasil eksperimen maupun numeris memiliki bentuk yang hampir serupa. Puncak daripada masing-masing spektrum terletak pada titik absis frekuensi 0,418 rad/s. Luasan di bawah kurva spektrum respon gerak *surge* hasil eksperimen lebih besar daripada spektrum respon gerak hasil numeris. Luasan di bawah kurva spektrum berbanding lurus dengan nilai stokastik yang didapat, sehingga nilai stokastik dari respon gerak *surge* hasil eksperimen lebih besar daripada stokastik respon gerak hasil numeris. Nilai-nilai stokastik terdapat pada Tabel 4.26.

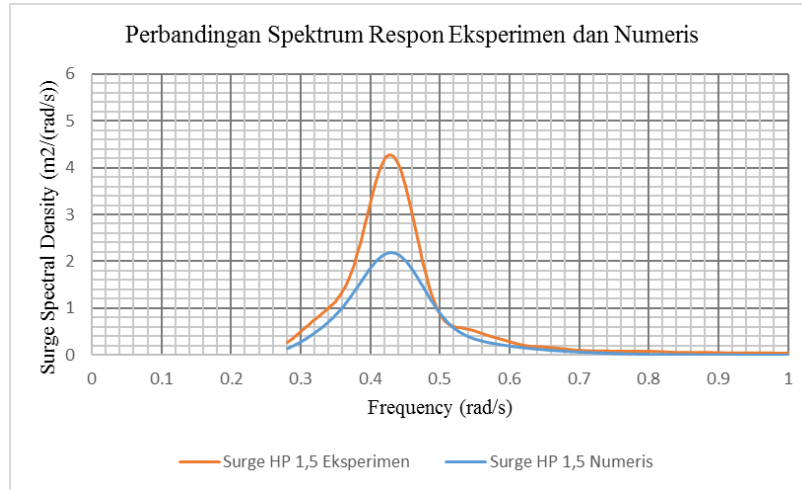
**Tabel 4. 26** Perbandingan Nilai Stokastik *Surge* Signifikan SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.4

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Surge Amplitude</i> (m)	1,619	1,161

4. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5 (HP 1.5)

Variasi terakhir yang dibahas pada setiap mode gerak adalah SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5 (HP 1.5). Spektrum respon gerak *surge*

dari hasil eksperimen dan numeris akan dibandingkan, serta dianalisis korelasinya dengan hasil nilai stokastik yang didapat. Perbandingan kurva spektrum yang didapat adalah sebagaimana pada Gambar 4.41.



**Gambar 4. 41** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Surge* SPAR dengan Heave Plate 1.5 Hasil Eksperimen dan Numeris

Dari Gambar 4.41 dapat dilihat bahwasanya kedua kurva spektrum memiliki puncak yang terletak pada titik absis yang sama, yaitu pada frekuensi 0,429 rad/s. Bentuk daripada kedua kurva juga dapat dikatakan hampir serupa. Hal ini menunjukkan bahwasanya hasil analisis numeris dapat digunakan sebagai perbandingan hasil dari eksperimen. Sebagaimana pada 3 variasi sebelumnya, luasan di bawah kurva spektrum berbanding lurus dengan hasil stokastik yang didapat. Luasan kurva spektrum hasil eksperimen lebih besar daripada kurva spektrum hasil numeris, sebagaimana nilai stokastik hasil eksperimen lebih besar daripada nilai stokastik hasil numeris. Tabel 4.27 berisi nilai-nilai stokastik *surge* signifikan SPAR.

**Tabel 4. 27** Perbandingan Nilai Stokastik *Surge* Signifikan SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Surge Amplitude</i> (m)	1,727	1,155

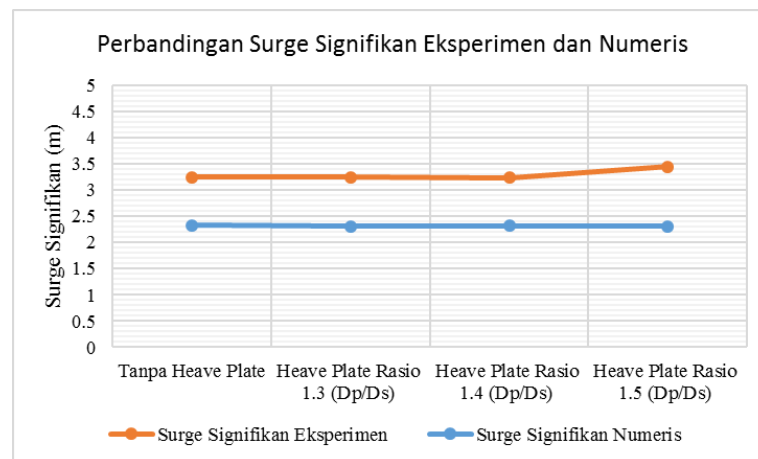
#### 5. Perbandingan nilai stokastik secara keseluruhan variasi *heave plate*

Penyajian nilai stokastik *surge* signifikan secara keseluruhan variasi *heave plate* merupakan bagian terakhir dalam penyajian data stokastik mode gerak *surge*.

Perbandingan ini dilakukan untuk melihat *trendline* reduksi nilai *surge* signifikan dari analisis eksperimen dan numeris akibat pengaruh pemasangan variasi diameter *heave plate* ( $D_p/D_s$ ).

**Tabel 4. 28** Perbandingan Nilai *Surge* Signifikan Metode Eksperimen dan Numeris Seluruh Variasi Pemasangan *Heave Plate*

Nilai Stokastik Metode Eksperimen				
	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.4 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.5 ( $D_p/D_s$ )
<i>Significant Surge Amplitude</i> (m)	1,622	1,625	1,619	1,727
Reduksi (%)	0	0,154	-0,213	6,444
Nilai Stokastik Metode Numeris				
	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.4 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.5 ( $D_p/D_s$ )
<i>Significant Surge Amplitude</i> (m)	1,164	1,158	1,161	1,155
Reduksi (%)	0,000	-0,583	-0,312	-0,838



**Gambar 4. 42** *Trendline* Perbandingan *Surge* Signifikan Seluruh Variasi *Heave Plate* Metode Eksperimen dan Numeris

Dari Tabel 4.28 dan Gambar 4.42 dapat dilihat bahwasanya terdapat perbedaan tren reduksi antara hasil *surge* signifikan eksperimen dan numeris. Tren reduksi

*surge* signifikan hasil dari analisis eksperimen cenderung fluktuatif seiring dengan bertambahnya rasio diameter *heave plate*. Namun, perubahan nilai reduksi tidak terlalu signifikan, ketika SPAR dipasang *heave plate* rasio (Dp/Ds) 1.3, nilai *surge* signifikan naik sebesar 0,137% terhadap nilai *surge* signifikan SPAR tanpa dipasang *heave plate*. Fenomena berbeda terjadi ketika SPAR dipasang *heave plate* rasio (Dp/Ds) 1.4, nilai reduksi menjadi turun sebesar -0,225%. Adapun, ketika SPAR dipasang *heave plate* rasio (Dp/Ds) 1.5, nilai reduksi dari *surge* signifikan kembali mengalami kenaikan sebesar 6,431%.

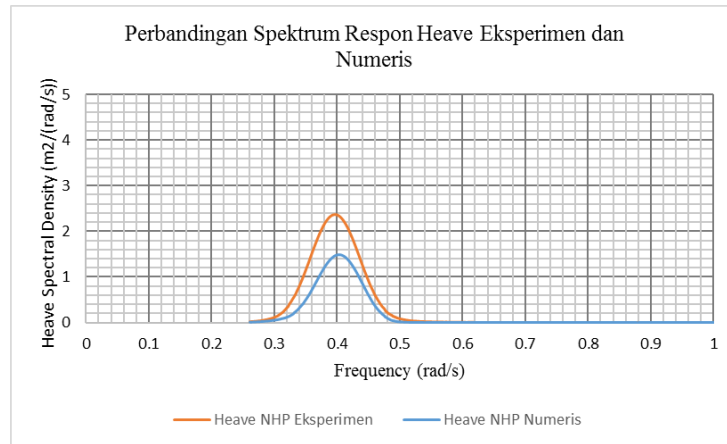
Adapun tren reduksi *surge* signifikan hasil analisis numeris cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya rasio diameter *heave plate* (Dp/Ds). Namun, sebagaimana yang terjadi pada analisis eksperimen, perubahan nilai reduksi tidak cukup signifikan. Nilai reduksi mengalami penurunan sebesar -0,583% saat SPAR dipasang *heave plate* rasio (Dp/Ds) 1.3. Nilai reduksi juga mengalami penurunan ketika SPAR dipasang *heave plate* rasio (Dp/Ds) 1.4, dan 1.5, dengan nilai reduksi masing-masing sebesar -0,312% dan -0,838%.

Dari perbandingan 2 hasil stokastik yang dianalisis secara eksperimen dan numeris, maka dapat disimpulkan bahwasanya penggunaan *heave plate* tidak secara signifikan mempengaruhi respon gerak *surge* dari SPAR. Temuan ini juga diperkuat oleh penelitian yang dilakukan Agarwal dan Jain (2003). Dalam penelitiannya, keduanya menyebutkan bahwasanya perubahan daripada damping ratio tidak berpengaruh terhadap respon gerak *surge* dan *pitch*. Adapun, pemakaian *heave plate* pada SPAR akan memberikan kontribusi terhadap damping ratio SPAR (Ardhianutama, 2019)

#### **4.9.2 Mode Gerak Heave**

##### **1. SPAR tanpa pemasangan *heave plate* (NHP)**

Sebagaimana pada mode gerak *surge*, spektrum respon *heave* hasil eksperimen dan numeris akan dibandingkan untuk mengetahui korelasinya dengan hasil stokastik. Perbandingan kurva spektrum dapat dilihat pada Gambar 4.43.



**Gambar 4. 43** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Heave* SPAR tanpa *Heave Plate* Hasil Eksperimen dan Numeris

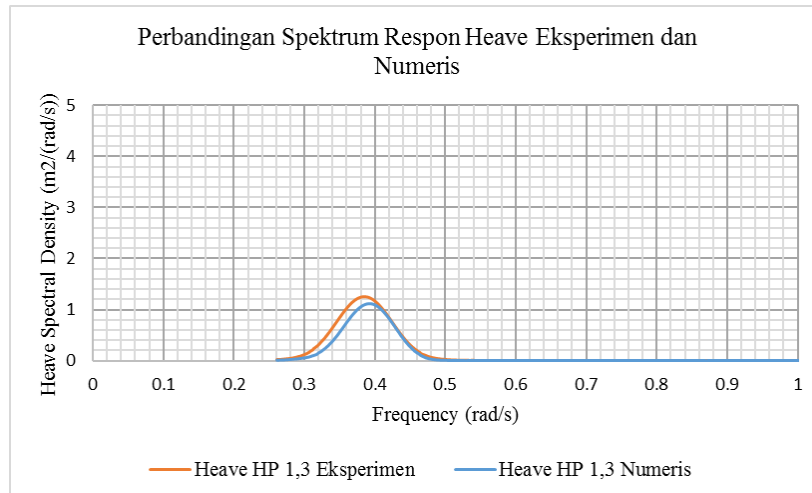
Kurva spektrum hasil eksperimen dan numeris pada Gambar 4.43 memiliki puncak yang terletak pada frekuensi yang sama, yaitu di sekitar 0,397 rad/s. Dari grafik juga dapat dilihat bahwasanya luasan daripada kurva spektrum respon hasil eksperimen lebih besar daripada kurva spektrum respon hasil numeris. Hal ini berbanding lurus dengan nilai stokastik yang didapat dari analisis eksperimen lebih besar daripada yang didapat dari analisis numeris. Tabel perbandingan nilai-nilai stokastik terdapat pada Tabel 4.29.

**Tabel 4. 29** Perbandingan Nilai Stokastik *Heave* Signifikan SPAR tanpa Pemasangan *Heave Plate*

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant heave amplitude</i> (m)	0,968	0,727

## 2. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio $D_p/D_s$ 1.3 (HP 1.3)

Variasi selanjutnya adalah SPAR dengan pemasangan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3 (HP 1.3). Kurva spektrum respon gerak *heave* yang dibandingkan terdapat pada Gambar 4.44.



**Gambar 4. 44** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Heave* SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.3 Hasil Eksperimen dan Numeris

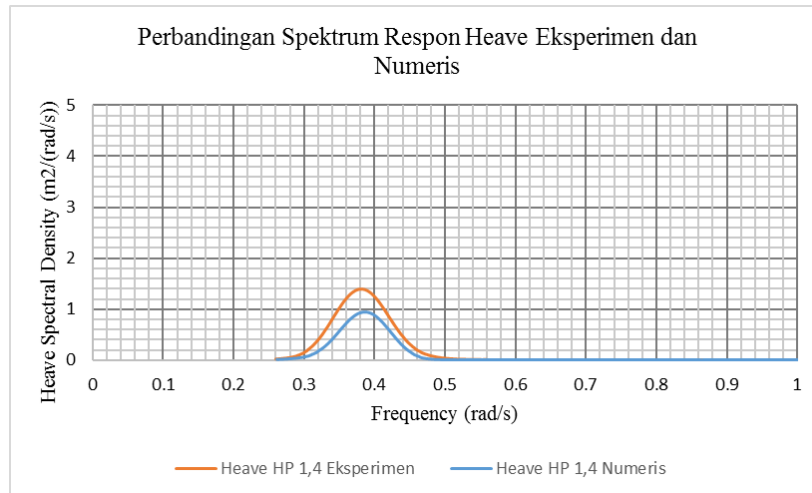
Dari Gambar 4.44 dapat dilihat bahwasanya kurva spektrum respon *heave* hasil analisis eksperimen dan numeris memiliki puncak spektrum yang terletak di frekuensi sekitar 0,393 rad/s. Sebagaimana yang terjadi pada variasi sebelumnya, luasan daripada kurva spektrum hasil eksperimen lebih besar daripada spektrum hasil numeris. Luasan di bawah kurva spektrum berbanding lurus dengan hasil stokastik yang didapat, sebagaimana pada Tabel 4.30.

**Tabel 4. 30** Perbandingan Nilai Stokastik *Heave* Signifikan SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.3

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant heave amplitude</i> (m)	0,706	0,634

### 3. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio $D_p/D_s$ 1.4 (HP 1.4)

Sebagaimana yang telah dilakukan pada 2 variasi sebelumnya, kurva spektrum respon gerak *heave* dari analisis eksperimen dan numeris pada variasi pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.4 akan dibandingkan. Perbandingan kedua kurva spektrum dapat dilihat pada Gambar 4.45.



**Gambar 4. 45** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Heave* SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.4 Hasil Eksperimen dan Numeris

Luasan di bawah kurva spektrum dari hasil analisis eksperimen lebih besar daripada luasan kurva spektrum numeris, sebagaimana yang tertera pada gambar 4.45. Puncak daripada kedua spektrum terletak di sekitar frekuensi 0,390 rad/s. Adapun nilai stokastik *heave* signifikan dari analisis eksperimen dan numeris tertera pada Tabel 4.31.

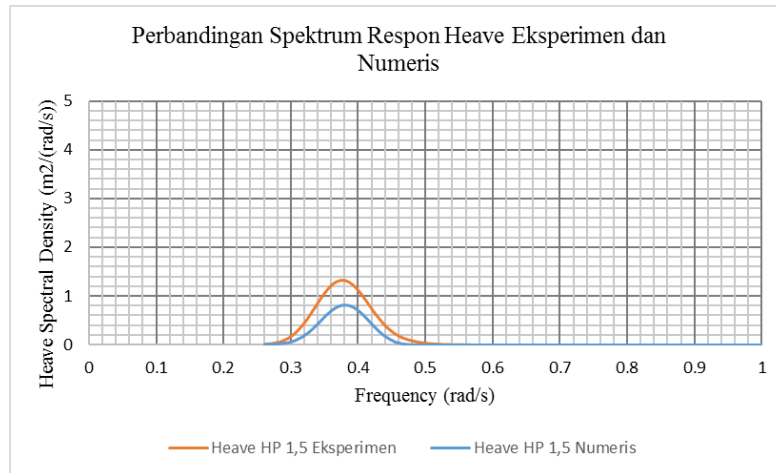
**Tabel 4. 31** Perbandingan Nilai Stokastik *Heave* Signifikan SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.4

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant heave amplitude</i> (m)	0,745	0,580

#### 4. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio $D_p/D_s$ 1.5 (HP 1.5)

Variasi terakhir dari mode gerak *heave* yang akan dibahas adalah variasi SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5 (HP 1.5). Kurva spektrum respon gerak *heave* hasil eksperimen dan numeris dibandingkan agar didapat korelasi antara spektrum dengan hasil stokastik yang didapat. Perbandingan antara kedua kurva hasil eksperimen dan numeris terdapat pada Gambar 4.46.





**Gambar 4. 46** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Heave* SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.5 Hasil Eksperimen dan Numeris

Korelasi antara spektrum dengan hasil stokastik dapat ditangkap dengan fakta bahwasanya luasan di bawah kurva spektrum hasil eksperimen lebih besar daripada luasan kurva spektrum numeris, perbandingan luasan ini berbanding lurus dengan perolehan nilai stokastik dari analisis eksperimen yang lebih besar daripada nilai stokastik dari analisis numeris. Nilai yang dimaksud adalah *surge* signifikan sebagaimana yang tertera pada Tabel 4.32.

**Tabel 4. 32** Perbandingan Nilai Stokastik *Heave* Signifikan SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.5

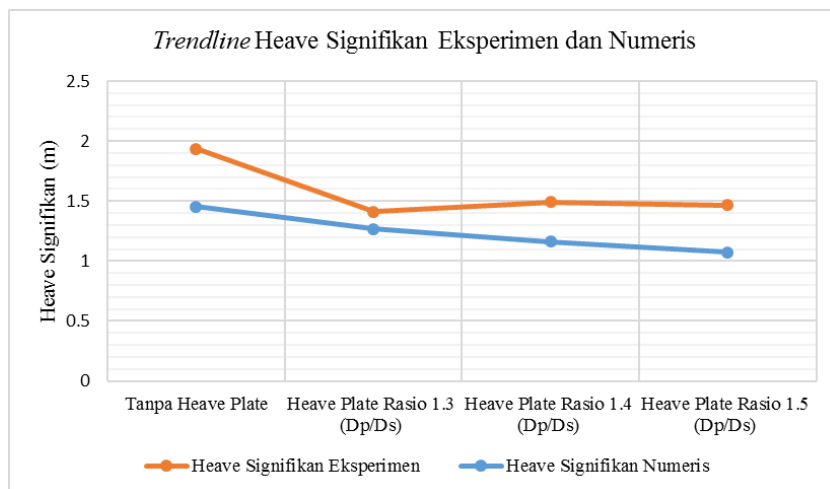
Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Heave significant response</i> (m)	0,734	0,535

5. Perbandingan nilai stokastik secara keseluruhan variasi *heave plate*

Bagian terakhir dalam penyajian data stokastik mode gerak *heave* adalah penyajian nilai stokastik *heave* signifikan secara keseluruhan variasi *heave plate*. Perbandingan ini dilakukan untuk melihat *trendline* reduksi nilai *heave* signifikan dari analisis eksperimen dan numeris akibat pengaruh pemasangan variasi diameter *heave plate* ( $D_p/D_s$ ).

**Tabel 4. 33** Perbandingan Nilai *Heave* Signifikan Metode Eksperimen dan Numeris Seluruh Variasi Pemasangan *Heave Plate*

Nilai Stokastik Metode Eksperimen				
	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.4 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.5 ( $D_p/D_s$ )
<i>Significant Heave Amplitude</i> (m)	0,968	0,706	0,745	0,734
Reduksi (%)	0,000	-27,122	-23,020	-24,200
Nilai Stokastik Metode Numeris				
	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.4 ( $D_p/D_s$ )	Heave Plate Rasio 1.5 ( $D_p/D_s$ )
<i>Significant Heave Amplitude</i> (m)	0,727	0,634	0,580	0,535
Reduksi (%)	0,000	-12,910	-20,269	-26,390



**Gambar 4. 47** Trendline Perbandingan *Heave* Signifikan Seluruh Variasi *Heave Plate* Metode Eksperimen dan Numeris

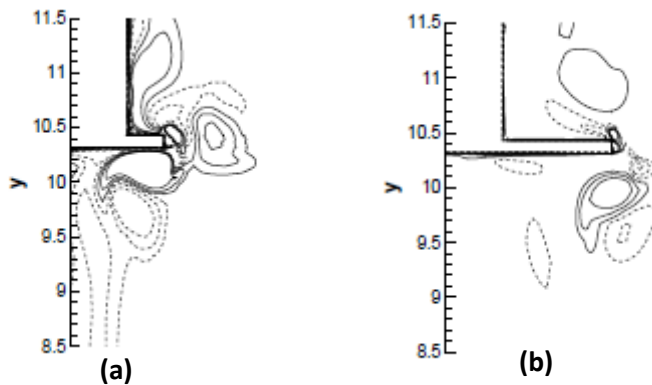
Tabel 4.33 dan Gambar 4.47 menunjukkan bahwasanya secara keseluruhan nilai reduksi respon gerak *heave* mengalami tren yang menurun. Nilai reduksi *heave* signifikan hasil analisis eksperimen mengalami penurunan yang cukup signifikan pada variasi *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3, yaitu sebesar -27,157%, apabila dibandingkan dengan nilai *heave* signifikan SPAR tanpa *heave plate*. Kemudian dengan perbandingan yang sama, nilai reduksi pada variasi SPAR dengan pemasangan *heave plate* 1.4 dan 1.5 berturut-turut berubah menjadi -22,984% dan -24,164.

