



**TUGAS AKHIR (MO 184804)**

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIS *ROLL DAMPING*  
STRUKTUR *FLOATING CRANE CATAMARAN* PADA  
KONDISI *FREE FLOATING* DAN TERTAMBAT**

**MUHAMAD FADKHURROHMAN AZIZ**

**NRP. 04311640000089**

**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**

**2020**



**FINAL PROJECT (MO 184804)**

**EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ROLL DAMPING  
STRUCTURE OF CATAMARAN FLOATING CRANE IN FREE  
FLOATING AND MOORING CONDITIONS**

**MUHAMAD FADKHURROHMAN AZIZ**

**NRP. 04311640000089**

**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**

**SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

**SURABAYA**

**2020**

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIS *ROLL DAMPING* STRUKTUR  
*FLOATING CRANE CATAMARAN* PADA KONDISI *FREE FLOATING*  
DAN TERTAMBAT**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Memperoleh Gelar Sarjana  
Teknik pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi  
Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**MUHAMAD FADKHURROHMAN AZIZ**

NRP. 04311640000089

Disetujui oleh:

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

.....  

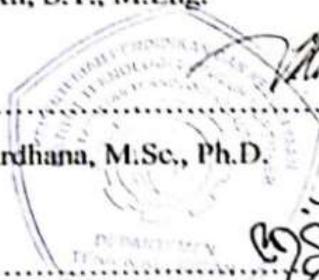

2. Ir. Murdjito, M.Sc., Eng. (Pembimbing 2)

.....  


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

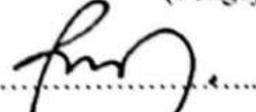
.....  


4. Ir. Wisnu Wardhana, M.Sc., Ph.D. (Penguji 1)



.....  


5. Dr. Eng. Rudi Walujo P, S.T., M.T. (Penguji 2)

.....  


6. Wimala L. Dhanista, S.T., M.T. (Penguji 3)

.....  


Surabaya, Agustus 2020

**STUDI EKSPERIMEN DAN NUMERIS *ROLL DAMPING* STRUKTUR  
*FLOATING CRANE CATAMARAN* PADA KONDISI *FREE FLOATING*  
DAN TERTAMBAT**

**Nama** : **Muhamad Fadkhurrohman Aziz**  
**NRP** : **04311640000089**  
**Departemen** : **Teknik Kelautan**  
**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 terkait dengan studi eksperimen *free decay test* gerak roll pada struktur *floating crane catamaran* yang ditinjau dari kondisi *free floating* dan tertambat. Eksperimen dilakukan pada fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) milik Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. Struktur yang digunakan sebagai eksperimen merupakan model *floating crane catamaran* dengan skala 1:36. Pada saat pengujian digunakan sistem horizontal *taut mooring* dengan konfigurasi 8 tali tambat yang dipasang pada 4 titik fairled. Dari pemodelan sistem tambat eksperimen, kekakuan pegas digunakan sebagai acuan pemodelan tali tambat pada analisis numeris. Analisis yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah membandingkan hasil eksperimen uji decay dengan hasil analisis menggunakan *software* Moses. Dari hasil eksperimen didapatkan perbandingan kondisi *free floating* terhadap tertambat untuk masing-masing uji decay sebesar 38%, 8%, dan 9% untuk nilai linear damping, kemudian 93%, 12% dan 13% untuk nilai kuadratik damping. Perbandingan hasil eksperimen terhadap hasil numeris didapatkan perbedaan paling besar untuk uji decay 1 terhadap numeris terdapat pada nilai kuadratik damping untuk kondisi *free floating* sebesar 128.39%, kemudian pada uji decay 2 dan uji decay 3 terhadap numeris didapatkan perbedaan paling besar pada nilai linear damping kondisi tertambat yaitu sebesar 60.80% dan 66.83%.

**Kata Kunci:** *floating crane catamaran, roll damping, linear damping, kuadratik damping*

**EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ROLL DAMPING  
STRUCTURE OF CATAMARAN FLOATING CRANE IN FREE  
FLOATING AND MOORING CONDITIONS**

**Name** : **Muhamad Fadkhurrohman Aziz**  
**NRP** : **04311640000089**  
**Department** : **Ocean Engineering**  
**Supervisors** : **Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.**  
**Ir. Murdjito, M.Sc. Eng.**  
**Baharuddin Ali, S.T., M.Eng.**

**ABSTRACT**

This final project discusses the experimental study of the free decay test of roll motion on the catamaran floating crane structure in terms of free floating and moored conditions. Experiments were carried out at the Maneuvering and Ocean Engineering Basin (MOB) facility owned by the Hydrodynamics Technology Center - BPPT. The structure used as an experiment is a catamaran floating crane model with a scale of 1:36. At the time of testing, a horizontal mooring line system was used with a configuration of 8 mooring ropes installed at 4 fairled points. From the experimental mooring system modeling, spring stiffness is used as a reference for mooring rope modeling in numerical analysis. The analysis carried out in this final project is to compare the experimental results of the decay test with the results of the analysis using Moses software. From the experimental results, the comparison of free floating to moored conditions for each decay test was 38%, 8%, and 9% for the linear damping value, then 93%, 12% and 13% for the damping quadratic value. Comparison of experimental results to numerical results obtained the greatest difference for the decay 1 test against the numerical found in the damping quadratic value for free floating conditions of 128.39%, then in the decay 2 test and the decay 3 test on numerical the greatest difference was the linear damping value of the moored condition namely 60.80% and 66.83%.

**Keyword:** *catamaran floating crane, roll damping, linear damping, quadratic damping*

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirobbil'alamin, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT., Tuhan semesta alam, atas berkat limpahan rahmat, taufik, serta karunia-Nya lah penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Studi Eksperimen dan Numeris Roll Damping Struktur *Floating Crane Catamaran* pada Kondisi *Free Floating* dan Tertambat”. Tak lupa juga sholawat serta salam penulis haturkan kepada junjungan umat islam nabi besar Muhammad SAW, yang telah menjadi suri tauladan bagi seluruh umat islam di dunia. Tugas akhir ini merupakan salah satu prasyarat yang harus dilaksanakan oleh para mahasiswa Departemen Teknik Kelautan untuk memperoleh gelar Strata 1 (S1).

Secara umum, penelitian tugas akhir ini merupakan studi eksperimen *free decay test* untuk gerakan roll dengan kondisi *free floating* dan tertambat. Penelitian mengenai damping ini diharapkan bisa menjadi ilmu yang sangat bermanfaat bagi pembaca. Serta menjadi rujukan atau acuan bagi mahasiswa-mahasiswa yang akan melanjutkan penelitian sejenis nantinya.

Masih banyak kekurangan yang terdapat pada pengerjaan tugas akhir ini, oleh karena itu adanya kritik dan saran menjadi sangat penting bagi penulis. Semoga semua kritik dan saran tersebut dapat bermanfaat dan juga semoga tugas akhir ini memberikan banyak manfaat untuk penelitian kedepannya.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Surabaya, Agustus 2020

Muhamad Fadkhurrohman Aziz

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan beribu terima kasih kepada pihak yang telah membantu dan membimbing dalam proses menyelesaikan tugas akhir ini, diantaranya :

1. Allah SWT, yang telah memberikan begitu banyak nikmat, kuasa dan kehendak-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir.
2. Orang tua penulis Bapak Sumajid dan Ibu Mulyanah yang senantiasa selalu memberikan dukungan doa, moril dan materil.
3. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. dan Ir. Murdjito, M.Sc.Eng selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan banyak masukan dan ilmu terhadap penulis dalam proses penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Baharuddin Ali, S.T., M.Eng. selaku pembimbing di Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT yang selalu memberikan kontribusi berupa masukan dan bantuan-bantuan dalam tugas akhir ini. Serta seluruh karyawan BTH yang telah banyak membantu eksperimen tugas akhir ini.
5. Bapak dan Ibu dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan dan saran dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
6. Bapak Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen wali dan juga Kepala Departemen Teknik Kelautan yang tidak pernah bosan memberikan saran dan arahan kepada penulis.
7. Teman-teman seperjuangan tugas akhir eksperimen *floating crane catamaran*; Hanif, Rico dan Yunan yang selalu saling tolong menolong terkait dengan pengerjaan dan penyusunan tugas akhir ini.
8. Keluarga besar Bassel Army (Bhaskara Selatan E-2) Hanif, Icam, Bije, Krisna, Yayan, Bayu (Beni), Miekail, Lingga, Sholeh, Musthafa, Yasser, Beni, Bima dan Afif yang sudah menemani 4 tahun masa kuliah penulis dengan penuh suka dan duka.

Sekali lagi penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah disebutkan, semoga mendapatkan balasan setimpal dari Allah SWT.

## DAFTAR ISI

<b>COVER</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>BAB I</b> .....	1
<b>PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	4
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	4
<b>1.4 Manfaat</b> .....	5
<b>1.5 Batasan Masalah</b> .....	5
<b>1.6 Sistematika Penulisan</b> .....	5
<b>BAB II</b> .....	7
<b>TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b> .....	7
<b>2.1 Tinjauan Pustaka</b> .....	7
<b>2.2 Dasar Teori</b> .....	8
<b>2.2.1 Kapal Katamaran</b> .....	8
<b>2.2.2 Teori Gerak Bangunan Apung</b> .....	9
<b>2.2.3 Beban Hidrodinamika</b> .....	10

2.2.4	Gaya Eksitasi.....	10
2.2.5	Gaya Reaksi.....	12
2.2.6	Persamaan Gerak Bangunan Apung.....	14
2.2.7	<i>Roll Decay Test</i> .....	18
2.2.8	<i>Roll Motion</i> .....	22
2.2.9	Teori Pemodelan .....	23
<b>BAB III.....</b>		29
<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		29
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2	Prosedur Penelitian.....	31
3.2.1	Studi Literatur dan Pengumpulan Data.....	31
3.2.2	Persiapan dan Analisa Pemodelan .....	32
3.2.3	Perancangan Model.....	34
3.2.4	Validasi Model.....	34
3.2.5	Konfigurasi Sistem Tali Tambat .....	35
3.2.6	Persiapan Instrumen Laboratorium.....	37
3.2.7	Langkah Uji Eksperimen .....	38
3.2.8	Langkah Analisa Numeris.....	39
3.2.9	Perbandingan Hasil Eksperimen dan Analisa Numeris.....	41
3.2.10	Kesimpulan.....	41
<b>BAB IV .....</b>		43
<b>ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....</b>		43
4.1	Pemodelan Struktur.....	43
4.2	Pemodelan pada Moses.....	47
4.3	Pemodelan Sistem Tambat.....	50
4.4	Alat Pengukuran .....	63

<b>4.5</b>	<b>Data dan Properti Keseluruhan.....</b>	<b>64</b>
<b>4.6</b>	<b>Analisis Eksperimen .....</b>	<b>65</b>
<b>4.7</b>	<b>Analisa Numeris .....</b>	<b>78</b>
<b>4.8</b>	<b>Perbandingan Hasil Eksperimen dan Numeris.....</b>	<b>82</b>
	<b>BAB V.....</b>	<b>93</b>
	<b>PENUTUP.....</b>	<b>93</b>
<b>5.1</b>	<b>Kesimpulan .....</b>	<b>93</b>
<b>5.2</b>	<b>Saran .....</b>	<b>94</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>95</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Struktur <i>Crane Barge</i> Tipe Catamaran .....	2
<b>Gambar 2.1</b> Gerakan Bangunan Apung .....	9
<b>Gambar 2.2</b> Interaksi Hidro-Struktur .....	10
<b>Gambar 2.3</b> Gerakan Osilasi Bebas Tereadam Akibat Eksitasi Gelombang Harmonik .....	16
<b>Gambar 2.4</b> Hasil Pengujian <i>Free Decay Test</i> .....	19
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....	29
<b>Gambar 3.2</b> Model Uji Eksperimen .....	33
<b>Gambar 3.3</b> Konfigurasi Tali Tambat Tampak Atas .....	36
<b>Gambar 3.4</b> Konfigurasi Sistem Tambat Tampak Samping .....	37
<b>Gambar 4.1</b> Proses Penimbangan Struktur Model Eksperimen .....	44
<b>Gambar 4.2</b> Contoh Besi Ballast .....	45
<b>Gambar 4.3</b> Kalibrasi Nilai LCG pada Model Struktur .....	46
<b>Gambar 4.4</b> Hasil Pemodelan Menggunakan <i>Software</i> Maxsurf modeler .....	48
<b>Gambar 4.5</b> Hasil Pemodelan Menggunakan <i>Software</i> Moses .....	49
<b>Gambar 4.6</b> Tali Pancing .....	51
<b>Gambar 4.7</b> Pegas yang digunakan pada Eksperimen .....	51
<b>Gambar 4.8</b> Konfigurasi Sistem Tambat Eksperimen Tampak Atas .....	52
<b>Gambar 4.9</b> Konfigurasi Sistem Tambat Tampak Samping .....	52
<b>Gambar 4.10</b> Proses Kalibrasi Pegas .....	53
<b>Gambar 4.11</b> Kekakuan Tali Tambat Eksperimen .....	57
<b>Gambar 4.12</b> Hasil Tegangan Tiap Ekskursi pada Eksperimen .....	58
<b>Gambar 4.13</b> Hasil Selisih Tegangan Tiap Ekskursi pada Eksperimen .....	59
<b>Gambar 4.14</b> <i>Static Mooring Analysis</i> .....	59
<b>Gambar 4.15</b> Plot Hasil Iterasi Tegangan Tali Tambat Tiap Ekskursi .....	61
<b>Gambar 4.16</b> Plot Hasil Iterasi Tegangan Tali Tambat Tiap Ekskursi .....	62
<b>Gambar 4.17</b> Hasil Iterasi Kekakuan Tali Tambat Tiap Ekskursi .....	63
<b>Gambar 4.18</b> <i>Qualysis Motion Capture Camera</i> .....	64
<b>Gambar 4.19</b> Grafik Hasil Uji Roll Decay <i>Free Floating</i> .....	66
<b>Gambar 4.20</b> Grafik Hasil Uji Roll Decay Tertambat .....	66
<b>Gambar 4.21</b> Hasil Uji <i>Decay</i> ke 1 Kondisi <i>Free Floating</i> dan Tertambat .....	67

<b>Gambar 4.22</b> Hasil Uji <i>Decay</i> ke 2 Kondisi <i>Free Floating</i> dan Tertambat .....	68
<b>Gambar 4.23</b> Hasil Uji <i>Decay</i> ke 3 Kondisi <i>Free Floating</i> dan Tertambat .....	68
<b>Gambar 4.24</b> Hasil Uji <i>Decay Software Moses</i> Kondisi <i>Free Floating</i> dan Tertambat .....	79
<b>Gambar 4.25</b> Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 1 dan Numeris untuk Kondisi <i>Free Floating</i> .....	83
<b>Gambar 4.26</b> Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 2 dan Numeris untuk Kondisi <i>Free Floating</i> .....	84
<b>Gambar 4.27</b> Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 3 dan Numeris untuk Kondisi <i>Free Floating</i> .....	84
<b>Gambar 4.28</b> Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 1 dan Numeris untuk Kondisi Tertambat .....	85
<b>Gambar 4.29</b> Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 2 dan Numeris untuk Kondisi Tertambat .....	85
<b>Gambar 4.30</b> Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 3 dan Numeris untuk Kondisi Tertambat .....	86

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> <i>Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scalling</i> .....	25
<b>Tabel 3.1</b> <i>Data Floating Crane Catamaran (Full Scale)</i> .....	31
<b>Tabel 3.2</b> <i>Data Kolam Maneuvering and Ocean Engineering Basin BTH-BPPT</i> .....	32
<b>Tabel 3.3</b> <i>Posisi Fairled Saat Eksperimen</i> .....	36
<b>Tabel 4.1</b> <i>Hasil Penskalaan Menggunakan Aturan Froude</i> .....	43
<b>Tabel 4.2</b> <i>Perhitungan Massa Total Model Eksperimen</i> .....	45
<b>Tabel 4.3</b> <i>Nilai KG Skala Model dan Skala Asli</i> .....	45
<b>Tabel 4.4</b> <i>Nilai LCG Skala Model dan Skala Asli</i> .....	46
<b>Tabel 4.5</b> <i>Jari-jari Girasi Floating Crane Catamaran</i> .....	47
<b>Tabel 4.6</b> <i>Hasil Validasi Pemodelan Software Moses Terhadap Ukuran Aslinya</i> .....	50
<b>Tabel 4.7</b> <i>Posisi Fairlead pada Model Eksperimen</i> .....	52
<b>Tabel 4.8</b> <i>Data Kalkulasi Pegas 1</i> .....	54
<b>Tabel 4.9</b> <i>Hasil Kalkulasi Kekakuan Pegas</i> .....	55
<b>Tabel 4.10</b> <i>Kekakuan tali Tambat Eksperimen</i> .....	56
<b>Tabel 4.11</b> <i>Hasil Iterasi Tegangan Tali Tambat Akibat Ekskursi</i> .....	60
<b>Tabel 4.12</b> <i>Hasil Iterasi Selisih Tegangan Tali Tambat Tiap Ekskursi</i> .....	61
<b>Tabel 4.13</b> <i>Hasil Iterasi Kekakuan Tali Tambat Tiap Ekskursi</i> .....	62
<b>Tabel 4.14</b> <i>Data Struktur Floating Crane Catamaran</i> .....	64
<b>Tabel 4.15</b> <i>Data Properti Tali Tambat</i> .....	65
<b>Tabel 4.16</b> <i>Perbandingan Amplitudo dari Uji Decay 1 untuk Kondisi Free Floating dan Tertambat</i> .....	69
<b>Tabel 4.17</b> <i>Perbandingan Amplitudo dari Uji Decay 2 untuk Kondisi Free Floating dan Tertambat</i> .....	69
<b>Tabel 4.18</b> <i>Perbandingan Amplitudo dari Uji Decay 3 untuk Kondisi Free Floating dan Tertambat</i> .....	69
<b>Tabel 4.19</b> <i>Nilai Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period dan Zero-down Crossing Period Uji Decay 1 Kondisi Free Floating</i> .....	70

<b>Tabel 4.20</b> Nilai <i>Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period</i> dan <i>Zero-down Crossing Period</i> Uji Decay 2 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	71
<b>Tabel 4.21</b> Nilai <i>Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period</i> dan <i>Zero-down Crossing Period</i> Uji Decay 3 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	71
<b>Tabel 4.22</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji <i>Decay</i> ke 1 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	72
<b>Tabel 4.23</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji <i>Decay</i> ke 2 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	72
<b>Tabel 4.24</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji <i>Decay</i> ke 3 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	72
<b>Tabel 4.25</b> Nilai <i>Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period</i> dan <i>Zero-down Crossing Period</i> Uji Decay ke 1 Kondisi Tertambat.....	73
<b>Tabel 4.26</b> Nilai <i>Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period</i> dan <i>Zero-down Crossing Period</i> Uji Decay ke 2 Kondisi Tertambat.....	73
<b>Tabel 4.27</b> Nilai <i>Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period</i> dan <i>Zero-down Crossing Period</i> Uji Decay ke 3 Kondisi Tertambat .....	73
<b>Tabel 4.28</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji <i>Decay</i> ke 1 Kondisi Tertambat .....	74
<b>Tabel 4.29</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji <i>Decay</i> ke 2 Kondisi Tertambat .....	74
<b>Tabel 4.30</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji <i>Decay</i> ke 3 Kondisi Tertambat .....	74
<b>Tabel 4.31</b> Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji Decay ke 1 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	75
<b>Tabel 4.32</b> Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji Decay ke 2 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	75
<b>Tabel 4.33</b> Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji Decay ke 3 Kondisi <i>Free Floating</i> .....	75
<b>Tabel 4.34</b> Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji Decay ke 1 Kondisi Tertambat .....	76
<b>Tabel 4.35</b> Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji Decay ke 2 Kondisi Tertambat .....	76
<b>Tabel 4.36</b> Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji Decay ke 3 Kondisi Tertambat .....	76
<b>Tabel 4.37</b> Nilai Koefisien Linear Damping (a) dan Kuadratik Damping (b) .....	77
<b>Tabel 4.38</b> Nilai Linear Damping dan Kuadratik Damping .....	77
<b>Tabel 4.39</b> Perbedaan Amplitudo Uji Decay pada <i>Software</i> Moses untuk Kondisi <i>Free Floating</i> dan Tertambat .....	79

<b>Tabel 4.40</b> Nilai <i>Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period</i> dan <i>Zero-down Crossing Period</i> Kondisi <i>Free Floating</i> .....	80
<b>Tabel 4.41</b> Nilai <i>Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period</i> dan <i>Zero-down Crossing Period</i> Kondisi Tertambat .....	80
<b>Tabel 4.42</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji Decay Numeris Kondisi <i>Free Floating</i> .....	81
<b>Tabel 4.43</b> Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji Decay Numeris Kondisi Tertambat .....	81
<b>Tabel 4.44</b> Nilai Koefisien Linear Damping (a) dan Kuadratik Damping (b) dari Hasil Uji Decay <i>Software Moses</i> .....	82
<b>Tabel 4.45</b> Nilai Linear Damping dan Kuadratik Damping dari <i>Software Moses</i> .....	82
<b>Tabel 4.46</b> Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi <i>Free Floating</i> .....	86
<b>Tabel 4.47</b> Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi <i>Free Floating</i> .....	87
<b>Tabel 4.48</b> Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi <i>Free Floating</i> .....	87
<b>Tabel 4.49</b> Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi Tertambat .....	88
<b>Tabel 4.50</b> Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi Tertambat .....	88
<b>Tabel 4.51</b> Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi Tertambat .....	88
<b>Tabel 4.52</b> Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen Uji Decay 1 dan Numeris .....	89
<b>Tabel 4.53</b> Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen Uji Decay 2 dan Numeris .....	89
<b>Tabel 4.53</b> Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen Uji Decay 3 dan Numeris .....	90

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan di bidang minyak dan gas bumi saat ini membuat eksplorasi dan eksploitasi mengarah ke perairan dalam. Struktur anjungan yang berbeda pun dibutuhkan karena kondisi lingkungan yang juga berbeda. Dengan kondisi lingkungan yang berbeda, maka konfigurasi dari struktur anjungan dan fungsi dari struktur anjungan tersebut harus bisa menyesuaikan dengan kondisi lingkungan yang ada. Era dimana kemajuan teknologi pada berbagai macam cabang ilmu pengetahuan dan bidang keahlian, khususnya dalam bidang kemaritiman, membuat sebuah kapal tidak hanya difungsikan sebagai alat transportasi orang dan barang saja, namun bisa dikembangkan ke arah lain. Salah satu fungsi lain dari kapal adalah sebagai fasilitas pengeboran dan anjungan penyimpanan minyak lepas pantai, tak hanya itu kapal juga bisa difungsikan untuk mentransportasikan alat-alat yang berukuran besar dan sangat berat. Dengan berkembangnya fungsi pada kapal, maka saat ini kapal mampu mengangkut komponen-komponen alat untuk eksplorasi dan eksploitasi dalam satu kali operasi (Gorat, L., 2017).

Kapal yang dapat membongkar dan juga mengangkut komponen-komponen tersebut disebut sebagai *crane barge*. *Crane barge* sendiri merupakan sebuah kapal yang mempunyai fasilitas akomodasi yang juga dilengkapi dengan sebuah *crane* untuk melaksanakan pekerjaan *lifting* dan *loadout* di lapangan. *Crane barge* juga dikembangkan agar dapat mengangkut struktur yang lebih besar. Dengan adanya pengangkutan muatan yang dilakukan pada *crane barge* dapat mempengaruhi dari pada kestabilan dari *crane barge* tersebut. Operasi pemindahan muatan dapat menambah beban luar pada kapal itu sendiri, sehingga mengakibatkan perpindahan letak *Center of Gravity* (CoG). Perpindahan ini bisa menyebabkan terjadinya *capsizing* apabila tidak disertai dengan analisa mengenai stabilitas pada *crane barge* tersebut (Nurmalita, 2011). Adapun contoh perkembangan *crane barge* seperti pada Gambar 1.1 berikut.



**Gambar 1.1** Struktur *Crane Barge* Tipe Catamaran (Sumber : Titan 2 *Operation at Caspian Sea*)

Pada saat operasi pengangkatan tersebut, dimungkinkan terjadi gerakan pada *crane barge* yang ditimbulkan oleh gaya luar seperti angin, gelombang dan arus atau bisa dibilang respon yang dihasilkan oleh bangunan merupakan efek adanya gaya lingkungan yang mengenai struktur tersebut. Gerakan yang terjadi pada kapal tersebut merupakan sebuah respon gerak yang mana digambarkan dalam wujud gerakan 6 derajat kebebasan. Dimana 6 gerakan tersebut mencakup gerakan *heave*, *surge*, *sway*, *pitch*, *roll* dan *yaw*. Dari ke 6 gerak diatas gerak *roll* lah yang sangat sulit untuk diprediksi (Ali, B. 2018). Gerakan *roll* sendiri merupakan fenomena penting pada kapal yang diakibatkan oleh kondisi laut saat berlayar, apabila efek ini ditambah dengan sedikit koefisien lain dapat menyebabkan kecelakaan serius pada kapal saat beroperasi.

*Rolling* merupakan gerakan putar pada sumbu memanjang kapal dan merupakan salah satu gerakan yang dominan pada saat kapal berada dilaut bebas. Gerakan ini merupakan gerak osilasi yang dialami oleh kapal. Gerakan *rolling* ini mempunyai karakteristik yang tidak menguntungkan bagi kapal yaitu; dapat menimbulkan stress tambahan bagi struktur kapal, bisa menimbulkan suasana yang tidak menyenangkan bagi penumpang maupun awak kapal. Pada kondisi tertentu, nilai *rolling* dari suatu struktur akan sangat

besar dan dapat membahayakan kapal ketika beroperasi (Wibowo, 2006). Dalam kondisi sebenarnya terdapat beberapa faktor yang bisa digunakan untuk mengontrol gerak *rolling* pada kapal, salah satunya adalah dengan mendesain kapal sesuai dengan daerah operasinya. Adapun hal lain adalah dengan mempertimbangkan *damping* (redaman) yang dihasilkan dari struktur itu sendiri, *damping* sendiri adalah parameter penting dalam persamaan gerakan *roll*, karena *damping* dapat mengontrol *magnitude* dari *amplitude rolling* yang terjadi akibat adanya beban lingkungan (Hendratmoko, H., 2012).

Sebagaimana diketahui akurasi prediksi pada gerakan *rolling* sangatlah sulit jika dibandingkan dengan mode gerakan lain, hal ini terbukti dari sering kurang akuratnya dalam prediksi gerak *roll*, hal ini terjadi karena metode prediksi gerakan kapal yang umum digunakan tidak memasukkan efek viskositas pada *roll damping* (Ikeda, Y., 2000). Sehingga dalam memprediksi gerak *roll damping* digunakan metode empiris. Memasukkan nilai viskositas *roll damping* yang sesuai akan membantu akurasi prediksi gerak *roll*. Adapun salah satu cara untuk memprediksi gerak *roll* adalah dengan melakukan pengujian *decay* pada gerak *roll* khususnya, pengujian ini sering dilakukan sebagai bagian dari program uji model *seakeeping*, uji ini digunakan untuk menentukan nilai *roll damping* pada karakteristik model.

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk memprediksi besarnya nilai *roll damping* yang mana didalamnya memuat nilai linear damping dan kuadrat damping. Uji *decay* ini dilakukan pada sebuah struktur *floating crane catamaran* pada kondisi *free floating* dan juga kondisi tertambat. Analisa dilakukan dengan melakukan eksperimen uji *decay* pada sebuah model struktur *floating crane catamaran* dan analisa numeris dilakukan menggunakan *software* Moses lalu hasil yang didapatkan dari eksperimen dan analisa numeris akan dilakukan perhitungan secara numeris menggunakan pendekatan-pendekatan menggunakan persamaan dari penelitian yang sudah ada untuk menentukan besarnya nilai linear damping dan kuadrat damping struktur pada gerak *roll*. Pada studi eksperimen tugas akhir ini, eksperimen dilakukan di fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) milik Balai Teknologi Hidrodinamika - BPPT dengan menggunakan model *floating crane*

*catamaran* skala 1:36 yang sudah ada di Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT.

Pada analisa numeris akan dilakukan pemodelan struktur *floating crane catamaran* menggunakan *software* Moses pada kondisi *free floating* dan tertambat untuk mengetahui parameter-parameter hidrostatis pada struktur tersebut. Setelah didapatkan model yang ideal dan sudah di cek validasinya terhadap ukuran sebenarnya maka akan dilakukan simulasi *decay test* menggunakan *software* Moses. Untuk mendapatkan nilai koefisien redaman pada analisa numeris ini akan dilakukan penyelesaian dengan menggunakan pendekatan atau persamaan yang didapatkan dari jurnal-jurnal dan penelitian yang sudah dilakukan. Persamaan-persamaan yang telah didapatkan tersebut nantinya akan digunakan sebagai acuan penentuan nilai redaman yang dihasilkan dari eksperimen dan hasil pemodelan menggunakan *software* Moses. Dari hasil yang sudah didapatkan dalam studi eksperimen dan analisa numeris, selanjutnya akan dibandingkan untuk mengetahui apakah pendekatan yang dilakukan dengan analisa numeris bisa menyerupai hasil studi eksperimen yang dilakukan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dikaji pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa besarnya *roll damping* pada struktur *Floating Crane Catamaran* pada kondisi *free floating* dan tertambat?
2. Bagaimana perbandingan hasil eksperimen dan analisa numeris *roll damping* pada kondisi *free floating* dan tertambat?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun dari perumusan masalah diatas, tujuan yang ingin dicapai pada pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui besarnya *roll damping* struktur *Floating Crane Catamaran* pada kondisi *free floating* dan tertambat.
2. Mengetahui perbandingan hasil eksperimen dan hasil analisa numeris *roll damping* pada kondisi *free floating* dan tertambat.

#### 1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dari tugas akhir ini dapat digunakan sebagai acuan dan pertimbangan dalam menganalisa *damping* pada struktur terapung khususnya pada gerak *roll*.
2. Dapat dijadikan sebagai referensi dalam penelitian mengenai analisa *roll damping* terhadap pengaruh kondisi *free floating* dan juga tertambat sebuah struktur terapung.

#### 1.5 Batasan Masalah

Dikarenakan banyak aspek yang tidak dapat diteliti pada dalam pengerjaan tugas akhir ini, maka untuk memperjelas lingkup pengerjaan tugas akhir ini perlu dilakukannya pembatasan permasalahan yang diteliti antara lain:

1. Studi eksperimen menggunakan model dan skenario berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh pihak Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT.
2. Studi eksperimen yang dilakukan menyesuaikan kondisi yang ada pada fasilitas *Manuevering Ocean Engineering Basin* (MOB), milik Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT.
3. Model eksperimen dan numeris menggunakan model *Floating Crane Catamaran*.
4. Studi eksperimen yang dilakukan pada kondisi *free floating* dan tertambat.
5. Analisa *damping* hanya dilakukan pada gerakan *roll* saja.
6. Tegangan pada tali tambat tidak diperhitungkan.
7. Analisa fluida disekitar struktur tidak diperhitungkan.

#### 1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari tugas akhir ini sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai apa saja yang melatar belakangi penelitian ini dilakukan, permasalahan apa yang akan dibahas, tujuan penelitian yang ingin dicapai, manfaat yang diperoleh dari penelitian ini,

batasan-batasan masalah yang diterapkan dalam penelitian ini, dan juga sistematikan penulisan yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini.

## 2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang mendasari dilakukannya tugas akhir ini, serta berbagai macam rumus dan persamaan yang akan digunakan demi menunjang pengerjaan tugas akhir ini.

## 3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi mengenai alur dan tahapan dalam proses penelitian yang dilakukan. Bab ini juga membahas data-data yang digunakan untuk menunjang pengerjaan tugas akhir ini.

## 4. BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini membahas mengenai hasil yang didapatkan dari penelitian yang sudah dilakukan dan juga membahas bagaimana mengolah data yang didapatkan dari hasil eksperimen dan juga hasil analisa numeris.

## 5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan dari tugas akhir, hasil dari analisis yang dilakukan, serta saran-saran yang perlu diberikan untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan di bidang minyak dan gas bumi saat ini membuat eksplorasi dan eksploitasi mengarah ke perairan dalam. Struktur anjungan yang berbeda pun dibutuhkan karena kondisi lingkungan yang juga berbeda. Dengan kondisi lingkungan perairan yang berbeda, maka konfigurasi dari struktur anjungan dan fungsi dari struktur anjungan tersebut harus bisa menyesuaikan dengan kondisi lingkungan yang ada (Gorat, M., 2017). Dalam perkembangannya, moda transportasi itupun mulai dimodifikasi dan dikembangkan kedalam jenis-jenis yang berbeda, salah satunya *crane brage* berjenis katamaran. Kapal katamaran yang dikenal sebagai kapal yang memiliki 2 lambung dan menyatu pada satu *deck* ini memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan pada saat operasinya (Sabastian, 2017). Pada saat beroperasi sebuah *crane barge* akan menghadapi beban hidrodinamik berupa gelombang, angin dan arus. Untuk menghadapi beban hidrodinamik atau beban eksternal yang mengenai struktur tersebut, diharuskan melakukan perancangan stabilitas pada struktur tersebut. Sehingga ketika menerima beban hidrodinamik sebuah struktur akan tetap stabil dan tidak mengalami kegagalan saat beroperasi (Hakim, 2012).

Salah satu analisa stabilitas pada sebuah struktur bangunan laut adalah analisa gerak *rolling*, dimana *rolling* merupakan gerakan putar yang terjadi pada sumbu-x dari kapal. Gerak *rolling* sendiri dinilai sebagai gerak yang tidak menguntungkan pada sebuah kapal (Wibowo, 2006). Dalam penelitiannya Ikeda (2000) *roll motion* merupakan faktor yang sangat penting dalam keselamatan operasi sebuah kapal. Menurut Falzarano (2015) gerak *rolling* pada kapal sangatlah sulit untuk diprediksi jika hanya dengan menggunakan analisa numeris saja. Sehingga diperlukan sebuah eksperimen untuk memprediksi gerak *rolling* yang terjadi pada sebuah kapal. Dari eksperimen dan analisa numeris inilah nantinya akan didapatkan nilai koefisien *damping* yang akan digunakan untuk meredam gerak *rolling* (Hendratmoko, 2012).

