



TUGAS AKHIR – MO 184804

**STUDI EKSPERIMEN ANALISIS HEAVE DAMPING PADA SPAR
AKIBAT PENAMBAHAN HEAVE PLATE DI KEEL**

Fikri Ardhanutama

NRP. 04311540000110

Dosen Pembimbing :

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

Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.

Baharuddin Ali S.T., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2019



FINAL PROJECT – MO 184804

**EXPERIMENTAL STUDY OF HEAVE DAMPING ANALYSIS DUE
TO HEAVE PLATE ADDITIONS AT SPAR KEEL**

Fikri Ardhanutama

NRP. 04311540000110

Supervisors :

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

Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.

Baharuddin Ali S.T., M.Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2019

**Studi Eksperimen Analisis *Heave Damping* Pada SPAR
Akibat Penambahan *Heave Plate* di Keel**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana
Teknik Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Fikri Ardhianutama

NRP. 04311540000110

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. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., MT (Penguji 1)
5. Dr. Eng. Shade Rahmawati, S.T., M.T. (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2019

Studi Eksperimen Analisis *Heave Damping* Pada SPAR Akibat Penambahan *Heave Plate di Keel*

Nama : Fikri Ardhianutama
NRP : 04311540000110
Departemen : Teknik Kelautan FTK -ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.
Baharuddin Ali S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Studi pada penelitian tugas akhir ini merupakan studi eksperimen *free decay test* pada SPAR, dengan uji coba bagaimana pengaruh adanya penambahan *heave plate* di *keel* terhadap *heave damping*. Kegiatan eksperimen dikerjakan di Kolam *Maneuvering Ocean Engineering Basin*, Balai Teknologi Hidrodinamika - BPPT. Model SPAR yang dibuat mengikuti model *Classic SPAR* dengan skala 1:125. Sistem tambat yang digunakan pada model SPAR ini adalah tipe *taut* dengan konfigurasi 4 tali identik. Uji coba eksperimen yang dikerjakan hanyalah uji coba *heave decay test*, sehingga gerakan yang diteliti pada eksperimen kali ini hanyalah gerakan *heave*. *Heave plate* yang digunakan untuk eksperimen memiliki rasio diameter sebesar 1.3x dari diameter model SPAR. Analisis yang dilakukan setelah uji coba eksperimen adalah membandingkan hasil eksperimen dengan perhitungan analitis dan menggunakan *Strip Theory*. Hasil dari eksperimen tersebut menyatakan bahwa adanya *heave plate* pada *keel* SPAR dapat menambah besarnya *heave damping* hingga 49 %. Begitu juga dengan analisis metode analitis dan *Strip Theory* yang hasilnya tidak terpaut jauh dari nilai hasil eksperimen dimana terjadi peningkatan nilai *heave damping* hingga 54 %. Selain menimbang komponen redaman, analisis yang dikerjakan juga berpengaruh terhadap komponen massa tambah. Baik dari hasil eksperimen, analitis, maupun *Strip Theory* menyimpulkan bahwa *heave plate* pada SPAR dapat menambah besarnya *heave added mass* hingga 77 %.

Kata Kunci: SPAR, *damping*, *heave plate*, *added mass*

Experimental Study of Heave Damping Analysis Due To Heave Plate Additions At Keel SPAR

Name : Fikri Ardhianutama
NRP : 04311540000110
Department : Ocean Engineering FTK -ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Ir. Murdjito, M.Sc.Eng.
Baharuddin Ali S.T., M.Eng.

ABSTRACT

Study in this thesis is a free decay test's experiment of SPAR, how the impact of heave damping due to heave plate addition at keel. The experiment was doing at Maneuvering Ocean Engineering Basin, Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. The SPAR model refer to the model of Classic SPAR with 1:125 scale. Mooring system which used in the SPAR model is taut type with 4-mooring identical configuration. This experiment is only do the heave decay test, so the motion which is researched is only a heave motion. The heave plate which is used for the experiment has a 1.3 diameter ratio of SPAR model diameter. Analyses was doing after the experiment are comparing experiment result with the analytical and Strip Theory calculation. The experiment result claim that heave plate addition at the SPAR's keel can increase heave damping up to 49 %. Likewise the results of analytical and Strip Theory method is close to the experiment result that it happened an increase of *heave damping* up to 54 %. Not only consider the damping component, but the analysis of an added mass is also investigated. The results of experimental, analytical, and Strip Theory analysis conclude a *heave plate* of SPAR can increase a heave added mass value up to 77%.

Keywords: SPAR, *damping*, *heave plate*, *added mass*

KATA PENGANTAR

Pertama-tama penulis mengucapkan rasa puji syukur atas kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, karena atas ridho dan karunia yang diberikan oleh-Nya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Studi Eksperimen Analisis *Heave Damping* pada SPAR Akibat Penambahan *Heave Plate* di *Keel*”.

Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat penting bagi penulis dalam menyelesaikan studi perkuliahan serta memperoleh gelar sarjana (S-1) dari Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Secara umum, penelitian tugas akhir ini melakukan studi eksperimen *free decay test* untuk gerakan *heave* dengan analisis pengaruh adanya penambahan *heave plate* pada *keel* SPAR. 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 bagi tugas akhir ini agar menjadi lebih baik lagi. Begitu pula dengan tugas akhir ini semoga memberikan banyak manfaat kedepannya.

Surabaya

Juli 2019

Fikri Ardhanutama

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyusunan tugas akhir ini penulis susun atas dukungan, bimbingan, bantuan, dan do'a dari beberapa pihak. Dalam kesempatan ini penulis tidak bisa menyebutkan seluruh pihak yang telah membantu. Namun tanpa dukungan mereka, penulis yakin bahwa akan banyak kesulitan yang dialami dalam proses penelitian tugas akhir ini. Ungkapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang selalu rutin mendoakan dan memberi dukungan atas keberlangsungan pengerjaan tugas akhir ini.
2. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. dan Ir. Murdjito, M.Sc.Eng selaku dosen pembimbing kami yang selalu memberikan banyak masukan dan ilmu terhadap penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Baharuddin Ali, S.T., M.Eng. selaku pembimbing kami di Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT yang selalu memberikan kontribusi berupa masukan dan bantuan-bantuan dalam tugas akhir kami. Serta seluruh karyawan BTH yang telah banyak membantu eksperimen tugas akhir kami.
4. Teman-teman seperjuangan tugas akhir eksperimen SPAR tahun ini; Hanif, Gilrandi, dan Brian yang selalu saling membantu satu sama lain mulai dari awal sampai akhir penyusunan tugas akhir kami. Semua hambatan dan rintangan terasa sangat ringan atas bantuan mereka semua.
5. Teman-teman pengurus Laboratorium Hidrodinamika – FTK ITS yang selalu menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
6. Seluruh teman-teman ITS TV yang selalu memberikan motivasi penuh di kantor kepada penulis selama 4 tahun ini.

DAFTAR ISI

COVER.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Manfaat	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori.....	8
2.2.1 SPAR Platform	8
2.2.2 Beban Hidrodinamik.....	10
2.2.3 Teori Gerak Bangunan Apung	10
2.2.4 Gaya Reaksi	11
2.2.5 Gaya Eksitasi	13
2.2.6 Persamaan Gerak Bangunan Apung	15
2.2.7 Added Mass	22
2.2.8 Damping.....	23
2.2.9 Free Decay Test	23
2.2.10 Linear and Quadratic Damping.....	25

2.2.11	Teori Pemodelan.....	27
2.2.12	Strip Theory	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		33
3.1	Diagram Alir Penelitian	33
3.2	Prosedur Penelitian.....	35
3.2.1	Studi Literatur	35
3.2.2	Persiapan dan Analisis Pemodelan	36
3.2.3	Perancangan Model.....	36
3.2.4	Persiapan Instrumen Laboratorium.....	39
3.2.5	Pengujian Model	41
3.2.6	Pengolahan Data	41
3.2.7	Perhitungan Analitis	41
3.2.8	Perhitungan Strip Theory.....	41
3.2.9	Analisis dan Perbandingan Hasil Studi Analisis.....	42
3.2.10	Kesimpulan	42
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....		43
4.1	Pemodelan Struktur	43
4.1.1	Distribusi Massa	46
4.1.2	Kalibrasi KG	46
4.1.3	Kalibrasi jari-jari girasi	47
4.2	Pemodelan Kekakuan Sistem Tali Tambat	47
4.3	Data dan Properti SPAR Keseluruhan	52
4.4	Instrumen Pengukuran	52
4.4.1	Kalibrasi Perangkat Qualysis Motion Capture Camera.....	53
4.5	Analisis Metode Ekperimen.....	53
4.5.1	Analisis Eksperimen Free Decay Test	54
4.5.2	Respon Redaman Struktur	61
4.5.3	Gaya Reaksi Struktur	63
4.6	Analisis Metode Analitis.....	65
4.6.1	Massa Tambah	65
4.6.2	Damping.....	65
4.6.3	Periode Natural	65

4.6.4	Kekakuan	66
4.7	Analisis Metode Strip Theory	66
4.8	Perbandingan Hasil Studi Analisis	68
4.8.1	Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis.....	68
4.8.2	Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Strip Theory.....	68
4.8.3	Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis dan Strip Theory.....	71
BAB V PENUTUP		72
5.1	Kesimpulan	72
5.2	Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA		74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Jenis-Jenis SPAR Platform	2
Gambar 1.2	Konfigurasi SPAR Dengan Heave Plate.....	4
Gambar 2.1	Gambaran Truss SPAR Dan Classic SPAR	9
Gambar 2.2	Ilustarsi Gerakan 6 Derajat Kebebasan Pada SPAR Platform	11
Gambar 2.3	Gerakan Osilasi Bebas Teredam Akibat Eksitasi Harmonik	17
Gambar 2.4	Sudut Fase Antara Elevasi Gerakan Heave Dengan Gelombang	19
Gambar 2.5	Respons Sistem Massa-Pegas Akibat Gaya Harmonik Eksternal.....	21
Gambar 2.6	Sudut Fase Respon Terhadap Sumber Eksitasi.....	21
Gambar 2.7	Hasil Pengujian Free Decay Test	24
Gambar 2.8	P-Q Analisis Dari Decay Test.....	27
Gambar 2.9	Penentuan Logarithmic Decrement.....	32
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 3.2	Rancang Model SPAR Dengan Heave Plate Tampak Samping	37
Gambar 3.3	Model SPAR Dengan Heave Plate Tampak Atas	38
Gambar 3.4	Konfigurasi Sistem Tambat Tampak Atas Dan Samping	38
Gambar 3.5	Qualysis Motion Capture Camera.....	40
Gambar 3.6	Passive Markers	40
Gambar 3.7	Calibration Kit	40

Gambar 4.1 Model Mini SPAR Dengan Topside Dan Heave Plate	44
Gambar 4.2 Silinder Besi Dan Ulir Untuk Memodelkan Ballast	44
Gambar 4.3 Konfigurasi Ballast	45
Gambar 4.4 Proses Kalibrasi KG.....	46
Gambar 4.5 Konfigurasi Model Tali Tambat	48
Gambar 4.6 Kalibrasi Kekakuan Tali Tambat	48
Gambar 4.7 Qualysis Motion Capture Camera Yang Telah Dipasang.....	53
Gambar 4.8 Konfigurasi Instalasi SPAR Dan Alat Perekam.....	54
Gambar 4.9 Model SPAR Tertambat Dengan Passive Markers	54
Gambar 4.10 Model SPAR Tertambat Tampak Dari Bawah Air	55
Gambar 4.11 Grafik Free Decay Model SPAR Sebelum Diskalakan	55
Gambar 4.12 Grafik Free Decay Model SPAR + Heave Plate Sebelum Diskalakan	56
Gambar 4.13 Ketidakhulusan Uji Coba 1 Pada Grafik Hasil Free Decay Test	57
Gambar 4.14 Grafik Heave Decay SPAR Dengan Dan Tanpa Heave Plate	58
Gambar 4.15 Grafik Perubahan Heave Damping	59
Gambar 4.16 Perubahan Koefisien Linear Dan Quadratic Heave Damping	60
Gambar 4.17 Respon Sistem Massa-Pegas SPAR.....	61
Gambar 4.18 Grafik Sudut Fase Respon SPAR Terhadap Sumber Eksitasi	62
Gambar 4.19 Gaya Reaksi Heave SPAR	64
Gambar 4.20 Gaya Reaksi Heave SPAR + Heave Plate.....	64
Gambar 4.21 Grafik Heave Decay Hasil Perhitungan Strip Theory.....	67
Gambar 4.22 Grafik Decay SPAR Perbandingan Eksperimen Dan Strip Theory.	69
Gambar 4.23 Grafik Decay SPAR + Heave Plate Perbandingan Eksperimen Dan Strip Theory	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder	12
Tabel 2.2 Model to Prototype Commonly Used in Froude Scaling	29
Tabel 3.1 Dimensi Mini SPAR.....	35
Tabel 3.2 Data Kolam MOB BTH - BPPT.....	36
Tabel 4.1 Hasil Skala Menggunakan Aturan Froude	43
Tabel 4.2 Spesifikasi Komponen Ballast.....	45
Tabel 4.3 Perhitungan Massa Total Model.....	46
Tabel 4.4 Jari-Jari Girasi Model.....	47
Tabel 4.5 Hasil Kalibrasi Kekakuan Model Tali Tambat.....	49
Tabel 4.6 Hasil Penskalaan Kekakuan Karet	49
Tabel 4.7 Kekakuan Wire Sling Model Eksperimen dan Full Scale	50
Tabel 4.8 Kekakuan Tali Tambat Gabungan.....	50
Tabel 4.9 Panjang Tali Tambat Pre – Tension	51
Tabel 4.10 Kekakuan Total Heave Tali Tambat	52
Tabel 4.11 Data dan Properti SPAR Keseluruhan.....	52
Tabel 4.12 Amplitudo Puncak Decay SPAR Model	56
Tabel 4.13 Amplitudo Puncak Decay SPAR + Heave Plate Model.....	57
Tabel 4.14 Amplitudo Puncak Decay Full Scale.....	58
Tabel 4.15 Hasil Eksperimen Free Decay Test	59
Tabel 4.16 Hasil Analisis Linear dan Quadratic Damping.....	60
Tabel 4.17 Hasil Analisis Respon Redaman SPAR	62
Tabel 4.18 Parameter Stokastik Gaya Reaksi Heave	64
Tabel 4.19 Parameter Hasil Perhitungan Analitis	66
Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Strip Theory	67
Tabel 4.21 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis	68
Tabel 4.22 Perbandingan Amplitudo Hasil Eksperimen dengan Strip Theory ...	70
Tabel 4.23 Perbandingan Parameter Eksperimen dengan Strip Theory.....	70
Tabel 4.24 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis dan Strip Theory .	71

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A (PERHITUNGAN KALIBRASI KG DAN JARI-JARI GIRASI)

LAMPIRAN B (DATA OUTPUT EKSPERIMEN *FREE DECAY TEST*)