Pada analisis numeris, penurunan *heave* signifikan juga terjadi pada variasi SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3, yakni sebesar -12,910% dengan perbandingan nilai *heave* signifikan pada SPAR tanpa *heave plate*. Dengan perbandingan yang sama, nilai *heave* signifikan juga mengalami reduksi pada variasi *heave plate* 1.4 dan 1.5 yaitu sebesar -20,269% dan -26,390%.

Dari perbandingan antara hasil eksperimen dan numeris, dapat disimpulkan bahwasanya penggunaan *heave plate* yang optimum dalam mereduksi respon gerak *heave* secara eksperimen maupun numeris adalah *heave plate* dengan rasio  $D_p/D_s$  1.3. Analisis perbandingan ini juga menguatkan argumen pada bagian analisis hasil eksperimen maupun numeris.

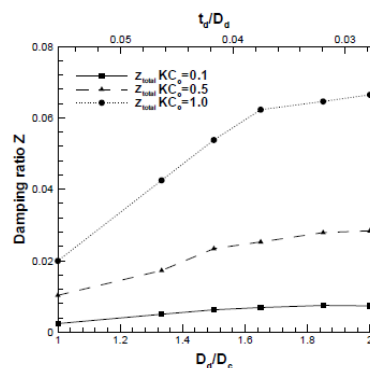
Tambahan penjelasan mengenai alasan yang menyebabkan respon SPAR pada *heave plate* diameter rasio 1.3 menjadi optimum juga dapat didapat dengan penjelasan aliran *vortex shedding* di sekitar *heave plate* dan pengaruhnya terhadap respon gerak. Dalam (Tao & Cai, 2004), telah diinvestigasi bagaimana pengaruh dari variasi diameter *heave plate* terhadap pola aliran *vortex shedding*. *Vortex* yang terbentuk pada diameter *heave plate* yang lebih kecil cenderung tertekan oleh tekanan yang dihasilkan dinding silinder. Di sisi lain, *vortex* yang terbentuk pada diameter *heave plate* yang lebih besar cenderung berbentuk bundar dan tidak terpengaruh oleh gangguan dari tekanan dinding silinder.

Dari sudut pandang energi konservatif, *vortex* meninggalkan volume control di sekitar silinder dan *heave plate* yang merupakan cara yang efektif untuk disipasi energi dan oleh karena itu menyiratkan peningkatan kekuatan redaman karena proses pelepasan *vortex* yang lebih kuat pada diameter *disk* yang lebih besar.



**Gambar 4. 48** Pola aliran atau *vortex formation* di sekitar *heave plate* (a)  $D_p/D_s$  1.33 (b)  $D_p/D_s$  2.0 (Tao & Cai, 2004)

Fenomena aliran seperti gambar 4.48 memiliki kaitan dengan besaran *damping ratio*, yaitu untuk rasio diameter *heave plate* yang kecil, panjang ekstensi antara ujung *disk* dengan silinder relatif kecil dan menyebabkan gangguan dari *boundary layer* silinder terhadap *vortex shedding process* menjadi jelas sehingga *damping* menjadi kecil. Seiring dengan kenaikan ukuran diameter *heave plate* sampai pada titik tertentu, ekstensi *disk* yang menjadi lebih panjang menjadikan gangguan dari *boundary layer* silinder menjadi tidak terjadi. Proses pembangkitan *vortex* di sekitar tepi *disk* menjadi tidak tergantung pada rasio diameter, menunjukkan bahwa setiap peningkatan lebih lanjut pada diameter *disk* tidak akan menghasilkan peningkatan yang cukup besar pada hambatan. Argumen ini didukung dengan grafik *trend line damping ratio* pada gambar 4.49 yang menunjukkan gradien *trend line* cenderung tajam kenaikannya pada diameter rasio kecil dan nilai *KC* besar, namun menjadi datar pada diameter rasio yang besar.

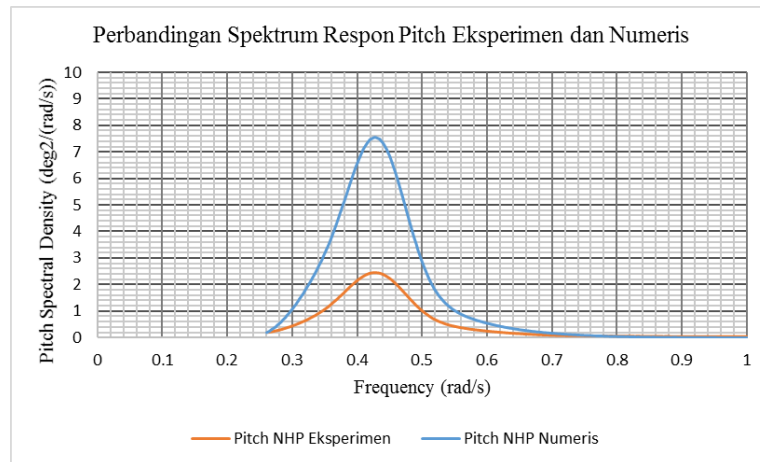


**Gambar 4.49** *Damping ratio* terhadap  $D_p/D_s$  pada nilai *KC* yang berbeda (Tao & Cai, 2004)

### 4.9.3 Mode Gerak *Pitch*

#### 1. SPAR tanpa pemasangan *heave plate* (NHP)

Sebagaimana yang dilakukan pada 2 mode gerak sebelumnya, spektrum respon gerak *pitch* antara hasil analisis eksperimen dan numeris perlu dibandingkan. Perbandingan kurva spektrum terdapat pada Gambar 4.50.



**Gambar 4. 50** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Pitch* SPAR tanpa *Heave Plate* Hasil Eksperimen dan Numeris

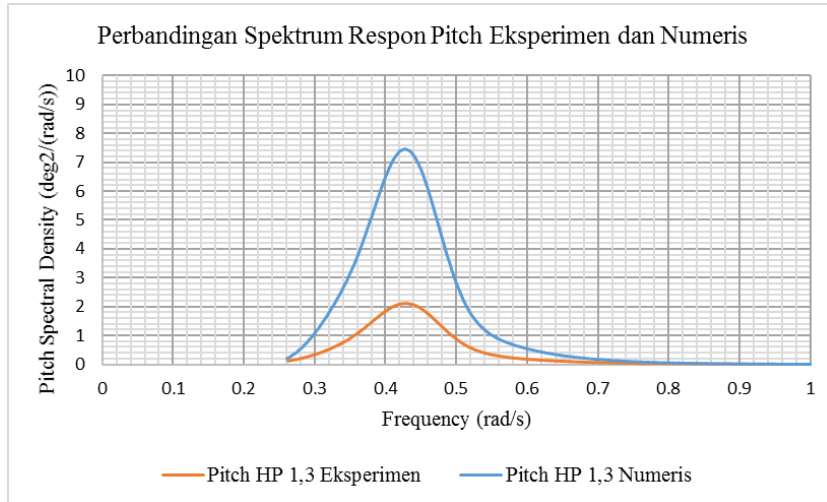
Kurva spektrum *pitch* hasil eksperimen maupun numeris, berdasarkan gambar 4.50, sama-sama memiliki puncak spektrum yang terletak di sekitar frekuensi 0,438 rad/s. Selain itu, luasan di bawah kurva spektrum hasil numeris lebih besar daripada luasan kurva spektrum hasil eksperimen. Hal ini berbanding lurus dengan nilai stokastik *pitch* signifikan dari analisis numeris lebih besar daripada *pitch* signifikan dari analisis eksperimen. Nilai stokastik dapat dilihat pada Tabel 4.34.

**Tabel 4. 34** Perbandingan Nilai Stokastik *Pitch* Signifikan SPAR tanpa Pemasangan *Heave Plate*

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Pitch Amplitude</i> (deg)	1,462	2,136

2. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.3 (HP 1.3)

Perbandingan kurva spektrum respon gerak *pitch* dapat dilihat pada Gambar 4.51.



**Gambar 4. 51** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Heave* SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.3 Hasil Eksperimen dan Numeris

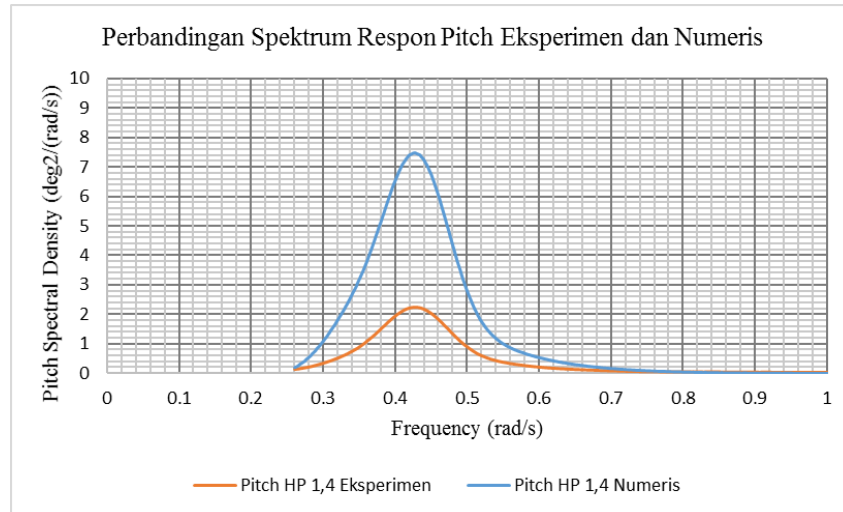
Dari Gambar 4.51 dapat dilihat bahwasanya puncak dari kurva spektrum respon gerak *pitch*, hasil eksperimen maupun numeris, berada pada titik absis yang sama, yaitu di sekitar frekuensi 0,436 rad/s. Selain itu, luasan kurva spektrum respon hasil numeris lebih besar daripada kurva spektrum eksperimen. Adapun parameter stokastik *pitch* signifikan yang dibandingkan antara hasil eksperimen dan numeris dapat dilihat pada Tabel 4.35.

**Tabel 4. 35** Perbandingan Nilai Stokastik *Pitch* Signifikan SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.3

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Pitch Amplitude</i> (deg)	1,322	2,128

3. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.4 (HP 1.4)

Sebagaimana yang telah dilakukan pada 2 variasi sebelumnya, spektrum respon gerak *pitch* hasil dari eksperimen dan numeris akan dibandingkan. Perbandingan tersebut dilakukan agar dapat membantu pembaca memahami korelasi antara luasan kurva di bawah spektrum dengan nilai stokastik yang akan didapat. Perbandingan luasan kurva spektrum dapat dilihat pada Gambar 4.52.



**Gambar 4. 52** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Heave* SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.4 Hasil Eksperimen dan Numeris

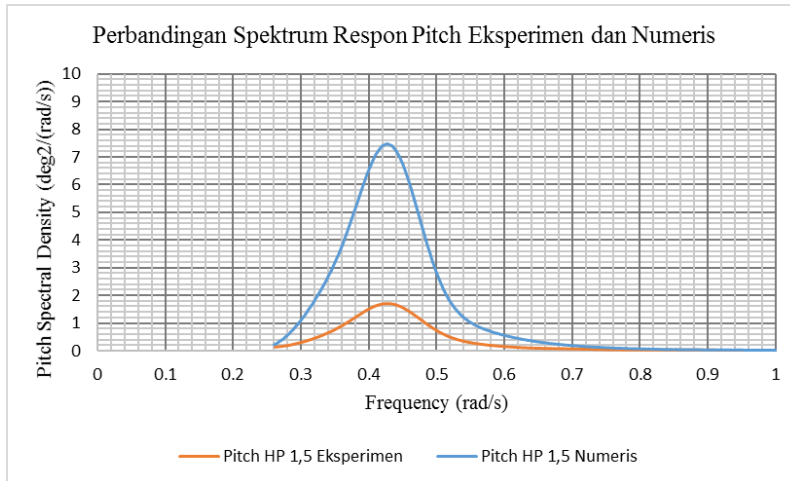
Berdasarkan Gambar 4.52, kedua kurva spektrum memiliki puncak yang terletak pada titik frekuensi yang sama, yaitu di sekitar 0,436 rad/s. Luasan di bawah kurva spektrum hasil numeris lebih besar daripada kurva spektrum hasil eksperimen, dan berbanding lurus dengan nilai stokastik yang didapat dari hasil numeris yang juga lebih besar daripada nilai stokastik dari hasil eksperimen. Nilai stokastik *pitch* signifikan tertera pada Tabel 4.36.

**Tabel 4. 36** Perbandingan Nilai Stokastik *Pitch* Signifikan SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.4

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Pitch Amplitude</i> (deg)	1,309	2,130

4. SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5 (HP 1.5)

Variasi terakhir yang dibahas di mode gerak *pitch* adalah SPAR dengan pemasangan *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.5 (HP 1.5). Perbandingan spektrum respon gerak *pitch* hasil eksperimen dengan hasil numeris dapat dilihat pada Gambar 4.53.



**Gambar 4. 53** Perbandingan Spektrum Respon Gerak *Heave* SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.5 Hasil Eksperimen dan Numeris

Puncak daripada spektrum respon gerak *pitch* hasil eksperimen maupun numeris sama-sama terletak pada frekuensi 0,428 deg/s. Berdasarkan korelasi antara luasan di bawah kurva spektrum dan nilai stokastik, pada bagian ini, luasan kurva spektrum numeris yang lebih besar daripada kurva spektrum numeris, berbanding lurus dengan nilai stokastik hasil numeris yang juga lebih besar daripada nilai stokastik hasil eksperimen. Nilai stokastik *pitch* signifikan dapat dilihat pada Tabel 4.37.

**Tabel 4. 37** Perbandingan Nilai Stokastik *Pitch* Signifikan SPAR dengan Pemasangan *Heave Plate* 1.5

Parameter Stokastik	Hasil Eksperimen	Hasil Numeris
<i>Significant Pitch Amplitude</i> (deg)	1,203	2,127

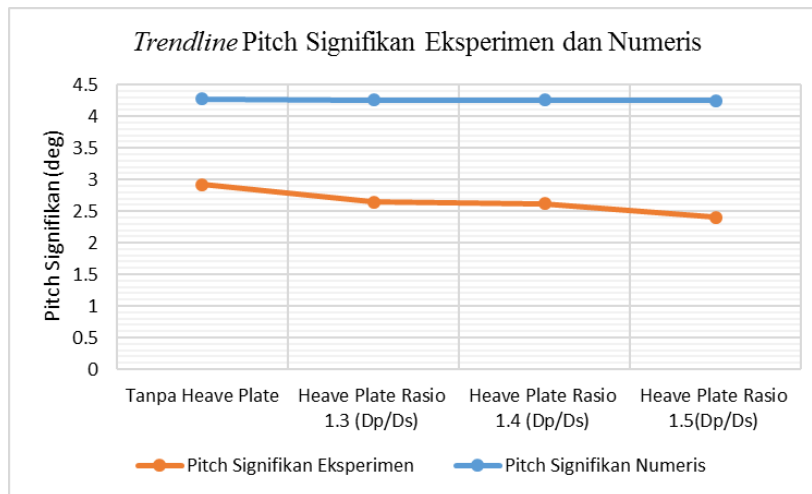
5. Perbandingan nilai stokastik secara keseluruhan variasi *heave plate*

Pada bagian ini, nilai stokastik *pitch* signifikan dari seluruh variasi pemasangan *heave plate* dibandingkan secara keseluruhan. Perbandingan ini dilakukan untuk melihat *trendline* reduksi nilai *pitch* signifikan dari analisis eksperimen dan numeris akibat pengaruh pemasangan variasi diameter *heave plate* ( $D_p/D_s$ ). Perbandingan nilai stokastik secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 4.38.



**Tabel 4. 38** Perbandingan Nilai *Pitch* Signifikan Metode Eksperimen dan Numeris Seluruh Variasi Pemasangan *Heave Plate*

Nilai Stokastik Metode Eksperimen				
	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
<i>Significant Pitch Amplitude</i> (deg)	1,462	1,322	1,309	1,203
Reduksi (%)	0,000	-9,591	-10,489	-17,747
Nilai Stokastik Metode Numeris				
	Tanpa Heave Plate	Heave Plate Rasio 1.3 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.4 (Dp/Ds)	Heave Plate Rasio 1.5 (Dp/Ds)
<i>Significant Pitch Amplitude</i> (deg)	2,136	2,128	2,130	2,127
Reduksi (%)	0,000	-0,409	-0,320	-0,437



**Gambar 4. 54** Trendline Perbandingan *Pitch* Signifikan Seluruh Variasi *Heave Plate* Metode Eksperimen dan Numeris

Berdasarkan Tabel 4.38 dan Gambar 4.54, secara keseluruhan *trendline* daripada nilai stokastik *pitch* signifikan cenderung menurun. Pada analisis eksperimen, penurunan yang cukup signifikan terjadi pada nilai *pitch* signifikan, ketika SPAR dipasangi *heave plate* rasio Dp/Ds 1.3. Penurunan yang terjadi adalah sebesar -9,588% dengan pembandingan nilai *pitch* signifikan dari SPAR tanpa pemasangan *heave plate*. Dengan pembandingan yang sama, nilai reduksi *pitch*

signifikan pada variasi SPAR dengan pemasangan *heave plate* 1.4 dan 1.5 masing-masing berubah menjadi -10,489% dan -17,747%.

Fenomena hampir serupa juga terjadi pada analisis numeris. Dikatakan serupa karena *trendline* reduksi nilai *pitch* signifikan juga mengalami penurunan. Namun, penurunan yang terjadi tidak terlalu signifikan pada setiap variasi pemasangan *heave plate*. Pada SPAR dengan pemasangan variasi *heave plate* 1.3, reduksi yang terjadi sebesar -0,409% dengan pembandingan nilai *pitch* signifikan dari SPAR tanpa pemasangan *heave plate*. Dengan pembandingan yang sama perubahan reduksi nilai *pitch* signifikan tidak banyak berubah ketika SPAR dipasang *heave plate* rasio  $D_p/D_s$  1.4 dan 1.5, yakni sebesar -0,320% dan -0,437%.

Dari perbandingan *trendline pitch* signifikan hasil analisis eksperimen dan numeris, dapat disimpulkan bahwasanya secara keseluruhan kenaikan ukuran rasio  $D_p/D_s$  daripada *heave plate* memiliki pengaruh dalam mereduksi nilai *pitch* signifikan daripada SPAR. Namun, reduksi yang didapat tidak terlalu signifikan baik secara numeris.

#### **4.10 ANALISIS KETIDAKTENTUAN**

Dikarenakan terdapat analisis perbandingan antara hasil studi eksperimen dan numeris, maka analisis ketidakpastian atau dalam kata lain disebut *uncertainty analysis* perlu dilakukan. Sebagaimana yang disebutkan dalam panduan ITTC, bahwasanya nilai sebenarnya dari pengukuran eksperimen kemungkinan tidak akan pernah bisa diketahui dikarenakan banyaknya ketidakpastian (ITTC, 2014). Hal-hal yang menjadi ketidakpastian tersebut perlu dianalisis untuk mengkonfirmasi kualitas dari data yang telah didapat, dan menghindari kesalahpahaman dalam penelitian. Namun, tidak semua parameter ketidakpastian bisa dianalisis secara keseluruhan. Maka dari itu, parameter-parameter ketidakpastian yang dianalisis dalam tugas akhir ini antara lain: ketidakpastian dalam pemodelan kekakuan tali tambat, dan ketidakpastian dalam simulasi numeris.

##### **4.10.1 Ketidakpastian dalam Pemodelan Kekakuan Tali Tambat**

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada bab 4.2, bahwasanya konfigurasi tali tambat yang digunakan pada uji eksperimen terdiri dari beberapa komponen yang menyusunnya. Komponen-komponen tersebut antara lain karet, *wire sling*, *carabiner*, dan *tumbuckle* sebagaimana tercantum pada gambar 4.10. Masing-

masing komponen tersebut idealnya menyumbangkan kekakuan terhadap sistem tambat secara keseluruhan. Namun, sebagaimana yang juga telah dibahas pada sub-bab 4.2.1 tentang perhitungan kekakuan tali tambat, komponen yang dianggap menyumbangkan kekakuan hanya karet dan *wire sling*. Sedangkan perhitungan kekakuan untuk *carabiner* dan *tumbuckle* sulit dilakukan karena bentuknya yang kompleks dan *rigid*. Perbedaan dalam perhitungan parameter kekakuan ini diindikasikan menjadi penyebab yang mempengaruhi perbedaan hasil antara uji eksperimen dengan simulasi numeris.