Dimana nilai *roll damping* ini sangatlah penting pada kondisi maksimum *roll* terutama pada daerah resonansi disekitar *roll natural period*. Pada penelitiannya Ali, B (2018) menjelaskan tentang kenaikan nilai koefisien *roll damping* ini didominasi oleh komponen linier. Dengan adanya kenaikan koefisien *roll damping* pada sebuah model kapal yang relatif kecil maka akan menyebabkan turunnya nilai respon gerak *roll* melalui uji *seakeeping*.

Sehingga terkait dengan tugas akhir ini, maka akan dilakukan studi eksperimen dan analisa numeris untuk memprediksi nilai *roll damping* pada sebuah struktur *floating crane catamaran* dengan kondisi *free floating* dan tertambat. Hasil dari pada uji eksperimen akan dijadikan sebagai pembandingan terhadap hasil analisa numeris yang dilakukan.

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Kapal Katamaran

Dalam dunia perkapalan, terdapat berbagai jenis kapal yang sudah dibuat, termasuk kapal dengan badan kapal lebih dari satu seperti kapal katamaran yang memiliki 2 buah badan kapal kemudian kapal trimaran yang memiliki 3 buah badan kapal dan seterusnya (Hermanto, 2014). Dalam tugas akhir Sabastian (2017) dijelaskan mengenai kelebihan dan kekurangan dari kapal katamaran tersebut. Kelebihan dari kapal katamaran antara lain adalah memiliki *deck* yang lebih luas sehingga dapat mengangkut kapasitas penumpang, kendaraan atau barang dalam jumlah yang besar, kemudian dengan adanya bentuk badan kapal yang berbeda dibandingkan dengan kapal *monohull*, bentuk 2 badan kapal ini berperan penting dalam mengurangi tahanan pada kapal sehingga menghasilkan kecepatan yang tinggi dan mengurangi konsumsi pada bahan bakar. Kekurangan dari kapal jenis ini adalah dikarenakan mempunyai 2 badan kapal menyebabkan kapal memiliki *maneuver* yang kurang baik dibandingkan dengan kapal *monohull*.

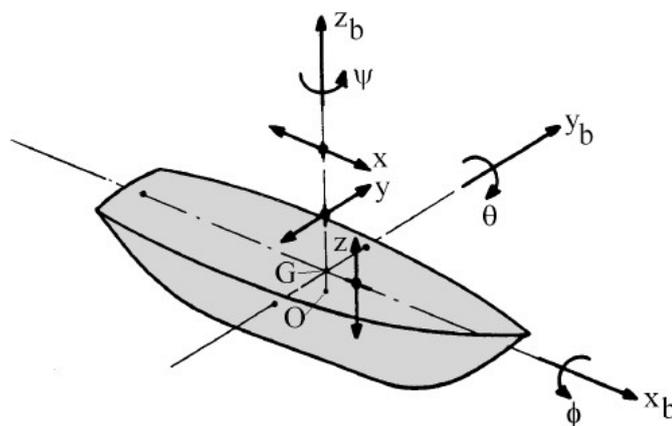
Dalam penelitian tugas akhir ini kapal katamaran dijadikan sebagai alternatif baru untuk sebuah kapal pengangkut atau *crane barge*. Kapal ini merupakan sebuah kapal yang memiliki struktur *crane* di atasnya,

kapal ini biasa digunakan untuk menunjang kegiatan seperti *lifting*, dll (Viviany, 2012).

### 2.2.2 Teori Gerak Bangunan Apung

Bangunan apung merupakan struktur yang mempunyai gerakan 6 derajat kebebasan. Gerakan ini dibagi menjadi dua yaitu gerak translasi dan gerak rotasi (Journee, et al., 2001). Gerak translasi merupakan gerakan dimana setiap titik dari bangunan apung bergerak dengan bentuk lintasan yang sama lurus, sedangkan gerak rotasi merupakan gerak dimana setiap titik bangunan apung bergerak dengan lintasan lingkaran. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah. Adapun 6 Jenis gerakan dari struktur terapung mempunyai penamaan masing-masing yaitu:

1. Mode gerak translasi
  - *Surging*, gerakan osilasi translasi arah sumbu x.
  - *Swaying*, gerakan osilasi translasi arah sumbu y.
  - *Heaving*, gerakan osilasi translasi arah sumbu z.
2. Mode gerak rotasi
  - *Rolling*, gerakan osilasi rotasi di sumbu x.
  - *Pitching*, gerakan osilasi rotasi di sumbu y.
  - *Yawing*, gerakan osilasi rotasi di sumbu z.



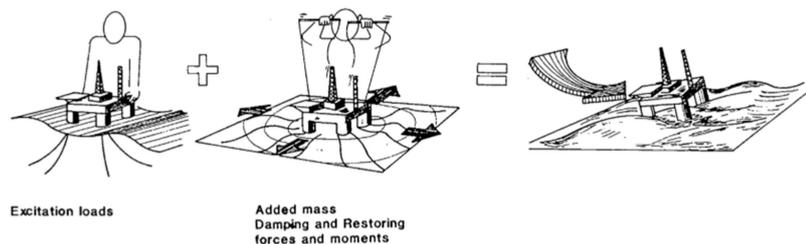
**Gambar 2.1** Gerakan Bangunan Apung (Journee, et al., 2001)

### 2.2.3 Beban Hidrodinamika

Suatu struktur terapung akan menerima sebuah beban hidrodinamika. Dimana menurut Faltinsen (1990) beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dijelaskan dalam 2 hal berikut diantaranya:

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk berosilasi namun menerima gelombang datang. Beban ini disebut sebagai beban akibat eksitasi gelombang. Beban ini secara umum terdiri dari gaya tekanan (yang biasa disebut Froude Krylov *Force*) dan gaya difraksi.
2. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat struktur digetarkan dengan frekuensi yang sama dengan gaya eksitasi gelombang yang datang. Namun, pada kali ini, tidak ada gelombang yang mengenai struktur. Beban hidrodinamika yang didapat dari sub masalah ini adalah beban massa tambah (*added mass*), beban redaman (*damping*) dan beban kekakuan (*restoring force*). Beban ini bisa juga dianggap sebagai beban reaksi akibat pergerakan struktur.

Dari 2 hal diatas dapat dihubungkan secara linear dengan cara menjumlahkan komponen keduanya, sehingga didapatkan total gaya hidrodinamik pada sebuah struktur lepas pantai. Adapun penjelasan tersebut dapat diringkas dengan melihat Gambar 2.2 dibawah.



**Gambar 2.2** Interaksi Hidro-Struktur (Faltinsen, 1990)

### 2.2.4 Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima oleh struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata inilah yang disebut sebagai gaya Froude-

Krylov (Faltinsen, 1990). Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, keberadaan struktur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan (Journee, et al., 2001). Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi.

Gaya Froude-Krylof dapat dicari menggunakan persamaan (2.1), dengan  $p$  merupakan distribusi tekanan,  $n$  merupakan unit vector dan  $dA$  merupakan luasan kecil dari suatu benda.

$$F_{FKi} = \int p n_i dA \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) menghubungkan antara distribusi tekanan yang diakibatkan medan gelombang dengan luas permukaan dari struktur. Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk struktur didapat dengan menurunkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan berneouli sehingga didapat persamaan (2.2). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks (Faltinsen, 1990).

$$p = \rho g \zeta_o e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

dengan,

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

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

$\zeta_o$  = amplitudo gelombang (m)

$k$  = angka gelombang (rad/m)

$z$  = elevasi dari muka gelombang (m)

$\omega$  = frekuensi gelombang (rad/s)

$t$  = waktu (s)

$x$  = arah gelombang posisi horizontal (m)

### 2.2.5 Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi massa tambah (*added mass*), redaman (*damping*) dan kekakuan (*stiffness*). Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

#### 1. Massa Tambah (*Added Mass*)

Bessel pada tahun 1828 melakukan eksperimen osilasi dalam bentuk pendulum di air dan di udara. Ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Bessel kemudian menginterpretasikan hal ini sebagai massa tambah (*added mass*) (Sarpkaya, 2010). Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda terapung (Newman, 1977). Ikut Bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah (Sarpkaya, 2010). Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak diperlihatkan pada persamaan (2.3) berikut:

$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \quad (2.3)$$

dengan,

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

$a$  = massa tambah (kg)

$\ddot{\xi}$  = respon percepatan gerak struktur ( $m/s^2$ )

#### 2. Redaman (*damping*)

Redaman merupakan dampak yang didapatkan dari adanya disipasi energi dari struktur (Newman, 1977). Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur

digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai persamaan (2.4). Persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai koefisien redaman dapat dicari dengan menggunakan analisa numeris (Chakrabarti, 1994)

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

dengan,

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

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

$\dot{\xi}$  = respon kecepatan gerak struktur (m/s)

### 3. Kekakuan (*stiffness*)

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak heave ( $\xi_3$ ), pitch ( $\xi_4$ ) dan roll ( $\xi_5$ ) (Djatkiko, 2012). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatis struktur. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.5). Persamaan 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:

$$c3 = \rho g Awp \quad (2.6)$$

$$c4 = \rho g V \overline{GMT} \quad (2.7)$$

$$c5 = \rho g V \overline{GML} \quad (2.8)$$

dengan,

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

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

$Awp$  = 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)

### 2.2.6 Persamaan Gerak Bangunan Apung

Gerak dari bangunan apung dapat dianalisa menggunakan Hukum II Newton sesuai persamaan (2.9) berikut ini.

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

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>)

Persamaan (2.9) menunjukkan bahwa hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya eksitasi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya eksitasi memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya timbul akibat perlawanan terhadap gaya eksitasi persamaan (2.10).

$$\sum F = F_{Eksitasi} - F_{Reaksi} \quad (2.10)$$

Dengan memasukkan pengertian gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka persamaan (2.10) dapat dikembangkan menjadi persamaan (2.11).

$$\sum F = F_{Eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.11)$$

dengan,

$$\sum F = \text{resultan gaya (N)}$$

$$F_a = \text{gaya inersia (N)}$$

$$F_b = \text{gaya redaman (N)}$$

$$F_c = \text{gaya pengembali (N)}$$

Dengan memasukkan persamaan (2.3), (2.4) dan (2.5) ke dalam persamaan (2.10), (2.11) maka didapatkan persamaan (2.12); (2.13).

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{Eksitasi} - (a_i \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i) \quad (2.12)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{\xi}_i + b_i \dot{\xi}_i + c_i \xi_i = F_{Eksitasi} \quad (2.13)$$

dengan,

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

$$F_{Eks} = \text{gaya eksitasi gelombang (N)}$$

$$m = \text{massa struktur (kg)}$$

$$a = \text{massa tambah struktur (kg)}$$

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

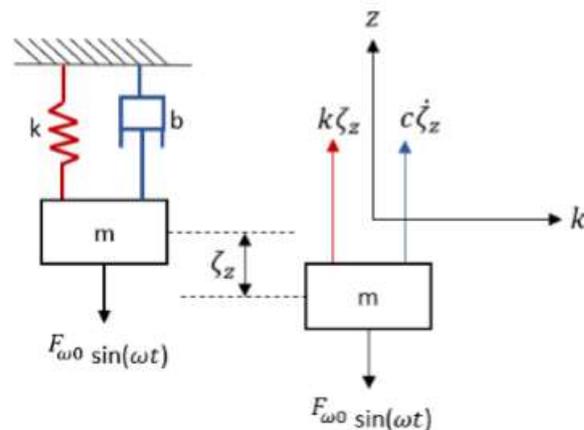
$b$  = nilai redaman sistem (N m/s)

$\dot{\xi}$  = respon kecepatan gerak struktur (m/s)

$c$  = kekakuan struktur (N/m)

$\xi$  = respon posisi gerak struktur (m)

Persamaan (2.13) sering disebut sebagai persamaan getaran sistem massa pegas teredam dalam gerakan 1 derajat kebebasan pada arah gaya harmonik eksternal yang mengenainya, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.3 berikut ini.



**Gambar 2.3** Gerakan Osilasi Bebas Teredam Akibat Eksitasi Gelombang Harmonik (Djarmiko, 2012)

Dalam sistem yang dibahas ini gaya gelombang harmonik dapat dijelaskan oleh persamaan elevasi gaya yang mempunyai amplitudo  $F_{\omega_0}$  dan frekuensi  $\omega_t$  berikut ini:

$$(m_i + a_i)\ddot{\xi}_i + b_i\dot{\xi}_i + c_i\xi_i = F_{\omega_0} \sin(\omega_t) \quad (2.14)$$

Dengan memberikan harga amplitudo  $F_{\omega_0} = 0$ , getaran bebas akan merepresentasikan penyelesaian umum yang dinamakan penyelesaian transien sebagai berikut:

$$(m_i + a_i)\ddot{\xi}_i + b_i\dot{\xi}_i + c_i\xi_i = 0 \quad (2.15)$$

Jika diasumsikan, maka penyelesaian tersebut memiliki bentuk sebagai berikut:

$$\zeta_z = \zeta_{z0} e^{qt} \quad (2.16)$$

Dengan  $\zeta_{z0}$  dan  $q$  adalah konstanta yang belum diketahui, dengan mensubstitusikan persamaan (2.16) ke persamaan (2.15) maka memberikan persaaam sebagai berikut:

$$\zeta_{z0} ((m + a)q^2 + bq + k)e^{qt} = 0 \quad (2.17)$$

Yang mana harus memenuhi untuk semua harga t, maka

$$(m + a)q^2 + bq + k = 0 \quad (2.18)$$

Dari persamaan (2.18) maka akan dihasilkan dua harga untuk  $q$ , yaitu:

$$q_{1,2} = -\frac{b}{2(m+a)} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2(m+a)}\right)^2 - \frac{k}{(m+a)}} \quad (2.19)$$

Penyelesaian umum dari  $\zeta_z$  dapat juga dituliskan sebagai berikut:

$$\zeta_z = A_1 e^{q_1 t} + A_2 e^{q_2 t} \quad (2.20)$$

Konstanta sembarangan  $A_1$  dan  $A_2$  dapat ditentukan dari nilai-nilai awal untuk permasalahan ini tergantung dari bagaimana pola gerakan dimulai. Melihat persamaan (2.19), jika perhitungan suku-suku di dalam tanda akar menghasilkan harga nol maka hanya akan didapatkan satu penyelesaian dari  $q$ . kondisi ini dinamakan sistem teredam kritis, dan koefisien redamannya dinamakan koefisien redaman kritis ( $b_c$ ). Oleh karena itu, bila suku-suku di dalam akar diberikan harga nol maka redaman kritisnya adalah:

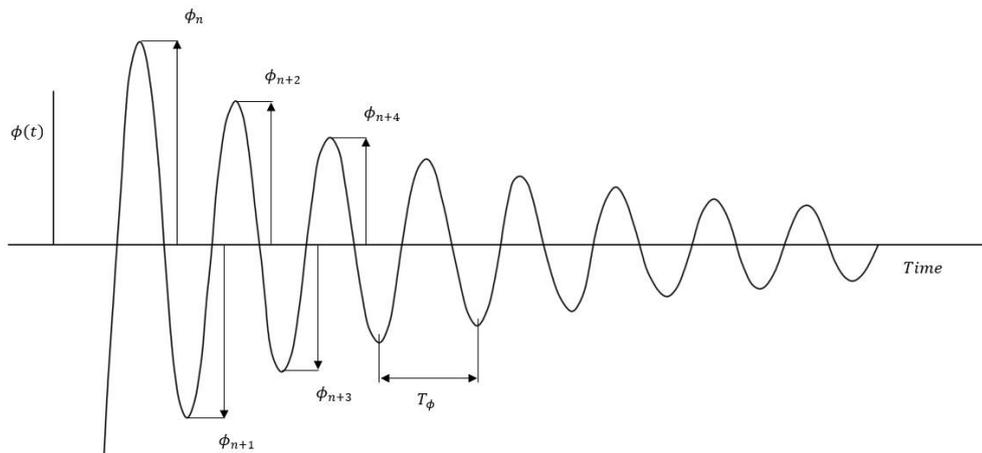
$$b_c = 2\sqrt{k(m+a)} \quad (2.21)$$

Rasio antara redaman  $b$  dengan redaman kritis  $b_c$ , disebut sebagai faktor redaman  $b_f = b/b_c$ . Nilai factor redaman ini seringkali dipakai untuk menjelaskan besarnya redaman pada suatu sistem dinamis. Suatu sistem yang teredam kritis ( $b_f = 1$ ) akan memiliki gerakan non-osilatori periodik. Sistem dengan  $b_f > 1$  disebut sebagai sistem sangat teredam atau *overdamped* dan bila  $b_f < 1$  maka sistem disebut kurang teredam atau *underdamped* (Djarmiko, 2012).

### 2.2.7 *Roll Decay Test*

*Free decay test* merupakan salah satu metode uji untuk penentuan nilai damping dari sebuah struktur. *Free decay test* sendiri dilakukan dengan model di air yang hanya di ujikan pada gerakan yang memiliki gaya atau momen hidromekanik seperti gerakan *heave*, *pitch*, dan *roll* saja, tetapi juga dapat dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, dan *yaw* (Journee dan Massie, 2001). Analisa uji *decay* dilakukan dengan cara yang sederhana, dimana model fisik kapal dimasukkan kedalam sebuah kolam uji. Ketika berada dalam kolam uji, kapal diberikan simpangan dengan sudut tertentu terhadap garis air.

Pada pengujian *decay* gerak *roll*, dilakukan penekanan pada salah satu sisi kapal yang sudah ditentukan secara manual, kemudian dilepaskan sehingga menciptakan sebuah osilasi pada gerakan *roll* kapal. Selama pengujian berlangsung, model diusahakan hanya bergerak pada mode gerakan *roll* dengan cara meminimalisasi mode gerak lain serta kondisi air pada saat pengujian harus tenang (Ali, 2018). Untuk menganalisa hasil pengujian diperlukan adanya parameter-parameter seperti *Center of Gravity* (CoG) dari kapal dan juga momen inersia dari kapal yang bisa ditentukan dari pengukuran model dengan bantuan alat ukur (Piehl, 2016). Dari hasil *free decay test*, akan didapatkan *output* berupa periode natural dan *damping coefficients* dari kapal yang diuji. Gambar 2.4 dibawah menunjukkan contoh hasil perekaman selama *motion decay test* untuk gerakan teredam sempurna.



**Gambar 2.4** Hasil Pengujian *Free Decay Test* (Ali, 2018)

dengan,

$\phi(t)$  = rentang waktu gerakan  $\phi$

$\phi_n$  = amplitudo gerakan dari osilasi ke- $n$ , (m), ( $^\circ$ )

$T_\phi$  = periode natural dari gerakan  $\phi$ , (s)

Menurut Froude (1861), proses penurunan nilai amplitudo gerak roll pada hasil uji *decay test* merupakan sebuah koefisien  $\Delta\phi$  yang merupakan nilai pengurangan amplitudo awal terhadap amplitudo selanjutnya (*delta angle*), dimana penurunan amplitudo gerak ini didefinisikan sebagai bentuk fungsi polynomial rata-rata  $\phi m$  (*mean angle*) yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta\phi = a\phi m + b\phi m^2 \quad (2.22)$$

Jika diasumsikan bahwa gerak  $\phi(t)$  dari hasil free decay test dapat dideskripsikan sebagai sebuah persamaan mode gerak, adapun persamaan mode gerak dalam free decay test yang paling umum digunakan adalah sebagai berikut:

$$(I + \Delta I) \frac{d^2\phi}{dt^2} + B_1 \frac{d\phi}{dt} + k\phi = 0 \quad (2.23)$$

Pada beberapa sumber lain juga dijelaskan terkait dengan adanya penambahan faktor non linear damping, menurut Ali, B. (2018) memasukan faktor non linear damping dapat menunjukkan hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan hanya menggunakan faktor linear damping saja. Sehingga apabila dari persamaan (2.23) dimasukkan faktor non linear damping, maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$(I + \Delta I) \frac{d^2\phi}{dt^2} + B_1 \frac{d\phi}{dt} + B_2 \frac{d\phi}{dt} \left| \frac{d\phi}{dt} \right| + k\phi = 0 \quad (2.24)$$

Dimana,

$(I + \Delta I)$  = Momen inerti dan momen added inertia (ton.m<sup>2</sup>)

$B_1$  = Linear damping (kN.s/m)

$B_2$  = Kuadratik damping (kN.s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)

$k$  = Kekakuan (*restoring coefficient*) (kN/m)

Dimana dari persamaan (2.24) diketahui bahwa persamaan gerak *roll* tidak mendapatkan gaya atau beban dari lingkungan. Kemudian diketahui  $(I + \Delta I)$  merupakan *moment inertia* dan *added inertia moment*,  $B_1$  dan  $B_2$  merupakan nilai linear dan kuadratik damping dari persamaan gerak *roll* tersebut dan  $k$  merupakan nilai kekakuan (*restoring moment*) dari struktur yang diujikan. Berikutnya dari hasil eksperimen decay test, dapat ditentukan koefisien linear dan kuadratik damping dengan mengasumsikan bahwa  $\phi = \phi_m \cos \omega t$ , maka  $\phi$  merupakan sebuah grafik fungsi cosinusoidal yang didapatkan dari hasil decay test gerak roll.

Mengacu pada persamaan (2.22) maka akan didapatkan koefisien a dan b yang mana (a) merupakan koefisien linear damping dan (b) merupakan koefisien kuadratik damping. dimana dari data yang sudah didapatkan sebelumnya menggunakan eksperimen *decay test* akan didapatkan koefisien a dan b tersebut menggunakan metode *least square*, dimana nilai a dan b didapatkan dengan menggambarkan grafik dengan

plot fungsi polynomial rata-rata ( $\phi m, \Delta\phi$ ). Bila diketahui persamaan gerak roll decay seperti pada persamaan (2.24) maka energi yang hilang selama uji roll decay untuk setiap setengah periode roll ( $T/2$ ) merupakan integral dari persamaan (2.24).

$$\int_0^{T/2} \left( (I + \Delta I) \frac{d^2\phi}{dt} + B_1 \frac{d\phi}{dt} + B_2 \frac{d\phi}{dt} \left| \frac{d\phi}{dt} \right| + k\phi \right) \frac{d\phi}{dt} dt \quad (2.25)$$

Dari integral persamaan (2.25) didapatkan nilai sebagai berikut:

- Massa total (momen inerti + momen added inerti):

$$\int_0^{T/2} \left( (I + \Delta I) \frac{d^2\phi}{dt} \right) \frac{d\phi}{dt} dt = 0 \quad (2.26)$$

- Koefisien linear damping:

$$\int_0^{T/2} \left( B_1 \frac{d\phi}{dt} \right) \frac{d\phi}{dt} dt = B_1 \frac{\pi^2}{T} \dot{\phi}^2 \quad (2.27)$$

- Koefisien kuadratik damping:

$$\int_0^{T/2} \left( B_2 \frac{d\phi}{dt} \left| \frac{d\phi}{dt} \right| \right) \frac{d\phi}{dt} dt = B_2 \frac{16\pi^2}{3T^2} \dot{\phi}^3 \quad (2.28)$$

- Kekakuan (*restoring coefficient*):

$$\int_0^{T/2} (k\phi) \frac{d\phi}{dt} dt = -k\dot{\phi} \Delta\phi \quad (2.29)$$

Sehingga dari nilai-nilai persamaan (2.26) – (2.29) jika dikembalikan lagi sesuai dengan persamaan decay test gerak roll, maka akan didapatkan:

$$B_1 \frac{\pi^2 \dot{\phi}^2}{T} + B_2 \frac{16\pi^2 \dot{\phi}^3}{3T^2} - k\dot{\phi} \Delta\phi = 0 \quad (2.30)$$

$$\Delta\phi = \frac{1}{k} \left( B_1 \frac{\pi^2}{T} \right) \dot{\phi} + \frac{1}{k} \left( B_2 \frac{16\pi^2}{3T^2} \right) \dot{\phi}^2 \quad (2.31)$$

Sehingga dari persamaan (2.31) dapat dilinearisasi seperti persamaan (2.24). Jika diketahui apabila  $\dot{\phi} = \phi m$ , maka akan didapatkan nilai koefisien a dan b pada persamaan *decrement roll decay* yang mana sudah disinggung pada persamaan (2.24). Sehingga nilai a dan b dapat di rumuskan seperti berikut:

$$a = \frac{1}{k} \left( B_1 \frac{\pi^2}{T} \right) \text{ dan } b = \frac{1}{k} \left( B_2 \frac{16 \pi^2}{3 T^2} \right) \quad (2.31)$$

$$B_1 = \frac{a k T}{\pi^2} \text{ dan } B_2 = \frac{b k 3 T^2}{16 \pi^2} \quad (2.32)$$

Sehingga dari persamaan (2.32) didapatkan nilai B<sub>1</sub> dan B<sub>2</sub> dari hasil eksperimen *decay test* gerak roll. Dimana nilai a dan b merupakan nilai dari koefisien linear damping dan koefisien kuadratik damping pada hasil uji decay gerak roll.

### 2.2.8 *Roll Motion*

Jika *rolling motion* adalah *motion* yang memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas kapal, maka *roll damping* adalah parameter yang sangat penting pada gerakan *rolling*. Karena *damping* menentukan nilai besaran dari amplitudo gerak *rolling* pada sebuah struktur (Ikeda, et al., 2000).

Pesman, et al. (2010) menyatakan bahwa ada beberapa komponen yang berpengaruh pada analisa *roll damping*. Komponen-komponen yang dimaksud adalah *wave damping*, *lift damping*, *friction damping*, *eddy making damping* dan *bilge keel damping*. Sedangkan menurut Ikeda, et al. (2000) nilai dari *roll damping* bisa didapatkan dengan menjumlahkan komponen-komponen yang sudah disebutkan diatas. Sedangkan menurut Chakrabarti (2000) menambahkan komponen yang dapat mempengaruhi nilai *roll damping*, komponen tersebut adalah tahanan antara kapal dan udara. Untuk derajat gerakan kapal, sebenarnya bisa digambarkan dengan lebih baik dengan menggunakan persamaan linernya, namun hal ini tidak sepenuhnya bisa diterapkan untuk gerakan

*rolling*. Secara umum persamaan gerak *roll* bisa dituliskan sebagai berikut:

$$A\ddot{\phi} + B(\dot{\phi})\dot{\phi} + C(\phi, t) = M \cos(\omega t) \quad (2.32)$$

Dimana  $\phi$  merupakan sudut gerak *roll*, *dots* mewakili penurunan terhadap fungsi waktu,  $I$  merupakan total momen inersia pada gerak *roll*,  $M$  adalah momen gelombang,  $\omega$  merupakan frekuensi dari gelombang, sedangkan  $t$  adalah fungsi waktu. Koefisien redaman ( $B$ ) dan koefisien pengembali ( $C$ ) ditunjukkan sebagai sebuah nilai linear. Sehingga pada koefisien redaman ( $B$ ) bisa dijelaskan dengan persamaan berikut ini:

$$B(\dot{\phi}) = B_1\dot{\phi} + B_2(\dot{\phi})\dot{\phi} + B_3\phi^3 \quad (2.33)$$

Dari persamaan (2.33) nilai dari  $B_1$  merupakan nilai linear,  $B_2$  merepresentasikan nilai adalah *quadratic drag* dan  $B_3$  adalah nilai volume.

### 2.2.9 Teori Pemodelan

Dalam melakukan pemodelan suatu *prototype* dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan kondisi sesungguhnya yang akan diterima oleh bangunan apung tersebut. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya (Munson, et al., 2013).

#### 3.1 Kesamaan Geometri

Dalam hal kesamaan geometri, model yang akan dibuat harus memiliki kesamaan dalam bentuk, tetapi berbeda dimensi. Model yang dibuat harus disesuaikan dengan suatu faktor skala sehingga sebanding dengan *prototype* yang dijadikan acuan, terutama pada bagian yang terendam. Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan *prototype* dengan persamaan (2.37) berikut:

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} \quad (2.37)$$

Dimana  $L_s$  dan  $L_m$  merupakan dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan *prototipe* dan model, dan  $\lambda$  merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Adapun satuan inersia yang memiliki komponen berat (ton) dan luas ( $m^2$ ), maka faktor skala menjadi berubah sebagai mana persamaan (2.38) berikut:

$$\lambda^5 = \frac{I_s}{I_m} \quad (2.38)$$

### 3.2 Kesamaan Kinematik

Dalam hal kesamaan kinematika, rasio dari kecepatan dan percepatan yang digunakan dalam model harus dijaga. Rasio dari kecepatan pada *prototipe* dengan kecepatan model yang bersesuaian harus 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 aslinya, tetapi dengan rasio yang berbeda dengan kecepatan. Ketika percepatan dan kecepatan model sudah sama dengan struktur aslinya, maka keduanya dapat dikatakan memiliki kesamaan kinematik.

### 3.3 Kesamaan Hidrodinamik

Hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh rasio dari gaya. Ada beberapa hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik berdasarkan masalah interaksi struktur dengan fluida. Kesamaan dinamik antara model dan struktur aslinya didapatkan dengan memenuhi hukum kesamaan tersebut. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, penting memahami proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling sesuai mengatur proses tersebut.

### 3.4 Bilangan *Froude*

Bilangan *Froude* didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium (Lloyd, 1989). Bilangan *Froude* didefinisikan sebagaimana persamaan (2.39) berikut:

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.39)$$

Dimana model *Froude* harus memenuhi hubungan,

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.40)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah  $\lambda$ , hubungan antara model dengan struktur asli 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 Scalling* (Chakrabarti, 1994)

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

**Tabel 2.1** Model to Prototype Multiplier for The Variables  
Commonly Used in Mechanics Under Froude Scalling (Chakrabarti,  
1994) (Lanjutan)

<i>VARIABLE</i>	<i>UNIT</i>	<i>SCALE FACTOR</i>	<i>REMARKS</i>
<i>GEOMETRY</i>			
<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>
<i>WAVE MECHANICS</i>			
<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>

**Tabel 2.1** Model to Prototype Multiplier for The Variables  
Commonly Used in Mechanics Under Froude Scalling (Chakrabarti,  
1994) (Lanjutan)

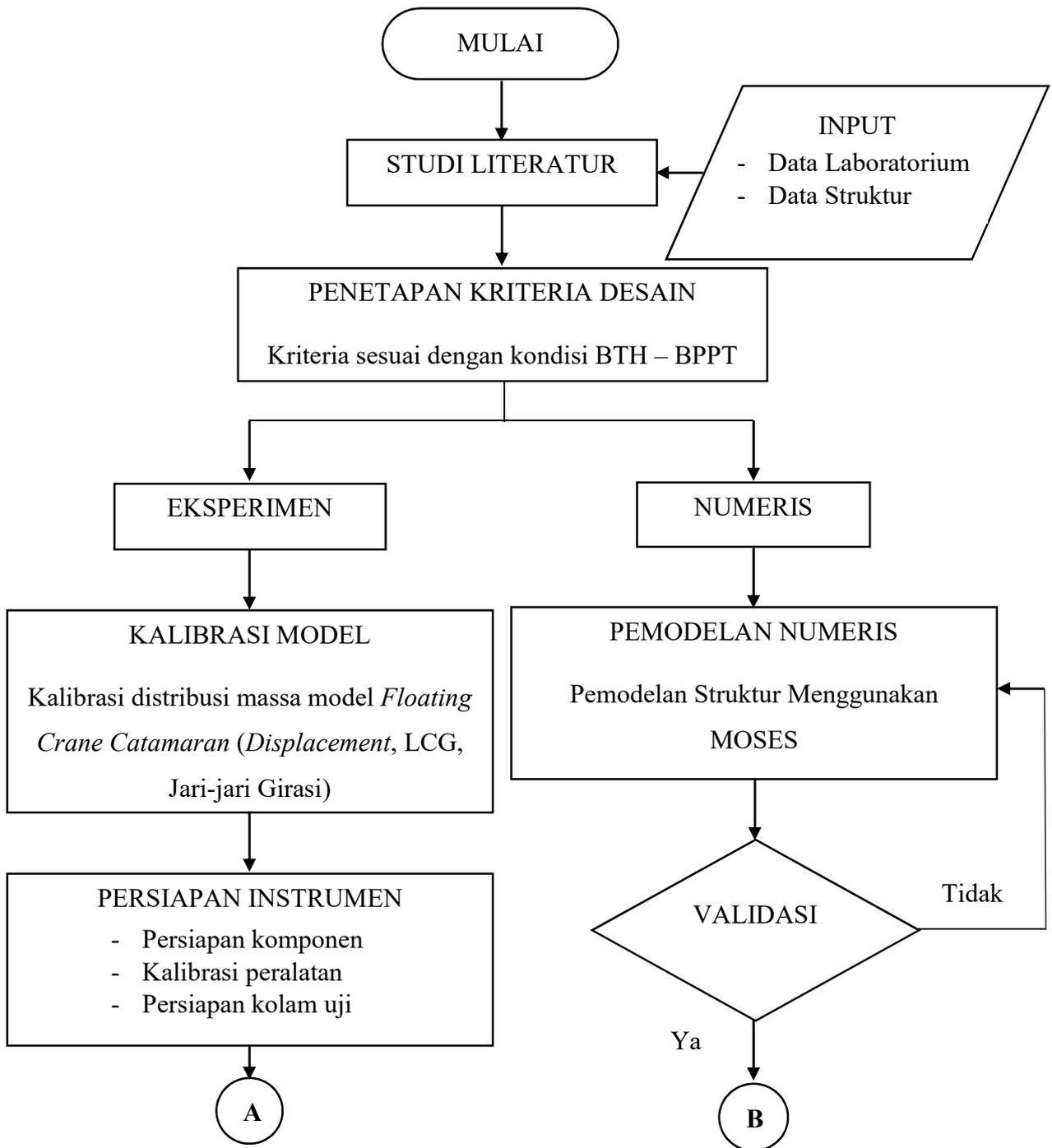
<i>KINEMATICS &amp; DYNAMICS</i>			
<i>Time</i>	T	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Dispalcement</i>	L	$\lambda$	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	MT <sup>2</sup>	$\lambda^2$	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Factor</i>	None	I	<i>Ratio of damping and critical damping coefficient</i>

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

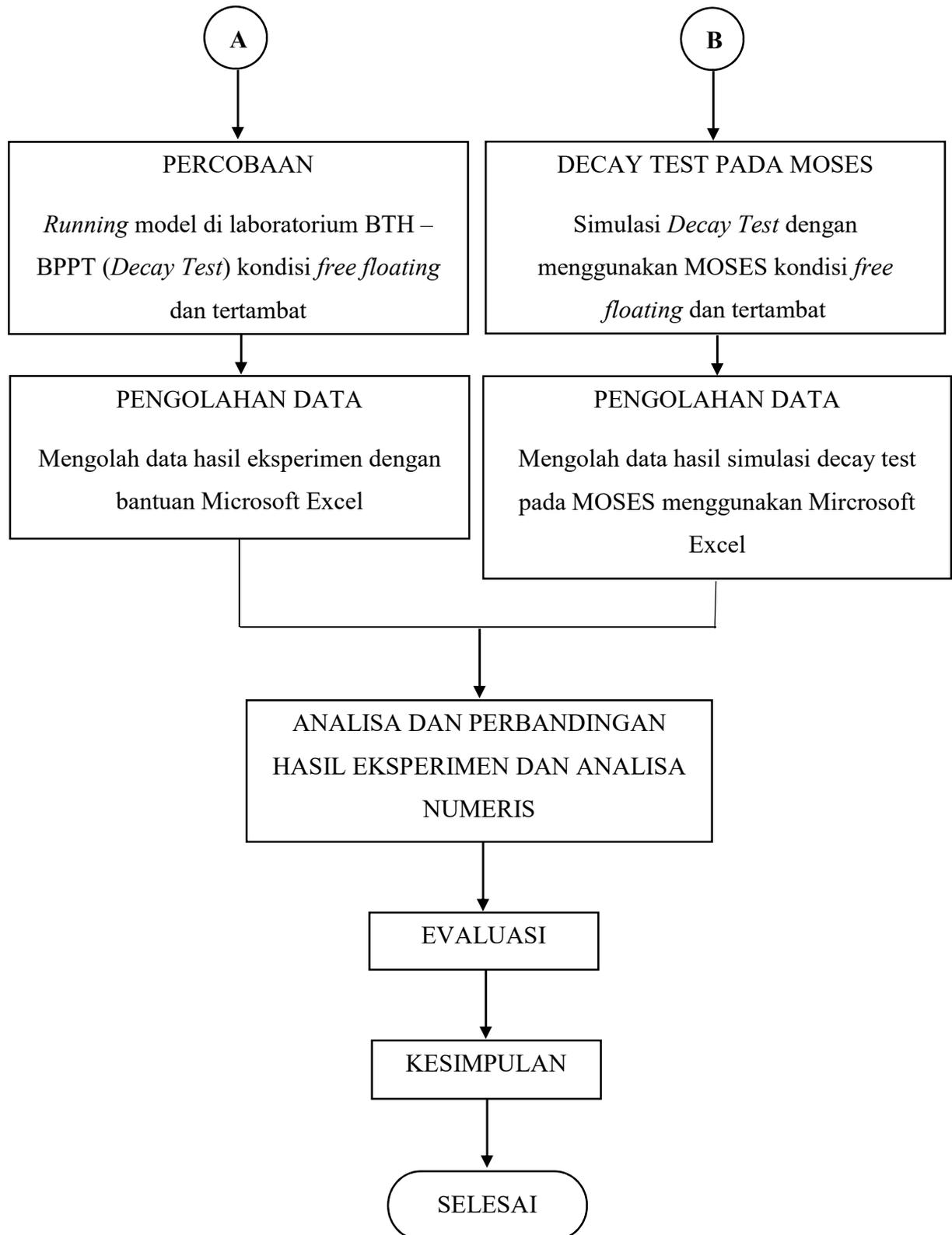
**BAB III**  
**METODOLOGI PENELITIAN**

**3.1 Diagram Alir Penelitian**

Adapun diagram alir dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut.