LAMPIRAN C (CODING MATLAB PENGOLAHAN DATA EKSPERIMEN)

LAMPIRAN D (TABEL PERHITUNGAN PENGOLAHAN DATA EKSPERIMEN)

LAMPIRAN E (TABEL PERHITUNGAN ANALITIS)

LAMPIRAN F (CODING MATLAB PENGOLAHAN DATA NUMERIS)

LAMPIRAN G (DATA *HEAVE DECAY* OUTPUT NUMERIS MATLAB)

BAB I PENDAHULUAN

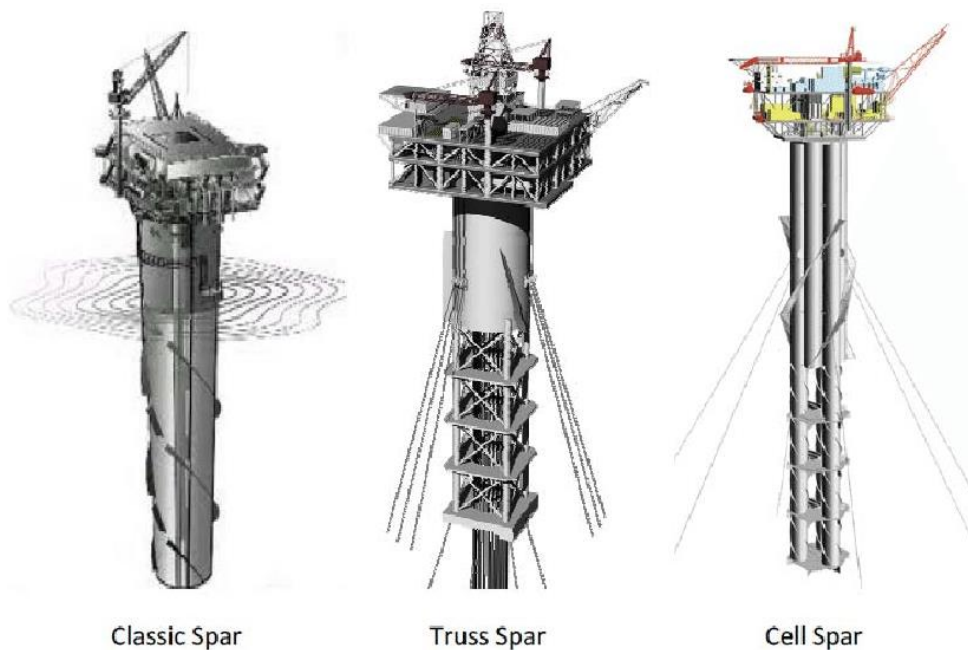
1.1 Latar Belakang

Kemajuan peradaban manusia saat ini diikuti pula dengan meningkatnya permintaan untuk memenuhi kebutuhan energi, termasuk kebutuhan terhadap minyak dan gas bumi. Berkembangnya teknologi pengeboran migas lepas pantai, membuat suatu anjungan lepas pantai yang terpancang (*fixed platform*) menjadi tidak ekonomis jika dibandingkan dengan anjungan terapung (*floating platform*) yang dapat berpindah dari suatu lokasi ke lokasi yang lain (Herwanzah, 2015). Selain dirancang dengan teknologi tinggi, struktur terapung juga memerlukan biaya yang tidak sedikit. Oleh karena itu para perancang harus berhati-hati dalam melakukan perancangan. Baik itu perancangan awal sampai pemeliharaan agar struktur terawat dengan baik (Wijaya, 2015).

Saat ini, bangunan lepas pantai terpancang digunakan pada kedalaman mencapai 300 m. Struktur terapung lainnya seperti *Semi-submersible* dan *Floating Production Ship* dapat beroperasi di lingkungan laut yang lebih dalam (> 300 m). Sedangkan struktur lentur seperti TLP (*Tension Leg Platform*) dan SPAR (*Single Point Anchor Reservoir*) merupakan jenis struktur terapung yang beroperasi pada laut sangat dalam (*ultra-deepwater*) mencapai kedalaman lebih dari 1000 m. Sehingga struktur jenis terpancang tidak memungkinkan untuk beroperasi di laut dalam karena kurang efektif baik dari sisi teknis maupun ekonomis (Chan, 1990). Salah satu faktor yang mempengaruhi efektivitas pengoperasian suatu sistem terapung di laut adalah faktor keselamatan. Keselamatan dalam hal ini ialah keselamatan para teknisi yang berada pada sistem anjungan tersebut. Maka diperlukan kemampuan perancangan untuk memprediksi perilaku bangunan laut ketika laut yang ganas harus dihadapi (Dinaryo, 2016).

SPAR *Platform* merupakan salah satu struktur produksi jenis terapung. Sejak instalasi pertamanya, SPAR menjadi semakin banyak digunakan karena kestabilan dan biayanya yang cukup efektif untuk bangunan lepas pantai.

Pertama kali dibuat pada tahun 1990an untuk Ladang Neptune di Gulf of Mexico (GoM), SPAR yang masih sederhana ini terdiri dari satu silinder dengan *draught* yang cukup dalam berada di bawah air (Dev, 2016). Di dunia hulu migas, SPAR *Platforms* dapat dibagi menjadi tiga jenis: *Classic SPAR*, *Truss SPAR*, dan *Cell SPAR* yang dapat dilihat pada Gambar 1.1. SPAR memiliki banyak fungsi, seperti untuk *drilling*, *production*, dan *storage*. Struktur *platform* SPAR umumnya terbagi kedalam empat bagian, bagian atas tersusun atas dua dari empat *layer deck*, badan utama didukung oleh *upper deck*, *riser*, dan *mooring system* (Shen, 2011). Struktur SPAR sangatlah kuat dan rumit, oleh karena itu, SPAR sangatlah cocok untuk beroperasi di laut dalam.



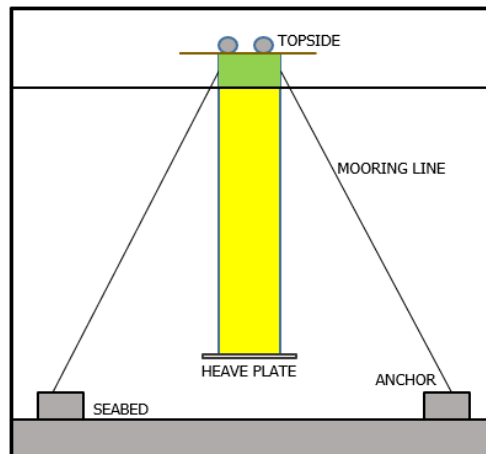
Gambar 1.1 Jenis-jenis SPAR *Platform* (Liew, 2012)

Struktur lepas pantai tentunya sangat dipengaruhi oleh beberapa kondisi beban lingkungan seperti angin, gelombang, dan arus (Li, 2011). Badan lambung SPAR umumnya memiliki *Helical Strakes* untuk mengurangi VIV (*Vortex-Induced Vibrations*) pada arus. Selain itu SPAR juga ditambat menggunakan sistem tambat *taut* atau *catenary* dengan jumlah enam hingga dua puluh tali ditambat pada dasar laut (Sudhakar, 2014). Tali tambat digunakan untuk menjaga struktur terapung tetap pada posisi yang direncanakan. Biasanya tali tambat berupa *heavy chain*, *steel wire ropes*, atau

synthetic polyester ropes (Stendal, 2015). Periode natural *heave* dari *classic* SPAR umumnya relatif panjang, sekitar 25 hingga 30 detik. Hal tersebut dikarenakan amplitudo redaman pada badan vertikal SPAR yang tidak terlalu signifikan. Oleh karena itu *classic* SPAR menunjukkan sebuah solusi desain yang andal untuk kegiatan eksplorasi migas pada wilayah laut yang ganas dan tentunya terdapat cadangan minyak yang melimpah (Sudhakar, 2014).

SPAR memiliki kemampuan *heave* yang lebih baik karena ketinggian *draught*-nya yang cukup dalam (Subbulakshmi, 2015). Untuk mengurangi gerakan *heave* tersebut, diperlukan adanya penambahan *heave damping* dari sistem SPAR *platform*. *Heave Plate* menjadi solusi alternatif sebagai penambahan *heave damping* untuk mengurangi gerakan *heave* sehingga jika sistem SPAR tersebut memiliki *riser*, *riser* tersebut akan lebih aman akibat gerakan *heave*-nya yang minimum. *Heave Plate* ditambahkan pada bagian *keel* dari SPAR, oleh sebab itu dampak yang ditimbulkan tidak hanya *heave damping* dan *motions*, namun juga akan menambah *added mass* dari sistem. Sebelumnya Uma pada tahun 2017, telah meneliti lebih dalam mengenai pengaruh *heave damping* akibat penambahan *circular plates* di keel pada badan lambung SPAR.

Dalam penelitian tugas akhir kali ini, akan dilakukan studi eksperimen dari *classic* SPAR yang diadaptasi dari model Mini SPAR. Topik yang dibahas pada penelitian ini adalah mengenai analisis *heave damping* akibat modifikasi penambahan *heave plate* di bagian *keel* SPAR. Studi eksperimen akan diawali dengan perhitungan parameter-parameter yang dibutuhkan untuk melakukan eksperimen seperti kalibrasi kekakuan tali tambat, perhitungan stabilitas, serta jari-jari girasi dari model SPAR yang telah dibuat. *Heave plate* yang digunakan sebagai eksperimen merupakan *single heave plate* dengan diameter rasio 1,3x diameter SPAR pada model, seperti tampak pada Gambar 1.2. Studi eksperimen ini akan menghasilkan beberapa parameter nilai seperti *heave damping*, periode natural *heave*, dan *heave added mass* dari SPAR dengan dan tanpa penambahan *heave plate*.



Gambar 1.2 Konfigurasi SPAR dengan *heave plate*

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dikaji pada penelitian tugas akhir ini yaitu:

- a) Sejauh mana perbedaan besaran *heave damping* pada SPAR akibat pengaruh penambahan *heave plate* di *keel*?
- b) Bagaimana besarnya *heave damping* pada SPAR dari hasil eksperimen dibandingkan dengan perhitungan analitis dan *Strip Theory*?
- c) Bagaimana perbandingan *heave added mass* pada SPAR terhadap penambahan *heave plate*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai penulis pada penelitian tugas akhir ini yaitu:

- a) Mengetahui sejauh mana perbedaan besaran *heave damping* pada SPAR akibat pengaruh penambahan *heave plate* di *keel*.
- b) Mengetahui perbandingan besarnya *heave damping* pada SPAR antara hasil eksperimen dengan perhitungan analitis dan *Strip Theory*.
- c) Mengetahui perbandingan *heave added mass* pada SPAR terhadap penambahan *heave plate*.

1.4 Batasan Penelitian

Karena banyak aspek yang tidak dapat diteliti pada penelitian tugas akhir ini, maka untuk memperjelas lingkup penelitian diperlukan batasan-batasan sebagai berikut:

- a) Studi eksperimen dilakukan pada model dari Mini SPAR
- b) Studi eksperimen menyesuaikan kondisi dan keadaan Kolam *Manuevering Ocean Engineering Basin* (MOB), Balai Teknologi Hidrodinamika - BPPT

- c) Studi eksperimen dilakukan tanpa adanya interaksi gelombang
- d) Analisis *damping* SPAR hanya dilakukan pada gerakan *heave*
- e) Studi eksperimen dilakukan dengan kondisi tegangan tali tertambat
- f) Analisis olah gerak SPAR tidak dipertimbangkan pada penelitian ini
- g) Pola aliran di sekitar struktur dan *heave plate* tidak dipertimbangkan

1.5 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

- a) Dapat digunakan sebagai acuan dan pertimbangan dalam menganalisis *damping* pada umumnya.
- b) Dapat digunakan sebagai acuan dan pertimbangan dalam menganalisis pengaruh penggunaan *heave plate* pada *classic* SPAR.
- c) Dapat dijadikan referensi untuk penelitian mengenai pengaruh penambahan *heave plate* terhadap *heave damping* dari SPAR.
- d) Dapat dijadikan referensi untuk penelitian mengenai pengaruh penggunaan *heave plate* pada SPAR terhadap *heave added mass*.

1.6 Sistematika Penulisan

Susunan dan sistematika penulisan tugas akhir ini adalah:

- a) BAB I : Pendahuluan, dijelaskan mengenai latar belakang dari penelitian tugas akhir ini, rumusan masalah apa yang diteliti, tujuan yang ingin dicapai, serta manfaat yang diharapkan dari tugas akhir ini. Bab ini juga berisi mengenai batasan-batasan dari penelitian dan sistematika penulisan tugas akhir.
- b) BAB II : Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori, menjelaskan dengan ringkas mengenai teori-teori menjadi dasar dan acuan dari tugas akhir ini, serta persamaan-persamaan yang digunakan dalam analisis dan pembahasan.
- c) BAB III : Metodologi Penelitian, berisi alur dan tahapan penelitian, analisis, dan pola penyelesaian permasalahan. Bab ini juga membahas data-data yang akan digunakan.
- d) BAB IV : Analisis dan Pembahasan, berisi uraian hasil analisis dari penelitian serta pembahasannya yang mendalam mulai dari cara

mendapatkan dan mengolah data, studi analisis eksperimen serta hasil perhitungan analitis dan *Strip Theory*.

- e) BAB V : Penutup, berisi kesimpulan yang didapat dari hasil analisis penelitian tugas akhir, dan saran-saran dari penulis sebagai pertimbangan untuk penelitian berikutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

SPAR merupakan satu-satunya jenis *platform* yang memiliki gerakan *heave* dan *pitch* yang cukup kecil agar *riser* yang terpasang pada SPAR menjadi aman dan ekonomis. Bahkan hingga badai 100 tahunan, SPAR masih dapat menahan gerakannya dengan didukung oleh sistem tambat *taut* (Chakrabarti, 2005). Oleh karena kemampuannya untuk bertahan pada lingkungan yang ekstrem, telah banyak penelitian dilakukan dengan objek SPAR *Platform*. (Dinaryo, 2013) telah meneliti operabilitas *seakeeping* dari SPAR *Platform* tipe *truss* di Selat Makassar, dengan hasil analisis bahwa besarnya gerakan rata-rata struktur SPAR masih belum melampaui jauh dari kriteria operasi. Sebelumnya Koo et al. pada tahun 2004 juga telah meneliti SPAR *Platform* dengan terpasang *mooring lines* dan *riser system* yang diasumsikan berada pada kondisi badai di *North Sea*, juga masih dalam kondisi yang sangat stabil untuk respon gerakan *heave* dan *pitch*.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh (Jain dan Agarwal, 2003), kekakuan serta redaman dari SPAR *Platform* dengan sistem tambat *catenary* dianalisis menggunakan Teori Gelombang *Airy* dan Gaya *Morison*. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa besarnya kekakuan tali tambat mempengaruhi respon gerakan yang cukup signifikan. Berikutnya (Jameel et al., 2017) meneliti pengaruh *mooring drag* dan *inertia* pada respon dari SPAR *Platform* dengan kesimpulan bahwa konfigurasi sistem *mooring lines* berpengaruh pada besarnya gaya *drag* dan *inertia* akibat adanya besarnya *hydrodynamic damping*.