Fenomena perbedaan hasil spektrum gerak *pitch* antara hasil eksperimen dan numeris dapat dijelaskan dengan analisis ketidakpastian ini. Salah satu indikasi penyebab spektrum respon *pitch* numeris yang memiliki bentuk lebih besar daripada eksperimen adalah perbedaan kekakuan tali tambat yang dimodelkan. Kekakuan sistem tambat secara eksperimen yang terdiri dari 4 komponen (karet, *wire sling*, *carabiner*, dan *tumbuckle*) idealnya memiliki nilai yang lebih besar daripada kekakuan sistem tambat secara numeris yang hanya terdiri dari 2 komponen (karet dan *wire sling*).

#### **4.10.2 Ketidakpastian dalam Simulasi Numeris**

Dalam simulasi numeris, terdapat satu parameter ketidakpastian yang sulit untuk disimulasikan pada perangkat lunak. Parameter tersebut yaitu redaman nonlinear. Redaman nonlinear terdiri dari *frictional damping* dan *viscous damping*. Nilai *viscous damping* yang terdiri dari *linear* dan *quadratic damping* didapat dari uji *free decay* pada eksperimen sebagaimana yang telah dilakukan (Ardhianutama, 2019). Sedangkan secara numeris, *viscous damping* sulit untuk diukur dan disimulasikan. Dalam Tugas Akhir ini, peranti lunak ORCAFLEX 9.2A yang digunakan tidak dapat mengkalkulasi nilai *viscous damping* serta nilai *viscous damping* tidak dapat dimasukkan sebagai *input*.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat setelah melakukan seluruh analisis dalam bab IV adalah untuk menjawab rumusan masalah pada bab I. Kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Nilai stokastik yang didapat dari analisis eksperimen menggambarkan beberapa fenomena yang menjelaskan efek variasi diameter rasio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) terhadap respon gerak SPAR. Fenomena pertama yaitu, variasi diameter rasio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) yang dipasangkan kepada SPAR tidak berpengaruh terhadap respon gerak *surge* SPAR. Hal ini dibuktikan dengan perbedaan nilai *surge* signifikan dari masing-masing variasi rasio ( $D_p/D_s$ ) yang dibandingkan dengan SPAR tanpa *heave plate* bernilai kecil, yaitu 0,154% untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.3, -0,213% untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.4, dan 6,444% untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.5. Fenomena kedua adalah bahwasanya variasi diameter rasio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) yang dipasangkan kepada SPAR memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap respon gerak *heave*. Adapun untuk diameter rasio yang optimum dalam mengurangi respon gerak *heave* adalah rasio  $D_p/D_s$  1.3. Hal ini dibuktikan dengan reduksi *heave* signifikan yang didapat pada *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.3 adalah sebesar -27,122, kemudian -23,020% untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.4, dan -24,200 untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.5. Fenomena ketiga yaitu, variasi diameter rasio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) yang dipasangkan kepada SPAR berpengaruh terhadap reduksi gerak *pitch* SPAR. Reduksi *pitch* signifikan bernilai -9,591% untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.3, -10,489 untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.4, dan -17,747 untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.5.
2. Nilai stokastik yang didapat dari analisis numeris juga dapat menggambarkan efek daripada variasi diameter rasio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) terhadap respon gerak SPAR. Variasi diameter rasio *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) terhadap memiliki efek yang signifikan terhadap respon gerak *surge* berdasarkan pada analisis numeris. Perbedaan nilai *surge* signifikan dari masing-masing variasi rasio ( $D_p/D_s$ ) yang dibandingkan dengan SPAR tanpa *heave plate* cenderung bernilai kecil, yaitu -0,583% untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.3, -0,312% untuk *heave plate* ( $D_p/D_s$ ) 1.4,

dan -0,838% untuk *heave plate* (Dp/Ds) 1.5. Kemudian untuk respon gerak *heave*, variasi diameter rasio (Dp/Ds) yang optimum dalam mereduksi *heave* signifikan adalah rasio 1.3, dengan nilai reduksi sebesar -12,910%. Efek variasi pemasangan *heave plate* diameter rasio Dp/Ds yang diinvestigasi selanjutnya adalah terhadap respon gerak *pitch*. Pemasangan *heave plate* pada SPAR tidak berpengaruh secara signifikan terhadap reduksi respon gerak *pitch*. Hal ini dibuktikan dengan nilai reduksi dari masing-masing variasi rasio Dp/Ds berturut-turut hanya sebesar -0,409%, -0,320%, dan -0,437%.

3. Nilai stokastik yang didapat secara eksperimen dan numeris secara keseluruhan memiliki *trendline* yang hampir serupa. Spektrum respon eksperimen dan numeris juga memiliki puncak yang terletak pada frekuensi yang sama. Ini menunjukkan bahwasanya kedua hasil analisis sudah sesuai dan dapat memvalidasi satu sama lain.

## 5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan kepada peneliti selanjutnya yang akan melanjutkan penelitian serupa adalah sebagaimana berikut:

1. Melakukan analisis pola aliran di sekitar *heave plate* secara eksperimen dan numeris untuk menambah penjelasan mengenai efek hidrodinamis yang ditimbulkan *heave plate*
2. Menambahkan variasi *double heave plate* atau variasi posisi *heave plate* yang dipasang tidak hanya pada *keel* SPAR.
3. Menambahkan variasi ratio diameter *heave plate* (Dp/Ds) 1.1, 1.2 1.6 agar trend reduksi amplitudo respon secara keseluruhan dapat diketahui.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, A. & Jain, A., 2003. Dynamic Behaviour of Offshore Spar Platform under Regular Sea Waves. *Ocean Engineering*, pp. 487-516.
- Anastasia, 2009. *Analisa Numeris Sistem Tambat Spar antara Catenary Mooring dan Taut Mooring System Akibat Beban Gelombang*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- Ardhianutama, F., 2019. *Studi Eksperimen Analisis Heave Damping Pada SPAR Akibat Penambahan Heave Plate di Keel*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Chakrabarti, S. K., 1994. *Hydrodynamics of Offshore Structure*. Dorchester: Computational Mechanics Publications.
- Chakrabarti, S. K., 2005. *Handbook of Offshore Engineering*. 1st ed. London: Elsevier.
- Djutmiko, E. B., 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press.
- Fahruddin, A., 2018. *Studi Numeris dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Sistem Tambat Spar Helical Strakes dengan Variasi Konfigurasi Tali Tambat*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- Finn, L. & Maher, J., 2003. *The Cell Spar for Marginal Field Development*. Marseille, Deep Offshore Technology Conference.
- Fischer, F. J. & Gopalakrishnan, R., 1998. Some Observations on the Heave Behaviour of Spar Platform. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Volume 120, pp. 221-225.
- Gomes, R., Henriques, J., Gato, L. & Falcão, A., 2012. Hydrodynamic optimization of an axisymmetric floating oscillating water column. *Renewable Energy*, Volume 44, pp. 328-339.
- Hasselmann, K. e. a., 1973. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Ergänzungsheft*, Volume 13.
- Herdayanditya, I., 2017. *Studi Analitis, Numeris, dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Tali Tambat Spar dengan Variasi Heading Gelombang*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- ITTC, 2014. *Recommended Procedures, Guide to the Expression of Uncertainty in Experimental Hydrodynamics*.
- Journee, J. M. J. & Massie, W. W., 2001. *Offshore Hydromechanics*. 1st ed. Delft: Delft University of Technology.

Kurian, V. J., Ng, C. Y. & Liew, M. S., 2013. *A Study on Motion Responses of Classic Spar Platforms Subjected to Short Crested Waves*. Langkawi, BEIAC 2013 - 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium, pp. 311-315.

Li, B., Huang, Z. & Low, Y. M., 2013. Experimental and Numerical Study of the Effects of Heave Plate on the Motion of a New Deep Draft Multi-Spar Platform. *Journal of Marine Science and Technology*, Volume 18, pp. 229-246.

Lloyd, A. R. J. M., 1989. *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Water*. 1st ed. Chichester: ELLIS HORWOOD LIMITED.

Mukhtasor, 2012. *Ocean Energy Policy in Indonesia*, Jakarta: Ocean Energy Workshop.

Muliawan, M. J., Karimirad, M., Torgeir, M. & Zhen, G., 2012. *STC (SPAR-TORUS COMBINATION): A Combined SPAR-Type Floating Wind Turbine And Large Point Absorber Floating Wave Energy Converter Promising Challenging*. Rio de Janeiro, ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W. & Rothmayer, A. P., 2013. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc..

Prasiwi, R. A., 2014. *Analisis Perilaku FPSO (Floating Production Storage and Offloading) Terhadap Internal Turret Mooring System Berbasis Simulasi Time Domain*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.

Priambodo, S. A., 2018. *Studi Numerik Dan Eksperimen Olah Gerak Classic SPAR Dilengkapi Helical Strakes Dengan Variasi Gelombang*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.

Sarpkaya, T., 2010. *Wave Forces on Offshore Structures*. New York: Cambridge University Press.

Subbulakshmi, A. & Sundaravadivelu, R., 2016. Heave damping of spar platform for offshore wind turbine with heave plate. *Ocean Engineering*, Volume 121, pp. 24-36.

Sudhakar, S. & Nallayarasu, S., 2011. *Influence of heave plate on hydrodynamic response of Spar*. Rotterdam, ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

Sudhakar, S. & Nallayarasu, S., 2014. Hydrodynamic Responses of Spar Hull with Single and Double Heave Plates in Random Waves. *International Journal of Ocean System Engineering*, 4(1), pp. 1-18.

Tao, L. & Cai, S., 2004. Heave motion suppression of a spar with a heaveplate. *Ocean Engineering*, Volume 31, pp. 669-692.



Tao, L. & Thiagarajan, K., 2003a. Low KC Flow Regimes of Oscillating Sharp Edges I. Vortex Shedding Observation. *Applied Ocean Research*, Volume 25, pp. 21-35.

Tao, L. & Thiagarajan, K., 2003b. Low KC Flow Regimes of Oscillating Sharp Edges II. Hydrodynamic Force. *Applied Ocean Research*, Volume 25, pp. 53-62.





**LAMPIRAN A**  
**PERHITUNGAN JARI-JARI GIRASI**

# APPARATUS FOR MEASUREMENT OF SHIP MODEL PITCH INERTIA MOMENT

Determination of the required natural period of the oscillation table with the model

to realize a specified mass distribution for the complete ballasted model

---

1. Determination of the springmoment constant of the empty oscillation table by attaching to the table a weight Mw at position x and z from the hinge A.

Hinge location of the table coincides with specified centre of gravity of the model.

Mass of weight:

Position of weight:

Measured inclination angle due to weight:

in radians:

Mw =	0.653	kg
x =	2.000	m
z =	0.095	m
phi =	2.723	deg
phi =	0.0475	rad

Springmoment constant:

$$C_y = g \cdot M_w (x / \phi - z)$$

$$C_y = 269.013 \text{ Nm / rad}$$

2. Determination of the mass moment of inertia Iyt of the oscillation table only by free oscillation of the empty table.

Measured natural period:

Natural frequency:

$$W_{nt} = 2 \cdot \pi / T_{nt}$$

Mass moment of inertia of the table:

$$I_{yt} = C_y / W_{nt}^2$$

Tnt =	3.352	s
Wnt =	1.874	rad / s

$$I_{yt} = 76.564 \text{ kg m}^2$$

3. Calculation of the required natural period of the oscillation table with the ballasted model.

Required total mass of model:

$$M_m = 16.600 \text{ kg}$$

Required radius of gyration of model:

$$k_{ym} = 0.492 \text{ m}$$

Mass moment of inertia of the model:  $I_{ym} = M_m \cdot k_{ym}^2$

$$I_{ym} = 4.018 \text{ kg m}^2$$

Required natural frequency of oscillation table with model:

$$W_n = (C_y / (I_{yt} + I_{ym}))^{1/2} \quad W_n = 1.827 \text{ rad / s}$$

**Required natural period:**

$$T_n = 2 \cdot \pi / W_n$$

<b>T<sub>n</sub> = 3.439 s</b>
--------------------------------

4. Calculation of obtained radius of gyration from measured natural period

Measured natural period:

$$T_n = 3.460 \text{ s}$$

Measured natural frequency:

$$W_n = 1.816 \text{ rad/sec}$$

"Measured" mass moment of inertia:

$$I_{ym} = 5.013 \text{ kg m}^2$$

"Measured" radius of gyration:

$$k_{ym} = 0.550 \text{ m}$$

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**LAMPIRAN B**  
**SCRIPT FAST FOURIER TRANSFORM**  
**PADA MATLAB**



```

clc;clear;close all
%SCRIPT TUGAS AKHIR EKPERIMEN SPAR%
filename = uigetfile('S*2.xls','Pilih File');
A1 = xlsread(filename);

sfr = 50;
skala = 125;
delt = 1/sfr;

for i=1:7
    if i<=4
        A(:,i)=A1(:,i+1)/100*skala;
    else
        A(:,i)=A1(:,i+1);
    end
    subplot(7,1,i)
    plot(A(:,i));grid

    y = A(:,i);
    n = length(y);
    fmint=1/(n*delt);
    ft=fmint*(0:round(n/2));
    fmin=1/(n*delt);
    Y=fft(y);
    YP=Y(1:round(n/2)+1);
    za=(2*sqrt(YP.*conj(YP)))/n;
    S(:,i)=(za.*za)/(2*fmin);

    Ws = (2*pi*ft)/sqrt(skala);
    Ws2 = Ws.*Ws;
    Ws4 = Ws.*Ws.*Ws.*Ws.*Ws;
    Ss(:,i)=S(:,i)/(2*pi)*sqrt(skala);
    Ss2(:,i)=Ws2'.*Ss(:,i);
    Ss4(:,i)=Ws4'.*Ss(:,i);

end

w = A(:,1);
x = A(:,2);
y = A(:,3);
z = A(:,4);
xr = A(:,5);
yr = A(:,6);
zr = A(:,7);

Sw = Ss(:,1);
Sw2= Ss2(:,1);
Sw4= Ss4(:,1);
Sx = Ss(:,2);
Sy = Ss(:,3);
Sz = Ss(:,4);
Sxr = Ss(:,5);
Syr = Ss(:,6);

```

```

Szr = Ss(:,7);

m0 = trapz(Ws,Sw);
m2 = trapz(Ws,Sw2);
m4 = trapz(Ws,Sw4);
Tpw = 2*pi*sqrt(m2/m4);

Hsw = 4*sqrt(trapz(Ws,Sw));
Hsx = 4*sqrt(trapz(Ws,Sx));
Hsy = 4*sqrt(trapz(Ws,Sy));
Hsz = 4*sqrt(trapz(Ws,Sz));
Hsxr = 4*sqrt(trapz(Ws,Sxr));
Hsyr = 4*sqrt(trapz(Ws,Syr));
Hszr = 4*sqrt(trapz(Ws,Szr));

figure
plot(Ws,Sw);grid; axis([0.2 1.5 0 45]);
title('Wave Spectrum');
xlabel('frequency, W (rad/s)'),ylabel('Sw(w) (m2/(rad/s))')

figure
plot(Ws,Sx);grid; axis([0.2 1.5 0 15]);
title('Surge Spectrum');
xlabel('frequency, W (rad/s)'),ylabel('Sx(w) (m2/(rad/s))')

figure
plot(Ws,Sy);grid; axis([0.2 1.5 0 1]);
title('Sway Spectrum');
xlabel('frequency, W (rad/s)'),ylabel('Sy(w) (m2/(rad/s))')

figure
plot(Ws,Sz);grid; axis([0.2 1.5 0 18]);
title('Heave Spectrum');
xlabel('frequency, W (rad/s)'),ylabel('Sz(w) (m2/(rad/s))')

figure
plot(Ws,Sxr);grid; axis([0.2 1.5 0 0.5]);
title('Roll Spectrum');
xlabel('frequency, W (rad/s)'),ylabel('Sxr(w) (deg/(rad/s))')

figure
plot(Ws,Syr);grid; axis([0.2 1.5 0 10]);
title('Pitch Spectrum');
xlabel('frequency, W (rad/s)'),ylabel('Syr(w) (deg/(rad/s))')

figure
plot(Ws,Szr);grid; axis([0.2 1.5 0 10]);
title('Yaw Spectrum');
xlabel('frequency, W (rad/s)'),ylabel('Szr(w) (deg/(rad/s))')

```

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**LAMPIRAN C**  
**PERHITUNGAN VALIDASI**  
**GELOMBANG UJI**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

TABULASI GELOMBANG TEORITIS										
w(rad/s)	Sw (m2/(rad/s))	SM		S*SM		w*S*SM		(w^2)*S*SM		(w^4)*S*SM
0.05	0	1		0		0		0		0
0.09265	2.039E-188	4		8.2E-188		7.6E-189		7E-190		6E-192
0.1353	3.881E-47	2		7.76E-47		1.05E-47		1.42E-48		2.6E-50
0.1779	6.902E-16	4		2.76E-15		4.91E-16		8.74E-17		2.77E-18
0.2206	0.00000734	2		1.47E-05		3.24E-06		7.14E-07		3.48E-08
0.2632	0.02702	4		0.10808		0.028447		0.007487		0.000519
0.3059	0.7188	2		1.4376		0.439762		0.134523		0.012588
0.3485	2.928	4		11.712		4.081632		1.422449		0.17276
0.3912	7.673	2		15.346		6.003355		2.348513		0.35941
0.4338	17.82	4		71.28		30.92126		13.41364		2.524212
0.4765	9.704	2		19.408		9.247912		4.40663		1.000535
0.5191	4.698	4		18.792		9.754927		5.063783		1.364511
0.5618	3.369	2		6.738		3.785408		2.126642		0.671209
0.6044	2.601	4		10.404		6.288178		3.800575		1.388347
0.6471	2.002	2		4.004		2.590988		1.676629		0.702069
0.6897	1.539	4		6.156		4.245793		2.928324		1.392963
0.7324	1.189	2		2.378		1.741647		1.275582		0.684235
0.775	0.9243	4		3.6972		2.86533		2.220631		1.333766
0.8176	0.7239	2		1.4478		1.183721		0.967811		0.646952
0.8603	0.5715	4		2.286		1.966646		1.691905		1.252206
0.9029	0.4553	2		0.9106		0.822181		0.742347		0.605182
0.9456	0.3655	4		1.462		1.382467		1.307261		1.1689
0.9882	0.2958	2		0.5916		0.584619		0.577721		0.564167
1.031	0.2411	4		0.9644		0.994296		1.02512		1.089662
1.074	0.1981	2		0.3962		0.425519		0.457007		0.527147
1.116	0.1638	4		0.6552		0.731203		0.816023		1.01632
1.159	0.1363	2		0.2726		0.315943		0.366178		0.49188
1.201	0.1142	4		0.4568		0.548617		0.658889		0.950382
1.244	0.09617	2		0.19234		0.239271		0.297653		0.460629
1.287	0.08144	4		0.32576		0.419253		0.539579		0.893742
1.329	0.06931	2		0.13862		0.184226		0.244836		0.43244
1.372	0.05929	4		0.23716		0.325384		0.446426		0.840346
1.415	0.05096	2		0.10192		0.144217		0.204067		0.408588
1.457	0.04398	4		0.17592		0.256315		0.373452		0.792781
1.5	0.03811	1		0.03811		0.057165		0.085748		0.192932
RESULTAN			E0	177.2677	E1	92.57569	E2	51.62743	E4	23.94138

Gamma 3.3  
dw 0.043 rad/s  
m0 2.520 m2  
m1 1.316 m2  
m2 0.734 m2  
m4 0.340 m2