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

## 3.2 Prosedur Penelitian

### 3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Pada tahap ini, dilakukan studi literatur dari berbagai sumber seperti jurnal, buku dan tugas akhir yang telah dilakukan sebelumnya. Literatur yang telah didapatkan merupakan literatur yang berhubungan dengan uji eksperimen dan analisa numeris *damping* pada gerakan *roll*. Selain itu, terdapat teori dasar mengenai hidrodinamika yang mana akan digunakan sebagai acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Pada pengerjaan tugas akhir ini akan dilakukan pengumpulan data dari struktur *Floating Crane Catamaran*, selanjutnya akan dilakukan pengujian berupa eksperimen dan analisa numeris *roll damping* pada sebuah struktur *Floating Crane Catamaran* dengan variasi kondisi *free floating* dan tertambat. Model yang digunakan dalam eksperimen tugas akhir ini merupakan model *Floating Crane Catamaran* yang sudah tersedia di Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. Model tersebut akan di uji di fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. Adapun data struktur yang digunakan sebagai acuan model untuk eksperimen ditunjukkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 berikut:

**Tabel 3.1** Data *Floating Crane Catamaran* (Full Scale)

<b><i>Principal Dimension</i></b>	<b>Besaran</b>	<b>Satuan</b>
<i>Length Overall</i> (LOA)	111	m
<i>Length of Perpendicular</i> (Lpp)	108	m
<i>Breadth</i> (B)	37.8	m
<i>Depth</i> (H)	10.5	m
<i>Draft</i> (T)	4.7	m
<i>Service Speed</i> (Vs)	12	knots

**Tabel 3.2** Data Kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin*  
BTH-BPPT

<b>Deskripsi</b>	<b>Besaran</b>	<b>Satuan</b>
Panjang	60	m
Lebar	35	m
Kedalaman Penuh	2.5	m
Kedalaman Operasi	2.5	m
<i>Maximum Wave Period</i>	0.5 – 3	Sec
<i>Wave Direction</i>	0° – 90°	<i>Degree</i>

### 3.2.2 Persiapan dan Analisa Pemodelan

Berangkat dari studi literatur yang sudah didapat dan pengumpulan data dari dimensi struktur *Floating Crane Catamaran* yang ada di Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT, langkah selanjutnya adalah pemodelan. Pemodelan yang dilakukan yaitu pemodelan eksperimen dan pemodelan numeris.

#### - Pemodelan Eksperimen

Pada uji eksperimen struktur *Floating Crane Catamaran* diawali dengan penentuan model yang akan digunakan pada uji eksperimen, dimana model yang digunakan merupakan model fisik yang mengacu pada ukuran model asli. Penentuan model eksperimen struktur *Floating Crane Catamaran* dilakukan dengan metode penskalaan berdasarkan hukum Model Froude yang mana akan berdampak pada penskalaan variabel-variabel yang berkaitan dengan geometri struktur dan gelombang, kinematika fluida serta dinamika struktur akibat beban gelombang. Penerapan hukum tersebut tak lepas pula dari pertimbangan kondisi laboratorium eksperimen di fasilitas kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT dan juga ketersediaan peralatan yang akan digunakan dalam eksperimen, maka dari pertimbangan tersebut skala yang digunakan dalam pemodelan struktur *Floating*

*Crane Catamaran* adalah sebesar 1:36. Adapun model yang digunakan dalam eksperimen seperti Gambar 3.2 dibawah ini.



**Gambar 3.2** Model Uji Eksperimen (Sumber : Doc. Pribadi)

- **Pemodelan Numeris**

Pemodelan numeris struktur yang dianalisa dilakukan menggunakan *software* Moses pada kondisi *free floating* dan tertambat. Pemodelan ini dilakukan dengan menggunakan fitur-fitur pembuat bentuk yang terdapat pada *software* Moses. Pemodelan dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter dimensi struktur *Floating Crane Catamaran* seperti *principal dimension* dan juga parameter distribusi massa seperti *Center of Gravity (CoG)*, jari-jari girasi yang tentunya sudah dikalibrasikan dengan ukuran model fisik yang digunakan dalam eksperimen, yang mana nilai jari-jari girasi sudah diperhitungkan sebelumnya oleh pihak Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. Dari pemodelan yang dilakukan akan dilakukan analisa statis untuk mendapatkan parameter hidrostatik dari struktur *Floating Crane Catamaran*. Dari hasil *output* yang didapatkan maka akan digunakan sebagai komparasi hasil pada hasil eksperimen dan analisa numeris kondisi *free floating* dan tertambat. Selanjutnya dilakukan analisa numeris menggunakan persamaan dari literatur yang sudah didapatkan. Analisa menggunakan bantuan *software* Microsoft Excel yang mana mengacu pada persamaan-persamaan yang didapatkan dari jurnal terkait. Jurnal tersebut merupakan jurnal yang menganalisis fungsi osilasi *decay test* pada

struktur *Floating Crane Catamaran* sehingga didapatkan grafik *roll decay* yang kemudian akan digunakan sebagai komparasi hasil dari eksperimen yang sudah didapatkan.

### 3.2.3 Perancangan Model

Pada tahap perancangan model, dilakukan pemodelan terhadap struktur yang akan digunakan sebagai bahan eksperimen. Model yang akan digunakan merupakan struktur multihull bertipe katamaran, yang mana model diperlihatkan pada Gambar 3.2. Model tersebut merupakan model yang sepenuhnya dirancang oleh pihak Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT, model yang digunakan dibuat dengan bahan kayu sepenuhnya untuk bagian hull, sedangkan untuk bagian pelengkap seperti deck, dan bagian bangunan atas dari struktur dimodelkan dengan menggunakan bahan kayu lapis. Kemudian dilakukan penambahan ballast yang bertujuan agar model mencapai titik setimbangnya ketika dilakukan pengujian, ballast yang digunakan merupakan besi yang akan diletakkan pada titik-titik yang sudah ditentukan sebelumnya oleh pihak Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT selaku pelaksana pengujian.

### 3.2.4 Validasi Model

Pada tahap validasi model ini, model yang telah disediakan oleh Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT maupun model yang telah dibuat pada *software* Moses perlu divalidasi agar hasil dari simulasi maupun percobaan tidak menghasilkan perbedaan yang jauh. Perbedaan hasil pemodelan eksperimen dan numeris disyaratkan tidak boleh melebihi error 2% jika dibandingkan dengan struktur sebenarnya. Pada tahap validasi yang digunakan sebagai parameter yang divalidasi antara lain adalah *displacement*, panjang, lebar, tinggi, posisi fairlead, LCG dan jari girasi untuk model eksperimen dan juga model yang digunakan untuk analisa numeris. Hal ini sesuai dengan aturan dari IASC (2013) terkait error yang dihasilkan dari validasi permodelan software dengan model sesungguhnya.

### 3.2.5 Konfigurasi Sistem Tali Tambat

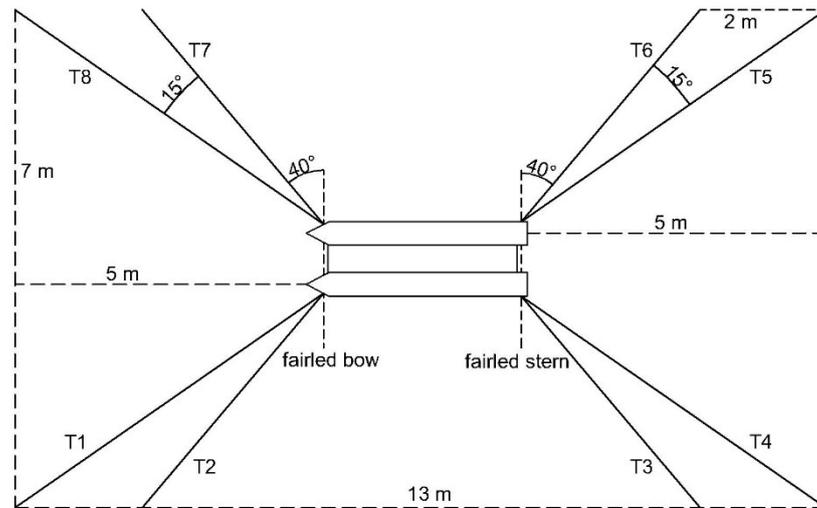
Pada pemodelan eksperimen yang dilakukan dengan kondisi tertambat. Pemodelan dilakukan dengan menimbang berbagai aspek terkait dengan kapasitas yang ada pada fasilitas kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) milik BTH – BPPT. Adapun beberapa aspek yang ditinjau terkait dengan pemodelan tali tambat yang digunakan untuk eksperimen adalah seperti kemudahan pekerjaan, ketersediaan bahan di Laboratorium dan sebagainya. Hal pertama yang dilakukan terkait dengan pemodelan tali tambat adalah penentuan kekakuan tali dan sistem yang ditinjau, apakah nantinya sistem sudah sesuai dengan kondisi riilnya. Dikarenakan apabila terjadi kesalahan dalam pemodelan sistem tambat dikhawatirkan untuk pendekatan numeris yang dilakukan akan menemukan hasil yang berbeda dan jauh dari hasil yang didapatkan dari eksperimen. Kemudian setelah menentukan sistem yang sesuai untuk tali tambat, maka selanjutnya adalah menentukan konfigurasi sistem tambat yang akan digunakan. Dalam pemodelan ini dipilih konfigurasi 8 tali tambat yang masing-masing akan dikaitkan pada 4 fairled yang sudah ditentukan posisinya sesuai dengan struktur sebenarnya. Tali tambat yang dipasang pada masing-masing *fairlead* yang ada pada samping struktur *Floating Crane Catamaran*. Terdapat delapan buah tali tambat yang dipasang pada ke empat sisi kapal, dimana digunakan konfigurasi 2 *line* pada tiap-tiap *fairlead*. Tali dihubungkan dengan sebuah spring dengan spesifikasi kekakuan yang sudah diukur sebelumnya menggunakan test beban, sehingga didapatkan kekakuan spring yang hampir sama untuk tiap spring yang digunakan untuk masing-masing tali tambat. Tali tambat ini akan ditarik secara horizontal sesuai dengan skenario eksperimen yang dilakukan oleh BTH – BPPT, kemudian tali tersebut akan dihubungkan ke *pulley* atau *roller* yang melekat pada sebuah tiang yang mana tali ini akan digunakan sebagai alat *transfer tension* kepada *load cell*. *Load cell* ini akan bekerja dengan baik apabila dihubungkan pada sebuah spring, dimana *load cell* inilah yang nantinya akan menghasilkan *output* berupa tegangan yang terjadi selama

eksperimen dilakukan atau berbasis *time domain*. Adapun posisi fairled yang digunakan dan konfigurasi tali tambat yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.3 dibawah ini.

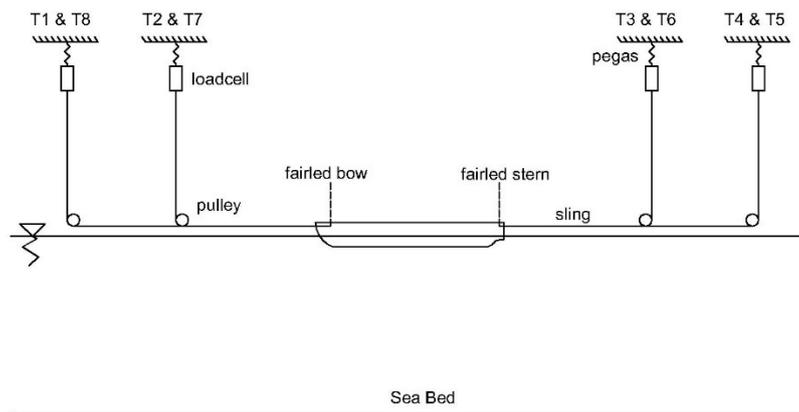
**Tabel 3.3** Posisi Fairled Saat Eksperimen

Posisi <i>Fairlead</i>			
Keterangan	Posisi	Skala Model	Satuan
<i>Bow</i>	Y dari <i>Deck</i>	0,035	m
	X dari <i>Bow</i>	0,157	m
<i>Stern</i>	Y dari <i>Deck</i>	0,035	m
	X dari <i>Stern</i>	0,125	m

Kemudian setelah diketahui masing-masing dari titik fairled maka dapat dimodelkan konfigurasi mooring sistem yang akan digunakan pada saat eksperimen. Adapun Gambar 3.3 dan 3.4 merupakan konfigurasi mooring sistem tampak atas dan tampak samping.



**Gambar 3.3** Konfigurasi Tali Tambat Tampak Atas



**Gambar 3.4** Konfigurasi Sistem Tambat Tampak Samping

### 3.2.6 Persiapan Instrumen Laboratorium

Instrument yang digunakan dalam eksperimen tugas akhir ini adalah seperangkat sistem penangkap gerak atau *motion* dari *QUALISYS*. Secara garis besar dalam eksperimen yang akan dilakukan terdapat beberapa komponen utama yang dapat digunakan untuk menangkap gerak dari struktur *Floating Crane Catamaran* pada analisa *decay test* terhadap gerakan *roll*. Adapun komponen-komponen yang dibutuhkan dalam analisa persiapan eksperimen tersebut antara lain:

- *Motion Capture Camera*

Kamera ini dapat menangkap posisi dari *Passive Marker* yang telah dipasang pada posisi-posisi tertentu pada struktur *Floating Crane Catamaran*. Posisi *Passive Marker* yang berubah-ubah seiring dengan adanya gerakan yang ditimbulkan oleh struktur *Floating Crane Catamaran* dapat ditangkap oleh kamera tersebut.

- *Passive Marker*

*Marker* yang digunakan ini merupakan *Marker* khusus yang digunakan untuk menentukan posisi titik dimana struktur *Floating Crane Catamaran* itu berada. Ketika struktur *Floating Crane Catamaran* dikenai dengan beban gelombang atau beban eksternal pada uji *roll decay* selama berlangsungnya eksperimen, posisi *Marker*

dari setiap waktunya akan ditangkap oleh sensor pada kamera dan akan dikumpulkan menjadi data berbasis ranah waktu (*Time History*).

### 3.2.7 Langkah Uji Eksperimen

Pengujian model fisik dilakukan di fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) milik Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. Pengujian dilakukan pada sebuah struktur *Floating Crane Catamaran* yang mana dilakukan dengan kondisi *free floating* dan tertambat. Langkah-langkah yang dilakukan dalam pengujian ini adalah:

1. Model struktur *Floating Crane Catamaran* yang sudah dikalibrasikan sebelumnya, akan diatur agar model tersebut sesuai dengan kondisi sebenarnya, kemudian model diletakkan dan diinstalasi pada kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) milik Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT, yang mana pada uji tersebut dilakukan pada kondisi *free floating* dan tertambat.
2. Menginstalasi tali tambat dan pegas yang akan digunakan untuk eksperimen, yang mana masing-masing tali tambat akan dihubungkan dengan masing-masing fairled di sisi kapal. Hal ini sesuai dengan skenario dan konfigurasi mooring sistem yang sudah dirancang oleh pihak Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT.
3. Pada bagian deck dari model diberikan *Passive Marker* sebagai alat penanda atau sebagai titik rekam yang akan ditangkap oleh perangkat kamera *QUALYSIS*. Dimana masing-masing *Passive Marker* ini difungsikan untuk mentransformasikan gerakan struktur *Floating Crane Catamaran* yang bergerak pada enam mode gerak dalam sebuah rekaman data respon perpindahan untuk translasi dalam centimeter (cm) dan derajat ( $^{\circ}$ ) untuk rotasi. Gerakan pada *Passive Marker* akan direkam oleh *Motion Capture Camera* yang telah dikalibrasikan dengan *Passive Marker* yang digunakan, dimana dalam studi kasus ini eksperimen yang dilakukan adalah free decay test. Pada uji free decay test ini hanya dilakukan pada gerakan

- roll saja, dimana roll merupakan gerakan pada arah rotasi sumbu – x.
4. Pada uji *decay* yang dilakukan pada struktur *Floating Crane Catamaran* ini dilakukan dengan kondisi *free floating* dan tertambat. Struktur yang di uji pada masing-masing kondisi diberikan simpangan awal pada *initial condition* saat  $t = 0$  sekon, kemudian diberikan simpangan awal pada sisi kapal. Kemudian dilepaskan untuk melihat redaman yang dihasilkan struktur pada respon gerak *roll*.
  5. Data respon yang terekam merupakan data mode gerakan *roll* berdasarkan ranah waktu yang didapatkan dari rekaman *motion capture camera* yang diakibatkan uji *decay*, yang kemudian disebut data mentah (*raw data*), kemudian diolah menggunakan software Microsoft Excel untuk mendapatkan grafik fungsi respon *roll* struktur *Floating Crane Catamaran* terhadap waktu pada kondisi *free floating* dan tertambat.
  6. Berdasarkan grafik fungsi respon gerak *roll* pada struktur *Floating Crane Catamaran* yang menghasilkan data berbasis ranah waktu akibat uji *roll decay*, didapatkan sebuah grafik osilasi gerak *roll* yang ditimbulkan akibat adanya singgungan yang diberikan kepada salah satu sisi kapal. Kemudian dari grafik osilasi tersebut akan dilanjutkan analisa amplitudo puncak dari tiap siklus osilasi respon struktur sehingga didapatkan nilai periode natural dari mode gerak *roll* tersebut, sedangkan menurut nilai amplitudo maksimum dan minimumnya akan dilakukan perhitungan mengenai nilai redaman linear dan redaman kuadratik yang dihasilkan dari struktur *Floating Crane Catamaran* pada kondisi *free floating* dan tertambat.

### 3.2.8 Langkah Analisa Numeris

Langkah uji numeris dilakukan sebagai validasi terhadap hasil yang didapatkan dari hasil eksperimen struktur *Floating Crane Catamaran*, dimana kondisi yang di eksperimenkan adalah dalam kondisi *free floating* dan tertambat. Dalam analisa numeris ini akan

dilakukan pemodelan dalam software MOSES dan juga akan dilakukan kalkulasi berdasarkan persamaan yang didapatkan dari literatur terkait. Langkah analisa numeris adalah sebagai berikut:

1. Membuat model struktur *Floating Crane Catamaran* pada kondisi *free floating* dan tertambat. Dimensi ukuran yang dimasukkan menyesuaikan dengan model aslinya. Jenis *file script* yang digunakan adalah dengan *file.dat* yang dimodelkan dalam bentuk *3D Diffraction*.
2. Kemudian dilakukan pembuatan *file script* dengan *file.cif* dimana *file* inilah yang nantinya berfungsi sebagai *file* pemanggil *file.dat* yang sudah dibuat. Dalam *file.dat* yang dibuat dimasukkan juga parameter-parameter seperti distribusi massa (*Center of Gravity* dan juga jari-jari girasi dari struktur).
3. Kemudian akan dilakukan analisa statis pada struktur *Floating Crane Catamaran* yang mana akan menghasilkan luaran berupa parameter-parameter hidrostatis dari struktur *Floating Crane Catamaran*, baik dalam kondisi *free floating* maupun kondisi tertambat.
4. Kemudian dilanjutkan analisa numeris menggunakan persamaan yang sudah didapatkan dari literatur yang terkait dengan analisa numeris tugas akhir ini, maka dibutuhkan bantuan software Microsoft Excel yang digunakan untuk analisa hasil osilasi *roll decay* yang didapatkan dari simulasi MOSES berdasarkan ranah waktu.
5. Langkah kalkulasi selanjutnya sama seperti pendekatan yang dilakukan pada perhitungan hasil eksperimen yang dilakukan, dimana kalkulasi ini akan didapatkan parameter-parameter yang ditinjau seperti redaman linear, redaman kuadratik dan kekakuan dari struktur berdasarkan persamaan-persamaan yang sudah didapatkan dari literatur terkait.

### **3.2.9 Perbandingan Hasil Eksperimen dan Analisa Numeris**

Setelah pengujian telah dilakukan, langkah selanjutnya adalah menganalisa hasil dari masing-masing pendekatan dan membandingkannya. Langkah perbandingan hasil tiap mode dengan kondisi *free floating* dan tertambat dibutuhkan untuk mengkomparasi hasil parameter tinjauan yang didapatkan melalui uji eksperimen sebagai patokan utama terhadap pendekatan analisa numeris dengan presentase perubahan maksimum sebesar 5%. Analisis yang dilakukan bertujuan untuk menjawab rumusan masalah tugas akhir ini. Hal tersebut meliputi, berapa besar nilai *roll damping* yang dihasilkan pada kondisi *free floating* dan tertambat, serta perbandingan antara hasil eksperimen dan analisa numeris.

#### **3.2.10 Kesimpulan**

Pada tahap kesimpulan ini, semua hasil analisa yang telah dilakukan baik dari hasil eksperimen maupun hasil dari numeris akan ditarik kesimpulannya, sehingga dari kesimpulan tersebut diharapkan dapat menjawab dari pada rumusan masalah yang sudah dibuat pada Bab I (Pertama) tugas akhir ini, kemudian juga diberikan juga saran yang harus dilakukan untuk penelitian selanjutnya terkait dengan uji roll decay.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemodelan Struktur

Dalam proses persiapan dalam pelaksanaan eksperimen, diperlukan adanya pemodelan terhadap struktur yang akan digunakan, pemodelan ini digunakan untuk memudahkan proses pelaksanaan eksperimen yaitu dengan cara menskalakan ukuran asli struktur terhadap sebuah model yang akan digunakan pada saat eksperimen. Dalam eksperimen kali ini, model yang digunakan sudah diskalakan sebesar 1:36 terhadap ukuran aslinya. Adapun ukuran-ukuran utama dari model yang digunakan dalam eksperimen ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 dibawah ini.

**Tabel 4. 1** Hasil Penskalaan Menggunakan Aturan *Froude*

<i>Principal Dimension</i>				
Keterangan	Skala Model	Faktor Skala	Skala Asli	Satuan
Skala	1:36	$\lambda$	1:1	m
LOA	3.08	$\lambda$	111	m
LWL	3.08	$\lambda$	111	m
LPP	3	$\lambda$	108	m
B	1.05	$\lambda$	37.8	m
H	0.4	$\lambda$	14.4	m
T	0.131	$\lambda$	4.7	m

Model yang digunakan merupakan model yang sudah dibuat sebelumnya, model tersebut merupakan model yang dibuat di Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. Selain dari ukuran-ukuran struktur yang akan digunakan dalam pelaksanaan eksperimen, sebelumnya perlu dilakukan beberapa kalibrasi seperti kalibrasi dari KG (*Keel to Gravity*) dan juga kalibrasi dari radius girasi untuk mendapatkan besaran distribusi massa dari struktur tersebut. Pada proses kalibrasi KG dan LCG, alat yang digunakan adalah sebuah meja osilator.

Adapun prosedur untuk mendapatkan nilai-nilai dari KG dan LCG dari struktur adalah sebagai berikut:

## 1. Kalibrasi Massa Struktur

Pada proses perhitungan massa struktur ini, sebelumnya dilakukan penimbangan untuk mengetahui berat dari model yang akan dieksperimentasikan. Hal ini dilakukan untuk melakukan penyesuaian terhadap dimensi dari model struktur serta juga penyesuaian terhadap distribusi dari massa struktur. Dari hasil penimbangan model, didapatkan berat model struktur kemudian untuk menyesuaikan dengan penambahan ballast berupa besi baja yang sebelumnya telah dikalibrasikan nilainya, dimana berat dai ballast yang digunakan ada 2 yaitu seberat 5 kg dan juga 10 kg. penambahan ballast ini bertujuan untuk mendapatkan massa total model yang sesuai dengan massa total struktur aslinya. Adapun Gambar 4.1 dibawah ini merupakan proses penimbangan model untuk didapatkan beratnya dan juga Gambar 4.2 merupakan contoh ballast yang digunakan untuk penambahan berat model.



**Gambar 4.1** Proses Penimbangan Struktur Model Eksperimen



**Gambar 4.2** Contoh Besi *Ballast*

Kemudian Tabel 4.2 merupakan perhitungan massa total dari model eksperimen setelah ditambahkan dengan besi *ballast*.

**Tabel 4. 2** Perhitungan Massa Total Model Eksperimen

Komponen	Massa (kg)
Struktur Model Eksperimen	111
Besi <i>Ballast</i>	70
Total	181

## 2. Kalibrasi KG (*Keel to Gravity*)

Kalibrasi nilai KG (*Keel to Gravity*) ini bertujuan untuk mendapatkan nilai KG dari skala model yang digunakan, setelah model dilengkapi dengan bangunan atasnya berupa crane dan juga *hellydecknya* barulah model yang akan dieksperimenkan diletakkan pada meja osilator. Untuk mendapatkan nilai KG untuk model yang akan dieksperimenkan, terlebih dahulu dilakukan pemodelan menggunakan skala struktur aslinya. setelah didapatkan nilai KG dari struktur dengan skala asli, kemudian dilanjutkan untuk mengubah nilai KG ke dalam bentuk skala model, sehingga pada saat kalibrasi nilai KG, nilai tersebut sudah dijadikan acuan tanpa harus dilakukan pengujian menggunakan meja osilator. Adapun nilai KG dapat dilihat pada Tabel 4.3 dibawah ini.

**Tabel 4.3** Nilai KG Skala Model dan Skala Asli

Keterangan	Skala Model	Faktor Skala	Skala Asli	Satuan
KG	0.428	$\lambda$	14.904	m

### 3. Kalibrasi LCG (Longitudinal Center of Gravity)

Kalibrasi nilai *Longitudinal Center of Gravity* ini bertujuan untuk mendapatkan nilai LCG dari skala model yang digunakan, model dilengkapi dengan bangunan atas dan juga peralatan lain yang ada. Barulah model yang akan dieksperimenkan diletakkan pada meja osilator. Untuk mengukur LCG, dibutuhkan bantuan alat lain untuk mengetahui apakah kondisinya sudah sesuai. Alat yang digunakan tersebut adalah *waterpass*, dalam proses penentuannya model digeser sedikit demi sedikit sampai *waterpass* stabil dan seimbang, dimana apabila *waterpass* sudah seimbang maka meja osilator pun juga dalam kondisi yang seimbang. Lalu jarak antara titik rotasi meja osilator dan keel dari struktur tersebut diukur untuk mendapatkan nilai LCG dari struktur *Floating Crane Catamaran*. Dari hasil kalibrasi didapatkan nilai LCG model sesuai dengan Tabel 4.4 dan juga proses kalibrasi nilai LCG ditunjukkan oleh Gambar 4.3.

**Tabel 4.4** Nilai LCG Skala Model dan Skala Asli

Keterangan	Skala Model	Faktor Skala	Skala Asli	Satuan
LCG	1.415	$\lambda$	50.94	m



**Gambar 4.3** Kalibrasi Nilai LCG pada Model Struktur

#### 4. Kalibrasi Jari-jari girasi

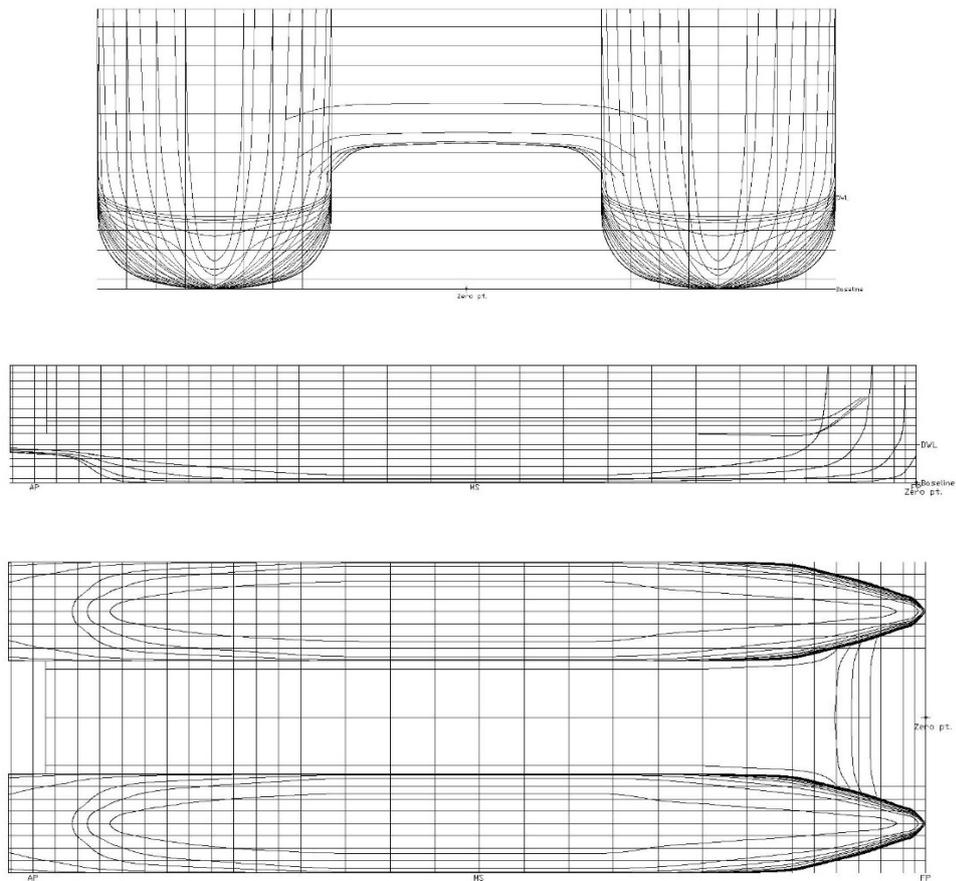
Pada proses kalibrasi jari-jari girasi, pelaksanaan kalibrasi sepenuhnya dilakukan oleh pihak Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT, dimana hanya bisa dilakukan kalibrasi pada nilai  $K_{yy}$  saja. Sedangkan untuk penentuan nilai  $K_{xx}$  dan  $K_{zz}$  sudah didapatkan dari hasil pemodelan yang sudah dilakukan oleh Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT, sehingga didapatkan nilai-nilai untuk jari-jari girasi dari struktur *floating crane catamaran* adalah sebagai Tabel 4.5 berikut:

**Tabel 4.5** Jari-jari Girasi Floating Crane Catamaran

Keterangan	Skala Model	Faktor Skala	Skala Asli	Satuan
$K_{xx}$	0,392	$\lambda$	14,12	m
$K_{yy}$	0,768	$\lambda$	27,648	m
$K_{zz}$	0,768	$\lambda$	27,648	m

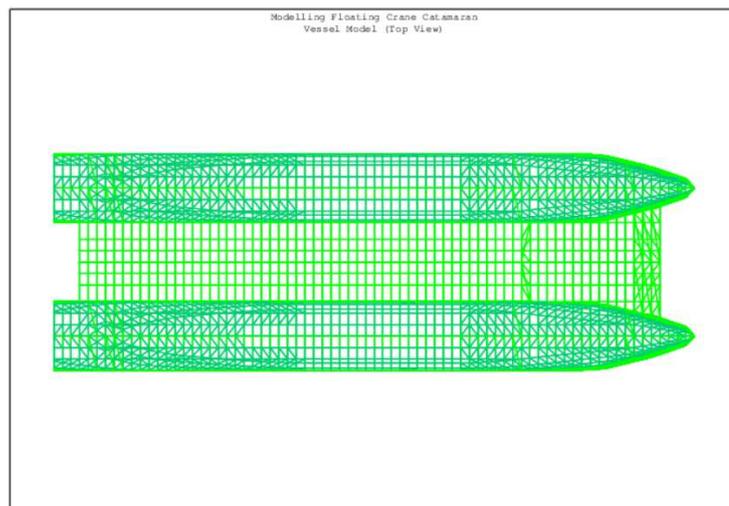
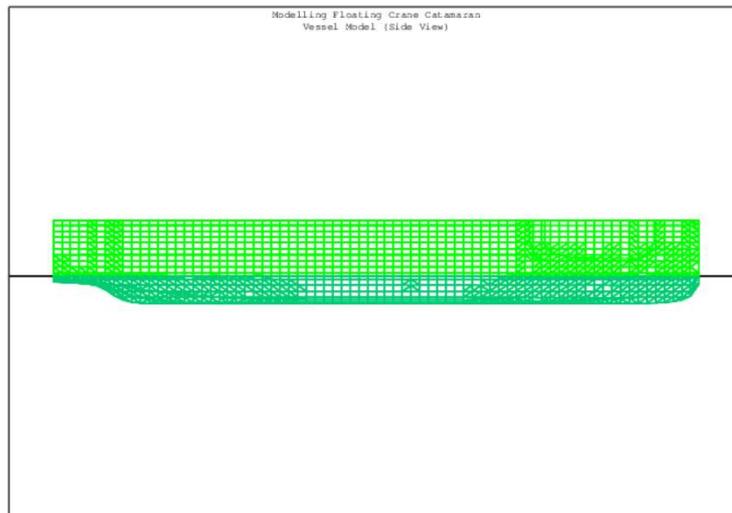
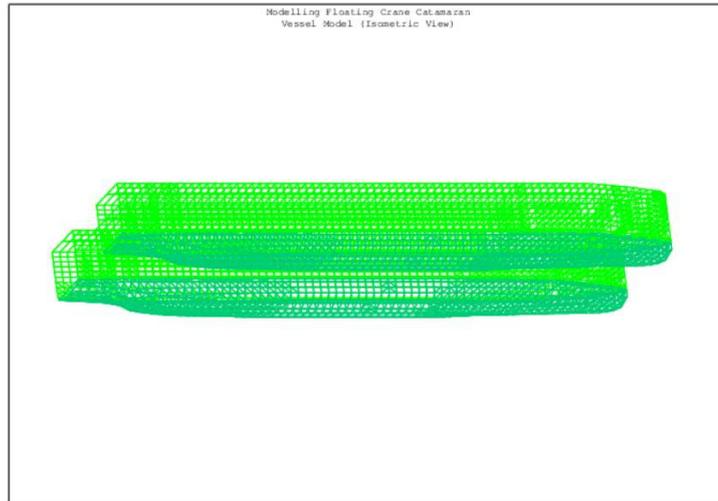
#### 4.2 Pemodelan pada Moses

Pemodelan pada struktur *floating crane catamaran* dilakukan dengan menggunakan *software* Maxsurf modeler untuk mendapatkan ukuran dan bentuk kapal yang sesuai dengan *draft* gambar yang sudah didesain oleh Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. langkah awal permodelan adalah dengan memasukkan data *principle dimension* dari Tabel 3.1, kemudian memasukan gambar *floating crane catamaran* seperti gambar *sheer plan*, *half breadth* dan juga *body plan* dari struktur. Kemudian dilakukan pemodelan dengan mengikuti jumlah station, *water line* dan juga *buttock line* sehingga didapatkan model yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Dari pemodelan yang dihasilkan dari *software* Maxsurf modeler inilah yang nantinya akan digunakan sebagai penentuan titik offset sehingga didapatkan *surface* dari struktur *floating crane catamaran*. Dari hasil titik-titik *offset* yang didapatkan dari *software* Maxsurf modeler kemudian dijadikan acuan pemodelan pada *software* Moses menggunakan teori 3D Diffraction. Adapun hasil pemodelan yang dilakukan menggunakan *software* Maxsurf dapat dilihat pada Gambar 4.4 dibawah ini.