Respon gerak dari SPAR *Platforms* merupakan sebuah pengaruh yang penting. Konsep desain dibalik *draught* SPAR yang cukup dalam ialah untuk mengurangi gaya eksitasi *heave* (Haslum, 2000). Haslum meneliti thesis mengenai metode yang dapat digunakan untuk memperkirakan perbedaan frekuensi gelombang linier orde satu dan dua dari SPAR *Platforms*. Analisis yang digunakan merupakan perhitungan analitis meliputi *Linear Frequency*

Domain, respon model frekuensi gelombang, serta respon dari gerakan *heave* atau *pitch*. Untuk eksperimen model hanya menguji *free decay test* sehingga didapatkan nilai *Heave Drag* ($C_{d,z}$) dan *Pitch Drag* ($C_{d,x}$).

(Herdayanditya, 2017) telah membuat model mini SPAR dengan analisis olah gerak serta dinamika tegangan tali tambat dengan variasi *heading* gelombang. Penelitian tersebut menunjukkan arah gelombang mempengaruhi besar gerak dan tegangan tali tambat. Berikutnya (Gumelar, 2018) memodelkan SPAR *Helical Strakes* pada sistem tambat *taut* dengan analisis studi eksperimen dan numeris. Variasi ketinggian *fairlead* menjadi perbedaan pada penelitian tersebut dengan hasil bahwa *Helical Strakes* dapat mengurangi nilai maksimum dari mode gerakan *heave* dan *pitch*.

2.2 Dasar Teori

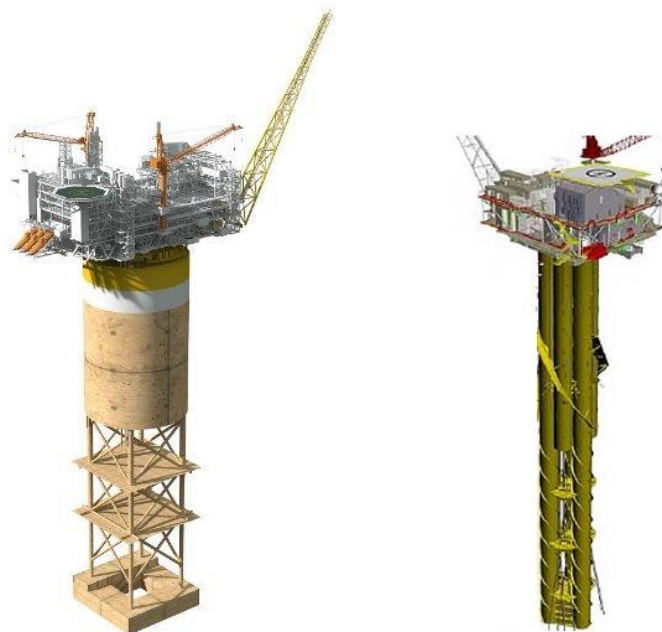
2.2.1 SPAR Platform

SPAR adalah jenis anjungan lepas pantai dengan tipe *deep draught installation* yang terdiri dari *hull system* dengan *topside deck* yang berada di atasnya. Bagian *hull* dari struktur ini terbagi atas *upper hull*, *mid-section*, dan *lower hull*. Sedangkan bagian *topside deck* berupa *deck* yang berjenis *space frame truss* yang menyediakan ruang untuk peralatan produksi, *workover* dan *drilling rig* (ABS, 2003).

SPAR sendiri umumnya di kenakan jangkar hingga ke dasar laut dengan menggunakan lebih dari satu tautan mooring. SPAR Platform dikembangkan pada tahun 1990 dan jenis SPAR Platform yang pertama kali diinstal adalah *Neptune* SPAR pada tahun 1996 di Teluk Meksiko. Pada tahun-tahun berikutnya SPAR Platform telah menjadi salah satu platform yang banyak digunakan dalam proses eksplorasi dan eksploitasi di laut dalam sehingga pengembangan teknologi pada SPAR Platform terus ditingkatkan. Desain dari SPAR Platform berbeda dari anjungan lepas pantai yang lain. Jika bangunan lepas pantai terapung lain umumnya berbentuk persegi, SPAR Platform berbentuk silinder yang berfungsi untuk mempertahankan posisinya saat sedang beroperasi (Kurian, 2012). Silinder diberi beban di bagian bawah dengan mengisi ruangan dengan material yang rapat dibandingkan dengan air laut sehingga dapat menurunkan *Center of Gravity* (CoG) dari struktur sampai berada di bawah

Center of Bouyancy (CoB) dan memberi stabilitas pada struktur (Chakrabarti, 2005).

Konsep penggunaan SPAR dalam kebutuhan *drilling*, produksi, dan *storage system* sebenarnya sudah diterapkan pada tahun 1980-an. Setelah dilakukan beberapa kajian dan usaha atas kerjasama industri minyak dan gas pada tahun 1996, *Oryx energy* dan CNG berhasil memasang SPAR. Semua SPAR *Platform* beroperasi di Teluk Meksiko dan hanya satu SPAR *Platform* yang beroperasi di luar Teluk Meksiko yaitu di Malaysia. Hingga saat ini sudah terdapat 3 generasi jenis SPAR *Platform* yaitu *Classic SPAR*, *Truss SPAR*, dan *Cell SPAR* (Dinaryo, 2016). *Truss SPAR* seperti tampak pada Gambar 2.1, terdiri dari lambung berbentuk silinder yang dengan fungsi yang relatif sama dengan *Classic SPAR* yaitu untuk menunjang *topside* struktur, menyimpan hasil produksi minyak dan gas serta menjaga stabilitas struktur dari beban lingkungan. Yang membedakan antara *Truss SPAR* dengan *Classic SPAR* adalah pada ukuran lambung silinder yang lebih pendek dikarenakan adanya pemasangan struktur berbentuk *truss* pada bagian bawah struktur *Truss SPAR*.



Gambar 2.1 Gambaran *Truss SPAR* dan *Classic SPAR* (Marval, 2017)

Cell SPAR diperkenalkan pada tahun 2004. Properti dari *Cell SPAR* hampir sama dengan jenis SPAR yang lain akan tetapi hanya saja ada perbedaan konstruksi. Untuk bagian lambung tersusun atas *multiple ring-stiffened tubes*

atau disebut sebagai *Cell*, yang terkoneksi oleh pelat horisontal dan vertikal. Metode konstruksi ini lebih murah daripada menggunakan metode pelat konvensional dan metode *frame*.

2.2.2 Beban Hidrodinamik

Suatu struktur terapung akan menerima beban hidrodinamika. Beban hidrodinamika yang diterima oleh struktur terapung dapat dipahami sebagai 2 sub masalah (Faltinsen, 1990) diantaranya:

1. Gaya dan momen yang dirasakan struktur terapung, saat benda ditahan untuk beresilasi 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.

Sub masalah 1 dan 2 tersebut dapat dihubungkan secara linear sehingga gaya hidrodinamik total pada struktur terapung merupakan penjumlahan sub-masalah 1 dan sub-masalah 2.

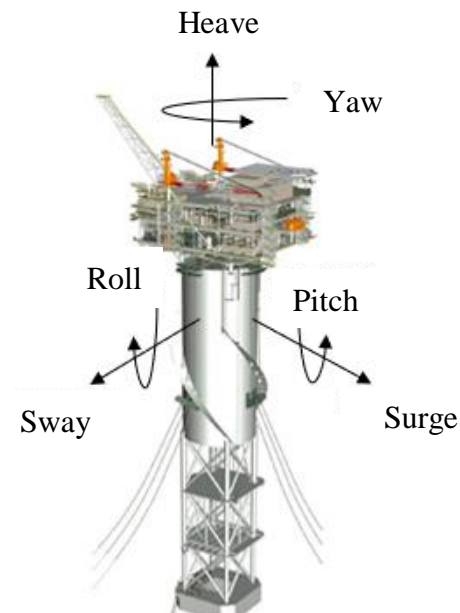
2.2.3 Teori Gerak Bangunan Apung

Gerakan bangunan apung yang terdiri dari 6 derajat kebebasan dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu gerak translasi dan gerak rotasi (Journee, et al., 2001). Gerak translasi yaitu merupakan gerak dimana bangunan apung berpindah atau bergeser terhadap satu sumbu, seperti gerak lurus. Sedangkan gerak rotasi merupakan gerak dimana bangunan apung berputar dengan poros putar sumbu tertentu. 6 Jenis gerak dari struktur terapung mempunyai penamaan masing-masing yaitu:

1. Mode gerak translasi
 - a. *Surging*, gerakan translasi arah sumbu x.

- b. *Swaying*, gerakan translasi arah sumbu y.
 - c. *Heaving*, gerakan translasi arah sumbu z.
2. Mode gerak rotasi
- a. *Rolling*, gerakan rotasi di sumbu x.
 - b. *Pitching*, gerakan rotasi di sumbu y.
 - c. *Yawing*, gerakan rotasi di sumbu z.

Gerakan translasi dan rotasi dari SPAR *Platform* digambarkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Ilustarsi Gerakan 6 Derajat Kebebasan Pada SPAR *Platform*

2.2.4 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 masa 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. Ikut bergerak 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. Persamaan (2.1) merupakan formula dari gaya masa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung. (Sarpkaya, 2010) menemukan beberapa nilai masa tambah untuk beberapa bentuk sederhana.

$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \quad (2.1)$$

dengan,


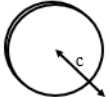
i = mode gerak struktur dengan 1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*) dan 6 (*yaw*)

a = massa tambah (kg)

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

Persamaan massa tambah untuk bentuk silinder dijelaskan pada Tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2.1 Persamaan Massa Tambah Untuk Bentuk Silinder (Sarpkaya, 2010)

	BENTUK	ADDED MASS PER UNIT LENGTH \longleftrightarrow MOTION
	CIRCLE	$\rho \pi c^2$
	CIRCULAR DISK	$\frac{8}{3} \rho c^3$

2. Redaman (*damping*)

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur. 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 (2.2). Persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai koefisien redaman dapat dicari dengan menggunakan analisis numeris (Chakrabarti, 1994)

$$Fb = bi\dot{\xi}_i \quad (2.2)$$

dengan,

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

b = redaman sistem (N s/m)

$\dot{\xi}$ = 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* (ξ_3), *pitch* (ξ_4) dan *roll* (ξ_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 (2.3). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$Fc = ci\xi_i \quad (2.3)$$

dengan,

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

c = kekakuan struktur (N/m)

ξ = respon gerak struktur (m)

2.2.5 Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima dari struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut sebagai gaya *Froude-Krillof* (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 (2.4), dengan p merupakan distribusi tekanan, n merupakan unit vector dan dA merupakan luasan kecil dari suatu benda.

$$F_{FKi} = \int p n_i dA \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) 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 (2.5). Sedangkan gaya difraksi pada struktur terapung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks (Faltinsen, 1990).

$$p = \rho g \zeta_0 e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.5)$$

dengan,

ρ = massa jenis air sekitar struktur (kg/m)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

ζ_0 = amplitudo gelombang (m)

k = angka gelombang (rad/m)

z = posisi di sumbu vertikal, dengan nilai 0 di permukaan air (m)

ω = frekuensi gelombang (rad/s)

t = waktu (s)

x = posisi di sumbu horizontal, searah dengan arah gelombang (m)

Besarnya gaya eksitasi *heave* (F_3) pada gelombang terbagi menjadi Gaya *Froude-Krylov*, F_{FK} (Gaya tekan akibat ketidakpastian aliran fluida) dan Gaya Difraksi F_{DIF} (Gaya tekan saat struktur mengalami perubahan tekanan oleh adanya eksistensi air) seperti dijelaskan pada Persamaan (2.6).

$$F_3 = F_{FK} + F_{DIF} \quad (2.6)$$

Gaya induksi oleh gelombang F_w merupakan penjumlahan dari gaya gelombang insiden F_I dan gaya gelombang difraksi F_D (Djatkiko, 2012). Gaya gelombang induksi juga dikenal sebagai gaya eksitasi gelombang, yang karena besarnya akan bervariasi terhadap perubahan waktu, maka dapat dituliskan sebagai:

$$F_w = (F_I + F_D)e^{-i\omega t} \quad (2.7)$$

dengan $i = \sqrt{-1}$

Pada kondisi ini, Gaya *Froude-Krylov* didapatkan oleh hubungan tekanan dinamis selama badan SPAR terendam di bawah air. Tekanan dapat diperoleh dari Persamaan *Bernoulli* dan Gaya Difraksi dapat didapatkan dengan menggunakan Teori Gelombang Linear (Philip, 2012). Gaya total dapat ditunjukkan dalam Persamaan (2.8)

$$F_3 = - \int P_z n_3 ds + A_{33} a_z \quad (2.8)$$

Dengan mensubstitusikan P_z dan a_z , Persamaan tersebut menjadi Persamaan (2.9):

$$F_3 = \left[\rho A_w g \frac{H \cosh(k(d+h))}{2 \cosh(kd)} - \omega^2 A_{33} \frac{H \sinh(k(d+h))}{2 \sinh(kd)} \right] \cos(kx - \omega t) \quad (2.9)$$

Dimana

H = Tinggi gelombang

ω = Frekuensi gelombang

T = Periode gelombang

k = *Wave number*

A_w = *Water Plane Area*

g = Gravitasi (9.81 m/sec²)

x & t = koordinat horizontal dan waktu

Besarnya *water plane area* dapat diformulasikan menjadi Persamaan (2.10):

$$A_w = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.10)$$

2.2.6 Persamaan Gerak Bangunan Apung

Gerak dari bangunan apung dapat dianalisis menggunakan hukum II Newton sesuai Persamaan (2.11):

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.11)$$

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/s²)

Persamaan di atas menunjukkan hubungan antara resultan gaya dengan massa benda dan percepatan benda. Resultan gaya untuk benda terapung merupakan pengurangan gaya aksi dengan gaya reaksi. Hal ini dikarenakan gaya aksi (gaya eksitasi) memberi gaya kepada struktur sedangkan gaya reaksi merupakan gaya yang melawan gaya aksi.