Hs 6.35 m  
Tm 12.031 m  
Tp 14.413 s

**LAMPIRAN D**  
**OUTPUT MOSES**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



+++ HYDROSTATIC PROPERTIES +++  
 =====

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac-/ KN	/-- Center Of Buoyancy --/ /			W.P. / Area	/ /C. Flotation / /		/---- -KMT-	Metacentric Heights			
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---		-KML-	-BMT-	-BML-	
0.00	0.00	0.00	0.00	-5.52	-0.00	-0.00	138.058	-3.98	-0.00	99999.99	99999.99	99999.99	99999.99	
1.39	0.00	0.00	3858.30	-0.00	-0.00	0.69	276.117	-0.00	0.00	16.51	16.51	15.82	15.82	
2.78	0.00	0.00	7716.60	-0.00	-0.00	1.39	276.117	-0.00	0.00	9.30	9.30	7.91	7.91	
4.17	0.00	0.00	11574.91	-0.00	0.00	2.08	276.117	-0.00	0.00	7.36	7.36	5.27	5.27	
5.56	0.00	0.00	15433.21	-0.00	0.00	2.78	276.117	-0.00	0.00	6.73	6.73	3.95	3.95	
6.94	0.00	0.00	19178.79	-0.00	0.00	3.45	240.528	-0.00	0.00	5.87	5.87	2.41	2.41	
8.33	0.00	0.00	22539.79	-0.00	0.00	4.08	240.528	-0.00	0.00	6.13	6.13	2.05	2.05	
9.72	0.00	0.00	25900.80	-0.00	0.00	4.72	240.528	-0.00	0.00	6.51	6.51	1.79	1.79	
11.11	0.00	0.00	29261.80	-0.00	0.00	5.37	240.528	-0.00	0.00	6.96	6.96	1.58	1.58	
12.50	0.00	0.00	32622.80	-0.00	0.00	6.04	240.528	-0.00	0.00	7.46	7.46	1.42	1.42	
13.89	0.00	0.00	35983.80	-0.00	0.00	6.71	240.528	-0.00	0.00	7.99	7.99	1.29	1.29	
15.28	0.00	0.00	39344.80	-0.00	0.00	7.38	240.528	-0.00	0.00	8.56	8.56	1.18	1.18	
16.67	0.00	0.00	42705.84	-0.00	0.00	8.05	240.528	-0.00	0.00	9.14	9.14	1.08	1.08	
18.06	0.00	0.00	46066.89	-0.00	0.00	8.73	240.528	-0.00	0.00	9.74	9.74	1.01	1.01	
19.45	0.00	0.00	49427.80	-0.00	0.00	9.41	240.528	-0.00	0.00	10.35	10.35	0.94	0.94	
20.83	0.00	0.00	52788.89	-0.00	0.00	10.10	240.528	-0.00	0.00	10.98	10.98	0.88	0.88	
22.22	0.00	0.00	56149.80	-0.00	0.00	10.78	240.528	-0.00	0.00	11.61	11.61	0.82	0.82	
23.61	0.00	0.00	59510.89	-0.00	0.00	11.47	240.528	-0.00	0.00	12.25	12.25	0.78	0.78	
25.00	0.00	0.00	62871.98	-0.00	0.00	12.15	240.528	-0.00	0.00	12.89	12.89	0.74	0.74	
26.39	0.00	0.00	66232.89	-0.00	0.00	12.84	240.528	-0.00	0.00	13.54	13.54	0.70	0.70	
27.78	0.00	0.00	69593.98	-0.00	0.00	13.53	240.528	-0.00	0.00	14.19	14.19	0.67	0.67	
29.17	0.00	0.00	72954.88	-0.00	0.00	14.22	240.528	-0.00	0.00	14.85	14.85	0.63	0.63	
30.56	0.00	0.00	76315.98	-0.00	0.00	14.91	240.528	-0.00	0.00	15.51	15.51	0.61	0.61	
31.95	0.00	0.00	79676.89	-0.00	0.00	15.60	240.528	-0.00	0.00	16.18	16.18	0.58	0.58	
33.34	0.00	0.00	83037.98	-0.00	0.00	16.29	240.528	-0.00	0.00	16.84	16.84	0.56	0.56	
34.72	0.00	0.00	86399.03	-0.00	0.00	16.98	240.528	-0.00	0.00	17.51	17.51	0.54	0.54	
36.11	0.00	0.00	89759.80	-0.00	0.00	17.67	240.528	-0.00	0.00	18.18	18.18	0.52	0.52	
37.50	0.00	0.00	93120.89	-0.00	0.00	18.36	240.528	-0.00	0.00	18.85	18.85	0.50	0.50	
38.89	0.00	0.00	96481.98	-0.00	0.00	19.05	240.528	-0.00	0.00	19.53	19.53	0.48	0.48	
40.28	0.00	0.00	99843.07	-0.00	0.00	19.74	240.528	-0.00	0.00	20.20	20.20	0.46	0.46	
41.67	0.00	0.00	103204.17	-0.00	0.00	20.43	240.528	-0.00	0.00	20.88	20.88	0.45	0.45	
43.06	0.00	0.00	106564.88	-0.00	0.00	21.12	240.528	-0.00	0.00	21.56	21.56	0.43	0.43	
44.45	0.00	0.00	109925.98	-0.00	0.00	21.82	240.528	-0.00	0.00	22.24	22.24	0.42	0.42	
45.84	0.00	0.00	113287.07	-0.00	0.00	22.51	240.528	-0.00	0.00	22.92	22.92	0.41	0.41	
47.22	0.00	0.00	116648.17	-0.00	0.00	23.20	240.528	-0.00	0.00	23.60	23.60	0.40	0.40	
48.61	0.00	0.00	120008.88	-0.00	0.00	23.89	240.528	-0.00	0.00	24.28	24.28	0.39	0.39	
50.00	0.00	0.00	123369.97	-0.00	0.00	24.58	240.528	-0.00	0.00	24.96	24.96	0.38	0.38	
51.39	0.00	0.00	126731.06	-0.00	0.00	25.28	240.528	-0.00	0.00	25.64	25.64	0.37	0.37	
52.78	0.00	0.00	130092.16	-0.00	0.00	25.97	240.528	-0.00	0.00	26.33	26.33	0.36	0.36	
54.17	0.00	0.00	133453.23	-0.00	0.00	26.66	240.528	-0.00	0.00	27.01	27.01	0.35	0.35	
55.56	0.00	0.00	136813.98	-0.00	0.00	27.35	240.528	-0.00	0.00	27.69	27.69	0.34	0.34	
56.95	0.00	0.00	140175.09	-0.00	0.00	28.05	240.528	-0.00	0.00	28.38	28.38	0.33	0.33	
58.34	0.00	0.00	143536.19	-0.00	0.00	28.74	240.528	-0.00	0.00	29.06	29.06	0.32	0.32	
59.73	0.00	0.00	146897.30	-0.00	0.00	29.43	240.528	-0.00	0.00	29.75	29.75	0.32	0.32	
61.11	0.00	0.00	150258.02	-0.00	0.00	30.13	240.528	-0.00	0.00	30.43	30.43	0.31	0.31	
62.50	0.00	0.00	153619.12	-0.00	0.00	30.82	240.528	-0.00	0.00	31.12	31.12	0.30	0.30	
63.89	0.00	0.00	156980.22	-0.00	0.00	31.51	240.528	-0.00	0.00	31.81	31.81	0.30	0.30	
65.28	0.00	0.00	160341.33	-0.00	0.00	32.21	240.528	-0.00	0.00	32.50	32.50	0.29	0.29	
66.67	0.00	0.00	163702.09	-0.00	0.00	32.90	240.528	-0.00	0.00	33.18	33.18	0.28	0.28	
68.06	0.00	0.00	167063.36	-0.00	0.00	33.59	240.528	-0.00	0.00	33.87	33.87	0.28	0.28	
69.45	0.00	0.00	170424.25	-0.00	0.00	34.29	240.528	-0.00	0.00	34.56	34.56	0.27	0.27	
70.84	0.00	0.00	173785.05	-0.00	0.00	34.98	240.528	-0.00	0.00	35.25	35.25	0.27	0.27	

+++ HYDROSTATIC PROPERTIES +++  
 =====

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac- KN	/-- Center Of Buoyancy --/ /			W.P. / Area	/ /C. Flotation / /		/---- Metacentric Heights			----/ -BML-
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	
72.23	0.00	0.00	177146.45	-0.00	0.00	35.67	240.528	-0.00	0.00	35.93	35.93	0.26	0.26
73.61	0.00	0.00	180507.20	-0.00	0.00	36.37	240.528	-0.00	0.00	36.62	36.62	0.26	0.26
75.00	0.00	0.00	183868.66	-0.00	0.00	37.06	240.528	-0.00	0.00	37.31	37.31	0.25	0.25
76.39	0.00	0.00	187229.39	-0.00	0.00	37.75	240.528	-0.00	0.00	38.00	38.00	0.25	0.25
77.78	0.00	0.00	190590.12	-0.00	0.00	38.45	240.528	-0.00	0.00	38.69	38.69	0.24	0.24
79.17	0.00	0.00	193951.59	-0.00	0.00	39.14	240.528	-0.00	0.00	39.38	39.38	0.24	0.24
80.56	0.00	0.00	197312.33	-0.00	0.00	39.84	240.528	-0.00	0.00	40.07	40.07	0.23	0.23
81.95	0.00	0.00	200673.20	-0.00	0.00	40.53	240.528	-0.00	0.00	40.76	40.76	0.23	0.23
83.34	0.00	0.00	204034.53	-0.00	0.00	41.22	240.528	-0.00	0.00	41.45	41.45	0.23	0.23
84.73	0.00	0.00	207395.25	-0.00	0.00	41.92	240.528	-0.00	0.00	42.14	42.14	0.22	0.22
86.12	0.00	0.00	210756.75	-0.00	0.00	42.61	240.528	-0.00	0.00	42.83	42.83	0.22	0.22
87.50	0.00	0.00	214117.45	-0.00	0.00	43.30	240.528	-0.00	0.00	43.52	43.52	0.22	0.22
88.89	0.00	0.00	217478.19	-0.00	0.00	44.00	240.528	-0.00	0.00	44.21	44.21	0.21	0.21
90.28	0.00	0.00	220839.66	-0.00	0.00	44.69	240.528	-0.00	0.00	44.90	44.90	0.21	0.21
91.67	0.00	0.00	224200.39	-0.00	0.00	45.39	240.528	-0.00	0.00	45.59	45.59	0.21	0.21
93.06	0.00	0.00	227561.86	-0.00	0.00	46.08	240.528	-0.00	0.00	46.28	46.28	0.20	0.20
94.45	0.00	0.00	230922.59	-0.00	0.00	46.77	240.528	-0.00	0.00	46.97	46.97	0.20	0.20
95.84	0.00	0.00	234283.33	-0.00	0.00	47.47	240.528	-0.00	0.00	47.66	47.66	0.20	0.20
97.23	0.00	0.00	237644.80	-0.00	0.00	48.16	240.528	-0.00	0.00	48.36	48.36	0.19	0.19
98.62	0.00	0.00	241005.53	-0.00	0.00	48.86	240.528	-0.00	0.00	49.05	49.05	0.19	0.19
100.01	0.00	0.00	244366.52	-0.00	0.00	49.55	240.528	-0.00	0.00	49.74	49.74	0.19	0.19
101.39	0.00	0.00	247727.73	-0.00	0.00	50.24	240.528	-0.00	0.00	50.43	50.43	0.19	0.19
102.78	0.00	0.00	251088.44	-0.00	0.00	50.94	240.528	-0.00	0.00	51.12	51.12	0.18	0.18
104.17	0.00	0.00	254449.94	-0.00	0.00	51.63	240.528	-0.00	0.00	51.81	51.81	0.18	0.18
105.56	0.00	0.00	257810.64	-0.00	0.00	52.33	240.528	-0.00	0.00	52.50	52.50	0.18	0.18
106.95	0.00	0.00	261171.38	-0.00	0.00	53.02	240.528	-0.00	0.00	53.20	53.20	0.18	0.18
108.34	0.00	0.00	264532.88	-0.00	0.00	53.71	240.528	-0.00	0.00	53.89	53.89	0.18	0.18
109.73	0.00	0.00	267893.59	-0.00	0.00	54.41	240.528	-0.00	0.00	54.58	54.58	0.17	0.17
111.12	0.00	0.00	271255.06	-0.00	0.00	55.10	240.528	-0.00	0.00	55.27	55.27	0.17	0.17
112.51	0.00	0.00	274615.78	-0.00	0.00	55.80	240.528	-0.00	0.00	55.96	55.96	0.17	0.17
113.89	0.00	0.00	277976.50	-0.00	0.00	56.49	240.528	-0.00	0.00	56.66	56.66	0.17	0.17
115.28	0.00	0.00	281338.00	-0.00	0.00	57.18	240.528	-0.00	0.00	57.35	57.35	0.16	0.16
116.67	0.00	0.00	284698.72	-0.00	0.00	57.88	240.528	-0.00	0.00	58.04	58.04	0.16	0.16
118.06	0.00	0.00	288059.91	-0.00	0.00	58.57	240.528	-0.00	0.00	58.73	58.73	0.16	0.16
119.45	0.00	0.00	291420.94	-0.00	0.00	59.27	240.528	-0.00	0.00	59.42	59.42	0.16	0.16
120.84	0.00	0.00	294781.66	-0.00	0.00	59.96	240.528	-0.00	0.00	60.12	60.12	0.16	0.16
122.23	0.00	0.00	298143.12	-0.00	0.00	60.65	240.528	-0.00	0.00	60.81	60.81	0.16	0.16
123.62	0.00	0.00	301503.84	-0.00	0.00	61.35	240.528	-0.00	0.00	61.50	61.50	0.15	0.15
125.01	0.00	0.00	304864.59	-0.00	0.00	62.04	240.528	-0.00	0.00	62.19	62.19	0.15	0.15
126.40	0.00	0.00	308226.06	-0.00	0.00	62.74	240.528	-0.00	0.00	62.89	62.89	0.15	0.15
127.78	0.00	0.00	311586.81	-0.00	0.00	63.43	240.528	-0.00	0.00	63.58	63.58	0.15	0.15
129.17	0.00	0.00	314948.25	-0.00	0.00	64.13	240.528	-0.00	0.00	64.27	64.27	0.15	0.15
130.56	0.00	0.00	318308.94	-0.00	0.00	64.82	240.528	-0.00	0.00	64.96	64.96	0.15	0.15
131.95	0.00	0.00	321669.72	-0.00	0.00	65.51	240.528	-0.00	0.00	65.66	65.66	0.14	0.14
133.34	0.00	0.00	325031.22	-0.00	0.00	66.21	240.528	-0.00	0.00	66.35	66.35	0.14	0.14
134.73	0.00	0.00	328392.25	-0.00	0.00	66.90	240.528	-0.00	0.00	67.04	67.04	0.14	0.14
136.12	0.00	0.00	331752.91	-0.00	0.00	67.60	240.528	-0.00	0.00	67.74	67.74	0.14	0.14
137.51	0.00	0.00	335114.12	-0.00	0.00	68.29	240.528	-0.00	0.00	68.43	68.43	0.14	0.14
138.90	0.00	0.00	338475.38	-0.00	0.00	68.98	240.528	-0.00	0.00	69.12	69.12	0.14	0.14

+++ HYDROSTATIC PROPERTIES +++  
 =====

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac- KN	/-- Center Of Buoyancy --/ /			W.P. Area	/C. Flotation /			Metacentric Heights			
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	-BML-	
0.00	0.00	0.00	0.00	-6.70	-0.00	-0.00	203.246	-4.83	-0.00	99999.99	99999.99	99999.99	99999.99	
1.40	0.00	0.00	4701.81	-0.00	-0.00	0.63	276.116	-0.00	-0.00	13.61	13.61	12.98	12.98	
2.79	0.00	0.00	8577.50	-0.00	0.00	1.29	276.116	-0.00	-0.00	8.41	8.41	7.12	7.12	
4.19	0.00	0.00	12453.20	-0.00	-0.00	1.97	276.116	-0.00	-0.00	6.88	6.88	4.90	4.90	
5.58	0.00	0.00	16328.89	-0.00	-0.00	2.67	276.116	-0.00	-0.00	6.40	6.40	3.74	3.74	
6.98	0.00	0.00	20204.59	-0.00	-0.00	3.36	276.116	-0.00	-0.00	6.38	6.38	3.02	3.02	
8.37	0.00	0.00	23680.57	-0.00	-0.00	3.99	240.528	-0.00	-0.00	5.95	5.95	1.96	1.96	
9.77	0.00	0.00	27056.72	-0.00	-0.00	4.62	240.528	-0.00	-0.00	6.34	6.34	1.71	1.71	
11.16	0.00	0.00	30432.90	-0.00	-0.00	5.27	240.528	-0.00	-0.00	6.79	6.79	1.52	1.52	
12.56	0.00	0.00	33809.02	-0.00	-0.00	5.93	240.528	-0.00	-0.00	7.30	7.30	1.37	1.37	
13.95	0.00	0.00	37185.25	-0.00	-0.00	6.59	240.528	-0.00	-0.00	7.84	7.84	1.25	1.25	
15.35	0.00	0.00	40561.31	-0.00	-0.00	7.26	240.528	-0.00	-0.00	8.41	8.41	1.14	1.14	
16.74	0.00	0.00	43937.48	-0.00	-0.00	7.94	240.528	-0.00	-0.00	8.99	8.99	1.05	1.05	
18.14	0.00	0.00	47313.79	-0.00	-0.00	8.62	240.528	-0.00	-0.00	9.60	9.60	0.98	0.98	
19.53	0.00	0.00	50689.81	-0.00	-0.00	9.30	240.528	-0.00	-0.00	10.21	10.21	0.91	0.91	
20.93	0.00	0.00	54065.97	-0.00	-0.00	9.98	240.528	-0.00	-0.00	10.84	10.84	0.86	0.86	
22.32	0.00	0.00	57442.16	-0.00	-0.00	10.67	240.528	-0.00	-0.00	11.47	11.47	0.81	0.81	
23.72	0.00	0.00	60818.35	-0.00	-0.00	11.35	240.528	-0.00	-0.00	12.11	12.11	0.76	0.76	
25.11	0.00	0.00	64194.45	-0.00	-0.00	12.04	240.528	-0.00	-0.00	12.76	12.76	0.72	0.72	
26.51	0.00	0.00	67570.63	-0.00	-0.00	12.73	240.528	-0.00	-0.00	13.41	13.41	0.69	0.69	
27.90	0.00	0.00	70946.80	-0.00	-0.00	13.42	240.528	-0.00	-0.00	14.07	14.07	0.65	0.65	
29.30	0.00	0.00	74322.97	-0.00	-0.00	14.11	240.528	-0.00	-0.00	14.73	14.73	0.62	0.62	
30.69	0.00	0.00	77698.94	-0.00	-0.00	14.80	240.528	-0.00	-0.00	15.39	15.39	0.60	0.60	
32.09	0.00	0.00	81075.12	-0.00	-0.00	15.49	240.528	-0.00	-0.00	16.06	16.06	0.57	0.57	
33.49	0.00	0.00	84451.16	-0.00	-0.00	16.18	240.528	-0.00	-0.00	16.73	16.73	0.55	0.55	
34.88	0.00	0.00	87827.55	-0.00	-0.00	16.87	240.528	-0.00	-0.00	17.40	17.40	0.53	0.53	
36.28	0.00	0.00	91203.77	-0.00	-0.00	17.56	240.528	-0.00	-0.00	18.07	18.07	0.51	0.51	
37.67	0.00	0.00	94579.95	-0.00	-0.00	18.26	240.528	-0.00	-0.00	18.75	18.75	0.49	0.49	
39.07	0.00	0.00	97956.12	-0.00	0.00	18.95	240.528	-0.00	-0.00	19.42	19.42	0.47	0.47	
40.46	0.00	0.00	101332.28	-0.00	-0.00	19.64	240.528	-0.00	-0.00	20.10	20.10	0.46	0.46	
41.86	0.00	0.00	104708.45	-0.00	-0.00	20.34	240.528	-0.00	-0.00	20.78	20.78	0.44	0.44	
43.25	0.00	0.00	108084.60	-0.00	-0.00	21.03	240.528	-0.00	-0.00	21.46	21.46	0.43	0.43	
44.65	0.00	0.00	111460.41	-0.00	-0.00	21.72	240.528	-0.00	-0.00	22.14	22.14	0.42	0.42	
46.04	0.00	0.00	114836.57	-0.00	-0.00	22.42	240.528	-0.00	-0.00	22.82	22.82	0.40	0.40	
47.44	0.00	0.00	118212.80	-0.00	-0.00	23.11	240.528	-0.00	-0.00	23.51	23.51	0.39	0.39	
48.83	0.00	0.00	121589.11	-0.00	-0.00	23.81	240.528	-0.00	-0.00	24.19	24.19	0.38	0.38	
50.23	0.00	0.00	124965.27	-0.00	-0.00	24.50	240.528	-0.00	-0.00	24.87	24.87	0.37	0.37	
51.62	0.00	0.00	128341.40	-0.00	-0.00	25.20	240.528	-0.00	-0.00	25.56	25.56	0.36	0.36	
53.02	0.00	0.00	131717.55	-0.00	-0.00	25.89	240.528	-0.00	-0.00	26.25	26.25	0.35	0.35	
54.41	0.00	0.00	135093.91	-0.00	-0.00	26.59	240.528	-0.00	-0.00	26.93	26.93	0.34	0.34	
55.81	0.00	0.00	138469.91	-0.00	-0.00	27.28	240.528	-0.00	-0.00	27.62	27.62	0.33	0.33	
57.20	0.00	0.00	141846.17	-0.00	-0.00	27.98	240.528	-0.00	-0.00	28.31	28.31	0.33	0.33	
58.60	0.00	0.00	145222.36	-0.00	-0.00	28.68	240.528	-0.00	-0.00	28.99	28.99	0.32	0.32	
59.99	0.00	0.00	148598.55	-0.00	-0.00	29.37	240.528	-0.00	-0.00	29.68	29.68	0.31	0.31	
61.39	0.00	0.00	151974.73	-0.00	-0.00	30.07	240.528	-0.00	-0.00	30.37	30.37	0.30	0.30	
62.78	0.00	0.00	155350.92	-0.00	-0.00	30.76	240.528	-0.00	-0.00	31.06	31.06	0.30	0.30	
64.18	0.00	0.00	158727.06	-0.00	-0.00	31.46	240.528	-0.00	-0.00	31.75	31.75	0.29	0.29	
65.58	0.00	0.00	162103.17	-0.00	-0.00	32.15	240.528	-0.00	-0.00	32.44	32.44	0.29	0.29	