**Gambar 4.4** Hasil Pemodelan Menggunakan *Software* Maxsurf modeler

Langkah berikutnya adalah memodelkan struktur dengan menggunakan *software* Moses untuk menganalisa property hidrostatis dari struktur. Pemodelannya menggunakan model *3D Diffraction* yang didapatkan dari kalkulasi offset yang didapatkan dari pemodelan yang dilakukan menggunakan *software* Maxsurf modeler sebelumnya didapatkan titik yang digunakan acuan *plane* yang digunakan dalam memodelkan struktur menggunakan *software* Moses. Adapun hasil pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan *software* Moses ditunjukkan pada Gambar 4.5 sebagai berikut.



**Gambar 4.5** Hasil Pemodelan Menggunakan *Software* Moses

Dari hasil pemodelan yang telah dilakukan kemudian dilakukan validasi terhadap ukuran sesungguhnya dari struktur. Validasi yang dilakukan adalah terhadap displacement, tinggi, lebar, draft dari kapal pemodelan yang tidak boleh melebihi error 2-5% sesuai dengan AISC (2013). Adapun hasil validasi yang telah dilakukan disajikan pada Tabel 4.6 dibawah ini.

**Tabel 4.6** Hasil Validasi Pemodelan *Software* Moses Terhadap Ukuran Aslinya

Validasi	Disp	LOA	B	T	H
Model	8646	111	37,8	4,7	14,4
MOSES	8569,1	111	37,8	4,7	14,4
Error	0,89%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

### 4.3 Pemodelan Sistem Tambat

Pada pemodelan tali tambat ini dibahas terkait dengan pemodelan yang dilakukan saat eksperimen dan juga pemodelan pada saat pengerjaan numeris. Adapun penjelasan terkait dengan pemodelan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

#### 1. Pemodelan Tali Tambat Eksperimen

Tali tambat yang digunakan dalam proses studi eksperimen ini mengacu pada spesifikasi yang sudah ditentukan sebelumnya, yaitu berupa *steel wire* dan pegas. Dimana *steel wire* yang digunakan dimodelkan menggunakan tali pancing dan fungsi pegas ini digunakan untuk mengatur *output* tegangan pada *load cell*. Adapun Gambar 4.6 merupakan gambar tali pancing dan Gambar 4.7 pegas yang digunakan selama eksperimen.

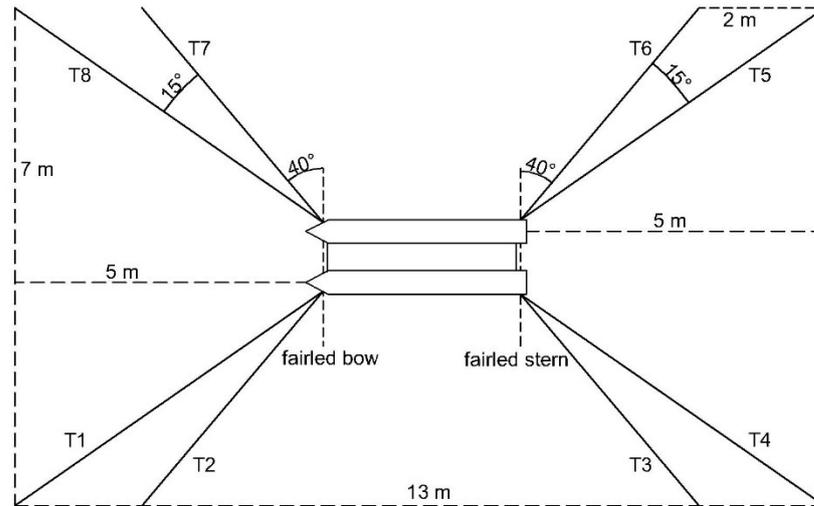


**Gambar 4.6** Tali Pancing

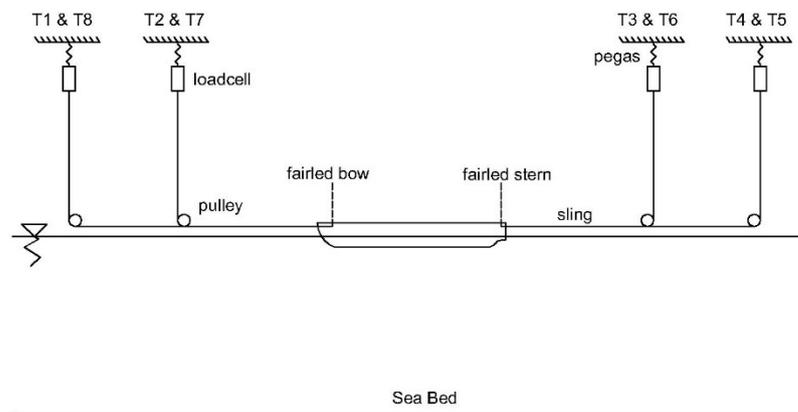


**Gambar 4.7** Pegas yang digunakan pada Eksperimen

Setelah didapatkan masing-masing material yang akan digunakan sebagai pemodelan untuk sistem tambat pada eskeperimen. Adapun konfigurasi sistem tambat yang akan digunakan untuk eksperimen adalah seperti Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 berikut:



**Gambar 4.8** Konfigurasi Sistem Tambat Eksperimen Tampak Atas



**Gambar 4.9** Konfigurasi Sistem Tambat Tampak Samping

**Tabel 4.7** Posisi *Fairlead* pada Model Eksperimen

Mooring	Posisi Fairled (m)						
	Skala Model			Faktor Skala	Skala Asli		
	X	Y	Z		X	Y	Z
T1	0.16	-0.44	0.37	$\lambda$	5.64	-15.90	13.14
T2	0.16	-0.44	0.37	$\lambda$	5.64	-15.90	13.14
T3	2.96	-0.53	0.37	$\lambda$	106.5	-18.90	13.14
T4	2.96	-0.53	0.37	$\lambda$	106.5	-18.90	13.14
T5	2.96	0.53	0.37	$\lambda$	106.5	18.90	13.14
T6	2.96	0.53	0.37	$\lambda$	106.5	18.90	13.14
T7	0.16	0.44	0.37	$\lambda$	5.64	15.90	13.14
T8	0.16	0.44	0.37	$\lambda$	5.64	15.90	13.14

Dari Tabel 4.7 diatas bisa dijelaskan jika notasi X, Y dan Z adalah X terhadap bow, Y terhadap centerline dari struktur dan Z terhadap keel.

Konfigurasi ini merupakan konfigurasi sistem horizontal tambat taut yang sudah di persiapkan sebelumnya oleh pihak Balai Hidrodinamika – BPPT. Melihat dari konfigurasi yang sudah dilakukan, tension yang dihasilkan hanya terpengaruh dari pertambahan excursi dari pegas. Hal ini dikarenakan sling yang digunakan memiliki nilai kekakuan yang besar, sehingga tidak akan mengalami pertambahan panjang atau melebihi *breaking load* dari sling itu sendiri. Sehingga kekakuan pegas akan dijadikan acuan sebagai kekakuan mooring sistem yang digunakan pada saat eksperimen.

Kekakuan pegas ditentukan dengan cara memberikan beban secara linear kepada pegas yang akan digunakan pada saat eksperimen. Perhitungan nilai kekakuan ini juga bertujuan untuk mengetahui dan juga mengkalibrasikan kekakuan masing-masing pegas sehingga diusahakan agar kekakuan pegas yang digunakan pada saat eksperimen sama untuk setiap mooring linenya, dikarenakan jika terdapat perbedaan kekakuan antara pegas akan mempengaruhi tension yang dihasilkan oleh load cell. Adapun proses kalibrasi dari pegas dapat dilihat dari Gambar 4.10 dibawah ini.



**Gambar 4.10** Proses Kalibrasi Pegas

Dari hasil kalibrasi didapatkan data regangan yang terjadi ketika pegas diberikan beban secara konstan. Nilai kekakuan pegas dapat dihitung dengan menggunakan hukum *hooke*, yang mana persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$F = K \cdot \Delta x$$

$$K = \frac{F}{\Delta x}$$

$$F = \frac{EA}{L} \cdot \Delta x$$

$$K = \frac{EA}{L}$$

Dimana,

F = gaya yang bekerja (N)

K = kekakuan (N/m)

$\Delta x$  = penambahan panjang tali (m)

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

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

L = panjang tali (m)

Dengan menggunakan persamaan diatas, selanjutnya akan dilakukan perhitungan nilai kekakuan dari masing-masing pegas. Adapun Tabel 4.8 adalah data uji kekakuan pada pegas.

**Tabel 4.8** Data Kalkulasi Pegas 1

m (gr)	m (kg)	F (N)	x (mm)	x (m)	dx (m)	k (N/m)
0	0	0.000	315	0.315	0	-
250	0.25	2.453	371	0.371	0.056	43.795
500	0.5	4.905	426	0.426	0.111	44.189
750	0.75	7.358	480	0.48	0.165	44.591
1000	1	9.810	535	0.535	0.22	44.591
1250	1.25	12.263	592	0.592	0.277	44.269
1500	1.5	14.715	647	0.647	0.332	44.322
1750	1.75	17.168	704	0.704	0.389	44.132

m (gr)	m (kg)	F (N)	x (mm)	x (m)	dx (m)	k (N/m)
2000	2	19.620	760	0.76	0.445	44.090
1750	1.75	17.168	701	0.701	0.386	44.475
1500	1.5	14.715	646	0.646	0.331	44.456
1250	1.25	12.263	591	0.591	0.276	44.429
1000	1	9.810	536	0.536	0.221	44.389
750	0.75	7.358	481	0.481	0.166	44.322
500	0.5	4.905	425	0.425	0.11	44.591
250	0.25	2.453	370	0.37	0.055	44.591
0	0	0.000	315	0.315	0	-

Proses diatas merupakan perhitungan kekakuan yang dilakukan pada pegas 1, proses yang sama akan diulang untuk mendapatkan nilai kekakuan untuk semua pegas yang digunakan pada pelaksanaan eksperimen. Adapun hasil akhir dari nilai kekakuan dari kesemua pegas yang digunakan pada saat eksperimen adalah seperti Tabel 4.9 berikut:

**Tabel 4.9** Hasil Kalkulasi Kekakuan Pegas

Keterangan	Skala Model	Skala Asli
	Kekakuan (N/m)	Kekakuan (kN/m)
Pegas 1	44.334	58.893
Pegas 2	44.015	58.47
Pegas 3	43.576	57.886
Pegas 4	43.45	57.72
Pegas 5	43.925	58.35
Pegas 6	44.007	58.458
Pegas 7	44.204	58.721
Pegas 8	43.258	57.464
Rata-rata	43.846	58.245

Dari hasil perhitungan kekakuan dari pegas selanjutnya adalah merangkai sling (*steel wire*) kemudian dihubungkan terhadap *load cell* dan dari *load cell* kemudian akan dihubungkan ke pegas yang sudah dikalibrasikan tersebut. Ujung dari tali tambat akan dikaitkan pada *fairlead* yang sudah ditentukan konfigurasi.

Pada awal pembahasan sudah dijelaskan terkait dengan sling (*steel wire*) pada eksperimen ini hanya digunakan sebagai *transfer tension* terhadap pegas. Sehingga bisa dikatakan jika kekakuan tali tambat hanya dipengaruhi oleh

kekakuan pegas. Hal ini juga berlaku untuk ke 8 tali tambat yang digunakan pada saat eksperimen. Nilai kekakuan tali tambat didapatkan dari hasil kalibrasi pegas sebelumnya yang mana sudah ditunjukkan pada Tabel untuk hasil kekakuan masing-masing pegas, kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari nilai kekakuan berdasarkan skala asli dari struktur. Tujuan dari perhitungan nilai K pada pegas dengan menambahkan beban secara linear sampai 2 kg bertujuan untuk mencari batas tension yang dihasilkan dari pegas ketika menerima beban.

Dari hasil perhitungan kekakuan pegas untuk skala asli didapatkan nilai kekakuan sebesar 58.25 kN/m, dikarenakan nilai kekakuan ini bersifat linear setiap penambahan beban yang diberikan saat pengujian. Jika dilihat dari pemberian beban sebesar 2 kg maka kalau ditinjau berdasarkan skala aslinya akan dihasilkan tension sebesar 938.28 kN/m, kemudian saat eksperimen dilakukan dengan pemberian beban gelombang maksimum hanya didapatkan tension maksimal sebesar 1.841 kg pada model yang diuji, kalau diskalakan kedalam ukuran aslinya maka hanya terjadi tension sebesar 863.87 kN/m. hal ini membuktikan apabila pegas yang diujikan pada saat eksperimen masih memenuhi nilai tension yang dihasilkan dan tidak terjadi kerusakan pada pegas.

Dari persamaan hukum *hooke* yang ada diatas kemudian dilakukan pencarian nilai tegangan yang terjadi pada setiap selisih pertambahan panjang pegas pada saat eksperimen berdasarkan ukuran aslinya. Adapun selisih tegangan yang terjadi sudah termasuk dengan penambahan *pretension* pada saat instalasi mooring dilakukan, *pretension* yang diberikan adalah sebesar 198.25 kN untuk ukuran sebenarnya. Sehingga nilai tegangan yang dihasilkan pada tiap pertambahan ekskursi adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.10** Kekakuan tali Tambat Eksperimen

Kekakuan Sistem Tambat Eksperimen			
$\Delta x$ (m)	K (kN/m)	$\Delta F$ (m)	F (kN)
0.00	58.25	0.00	<b>198.96</b>
1.00	58.25	58.25	257.21
2.00	58.25	116.49	315.45

Kekakuan Sistem Tambat Eksperimen			
$\Delta x$ (m)	K (kN/m)	$\Delta F$ (m)	F (kN)
3.00	58.25	174.74	373.70
4.00	58.25	232.98	431.94
5.00	58.25	291.23	490.19
6.00	58.25	349.47	548.43
7.00	58.25	407.72	606.68
8.00	58.25	465.96	664.92
9.00	58.25	524.21	723.17
10.00	58.25	582.45	781.41
11.00	58.25	640.70	839.66
12.00	58.25	698.94	897.90
13.00	58.25	757.19	956.15
14.00	58.25	815.43	1014.39
15.00	58.25	873.68	1072.64

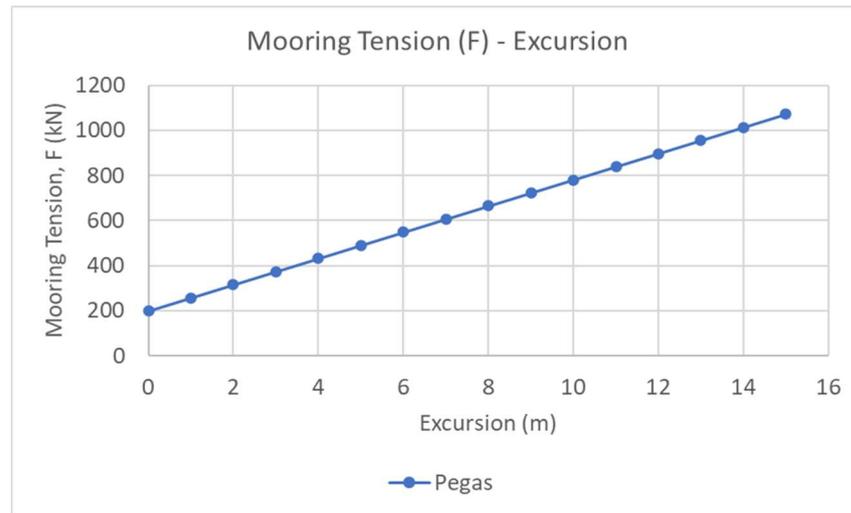
Adapun dari Tabel diatas bisa dijelaskan dengan grafik perbandingan kekakuan, pertambahan besarnya tension yang dihasilkan dan juga selisih pertambahan tension terhadap pertambahan panjang atau ekskursi pegas adalah seperti Gambar 4.11 berikut:



**Gambar 4.11** Kekakuan Tali Tambat Eksperimen

Kemudian dari grafik yang dihasilkan dari Gambar 4.11 maka akan dilakukan perbandingan terhadap tension yang dihasilkan dari setiap perpanjangan ekskursi dari pegas selama eksperimen berlangsung. Adapun

Gambar 4.12 dibawah ini merupakan hasil perbandingan tension yang dihasilkan oleh pegas terhadap perpanjangan ekskursi dari pegas.



**Gambar 4.12** Hasil Tegangan Tiap Ekskursi pada Eksperimen

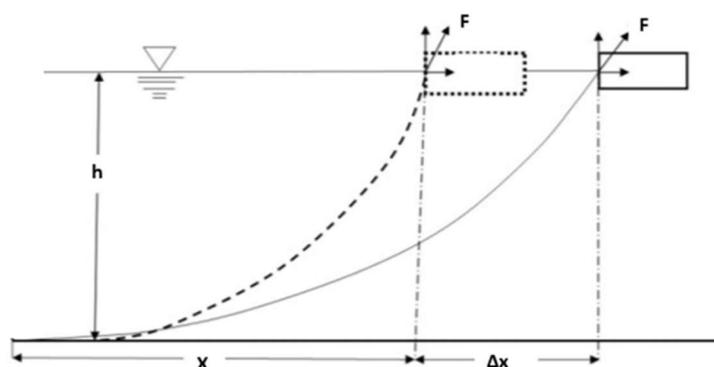
Kemudian dari hasil masing-masing tension yang didapatkan dari pertambahan panjang ekskursi dari pegas, maka akan dilakukan perhitungan terkait dengan selisih dari masing-masing tension yang dihasilkan setiap perpanjangan pegas. Dikarenakan pegas memiliki nilai kekakuan yang linear sebagaimana terlihat pada Gambar 4.11 maka akan sangat sulit mendekati nilai kekakuan mooring sistem saat eksperimen jika dimodelkan kedalam numeris. Adapun Gambar 4.13 merupakan perbandingan selisih dari masing-masing tension yang dihasilkan dari setiap pertambahan panjang pegas.



**Gambar 4.13** Hasil Selisih Tegangan Tiap Ekskursion pada Eksperimen

## 2. Pemodelan Tali Tambat Numeris

Pada pemodelan tali tambat yang akan digunakan pada analisis numeris ini perlu diperhatikan kesamaan data model yang digunakan pada saat eksperimen terkait dengan konfigurasi tali tambat yang digunakan, pretension, dan juga kekakuan tali tambat. Sehingga untuk mendekati sistem tali tambat yang digunakan pada saat eksperimen ini dilakukan pendekatan dengan melakukan iterasi perhitungan dengan tujuan untuk mendapatkan properti tali yang memiliki nilai kekakuan yang sama dengan tali tambat eksperimen. Adapun Gambar 4.14 merupakan salah satu penjelas dari skema iterasi yang akan digunakan untuk mendekati nilai kekakuan dari sistem tambat eksperimen.



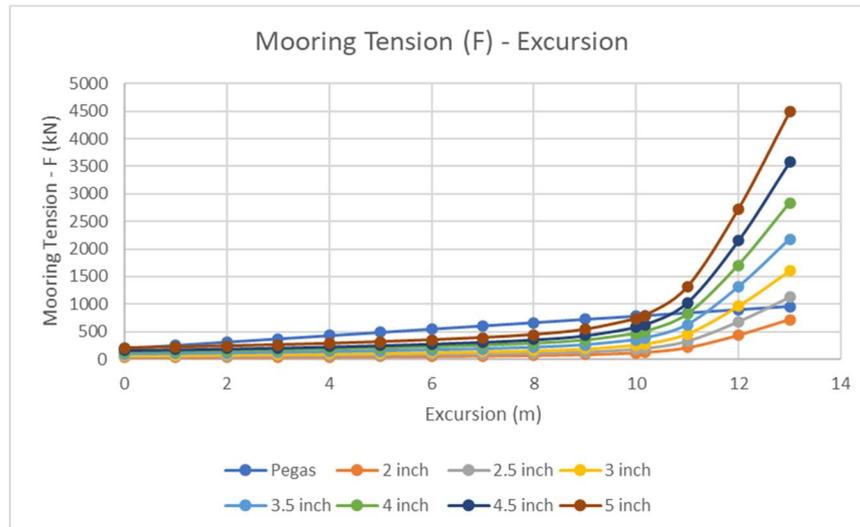
**Gambar 4.14** *Static Mooring Analysis*

Pada proses iterasi ini, dilakukan dengan mengambil salah satu titik fairled yang digunakan sebagai acuan, kemudian disejajarkan posisi fairled dan anchor pada bidang 2 dimensi (X-Z) seperti halnya yang dilakukan pada saat penentuan kekakuan pada saat eksperimen.

Untuk mempermudah proses iterasi, iterasi *static mooring* untuk mendapatkan nilai tension setiap pergeseran atau ekskursi dari tali tambat digunakan *software* Orcaflex, katalog tali tambat yang digunakan adalah sesuai dengan katalog tali tambat *marlow ropes ltd.* (katalog tali tambat yang digunakan Orcaflex). Pada penentuan iterasi ini dilakukan penguncian terhadap beberapa nilai yang digunakan sebagai input pada *software* Orcaflex yakni digunakan jenis tali 6x19 *wire with wire core*, panjang tali yang digunakan adalah 342.87 meter, jarak horizontal fairled terhadap *anchor* adalah 320 meter, dan nilai-nilai inilah yang akan dikunci sebagai input pada *software* Orcaflex kemudian terdapat nilai-nilai yang akan divariasikan untuk mendapatkan nilai diameter *wire* yang digunakan. Adapun nilai diameter *wire* yang digunakan sebagai variasi adalah 2 inch; 2.5 inch; 3 inch; 3.5 inch; 4 inch; 4.5 inch; dan 5 inch. Adapun hasil iterasi yang sudah dilakukan untuk mendapatkan properti tali tambat yang sesuai dengan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.11 dibawah ini.

**Tabel 4.11** Hasil Iterasi Tegangan Tali Tambat Akibat Ekskursi

$\Delta x$ (m)	Mooring Tension F (kN)							
	Pegas	2 inch	2.5 inch	3 inch	3.5 inch	4 inch	4.5 inch	5 inch
0.00	198.96	32.78	51.21	73.48	99.95	130.46	165.00	204.77
1.00	257.21	35.36	55.25	79.27	107.83	140.74	178.01	220.92
2.00	315.45	38.33	59.89	85.93	116.88	152.56	192.95	239.48
3.00	373.70	41.77	65.25	93.62	127.34	166.21	210.21	260.92
4.00	431.94	45.76	71.49	102.57	139.51	182.09	230.30	285.87
5.00	490.19	50.44	78.81	113.06	153.78	200.72	253.86	315.12
6.00	548.43	55.98	87.45	125.46	170.65	222.73	281.70	349.68
7.00	606.68	62.55	97.73	140.24	190.74	248.95	314.86	390.59
8.00	664.92	71.58	111.82	160.26	217.93	284.37	359.56	446.79
9.00	723.17	86.62	135.30	193.48	262.98	343.00	433.51	540.33
10.00	781.41	117.92	184.14	261.97	355.70	463.46	585.14	734.52
10.17	791.26	126.96	198.26	281.64	382.29	497.95	628.51	790.57
11.00	839.66	211.31	329.83	464.37	629.18	818.04	1030.63	1312.54
12.00	897.90	438.86	685.15	968.59	1313.36	1708.89	2154.57	2729.20
13.00	956.15	720.83	1125.69	1601.73	2174.78	2833.54	3577.36	4490.59
14.00	1014.39	1011.71	1580.18	2256.00	3065.26	3996.53	5049.17	6308.43
15.00	1072.64	1304.76	2038.07	2915.35	3962.69	5168.68	6532.66	8139.99

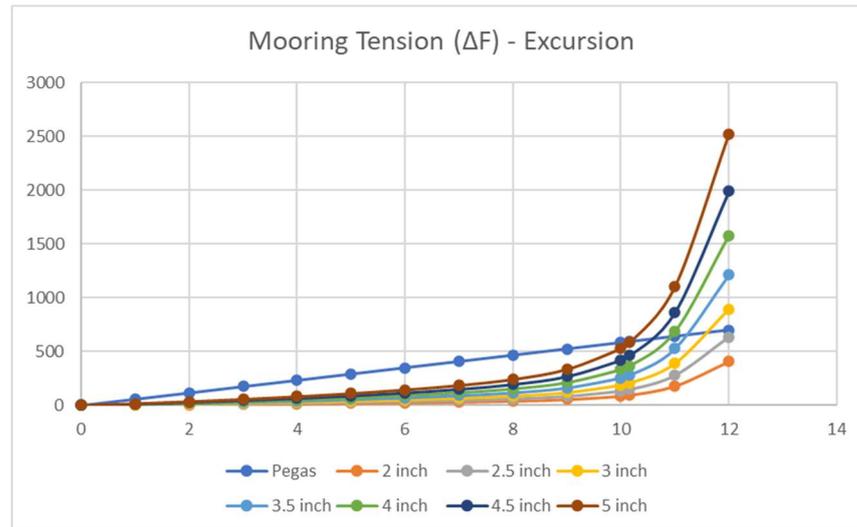


**Gambar 4.15** Plot Hasil Iterasi Tegangan Tali Tambat Tiap Ekskursi

Kemudian dari hasil tension yang didapatkan pada proses iterasi menggunakan *software* Orcaflex, selanjutnya akan dicari nilai selisih dari masing-masing tension yang akan digunakan sebagai perbandingan dengan hasil selisih yang dihasilkan dari selisih tension pada saat eksperimen. Adapun hasil selisih tension yang didapatkan dari perhitungan Tabel 4.11 ditampilkan dalam Tabel 4.12 dibawah ini.

**Tabel 4.12** Hasil Iterasi Selisih Tegangan Tali Tambat Tiap Ekskursi

$\Delta x$ (m)	Mooring Tension $\Delta F$ (kN)							
	Pegas	2 inch	2.5 inch	3 inch	3.5 inch	4 inch	4.5 inch	5 inch
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	58.25	2.59	4.04	5.79	7.88	10.29	13.01	16.15
2.00	116.49	5.56	8.68	12.45	16.93	22.10	27.95	34.71
3.00	174.74	8.99	14.04	20.14	27.39	35.75	45.21	56.15
4.00	232.98	12.98	20.28	29.09	39.56	51.63	65.30	81.10
5.00	291.23	17.66	27.60	39.58	53.83	70.26	88.86	110.35
6.00	349.47	23.20	36.24	51.98	70.70	92.28	116.70	144.91
7.00	407.72	29.78	46.51	66.75	90.79	118.49	149.86	185.82
8.00	465.96	38.80	60.60	86.78	117.98	153.91	194.56	242.01
9.00	524.21	53.84	84.08	120.00	163.03	212.54	268.50	335.56
10.00	582.45	85.14	132.93	188.49	255.75	333.00	420.14	529.75
10.17	592.30	94.19	147.05	208.16	282.34	367.50	463.51	585.79
11.00	640.70	178.53	278.61	390.89	529.23	687.58	865.63	1107.77
12.00	698.94	406.08	633.94	895.11	1213.41	1578.43	1989.56	2524.43
13.00	757.19	688.05	1074.48	1528.25	2074.84	2703.08	3412.36	4285.82
14.00	815.43	978.93	1528.97	2182.52	2965.31	3866.07	4884.17	6103.66
15.00	873.68	1271.98	1986.86	2841.87	3862.74	5038.23	6367.66	7935.22

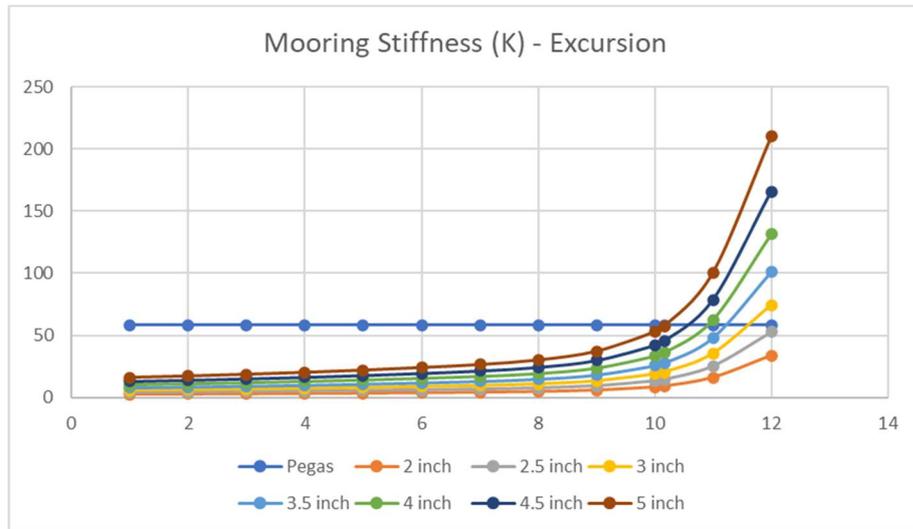


**Gambar 4.16** Plot Hasil Iterasi Tegangan Tali Tambat Tiap Ekskursi

Dari hasil selisih tegangan yang didapatkan sesuai dengan Tabel 4.12 diatas, kemudian akan dilakukan perhitungan nilai kekakuan dari setiap pertambahan ekskursi dari tali tambat sehingga dapat ditentukan tali tambat dengan diameter berapa yang hampir menyerupai kondisi pada saat eksperimen. Adapun hasil iterasi nilai kekakuan sistem tambat untuk analisa numeris ditampilkan pada Tabel 4.13 dibawah.