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.12)$$

Dengan memasukkan pengertian gaya eksitasi dan gaya reaksi pada struktur terapung yang terkena gelombang, maka persamaan (2.12) dapat dikembangkan menjadi persamaan (2.13)

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_b + F_c) \quad (2.13)$$

dengan,

$\sum F$ = resultan gaya (N)

F_a = gaya inersia (N)

F_b = gaya redaman (N)

F_c = gaya pengembali (N)

Dengan memasukkan persamaan (2.1), (2.2), dan (2.3) ke persamaan (2.12) dan (2.13) maka didapat persamaan (2.14) dan (2.15):

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

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

dengan,

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

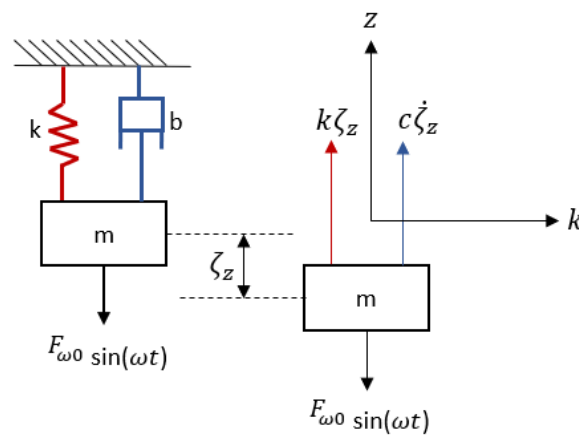
F_{eks} = gaya eksitasi gelombang (N)

m = massa struktur (kg)

a = massa tambah (kg)

- $\ddot{\xi}$ = respon percepatan gerak struktur (m/s^2)
- b = nilai redaman sistem ($N\ s/m$)
- $\dot{\xi}$ = respon kecepatan gerak struktur (m/s)
- c = kekakuan struktur (N/m)
- ξ = respon posisi gerak struktur (m)

Persamaan (2.15) mudah sekali dikenali sebagai getaran sistem massa-pegas teredam dalam gerakan 1-derajat kebebasan pada arah gaya harmonik eksternal yang mengenainya, seperti diilustrasikan oleh Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gerakan osilasi bebas teredam akibat eksitasi harmonik (Djatkiko, 2012)

Dalam sistem yang dibahas ini gaya gelombang harmonik dalam Persamaan (2.7) dapat digantikan oleh elevasi gaya yang mempunyai amplitudo F_{ω_0} dan frekuensi ω_t maka Persamaan (2.16) menjadi:

$$(m_i + a_i)\ddot{\xi}_i + b_i\dot{\xi}_i + c_i\xi_i = F_{\omega_0}\sin(\omega t) \quad (2.16)$$

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

$$(m_i + a_i)\ddot{\xi}_i + b_i\dot{\xi}_i + c_i\xi_i = 0 \quad (2.17)$$

Jika diasumsikan penyelesaian tersebut memiliki bentuk

$$\zeta_z = \zeta_{z0}e^{qt} \quad (2.18)$$

Dengan ζ_{z0} dan q adalah konstanta yang belum diketahui, menyubstitusikan Persamaan (2.18) ke dalam Persamaan (2.17) memberikan

$$\zeta_{z0}((m+a)q^2 + bq + k)e^{qt} = 0 \quad (2.19)$$

yang harus memenuhi untuk semua t . Kemudian

$$(m+a)q^2 + bq + k = 0 \quad (2.20)$$

akan menghasilkan dua harga untuk q , yakni

$$q_{1,2} = -\frac{b}{2(m+a)} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{2(m+a)}\right)^2 - \frac{k}{m+a}} \quad (2.21)$$

Penyelesaian umum dari ζ_z dapat juga dituliskan sebagai

$$\zeta_z = A_1 e^{q_1 t} + A_2 e^{q_2 t} \quad (2.22)$$

Konstanta sembarang A_1 dan A_2 dapat ditentukan dari nilai-nilai awal untuk permasalahan ini tergantung dari bagaimana pola gerakan dimulai. Melihat Persamaan (2.21), jika hasil perhitungan suku-suku di dalam tanda akar menghasilkan harga nol maka hanya akan didapat 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 tanda akar diberikan harga nol maka redaman kritisnya adalah:

$$b_c = 2\sqrt{k(m+a)} \quad (2.23)$$

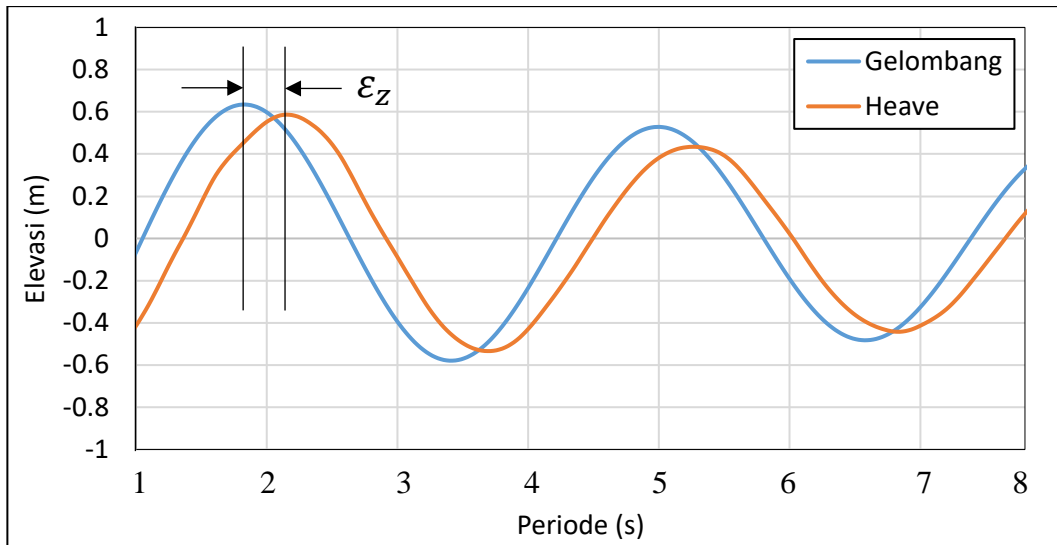
Rasio antara redaman b dengan redaman kritis b_c , adalah disebut sebagai faktor redaman $b_f = b/b_c$. Nilai faktor redaman ini seringkali dipakai untuk menjelaskan besarnya redaman pada suatu sistem dinamis. Suatu sistem yang teredam kritis ($b_f = 1$) akan memiliki gerakan non-osilatori aperiodik.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

Dengan adanya eksitasi gaya eksternal, misalnya gelombang, yang bekerja terus menerus maka silinder terapung juga akan bergerak dengan amplitudo dan frekuensi tetap, atau *steady-state-oscillation*. Kondisi ini akan dipresentasikan oleh solusi partikular dalam bentuk:

$$\zeta_z = \zeta_{z0} \sin(\omega t - \varepsilon_z) \quad (2.24)$$

Dalam persamaan (2.24) diatas, ζ_{z0} adalah amplitudo gerakan osilasi dan ε_z adalah sudut fase antara gerakan dengan gaya eksitasi. Arti

dari adanya sudut fase ini adalah bahwa pada saat gelombang pertama kali berpropagasi melewati silinder, silinder masih dalam keadaan diam, dan baru beberapa saat kemudian silinder akan bergerak. Waktu yang diukur antara puncak gelombang dan puncak gerakan yang berurutan bila dibagi dengan periode gerakan dan dikalikan dengan satu siklus gerakan ($2\pi\text{rad}$) akan memberikan sudut fase. Secara jelasnya, sudut fase respon digambarkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Sudut Fase Antara Elevasi Gerakan Heave dengan Gelombang

Dengan mendiferensiasikan x pada Persamaan (2.24) terhadap waktu, dan mensubstitusikan ke dalam Persamaan (2.16) akan diperoleh:

$$-(m + a) \omega^2 \zeta_{z0} \sin(\omega t - \varepsilon_z) + b\omega \zeta_{z0} \cos(\omega t - \varepsilon_z) + k \zeta_{z0} \sin(\omega t - \varepsilon_z) = F_{w0} \sin(\omega t - \varepsilon_z) \quad (2.25)$$

Karena Persamaan tersebut harus berlaku untuk semua harga t , maka suku $\sin \omega t$ dan $\cos \omega t$ dapat diambil sama dengan 0. Maka Persamaan (2.25) menjadi:

$$-(m + a) \omega^2 \zeta_{z0} \cos \varepsilon_z + b\omega \zeta_{z0} \sin \varepsilon_z + k \zeta_{z0} \cos \varepsilon_z = F_{w0} \quad (2.26)$$

dan

$$(m + a) \omega^2 \zeta_{z0} \sin \varepsilon_z + b\omega \zeta_{z0} \cos \varepsilon_z - k \zeta_{z0} \sin \varepsilon_z = F_{w0} \quad (2.27)$$

Penyelesaian kedua persamaan ini untuk ζ_{z0} dan ε_z memberikan:

$$\zeta_{z0} = \frac{F_{w0}}{\sqrt{[k - (m+a)\omega^2]^2 + (b\omega)^2}} \quad (2.28)$$

dan

$$\tan \varepsilon_z = \frac{b\omega}{k-(m+a)\omega^2} \quad (2.29)$$

Meninjau kembali Gambar 2.3, bila peredan dihilangkan sehingga $b=0$ dan pada sistem dikenakan gaya statis sebesar F_{w0} , yaitu amplitudo gaya eksitasi harmonik, maka sistem massa-pegas akan terdefleksi ke bawah sebesar ζ_{zs} . Dengan begitu defleksi yang terjadi merupakan defleksi statis dan memiliki persamaan:

$$\zeta_{zs} = F_{w0}/k \quad (2.30)$$

Melihat hubungan $\omega_n = \sqrt{k/(m+a)}$, $b_f = b/b_c$, dan $b_c = 2(m+a)\omega_n$, penyelesaian dari Persamaan (2.28) dapat dituliskan dalam bentuk non-dimensi berikut:

$$\frac{\zeta_{z0}}{\zeta_{zs}} = \frac{1}{\sqrt{[1-(\omega/\omega_n)]^2 + [2b_f(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (2.31)$$

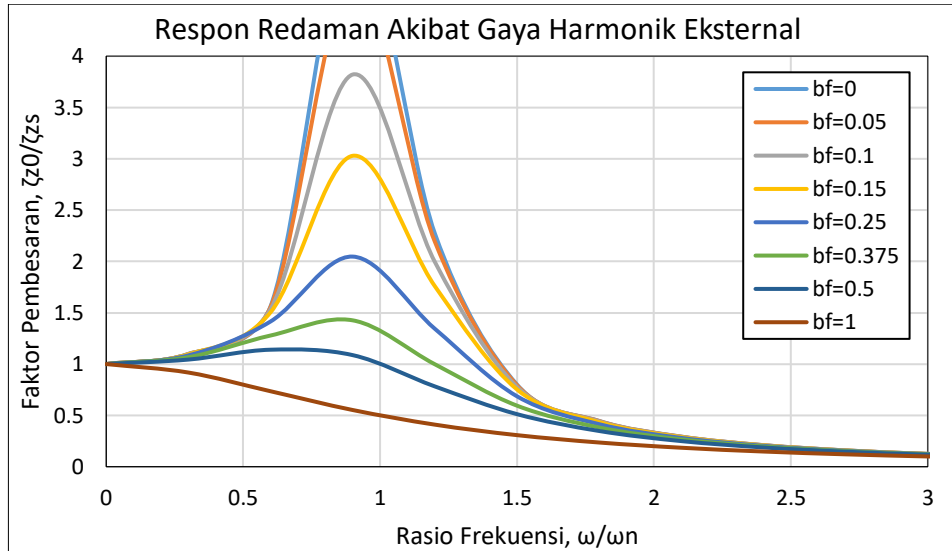
dan

$$\tan \varepsilon_z = \frac{2b_f(\omega/\omega_n)}{1-(\omega/\omega_n)^2} \quad (2.32)$$

Mengacu ke Persamaan (2.31), perhitungan tersebut digunakan untuk memperoleh data respons non-dimensi ζ_{z0}/ζ_{zs} sebagai fungsi perubahan faktor redaman b_f dan rasio frekuensi eksitasi terhadap frekuensi alami ω/ω_n . Rasio ζ_{z0}/ζ_{zs} merupakan perbandingan antara respons atau defleksi sistem dinamis dengan respons statis. Data yang dihasilkan kemudian diplot dalam grafik hubungan antara ζ_{z0}/ζ_{zs} dan ω/ω_n dengan kurva yang berubah mengikuti besarnya harga faktor redaman b_f , seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.5.

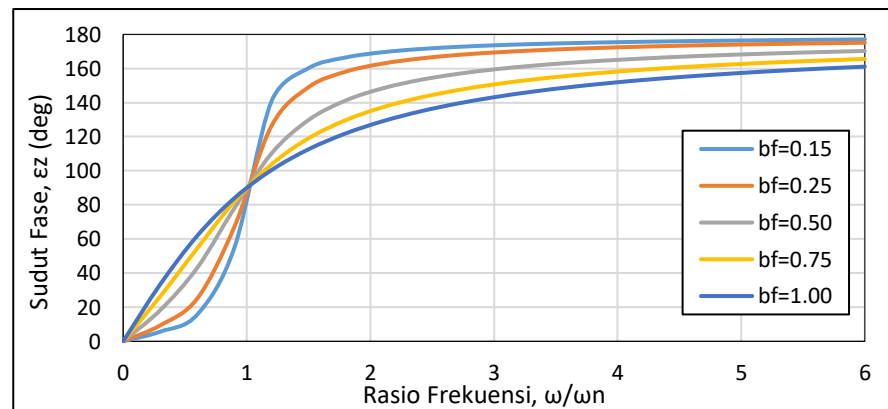
Harga rasio ζ_{z0}/ζ_{zs} akan membesar atau mengecil tergantung dari perubahan faktor redaman dan frekuensi, maka nilai rasio tersebut dapat dinamakan juga faktor pembesaran atau *magnification factor*. Pada sistem yang teredam kritis, yakni pada saat $b_f = 1.0$, akan memberikan harga ζ_{z0}/ζ_{zs} dibawah 1.0. Sistem yang tidak punya redaman atau $b_f = 0$, bila terkena eksitasi pada frekuensi alaminya akan mempunyai respon yang

besarnya tidak berhingga. Sehingga dalam perancangan nanti, operasi bangunan laut tersebut akan menimbulkan resonansi yang membuat respon sistem menjadi berlebihan.



Gambar 2.5 Respons sistem massa-pegas akibat gaya harmonik eksternal

Berikutnya meninjau karakteristik sudut fase respons ε_z , dengan mengacu Persamaan (2.32). Hasil perhitungan dari persamaan tersebut telah diplot dalam grafik pada Gambar 2.6, sebagai fungsi perubahan rasio frekuensi ω/ω_n untuk sejumlah variasi nilai b_f . Pada nilai $b_f = 1.0$, kenaikan ε_z terjadi bersamaan dengan kenaikan ω/ω_n . Bila nilai b_f mengecil maka perubahn kenaikan ε_z lebih lambat pada awalnya, ditunjukkan dengan kurva yang landai, kemudian kenaikan terjadi dengan cepat di sekitar $\omega/\omega_n = 1.0$, dan kemudian melambat lagi pada harga-harga ω/ω_n lebih tinggi. Sudut fase respons saat $\omega/\omega_n = 1.0$, atau saat kondisi resonansi, mempunyai harga 90° .