7 July, 2019

+++ HYDROSTATIC PROPERTIES +++  
 =====

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac-/ KN	/-- Center Of Buoyancy --/ /			W.P. / Area	/C. Flotation /		/---- Metacentric Heights			----/ -BML-
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	
66.97	0.00	0.00	165479.06	-0.00	0.00	32.85	240.528	-0.00	-0.00	33.13	33.13	0.28	0.28
68.37	0.00	0.00	168855.44	-0.00	-0.00	33.55	240.528	-0.00	-0.00	33.82	33.82	0.27	0.27
69.76	0.00	0.00	172231.36	-0.00	-0.00	34.24	240.528	-0.00	-0.00	34.51	34.51	0.27	0.27
71.16	0.00	0.00	175607.67	-0.00	-0.00	34.94	240.528	-0.00	-0.00	35.20	35.20	0.26	0.26
72.55	0.00	0.00	178983.70	-0.00	0.00	35.64	240.528	-0.00	-0.00	35.89	35.89	0.26	0.26
73.95	0.00	0.00	182359.48	-0.00	-0.00	36.33	240.528	-0.00	-0.00	36.59	36.59	0.25	0.25
75.34	0.00	0.00	185736.03	-0.00	-0.00	37.03	240.528	-0.00	-0.00	37.28	37.28	0.25	0.25
76.74	0.00	0.00	189111.83	-0.00	-0.00	37.73	240.528	-0.00	-0.00	37.97	37.97	0.24	0.24
78.13	0.00	0.00	192488.36	-0.00	-0.00	38.42	240.528	-0.00	-0.00	38.66	38.66	0.24	0.24
79.53	0.00	0.00	195864.17	-0.00	-0.00	39.12	240.528	-0.00	-0.00	39.35	39.35	0.24	0.24
80.92	0.00	0.00	199240.91	-0.00	-0.00	39.81	240.528	-0.00	-0.00	40.05	40.05	0.23	0.23
82.32	0.00	0.00	202617.08	-0.00	-0.00	40.51	240.528	-0.00	-0.00	40.74	40.74	0.23	0.23
83.71	0.00	0.00	205992.92	-0.00	-0.00	41.21	240.528	-0.00	-0.00	41.43	41.43	0.22	0.22
85.11	0.00	0.00	209369.55	-0.00	-0.00	41.90	240.528	-0.00	-0.00	42.13	42.13	0.22	0.22
86.50	0.00	0.00	212745.34	-0.00	-0.00	42.60	240.528	-0.00	-0.00	42.82	42.82	0.22	0.22
87.90	0.00	0.00	216121.91	-0.00	-0.00	43.30	240.528	-0.00	-0.00	43.51	43.51	0.21	0.21
89.29	0.00	0.00	219497.62	-0.00	-0.00	43.99	240.528	-0.00	-0.00	44.21	44.21	0.21	0.21
90.69	0.00	0.00	222874.23	-0.00	-0.00	44.69	240.528	-0.00	-0.00	44.90	44.90	0.21	0.21
92.08	0.00	0.00	226249.89	-0.00	-0.00	45.39	240.528	-0.00	-0.00	45.59	45.59	0.20	0.20
93.48	0.00	0.00	229626.05	-0.00	-0.00	46.09	240.528	-0.00	-0.00	46.29	46.29	0.20	0.20
94.87	0.00	0.00	233002.34	-0.00	-0.00	46.78	240.528	-0.00	-0.00	46.98	46.98	0.20	0.20
96.27	0.00	0.00	236378.14	-0.00	0.00	47.48	240.528	-0.00	-0.00	47.67	47.67	0.20	0.20
97.67	0.00	0.00	239754.89	-0.00	-0.00	48.18	240.528	-0.00	-0.00	48.37	48.37	0.19	0.19
99.06	0.00	0.00	243130.47	-0.00	-0.00	48.87	240.528	-0.00	-0.00	49.06	49.06	0.19	0.19
100.46	0.00	0.00	246507.31	-0.00	-0.00	49.57	240.528	-0.00	-0.00	49.76	49.76	0.19	0.19
101.85	0.00	0.00	249882.78	-0.00	-0.00	50.27	240.528	-0.00	-0.00	50.45	50.45	0.19	0.19
103.25	0.00	0.00	253259.72	-0.00	-0.00	50.96	240.528	-0.00	-0.00	51.15	51.15	0.18	0.18
104.64	0.00	0.00	256635.14	-0.00	-0.00	51.66	240.528	-0.00	-0.00	51.84	51.84	0.18	0.18
106.04	0.00	0.00	260011.34	-0.00	-0.00	52.36	240.528	-0.00	-0.00	52.54	52.54	0.18	0.18
107.43	0.00	0.00	263387.59	-0.00	-0.00	53.05	240.528	-0.00	-0.00	53.23	53.23	0.18	0.18
108.83	0.00	0.00	266763.91	-0.00	-0.00	53.75	240.528	-0.00	-0.00	53.93	53.93	0.17	0.17
110.22	0.00	0.00	270140.09	-0.00	-0.00	54.45	240.528	-0.00	-0.00	54.62	54.62	0.17	0.17
111.62	0.00	0.00	273516.41	-0.00	-0.00	55.15	240.528	-0.00	-0.00	55.31	55.31	0.17	0.17
113.01	0.00	0.00	276892.41	-0.00	-0.00	55.84	240.528	-0.00	-0.00	56.01	56.01	0.17	0.17
114.41	0.00	0.00	280268.81	-0.00	-0.00	56.54	240.528	-0.00	-0.00	56.71	56.71	0.17	0.17
115.80	0.00	0.00	283644.03	-0.00	-0.00	57.24	240.528	-0.00	-0.00	57.40	57.40	0.16	0.16
117.20	0.00	0.00	287021.22	-0.00	-0.00	57.93	240.528	-0.00	-0.00	58.10	58.10	0.16	0.16
118.59	0.00	0.00	290396.38	-0.00	-0.00	58.63	240.528	-0.00	-0.00	58.79	58.79	0.16	0.16
119.99	0.00	0.00	293773.59	-0.00	-0.00	59.33	240.528	-0.00	-0.00	59.49	59.49	0.16	0.16
121.38	0.00	0.00	297148.75	-0.00	-0.00	60.03	240.528	-0.00	-0.00	60.18	60.18	0.16	0.16
122.78	0.00	0.00	300526.00	-0.00	-0.00	60.72	240.528	-0.00	-0.00	60.88	60.88	0.15	0.15
124.17	0.00	0.00	303901.38	-0.00	-0.00	61.42	240.528	-0.00	-0.00	61.57	61.57	0.15	0.15
125.57	0.00	0.00	307277.91	-0.00	-0.00	62.12	240.528	-0.00	-0.00	62.27	62.27	0.15	0.15
126.97	0.00	0.00	310654.56	-0.00	-0.00	62.81	240.528	-0.00	-0.00	62.96	62.96	0.15	0.15
128.36	0.00	0.00	314030.03	-0.00	-0.00	63.51	240.528	-0.00	-0.00	63.66	63.66	0.15	0.15
129.76	0.00	0.00	317407.00	-0.00	-0.00	64.21	240.528	-0.00	-0.00	64.35	64.35	0.15	0.15
131.15	0.00	0.00	320782.34	-0.00	-0.00	64.91	240.528	-0.00	-0.00	65.05	65.05	0.14	0.14
132.55	0.00	0.00	324159.31	-0.00	-0.00	65.60	240.528	-0.00	-0.00	65.75	65.75	0.14	0.14

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                                     *
*      MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE DP/DS 1.3             *
*      OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Nur Muhammad Hanif *
*                                                                              *
*****

```

7 July, 2019

+++ H Y D R O S T A T I C P R O P E R T I E S +++

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac-/ KN	/-- Center Of Buoyancy --/ /			W.P. / Area	/C. Flotation /		/---- Metacentric Heights ----/			
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	-BML-
133.94	0.00	0.00	327535.03	-0.00	0.00	66.30	240.528	-0.00	-0.00	66.44	66.44	0.14	0.14
135.34	0.00	0.00	330911.97	-0.00	-0.00	67.00	240.528	-0.00	-0.00	67.14	67.14	0.14	0.14
136.73	0.00	0.00	334287.09	-0.00	0.00	67.69	240.528	-0.00	-0.00	67.83	67.83	0.14	0.14
138.13	0.00	0.00	337663.62	-0.00	-0.00	68.39	240.528	-0.00	-0.00	68.53	68.53	0.14	0.14
139.52	0.00	0.00	341038.97	-0.00	-0.00	69.09	240.528	-0.00	-0.00	69.22	69.22	0.14	0.14

+++ HYDROSTATIC PROPERTIES +++  
 =====

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac- KN	/-- Center Of Buoyancy --/ /			W.P. Area	/C. Flotation /		/--- -KMT-	Metacentric Heights			
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---		-KML-	-BMT-	-BML-	
0.00	0.00	0.00	0.00	-7.22	-0.00	-0.00	235.718	-5.20	-0.00	99999.99	99999.99	99999.99	99999.99	
1.40	0.00	0.00	5113.19	-0.00	-0.00	0.60	276.117	-0.00	-0.00	12.54	12.54	11.94	11.94	
2.79	0.00	0.00	8988.88	-0.00	-0.00	1.25	276.117	-0.00	-0.00	8.04	8.04	6.79	6.79	
4.19	0.00	0.00	12864.57	-0.00	-0.00	1.92	276.117	-0.00	-0.00	6.67	6.67	4.74	4.74	
5.58	0.00	0.00	16740.26	-0.00	-0.00	2.61	276.117	-0.00	-0.00	6.25	6.25	3.65	3.65	
6.98	0.00	0.00	20615.93	-0.00	-0.00	3.30	276.117	-0.00	-0.00	6.26	6.26	2.96	2.96	
8.37	0.00	0.00	24091.95	-0.00	-0.00	3.93	240.528	-0.00	-0.00	5.85	5.85	1.92	1.92	
9.77	0.00	0.00	27468.07	-0.00	-0.00	4.56	240.528	-0.00	-0.00	6.24	6.24	1.69	1.69	
11.16	0.00	0.00	30844.30	-0.00	-0.00	5.21	240.528	-0.00	-0.00	6.71	6.71	1.50	1.50	
12.56	0.00	0.00	34220.41	-0.00	-0.00	5.86	240.528	-0.00	-0.00	7.21	7.21	1.35	1.35	
13.95	0.00	0.00	37596.55	0.00	-0.00	6.53	240.528	-0.00	-0.00	7.76	7.76	1.23	1.23	
15.35	0.00	0.00	40972.75	-0.00	-0.00	7.19	240.528	-0.00	-0.00	8.33	8.33	1.13	1.13	
16.74	0.00	0.00	44348.87	0.00	-0.00	7.87	240.528	-0.00	-0.00	8.91	8.91	1.04	1.04	
18.14	0.00	0.00	47725.18	0.00	-0.00	8.55	240.528	-0.00	-0.00	9.52	9.52	0.97	0.97	
19.53	0.00	0.00	51101.11	-0.00	-0.00	9.23	240.528	-0.00	-0.00	10.13	10.13	0.91	0.91	
20.93	0.00	0.00	54477.36	-0.00	-0.00	9.91	240.528	-0.00	-0.00	10.76	10.76	0.85	0.85	
22.32	0.00	0.00	57853.58	-0.00	-0.00	10.59	240.528	-0.00	-0.00	11.39	11.39	0.80	0.80	
23.72	0.00	0.00	61229.82	-0.00	-0.00	11.28	240.528	-0.00	-0.00	12.03	12.03	0.76	0.76	
25.11	0.00	0.00	64605.78	-0.00	0.00	11.96	240.528	-0.00	-0.00	12.68	12.68	0.72	0.72	
26.51	0.00	0.00	67981.90	-0.00	-0.00	12.65	240.528	-0.00	-0.00	13.33	13.33	0.68	0.68	
27.90	0.00	0.00	71358.05	-0.00	0.00	13.34	240.528	-0.00	-0.00	13.99	13.99	0.65	0.65	
29.30	0.00	0.00	74734.49	-0.00	-0.00	14.03	240.528	-0.00	-0.00	14.65	14.65	0.62	0.62	
30.69	0.00	0.00	78110.45	-0.00	-0.00	14.72	240.528	-0.00	-0.00	15.31	15.31	0.59	0.59	
32.09	0.00	0.00	81486.61	-0.00	0.00	15.41	240.528	-0.00	-0.00	15.98	15.98	0.57	0.57	
33.49	0.00	0.00	84862.57	-0.00	-0.00	16.10	240.528	-0.00	-0.00	16.65	16.65	0.55	0.55	
34.88	0.00	0.00	88238.94	-0.00	-0.00	16.79	240.528	-0.00	-0.00	17.32	17.32	0.52	0.52	
36.28	0.00	0.00	91615.12	-0.00	-0.00	17.49	240.528	-0.00	-0.00	17.99	17.99	0.51	0.51	
37.67	0.00	0.00	94991.23	-0.00	-0.00	18.18	240.528	-0.00	-0.00	18.67	18.67	0.49	0.49	
39.07	0.00	0.00	98367.35	-0.00	-0.00	18.87	240.528	-0.00	-0.00	19.34	19.34	0.47	0.47	
40.46	0.00	0.00	101743.53	-0.00	-0.00	19.56	240.528	-0.00	-0.00	20.02	20.02	0.46	0.46	
41.86	0.00	0.00	105119.88	-0.00	-0.00	20.26	240.528	-0.00	-0.00	20.70	20.70	0.44	0.44	
43.25	0.00	0.00	108495.97	-0.00	0.00	20.95	240.528	-0.00	-0.00	21.38	21.38	0.43	0.43	
44.65	0.00	0.00	111871.95	-0.00	-0.00	21.65	240.528	-0.00	-0.00	22.06	22.06	0.41	0.41	
46.04	0.00	0.00	115248.12	-0.00	-0.00	22.34	240.528	-0.00	-0.00	22.74	22.74	0.40	0.40	
47.44	0.00	0.00	118624.41	-0.00	-0.00	23.03	240.528	-0.00	-0.00	23.43	23.43	0.39	0.39	
48.83	0.00	0.00	122000.57	-0.00	-0.00	23.73	240.528	-0.00	-0.00	24.11	24.11	0.38	0.38	
50.23	0.00	0.00	125376.70	-0.00	-0.00	24.42	240.528	-0.00	-0.00	24.79	24.79	0.37	0.37	
51.62	0.00	0.00	128752.82	-0.00	-0.00	25.12	240.528	-0.00	-0.00	25.48	25.48	0.36	0.36	
53.02	0.00	0.00	132128.97	-0.00	-0.00	25.81	240.528	-0.00	-0.00	26.16	26.16	0.35	0.35	
54.41	0.00	0.00	135505.11	-0.00	-0.00	26.51	240.528	-0.00	-0.00	26.85	26.85	0.34	0.34	
55.81	0.00	0.00	138880.89	-0.00	0.00	27.20	240.528	-0.00	-0.00	27.54	27.54	0.33	0.33	
57.20	0.00	0.00	142257.48	-0.00	-0.00	27.90	240.528	-0.00	-0.00	28.23	28.23	0.33	0.33	
58.60	0.00	0.00	145633.75	-0.00	-0.00	28.60	240.528	-0.00	-0.00	28.91	28.91	0.32	0.32	
59.99	0.00	0.00	149009.91	-0.00	-0.00	29.29	240.528	-0.00	-0.00	29.60	29.60	0.31	0.31	
61.39	0.00	0.00	152386.02	-0.00	-0.00	29.99	240.528	-0.00	-0.00	30.29	30.29	0.30	0.30	
62.78	0.00	0.00	155762.16	-0.00	-0.00	30.68	240.528	-0.00	-0.00	30.98	30.98	0.30	0.30	
64.18	0.00	0.00	159138.23	-0.00	-0.00	31.38	240.528	-0.00	-0.00	31.67	31.67	0.29	0.29	
65.58	0.00	0.00	162514.34	-0.00	-0.00	32.07	240.528	-0.00	-0.00	32.36	32.36	0.28	0.28	

7 July, 2019

+++ H Y D R O S T A T I C P R O P E R T I E S +++  
 =====

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac-/ KN	/-- Center Of Buoyancy --/ /			W.P. / Area	/ /C. Flotation /		/---- Metacentric Heights			----/ -BML-
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	
66.97	0.00	0.00	165890.14	-0.00	-0.00	32.77	240.528	-0.00	-0.00	33.05	33.05	0.28	0.28
68.37	0.00	0.00	169266.59	-0.00	-0.00	33.47	240.528	-0.00	-0.00	33.74	33.74	0.27	0.27
69.76	0.00	0.00	172642.97	-0.00	-0.00	34.16	240.528	-0.00	-0.00	34.43	34.43	0.27	0.27
71.16	0.00	0.00	176019.38	-0.00	-0.00	34.86	240.528	-0.00	-0.00	35.12	35.12	0.26	0.26
72.55	0.00	0.00	179395.39	-0.00	-0.00	35.56	240.528	-0.00	-0.00	35.81	35.81	0.26	0.26
73.95	0.00	0.00	182771.12	-0.00	-0.00	36.25	240.528	-0.00	-0.00	36.50	36.50	0.25	0.25
75.34	0.00	0.00	186147.59	-0.00	-0.00	36.95	240.528	-0.00	-0.00	37.20	37.20	0.25	0.25
76.74	0.00	0.00	189523.38	-0.00	-0.00	37.64	240.528	-0.00	-0.00	37.89	37.89	0.24	0.24
78.13	0.00	0.00	192899.94	-0.00	-0.00	38.34	240.528	-0.00	-0.00	38.58	38.58	0.24	0.24
79.53	0.00	0.00	196275.61	-0.00	-0.00	39.04	240.528	-0.00	-0.00	39.27	39.27	0.24	0.24
80.92	0.00	0.00	199652.42	-0.00	-0.00	39.73	240.528	-0.00	-0.00	39.97	39.97	0.23	0.23
82.32	0.00	0.00	203028.33	-0.00	-0.00	40.43	240.528	-0.00	-0.00	40.66	40.66	0.23	0.23
83.71	0.00	0.00	206404.31	-0.00	-0.00	41.13	240.528	-0.00	-0.00	41.35	41.35	0.22	0.22
85.11	0.00	0.00	209780.61	-0.00	-0.00	41.82	240.528	-0.00	-0.00	42.04	42.04	0.22	0.22
86.50	0.00	0.00	213156.56	-0.00	0.00	42.52	240.528	-0.00	-0.00	42.74	42.74	0.22	0.22
87.90	0.00	0.00	216533.20	-0.00	0.00	43.22	240.528	-0.00	-0.00	43.43	43.43	0.21	0.21
89.29	0.00	0.00	219908.81	-0.00	-0.00	43.91	240.528	-0.00	-0.00	44.12	44.12	0.21	0.21
90.69	0.00	0.00	223285.62	-0.00	-0.00	44.61	240.528	-0.00	-0.00	44.82	44.82	0.21	0.21
92.08	0.00	0.00	226661.08	-0.00	-0.00	45.31	240.528	-0.00	-0.00	45.51	45.51	0.20	0.20
93.48	0.00	0.00	230037.59	-0.00	-0.00	46.00	240.528	-0.00	-0.00	46.20	46.20	0.20	0.20
94.87	0.00	0.00	233413.59	-0.00	-0.00	46.70	240.528	-0.00	-0.00	46.90	46.90	0.20	0.20
96.27	0.00	0.00	236789.78	-0.00	-0.00	47.40	240.528	-0.00	-0.00	47.59	47.59	0.20	0.20
97.67	0.00	0.00	240165.86	-0.00	-0.00	48.09	240.528	-0.00	-0.00	48.29	48.29	0.19	0.19
99.06	0.00	0.00	243542.05	-0.00	-0.00	48.79	240.528	-0.00	-0.00	48.98	48.98	0.19	0.19
100.46	0.00	0.00	246918.78	-0.00	-0.00	49.49	240.528	-0.00	-0.00	49.68	49.68	0.19	0.19
101.85	0.00	0.00	250294.27	-0.00	0.00	50.18	240.528	-0.00	-0.00	50.37	50.37	0.19	0.19
103.25	0.00	0.00	253671.25	-0.00	-0.00	50.88	240.528	-0.00	-0.00	51.06	51.06	0.18	0.18
104.64	0.00	0.00	257046.50	-0.00	-0.00	51.58	240.528	-0.00	-0.00	51.76	51.76	0.18	0.18
106.04	0.00	0.00	260422.92	-0.00	-0.00	52.28	240.528	-0.00	-0.00	52.45	52.45	0.18	0.18
107.43	0.00	0.00	263798.97	-0.00	0.00	52.97	240.528	-0.00	-0.00	53.15	53.15	0.18	0.18
108.83	0.00	0.00	267175.34	-0.00	-0.00	53.67	240.528	-0.00	-0.00	53.84	53.84	0.17	0.17
110.22	0.00	0.00	270551.25	-0.00	-0.00	54.37	240.528	-0.00	-0.00	54.54	54.54	0.17	0.17
111.62	0.00	0.00	273927.59	-0.00	-0.00	55.06	240.528	-0.00	-0.00	55.23	55.23	0.17	0.17
113.01	0.00	0.00	277303.94	-0.00	-0.00	55.76	240.528	-0.00	-0.00	55.93	55.93	0.17	0.17
114.41	0.00	0.00	280679.94	-0.00	0.00	56.46	240.528	-0.00	-0.00	56.62	56.62	0.16	0.16
115.80	0.00	0.00	284056.22	-0.00	-0.00	57.15	240.528	-0.00	-0.00	57.32	57.32	0.16	0.16
117.20	0.00	0.00	287432.22	-0.00	-0.00	57.85	240.528	-0.00	-0.00	58.01	58.01	0.16	0.16
118.59	0.00	0.00	290808.66	-0.00	-0.00	58.55	240.528	-0.00	-0.00	58.71	58.71	0.16	0.16
119.99	0.00	0.00	294184.56	-0.00	-0.00	59.25	240.528	-0.00	-0.00	59.40	59.40	0.16	0.16
121.38	0.00	0.00	297561.06	-0.00	0.00	59.94	240.528	-0.00	-0.00	60.10	60.10	0.16	0.16
122.78	0.00	0.00	300936.91	-0.00	-0.00	60.64	240.528	-0.00	-0.00	60.79	60.79	0.15	0.15
124.17	0.00	0.00	304313.31	-0.00	-0.00	61.34	240.528	-0.00	-0.00	61.49	61.49	0.15	0.15
125.57	0.00	0.00	307688.69	-0.00	-0.00	62.03	240.528	-0.00	-0.00	62.18	62.18	0.15	0.15
126.97	0.00	0.00	311065.62	-0.00	-0.00	62.73	240.528	-0.00	-0.00	62.88	62.88	0.15	0.15
128.36	0.00	0.00	314441.72	-0.00	-0.00	63.43	240.528	-0.00	-0.00	63.58	63.58	0.15	0.15
129.76	0.00	0.00	317817.94	-0.00	-0.00	64.13	240.528	-0.00	-0.00	64.27	64.27	0.15	0.15
131.15	0.00	0.00	321194.34	-0.00	-0.00	64.82	240.528	-0.00	-0.00	64.97	64.97	0.14	0.14
132.55	0.00	0.00	324570.00	-0.00	-0.00	65.52	240.528	-0.00	-0.00	65.66	65.66	0.14	0.14