**Tabel 4.13** Hasil Iterasi Kekakuan Tali Tambat Tiap Ekskursi

$\Delta x$ (m)	Mooring Stiffness K (kN/m)							
	Pegas	2 inch	2.5 inch	3 inch	3.5 inch	4 inch	4.5 inch	5 inch
1.00	58.25	2.59	4.04	5.79	7.88	10.29	13.01	16.15
2.00	58.25	2.78	4.34	6.22	8.47	11.05	13.97	17.35
3.00	58.25	3.00	4.68	6.71	9.13	11.92	15.07	18.72
4.00	58.25	3.25	5.07	7.27	9.89	12.91	16.33	20.27
5.00	58.25	3.53	5.52	7.92	10.77	14.05	17.77	22.07
6.00	58.25	3.87	6.04	8.66	11.78	15.38	19.45	24.15
7.00	58.25	4.25	6.64	9.54	12.97	16.93	21.41	26.55
8.00	58.25	4.85	7.58	10.85	14.75	19.24	24.32	30.25
9.00	58.25	5.98	9.34	13.33	18.11	23.62	29.83	37.28
10.00	58.25	8.51	13.29	18.85	25.58	33.30	42.01	52.98
10.17	58.25	9.26	14.46	20.47	27.76	36.14	45.58	57.61
11.00	58.25	16.23	25.33	35.54	48.11	62.51	78.69	100.71
12.00	58.25	33.84	52.83	74.59	101.12	131.54	165.80	210.37
13.00	58.25	52.93	82.65	117.56	159.60	207.93	262.49	329.68
14.00	58.25	69.92	109.21	155.89	211.81	276.15	348.87	435.98
15.00	58.25	84.80	132.46	189.46	257.52	335.88	424.51	529.01



**Gambar 4.17** Hasil Iterasi Kekakuan Tali Tambat Tiap Ekskursi

#### 4.4 Alat Pengukuran

Dalam uji eksperimen, terdapat instrument utama yang digunakan untuk mengukur elevasi pergerakan struktur. Perangkat instrument tersebut adalah *Qualysis Motion Capture Camera*. Dimana sebelum digunakan untuk pengujian alat tersebut terlebih dahulu dikalibrasikan.

##### 1. Kalibrasi Perangkat *Qualysis Motion Capture Camera*

Untuk mengukur gerak respon struktur *floating crane catamaran* pada saat pelaksanaan eksperimen, diperlukan sebuah alat yang digunakan untuk merekam perpindahan posisi dari struktur *floating crane catamaran* ketika terkena gelombang. Pada eksperimen ini digunakan perangkat alat rekam yaitu *Qualysis Motion Capture Camera* yang dapat merekam gerakan respon struktur pada arah x,y,z baik translasi maupun rotasi, dengan cara merekam posisi awal struktur sehingga alat perekam dapat mengetahui posisi titik nol dari struktur. Hasil dari rekaman perpindahan yang diarahkan ke *passive marker* yang sudah diletakkan pada struktur selanjutnya akan dikelompokkan berdasarkan gerak 6 derajat kebebasan sesuai dengan teori gerak bangunan apung, lalu dibuat dalam bentuk *time history* pada masing-masing gerakan untuk kemudian dianalisis pada metode berikutnya. Adapun Gambar 4.18 *Qualysis Motion Capture Camera* yang digunakan

untuk merekam pergerakan struktur floating crane catamaran adalah sebagai berikut.



**Gambar 4.18** *Qualysis Motion Capture Camera*

#### 4.5 Data dan Properti Keseluruhan

Pada tahap ini telah didapatkan keseluruhan data dari model *floating crane catamaran* yang digunakan dalam proses eksperimen. Secara keseluruhan, data dari struktur *floating crane catamaran* baik dalam skala model dan skala asli yang diujikan di kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* BTH – BPPT dapat dilihat pada Tabel 4.14 dibawah ini.

**Tabel 4.14** Data Struktur *Floating Crane Catamaran*

Floating Crane Catamaran Properties (Skala 1:36)				
Keterangan	Skala Model	Faktor Skala	Skala Asli	Satuan
LOA	3.08	$\lambda$	111	m
LWL	3.08	$\lambda$	111	m
LPP	3.00	$\lambda$	108	m
B	1.05	$\lambda$	37.8	m
H	0.4	$\lambda$	14.4	m
T	0.131	$\lambda$	4.7	m
Massa Struktur	181.00	$\lambda^3 \cdot \rho_{sea}$	8646000	kg
	0.181	$\lambda^3 \cdot \rho_{sea}$	8646	ton
LCG (From AP)	1.420	$\lambda$	50.94	m
KG	0.430	$\lambda$	15.41	m
Pretension	0.424	$\lambda^3 \cdot \rho_{sea}$	20281.48	kg
	0.00416	$\lambda^3 \cdot \rho_{sea}$	198.96	kN
Kekakuan Pegas	43.850	$\lambda^2 \cdot \rho_{sea}$	58.25	kN/m

**Tabel 4.15** Data Properti Tali Tambat

Mooring	Posisi Fairled (m)						
	Skala Model			Faktor Skala	Skala Asli		
	X	Y	Z		X	Y	Z
T1	0.16	-0.44	0.37	$\lambda$	5.64	-15.90	13.14
T2	0.16	-0.44	0.37	$\lambda$	5.64	-15.90	13.14
T3	2.96	-0.53	0.37	$\lambda$	106.5	-18.90	13.14
T4	2.96	-0.53	0.37	$\lambda$	106.5	-18.90	13.14
T5	2.96	0.53	0.37	$\lambda$	106.5	18.90	13.14
T6	2.96	0.53	0.37	$\lambda$	106.5	18.90	13.14
T7	0.16	0.44	0.37	$\lambda$	5.64	15.90	13.14
T8	0.16	0.44	0.37	$\lambda$	5.64	15.90	13.14

#### 4.6 Analisis Eksperimen

Eksperimen yang dilakukan merupakan uji pada sebuah struktur *crane barge* yang memiliki dua lambung kapal (*Catamaran*). Analisis eksperimen struktur tersebut dilakukan pada kolam uji *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) milik Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT. Sebelum dilakukan pengujian struktur terlebih dahulu dipasang tali tambatnya dan dirangkai sesuai dengan skenario pengujian yang telah ditentukan oleh pihak Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT.

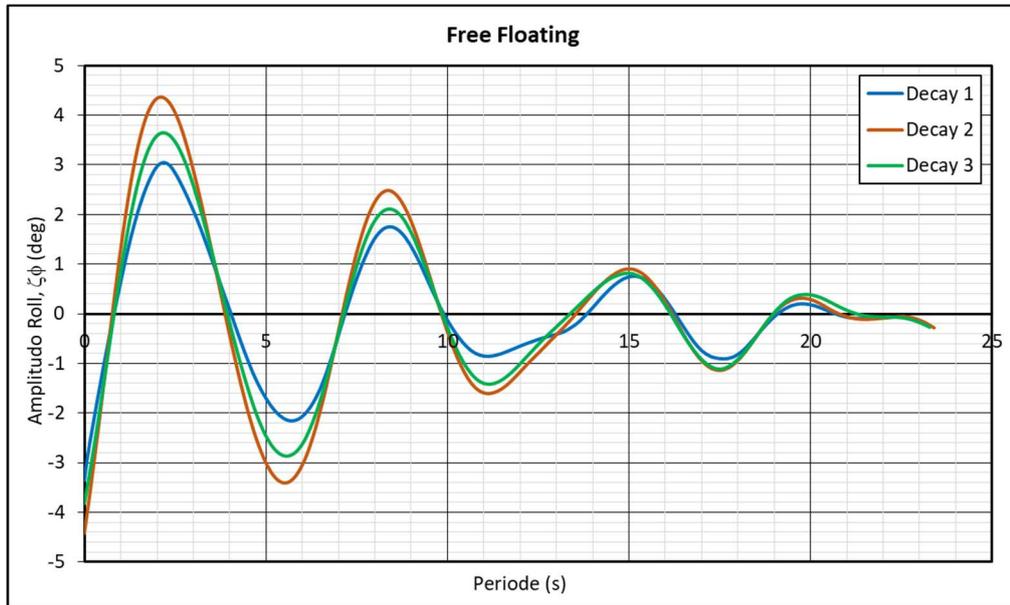
Skenario eksperimen dilakukan pada 2 kondisi yaitu:

1. *Free Decay Test* pada *Floating Crane Catamaran* Kondisi *Free Floating*.
2. *Free Decay Test* pada *Floating Crane Catamaran* Kondisi Tertambat.

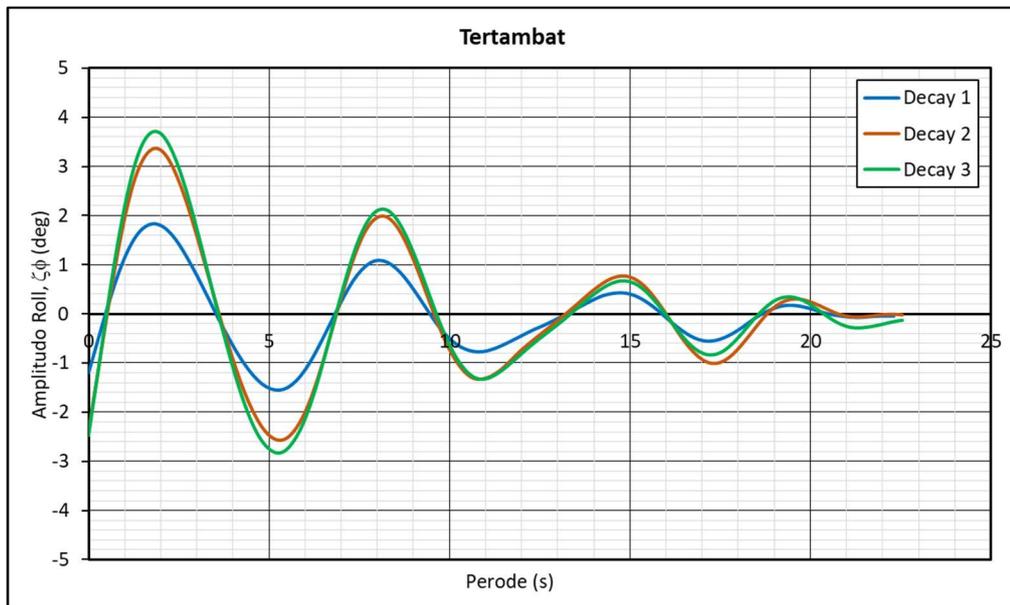
Dari hasil pengujian dari tiap kondisi akan direkam menggunakan *Qualysis Motion Capture Camera* dimana alat tersebut akan menangkap titik koordinat dari *passive marker* yang dipasangkan pada struktur. Saat eksperimen *free decay test* akibat adanya singgungan terhadap struktur pada arah gerak roll yang mana searah dengan sumbu x. Grafik respon gerak roll yang berupa *time history* dari eksperimen akan diplot menjadi grafik *roll decay*.

Analisa eksperimen yang dilakukan, merupakan analisa hasil pengujian *free decay test* yang dilakukan pada sebuah struktur *floating crane catamaran* pada kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) milik Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT. Berdasarkan dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan pada model struktur *floating crane*

catamaran dengan kondisi *free floating* dan tertambat. Didapatkan hasil berupa grafik fungsi *roll decay* selama kurang lebih 22,3 – 23,8 detik. Grafik fungsi *roll decay* yang didapatkan merupakan grafik posisi terhadap fungsi waktu yang mana ditunjukkan pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 dibawah ini.



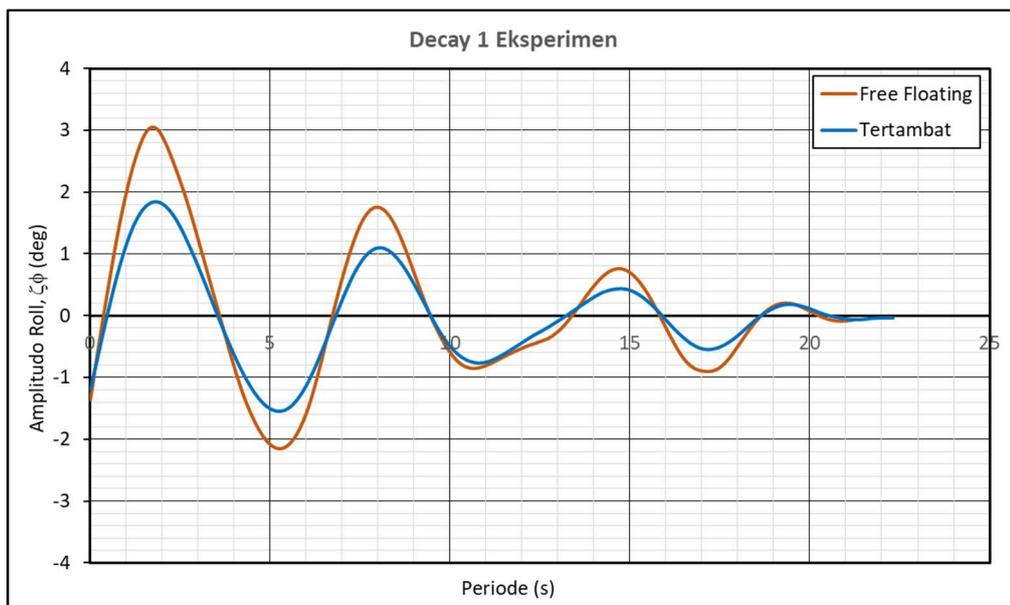
**Gambar 4.19** Grafik Hasil Uji Roll Decay *Free Floating*



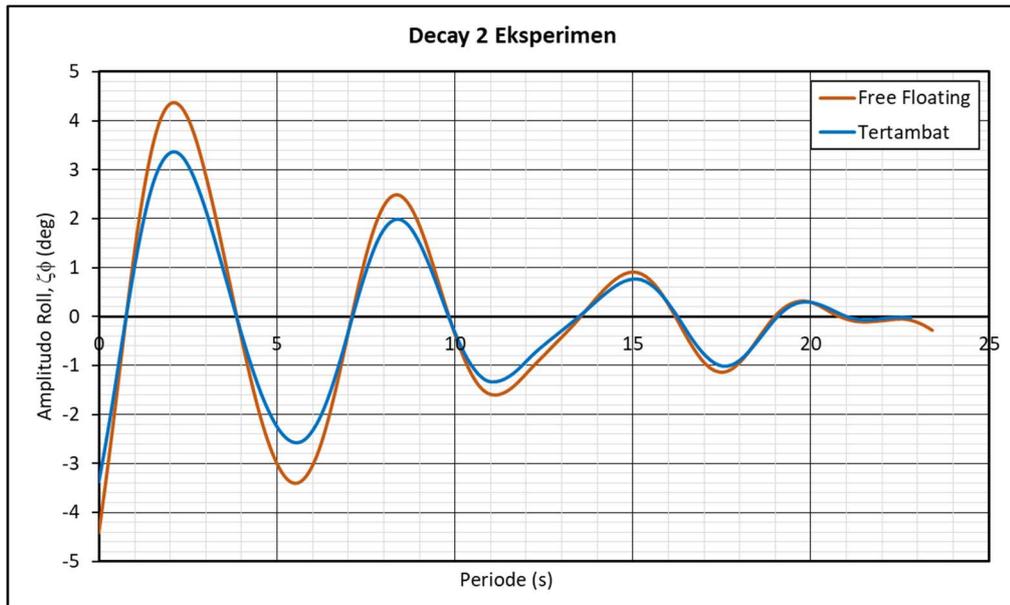
**Gambar 4.20** Grafik Hasil Uji Roll Decay Tertambat

Pada eksperimen *roll decay* yang dilakukan pada tiap-tiap kondisi dilakukan percobaan sebanyak 3 kali, dengan memberikan simpangan atau singgungan pada bagian *port side*. Pemberian simpangan (*initial condition*) ini

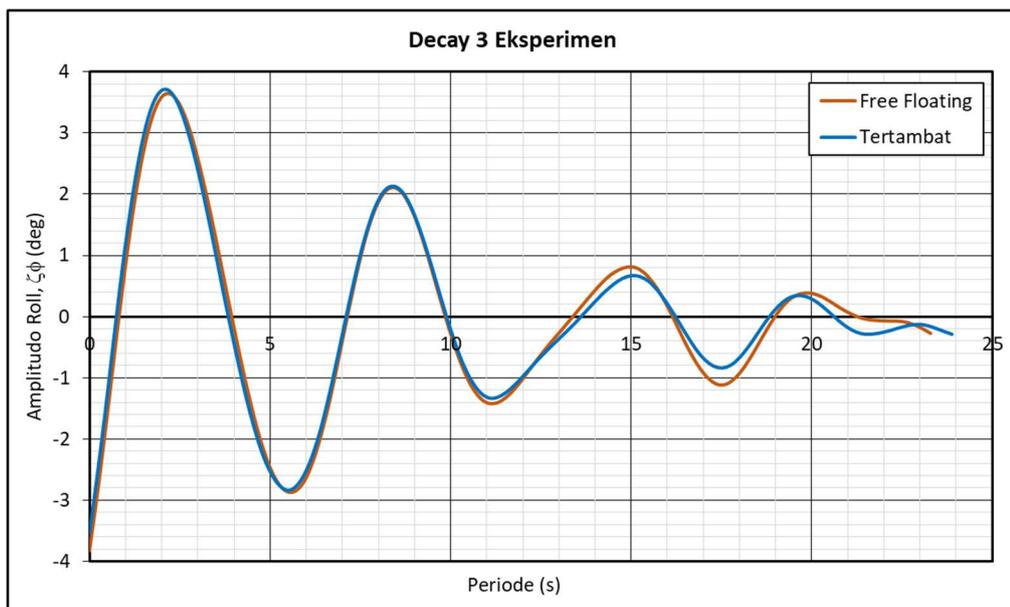
adalah sebuah cara untuk menghasilkan gaya reaksi berupa fungsi respon gerak *roll* struktur berdasarkan fungsi waktu. *Initial condition* yang diberikan pada masing-masing pengujian memiliki nilai yang berbeda pada tiap pengujiannya, perbedaan *initial condition* ini dimaksudkan untuk mengetahui apakah terjadi perbedaan pada bentuk respon gerak *roll* yang dihasilkan dari uji *roll decay*. Dari hasil grafik pengujian tersebut, selanjutnya akan dilakukan analisis pada tiap bagian puncak amplitudo gerak *roll* ( $\zeta_\phi$ ) pada uji *roll decay*. Analisis yang dilakukan pada tiap puncak adalah pada posisi *crests period* (nilai maksimum dari amplitudo gerak *roll decay*) yang memiliki nilai positif dan juga pada posisi *troughs period* (nilai minimum dari amplitudo gerak *roll decay*) yang mempunyai nilai negatif. Berdasarkan Djatmiko (2012), sebuah model yang mengalami gerak osilasi pada medium fluida, maka akan ada sebuah fase dimana respon gerak osilasi tersebut akan mengalami penurunan (*decrement*) seiring dengan berjalannya waktu dan berbentuk eksponensial atau bisa disebut fase *transient* dimana faktor redaman masih dominan mempengaruhi respon dari gerak struktur. Pada hasil eksperimen *roll decay*, dari Gambar diatas bisa dilihat hanya terjadi 3 siklus pada masing-masing kondisi *free floating* maupun tertambat. Adapun hasil uji *decay* untuk kondisi *free floating* dan tertambat adalah sebagai berikut:



**Gambar 4.21** Hasil Uji Decay ke 1 Kondisi *Free Floating* dan Tertambat



**Gambar 4.22** Hasil Uji Decay ke 2 Kondisi *Free Floating* dan Tertambat



**Gambar 4.23** Hasil Uji Decay ke 3 Kondisi *Free Floating* dan Tertambat

Jika dilakukan analisa lebih dalam lagi bisa dilihat perbandingan uji roll decay kondisi *free floating* dan tertambat diatas, dapat dilihat apabila untuk hasil uji decay 1 dan 2 terlihat perbedaan amplitudo yang signifikan untuk kondisi *free floating* dan tertambat. sedangkan untuk hasil uji decay 3 tidak ada perbedaan yang signifikan terhadap amplitudo hasil uji decay pada kondisi *free floating* dan tertambat. Kemudian dari masing-masing amplitudo puncak dan

lembah yang dihasilkan dari uji decay, bisa dilihat jika terjadi perbedaan pada amplitudo puncak ke 3 dari grafik osilasi tersebut, hal ini menunjukkan apabila kekakuan pegas baru mulai bekerja pada periode tersebut. Hal ini bisa dilihat dari hasil perbandingan selisih tiap amplitudo dari hasil eksperimen decay. Adapun hasil perbandingan dari amplitudo untuk masing-masing uji decay ditampilkan pada Tabel 4.16, 4.17 dan 4.18 dibawah ini.

**Tabel 4.16** Perbandingan Amplitudo dari Uji Decay 1 untuk Kondisi *Free Floating* dan Tertambat

$\zeta\phi$	<i>Free Floating</i>	Tertambat	Selisih
$\zeta\phi_0$	3.042	1.839	40%
$\zeta\phi_1$	2.158	1.548	28%
$\zeta\phi_2$	1.751	1.096	37%
$\zeta\phi_3$	0.858	0.768	10%
$\zeta\phi_4$	0.756	0.435	42%
$\zeta\phi_5$	0.908	0.550	39%

**Tabel 4.17** Perbandingan Amplitudo dari Uji Decay 2 untuk Kondisi *Free Floating* dan Tertambat

$\zeta\phi$	<i>Free Floating</i>	Tertambat	Selisih
$\zeta\phi_0$	4.362	3.357	23%
$\zeta\phi_1$	3.401	2.575	24%
$\zeta\phi_2$	2.486	1.985	20%
$\zeta\phi_3$	1.599	1.355	17%
$\zeta\phi_4$	0.911	0.764	16%
$\zeta\phi_5$	1.134	1.103	11%

**Tabel 4.18** Perbandingan Amplitudo dari Uji Decay 3 untuk Kondisi *Free Floating* dan Tertambat

$\zeta\phi$	<i>Free Floating</i>	Tertambat	Selisih
$\zeta\phi_0$	3.654	1.839	40%
$\zeta\phi_1$	2.158	1.548	28%
$\zeta\phi_2$	1.751	1.096	37%
$\zeta\phi_3$	0.858	0.768	10%
$\zeta\phi_4$	0.756	0.435	42%
$\zeta\phi_5$	0.908	0.550	39%

Berdasarkan dengan nilai amplitudo yang telah didapatkan, baik itu *crests period* atau *troughs period* masing-masing dicari nilai periode naturalnya. Karena dirasa ketika hanya mempertimbangkan nilai *crests period* dan *troughs period* saja, nilai periode natural yang didapatkan dirasa kurang akurat, sehingga ditambahkan nilai *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period*. Dimana nilai *zero-up crossing period* didapatkan dari nilai daerah tumbukan atau titik nol amplitudo yang naik sampai mencapai nilai satu periode dari gelombang tersebut, sedangkan untuk *zero-down crossing period* didapatkan dari nilai daerah tumbukan atau titik nol amplitudo yang turun sampai satu periode atau satu siklus dari gelombang itu sendiri. Adapun proses untuk mendapatkan periode natural dari masing-masing nilai yang ingin ditinjau adalah dengan cara menjumlah seluruh nilai periode dari masing-masing siklus yang terjadi kemudian dibagi dengan banyaknya jumlah siklus yang terjadi. Sehingga penentuan nilai periode natural gerak *roll* dari masing-masing pengujian adalah dengan merata-rata hasil periode gerak *roll* tiap kondisi yang telah didapatkan sebelumnya. Melihat dari grafik gerak *roll* yang dihasilkan dari uji decay, perhitungan akan dilakukan pada hasil uji decay yang ke 1, 2, 3 dari masing-masing kondisi, baik dari kondisi *free floating* maupun kondisi tertambat. Adapun Tabel 4.19, 4.20 dan 4.21 dibawah ini merupakan nilai dari *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* untuk uji decay kondisi *free floating*.

**Tabel 4.19** Nilai *Crests Period*, *Troughs Period*, *Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Uji Decay 1 Kondisi *Free Floating*

Periode Uji Decay Kondisi <i>Free Floating</i>				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	2.28	5.88	0.36	3.59
2	8.52	11.28	6.72	9.43
3	15.36	17.76	13.4	15.82

**Tabel 4.20** Nilai *Crests Period*, *Troughs Period*, *Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Uji Decay 2 Kondisi *Free Floating*

Periode Uji Decay Kondisi <i>Free Floating</i>				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	2.16	5.52	0.65	3.75
2	8.4	11.16	6.98	9.71
3	15	17.52	13.42	16.08

**Tabel 4.21** Nilai *Crests Period*, *Troughs Period*, *Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Uji Decay 3 Kondisi *Free Floating*

Periode Uji Decay Kondisi <i>Free Floating</i>				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	2.16	5.52	0.81	3.94
2	8.4	11.16	7.13	9.85
3	15	17.52	13.36	16.15

Dari hasil penentuan nilai periode tiap satuan waktu untuk *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period*, maka selanjutnya adalah perhitungan periode natural gerak roll untuk setiap *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* dari hasil uji decay ke 1, 2 dan 3 kondisi *free floating*. Sehingga dari Tabel-tabel diatas dapat diketahui nilai periode yang dihasilkan dari masing-masing komponen *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* dari uji decay ke 1, 2 dan 3 pada kondisi *free floating*. Kemudian dicari nilai rata-rata dari masing-masing komponen untuk tiap-tiap uji, dari hasil periode rata-rata *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* dilakukan kalkulasi rata-rata untuk mendapatkan nilai periode natural untuk gerak roll yang dihasilkan dari uji decay kondisi *free floating*. Adapun hasil kalkulasi terdapat pada Tabel 4.22, 4.23 dan 4.24 dibawah ini.

**Tabel 4.22** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji *Decay* ke 1 Kondisi  
*Free Floating*

Keterangan	Rata-Rata Periode (s)
<i>Crests period</i>	6.54
<i>Troughs period</i>	5.94
<i>Zero-up period</i>	6.52
<i>Zero-down period</i>	6.12
Perode Natural Roll	<b>6.28</b>

**Tabel 4.23** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji *Decay* ke 2 Kondisi  
*Free Floating*

Keterangan	Rata-Rata Periode (s)
<i>Crests period</i>	6.42
<i>Troughs period</i>	6.00
<i>Zero-up period</i>	6.39
<i>Zero-down period</i>	6.17
Perode Natural Roll	<b>6.24</b>

**Tabel 4.24** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji *Decay* ke 3 Kondisi  
*Free Floating*

Keterangan	Rata-Rata Periode (s)
<i>Crests period</i>	6.42
<i>Troughs period</i>	6.00
<i>Zero-up period</i>	6.28
<i>Zero-down period</i>	6.11
Perode Natural Roll	<b>6.20</b>

Dari hasil kalkulasi diatas didapatkan periode natural gerak roll pada kondisi *free floating* untuk masing-masing uji decay 1, 2 dan 3 adalah sebesar 6.28 sec, 6.24 sec dan 6.20 sec. Berikutnya akan dilakukan perhitungan yang sama untuk penentuan periode natural uji decay pada kondisi tertambat, dimana akan dicari nilai periode rata-rata dari *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* untuk kondisi tertambat. Adapun nilai periode untuk *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing*

*period* dan *zero-down crossing period* kondisi tertambat terdapat pada Tabel 4.25, 4.26 dan 4.27 dibawah ini.

**Tabel 4.25** Nilai *Crests Period*, *Troughs Period*, *Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Uji Decay ke 1 Kondisi Tertambat

Periode Uji Decay Kondisi Tertambat				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	1.8	5.28	0.46	3.53
2	8.04	10.8	6.83	9.46
3	14.76	17.16	13.24	15.9

**Tabel 4.26** Nilai *Crests Period*, *Troughs Period*, *Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Uji Decay ke 2 Kondisi Tertambat

Periode Uji Decay Kondisi Tertambat				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	2.16	5.52	0.77	3.85
2	8.4	11.04	7.13	9.81
3	15.12	17.64	13.49	16.23

**Tabel 4.27** Nilai *Crests Period*, *Troughs Period*, *Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Uji Decay ke 3 Kondisi Tertambat

Periode Uji Decay Kondisi Tertambat				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	2.16	5.52	0.74	3.84
2	8.4	11.16	7.08	9.88
3	15	17.52	13.62	16.22

Dari Tabel-tabel diatas, akan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai periode rata-rata *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* dari hasil pengujian kondisi tertambat. Dari Tabel-tabel diatas dapat diketahui nilai periode rata-rata dari masing-masing

*crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* pada kondisi tertambat. Selanjutnya setelah didapatkan nilai periode rata-rata dari *crests period*, *troughs period*, *zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* pada kondisi tertambat, selanjutnya akan dilakukan kalkulasi rata-rata untuk mendapatkan nilai periode natural untuk gerak roll yang dihasilkan dari uji decay kondisi tertambat. Adapun hasil kalkulasi terdapat pada Tabel 4.28, 4.29 dan 4.30 dibawah ini.

**Tabel 4.28** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji *Decay* ke 1 Kondisi Tertambat

Keterangan	Rata-Rata Periode (s)
<i>Crests period</i>	6.48
<i>Troughs period</i>	5.94
<i>Zero-up period</i>	6.39
<i>Zero-down period</i>	6.19
Perode Natural Roll	<b>6.25</b>

**Tabel 4.29** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji *Decay* ke 2 Kondisi Tertambat

Keterangan	Rata-Rata Periode (s)
<i>Crests period</i>	6.48
<i>Troughs period</i>	6.06
<i>Zero-up period</i>	6.36
<i>Zero-down period</i>	6.19
Perode Natural Roll	<b>6.27</b>

**Tabel 4.30** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji *Decay* ke 3 Kondisi Tertambat

Keterangan	Rata-Rata Periode (s)
<i>Crests period</i>	6.42
<i>Troughs period</i>	6.00
<i>Zero-up period</i>	6.44
<i>Zero-down period</i>	6.19
Perode Natural Roll	<b>6.26</b>

Dari Tabel-tabel diatas didapatkan periode natural gerak roll untuk uji decay pada kondisi tertambat adalah sebesar 6.25 sec, 6.27 sec dan 6.26 sec. Kemudian setelah diketahui nilai periode natural gerak roll dari masing-masing kondisi, selanjutnya adalah mencari koefisien *roll* damping dari hasil uji decay, dimana proses untuk mendapatkan koefisien damping pada gerak *roll* sudah dijelaskan pada sub-bab ke 2. Dari sub-bab kedua dijelaskan terkait dengan asumsi  $\frac{1}{2}$  periode gerak roll yang digunakan sebagai acuan amplitude yang digunakan dari uji decay, sehingga yang digunakan sebagai acuan nilai amplitudo adalah seperti Tabel 4.31, 4.32 dan 4.33 dibawah ini.

**Tabel 4.31** Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji *Decay* ke 1 Kondisi *Free Floating*

$\zeta\phi$	Amplitudo Gerak Roll (deg)
$\zeta\phi_0$	3.042
$\zeta\phi_1$	2.158
$\zeta\phi_2$	1.751
$\zeta\phi_3$	0.858
$\zeta\phi_4$	0.756
$\zeta\phi_5$	0.908

**Tabel 4.32** Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji *Decay* ke 2 Kondisi *Free Floating*

$\zeta\phi$	Amplitudo Gerak Roll (deg)
$\zeta\phi_0$	4.362
$\zeta\phi_1$	3.401
$\zeta\phi_2$	2.486
$\zeta\phi_3$	1.599
$\zeta\phi_4$	0.911
$\zeta\phi_5$	1.134

**Tabel 4.33** Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji *Decay* ke 3 Kondisi *Free Floating*

$\zeta\phi$	Amplitudo Gerak Roll (deg)
$\zeta\phi_0$	3.654
$\zeta\phi_1$	2.866
$\zeta\phi_2$	2.115
$\zeta\phi_3$	1.418

$\zeta\phi$	Amplitudo Gerak Roll (deg)
$\zeta\phi_4$	0.819
$\zeta\phi_5$	1.114

Kemudian dari hasil yang didapatkan dari kondisi *free floating* selanjutnya, akan dicari nilai amplitudo dari kondisi tertambat, adapun hasil yang didapatkan disajikan pada Tabel 4.34, 4.35 dan 4.36 dibawah ini.

**Tabel 4.34** Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji *Decay* ke 1 Kondisi Tertambat

$\zeta\phi$	Amplitudo Gerak Roll (deg)
$\zeta\phi_0$	1.839
$\zeta\phi_1$	1.548
$\zeta\phi_2$	1.096
$\zeta\phi_3$	0.768
$\zeta\phi_4$	0.435
$\zeta\phi_5$	0.550

**Tabel 4.35** Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji *Decay* ke 2 Kondisi Tertambat

$\zeta\phi$	Amplitudo Gerak Roll (deg)
$\zeta\phi_0$	3.357
$\zeta\phi_1$	2.575
$\zeta\phi_2$	1.985
$\zeta\phi_3$	1.335
$\zeta\phi_4$	0.764
$\zeta\phi_5$	1.013

**Tabel 4.36** Amplitudo Gerak Roll Hasil Uji *Decay* ke 3 Kondisi Tertambat

$\zeta\phi$	Amplitudo Gerak Roll (deg)
$\zeta\phi_0$	3.702
$\zeta\phi_1$	2.836
$\zeta\phi_2$	2.128
$\zeta\phi_3$	1.336
$\zeta\phi_4$	0.667
$\zeta\phi_5$	0.804

Hasil dari amplitudo gerak roll pada kondisi *free floating* dan tertambat tiap  $\frac{1}{2}$  periode tersebut selanjutnya akan dilakukan kalkulasi nilai  $\Delta\phi$  dan  $\phi_m$ . selanjutnya akan diplot pada grafik fungsi *polynomial* menggunakan

pendekatan *least square*, yang mana sumbu x-y dari grafik adalah  $(\phi_m, \Delta\phi)$ , dimana  $\phi_m = (\phi_{n+1} + \phi_n)/2$  dan  $\Delta\phi = \phi_n - \phi_{n+1}$ . Sehingga hasil plotting grafik tersebut didapatkan nilai koefisien roll damping untuk linear damping dan kuadratik damping. Adapun nilai koefisien linear dan kuadratik damping ditunjukkan oleh Tabel 4.37 berikut ini.

**Tabel 4.37** Nilai Koefisien Linear Damping (a) dan Kuadratik Damping (b)

Uji	Free Floating		Tertambat	
	a	b	a	b
Decay 1	0.3602	0.0155	0.5839	0.2288
Decay 2	0.5375	0.0741	0.4963	0.0831
Decay 3	0.5371	0.0909	0.5875	0.1024

Dari hasil plotting data uji roll decay dengan metode *least square*, maka didapatkan koefisien nilai a dan b yang merupakan nilai koefisien linear damping dan kuadratik damping. Selanjutnya adalah mencari nilai linear damping dan nilai kuadratik damping dari masing-masing kondisi. Dengan memasukkan koefisien linear dan kuadratik yang sudah didapatkan, kemudian memasukkan nilai k (*restoring force*) dari struktur *floating crane catamaran* dan nilai periode natural yang sudah didapatkan dari kalkulasi sebelumnya maka akan didapatkan nilai linear damping dan kuadratik damping dari kondisi free floating dan tertambat. Adapun hasil perhitungan linear damping dan kuadratik damping ditunjukkan oleh Tabel 4.38 dibawah ini.