Gambar 2.6 Sudut Fase Respon Terhadap Sumber Eksitasi

Dalam perancangan, sudut fase beberapa mode respons gerakan harus diupayakan mempunyai nilai yang berbeda cukup besar. Bila tidak maka gerakan kopel akan menjadi bertambah besar secara signifikan, sehingga gerakan relatifnya terhadap gelombang mengalami eskalasi dan cenderung menimbulkan adanya *slamming*.

2.2.7 *Added Mass*

Untuk menanggulangi dampak resonansinya, pada struktur *Classic* SPAR di bagian *keel* nya dipasangkan pelat tipis dengan diameter lebih besar dari diameter *Classic* SPAR. Pelat tipis ini berfungsi untuk mereduksi respon gerak *heave* yang signifikan besarnya akibat resonansi, sehingga disebut sebagai *heave plate*. Pemasangan *heave plate* dapat menambah karakteristik massa tambah dan redaman struktur *Classic* SPAR pada arah gerak *heave*, kemudian berdampak pada penambahan nilai periode natural struktur sehingga resonansi pada struktur dapat dihindarkan (Molin *et al.*, 2007). Besarnya penambahan nilai dari karakteristik massa tambah dan redaman sangat erat bergantung pada bentuk, ukuran, porositas, jumlah dan peletakkan dari *heave plate* pada struktur *Classic* SPAR (Holmes *et al.*, 2001).

Heave added mass untuk silinder dapat dirumuskan dalam Persamaan (2.33) (Tao dan Molin, 2007):

$$A_{33} = 2.09\rho r^3 \quad (2.33)$$

Heave added mass dari silinder + *heave plate* dapat ditemukan secara teori oleh (Tao dan Molin, 2007) menggunakan hubungan Persamaan (2.34) dan (2.35).

$$m_a = A_{33} = \frac{1}{12}\rho [2D_d^3 + 3\pi D_d^2 z - \pi^3 z^3 - 3\pi D_s^2 z] \quad (2.34)$$

Dimana,

$$z = \frac{1}{\pi} \sqrt{D_d^2 - D_s^2} \quad (2.35)$$

D_s = Diameter SPAR

D_d = Diameter *Heave Plate*

Koefisien *added mass* C_a kemudian dihitung dalam Persamaan (2.36):

$$C_a = \frac{A_{33}}{M+A_{33}} \quad (2.36)$$

Dengan M merupakan massa struktur. Lalu periode natural *heave* dapat ditemukan menggunakan Persamaan (2.37) dibawah ini.

$$T_{N,3} = 2\pi \sqrt{\frac{h(1+C_a)}{g}} \quad (2.37)$$

2.2.8 Damping

Dari persamaan gerak bangunan apung pada Bagian 2.2.6, telah dijelaskan mengenai Persamaan 6 derajat kebebasan untuk persamaan gerak dari struktur terapung. Lalu untuk besarnya koefisien *heave damping*, B_{33} , dan C_{33} , gaya kekakuan didapatkan oleh Persamaan (2.38) dan (2.39) (Philip, 2012):

$$B_{33} = 2\xi_3 \sqrt{(A_{33} + M)C_{33}} \quad (2.38)$$

$$C_{33} = \rho g A_w \quad (2.39)$$

Setelah disubsitusikan ke Persamaan (2.13), didapatkan Persamaan (2.40):

$$\xi_3 = \frac{F_3(t) - (M+A_{33})\ddot{\eta} - C_{33}\eta_3}{2\eta_3 \sqrt{(A_{33}+M)C_{33}}} \quad (2.40)$$

Dimana:

M = Massa Struktur (Kg)

C_{33} = Gaya Kekakuan *Heave* (N/m)

A_{33} = *Heave Added Mass* (Kg)

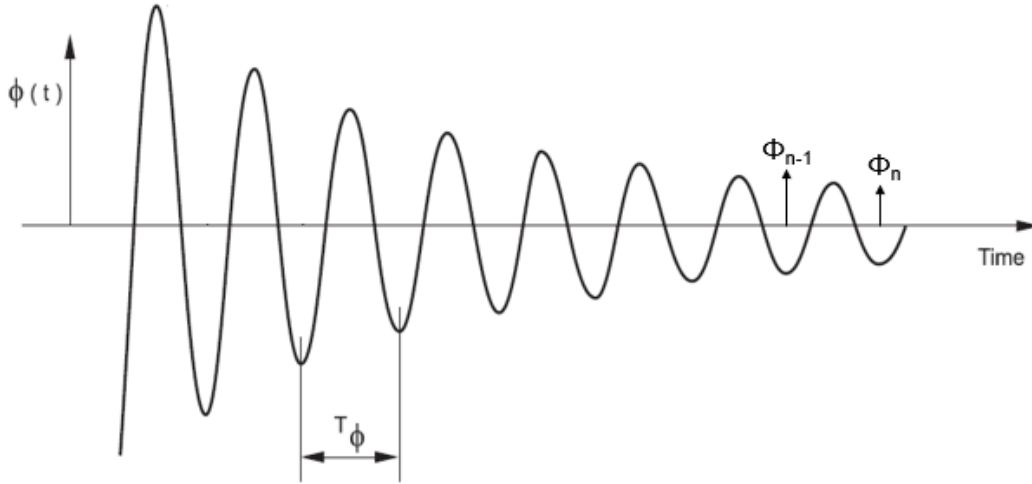
Damping ratio, ξ_3 , dapat didapatkan dengan solusi Persamaan (2.40) menggunakan F_3 sebagai gaya eksitasi *heave* dan $\ddot{\eta}_3$ merupakan percepatan (Philip, 2012).

2.2.9 Free Decay Test

Free Decay Test dengan model dicoba di air dapat dilakukan tidak hanya untuk gerakan-gerakan tertentu yang memiliki gaya atau momen hidromekanik seperti gerakan *heave*, *pitch*, dan *roll*. Tetapi juga dapat dilakukan untuk gerakan lainnya: *surge*, *sway*, dan *yaw* (Journee dan Massie, 2001).

Dari *free decay test*, periode natural dan *damping coefficients* dapat diperoleh. Gambar 2.7 dibawah menunjukkan contoh hasil perekaman

selama *motion decay test* untuk gerakan teredam sempurna, contoh dibawah merupakan kapal dengan gerakan *heave free floating* (MARIN Report No. 22808-3-OB).



Gambar 2.7 Hasil pengujian *free decay test* (MARIN Report No. 22808-3-OB)

Dimana:

$\phi(t)$ = rentang waktu gerakan ϕ

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

T_{ϕ} = periode natural dari gerakan ϕ , (s)

- **Persamaan Gerak**

Diasumsikan bahwa gerakan $\phi(t)$ dalam *free decay test* dapat dideskripsikan oleh Persamaan gerak (2.41) berikut ini:

$$a_{\phi\phi} \cdot \ddot{\phi} + b_{\phi\phi}^{(1)} \cdot \dot{\phi} + b_{\phi\phi}^{(2)} \cdot \phi \cdot |\phi| + c_{\phi\phi} \cdot \phi = 0 \quad (2.41)$$

Dimana:

$a_{\phi\phi}$ = massa total (massa struktur + *added mass*), (t), ($t \cdot m^2$)

$b_{\phi\phi}^{(1)}$ = Koefisien *linear damping*, (kNs/m), (kNm/s/rad)

$b_{\phi\phi}^{(2)}$ = Koefisien *quadratic damping*, (kNs^2/m^2), (kNm^2s^2/rad)

$c_{\phi\phi}$ = *Restoring coefficient*, (kN/m), (kNm/rad)

Berikutnya dari hasil *free decay test* dapat ditentukan koefisien *linear damping* dengan solusi Persamaan (2.42) berikut (MARIN Report No. 22808-3-OB).

$$\phi(t) = e^{-\frac{b_{\phi\phi}}{2a_{\phi\phi}} t} \cdot (c_1 \cdot \cos \omega_n t + c_2 \cdot \sin \omega_n t) \quad (2.42)$$

Dimana:

ω_n = frekuensi natural, (rad/s)

c_1, c_2 = Konstanta

Dimana δ adalah *logarithmic decrement*. δ dapat ditentukan menggunakan Persamaan (2.43) berikut (Sudhakar, 2014).

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{\phi_{N-1}}{\phi_N} \right) \quad (2.43)$$

Dimana:

N = Jumlah *cycle*

ϕ_N = Amplitudo puncak dari osilasi ke-N, (m), (°)

ϕ_{N-1} = Amplitudo puncak dari osilasi ke-N-1, (m), (°)

Selanjutnya *damping ratio* dapat ditemukan dari *logarithmic decrement* pada Persamaan (2.44):

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (2.44)$$

Damping ratio dapat digunakan untuk menemukan frekuensi natural tidak teredam ω_n dari frekuensi natural teredam ω_d seperti Persamaan (2.45):

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T} \quad (2.45)$$

Dimana T, Periode osilasi, merupakan waktu antara 2 amplitudo puncak. Frekuensi natural dan periode natural dapat mudah ditemukan dengan Persamaan (2.46) dan (2.47) (Sudhakar, 2014):

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (2.46)$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.47)$$

Heave Added Mass, A_{33} juga dapat ditentukan dari periode natural *heave*, $T_{N,3}$ sebagai berikut pada Persamaan (2.48) (Philip, 2012):

$$\Rightarrow A_{33} = \frac{T_{N,3}^2}{4\pi^2} \cdot C_{33} - M \quad (2.48)$$

2.2.10 Linear and Quadratic Damping

Jika suatu sistem hanya menggunakan *linear damping* saja maka bila *decrement amplitude* gerak ϕ seperti pada Gambar 2.7 yang diasumsikan

merupakan fungsi eksponensial, maka hubungan antara nilai ϕ_N dan ϕ_{N-1} dari dua puncak amplitudo gerak ϕ sehingga:

$$\Delta = \frac{\phi_{N-1}}{\phi_N} = e^\delta \quad (2.49)$$

Dimana δ adalah *logaritmik decrement*. Untuk sistem dengan *linear damping* saja, penurunan logaritmik adalah konstan dan nilai konstanta tersebut dapat ditentukan menggunakan Persaman (2.43). Maka *linear damping coefficient* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$b_{1\phi} = \frac{\delta \sqrt{c_\phi a_\phi}}{\pi} = \frac{2 c_\phi T_0 \delta}{4\pi^2} \quad (2.50)$$

Pada asumsi sistem linier T_0 periode natural dan *relative damping* β dapat dihitung pada kondisi *displacement* tertentu Δ , dirumuskan

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\Delta + a_\phi}{c_\phi}} \quad (2.51)$$

sedangkan

$$\beta = \frac{b_{1\phi}}{b_{critical}} = \frac{b_{1\phi}}{\sqrt{(2\Delta + a_\phi)c_\phi}} = -\frac{\delta}{2\pi} \quad (2.52)$$

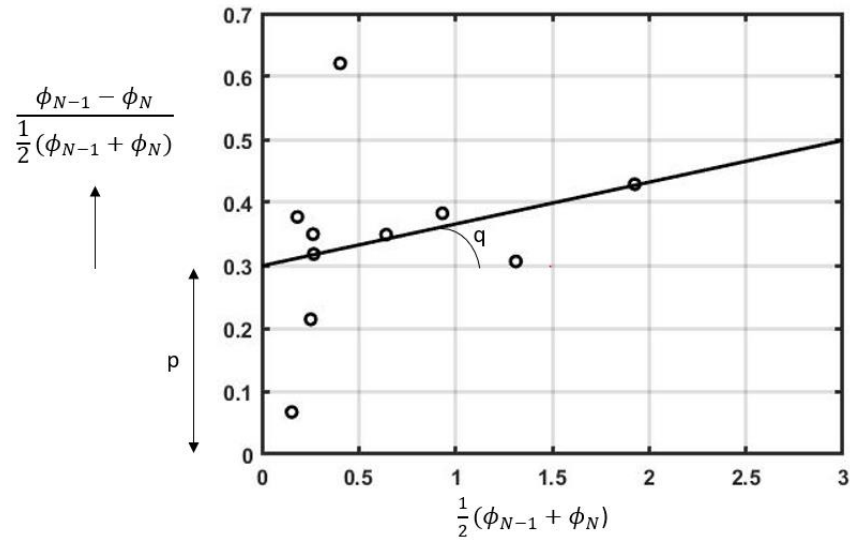
Koefisien *linear* dan *quadratic damping* dapat diperoleh melalui *decay test* melalui langkah berikut, pertama *decrease of motion amplitude* $\phi_{N-1} - \phi_N$ dibagi dengan *mean motion amplitude* $(\phi_{N-1} + \phi_N)/2$ dan diplotkan sebagai *mean motion amplitude*, lebih jelasnya lihat Gambar 2.8 dibawah ini.

Nilai p dan q dapat diperoleh melalui *fitting line* dari titik-titik data yang diperoleh melalui *decay test*. Koefisien p dan q dapat digunakan untuk mendapatkan *linear* $b_{1\phi}$ dan *quadratic* $b_{2\phi}$ *damping coefficients* melalui rumusan masing-masing seperti berikut:

$$b_{1\phi} = \frac{2 p a_\phi}{T_0} \quad (2.53)$$

dan

$$b_{2\phi} = \frac{3}{8} q a_\phi \quad (2.54)$$



Gambar 2.8 p-q analisis dari *decay test*

2.2.11 Teori Pemodelan

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

1. Kesamaan Geometri

Dalam pengujian eksperimen, model yang dibuat haruslah identik terhadap struktur aslinya dalam hal geometri. Perbedaan dimensi antara model dan struktur asli dapat dilakukan dengan penskalaan sehingga model dapat dikatakan sebanding dengan struktur asli. Untuk suatu satuan yang memiliki komponen panjang (meter) maka penskalaan dapat dilakukan dengan Persamaan (2.55):

$$\lambda = \frac{L_s}{L_m} \quad (2.55)$$

Dimana L_s dan L_m dua dimensi (diameter, panjang, dll) yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan λ merupakan rasio skala diantara keduanya. Adapun untuk satuan inersia yang memiliki

komponen berat (ton) dan luas (m²), maka faktor skala menjadi berubah sebagaimana Persamaan (2.56):

$$\lambda^5 = \frac{Is}{Im} \quad (2.56)$$

2. Kesamaan Kinematik

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

3. Kesamaan Hidrodinamik

Rasio dari gaya merupakan hal yang menentukan dalam penentuan hukum skala hidrodinamik. Beberapa hal yang meliputi ini adalah konstanta pegas pada sistem, dan faktor redaman. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut.

4. Bilangan *Froude*

Bilangan *Froude* adalah suatu ukuran dari hubungan gaya inersia, gravitasi, dan *viscous* yang bekerja pada aliran di sekitar kapal atau bangunan apung dan modelnya (Lloyd, 1989). Bilangan *Froude* didefinisikan sebagaimana Persamaan (2.57) dan (2.58),

$$F_N = \sqrt{\frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya gravitasi}}} \quad (2.57)$$

$$F_N = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (2.58)$$

Rasio antara gaya inersia dengan gaya *viscous* dapat digambarkan pada Persamaan (2.59):

$$\frac{\rho U^2 L^2}{\mu_w UL} = \frac{\rho UL}{\mu_w} \quad (2.59)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah λ , hubungan antara model dengan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel 2.2 merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model *Froude*.