```

*****
*** MOSES ***
-----
7 July, 2019
*
*   MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE
*   OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Nur Muhammad Hanif
*
*****

```

+++ H Y D R O S T A T I C P R O P E R T I E S +++

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac-/ KN	/-- Center Of Buoyancy --/			W.P. / Area	/C. Flotation /		/--- Metacentric Heights			---/ -BML-
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	
133.94	0.00	0.00	327947.06	-0.00	-0.00	66.22	240.528	-0.00	-0.00	66.36	66.36	0.14	0.14
135.34	0.00	0.00	331322.53	-0.00	-0.00	66.91	240.528	-0.00	-0.00	67.05	67.05	0.14	0.14
136.73	0.00	0.00	334699.06	-0.00	-0.00	67.61	240.528	-0.00	-0.00	67.75	67.75	0.14	0.14
138.13	0.00	0.00	338074.09	-0.00	0.00	68.31	240.528	-0.00	-0.00	68.45	68.45	0.14	0.14
139.52	0.00	0.00	341450.84	-0.00	-0.00	69.01	240.528	-0.00	-0.00	69.14	69.14	0.14	0.14



\*\*\*\*\*  
 \* \*\* MOSES \*\* \*  
 \* -----  
 \* June 29, 2019 \*  
 \*  
 \* MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE Dp/Ds 1.5 \*  
 \* OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Nur Muhammad Hanif \*  
 \*  
 \* \*\*\*\*\*

+++ HYDROSTATIC PROPERTIES +++  
 =====

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

/--- Draft	Condition Trim	---// Roll	Displac- KN	/--- Center Of Buoyancy --- /			W.P. Area	/C. Flotation /			Metacentric Heights			
				---X---	---Y---	---Z---		---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	-BML-	
0.00	0.00	0.00	0.00	-7.73	-0.00	-0.00	270.594	-5.57	0.00	99999.99	99999.99	99999.99	99999.99	
1.40	0.00	0.00	5554.99	-0.00	-0.00	0.58	276.116	-0.00	-0.00	11.57	11.57	10.99	10.99	
2.79	0.00	0.00	9430.68	-0.00	-0.00	1.20	276.116	-0.00	-0.00	7.67	7.67	6.47	6.47	
4.19	0.00	0.00	13306.38	-0.00	-0.00	1.87	276.116	-0.00	-0.00	6.46	6.46	4.59	4.59	
5.58	0.00	0.00	17182.08	-0.00	-0.00	2.55	276.116	-0.00	-0.00	6.10	6.10	3.55	3.55	
6.98	0.00	0.00	21057.76	-0.00	-0.00	3.24	276.116	-0.00	-0.00	6.13	6.13	2.90	2.90	
8.37	0.00	0.00	24533.75	-0.00	-0.00	3.86	240.528	-0.00	-0.00	5.75	5.75	1.89	1.89	
9.77	0.00	0.00	27909.85	-0.00	-0.00	4.49	240.528	-0.00	-0.00	6.15	6.15	1.66	1.66	
11.16	0.00	0.00	31286.05	-0.00	0.00	5.14	240.528	-0.00	-0.00	6.62	6.62	1.48	1.48	
12.56	0.00	0.00	34662.22	-0.00	-0.00	5.79	240.528	-0.00	-0.00	7.13	7.13	1.34	1.34	
13.95	0.00	0.00	38038.46	0.00	0.00	6.45	240.528	-0.00	-0.00	7.67	7.67	1.22	1.22	
15.35	0.00	0.00	41414.54	-0.00	-0.00	7.12	240.528	-0.00	-0.00	8.24	8.24	1.12	1.12	
16.74	0.00	0.00	44790.73	-0.00	-0.00	7.79	240.528	-0.00	-0.00	8.83	8.83	1.03	1.03	
18.14	0.00	0.00	48166.92	0.00	0.00	8.47	240.528	-0.00	-0.00	9.43	9.43	0.96	0.96	
19.53	0.00	0.00	51542.88	0.00	-0.00	9.15	240.528	-0.00	-0.00	10.05	10.05	0.90	0.90	
20.93	0.00	0.00	54919.16	-0.00	-0.00	9.83	240.528	-0.00	-0.00	10.67	10.67	0.84	0.84	
22.32	0.00	0.00	58295.30	-0.00	0.00	10.51	240.528	-0.00	-0.00	11.31	11.31	0.79	0.79	
23.72	0.00	0.00	61671.60	-0.00	0.00	11.20	240.528	-0.00	-0.00	11.95	11.95	0.75	0.75	
25.11	0.00	0.00	65047.46	-0.00	0.00	11.88	240.528	-0.00	-0.00	12.60	12.60	0.71	0.71	
26.51	0.00	0.00	68423.76	-0.00	-0.00	12.57	240.528	-0.00	-0.00	13.25	13.25	0.68	0.68	
27.90	0.00	0.00	71800.05	-0.00	-0.00	13.26	240.528	-0.00	-0.00	13.90	13.90	0.65	0.65	
29.30	0.00	0.00	75176.11	-0.00	0.00	13.95	240.528	-0.00	-0.00	14.56	14.56	0.62	0.62	
30.69	0.00	0.00	78552.28	-0.00	0.00	14.64	240.528	-0.00	-0.00	15.23	15.23	0.59	0.59	
32.09	0.00	0.00	81928.31	-0.00	0.00	15.33	240.528	-0.00	-0.00	15.89	15.89	0.57	0.57	
33.49	0.00	0.00	85304.49	-0.00	-0.00	16.02	240.528	-0.00	-0.00	16.56	16.56	0.54	0.54	
34.88	0.00	0.00	88680.65	-0.00	0.00	16.71	240.528	-0.00	-0.00	17.23	17.23	0.52	0.52	
36.28	0.00	0.00	92056.80	-0.00	-0.00	17.40	240.528	-0.00	-0.00	17.91	17.91	0.50	0.50	
37.67	0.00	0.00	95433.01	-0.00	-0.00	18.10	240.528	-0.00	-0.00	18.58	18.58	0.49	0.49	
39.07	0.00	0.00	98809.27	-0.00	-0.00	18.79	240.528	-0.00	-0.00	19.26	19.26	0.47	0.47	
40.46	0.00	0.00	102185.50	-0.00	0.00	19.48	240.528	-0.00	-0.00	19.93	19.93	0.45	0.45	
41.86	0.00	0.00	105561.50	-0.00	-0.00	20.17	240.528	-0.00	-0.00	20.61	20.61	0.44	0.44	
43.25	0.00	0.00	108937.83	-0.00	-0.00	20.87	240.528	-0.00	-0.00	21.29	21.29	0.43	0.43	
44.65	0.00	0.00	112313.79	-0.00	0.00	21.56	240.528	-0.00	-0.00	21.97	21.97	0.41	0.41	
46.04	0.00	0.00	115689.83	-0.00	-0.00	22.26	240.528	-0.00	-0.00	22.66	22.66	0.40	0.40	
47.44	0.00	0.00	119065.92	-0.00	-0.00	22.95	240.528	-0.00	-0.00	23.34	23.34	0.39	0.39	
48.83	0.00	0.00	122442.45	-0.00	-0.00	23.64	240.528	-0.00	-0.00	24.02	24.02	0.38	0.38	
50.23	0.00	0.00	125818.55	-0.00	0.00	24.34	240.528	-0.00	-0.00	24.71	24.71	0.37	0.37	
51.62	0.00	0.00	129194.56	-0.00	0.00	25.03	240.528	-0.00	-0.00	25.39	25.39	0.36	0.36	
53.02	0.00	0.00	132571.00	-0.00	-0.00	25.73	240.528	-0.00	-0.00	26.08	26.08	0.35	0.35	
54.41	0.00	0.00	135947.20	-0.00	-0.00	26.42	240.528	-0.00	-0.00	26.76	26.76	0.34	0.34	
55.81	0.00	0.00	139322.88	-0.00	-0.00	27.12	240.528	-0.00	-0.00	27.45	27.45	0.33	0.33	
57.20	0.00	0.00	142698.89	-0.00	-0.00	27.81	240.528	-0.00	-0.00	28.14	28.14	0.32	0.32	
58.60	0.00	0.00	146075.58	-0.00	-0.00	28.51	240.528	-0.00	-0.00	28.83	28.83	0.32	0.32	
59.99	0.00	0.00	149451.58	-0.00	0.00	29.21	240.528	-0.00	-0.00	29.52	29.52	0.31	0.31	
61.39	0.00	0.00	152827.59	-0.00	-0.00	29.90	240.528	-0.00	-0.00	30.20	30.20	0.30	0.30	
62.78	0.00	0.00	156204.09	-0.00	0.00	30.60	240.528	-0.00	-0.00	30.89	30.89	0.30	0.30	
64.18	0.00	0.00	159580.23	-0.00	0.00	31.29	240.528	-0.00	-0.00	31.58	31.58	0.29	0.29	
65.58	0.00	0.00	162956.20	-0.00	-0.00	31.99	240.528	-0.00	-0.00	32.27	32.27	0.28	0.28	
66.97	0.00	0.00	166331.89	-0.00	-0.00	32.68	240.528	-0.00	-0.00	32.96	32.96	0.28	0.28	
68.37	0.00	0.00	169708.80	-0.00	0.00	33.38	240.528	-0.00	-0.00	33.65	33.65	0.27	0.27	
69.76	0.00	0.00	173084.61	-0.00	-0.00	34.08	240.528	-0.00	-0.00	34.34	34.34	0.27	0.27	
71.16	0.00	0.00	176460.88	-0.00	0.00	34.77	240.528	-0.00	-0.00	35.03	35.03	0.26	0.26	