**Tabel 4.38** Nilai Linear Damping dan Kuadratik Damping

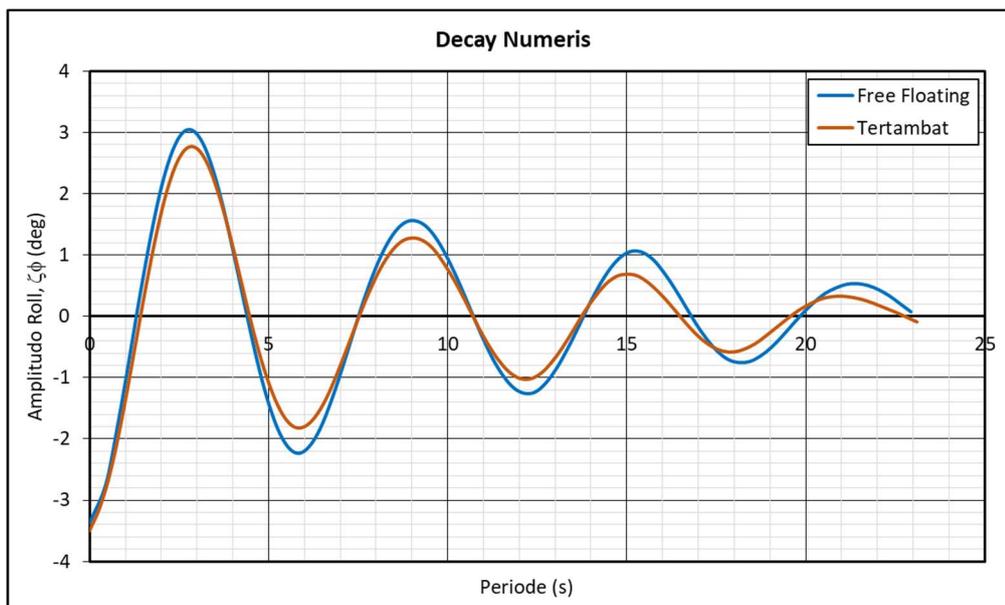
Paramater	Uji Decay	Free Floating	Tertambat	Satuan	Perbedaan
Linear Damping	1	7.578.E+05	1.223.E+06	kN/m/s	38%
	2	1.124.E+06	1.043.E+06	kN/m/s	8%
	3	1.116.E+06	1.233.E+06	kN/m/s	9%
Kuadratik Damping	1	3.839.E+04	5.613.E+05	kN/m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup>	93%
	2	1.814.E+05	2.054.E+05	kN/m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup>	12%
	3	2.195.E+05	2.523.E+05	kN/m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup>	13%

Dari Tabel 4.38 diatas dapat diketahui apabila adanya sistem tambat yang digunakan pada struktur *floating crane catamaran* menunjukkan peningkatan pada nilai linear *roll* damping terbesar adalah pada uji decay 1 sebesar 38% dari selisih nilai linear *roll* damping *free floating* terhadap kondisi tertambat, sedangkan untuk nilai kuadratik *roll* damping didapatkan nilai perbedaan terbesar adalah sebesar 93% dari selisih nilai kuadratik *roll* damping *free floating* terhadap kondisi tertambat untuk uji decay 1 juga. Dari hasil juga bisa dilihat dimana nilai kuadratik damping mendominasi dari pada nilai linear damping untuk hasil yang didapatkan dari eksperimen roll decay. Sehingga apabila dilihat dari gerak osilasi yang dihasilkan dari uji decay saat eksperimen ketika sudah mencapai siklus ke 3 gerakan osilasi cenderung lebih menurun dari pada gerakan pada saat siklus ke 1 dan ke 2 untuk semua hasil uji eksperimen.

#### 4.7 Analisa Numeris

Analisa numeris yang digunakan untuk mendapatkan parameter damping pada gerak roll adalah dengan menggunakan *software* Moses, dimana dengan menginputkan parameter-parameter yang didapatkan dari model yang diujikan kemudian di kalikan dengan faktor skala untuk mendapatkan parameter dengan ukuran sebenarnya maka akan didapatkan data-data struktur dengan skala sebenarnya. Adapun parameter-parameter yang ditinjau sebagai input dalam analisis menggunakan *software* Moses adalah *pricipal dimension* dari struktur, KG, LCG dan jari-jari girasi.

Dari pemodelan yang sudah didapatkan, kemudian dilakukan simulasi uji decay pada gerak roll menggunakan *software* Moses, dari hasil simulasi menggunakan *software* Moses didapatkan grafik osilasi dari uji decay pada gerak roll. Pada *software* Moses sendiri bisa dilakukan set-up dengan tidak mempertimbangkan kecenderungan terjadinya gerak couple atau gerak gabungan yang terjadi dari model yang diberikan *heel angle* sesuai dengan kondisi pada eksperimen. Dari simulasi pada *software* Moses didapatkan grafik osilasi gerak roll sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.24 dibawah ini.



**Gambar 4.24** Hasil Uji Decay *Software* Moses Kondisi *Free Floating* dan Tertambat

Dari grafik osilasi yang sudah didapatkan dari simulasi menggunakan *software* Moses, kemudian dilakukan pengamatan terkait dengan hasil simulasi yang didapatkan dari hasil *software* Moses. Dimana, dari hasil simulasi yang dilakukan pada *software* Moses menunjukkan perbedaan antara kondisi *free floating* dan kondisi tertambat, hal ini bisa ditinjau dengan melihat *trend* grafik osilasi pada kondisi tertambat yang cenderung mengalami penambahan redaman yang diakibatkan dari adanya pemasangan mooring sistem dan juga pengaruh dari kekakuan atau *restoring force* dari stuktur. Adapun perbedaan nilai amplitudo yang dihasilkan dari hasil numeris *software* Moses ditampilkan pada Tabel 4.39 dibawah ini.

**Tabel 4.39** Perbedaan Amplitudo Uji Decay pada *Software* Moses untuk Kondisi *Free Floating* dan Tertambat

$\zeta\phi$	<i>Free Floating</i>	Tertambat	Selisih
$\zeta\phi_0$	3.040	2.740	10%
$\zeta\phi_1$	2.240	1.800	20%
$\zeta\phi_2$	1.550	1.280	17%
$\zeta\phi_3$	1.260	1.020	19%
$\zeta\phi_4$	0.970	0.690	29%
$\zeta\phi_5$	0.760	0.530	30%

Dari hasil kalkulasi perbedaan amplitudo yang dihasilkan dari gerak osilasi pada analisa numeris, didapatkan bahwa terdapat kondisi yang sama seperti pada hasil uji eksperimen, dimana pada amplitude ke 4 dan 5 mulai mengalami perbedaan yang cukup besar dikarenakan efek dari adanya penambahan mooring sistem pada struktur. Kemudian dari hasil grafik osilasi yang sudah didapatkan, dilakukan perhitungan periode natural dari gerak roll dengan menggunakan pendekatan yang sama dengan proses yang sudah dilakukan untuk mengeluarkan nilai periode natural dari uji decay hasil eksperimen. Adapun hasil output periode natural untuk uji decay menggunakan *software* Moses ditampilkan seperti Tabel 4.40 dan Tabel 4.41 dibawah ini.

**Tabel 4.40** Nilai *Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Kondisi *Free Floating*

Periode <i>Decay</i> Numeris Kondisi <i>Free Floating</i>				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	3	6	1.47	4.55
2	9.3	12.3	7.65	10.87
3	15	18.3	13.93	16.97

**Tabel 4.41** Nilai *Crests Period, Troughs Period, Zero-up Crossing Period* dan *Zero-down Crossing Period* Kondisi Tertambat

Periode <i>Decay</i> Numeris Kondisi Tertambat				
Periode	<i>Crests Period</i> (s)	<i>Troughs Period</i> (s)	<i>Zero-up Crossing Period</i> (s)	<i>Zero-down Crossing Period</i> (s)
1	3	6	1.41	4.47
2	9	12.3	7.51	10.71
3	15	18.3	13.72	16.49

Dari *crests period, troughs period, zero-up crossing period* dan *zero-down crossing period* yang didapatkan dari masing-masing kondisi kemudian akan dilakukan perhitungan periode natural gerak roll kondisi *free floating* dan

tertambat dari hasil uji decay pada *software* Moses. adapun hasil periode natural yang didapatkan dari hasil kalkulasi adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.42** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji Decay Numeris Kondisi *Free Floating*

Keterangan	Rata-Rata Periode (s)
<i>Crests period</i>	6.00
<i>Troughs period</i>	6.15
<i>Zero-up period</i>	6.23
<i>Zero-down period</i>	6.21
Perode Natural Roll	<b>6.15</b>

**Tabel 4.43** Hasil Periode Natural Gerak Roll dari Uji Decay Numeris Kondisi Tertambat

Keterangan	Rata-Rata Periode
<i>Crests period</i>	6.00
<i>Troughs period</i>	6.15
<i>Zero-up period</i>	6.16
<i>Zero-down period</i>	6.01
Perode Natural Roll	<b>6.08</b>

Dari Tabel 4.42 dan 4.43 diatas hasil nilai dari periode natural gerak roll dari kondisi *free floating* dan kondisi tertambat, dimana didapatkan nilai periode natural 6.15 sec untuk *free floating* dan 6.08 sec untuk kondisi tertambat. Setelah dilakukan perhitungan terkait dengan periode natural gerak roll, maka akan dilanjutkan dengan perhitungan untuk mencari koefisien linear damping dan kuadratik damping untuk kondisi *free floating* dan tertambat. metode yang digunakan sama dengan proses perhitungan koefisien linear damping dan kuadratik damping dari eksperimen. dari perhitungan tersebut maka akan didapatkan masing-masing nilai a dan b yang mana merupakan nilai koefisien linear damping dan kuadratik damping. adapun nilai koefisien linear damping dan kuadratik damping untuk masing-masing kondisi ditampilkan pada Tabel 4.44 dibawah ini.

**Tabel 4.44** Nilai Koefisien Linear Damping (a) dan Kuadratik Damping (b) dari Hasil Uji Decay *Software* Moses

Uji Decay	Free Floating		Tertambat	
	a	b	a	b
Moses	0.2251	0.0354	0.1953	0.0942

Dari hasil koefisien yang didapatkan kemudian akan dikalkulasikan untuk mendapatkan nilai damping linear dan nilai damping kuadratiknya. Sama seperti dengan pendekatan yang dilakukan untuk mencari nilai linear damping dan kuadratik damping hasil dari eksperimen. Adapun hasil dari nilai linear damping dan kuadratik damping adalah sebagai Tabel 4.45 berikut:

**Tabel 4.45** Nilai Linear Damping dan Kuadratik Damping dari *Software* Moses

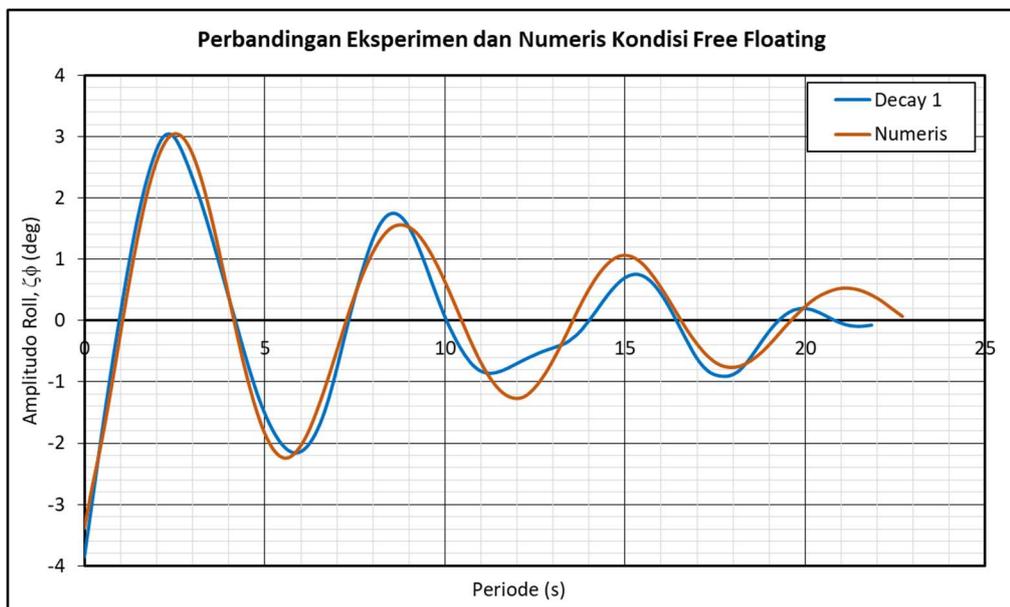
Parameter	<i>Free Floating</i>	Tertambat	Satuan	Peningkatan
Linear Roll Damping	4.736.E+05	4.089.E+05	kN/m/s	16%
Kuadratik Roll Damping	8.768.E+04	2.311.E+05	kN/m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup>	62%

Dari hasil numeris dari *software* Moses didapatkan bahwa nilai kuadratik damping lebih mendominasi penurunan amplitudo gerak roll yang dihasilkan dari uji decay menggunakan *software* Moses dimana terdapat perbedaan sebesar 62% dari kondisi *free floating* ke kondisi tertambat, sedangkan untuk nilai linear damping terjadi peningkatan sebesar 16% dari kondisi *free floating* ke kondisi tertambat. Hasil ini sudah hampir menyerupai dengan hasil eksperimen yang dilakukan, dimana pada hasil eksperimen didapatkan apabila nilai kuadratik damping lebih dominan penambahannya apabila struktur diberikan tambah mooring sistem.

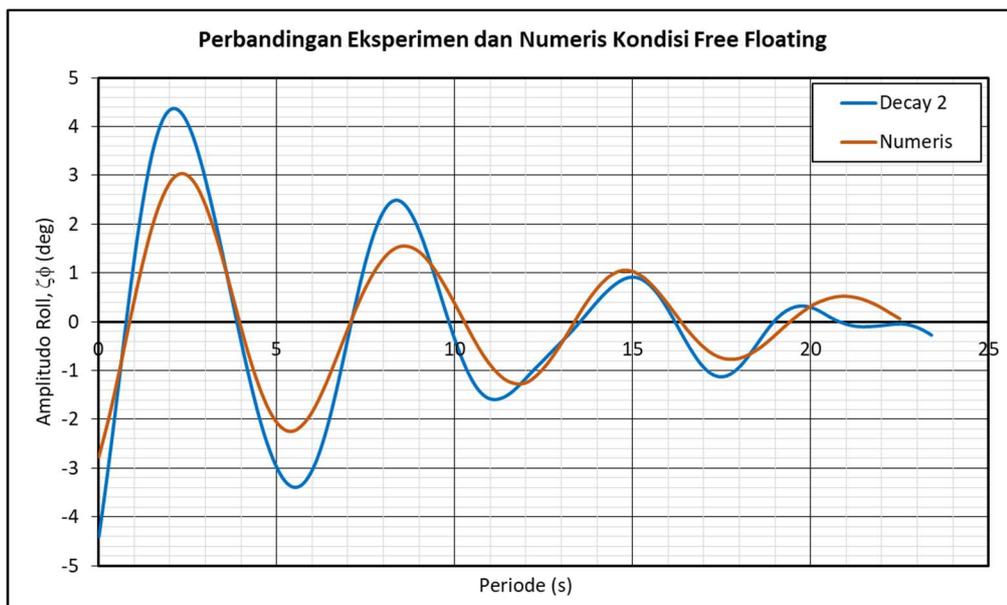
#### 4.8 Perbandingan Hasil Eksperimen dan Numeris

Dari hasil yang sudah didapatkan terkait dengan analisis yang dilakukan dari hasil eksperimen dan juga numeris dari *software* Moses, maka perbandingan hasil eksperimen dengan numeris dapat dilakukan dengan

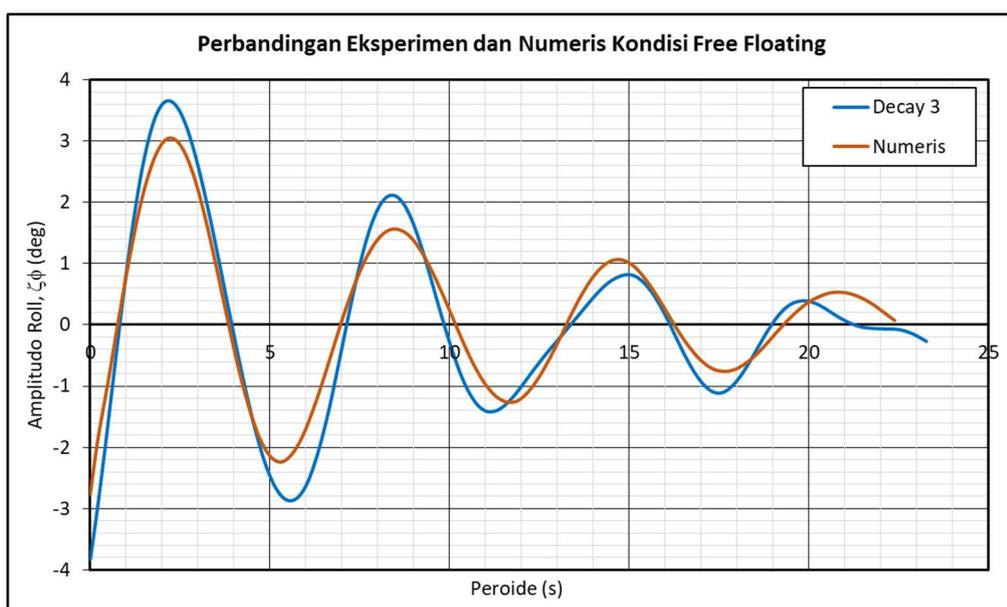
membandingkan grafik roll hasil uji decay yang dihasilkan, dengan cara menganalisis perbedaan yang dihasilkan dari tiap puncak amplitudo pada tiap siklus. Perbandingan yang dilakukan merupakan perbandingan hasil parameter-parameter yang ditinjau saat analisis dilakukan. Adapun parameter yang ditinjau adalah periode natural, perbedaan amplitudo gerak roll, linear damping dan kuadratik damping yang dihasilkan dari masing-masing kondisi. Selanjutnya untuk perbandingan hasil analisis eksperimen dan analisis numeris untuk kondisi *free floating* bisa dilihat dari Gambar 4.25, 4.26 dan 4.27 dibawah ini.



**Gambar 4.25** Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 1 dan Numeris untuk Kondisi *Free Floating*

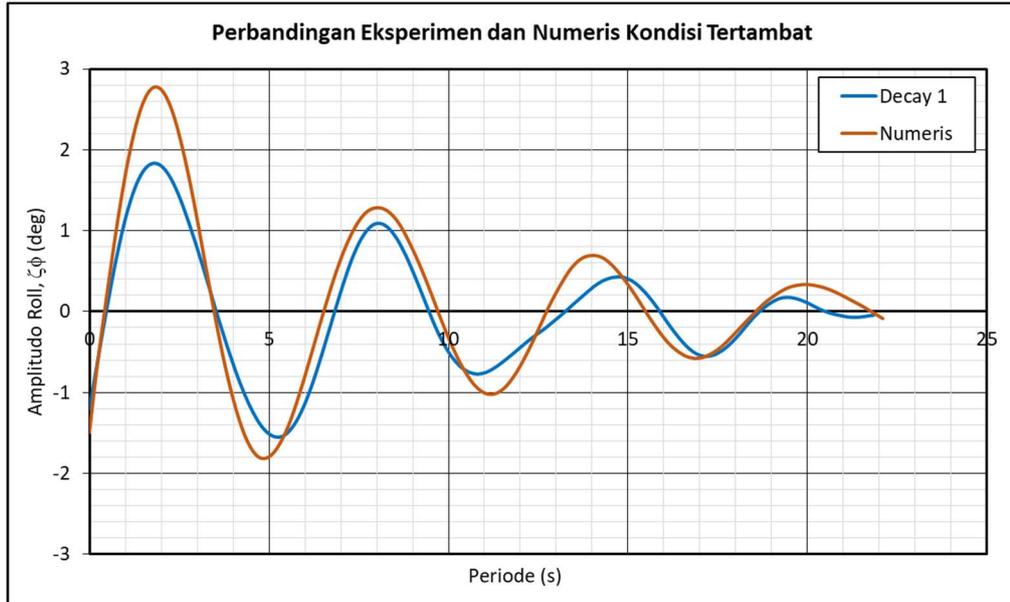


**Gambar 4.26** Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 2 dan Numeris untuk Kondisi *Free Floating*

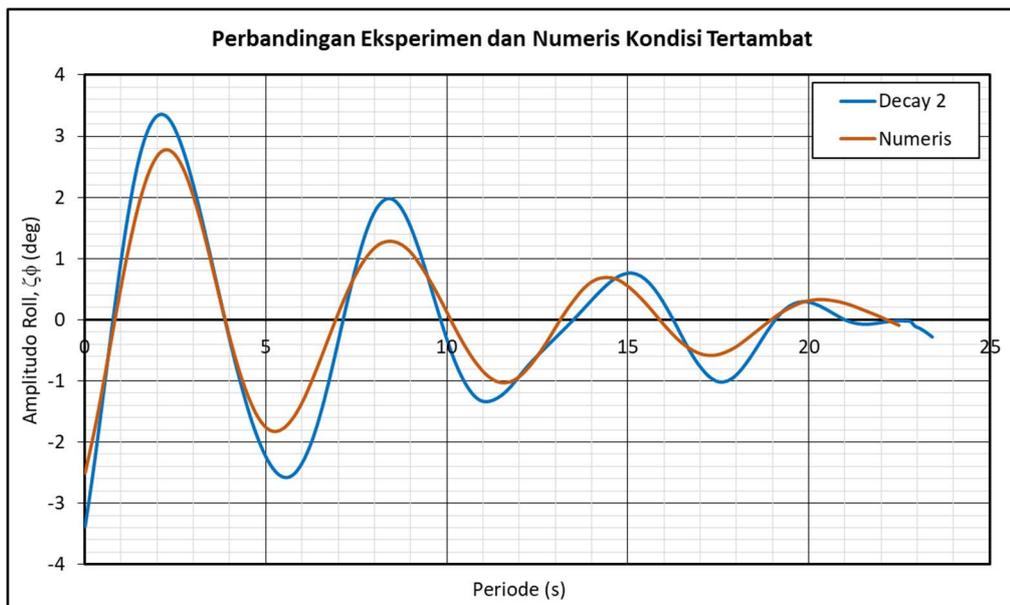


**Gambar 4.27** Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 3 dan Numeris untuk Kondisi *Free Floating*

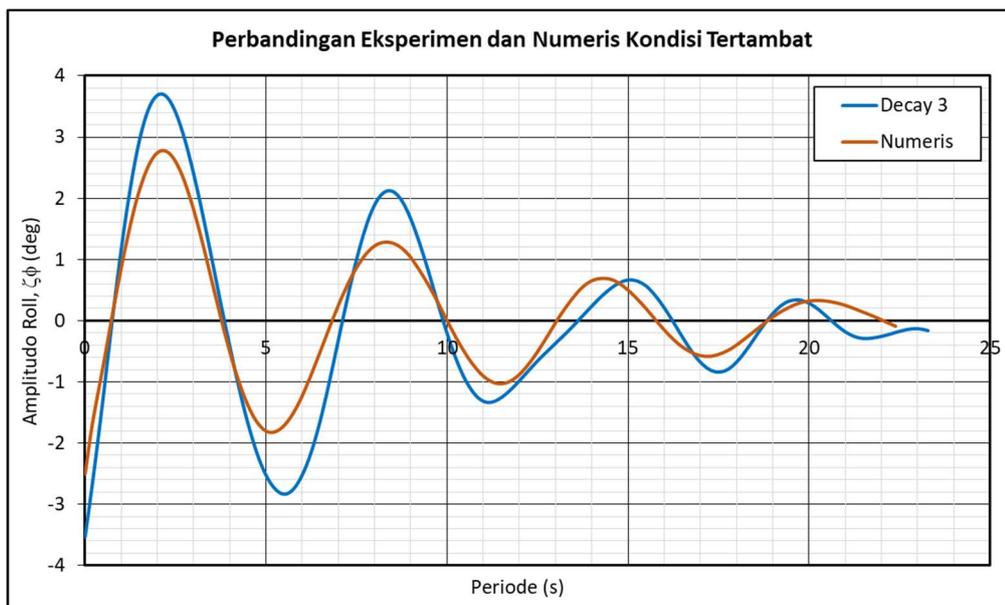
Kemudian setelah membandingkan antara hasil eksperimen dan numeris pada kondisi *free floating*, selanjutnya adalah membandingkan hasil dari eksperimen dan numeris untuk kondisi tertambat. Adapun hasil perbandingan tersebut ditampilkan pada Gambar 4.28, 4.29 dan 4.30 dibawah ini.



**Gambar 4.28** Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 1 dan Numeris untuk Kondisi Tertambat



**Gambar 4.29** Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 2 dan Numeris untuk Kondisi Tertambat



**Gambar 4.30** Grafik Roll Decay Perbandingan Hasil Eksperimen Decay ke 3 dan Numeris untuk Kondisi Tertambat

Dari hasil perbandingan diatas maka akan dilakukan perbandingan tiap masing-masing amplitudo yang dihasilkan dari eksperimen dan numeris. Adapun hasil perbandingan yang didapatkan dari masing-masing kondisi hasil uji eksperimen terhadap hasil numeris untuk kondisi *free floating* ditampilkan pada Tabel 4.46, 4.47 dan 4.48 dibawah ini.

**Tabel 4.46** Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi *Free Floating*

$\zeta\phi$	Decay 1	Numeris	Selisih
$\zeta\phi_0$	3.042	3.040	0%
$\zeta\phi_1$	2.158	2.240	4%
$\zeta\phi_2$	1.751	1.550	11%
$\zeta\phi_3$	0.858	1.260	47%
$\zeta\phi_4$	0.756	0.970	28%
$\zeta\phi_5$	0.908	0.760	16%

**Tabel 4.47** Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi *Free Floating*

$\zeta\phi$	Decay 2	Numeris	Selisih
$\zeta\phi_0$	4.362	3.040	30%
$\zeta\phi_1$	3.401	2.240	34%
$\zeta\phi_2$	2.486	1.550	38%
$\zeta\phi_3$	1.599	1.260	21%
$\zeta\phi_4$	0.991	0.970	6%
$\zeta\phi_5$	1.134	0.760	33%

**Tabel 4.48** Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi *Free Floating*

$\zeta\phi$	Decay 3	Numeris	Selisih
$\zeta\phi_0$	3.654	3.040	17%
$\zeta\phi_1$	2.866	2.240	22%
$\zeta\phi_2$	2.115	1.550	27%
$\zeta\phi_3$	1.418	1.260	11%
$\zeta\phi_4$	0.819	0.970	18%
$\zeta\phi_5$	1.114	0.760	32%

Dari perbandingan hasil eksperimen dan numeris diatas dapat dilihat terjadi perbedaan yang cukup besar pada tiap-tiap amplitudo gerakan roll yang dihasilkan dari masing-masing uji decay. Perbedaan selisih amplitudo paling besar terjadi pada amplitudo ke 3 untuk perbandingan hasil uji decay 1 terhadap hasil numeris yaitu sebesar 47%.

Selanjutnya setelah didapatkan nilai perbandingan amplitudo untuk hasil eksperimen terhadap hasil numeris pada kondisi *free floating*. Kemudian akan dilakukan perbandingan untuk hasil eksperimen terhadap hasil numeris pada kondisi tertambat. Adapun perbandingan untuk hasil eksperimen terhadap hasil numeris ditampilkan dalam Tabel 4.49, 4.50 dan 4.51 dibawah ini.

**Tabel 4.49** Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi Tertambat

$\zeta\phi$	Decay 1	Numeris	Selisih
$\zeta\phi_0$	1.839	2.740	49%
$\zeta\phi_1$	1.548	1.800	16%
$\zeta\phi_2$	1.096	1.280	17%
$\zeta\phi_3$	0.768	1.020	33%
$\zeta\phi_4$	0.435	0.690	59%
$\zeta\phi_5$	0.550	0.530	4%

**Tabel 4.50** Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi Tertambat

$\zeta\phi$	Decay 2	Numeris	Selisih
$\zeta\phi_0$	3.357	2.740	18%
$\zeta\phi_1$	2.575	1.800	30%
$\zeta\phi_2$	1.985	1.280	36%
$\zeta\phi_3$	1.335	1.020	24%
$\zeta\phi_4$	0.764	0.690	10%
$\zeta\phi_5$	1.013	0.530	48%

**Tabel 4.51** Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dan Numeris pada Kondisi Tertambat

$\zeta\phi$	Decay 3	Numeris	Selisih
$\zeta\phi_0$	3.702	2.740	26%
$\zeta\phi_1$	2.836	1.800	37%
$\zeta\phi_2$	2.128	1.280	40%
$\zeta\phi_3$	1.336	1.020	24%
$\zeta\phi_4$	0.667	0.690	3%
$\zeta\phi_5$	0.840	0.530	37%

Dari perbandingan hasil eksperimen terhadap hasil numeris diatas dapat dilihat apabila terdapat perbedaan yang besar pula pada hasil uji decay 1 dimana pada amplitude ke 4 terdapat perbedaan 49%. Dari keseluruhan perbedaan yang didapatkan dari masing-masing kondisi menunjukkan bahwa dari perbandingan kondisi *free floating* didapatkan bahwa hasil numeris mendekati hasil uji decay 1 dari eksperimen. Kemudian untuk perbandingan

kondisi tertambat masing masing hasil eksperimen mempunyai nilai perbedaan yang besar, hal ini dimungkinkan karena terdapat perbedaan penggunaan mooring sistem untuk kondisi eksperimen dan numeris, serta hal tersebut berdampak pada nilai kekakuan mooring sistem yang dihasilkan pada saat eksperimen dan numeris.

Kemudian dari hasil analisis yang didapatkan melalui eksperimen dan numeris pada *software* Moses, akan dibandingkan terkait dengan nilai linear damping dan kuadratik damping yang didapatkan dari hasil kalkulasi sesuai dengan jurnal (Ali, B. 2018). Adapun Tabel 4.52, 4.53 dan 4.54 adalah perbandingan hasil eksperimen dan numeris.

**Tabel 4.52** Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen Uji Decay 1 dan Numeris

Parameter	Kondisi	Eksperimen	Numeris	Satuan	Perbedaan
Linear Roll Damping	<i>Free Floating</i>	7.578.E+05	4.736.E+05	kN/m/s	37.51%
	Tertambat	1.223.E+06	4.089.E+05	kN/m/s	66.55%
Kuadratik Roll Damping	<i>Free Floating</i>	3.839.E+04	8.768.E+04	kN/m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	128.39%
	Tertambat	5.613.E+05	2.311.E+05	kN/m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	58.83%

**Tabel 4.53** Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen Uji Decay 2 dan Numeris

Parameter	Kondisi	Eksperimen	Numeris	Satuan	Perbedaan
Linear Roll Damping	<i>Free Floating</i>	1.124.E+06	4.736.E+05	kN/m/s	57.88%
	Tertambat	1.043.E+06	4.089.E+05	kN/m/s	60.80%
Kuadratik Roll Damping	<i>Free Floating</i>	1.814.E+05	8.768.E+04	kN/m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	51.67%
	Tertambat	2.054.E+05	2.311.E+05	kN/m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	12.50%

**Tabel 4.54** Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen Uji Decay 3 dan Numeris

Parameter	Kondisi	Eksperimen	Numeris	Satuan	Perbedaan
Linear Roll	<i>Free Floating</i>	1.116.E+06	4.736.E+05	kN/m/s	57.56%
Damping	Tertambat	1.223.E+06	4.089.E+05	kN/m/s	66.83%
Kuadratik Roll	<i>Free Floating</i>	2.195.E+05	8.768.E+04	kN/m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	60.06%
Damping	Tertambat	2.523.E+05	2.311.E+05	kN/m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	8.41%

Dari hasil perbandingan diatas terdapat perbedaan yang besar terhadap nilai linear damping dan juga kuadratik damping dari masing-masing kondisi. Dimana bisa dilihat dari hasil perbandingan untuk uji decay 1 terhadap hasil numeris bahwa perbedaan terbesar adalah pada nilai linear damping untuk kondisi tertambat, kemudian untuk perbandingan nilai kuadratik damping lebih besar terjadi pada kondisi *free floating* hal ini berbanding lurus dengan perbedaan amplitudo yang dihasilkan dari uji decay 1 terhadap numeris. Kemudian untuk perbandingan hasil uji decay ke 2 terhadap hasil numeris didapatkan bahwa nilai linear damping lebih besar dari pada nilai kuadratik damping dimana terdapat perbedaan sebesar 60.80% untuk hasil perbandingan nilai linear damping untuk kondisi tertambat, hal ini juga terjadi pada perbandingan hasil uji decay ke 3 ketika dibandingkan dengan hasil numeris, dengan perbedaan sebesar 66.83% pada nilai linear damping. Perbedaan yang terlampau besar ketika masing-masing hasil uji decay dibandingkan dengan hasil numeris dikarenakan perbedaan mooring sistem yang digunakan, hal ini dikarenakan sangat sulit untuk mendekati kondisi ideal dari *mooring* sistem yang digunakan pada saat eksperimen. Kemudian meninjau fungsi dari struktur yang merupakan *mobile vessel* sehingga kebanyakan *mooring* sistem yang digunakan adalah sistem *catenary mooring*. Sehingga dari perbedaan *set-up* itulah menghasilkan nilai kekakuan yang berbeda untuk kondisi eksperimen dan numeris.

Kemudian perlu ditinjau lagi pada respon gerakan yang dihasilkan ketika struktur mendapatkan beban lingkungan, dimana ketika dilihat dari hasil gerak roll yang dihasilkan pada siklus ke 3 untuk tiap-tiap uji decay terdapat perubahan amplitude dimana periode yang dihasilkan lebih besar dari pada periode pada siklus ke 1 dan 2. Sehingga perlu kaji lebih lanjut mengenai pengaruh fluida yang bergerak diantara dua lambung struktur *floating crane catamaran* ini. Kemudian dari hasil perbandingan untuk hasil uji decay pada tiap kondisi, terlihat apabila pada perbandingan uji ke 2 dan ke 3 untuk kondisi *free floating* dan tertambat mooring sistem tidak terlalu bekerja sehingga grafik gerakan yang dihasilkan tidak memperlihatkan perbedaan yang cukup signifikan baik dari segi amplitudo maupun dari periode yang dihasilkan.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari semua hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV, maka hasilnya akan digunakan sebagai acuan untuk menjawab rumusan-rumusan masalah yang sudah ditetapkan pada tugas akhir ini. Kesimpulan dari seluruh analisis tugas akhir ini adalah.