Tabel 2.2 *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994)*

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
GEOMETRY			
<i>Length</i>	<i>L</i>	λ	<i>Any Characteristic dimension of the object</i>
<i>Volume</i>	L^3	λ^3	<i>For any portion of the object</i>
<i>Angle</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>e.g., between members or solid angle</i>
<i>Radius of Gyration</i>	<i>L</i>	λ	<i>Measured from a fixed point</i>
<i>Moment of Inertia Mass</i>	ML^2	λ^5	<i>Taken about fixed point</i>
<i>Center of Gravity</i>	<i>L</i>	λ	<i>Measured from a reference point</i>
<i>Natural Period</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Period at which inertia force = restoring force</i>
WAVE MECHANICS			
<i>Wave Height</i>	<i>L</i>	λ	<i>Consecutive crest to trough distance</i>

Tabel 2.2 Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994) (lanjutan)

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
WAVE MECHANICS			
<i>Wave Period</i>	<i>T</i>	$\sqrt{\lambda}$	<i>Time between two successive crests passing a point</i>
<i>Wave Length</i>	<i>L</i>	λ	<i>Distance between two successive crests at a given time</i>
<i>Wave Elevation</i>	<i>L</i>	λ	<i>Form of wave (distance from still waterline)</i>
KINEMATICS & DYNAMICS			
<i>Time</i>	<i>T</i>	$\lambda^{1/2}$	<i>Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time</i>
<i>Displacement</i>	<i>L</i>	λ	<i>Position at rest is considered as zero</i>
<i>Spring Constant (Linear)</i>	MT^{-2}	λ^2	<i>Force per unit length of extension</i>
<i>Damping Factor</i>	<i>None</i>	<i>1</i>	<i>Ratio of damping and critical damping coefficient</i>

2.2.12 Strip Theory

Strip Theory merupakan teori yang berdasarkan teori aliran potensial. Teori ini juga menyatakan bahwa efek *viscous* tidak dipertimbangkan, yang mana dapat membawa masalah serius ketika memprediksikan gerakan *heave* pada frekuensi resonansi. Dalam aplikasinya, untuk efek *viscous heave damping* dapat dihitung cukup dengan metode empiris. *Strip Theory* memang disarankan untuk mempertimbangkan struktur hull yang *rigid*, terapung dalam permukaan dengan fluida ideal, yang mana homogen, bebas dari tegangan permukaan, dan tanpa adanya viskositas (Journee dan Adegeest, 2003).

Pada kasus murni *free heaving* untuk silinder pada kondisi *still water*, persamaan linier dari gerakan *heave* dari titik *center of gravity*, G , diberikan Persamaan (2.60) yang mana merupakan persamaan dasar gerak bangunan apung.

$$(m + a) \cdot \ddot{\phi} + b \cdot \dot{\phi} + c \cdot \phi = 0 \quad (2.60)$$

Dimana persamaan di atas dapat ditulis sebagai Persamaan (2.61).

$$\ddot{\phi} + 2v \cdot \dot{\phi} + \omega_0^2 \cdot \phi = 0 \quad (2.61)$$

Dalam koefisien redaman dan frekuensi natural tidak teredam yang didefinisikan oleh Persamaan (2.62) dan (2.63), kedua persamaan ini yang membuat Persamaan (2.60) menjadi Persamaan (2.61).

$$2v = \frac{b}{m+a} \quad (2.62)$$

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m+a} \quad (2.63)$$

Koefisien redaman non-dimensional, k , ditulis dalam Persamaan (2.64) yang mana juga menunjukkan adanya Persamaan (2.62) dan (2.63).

$$k = \frac{v}{\omega_0} = \frac{b}{2\sqrt{(m+a) \cdot c}} \quad (2.64)$$

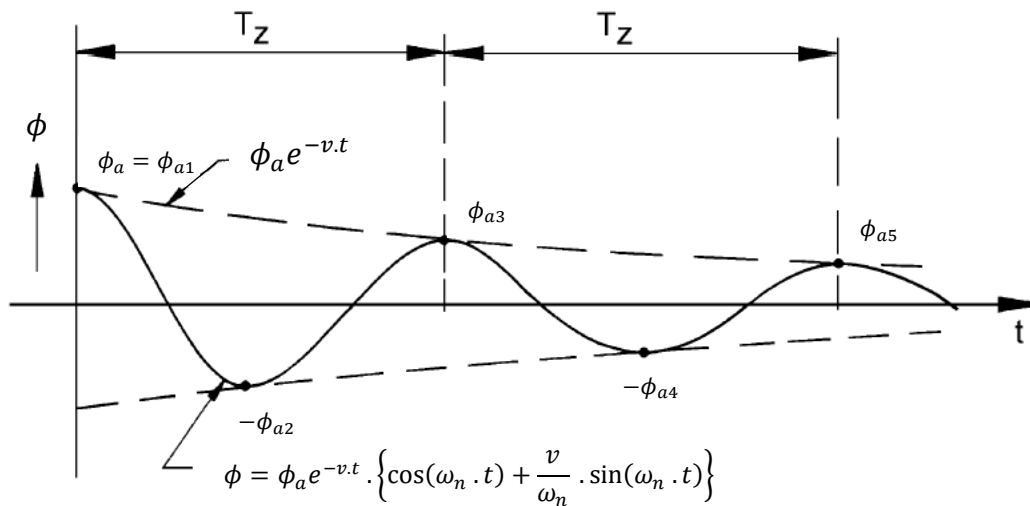
Koefisien redaman ini ditulis sebagai pecahan antara koefisien redaman actual, b , dan koefisien redaman kritis, $b_c = 2\sqrt{(m+a) \cdot c}$; jadi untuk redaman kritis: $k_c=1$. Bersama ini, Persamaan (2.65) dapat ditulis sebagai:

$$\ddot{\phi} + 2k\omega_0 \cdot \dot{\phi} + \omega_0^2 \cdot \phi = 0 \quad (2.65)$$

Struktur didefleksikan dengan *initial vertical displacement*, ϕ_a , dalam keadaan *still water* yang kemudian dilepaskan. Solusi dari Persamaan (2.61) dari gerakan *decay* ini menjadi formulasi matematis Persamaan (2.66).

$$\phi = \phi_a e^{-v.t} \cdot \left\{ \cos(\omega_n . t) + \frac{v}{\omega_n} . \sin(\omega_n . t) \right\} \quad (2.66)$$

Dimana $\phi_a e^{-v.t}$ merupakan pengurangan dari puncak amplitudo setelah satu periode. Nilai k dapat mudah ditemukan ketika hasil *decay test* dengan model dalam keadaan *still water* telah dilakukan. Gambar 2.9 menunjukkan fenomena yang biasanya terjadi serta penentuan *logarithmic decrement* (Journee dan Massie, 2001).

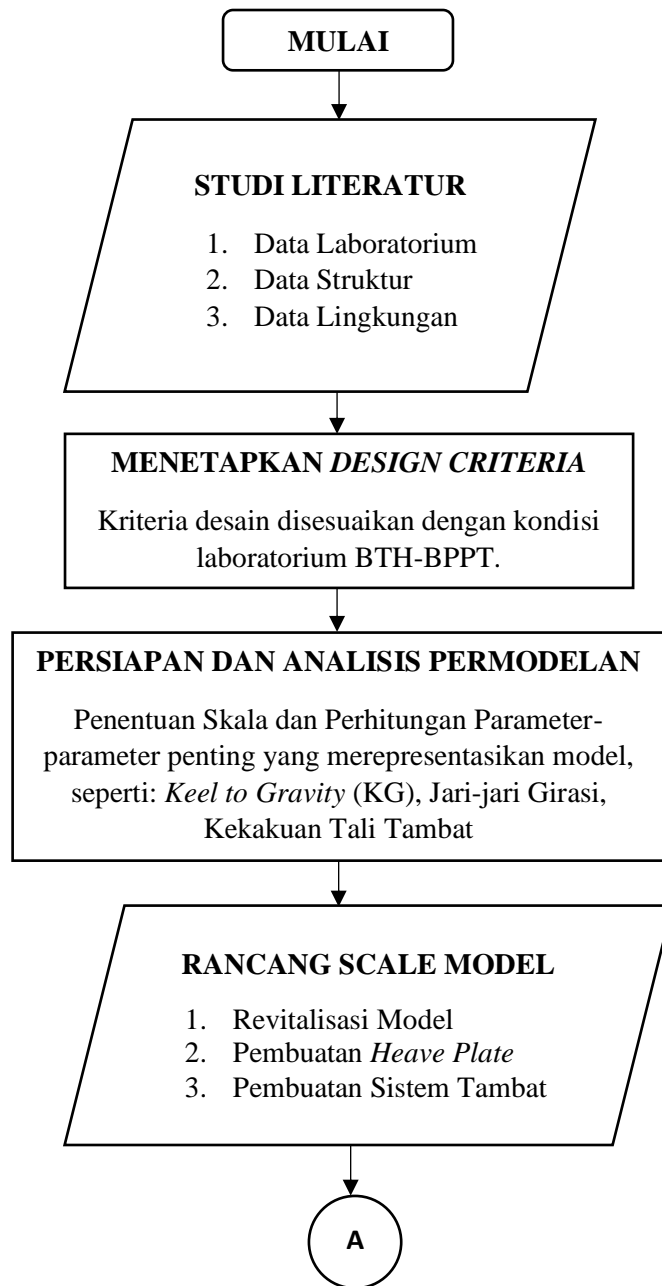


Gambar 2.9 Penentuan *Logarithmic Decrement*

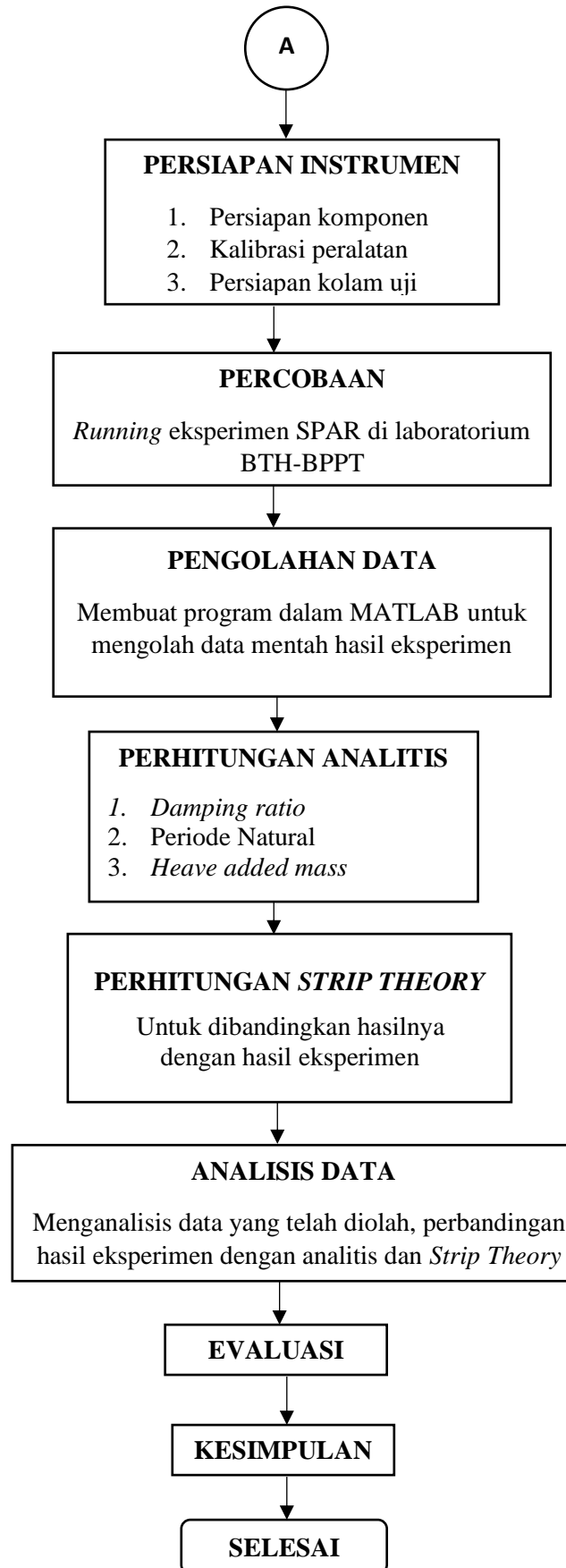
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini dapat direpresentasikan melalui diagram alir pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

3.2.1 Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi literatur dari berbagai literasi mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini. Literasi yang dipelajari merupakan literasi yang berhubungan dengan penelitian tentang SPAR *platform* baik dalam lingkup pemodelan numeris ataupun eksperimen, literatur mengenai *damping*, massa tambah, dll. Pada tahap ini juga dilakukan pengumpulan data-data SPAR yang digunakan sebagai acuan yang diperlukan untuk penelitian. Pada penelitian ini, data SPAR yang digunakan adalah data dari model Mini SPAR.

Tabel 3.1 berikut ini menunjukkan data dimensi model Mini SPAR yang digunakan sebagai acuan. Data dimensi ini akan dimodelkan yang lalu semua parameternya diskala disesuaikan dengan kondisi kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin (MOB)* Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT, lalu setelah itu dibuat model untuk dianalisis secara eksperimen.

Tabel 3.1 Dimensi Mini SPAR

Mini SPAR		
Deskripsi	Besaran	Satuan
Lambung		
Diameter SPAR (D_s)	17.50	m
Draft	129.95	m
Tinggi	154.25	m
<i>Fairlead</i> dari <i>Keel</i>	146.25	m
Deck		
Panjang	50.29	m
Lebar	50.29	m
Tinggi	19.57	m
<i>Mass Distribution</i>		
<i>Weight</i>	32421.875	kg

Tabel 3.2 Data Kolam MOB BTH - BPPT

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

3.2.2 Persiapan dan Analisis Pemodelan

Pada tahap ini, data yang telah terkumpul dari properti SPAR, dimensi SPAR, sistem tambat, dll, akan digunakan sebagai acuan dalam membuat model SPAR. Pemodelan eksperimen dari Mini SPAR dilakukan dengan cara menskala parameter-parameter dimensi dan distribusi massanya. Pertama skala ditentukan dengan mempertimbangkan aspek kesamaan geometris, kinematis, dan dinamis. Ketersediaan material di pasar dan kondisi kolam MOB BTH – BPPT juga menjadi pertimbangan dalam menentukan skala model. *Froude* sistem digunakan pada tahap kesamaan dinamis. Dari berbagai pertimbangan di atas, didapatkan skala model terhadap data asli sebesar 1:125.