```

*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     June 29, 2019                               *
* MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE Dp/Ds 1.5                   *
* OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Nur Muhammad Hanif     *
*                                                                              *
*****

```

+++ HYDROSTATIC PROPERTIES +++

For Body SPAR

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and KN Unless Specified

---/	Condition	---/	Displac- /	---/	Center Of Buoyancy	---/	W.P. /	---/	Flotation	---/	Metacentric Heights			---/	
Draft	Trim	Roll	KN	---	X---	Y---	Z---	Area	---	X---	Y---	KMT-	KML-	BMT-	BML-
72.55	0.00	0.00	179837.19	-0.00	0.00	35.47	240.528	-0.00	-0.00	35.73	35.73	0.26	0.26		
73.95	0.00	0.00	183212.97	-0.00	-0.00	36.16	240.528	-0.00	-0.00	36.42	36.42	0.25	0.25		
75.34	0.00	0.00	186589.34	-0.00	-0.00	36.86	240.528	-0.00	-0.00	37.11	37.11	0.25	0.25		
76.74	0.00	0.00	189964.97	-0.00	0.00	37.56	240.528	-0.00	-0.00	37.80	37.80	0.24	0.24		
78.13	0.00	0.00	193341.77	-0.00	-0.00	38.25	240.528	-0.00	-0.00	38.49	38.49	0.24	0.24		
79.53	0.00	0.00	196717.72	-0.00	0.00	38.95	240.528	-0.00	-0.00	39.19	39.19	0.24	0.24		
80.92	0.00	0.00	200094.30	-0.00	-0.00	39.65	240.528	-0.00	-0.00	39.88	39.88	0.23	0.23		
82.32	0.00	0.00	203470.30	-0.00	-0.00	40.34	240.528	-0.00	-0.00	40.57	40.57	0.23	0.23		
83.71	0.00	0.00	206845.97	-0.00	-0.00	41.04	240.528	-0.00	-0.00	41.26	41.26	0.22	0.22		
85.11	0.00	0.00	210222.38	-0.00	-0.00	41.74	240.528	-0.00	-0.00	41.96	41.96	0.22	0.22		
86.50	0.00	0.00	213598.03	-0.00	-0.00	42.43	240.528	-0.00	-0.00	42.65	42.65	0.22	0.22		
87.90	0.00	0.00	216974.67	-0.00	-0.00	43.13	240.528	-0.00	-0.00	43.34	43.34	0.21	0.21		
89.29	0.00	0.00	220350.89	-0.00	0.00	43.83	240.528	-0.00	-0.00	44.04	44.04	0.21	0.21		
90.69	0.00	0.00	223727.52	-0.00	-0.00	44.52	240.528	-0.00	-0.00	44.73	44.73	0.21	0.21		
92.08	0.00	0.00	227103.33	-0.00	0.00	45.22	240.528	-0.00	-0.00	45.42	45.42	0.20	0.20		
93.48	0.00	0.00	230479.27	-0.00	0.00	45.92	240.528	-0.00	-0.00	46.12	46.12	0.20	0.20		
94.87	0.00	0.00	233855.39	-0.00	0.00	46.61	240.528	-0.00	-0.00	46.81	46.81	0.20	0.20		
96.27	0.00	0.00	237231.11	-0.00	-0.00	47.31	240.528	-0.00	-0.00	47.50	47.50	0.20	0.20		
97.67	0.00	0.00	240607.61	-0.00	-0.00	48.01	240.528	-0.00	-0.00	48.20	48.20	0.19	0.19		
99.06	0.00	0.00	243983.91	-0.00	-0.00	48.70	240.528	-0.00	-0.00	48.89	48.89	0.19	0.19		
100.46	0.00	0.00	247360.66	-0.00	-0.00	49.40	240.528	-0.00	-0.00	49.59	49.59	0.19	0.19		
101.85	0.00	0.00	250736.41	-0.00	-0.00	50.10	240.528	-0.00	-0.00	50.28	50.28	0.18	0.18		
103.25	0.00	0.00	254112.81	-0.00	0.00	50.79	240.528	-0.00	-0.00	50.98	50.98	0.18	0.18		
104.64	0.00	0.00	257488.45	-0.00	-0.00	51.49	240.528	-0.00	-0.00	51.67	51.67	0.18	0.18		
106.04	0.00	0.00	260864.16	-0.00	-0.00	52.19	240.528	-0.00	-0.00	52.36	52.36	0.18	0.18		
107.43	0.00	0.00	264240.62	-0.00	0.00	52.88	240.528	-0.00	-0.00	53.06	53.06	0.18	0.18		
108.83	0.00	0.00	267616.97	-0.00	-0.00	53.58	240.528	-0.00	-0.00	53.75	53.75	0.17	0.17		
110.22	0.00	0.00	270993.91	-0.00	-0.00	54.28	240.528	-0.00	-0.00	54.45	54.45	0.17	0.17		
111.62	0.00	0.00	274369.62	-0.00	-0.00	54.98	240.528	-0.00	-0.00	55.14	55.14	0.17	0.17		
113.01	0.00	0.00	277746.06	-0.00	0.00	55.67	240.528	-0.00	-0.00	55.84	55.84	0.17	0.17		
114.41	0.00	0.00	281121.72	-0.00	0.00	56.37	240.528	-0.00	-0.00	56.53	56.53	0.16	0.16		
115.80	0.00	0.00	284497.34	-0.00	-0.00	57.07	240.528	-0.00	-0.00	57.23	57.23	0.16	0.16		
117.20	0.00	0.00	287873.81	-0.00	0.00	57.76	240.528	-0.00	-0.00	57.92	57.92	0.16	0.16		
118.59	0.00	0.00	291249.53	-0.00	0.00	58.46	240.528	-0.00	-0.00	58.62	58.62	0.16	0.16		
119.99	0.00	0.00	294626.97	-0.00	-0.00	59.16	240.528	-0.00	-0.00	59.31	59.31	0.16	0.16		
121.38	0.00	0.00	298002.91	-0.00	-0.00	59.85	240.528	-0.00	-0.00	60.01	60.01	0.16	0.16		
122.78	0.00	0.00	301379.34	-0.00	-0.00	60.55	240.528	-0.00	-0.00	60.71	60.71	0.15	0.15		
124.17	0.00	0.00	304755.00	-0.00	-0.00	61.25	240.528	-0.00	-0.00	61.40	61.40	0.15	0.15		
125.57	0.00	0.00	308130.94	-0.00	0.00	61.95	240.528	-0.00	-0.00	62.10	62.10	0.15	0.15		
126.97	0.00	0.00	311507.06	-0.00	0.00	62.64	240.528	-0.00	-0.00	62.79	62.79	0.15	0.15		
128.36	0.00	0.00	314882.75	-0.00	-0.00	63.34	240.528	-0.00	-0.00	63.49	63.49	0.15	0.15		
129.76	0.00	0.00	318260.00	-0.00	0.00	64.04	240.528	-0.00	-0.00	64.18	64.18	0.15	0.15		
131.15	0.00	0.00	321636.06	-0.00	-0.00	64.73	240.528	-0.00	-0.00	64.88	64.88	0.14	0.14		
132.55	0.00	0.00	325012.28	-0.00	-0.00	65.43	240.528	-0.00	-0.00	65.57	65.57	0.14	0.14		
133.94	0.00	0.00	328388.47	-0.00	0.00	66.13	240.528	-0.00	-0.00	66.27	66.27	0.14	0.14		
135.34	0.00	0.00	331764.59	-0.00	-0.00	66.83	240.528	-0.00	-0.00	66.97	66.97	0.14	0.14		
136.73	0.00	0.00	335140.44	-0.00	-0.00	67.52	240.528	-0.00	-0.00	67.66	67.66	0.14	0.14		
138.13	0.00	0.00	338515.97	-0.00	0.00	68.22	240.528	-0.00	-0.00	68.36	68.36	0.14	0.14		
139.52	0.00	0.00	341892.31	-0.00	-0.00	68.92	240.528	-0.00	-0.00	69.05	69.05	0.14	0.14		

### MATRIKS 6x6 Massa Tambah dan Damping SPAR without Heave Plate

Frequency	0.4333	Period	14.5000		
Added Mass					
9.32072E-01	3.27317E-07	-2.22254E-07	-3.13833E-06	1.44808E+01	-6.30240E-06
-1.56421E-07	9.32070E-01	1.58206E-08	-1.44808E+01	1.17103E-05	-4.74898E-06
1.84793E-07	-7.80144E-08	6.22694E-02	5.14221E-06	-2.25725E-06	8.52651E-07
-3.13833E-06	-1.44808E+01	5.14221E-06	1.75244E+03	3.23636E-03	1.10427E-04
1.44808E+01	1.17103E-05	-2.25725E-06	-2.64652E-03	1.75245E+03	-7.77064E-05
-6.30240E-06	-4.74898E-06	8.52651E-07	1.11152E-04	-7.72098E-05	5.06416E-10
Damping					
6.99064E-02	3.89473E-09	2.86153E-09	1.29282E-08	-2.74389E+00	-3.59168E-07
-2.97467E-09	6.93419E-02	-5.74958E-09	2.71165E+00	2.35623E-07	-1.46520E-07
4.65178E-09	2.34852E-09	1.13405E-03	1.08721E-07	1.41053E-07	-7.85300E-09
1.29282E-08	2.71165E+00	1.08721E-07	5.00832E+02	4.05004E-05	-1.00767E-06
-2.74389E+00	2.35623E-07	1.41053E-07	-4.55496E-05	5.05508E+02	1.30035E-05
-3.59168E-07	-1.46520E-07	-7.85300E-09	-9.83877E-07	1.29581E-05	9.86817E-09

### MATRIKS 6x6 Massa Tambah dan Damping SPAR with Heave Plate Dp/Ds 1.3

Frequency	0.4333	Period	14.5000		