1. Studi eksperimen dengan menggunakan metode *free decay test* pada gerak roll menunjukkan adanya pertambahan nilai roll damping yang disebabkan karena adanya penambahan *mooring* sistem pada operasinya. Peningkatan roll damping ini bisa dilihat dari perbandingan hasil eksperimen yang menunjukkan pada siklus ke 3 uji decay mengalami penurunan amplitudo yang cukup signifikan, sehingga mempercepat redaman yang terjadi. Hal ini juga ditunjukkan dengan perbandingan selisih amplitudo gerak yang dihasilkan dari kondisi *free floating* terhadap kondisi tertambat. Kemudian dari hasil nilai roll damping sendiri yang mana memuat komponen linear damping dan kuadratik damping, diketahui pengaruh kuadratik damping yang sangat dominan dari hasil uji eksperimen yang dilakukan. Dari hasil perhitungan didapatkan perbedaan kondisi *free floating* terhadap kondisi tertambat untuk nilai linear damping hasil uji decay 1 adalah sebesar 38%, kemudian untuk uji decay 2 sebesar 8%, dan uji decay 3 sebesar 9%, kemudian untuk nilai kuadratik damping dari hasil uji decay 1 didapatkan perbedaan sebesar 93%, kemudian untuk uji decay 2 sebesar 12%, dan uji decay 3 sebesar 13%.
2. Perbandingan antara hasil eksperimen terhadap hasil numeris dari *software* Moses menunjukkan bahwa terjadi perbedaan yang cukup signifikan pada tiap amplitudo gerak roll yang dihasilkan, sehingga berpengaruh terhadap hasil perbandingan yang dilakukan. Kemudian dari hasil perbandingan analisis nilai damping hasil eksperimen dan numeris untuk uji decay 1 terhadap numeris didapatkan perbedaan yang besar pada nilai kuadratik damping untuk kondisi *free floating* sebesar 128.39%. Kemudian untuk

perbandingan uji decay 2 terhadap hasil numeris, perbedaan terbesar terjadi pada nilai linear damping untuk kondisi tertambat yaitu sebesar 60.80%. Sedangkan untuk perbandingan uji decay 3 terhadap hasil numeris didapatkan perbedaan terbesar adalah pada nilai linear damping kondisi tertambat sebesar 66.83%. Dari hasil perbandingan ini bisa dilihat jika dari masing-masing faktor memiliki perbandingan yang besar, sehingga perlu dikaji lagi lebih lanjut terkait dengan uji eksperimen dan juga uji numeris yang dilakukan. Hal ini bisa saja terjadi mengingat konfigurasi mooring yang digunakan pada saat eksperimen dan numeris berbeda, dimana konfigurasi mooring yang digunakan saat eksperimen adalah sistem horizontal taut dan untuk numeris digunakan konfigurasi sistem *catenary mooring*.

## 5.2 Saran

Pada proses pengerjaan penelitian tugas akhir ini, masih banyak kekurangan dalam proses pengerjaan dan juga analisis, sehingga diharapkan akan muncul penelitian-penelitian sejenis terkait dengan kajian roll damping pada struktur *multihull vessel*. Adapun saran yang diberikan penulis antara lain:

1. Melakukan permodelan numeris sistem tambat terlebih dahulu sebelum melakukan pemodelan pada eksperimen, sehingga tidak terjadi perbedaan konfigurasi ketika dilakukan validasi terhadap hasil analisis numeris.
2. Dilakukan kajian lebih lanjut terkait dengan sistem mooring horizontal taut yang digunakan pada saat eksperimen, sehingga bisa dilakukan pendekatan nilai kekakuan yang sesuai ketika dilakukan analisa numeris.
3. Memodelkan sistem tambat dengan mempertimbangkan konfigurasi sudut dan sumbu x,y,z sehingga diharapkan terdapat pengaruh yang signifikan terhadap hasil eksperimen uji decay yang dilakukan untuk kondisi tertambat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, B., Indiyanto., Permana, C., Widodo. 2018. Analisa Perubahan Panjang Model FPU Barge Terhadap Koefisien Linier dan Kuadratik *Roll Damping*. Surabaya: Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT.
- Chakrabarti, S.K. 1994. *Hydrodynamics of Offshore Structure*. Dorchester: Computational Mechanics Publications
- Chakrabarti, S. 2000. *Empirical Calculation Of Roll Damping For Ships And Barges*. USA: Offshore Structure Analysis Inc.
- Djarmiko, 2012. Perilaku Dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak. Surabaya: ITS Press.
- Faltinsen, O.M. 1990. *Sea Loads on Ships Offshore Structures*. Cambridge: University of Cambridge.
- Falzarano, J., et al. 2015. *An Overview Of The Prediction Methods For Roll Damping Of Ships*. USA: Marine Dynamics Laboratory Texas A&M University.
- Gorat, M. 2017. Analisis Stabilitas *Crane Barge* Saat Operasi *Heavy Lifting*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- Hakim, T. 2012. Analisis Kekuatan Konstruksi Crane Pedestal Pada *Mooring Storage Tanker* Niria. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- Hendratmoko, H., 2012. Studi Eksperimen Pengaruh Lunas Bilga Terhadap Gerakan Rolling. Surabaya: Departemen Teknik Perkapalan FTK ITS.
- Herdanditya, I. 2017. Studi Analitis, Numeris, dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Tali Tambat SPAR dengan Variasi Heading Gelombang. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hermanto. 2014. Analisis CFD Hambatan Viskos Katamaran Tak Sejajar (Staggered) Dengan Variasi Penempatan Posisi Demihull Secara Memanjang Dan Melintang. Surabaya: Departemen Teknik Perkapalan – FTK – ITS.

- Himeno, Y. 1981. *Prediction of Ship Roll Damping-State of The Art*. Report No. 239. Departement of Naval Architecture, The University of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Ikeda, Y., Katayama, T. 2000. *Roll Damping Prediction Method For A High-Speed Planing Craft*. Proceedings of The 7<sup>th</sup> International Conference on Stability of Ship and Ocean Vehicles. Vol. B 532-541.
- Journee, J.M.J. dan Adegeest, L.J.M. 2003. *Theoretical Manual of Strip Theory Program "SEAWAY for Windows"*. TU Delft Report No. 1370 Revision: 1412-2003.
- Journee, J.M.J. dan Massie, W.W. 2001. *Offshore Hydromechanics First Edition*. Delft University of Technology.
- Lloyd, A. R. J. M., 1989. *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Water 1st edition*. Chichester: Ellis Horwood Limited.
- Munson, B. R. et al. 2013. *Fundamentals of Fluid Mechanics 7th edition*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Newman, J. N. 2017. *Marine Hydrodynamics*. Cambridge: The MIT Press.
- Nurmalita, T. 2011. Pengaruh *Bilge Keel* Terhadap Respon Gerakan *Roll* Dan Aliran Fluida Di Sekitar *Bilge Keel* Pada FLNG. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK ITS.
- Phiel, H. P. 2016. *Ship Roll Damping Analysis*. Hamburg: Departement of Mechanical Engineering University of Deisburg-Essen.
- Sabastian. 2017. Perencanaan Sistem Penggerak Kapal Katamaran Dengan Variasi Jarak Demihull Sebagai Kapal Rumah Sakit. Surabaya: Departemen Teknik Sistem Perkapalan – FTK – ITS.
- San, K et al. 2018. *Analysis on Rolling Damping Of A Conventional Boat Fitted With T-Shapped Bilge Keels*. Malaysia: Departement of Mechanical Engineering Curtin University Malaysia.

Sarpkaya, Turgut. 2010. Wave Forces on Offshore Structures. Cambridge University Press.

Viviany. 2012. Evaluasi Untuk Kerja Crane Barge KGM-23 Pada Saat Operasi Pengangkatan Dan Pemasangan Boom Burner di Lokasi Peciko Field Platform MWP-B Total E&P Indonesia. Surabaya: Intitut Teknologi Sepuluh Nopember.

Wibowo, Harso, Nugroho. 2006. Gerakan Non-linier Rolling Kapal di Gelombang Beraturan (Kajian Numerik). UPT – Balai Pengkajian Penelitian Hidrodinamika.

MARIN Report No.22808-3-OB

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

**LAMPIRAN A**  
**DATA FREE DECAY TEST EKSPERIMEN**

Data Free Decay Test Kondisi Free Floating

Hasil Eksperimen Kondisi Free Floating					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
0	-3.858	0	-4.412	0	-3.824
0.12	-3.361	0.12	-3.779	0.12	-3.32
0.24	-2.859	0.24	-3.124	0.24	-2.796
0.36	-2.35	0.36	-2.441	0.36	-2.243
0.48	-1.851	0.48	-1.733	0.48	-1.665
0.6	-1.367	0.6	-1.012	0.6	-1.073
0.72	-0.898	0.72	-0.29	0.72	-0.477
0.84	-0.448	0.84	0.418	0.84	0.11
0.96	-0.019	0.96	1.094	0.96	0.674
1.08	0.402	1.08	1.724	1.08	1.206
1.2	0.813	1.2	2.299	1.2	1.699
1.32	1.204	1.32	2.811	1.32	2.144
1.44	1.567	1.44	3.257	1.44	2.539
1.56	1.893	1.56	3.628	1.56	2.876
1.68	2.188	1.68	3.924	1.68	3.157
1.8	2.445	1.8	4.144	1.8	3.374
1.92	2.664	1.92	4.287	1.92	3.528
2.04	2.846	2.04	4.359	2.04	3.62
2.16	2.979	2.16	4.362	2.16	3.654
2.28	3.042	2.28	4.304	2.28	3.633
2.4	3.04	2.4	4.189	2.4	3.562
2.52	2.975	2.52	4.021	2.52	3.447
2.64	2.851	2.64	3.801	2.64	3.287
2.76	2.695	2.76	3.535	2.76	3.087
2.88	2.521	2.88	3.229	2.88	2.851
3	2.334	3	2.895	3	2.585
3.12	2.134	3.12	2.538	3.12	2.296
3.24	1.928	3.24	2.163	3.24	1.988
3.36	1.705	3.36	1.769	3.36	1.666
3.48	1.468	3.48	1.362	3.48	1.33
3.6	1.22	3.6	0.948	3.6	0.984
3.72	0.973	3.72	0.533	3.72	0.634
3.84	0.724	3.84	0.118	3.84	0.283
3.96	0.473	3.96	-0.29	3.96	-0.063
4.08	0.225	4.08	-0.69	4.08	-0.405
4.2	-0.019	4.2	-1.074	4.2	-0.736

Hasil Eksperimen Kondisi Free Floating					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
4.32	-0.273	4.32	-1.442	4.32	-1.055
4.44	-0.523	4.44	-1.786	4.44	-1.358
4.56	-0.763	4.56	-2.105	4.56	-1.643
4.68	-0.99	4.68	-2.392	4.68	-1.905
4.8	-1.204	4.8	-2.646	4.8	-2.142
4.92	-1.393	4.92	-2.868	4.92	-2.346
5.04	-1.563	5.04	-3.054	5.04	-2.519
5.16	-1.714	5.16	-3.203	5.16	-2.658
5.28	-1.846	5.28	-3.311	5.28	-2.763
5.4	-1.957	5.4	-3.378	5.4	-2.832
5.52	-2.045	5.52	-3.401	5.52	-2.866
5.64	-2.109	5.64	-3.378	5.64	-2.862
5.76	-2.148	5.76	-3.309	5.76	-2.822
5.88	-2.158	5.88	-3.196	5.88	-2.745
6	-2.138	6	-3.04	6	-2.627
6.12	-2.089	6.12	-2.841	6.12	-2.468
6.24	-2.009	6.24	-2.596	6.24	-2.268
6.36	-1.899	6.36	-2.312	6.36	-2.038
6.48	-1.759	6.48	-1.992	6.48	-1.778
6.6	-1.587	6.6	-1.644	6.6	-1.492
6.72	-1.382	6.72	-1.267	6.72	-1.179
6.84	-1.143	6.84	-0.873	6.84	-0.846
6.96	-0.882	6.96	-0.468	6.96	-0.502
7.08	-0.601	7.08	-0.063	7.08	-0.158
7.2	-0.311	7.2	0.333	7.2	0.182
7.32	-0.024	7.32	0.713	7.32	0.51
7.44	0.249	7.44	1.071	7.44	0.822
7.56	0.514	7.56	1.4	7.56	1.11
7.68	0.764	7.68	1.692	7.68	1.371
7.8	0.993	7.8	1.943	7.8	1.596
7.92	1.2	7.92	2.149	7.92	1.782
8.04	1.383	8.04	2.307	8.04	1.927
8.16	1.531	8.16	2.417	8.16	2.032
8.28	1.642	8.28	2.476	8.28	2.095
8.4	1.716	8.4	2.486	8.4	2.115
8.52	1.751	8.52	2.444	8.52	2.095
8.64	1.748	8.64	2.357	8.64	2.035
8.76	1.708	8.76	2.229	8.76	1.938

Hasil Eksperimen Kondisi Free Floating					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
8.88	1.635	8.88	2.064	8.88	1.804
9	1.53	9	1.864	9	1.638
9.12	1.398	9.12	1.634	9.12	1.445
9.24	1.243	9.24	1.381	9.24	1.231
9.36	1.07	9.36	1.11	9.36	1
9.48	0.883	9.48	0.828	9.48	0.757
9.6	0.687	9.6	0.542	9.6	0.508
9.72	0.493	9.72	0.259	9.72	0.263
9.84	0.304	9.84	-0.016	9.84	0.023
9.96	0.124	9.96	-0.28	9.96	-0.207
10.08	-0.041	10.08	-0.528	10.08	-0.427
10.2	-0.188	10.2	-0.756	10.2	-0.632
10.32	-0.328	10.32	-0.961	10.32	-0.819
10.44	-0.454	10.44	-1.14	10.44	-0.982
10.56	-0.564	10.56	-1.292	10.56	-1.119
10.68	-0.66	10.68	-1.414	10.68	-1.231
10.8	-0.739	10.8	-1.504	10.8	-1.318
10.92	-0.796	10.92	-1.564	10.92	-1.378
11.04	-0.833	11.04	-1.594	11.04	-1.411
11.16	-0.854	11.16	-1.599	11.16	-1.418
11.28	-0.858	11.28	-1.581	11.28	-1.405
11.4	-0.849	11.4	-1.546	11.4	-1.372
11.52	-0.83	11.52	-1.494	11.52	-1.322
11.64	-0.803	11.64	-1.426	11.64	-1.258
11.76	-0.771	11.76	-1.346	11.76	-1.182
11.88	-0.735	11.88	-1.257	11.88	-1.098
12	-0.699	12	-1.164	12	-1.007
12.12	-0.662	12.12	-1.069	12.12	-0.911
12.24	-0.627	12.24	-0.978	12.24	-0.816
12.36	-0.593	12.36	-0.89	12.36	-0.722
12.48	-0.562	12.48	-0.803	12.48	-0.63
12.6	-0.531	12.6	-0.713	12.6	-0.539
12.72	-0.501	12.72	-0.623	12.72	-0.452
12.84	-0.476	12.84	-0.533	12.84	-0.368
12.96	-0.453	12.96	-0.445	12.96	-0.287
13.08	-0.428	13.08	-0.356	13.08	-0.204
13.2	-0.402	13.2	-0.267	13.2	-0.121
13.32	-0.375	13.32	-0.174	13.32	-0.036

Hasil Eksperimen Kondisi Free Floating					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
13.44	-0.334	13.44	-0.076	13.44	0.048
13.56	-0.278	13.56	0.026	13.56	0.133
13.68	-0.219	13.68	0.13	13.68	0.218
13.8	-0.145	13.8	0.233	13.8	0.303
13.92	-0.058	13.92	0.336	13.92	0.386
14.04	0.033	14.04	0.436	14.04	0.467
14.16	0.128	14.16	0.532	14.16	0.544
14.28	0.228	14.28	0.619	14.28	0.615
14.4	0.327	14.4	0.699	14.4	0.676
14.52	0.421	14.52	0.768	14.52	0.726
14.64	0.508	14.64	0.827	14.64	0.766
14.76	0.585	14.76	0.872	14.76	0.796
14.88	0.651	14.88	0.901	14.88	0.815
15	0.703	15	0.911	15	0.819
15.12	0.738	15.12	0.901	15.12	0.805
15.24	0.756	15.24	0.87	15.24	0.77
15.36	0.756	15.36	0.819	15.36	0.717
15.48	0.736	15.48	0.748	15.48	0.645
15.6	0.696	15.6	0.658	15.6	0.558
15.72	0.638	15.72	0.551	15.72	0.456
15.84	0.562	15.84	0.425	15.84	0.34
15.96	0.47	15.96	0.286	15.96	0.213
16.08	0.364	16.08	0.138	16.08	0.076
16.2	0.245	16.2	-0.016	16.2	-0.071
16.32	0.118	16.32	-0.174	16.32	-0.219
16.44	-0.016	16.44	-0.332	16.44	-0.366
16.56	-0.153	16.56	-0.485	16.56	-0.504
16.68	-0.289	16.68	-0.628	16.68	-0.635
16.8	-0.421	16.8	-0.759	16.8	-0.755
16.92	-0.545	16.92	-0.875	16.92	-0.861
17.04	-0.654	17.04	-0.972	17.04	-0.951
17.16	-0.743	17.16	-1.047	17.16	-1.022
17.28	-0.811	17.28	-1.099	17.28	-1.075
17.4	-0.859	17.4	-1.127	17.4	-1.107
17.52	-0.887	17.52	-1.134	17.52	-1.114
17.64	-0.903	17.64	-1.116	17.64	-1.096
17.76	-0.908	17.76	-1.075	17.76	-1.055
17.88	-0.902	17.88	-1.012	17.88	-0.994

Hasil Eksperimen Kondisi Free Floating					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
18	-0.878	18	-0.933	18	-0.916
18.12	-0.836	18.12	-0.836	18.12	-0.823
18.24	-0.774	18.24	-0.725	18.24	-0.717
18.36	-0.695	18.36	-0.603	18.36	-0.602
18.48	-0.6	18.48	-0.479	18.48	-0.48
18.6	-0.501	18.6	-0.354	18.6	-0.355
18.72	-0.399	18.72	-0.232	18.72	-0.233
18.84	-0.298	18.84	-0.114	18.84	-0.116
18.96	-0.201	18.96	-0.008	18.96	-0.007
19.08	-0.112	19.08	0.084	19.08	0.094
19.2	-0.032	19.2	0.159	19.2	0.183
19.32	0.037	19.32	0.221	19.32	0.256
19.44	0.095	19.44	0.267	19.44	0.313
19.56	0.141	19.56	0.299	19.56	0.353
19.68	0.174	19.68	0.316	19.68	0.379
19.8	0.194	19.8	0.319	19.8	0.391
19.92	0.202	19.92	0.307	19.92	0.391
20.04	0.197	20.04	0.283	20.04	0.379
20.16	0.183	20.16	0.248	20.16	0.357
20.28	0.159	20.28	0.203	20.28	0.327
20.4	0.129	20.4	0.152	20.4	0.287
20.52	0.094	20.52	0.1	20.52	0.244
20.64	0.057	20.64	0.053	20.64	0.198
20.76	0.021	20.76	0.011	20.76	0.153
20.88	-0.012	20.88	-0.023	20.88	0.111
21	-0.04	21	-0.053	21	0.072
21.12	-0.064	21.12	-0.077	21.12	0.037
21.24	-0.08	21.24	-0.094	21.24	0.007
21.36	-0.089	21.36	-0.104	21.36	-0.018
21.48	-0.092	21.48	-0.108	21.48	-0.036
21.6	-0.089	21.6	-0.106	21.6	-0.048
21.72	-0.081	21.72	-0.101	21.72	-0.055
21.84	-0.071	21.84	-0.094	21.84	-0.06
		21.96	-0.086	21.96	-0.064
		22.08	-0.078	22.08	-0.066
		22.2	-0.067	22.2	-0.067
		22.32	-0.057	22.32	-0.068
		22.44	-0.051	22.44	-0.072

Data Free Decay Test Kondisi Tertambat

Hasil Eksperimen Kondisi Tertambat					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
0	-1.196	0	-3.376	0	-3.534
0.12	-0.886	0.12	-2.9	0.12	-3.013
0.24	-0.575	0.24	-2.401	0.24	-2.481
0.36	-0.267	0.36	-1.873	0.36	-1.922
0.48	0.035	0.48	-1.323	0.48	-1.342
0.6	0.324	0.6	-0.766	0.6	-0.736
0.72	0.598	0.72	-0.215	0.72	-0.133
0.84	0.852	0.84	0.323	0.84	0.456
0.96	1.08	0.96	0.839	0.96	1.01
1.08	1.281	1.08	1.324	1.08	1.526
1.2	1.452	1.2	1.771	1.2	1.999
1.32	1.592	1.32	2.171	1.32	2.422
1.44	1.7	1.44	2.515	1.44	2.791
1.56	1.776	1.56	2.798	1.56	3.101
1.68	1.822	1.68	3.02	1.68	3.349
1.8	1.839	1.8	3.186	1.8	3.53
1.92	1.828	1.92	3.296	1.92	3.647
2.04	1.79	2.04	3.354	2.04	3.704
2.16	1.726	2.16	3.357	2.16	3.702
2.28	1.64	2.28	3.309	2.28	3.644
2.4	1.533	2.4	3.211	2.4	3.533
2.52	1.407	2.52	3.068	2.52	3.376
2.64	1.265	2.64	2.888	2.64	3.178
2.76	1.113	2.76	2.676	2.76	2.946
2.88	0.954	2.88	2.439	2.88	2.682
3	0.789	3	2.179	3	2.392
3.12	0.618	3.12	1.898	3.12	2.08
3.24	0.442	3.24	1.602	3.24	1.753
3.36	0.264	3.36	1.298	3.36	1.415
3.48	0.084	3.48	0.99	3.48	1.066
3.6	-0.092	3.6	0.682	3.6	0.711
3.72	-0.263	3.72	0.37	3.72	0.357
3.84	-0.43	3.84	0.06	3.84	0.013
3.96	-0.589	3.96	-0.245	3.96	-0.324
4.08	-0.743	4.08	-0.538	4.08	-0.654
4.2	-0.885	4.2	-0.82	4.2	-0.974

Hasil Eksperimen Kondisi Tertambat					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
4.32	-1.017	4.32	-1.089	4.32	-1.276
4.44	-1.137	4.44	-1.344	4.44	-1.556
4.56	-1.245	4.56	-1.579	4.56	-1.815
4.68	-1.339	4.68	-1.792	4.68	-2.051
4.8	-1.417	4.8	-1.981	4.8	-2.258
4.92	-1.477	4.92	-2.148	4.92	-2.434
5.04	-1.519	5.04	-2.291	5.04	-2.577
5.16	-1.543	5.16	-2.406	5.16	-2.689
5.28	-1.548	5.28	-2.493	5.28	-2.77
5.4	-1.532	5.4	-2.549	5.4	-2.821
5.52	-1.494	5.52	-2.575	5.52	-2.836
5.64	-1.434	5.64	-2.567	5.64	-2.812
5.76	-1.354	5.76	-2.524	5.76	-2.748
5.88	-1.254	5.88	-2.444	5.88	-2.649
6	-1.136	6	-2.332	6	-2.517
6.12	-1	6.12	-2.188	6.12	-2.353
6.24	-0.85	6.24	-2.016	6.24	-2.155
6.36	-0.686	6.36	-1.811	6.36	-1.924
6.48	-0.515	6.48	-1.577	6.48	-1.662
6.6	-0.339	6.6	-1.317	6.6	-1.375
6.72	-0.16	6.72	-1.036	6.72	-1.065
6.84	0.018	6.84	-0.737	6.84	-0.74
6.96	0.192	6.96	-0.427	6.96	-0.408
7.08	0.361	7.08	-0.114	7.08	-0.075
7.2	0.519	7.2	0.195	7.2	0.252
7.32	0.665	7.32	0.496	7.32	0.569
7.44	0.79	7.44	0.781	7.44	0.87
7.56	0.895	7.56	1.049	7.56	1.148
7.68	0.979	7.68	1.291	7.68	1.399
7.8	1.042	7.8	1.504	7.8	1.619
7.92	1.082	7.92	1.679	7.92	1.802
8.04	1.096	8.04	1.814	8.04	1.945
8.16	1.087	8.16	1.909	8.16	2.049
8.28	1.056	8.28	1.968	8.28	2.109
8.4	1.004	8.4	1.985	8.4	2.128
8.52	0.934	8.52	1.963	8.52	2.107
8.64	0.848	8.64	1.9	8.64	2.047
8.76	0.747	8.76	1.801	8.76	1.95

Hasil Eksperimen Kondisi Tertambat					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
8.88	0.633	8.88	1.668	8.88	1.817
9	0.51	9	1.507	9	1.655
9.12	0.382	9.12	1.321	9.12	1.468
9.24	0.25	9.24	1.117	9.24	1.264
9.36	0.116	9.36	0.897	9.36	1.043
9.48	-0.018	9.48	0.668	9.48	0.811
9.6	-0.147	9.6	0.43	9.6	0.568
9.72	-0.266	9.72	0.195	9.72	0.326
9.84	-0.372	9.84	-0.039	9.84	0.088
9.96	-0.466	9.96	-0.26	9.96	-0.141
10.08	-0.547	10.08	-0.469	10.08	-0.358
10.2	-0.615	10.2	-0.659	10.2	-0.558
10.32	-0.671	10.32	-0.827	10.32	-0.738
10.44	-0.712	10.44	-0.973	10.44	-0.896
10.56	-0.742	10.56	-1.095	10.56	-1.03
10.68	-0.76	10.68	-1.195	10.68	-1.141
10.8	-0.768	10.8	-1.27	10.8	-1.228
10.92	-0.763	10.92	-1.317	10.92	-1.29
11.04	-0.749	11.04	-1.335	11.04	-1.326
11.16	-0.724	11.16	-1.331	11.16	-1.336
11.28	-0.693	11.28	-1.309	11.28	-1.323
11.4	-0.656	11.4	-1.273	11.4	-1.291
11.52	-0.616	11.52	-1.223	11.52	-1.246
11.64	-0.574	11.64	-1.162	11.64	-1.19
11.76	-0.53	11.76	-1.087	11.76	-1.124
11.88	-0.486	11.88	-1.003	11.88	-1.053
12	-0.44	12	-0.914	12	-0.976
12.12	-0.395	12.12	-0.826	12.12	-0.899
12.24	-0.351	12.24	-0.743	12.24	-0.82
12.36	-0.31	12.36	-0.665	12.36	-0.742
12.48	-0.272	12.48	-0.592	12.48	-0.666
12.6	-0.234	12.6	-0.52	12.6	-0.594
12.72	-0.193	12.72	-0.45	12.72	-0.524
12.84	-0.149	12.84	-0.38	12.84	-0.455
12.96	-0.105	12.96	-0.31	12.96	-0.387
13.08	-0.061	13.08	-0.239	13.08	-0.318
13.2	-0.016	13.2	-0.169	13.2	-0.25
13.32	0.031	13.32	-0.097	13.32	-0.181

Hasil Eksperimen Kondisi Tertambat					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
13.44	0.08	13.44	-0.025	13.44	-0.109
13.56	0.127	13.56	0.049	13.56	-0.034
13.68	0.174	13.68	0.125	13.68	0.043
13.8	0.22	13.8	0.201	13.8	0.119
13.92	0.266	13.92	0.278	13.92	0.195
14.04	0.31	14.04	0.355	14.04	0.269
14.16	0.349	14.16	0.43	14.16	0.342
14.28	0.381	14.28	0.501	14.28	0.411
14.4	0.404	14.4	0.568	14.4	0.473
14.52	0.421	14.52	0.628	14.52	0.531
14.64	0.431	14.64	0.68	14.64	0.581
14.76	0.435	14.76	0.721	14.76	0.622
14.88	0.428	14.88	0.749	14.88	0.651
15	0.41	15	0.764	15	0.667
15.12	0.382	15.12	0.764	15.12	0.666
15.24	0.344	15.24	0.747	15.24	0.652
15.36	0.296	15.36	0.712	15.36	0.621
15.48	0.241	15.48	0.66	15.48	0.575
15.6	0.179	15.6	0.593	15.6	0.51
15.72	0.111	15.72	0.509	15.72	0.432
15.84	0.038	15.84	0.41	15.84	0.341
15.96	-0.04	15.96	0.298	15.96	0.242
16.08	-0.118	16.08	0.178	16.08	0.135
16.2	-0.193	16.2	0.051	16.2	0.023
16.32	-0.263	16.32	-0.081	16.32	-0.094
16.44	-0.33	16.44	-0.219	16.44	-0.212
16.56	-0.39	16.56	-0.355	16.56	-0.327
16.68	-0.444	16.68	-0.485	16.68	-0.438
16.8	-0.487	16.8	-0.604	16.8	-0.541
16.92	-0.52	16.92	-0.711	16.92	-0.632
17.04	-0.541	17.04	-0.804	17.04	-0.707
17.16	-0.55	17.16	-0.884	17.16	-0.767
17.28	-0.546	17.28	-0.947	17.28	-0.81
17.4	-0.532	17.4	-0.991	17.4	-0.835
17.52	-0.506	17.52	-1.013	17.52	-0.84
17.64	-0.473	17.64	-1.013	17.64	-0.826
17.76	-0.431	17.76	-0.992	17.76	-0.793
17.88	-0.383	17.88	-0.951	17.88	-0.741

Hasil Eksperimen Kondisi Tertambat					
Uji Decay 1		Uji Decay 2		Uji Decay 3	
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
18	-0.327	18	-0.891	18	-0.671
18.12	-0.268	18.12	-0.815	18.12	-0.589
18.24	-0.204	18.24	-0.724	18.24	-0.496
18.36	-0.14	18.36	-0.624	18.36	-0.398
18.48	-0.078	18.48	-0.516	18.48	-0.292
18.6	-0.024	18.6	-0.406	18.6	-0.188
18.72	0.026	18.72	-0.293	18.72	-0.086
18.84	0.069	18.84	-0.183	18.84	0.009
18.96	0.107	18.96	-0.079	18.96	0.096
19.08	0.139	19.08	0.016	19.08	0.173
19.2	0.163	19.2	0.099	19.2	0.238
19.32	0.177	19.32	0.168	19.32	0.288
19.44	0.181	19.44	0.222	19.44	0.322
19.56	0.177	19.56	0.261	19.56	0.339
19.68	0.166	19.68	0.286	19.68	0.343
19.8	0.149	19.8	0.298	19.8	0.332
19.92	0.128	19.92	0.296	19.92	0.308
20.04	0.104	20.04	0.284	20.04	0.272
20.16	0.076	20.16	0.261	20.16	0.226
20.28	0.048	20.28	0.231	20.28	0.172
20.4	0.023	20.4	0.196	20.4	0.112
20.52	0.002	20.52	0.157	20.52	0.049
20.64	-0.015	20.64	0.115	20.64	-0.015
20.76	-0.029	20.76	0.074	20.76	-0.076
20.88	-0.041	20.88	0.033	20.88	-0.133
21	-0.052	21	-0.002	21	-0.183
21.12	-0.062	21.12	-0.03	21.12	-0.224
21.24	-0.066	21.24	-0.049	21.24	-0.256
21.36	-0.067	21.36	-0.062	21.36	-0.278
21.48	-0.063	21.48	-0.069	21.48	-0.289
21.6	-0.056	21.6	-0.07	21.6	-0.291
21.72	-0.047	21.72	-0.065	21.72	-0.284
21.84	-0.042	21.84	-0.056	21.84	-0.274
21.96	-0.039	21.96	-0.046	21.96	-0.26
22.08	-0.038	22.08	-0.035	22.08	-0.243
22.2	-0.038	22.2	-0.025	22.2	-0.224
22.32	-0.04	22.32	-0.018	22.32	-0.202
		22.44	-0.014	22.44	-0.182

**LAMPIRAN B**  
**TABULASI EKSPERIMEN**

Hasil Perhitungan Kondisi Free Floating Uji Decay 1, 2 dan 3

Kondisi Free Floating				
Periode Decay Test 1 Kondisi Free Floating (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	2.28	5.88	0.36	3.59
2	8.52	11.28	6.72	9.43
3	15.36	17.76	13.4	15.82

Periode Decay Test 2 Kondisi Free Floating (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	2.16	5.52	0.65	3.75
2	8.4	11.16	6.98	9.71
3	15	17.52	13.42	16.08

Periode Decay Test 3 Kondisi Free Floating (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	2.16	5.52	0.81	3.94
2	8.4	11.16	7.13	9.85
3	15	17.52	13.36	16.15

Decay 1 Free Floating			
Crests period	$\Delta T$	Troughs period	$\Delta T$
1 - 2	6.24	1 - 2	5.40
2 - 3	6.84	2 - 3	6.48
Rata-rata	6.54	Rata-rata	5.94

Zero-up Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.36
2 - 3	6.68
Rata-rata	6.52

Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	5.84
2 - 3	6.39
Rata-rata	6.12

### Decay 2 Free Floating

Crests period	$\Delta T$	Troughs period	$\Delta T$
1 - 2	6.24	1 - 2	5.64
2 - 3	6.60	2 - 3	6.36
Rata-rata	6.42	Rata-rata	6.00

Zero-up Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.33
2 - 3	6.44
Rata-rata	6.39

Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	5.96
2 - 3	6.37
Rata-rata	6.17

### Decay 3 Free Floating

Crests period	$\Delta T$	Troughs period	$\Delta T$
1 - 2	6.24	1 - 2	5.64
2 - 3	6.60	2 - 3	6.36
Rata-rata	6.42	Rata-rata	6.00

Zero-up Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.32
2 - 3	6.23
Rata-rata	6.28

Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	5.91
2 - 3	6.30
Rata-rata	6.11

### Decay 1 Free Floating

Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.54
Troughs period	5.94
Zero-up period	6.52
Zero-down period	6.12
Perode Natural Roll	6.28