Pemodelan *heave plate* SPAR mengacu pada hasil penelitian yang dilakukan Subbulakshmi, dkk. Pada tahun 2015 yang bertema “*Effect of Viscous Damping on Hydrodynamics Response of SPAR with Heave Plate*”. Pada penelitian tersebut didapatkan dimensi *heave plate* paling optimal dari beberapa percobaan yaitu 1,3 kali diameter SPAR.

3.2.3 Perancangan Model

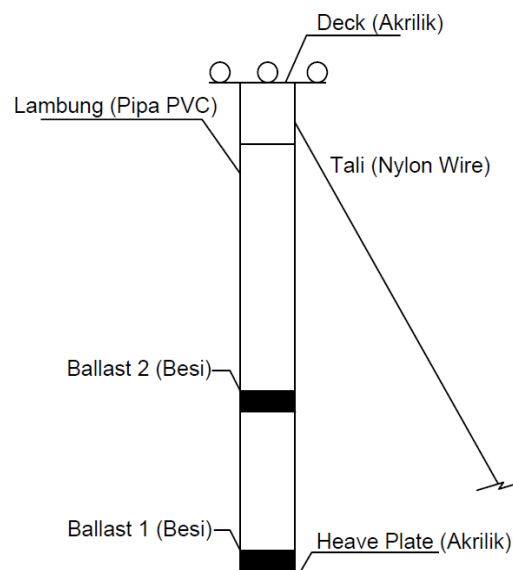
Pada tahap ini dilakukan perancangan *scale model* untuk diuji di kolam MOB BTH – BPPT. Langkah-langkah dalam perancangan model dapat dibagi menjadi beberapa tahap sebagai berikut. Tahapan dari perancangan *scale model* ini terbagi menjadi 3 tahap:

1. Revitalisasi Model

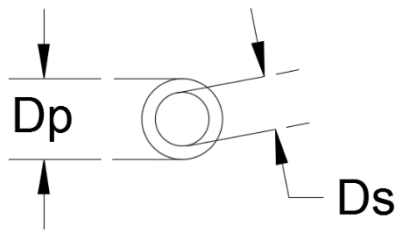
Pada tahap ini, model SPAR yang telah dibuat Ivandito dkk pada tahun 2017 kembali digunakan namun dengan berbagai perubahan. Model mini SPAR polos tersebut diberi tambahan perangkat peredam gerak, yaitu *heave plate* yang berbentuk lingkaran pipih dan diletakkan di bagian bawah *keel* SPAR. Bahan untuk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

2. Pemodelan *Heave Plate*

Heave Plate dimodelkan sebagai piringan pipih berbentuk bundar yang berfungsi sebagai perangkat tambahan untuk menambah redaman. Akrilik dipilih sebagai bahan untuk *heave plate* karena bahannya yang ringan sehingga posisi titik KG dan jari-jari girasi tidak berubah akibat pemasangan *heave plate* pada SPAR. *Heave plate* dipasang pada bagian *keel* dari SPAR. Diameter *heave plate* yang digunakan sebesar 18.2 cm dengan ketebalan sebesar 0.5 cm. Gambar 3.2 dan 3.3 menampilkan rancang model SPAR dengan *heave plate* tampak samping dan tampak atas.



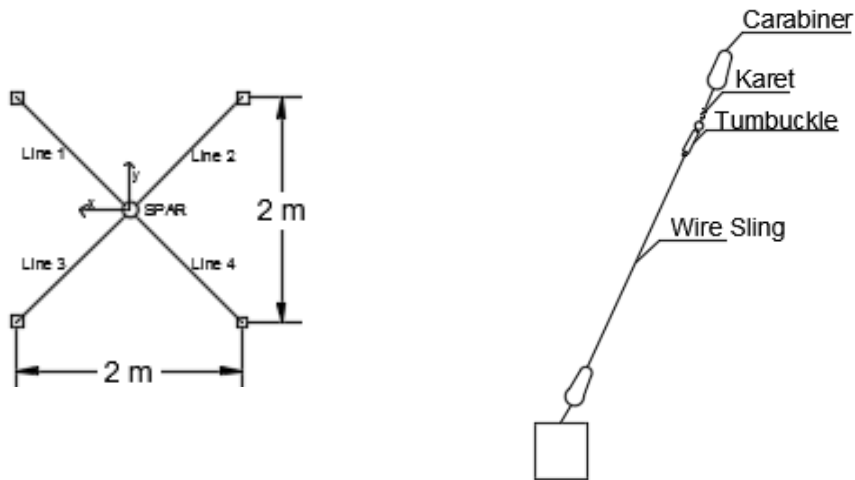
Gambar 3.2 Rancang Model SPAR dengan *Heave Plate* Tampak Samping



Gambar 3.3 Model SPAR dengan heave plate tampak atas

3. Pembuatan Sistem Tambat

Pada tahap ini, sistem tambat dimodelkan di fasilitas MOB dengan berbagai aspek pertimbangan seperti kemudahan pekerjaan, ketersediaan bahan di pasar, dan sebagainya. Hal pertama yang dilakukan adalah menentukan konfigurasi sistem yang akan digunakan. Konfigurasi sistem tambat yang dipilih adalah 4x1. SPAR akan ditambat dari *fairlead* ke dasar kolam dengan 4 *mooring line* secara *taut*. *Mooring line* dibuat menggunakan kombinasi antara karet pegas dan *nylon coated wire* yang disambungkan ke karabiner lalu dikaitkan ke *fairlead*. Di dasar kolam, masing-masing tali tambat dikaitkan ke pemberat seberat 50 Kg yang ditenggelamkan di dasar kolam. Konfigurasi tali tambat pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Konfigurasi Sistem Tambat Tampak Atas dan Samping

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

- Kekakuan Tali Tambat
Pemodelan dari tali tambat menggunakan senar nylon. Kekakuan dari senar akan diwakilkan oleh karet yang dipasang pada setiap konfigurasi *mooring line*. Penggunaan karet ini diperlukan untuk mengetahui *pre-tension mooring* dan menghindari terjadinya *slack* pada senar.
- Posisi *fairlead*
Posisi *fairlead* disesuaikan dengan data asli yang ada pada tabel 3.1 dan disesuaikan dengan skala model. Posisi *fairlead* berada diatas muka air dan di atas titik pusat massa total model (*center of gravity (COG)*).
- Sudut tali tambat dengan model pada *fairlead*
Sudut tali tambat dengan *fairlead* akan menyesuaikan kedalaman Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) yaitu sebesar 30°.
- Jenis sistem tambat
Jenis sistem tambat yang digunakan pada tugas akhir ini adalah jenis *taut mooring*.

3.2.4 Persiapan Instrumen Laboratorium

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

1. *Motion Capture Camera*

Kamera ini dapat menangkap posisi daripada *marker* yang dipasang pada bagian *deck* SPAR. Posisi *marker* yang berubah-ubah dapat ditangkap kamera dengan *frame rate* sekitar 180-1750 fps. Gambar 3.5 menampilkan *Qualysis Motion Capture Camera* pada saat proses kalibrasinya.



Gambar 3.5 *Qualysis Motion Capture Camera*

2. *Passive Markers*

Marker ini khusus digunakan untuk menandakan posisi titik dimana SPAR itu bergerak. Ketika SPAR dikenai getaran sewaktu eksperimen, posisi *marker* di setiap detiknya akan ditangkap oleh kamera, dan dikumpulkan menjadi *time history*. Secara lebih jelasnya, Gambar 3.6 menampilkan bentuk dari *passive markers*.



Gambar 3.6 *Passive Markers*

3. *Calibration Kit*

Alat ini digunakan untuk mengkalibrasi posisi sumbu x dan y agar sesuai dengan keinginan pengguna. Kalibrasi posisi sumbu penting untuk dilakukan agar tidak terjadi kesalahan dalam membaca gerak dari SPAR. Gambar 3.7 menunjukkan *Calibration Kit* saat proses kalibrasi *Qualysis*.



Gambar 3.7 *Calibration Kit*

3.2.5 Pengujian Model

Model akan diuji di fasilitas MOB BTH-BPPT. *heave plate* akan dipasang di *keel* SPAR dan diuji dengan mencelupkan model ke arah sumbu z (*heave*). Pengujian akan berhenti sampai model benar-benar teredam atau berhenti. Hasil dari pengujian berupa *time history* yang akan diolah pada tahap selanjutnya untuk menentukan amplitudo osilasi redaman.

3.2.6 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan menggunakan program yang telah dibuat dengan bantuan perangkat lunak Matlab. Dari hasil olahan ini akan didapatkan amplitudo osilasi redaman yang selanjutnya akan dihitung hingga memperoleh nilai periode natural, *damping ratio*, serta *heave added mass*. Sehingga komponen *heave damping* pun dapat mudah ditemukan dari analisis tersebut.

3.2.7 Perhitungan Analitis

Perhitungan Analitis mengacu pada jurnal “Damping Characteristics of Heave Plates Attached to SPAR Hull” (Philip, 2012) yang mana karakteristik redaman sistem SPAR yang diteliti pada jurnal tersebut sama dengan eksperimen yang dilakukan pada tugas akhir ini yaitu *underdamped* atau kurang teredam. Perhitungan analitis ini akan menghasilkan nilai *damping ratio* yang didapatkan dari perhitungan gaya reaksi. Yang kemudian digunakan untuk menentukan besarnya *heave damping* dengan mengetahui nilai *heave added mass* dan kekakuan terlebih dahulu.

3.2.8 Perhitungan *Strip Theory*

Perhitungan *Strip Theory* yang dilakukan mengacu pada *Strip Theory Program “SEAWAY for Windows”* (Journee dan Adegeest, 2003) serta *Offshore Hydromechanics* (Journee dan Massie, 2001) yang dibantu dengan bantuan *software* Matlab. *Output* dari perhitungan *Strip Theory* merupakan grafik *heave decay* seperti hasil eksperimen. Dari grafik *decay* tersebut, maka parameter-parameter seperti periode natural, *heave damping*, dan massa tambah dapat dihitung sehingga nantinya menjadi pembandingan dari hasil eksperimen. Selain daripada itu, perhitungan ini juga sebagai pembuktian apakah model perhitungan *Strip Theory* bisa digunakan pada beberapa kondisi

struktur, terutama akibat dari dampak penambahan *heave plate* pada *keel* SPAR.

3.2.9 Analisis dan Perbandingan Hasil Studi Analisis

Setelah pengujian eksperimen dan perhitungan telah dilakukan, langkah selanjutnya adalah menganalisis hasil dari masing-masing metode dan membandingkannya. Perbandingan analisis terbagi menjadi 2 yaitu antara hasil eksperimen dengan analitis serta hasil eksperimen dengan *Strip Theory*. Selain membandingkan parameter-parameter seperti periode natural, *damping*, dll. Grafik *decay* antara hasil eksperimen dengan *Strip Theory* juga dibandingkan dalam satu kesatuan grafik.

3.2.10 Kesimpulan

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

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Struktur

Dalam melakukan eksperimen, skala yang digunakan sebesar 1:125 terhadap ukuran aslinya. Bagian *hull* SPAR dimodelkan menggunakan pipa PVC berdiameter 14 cm dengan *fairlead* berupa kait besi, sedangkan untuk bagian *topside* digunakan triplek kayu dengan tebal 1.8 cm. Untuk *heave plate*, menggunakan material akrilik dengan diameter 21 cm yang memiliki ketebalan 0.5 cm. Ukuran-ukuran utama dari *scale model* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil skala menggunakan aturan *Froude*

Parameter	Dimensi Model	Faktor Skala	Dimensi <i>Full Scale</i>
Diameter SPAR (m)	0.140	λ	17.5
<i>Draft</i> (m)	1.034	λ	129.25
Tinggi SPAR (m)	1.234	λ	154.25
Diameter <i>Heave Plate</i> (m)	0.182	λ	22.75
Tebal <i>Heave Plate</i> (m)	0.005	λ	0.625
Tinggi <i>Fairlead</i> (m)	1.170	λ	146.25

Pipa PVC yang digunakan untuk memodelkan *hull* SPAR dipotong sesuai dengan ukuran yang ditentukan, lalu bagian bawah pipa ditutup dengan tutup pipa yang direkatkan dengan lem untuk mencegah kebocoran. *Scale model* yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.1.

Selain dimensi-dimensi utama dari struktur, *Keel to Gravity* (KG) dan jari-jari girasi juga perlu dikalibrasi untuk mendapatkan karakteristik distribusi massa struktur. Distribusi massa dimodelkan dengan menggunakan *ballast* berupa silinder besi yang dirangkai menggunakan ulir panjang. *Ballast* besi ini kemudian diatur ketinggiannya hingga keseimbangan SPAR di dalam air sesuai dengan yang diharapkan.



Gambar 4.1 Model Mini SPAR dengan *topside* dan *heave plate*

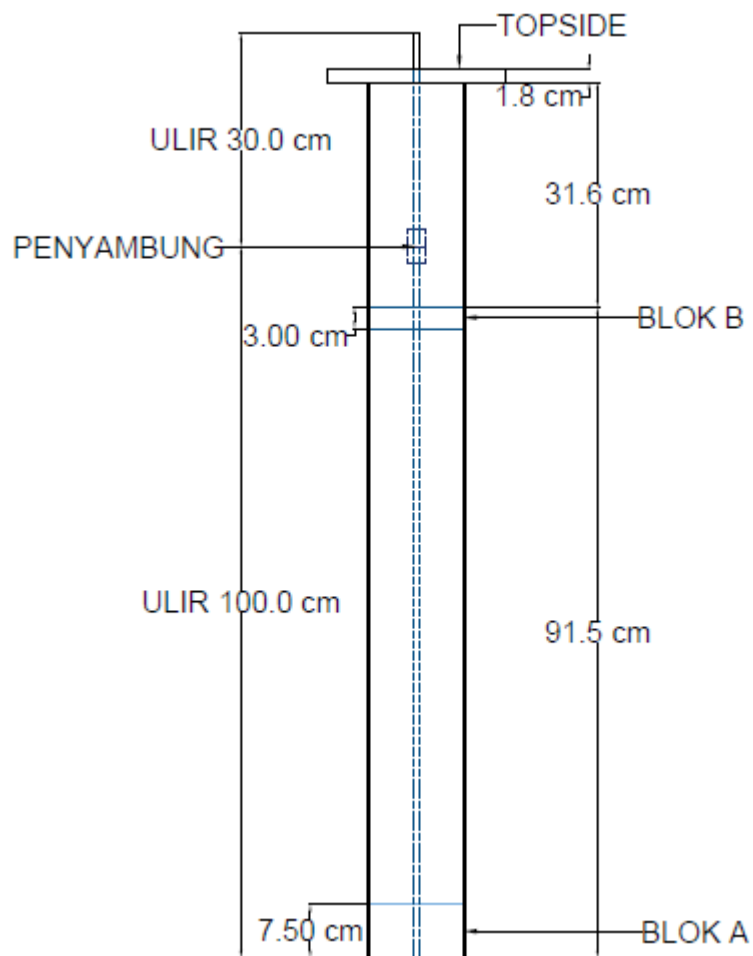
Kalibrasi KG dan jari-jari girasi menggunakan meja osilator untuk mendapatkan nilainya. *Ballast* kemudian ditanam di dalam pipa PVC sebelum *fairlead* dipasang. *Silinder* besi yang digunakan sebagai *ballast* dapat dilihat pada Gambar 4.2, dengan spesifikasi tiap silindernya pada Tabel 4.2 dan konfigurasi pada Gambar 4.3.