Added Mass					
9.33418E-01	-2.81189E-07	2.29463E-06	-9.94710E-06	1.08379E+01	-4.84960E-06
-1.31062E-06	9.33416E-01	5.98184E-07	-1.08379E+01	9.84894E-07	-9.74106E-06
-5.78299E-06	-1.41214E-06	1.21666E-01	3.82502E-05	-1.42760E-04	3.93910E-07
-9.94710E-06	-1.08379E+01	3.82502E-05	1.43025E+03	3.21114E-03	1.43673E-04
1.08379E+01	9.84894E-07	-1.42760E-04	-3.06949E-03	1.43025E+03	-7.06113E-05
-4.84960E-06	-9.74106E-06	3.93910E-07	1.43023E-04	-7.04097E-05	5.59932E-10
Damping					
8.16453E-02	-1.73294E-08	8.74689E-09	-1.93346E-07	-3.43389E+00	-4.92260E-07
-2.85873E-08	8.08552E-02	1.86140E-09	3.38912E+00	8.88325E-08	-5.60033E-07
-4.52561E-08	-7.16220E-09	3.28444E-03	2.82838E-07	3.48088E-08	4.72055E-09
-1.93346E-07	3.38912E+00	2.82838E-07	5.42632E+02	9.00304E-05	-1.87829E-05
-3.43389E+00	8.88325E-08	3.48088E-08	-2.06144E-05	5.48683E+02	2.12969E-05
-4.92260E-07	-5.60033E-07	4.72055E-09	-1.87801E-05	2.12597E-05	4.49944E-08

### MATRIKS 6x6 Massa Tambah dan Damping SPAR with Heave Plate Dp/Ds 1.4

Frequency	0.4333	Period	14.5000		
Added Mass					
9.31898E-01	-7.41827E-07	1.01741E-06	-3.12132E-05	1.09418E+01	-4.94003E-06
-1.82460E-06	9.31893E-01	4.41724E-07	-1.09421E+01	1.15886E-05	-9.71217E-06
-4.51816E-06	-2.14305E-07	1.63748E-01	2.69885E-05	-7.10391E-05	3.27718E-07
-3.12132E-05	-1.09421E+01	2.69885E-05	1.42588E+03	2.95727E-03	1.43719E-04
1.09418E+01	1.15886E-05	-7.10391E-05	-2.86543E-03	1.42590E+03	-7.30369E-05
-4.94003E-06	-9.71217E-06	3.27718E-07	1.43048E-04	-7.30093E-05	5.67819E-10
Damping					
8.05903E-02	-1.94699E-08	3.32255E-11	-1.81140E-07	-3.36936E+00	-4.95014E-07
-3.08473E-08	7.97797E-02	8.57046E-10	3.32349E+00	-1.65314E-07	-5.51367E-07
-5.85418E-08	-1.07750E-08	3.88797E-03	2.41762E-07	2.22806E-07	3.65212E-09
-1.81140E-07	3.32349E+00	2.41762E-07	5.33999E+02	5.63147E-05	-1.82914E-05
-3.36936E+00	-1.65314E-07	2.22806E-07	3.29942E-06	5.40192E+02	2.12885E-05
-4.95014E-07	-5.51367E-07	3.65212E-09	-1.82881E-05	2.12474E-05	4.44545E-08

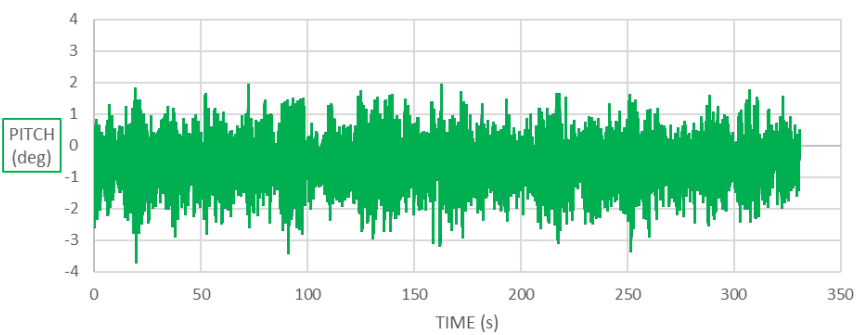
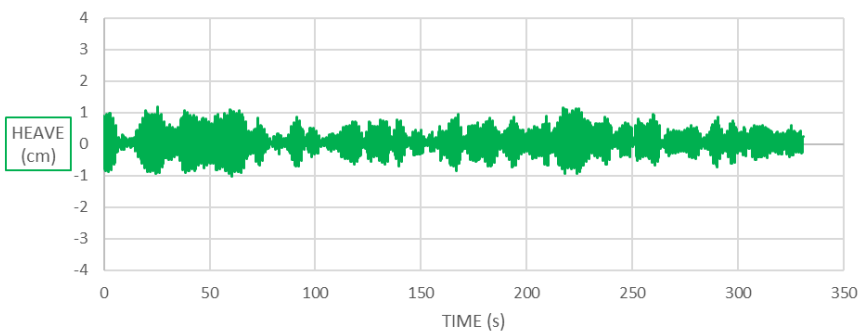
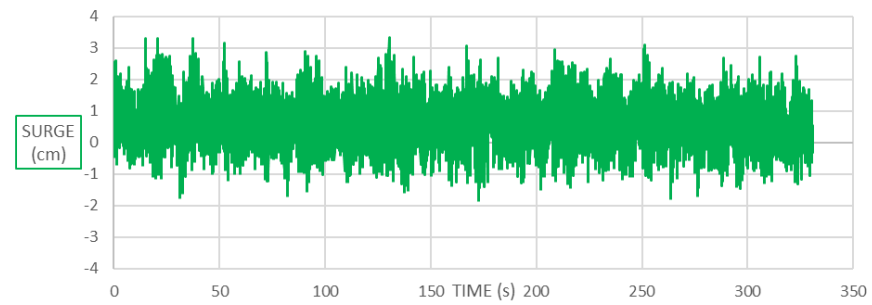
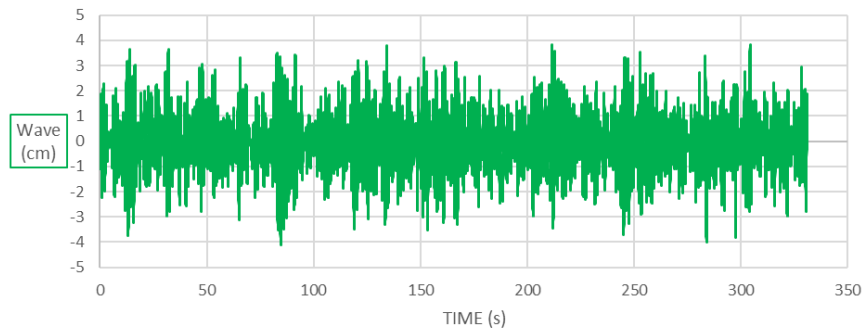
### MATRIKS 6x6 Massa Tambah dan Damping SPAR with Heave Plate Dp/Ds 1.5

Frequency	0.4333	Period	14.5000		
Added Mass					
9.26430E-01	6.90180E-07	4.38424E-07	3.07859E-05	1.52954E+01	2.02414E-06
-3.74458E-07	9.26442E-01	-1.98738E-06	-1.52945E+01	-3.99994E-05	-2.00892E-05
3.56105E-06	2.04584E-08	1.79393E-01	-1.27441E-04	-4.11587E-05	2.76281E-07
3.07859E-05	-1.52945E+01	-1.27441E-04	1.78320E+03	1.41342E-03	4.70788E-04
1.52954E+01	-3.99994E-05	-4.11587E-05	-7.84360E-03	1.78314E+03	7.89788E-05
2.02414E-06	-2.00892E-05	2.76281E-07	4.71052E-04	7.93879E-05	9.42295E-10
Damping					
6.78891E-02	6.02663E-09	-1.02008E-10	2.08576E-07	-2.58911E+00	2.18262E-07
-8.17522E-09	6.72796E-02	-2.84609E-09	2.55467E+00	-5.11680E-07	-1.40552E-06
2.20786E-08	5.29765E-09	2.70526E-03	2.39538E-07	2.30629E-07	2.15760E-09
2.08576E-07	2.55467E+00	2.39538E-07	4.86230E+02	2.76367E-05	-4.94511E-05
-2.58911E+00	-5.11680E-07	2.30629E-07	-6.22913E-05	4.91234E+02	-8.77685E-06
2.18262E-07	-1.40552E-06	2.15760E-09	-4.95107E-05	-8.77950E-06	-1.53149E-08

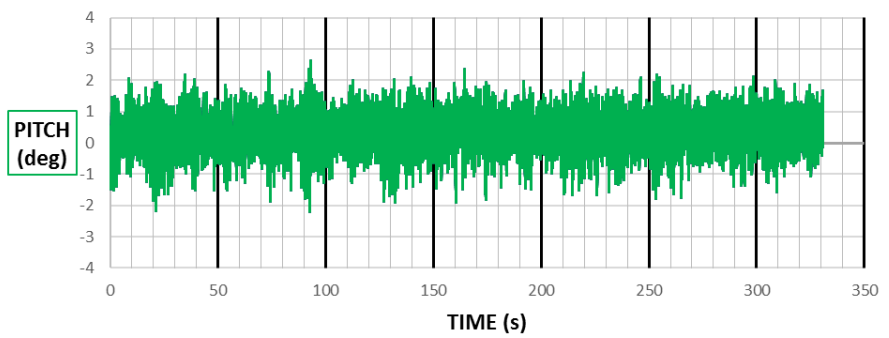
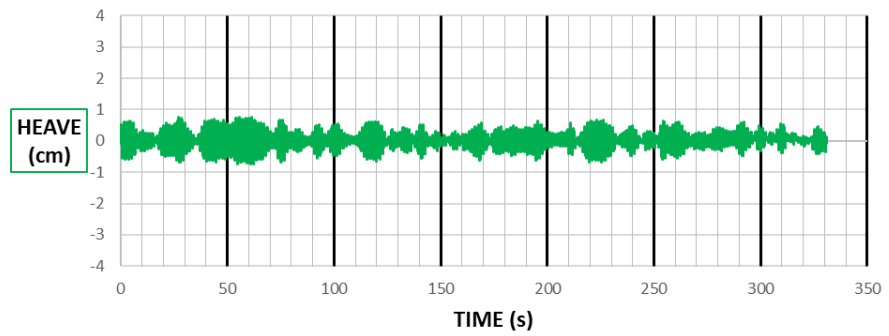
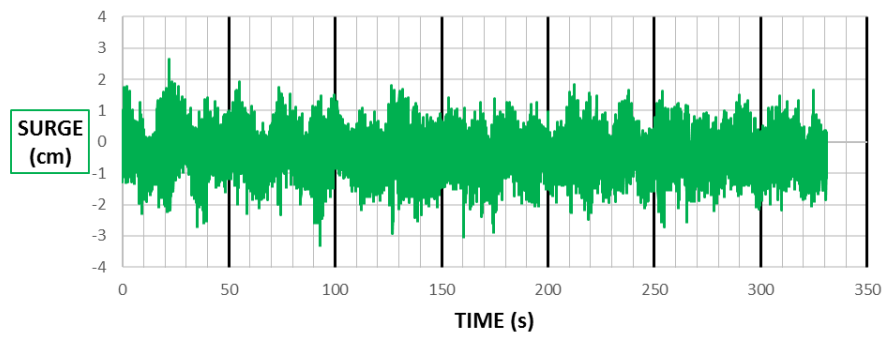
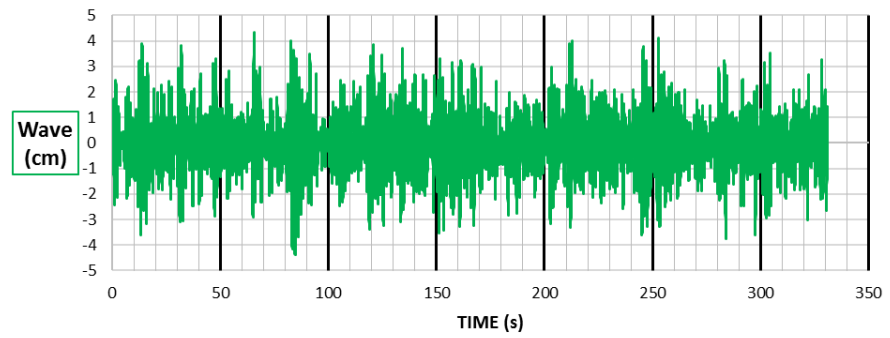


LAMPIRAN E  
TIME HISTORY

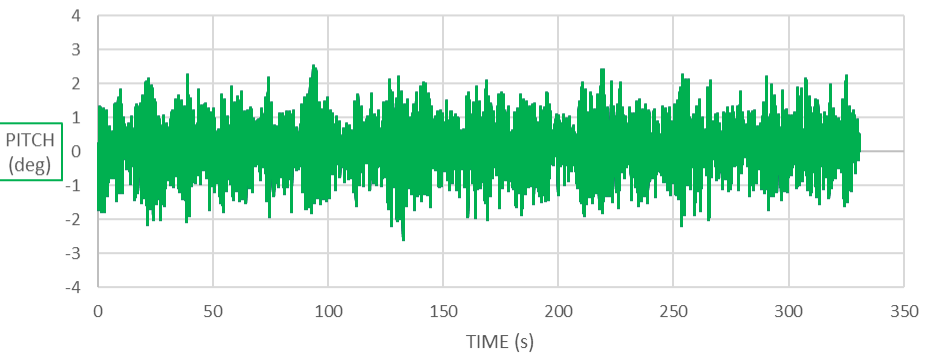
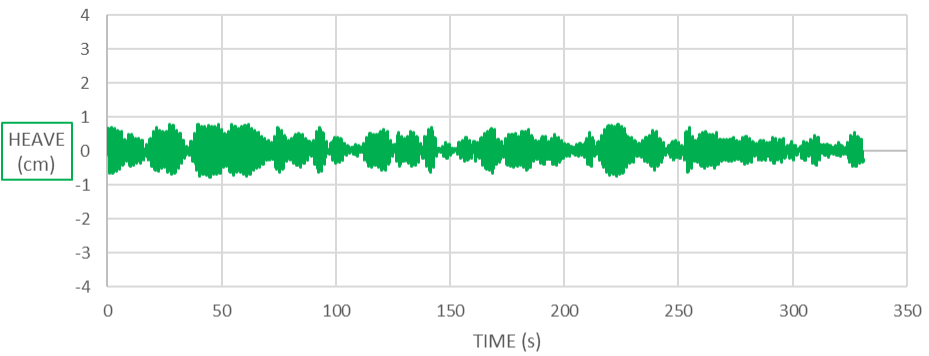
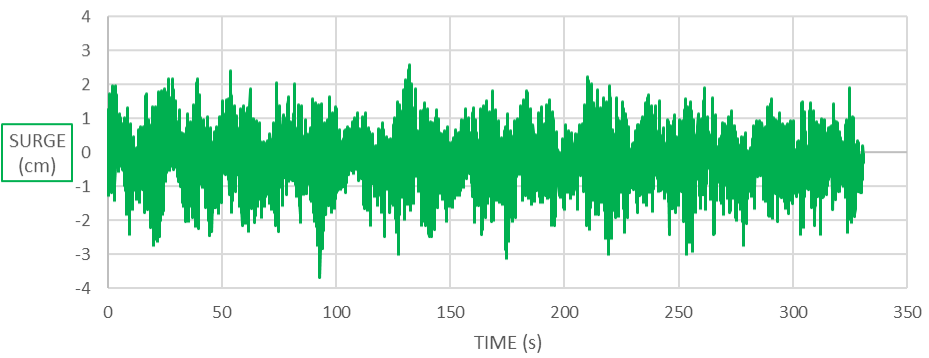
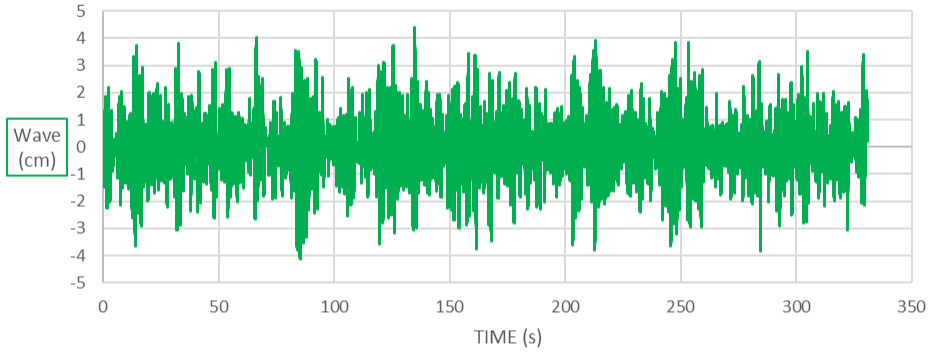
# SPAR RESPONSE TIME HISTORY WITHOUT HEAVE PLATE EXPERIMENTAL METHOD



**SPAR RESPONSE TIME HISTORY  
WITH HEAVE PLATE 1,3  
EXPERIMENTAL METHOD**

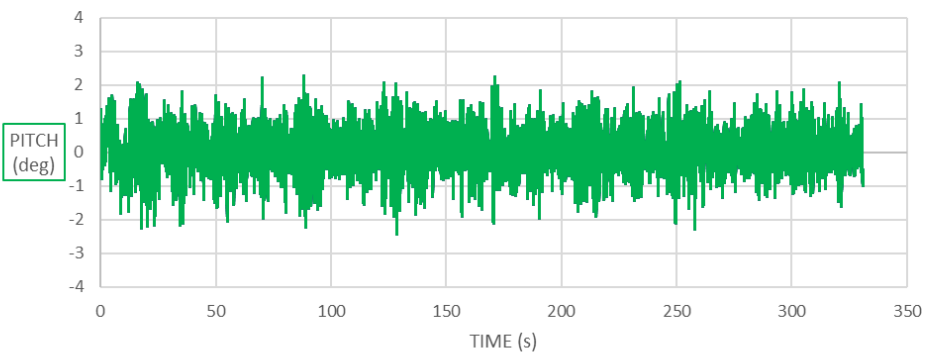
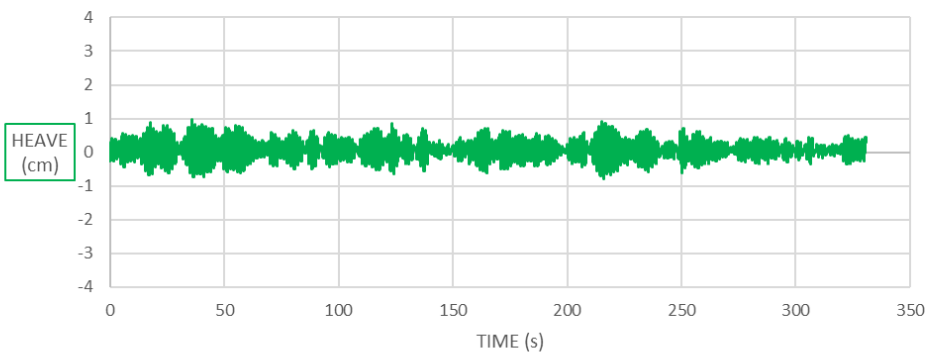
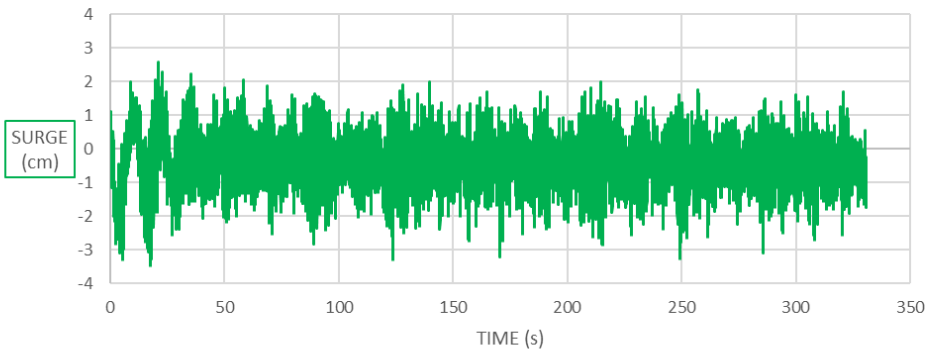
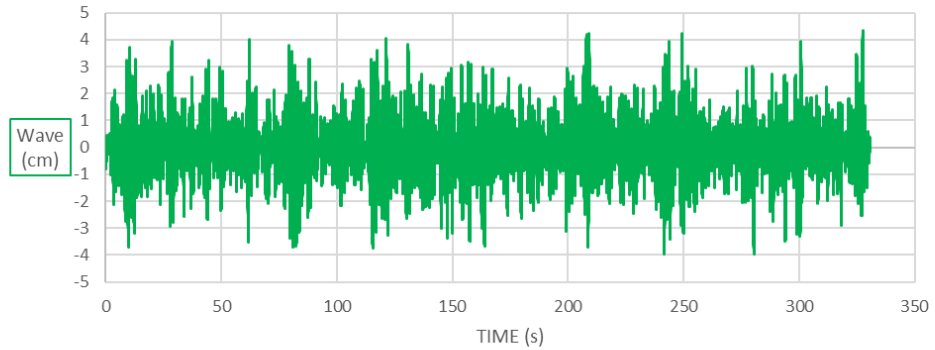


# SPAR RESPONSE TIME HISTORY WITH HEAVE PLATE 1,4 EXPERIMENTAL METHOD

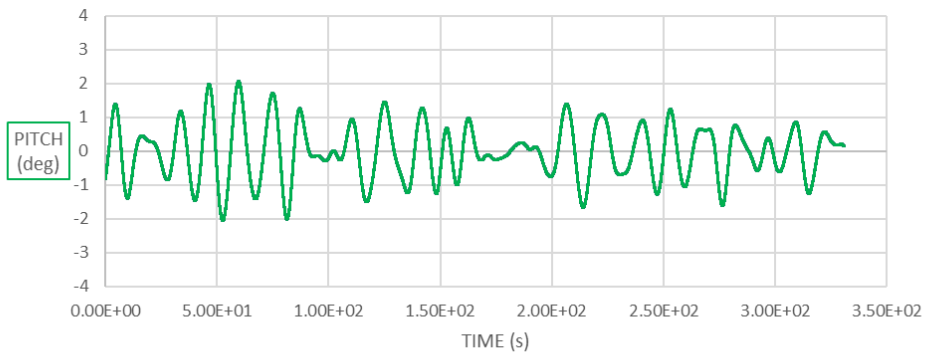
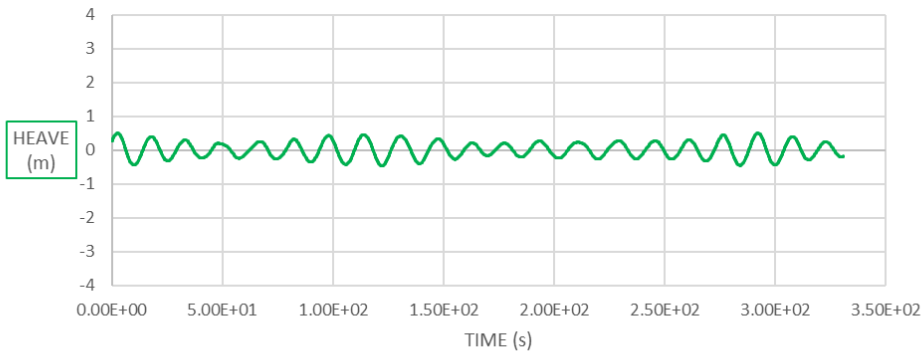
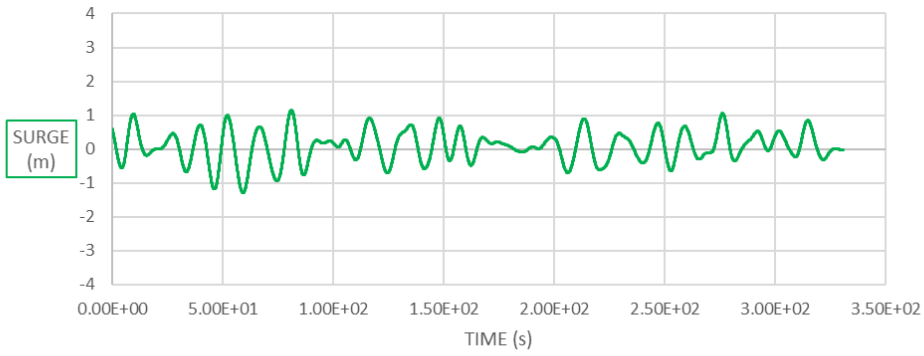
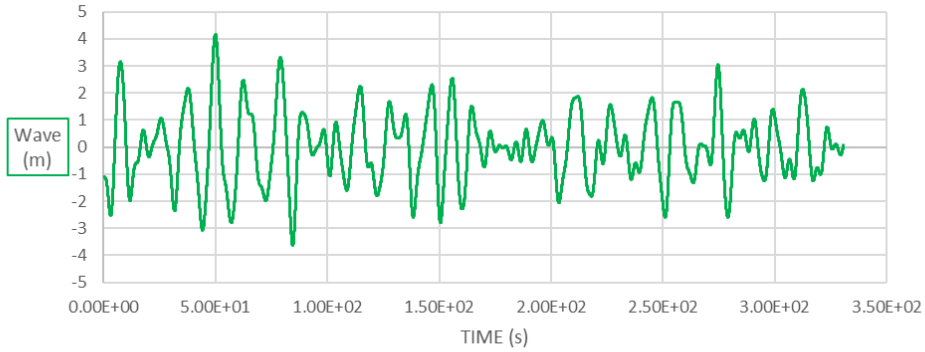




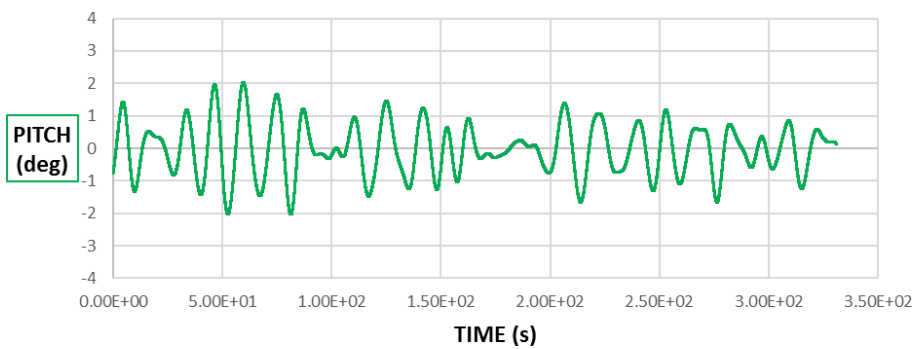
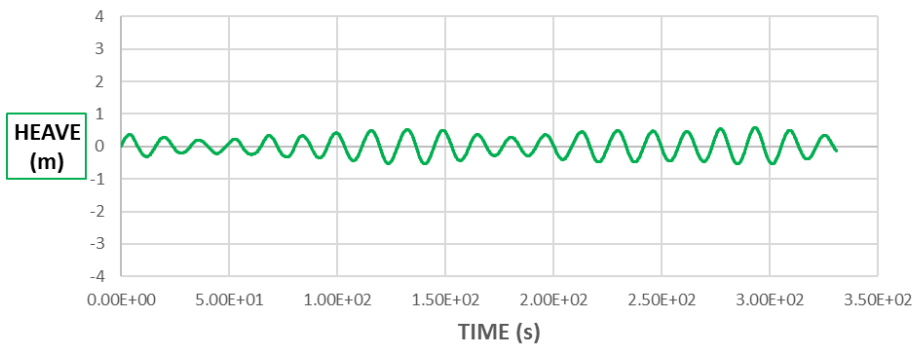
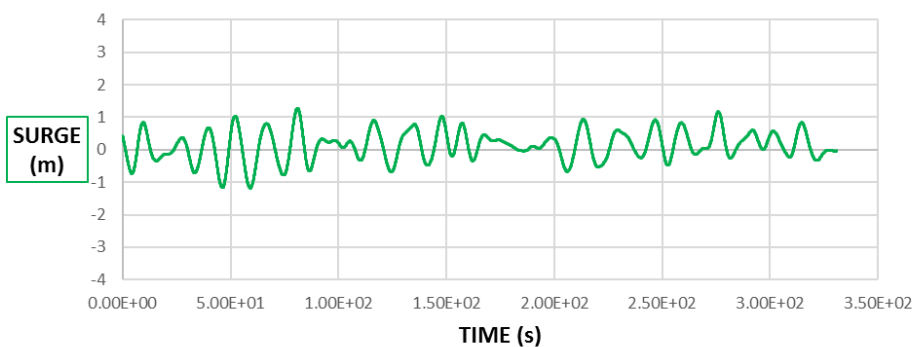
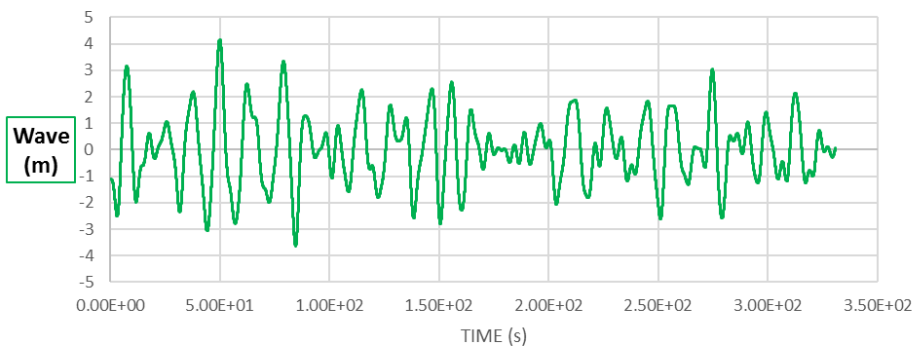
# SPAR RESPONSE TIME HISTORY WITH HEAVE PLATE 1,5 EXPERIMENTAL METHOD



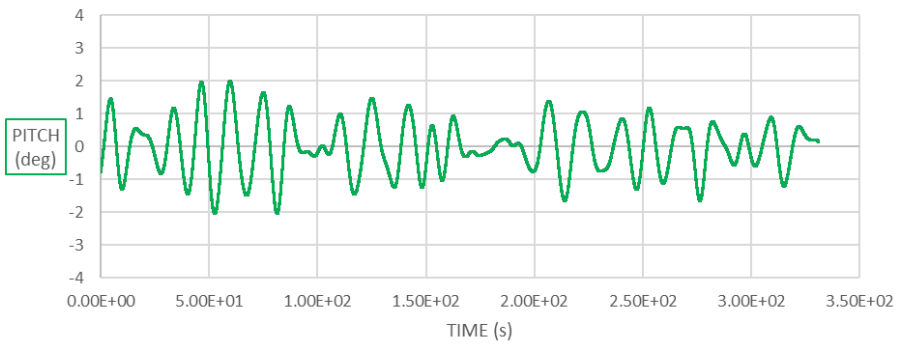
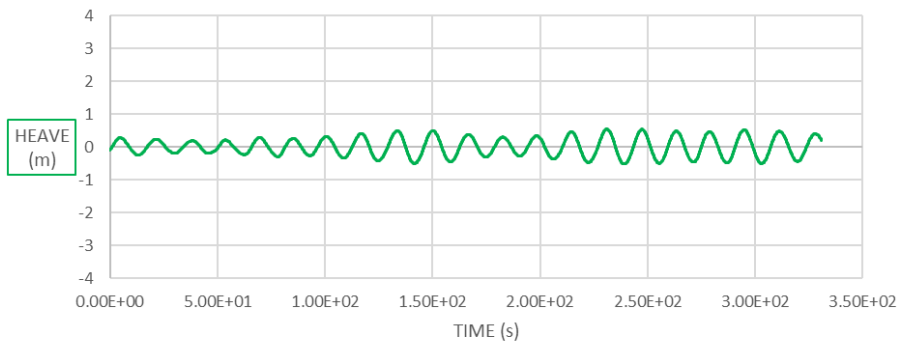
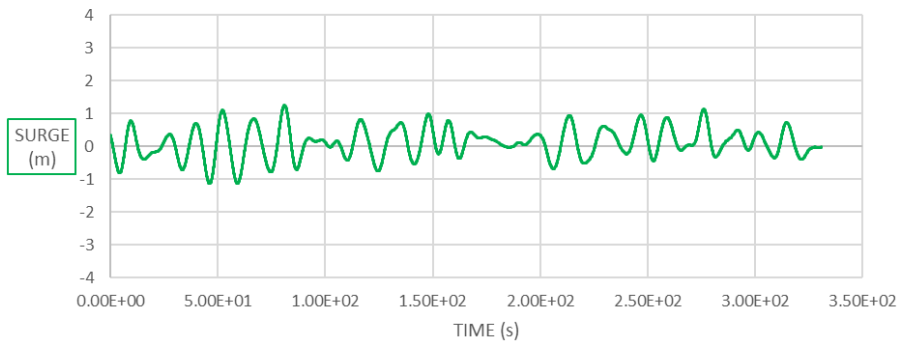
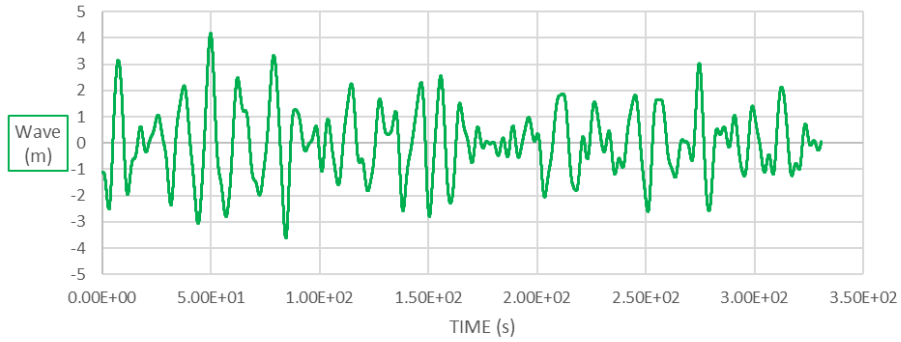
# SPAR RESPONSE TIME HISTORY WITHOUT HEAVE PLATE NUMERICAL METHOD



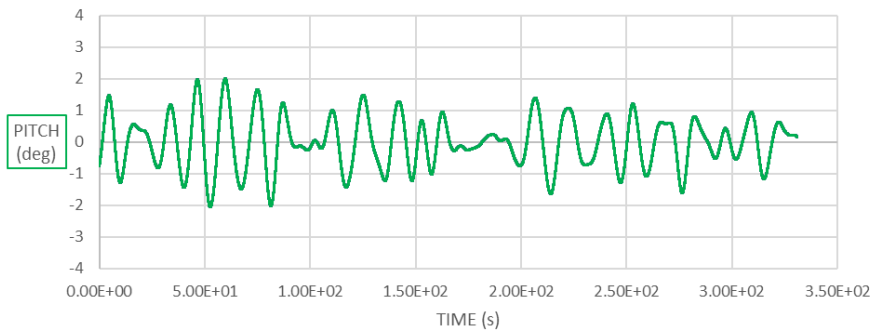
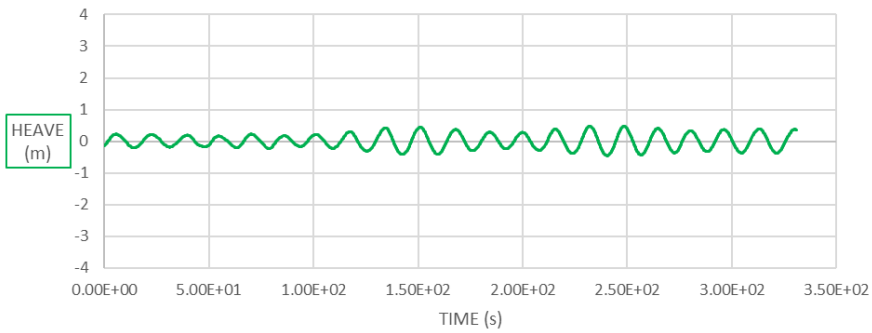
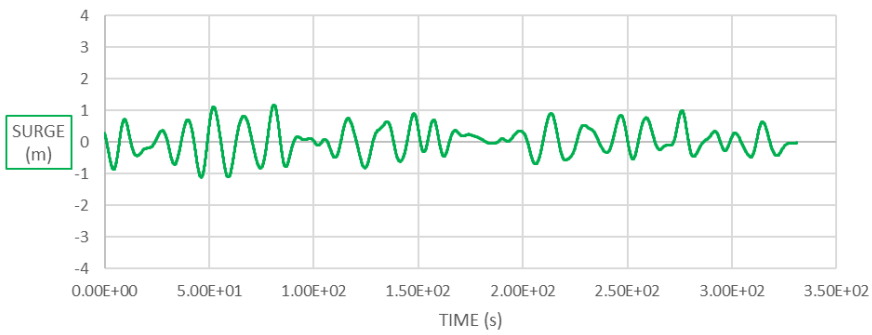
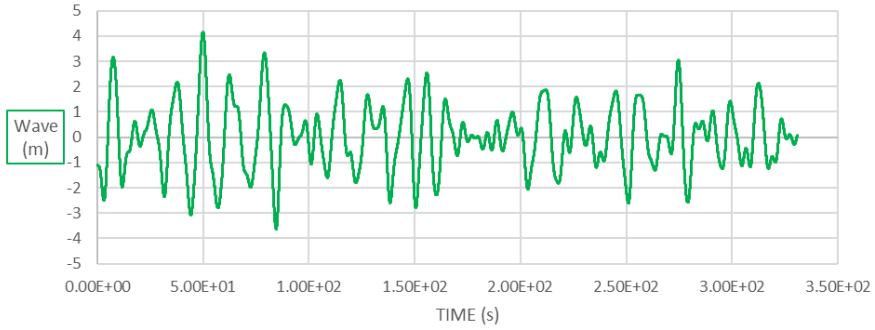
### SPAR RESPONSE TIME HISTORY WITH HEAVE PLATE 1,3 NUMERICAL METHOD



### SPAR RESPONSE TIME HISTORY WITH HEAVE PLATE 1,4 NUMERICAL METHOD



# SPAR RESPONSE TIME HISTORY WITH HEAVE PLATE 1,5 NUMERICAL METHOD



## BIODATA PENULIS



Nur Muhammad Hanif lahir di kota Sintang 3 Agustus 1996. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN PASAR ATAS, Cimahi. Kemudian penulis melanjutkan pendidikannya di SMPIT Imam Bukhari, Sumedang serta di SMA Future Gate, Bekasi. Setelah menyelesaikan pendidikan SMA, , pada tahun 2015, penulis diterima melalui jalur SBMPTN di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di PT. IMEC INTERNATIONAL SERVICES selama 2 bulan. Selain itu, penulis beserta teman pernah menjadi juara 2 dalam Petroweek Oil Rig Design Competition di Universitas Trisakti, Jakarta pada tahun 2016. Penulis punya pengalaman berorganisasi sebagai Ketua Departemen Kajian Strategis, Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (HIMATEKLA) periode 2017/2018. Terakhir, penulis berkesempatan untuk mewakili ITS untuk konferensi Paris Model United Nations 2019, di Prancis. Di tahun akhir penulis menjadi pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS sekaligus mengerjakan Tugas Akhir dengan tema pengaruh variasi diameter *heave plate* pada respon gerak SPAR.

Email: [hanif.nurmuhammad@gmail.com](mailto:hanif.nurmuhammad@gmail.com)