### Decay 2 Free Floating

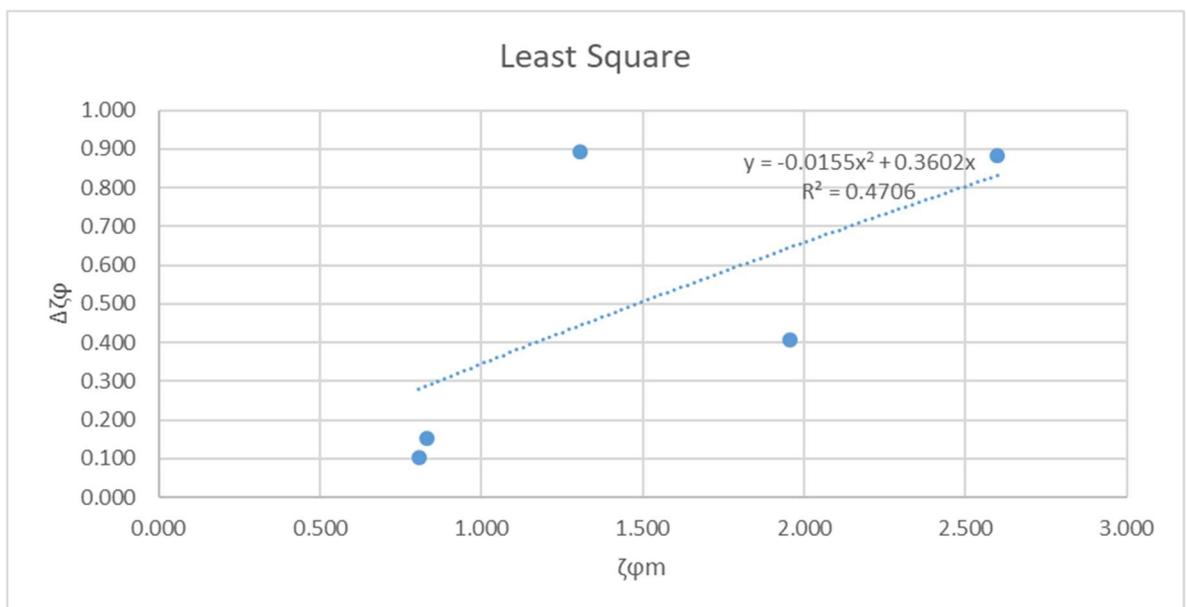
Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.42
Troughs period	6.00
Zero-up period	6.39
Zero-down period	6.17
Perode Natural Roll	6.24

### Decay 3 Free Floating

Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.42
Troughs period	6.00
Zero-up period	6.28
Zero-down period	6.11
Perode Natural Roll	6.20

### Decay 1 Free Floating

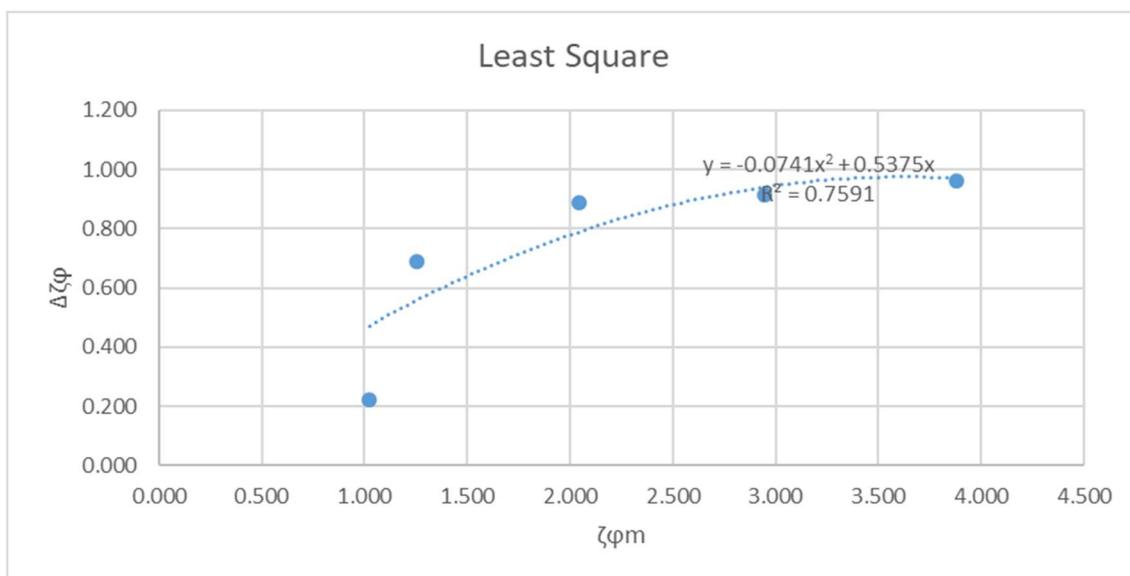
$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)	$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$\zeta\varphi_0$	3.042	$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.884	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	2.600
$\zeta\varphi_1$	2.158	$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.407	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	1.955
$\zeta\varphi_2$	1.751	$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.893	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	1.305
$\zeta\varphi_3$	0.858	$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.102	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	0.807
$\zeta\varphi_4$	0.756	$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.152	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	0.832
$\zeta\varphi_5$	0.908				



a	=	0.3602	
b	=	0.0155	
Tn	=	6.28	
$\Delta$	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	7.578.E+05	kN/(m/sec)
B2	=	3.839.E+04	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

#### Decay 2 Free Floating

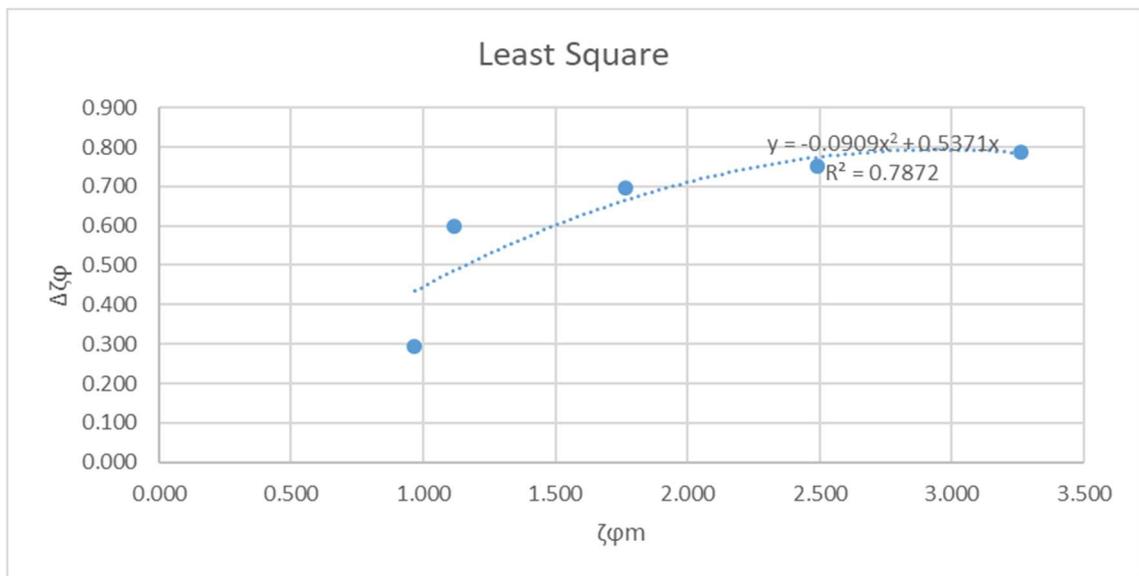
$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)	$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$\zeta\varphi_0$	4.362	$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.961	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	3.882
$\zeta\varphi_1$	3.401	$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.915	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	2.944
$\zeta\varphi_2$	2.486	$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.887	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	2.043
$\zeta\varphi_3$	1.599	$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.688	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	1.255
$\zeta\varphi_4$	0.911	$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.223	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	1.023
$\zeta\varphi_5$	1.134				



a	=	0.5375	
b	=	0.0741	
Tn	=	6.24	
$\Delta$	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	1.124.E+06	kN/(m/sec)
B2	=	1.814.E+05	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

Decay 3 Free Floating

$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)	$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$\zeta\varphi_0$	3.654	$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.788	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	3.260
$\zeta\varphi_1$	2.866	$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.751	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	2.491
$\zeta\varphi_2$	2.115	$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.697	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	1.767
$\zeta\varphi_3$	1.418	$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.599	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	1.119
$\zeta\varphi_4$	0.819	$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.295	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	0.967
$\zeta\varphi_5$	1.114				



a	=	0.5371	
b	=	0.0909	
Tn	=	6.20	
$\Delta$	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	1.116.E+06	kN/(m/sec)
B2	=	2.195.E+05	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

Hasil Perhitungan Kondisi Tertambat Uji Decay 1, 2 dan 3

Kondisi Tertambat				
Periode Decay Test 1 Kondisi Tertambat (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	1.8	5.28	0.46	3.53
2	8.04	10.8	6.83	9.46
3	14.76	17.16	13.24	15.9

Periode Decay Test 2 Kondisi Tertambat (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	2.16	5.52	0.77	3.85
2	8.4	11.04	7.13	9.81
3	15.12	17.64	13.49	16.23

Periode Decay Test 3 Kondisi Tertambat (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	2.16	5.52	0.74	3.84
2	8.4	11.16	7.08	9.88
3	15	17.52	13.62	16.22

Decay 1 Tertambat			
Crests period	$\Delta T$	Troughs period	$\Delta T$
1 - 2	6.24	1 - 2	5.52
2 - 3	6.72	2 - 3	6.36
Rata-rata	6.48	Rata-rata	5.94

Zero-up Crossing period	$\Delta T$	Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.37	1 - 2	5.93
2 - 3	6.41	2 - 3	6.44
Rata-rata	6.39	Rata-rata	6.19

### Decay 2 Tertambat

Crests period	$\Delta T$
1 - 2	6.24
2 - 3	6.72
Rata-rata	6.48

Troughs period	$\Delta T$
1 - 2	5.52
2 - 3	6.60
Rata-rata	6.06

Zero-up Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.36
2 - 3	6.36
Rata-rata	6.36

Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	5.96
2 - 3	6.42
Rata-rata	6.19

### Decay 3 Tertambat

Crests period	$\Delta T$
1 - 2	6.24
2 - 3	6.60
Rata-rata	6.42

Troughs period	$\Delta T$
1 - 2	5.64
2 - 3	6.36
Rata-rata	6.00

Zero-up Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.34
2 - 3	6.54
Rata-rata	6.44

Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.04
2 - 3	6.34
Rata-rata	6.19

### Decay 1 Tertambat

Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.48
Troughs period	5.94
Zero-up period	6.39
Zero-down period	6.19
Perode Natural Roll	6.25

### Decay 2 Tertambat

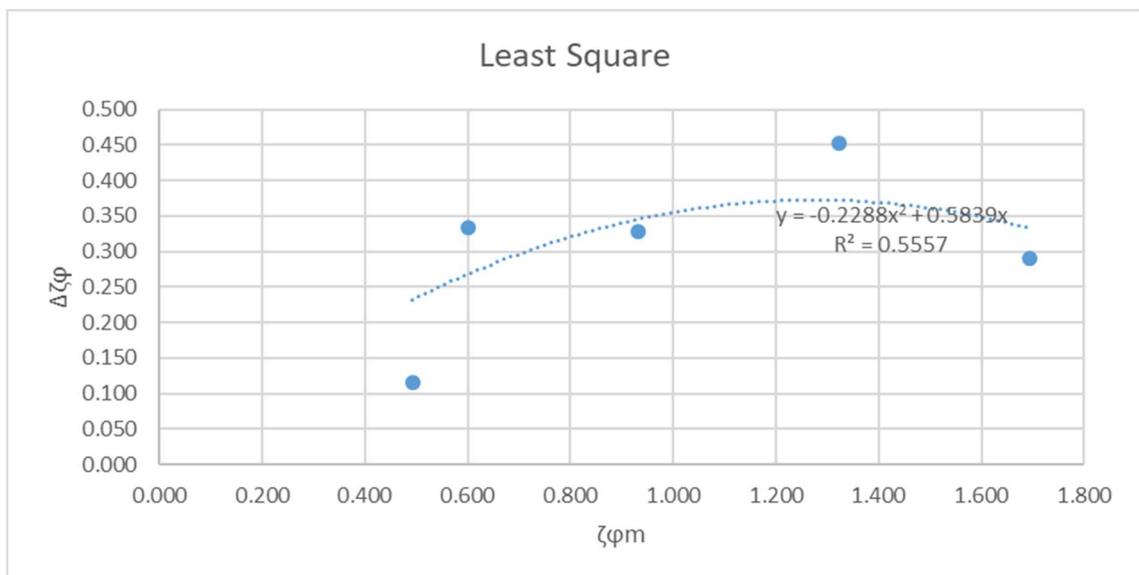
Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.48
Troughs period	6.06
Zero-up period	6.36
Zero-down period	6.19
Perode Natural Roll	6.27

### Decay 3 Tertambat

Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.42
Troughs period	6.00
Zero-up period	6.44
Zero-down period	6.19
Perode Natural Roll	6.26

### Decay 1 Tertambat

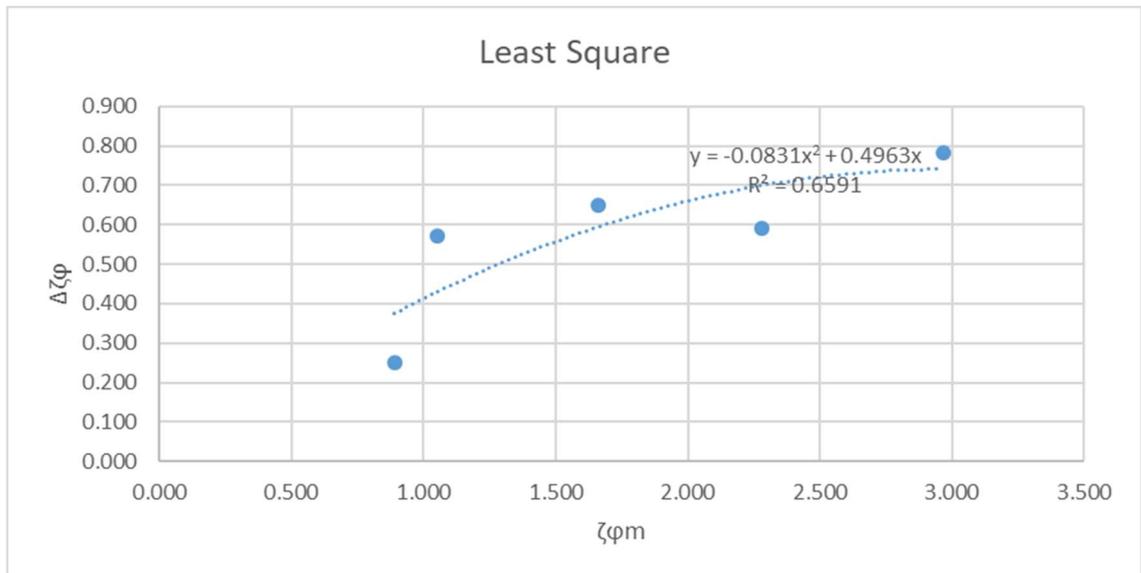
$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)	$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$\zeta\varphi_0$	1.839	$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.291	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	1.694
$\zeta\varphi_1$	1.548	$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.452	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	1.322
$\zeta\varphi_2$	1.096	$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.328	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	0.932
$\zeta\varphi_3$	0.768	$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.333	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	0.602
$\zeta\varphi_4$	0.435	$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.115	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	0.493
$\zeta\varphi_5$	0.550				



a	=	0.5839	
b	=	0.2288	
Tn	=	6.25	
$\Delta$	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	1.223.E+06	kN/(m/sec)
B2	=	5.613.E+05	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

#### Decay 2 Tertambat

$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)	$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$\zeta\varphi_0$	3.357	$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.782	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	2.966
$\zeta\varphi_1$	2.575	$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.590	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	2.280
$\zeta\varphi_2$	1.985	$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.650	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	1.660
$\zeta\varphi_3$	1.335	$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.571	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	1.050
$\zeta\varphi_4$	0.764	$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.249	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	0.889
$\zeta\varphi_5$	1.013				

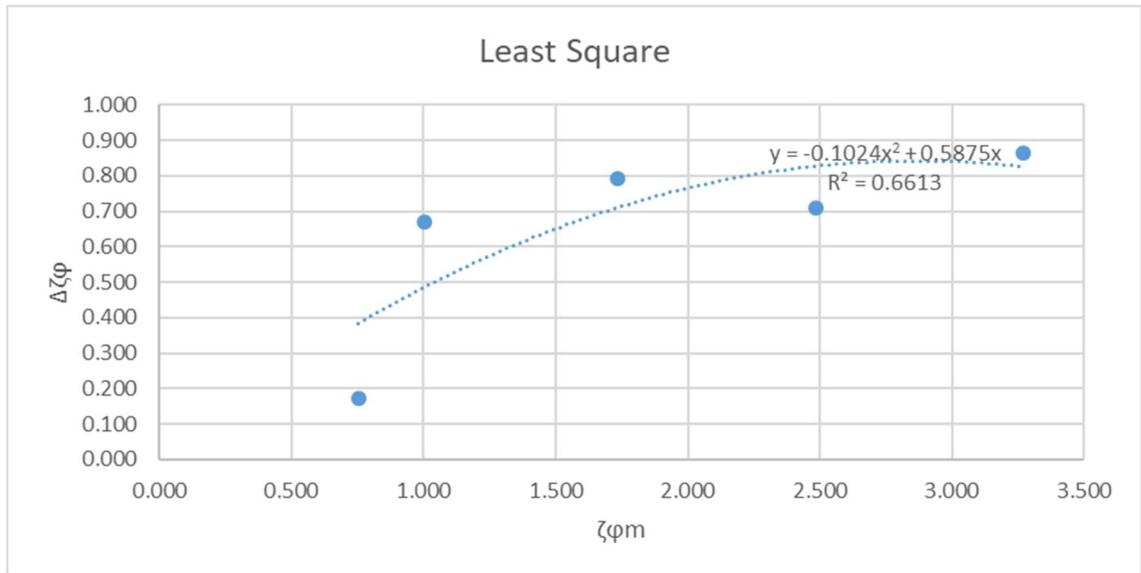


a	=	0.4963	
b	=	0.0831	
Tn	=	6.27	
$\Delta$	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	1.043.E+06	kN/(m/sec)
B2	=	2.054.E+05	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

Decay 3 Tertambat

$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)
$\zeta\varphi_0$	3.702
$\zeta\varphi_1$	2.836
$\zeta\varphi_2$	2.128
$\zeta\varphi_3$	1.336
$\zeta\varphi_4$	0.667
$\zeta\varphi_5$	0.840

$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.866	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	3.269
$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.708	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	2.482
$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.792	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	1.732
$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.669	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	1.002
$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.173	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	0.754



a	=	0.5875	
b	=	0.1024	
Tn	=	6.26	
$\Delta$	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	1.233.E+06	kN/(m/sec)
B2	=	2.523.E+05	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

**LAMPIRAN C**

**DATA HASIL DECAY PADA MOSES**

### Hasil Decay Pada Moses

Numeris Decay Kondisi Free Floating			
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
0	-3.8	-0.15	-3.8
0.3	-3.38	0	-3.38
0.6	-2.76	0.45	-2.76
0.9	-1.9	0.75	-1.9
1.2	-0.91	1.05	-0.91
1.5	0.14	1.35	0.14
1.8	1.12	1.65	1.12
2.1	1.97	1.95	1.97
2.4	2.59	2.25	2.59
2.7	2.96	2.55	2.96
3	3.04	2.85	3.04
3.3	2.84	3.15	2.84
3.6	2.39	3.45	2.39
3.9	1.74	3.75	1.74
4.2	0.96	4.05	0.96
4.5	0.14	4.35	0.14
4.8	-0.65	4.65	-0.65
5.1	-1.32	4.95	-1.32
5.4	-1.83	5.25	-1.83
5.7	-2.14	5.55	-2.14
6	-2.24	5.85	-2.24
6.3	-2.12	6.15	-2.12
6.6	-1.83	6.45	-1.83
6.9	-1.39	6.75	-1.39
7.2	-0.87	7.05	-0.87
7.5	-0.31	7.35	-0.31
7.8	0.24	7.65	0.24
8.1	0.72	7.95	0.72
8.4	1.11	8.25	1.11
8.7	1.39	8.55	1.39
9	1.54	8.85	1.54
9.3	1.55	9.15	1.55
9.6	1.44	9.45	1.44
9.9	1.21	9.75	1.21
10.2	0.89	10.05	0.89
10.5	0.51	10.35	0.51
10.8	0.1	10.65	0.1
11.1	-0.31	10.95	-0.31
11.4	-0.68	11.25	-0.68
11.7	-0.97	11.55	-0.97
12	-1.17	11.85	-1.17

Numeris Decay Kondisi Tertambat			
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
0	-3.5	0	-3.5
0.3	-3.1	0.3	-3.1
0.6	-2.5	0.6	-2.5
0.9	-1.68	0.9	-1.68
1.2	-0.73	1.2	-0.73
1.5	0.25	1.5	0.25
1.8	1.16	1.8	1.16
2.1	1.92	2.1	1.92
2.4	2.46	2.4	2.46
2.7	2.74	2.7	2.74
3	2.74	3	2.74
3.3	2.48	3.3	2.48
3.6	2	3.6	2
3.9	1.37	3.9	1.37
4.2	0.65	4.2	0.65
4.5	-0.07	4.5	-0.07
4.8	-0.72	4.8	-0.72
5.1	-1.24	5.1	-1.24
5.4	-1.61	5.4	-1.61
5.7	-1.8	5.7	-1.8
6	-1.8	6	-1.8
6.3	-1.64	6.3	-1.64
6.6	-1.35	6.6	-1.35
6.9	-0.95	6.9	-0.95
7.2	-0.5	7.2	-0.5
7.5	-0.04	7.5	-0.04
7.8	0.39	7.8	0.39
8.1	0.76	8.1	0.76
8.4	1.04	8.4	1.04
8.7	1.22	8.7	1.22
9	1.28	9	1.28
9.3	1.24	9.3	1.24
9.6	1.1	9.6	1.1
9.9	0.86	9.9	0.86
10.2	0.57	10.2	0.57
10.5	0.24	10.5	0.24
10.8	-0.11	10.8	-0.11
11.1	-0.43	11.1	-0.43
11.4	-0.7	11.4	-0.7
11.7	-0.9	11.7	-0.9
12	-1.01	12	-1.01

Numeris Decay Kondisi Free Floating			
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
12.3	-1.26	12.15	-1.26
12.6	-1.24	12.45	-1.24
12.9	-1.09	12.75	-1.09
13.2	-0.85	13.05	-0.85
13.5	-0.54	13.35	-0.54
13.8	-0.19	13.65	-0.19
14.1	0.18	13.95	0.18
14.4	0.51	14.25	0.51
14.7	0.78	14.55	0.78
15	0.97	14.85	0.97
15.3	1.06	15.15	1.06
15.6	1.04	15.45	1.04
15.9	0.92	15.75	0.92
16.2	0.71	16.05	0.71
16.5	0.45	16.35	0.45
16.8	0.16	16.65	0.16
17.1	-0.13	16.95	-0.13
17.4	-0.38	17.25	-0.38
17.7	-0.58	17.55	-0.58
18	-0.71	17.85	-0.71
18.3	-0.76	18.15	-0.76
18.6	-0.74	18.45	-0.74
18.9	-0.65	18.75	-0.65
19.2	-0.51	19.05	-0.51
19.5	-0.33	19.35	-0.33
19.8	-0.13	19.65	-0.13
20.1	0.06	19.95	0.06
20.4	0.23	20.25	0.23
20.7	0.37	20.55	0.37
21	0.46	20.85	0.46
21.3	0.52	21.15	0.52
21.6	0.53	21.45	0.53
21.9	0.5	21.75	0.5
22.2	0.43	22.05	0.43
22.5	0.33	22.35	0.33
22.8	0.2	22.65	0.2
23.1	0.07	22.95	0.07

Numeris Decay Kondisi Free Floating			
T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)	T(s)	$\zeta\varphi$ (deg)
12.3	-1.02	12.3	-1.02
12.6	-0.93	12.6	-0.93
12.9	-0.75	12.9	-0.75
13.2	-0.51	13.2	-0.51
13.5	-0.23	13.5	-0.23
13.8	0.06	13.8	0.06
14.1	0.31	14.1	0.31
14.4	0.52	14.4	0.52
14.7	0.65	14.7	0.65
15	0.69	15	0.69
15.3	0.66	15.3	0.66
15.6	0.55	15.6	0.55
15.9	0.39	15.9	0.39
16.2	0.2	16.2	0.2
16.5	-0.01	16.5	-0.01
16.8	-0.21	16.8	-0.21
17.1	-0.38	17.1	-0.38
17.4	-0.5	17.4	-0.5
17.7	-0.57	17.7	-0.57
18	-0.58	18	-0.58
18.3	-0.53	18.3	-0.53
18.6	-0.44	18.6	-0.44
18.9	-0.31	18.9	-0.31
19.2	-0.17	19.2	-0.17
19.5	-0.03	19.5	-0.03
19.8	0.1	19.8	0.1
20.1	0.2	20.1	0.2
20.4	0.28	20.4	0.28
20.7	0.32	20.7	0.32
21	0.33	21	0.33
21.3	0.31	21.3	0.31
21.6	0.27	21.6	0.27
21.9	0.21	21.9	0.21
22.2	0.14	22.2	0.14
22.5	0.07	22.5	0.07
22.8	-0.01	22.8	-0.01
23.1	-0.09	23.1	-0.09

**LAMPIRAN D**

**TABULASI HASIL DECAY PADA MOSES**

## Hasil Perhitungan Kondisi Free Floating

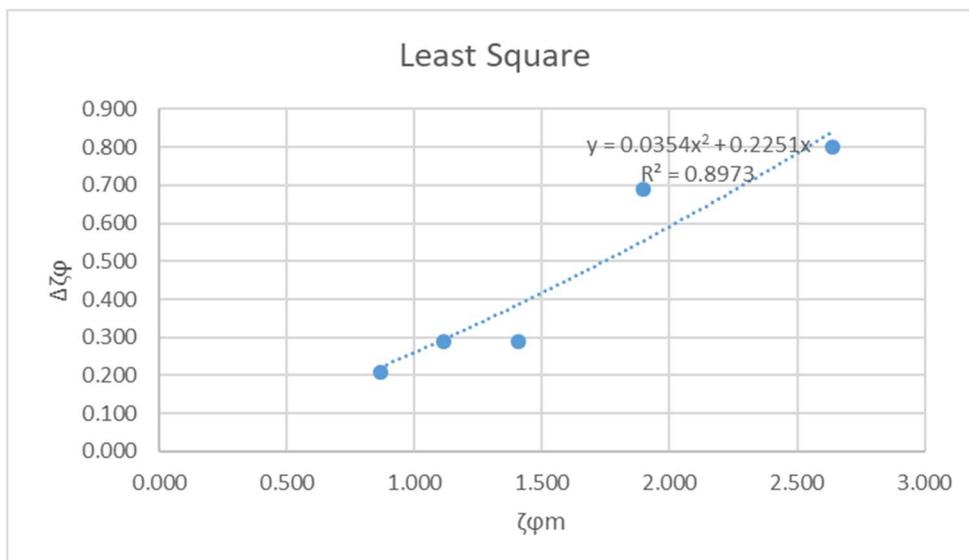
Kondisi Free Floating				
Periode Decay Test 1 Kondisi Free Floating (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	3	6	1.47	4.55
2	9.3	12.3	7.65	10.87
3	15	18.3	13.93	16.97

Decay 1 Free Floating			
Crests period	$\Delta T$	Troughs period	$\Delta T$
1 - 2	6.30	1 - 2	6.30
2 - 3	5.70	2 - 3	6.00
Rata-rata	6.00	Rata-rata	6.15

Zero-up Crossing period	$\Delta T$	Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.18	1 - 2	6.32
2 - 3	6.28	2 - 3	6.10
Rata-rata	6.23	Rata-rata	6.21

Decay 1 Free Floating	
Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.00
Troughs period	6.15
Zero-up period	6.23
Zero-down period	6.21
Periode Natural Roll	6.15

Decay 1 Free Floating					
$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)	$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$\zeta\varphi_0$	3.040	$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.800	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	2.640
$\zeta\varphi_1$	2.240	$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.690	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	1.895
$\zeta\varphi_2$	1.550	$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.290	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	1.405
$\zeta\varphi_3$	1.260	$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.290	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	1.115
$\zeta\varphi_4$	0.970	$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.210	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	0.865
$\zeta\varphi_5$	0.760				



a	=	0.2251	
b	=	0.0354	
Tn	=	6.28	
Δ	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	4.736.E+05	kN/(m/sec)
B2	=	8.768.E+04	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

### Hasil Perhitungan Kondisi Tertambat

Kondisi Tertambat				
Periode Decay Test 1 Kondisi Tertambat (s)				
Periode	Crests Period	Troughs Period	Zero-up Crossing Period	Zero-down Crossing Period
1	3	6	1.41	4.47
2	9	12.3	7.51	10.71
3	15	18.3	13.72	16.49

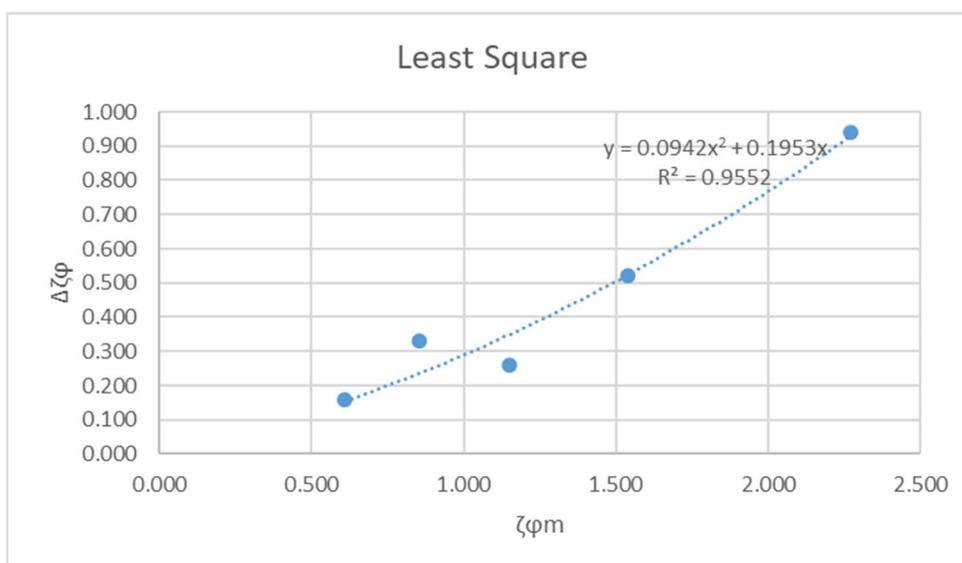
Decay 1 Tertambat			
Crests period	ΔT	Troughs period	ΔT
1 - 2	6.00	1 - 2	6.30
2 - 3	6.00	2 - 3	6.00
Rata-rata	6.00	Rata-rata	6.15

Zero-up Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.10
2 - 3	6.21
Rata-rata	6.16

Zero-down Crossing period	$\Delta T$
1 - 2	6.24
2 - 3	5.78
Rata-rata	6.01

Decay 1 Tertambat	
Keterangan	Rata-Rata Periode
Crests period	6.00
Troughs period	6.15
Zero-up period	6.16
Zero-down period	6.01
Periode Natural Roll	6.08

Decay 1 Tertambat					
$\zeta\varphi$	$\zeta\varphi$ (deg)	$\Delta\zeta\varphi$	Hasil	$\zeta\varphi_m$	Hasil
$\zeta\varphi_0$	2.740	$ \zeta\varphi_0 - \zeta\varphi_1 $	0.940	$ \zeta\varphi_0 + \zeta\varphi_1 /2$	2.270
$\zeta\varphi_1$	1.800	$ \zeta\varphi_1 - \zeta\varphi_2 $	0.520	$ \zeta\varphi_1 + \zeta\varphi_2 /2$	1.540
$\zeta\varphi_2$	1.280	$ \zeta\varphi_2 - \zeta\varphi_3 $	0.260	$ \zeta\varphi_2 + \zeta\varphi_3 /2$	1.150
$\zeta\varphi_3$	1.020	$ \zeta\varphi_3 - \zeta\varphi_4 $	0.330	$ \zeta\varphi_3 + \zeta\varphi_4 /2$	0.855
$\zeta\varphi_4$	0.690	$ \zeta\varphi_4 - \zeta\varphi_5 $	0.160	$ \zeta\varphi_4 + \zeta\varphi_5 /2$	0.610
$\zeta\varphi_5$	0.530				



a	=	0.1953	
b	=	0.0942	
Tn	=	6.25	
$\Delta$	=	8646	ton
GM	=	38.95	m
g	=	9.81	m/s <sup>2</sup>
K	=	3303632.277	kN/m
B1	=	4.089.E+05	kN/(m/sec)
B2	=	2.311.E+05	kN/(m <sup>2</sup> /sec <sup>2</sup> )

## BIODATA PENULIS



Muhamad Fadkhurrohman Aziz merupakan putra kedua dari Sumajid dan Mulyanah yang lahir di Blitar pada 25 September 1997. Pada masa pendidikan, penulis menempuh pendidikan formal di MIN 7 Blitar, MTsN 1 Blitar dan SMAN 1 Srengat, Kabupaten Blitar. Setelah lulus SMA pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan dan diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan organisasi. Pada periode tahun 2017/2018 penulis aktif pada organisasi HIMATEKLA FTK ITS sebagai staff Departemen Minat dan Bakat. Kemudian pada periode tahun 2019 penulis diamanahi sebagai ketua Departemen Olahraga dan Kesenian HIMATEKLA FTK ITS. Selama menjadi mahasiswa Departemen Teknik Kelautan, penulis sangat aktif mengikuti beberapa kejuaraan yang diadakan oleh ITS, seperti IFC (*ITS Futsal Championship*). Kemudian pada tahun 2019 penulis juga berkesempatan melaksanakan kerja praktek selama dua bulan di Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (PHE ONWJ) pada divisi *Pipeline Repair and Replacement Project* (PRRP). Di tahun terakhir penulis menjadi pengurus dari Laboratorium Desain dan Konstruksi Bangunan Laut (DCOS). Dengan beberapa teman, penulis mengerjakan tugas akhir eksperimen dengan tema studi eksperimen pada sebuah struktur *floating crane catamaran*.

Email : [fadkhurrohman97aziz@gmail.com](mailto:fadkhurrohman97aziz@gmail.com)