Gambar 4.2 Silinder besi dan ulir untuk memodelkan *ballast*

Tabel 4.2 Spesifikasi komponen *ballast*

Komponen		Tebal (cm)	Jumlah	Massa Total (Kg)
Blok A	<i>Ballast 1</i>	2	1	10.941
	<i>Ballast 2</i>	2	1	
	<i>Ballast 3</i>	2.5	1	
	<i>Ballast 4</i>	1	1	
Blok B	<i>Ballast 5</i>	2.5	1	
	<i>Ballast 6</i>	0.5	1	
Rangka	Ulir (130 cm)	-	1	



Gambar 4.3 Konfigurasi *Ballast*

Prosedur untuk mendapatkan distribusi massa dari SPAR adalah sebagai berikut:

4.1.1 Distribusi Massa

Untuk mendapatkan massa total dari model eksperimen, masing-masing komponen dari model eksperimen ditimbang lalu dijumlahkan. Hasil dari pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Perhitungan massa total model

Komponen	Massa (Kg)
Silinder besi + ulir (<i>ballast</i>)	10.941
Pipa PVC (<i>Hull SPAR</i>)	4.81
Topside (<i>Plywood</i>)	0.607
<i>Heave Plate</i>	0.145
Total	16.503

4.1.2 Kalibrasi KG

Untuk mendapatkan besar *Keel to Gravity* (KG) dari *scale model*, setelah model dirangkai bersama dengan ballast-nya, model diletakkan di atas meja osilator. Untuk mengukur KG, digunakan *waterpass* yang diletakkan di permukaan meja osilator. Peletakan SPAR dirubah berulang kali hingga *waterpass* seimbang, yang artinya meja osilator juga seimbang. Lalu jarak antara titik rotasi meja osilator dan *keel* dari SPAR diukur untuk mendapatkan KG dari SPAR. Dari kalibrasi didapatkan KG model sebesar 45.7 cm dari *keel*. Proses kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Proses kalibrasi KG

4.1.3 Kalibrasi jari-jari girasi

Kalibrasi jari-jari girasi dilakukan untuk mendapatkan besar jari-jari girasi dari *scale model*. Karena bentuk struktur adalah silinder, maka jari-jari girasi yang diukur hanya jari-jari girasi *roll* (R_{xx}), dan jari-jari girasi *pitch* (R_{yy}). Dimana keduanya memiliki besar yang sama karena bentuk SPAR yang simetris. Proses kalibrasi jari-jari girasi dilakukan bersamaan dengan kalibrasi KG seperti tampak pada Gambar 4.4.

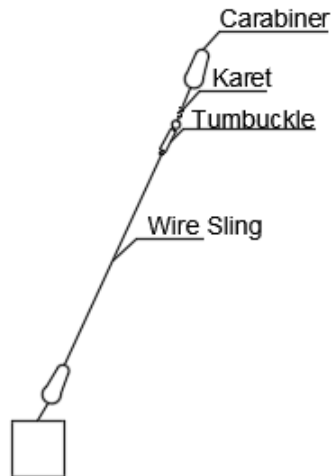
Alat yang digunakan dalam kalibrasi jari-jari girasi adalah *stopwatch* dan meja osilator. Pertama-tama periode natural meja osilator diukur menggunakan *stopwatch* tanpa ada model di atasnya, lalu setelah meja osilator dikalibrasi, kalibrasi KG model dilakukan dengan meletakkan *scale model* di atas meja osilator. Meja osilator digerakkan agar berosilasi tanpa merubah posisi model dari titik setimbang (pada KG). Kemudian periode natural dari meja dan model diukur menggunakan *stopwatch* berdasarkan lama osilasi tiap satu getarannya. Sehingga, dari rangkaian prosedur kalibrasi didapatkan inersia dari meja osilator tanpa model di atasnya, dan inersia dari meja osilator dengan model di atasnya. Selisih inersia dari keduanya merupakan inersia model. Dari didupatkannya inersia model, maka jari-jari girasi dari model dapat dikalkulasi seperti yang tertera pada lampiran. Hasil dari kalibrasi jari-jari girasi model dapat dilihat pada Tabel 4.4. Perhitungan kalibrasi jari-jari girasi ditampilkan pada bagian Lampiran A.

Tabel 4.4 Jari-jari girasi model

Rxx (m)	Ryy (m)
0.55	0.55

4.2 Pemodelan Kekakuan Sistem Tali Tambat

Tali tambat dimodelkan dengan merangkai karet, *stainless steel wire*, dan beberapa komponen lain. Di bagian dasar kolam, rangkaian tali tambat ini dikaitkan dengan pemberat beton seberat 50 kg, sedangkan di ujung yang lain dikaitkan ke *fairlead* pada struktur SPAR. Konfigurasi rangkaian model tali tambat dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Konfigurasi Model Tali Tambat

Untuk memodelkan kekakuan tali tambat pada eksperimen ini, digunakan 4 karet serta *wire sling* yang dipasang pada masing-masing rangkaian tali tambat. Karet ini kemudian dikalibrasi kekakuannya dengan menggunakan neraca gantung, lalu karet diberi penambahan beban secara konstan. Kalibrasi dilakukan dua kali, yang pertama yaitu penambahan secara konstan, lalu yang kedua yaitu pengurangan beban secara konstan. Kegiatan kalibrasi dapat dilihat seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Kalibrasi Kekakuan Tali Tambat

Dari proses kalibrasi didapatkan data penambahan panjang karet akibat beban yang digantung, sehingga kekakuan karet dapat dihitung menggunakan hukum *Hooke*, dengan persamaan sebagai berikut.

$$F = EA/l \, dx = Kdx \quad (4.1)$$

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

Dimana,

F = Gaya beban (N)

E = Modulus young (kg/ms^2)

dx = Penambahan panjang tali (m)

K = Kekakuan (N/m)

l = Panjang tali (m)

A = Luas penampang tali (m^2)

Data penambahan panjang dan kalkulasi kekakuan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Hasil kalibrasi kekakuan model tali tambat

Beban (Kg)	F (N)	Uji Coba	Uji	K (N/m)
		1	Coba 2	
		x (cm)	x (cm)	
0.02	0.1962	20.15	20.15	130.80
0.04	0.3924	20.35	20.35	112.11
0.06	0.5886	20.55	20.55	107.02
0.08	0.7848	20.75	20.75	104.64
0.1	0.9810	20.95	20.95	103.26
K _{avg} (Kekakuan Rata-Rata), N/m				111.567

Dari kalibrasi tersebut didapatkan kekakuan tali tambat model adalah sebesar 98.1 N/m. Selanjutnya kekakuan tali tambat model diskalakan kembali ke skala sebenarnya menggunakan hukum *Froude*. Karena dalam eksperimen, kolam menggunakan air tawar yang memiliki massa jenis yang berbeda dari air laut, maka penskalaan menggunakan hukum *Froude* harus dikalikan dengan rasio massa jenis air laut dan air tawar (Newman, 2017). Sehingga formulasinya menjadi sebagai berikut.

$$\varepsilon = \rho_{Sea} / \rho_{water} \quad (4.3)$$

$$K_{full\ scale} = K_{model} \lambda^2 \varepsilon \quad (4.4)$$

Hasil dari penskalaan ke ukuran *full scale* dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Hasil Penskalaan Kekakuan Karet

K Model (N/m)	K Model (kN/m)	Skala	K <i>Full Scale</i> ($\lambda^2 \varepsilon$) (kN/m)
111.567	111.567×10^{-3}	1:125	1768.817

Dari Tabel 4.6 di atas didapatkan *stiffness* karet yang digunakan pada *full scale* adalah 1768.817 kN/m. Berikutnya untuk mengkalkulasi kekakuan *wire sling*, harus ditentukan terlebih dahulu bahan, diameter dan panjang *wire sling* yang akan digunakan dalam model eksperimen, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4.5) (Haslum, 2000).

$$C_{ml} = \frac{EA}{L_0} \quad (4.5)$$

Diketahui bahwa bahan *wire sling* adalah *stainless steel*, maka dengan hal tersebut nilai parameter Modulus Young (E) bahan *wire sling* yang digunakan dalam eksperimen adalah 1200 kp/mm², diameternya (D_w) sebesar 0.15 mm diukur dengan penggaris dan panjang *wire sling* (L_0) sebesar 2.04 m. Setelah dikalikan dengan rasio densitas akibat perbedaan fluida dan diskalakan ke dalam *full scale*. Hasil kekakuan *wire sling* ditampilkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Kekakuan *Wire Sling* Model Eksperimen dan *Full Scale*

Ukuran (Model)	Model Skala	Ukuran (<i>Full Scale</i>)
1732.496 N/m	λ^2	27747.005 kN/m

Berikutnya nilai kekakuan gabungan antara karet dan *wire sling* dihasilkan menggunakan Persamaan (4.6) dan (4.7) dan ditampilkan hasilnya berdasarkan faktor *full scale* dalam Tabel 4.8.

$$\frac{1}{C_{ml}} = \frac{1}{k_K} + \frac{1}{k_W} \quad (4.6)$$

$$C_{ml} = \frac{k_K k_W}{k_K + k_W} \quad (4.7)$$

Tabel 4.8 Kekakuan Tali Tambat Gabungan Model Eksperimen dan *Full Scale*

Ukuran (Model)	Model Skala	Ukuran (<i>Full Scale</i>)
104.817 N/m	λ^2	1678.712 kN/m

Kemudian untuk mengetahui besarnya kekakuan total *heave* tali tambat, diperlukan untuk menentukan besarnya sudut antara tali tambat dan *seabed* (α) dengan menggunakan Persamaan (4.8).

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{h_{ml}}{\sqrt{(h_{ml}^2 + l_{ml}^2)}}\right) \quad (4.8)$$

Dimana jarak horisontal antara *anchor* dengan *fairlead* (l_{ml}) adalah 1.334 m dan tinggi antara *anchor* dengan *fairlead* (h_{ml}) adalah 2.536 m. Sehingga didapatkan nilai α sebesar 27.9° . Lalu dilanjutkan dengan menghitung besarnya *pre-tension* dengan menggunakan Persamaan (4.9) dan (4.10).

$$F_{PT} = (\rho_f \pi D^2 \Delta T_S) / (16 \cos(\beta)) \quad (4.9)$$

$$T_{PT} = F_{PT} g \quad (4.10)$$

Dimana penambahan sarat yang terjadi (ΔT_S) adalah sebesar 0,08 meter. Dan sudut relatif terhadap *fairlead* (β) dihitung dengan menggunakan Persamaan (4.11).

$$\beta = \sin^{-1}(\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}) \quad (4.11)$$

Dari perhitungan diatas didapatkan nilai β sebesar 62.1° . Sehingga nilai *pre-tension* yang didapatkan adalah 3.5 N dalam skala model, atau 6841.40 kN dalam *full scale*. Lalu besarnya panjang tali tambat *pre-tension* dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (4.12) (Faltinsen, 1990).

$$L = L_0 \left(1 + \frac{T_{PT}}{EA}\right) \quad (4.12)$$

Dari persamaan tersebut didapatkan panjang tali *pre-tension* yang disajikan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Panjang Tali Tambat *Pre – Tension* Model Eksperimen dan *Full Scale*

Deskripsi	Ukuran (Model)	Model Skala	Ukuran (<i>Full Scale</i>)
Panjang Tali <i>pre - tension</i> karet (L_k)	0.231 m	λ	28.92 m
Panjang Tali <i>pre - tension wire sling</i> (L_w)	2.042 m		255.25 m
Panjang Total Komponen Pendukung (<i>Carabiner</i> dan <i>Tumbuckle</i>)	0.630 m		78.78 m
Panjang Tali <i>total</i> pasca <i>pre – tension</i> (L)	2.903 m		362.95 m

Setelah perhitungan-perhitungan di atas, maka didapatkan nilai kekakuan *heave* total dari tali tambat (C_{ML}) dengan menggunakan Persamaan (4.13) dan lalu mengkalikannya sejumlah banyaknya tali tambat yaitu konfigurasi 4 tali tambat. Hasil perhitungan di bawah ini ditampilkan dalam Tabel 4.10.

$$\frac{\partial V_{ml}}{\partial h_{ml}} = C_{ml} \sin^2 \alpha + \frac{T_{PT}}{L} \cos^2 \alpha \quad (4.13)$$

Tabel 4.10 Kekakuan Total *Heave* Tali Tambat

Deskripsi	Ukuran (Model)	Model Skala	Ukuran (<i>Full Scale</i>)
Kekakuan Total <i>heave</i> Tali Tambat (C_{33})	328.505 N/m	λ^2	5261.207 kN/m

Nilai kekakuan yang didapatkan adalah sama baik untuk SPAR tanpa maupun dengan *heave plate*. Sedangkan nilai kekakuan hidrostatis tidak dipertimbangkan dalam kondisi tertambat karena pengaruhnya yang tidak terlalu signifikan terhadap kekakuan sistem.

4.3 Data dan Properti SPAR Keseluruhan

Pada tahap ini telah didapatkan keseluruhan data dari model SPAR yang digunakan dalam eksperimen. Secara keseluruhan, data dari struktur SPAR yang diuji secara eksperimen dalam skala model dan *full scale* dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Data dan Properti SPAR Keseluruhan

<i>SPAR Properties</i> (Skala 1:125)				
Parameter	Satuan	Dimensi <i>Scale Model</i>	Faktor Skala	Dimensi <i>Full Scale</i>
Diameter	m	0.140	λ	17.5
<i>Draught Free Floating</i>	m	1.034	λ	129.25
<i>Draught</i> Tertambat	m	1.114	λ	139.25
Tinggi SPAR dari <i>keel</i>	m	1.234	λ	154.25
Tinggi <i>Fairlead</i> dari <i>keel</i>	m	1.170	λ	146.25
Massa	kg	16.503	λ^3	32232421.88
<i>Keel to Gravity</i> (KG)	m	0.457	λ	57.125
<i>Roll radius of gyration</i> (Rxx)	m	0.550	λ	68.75
<i>Pitch radius of gyration</i> (Ryy)	m	0.550	λ	68.75

4.4 Instrumen Pengukuran

Dalam uji eksperimen, terdapat instrumen utama yang digunakan untuk mengukur elevasi pergerakan struktur. Perangkat instrument tersebut adalah

Qualysis Motion Capture Camera. Alat ini perlu dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan.

4.4.1 Kalibrasi Perangkat *Qualysis Motion Capture Camera*

Untuk mengukur gerakan respons SPAR saat eksperimen, diperlukan instrumen khusus yang dapat merekam perpindahan posisi dari SPAR ketika terkena gelombang. Pada eksperimen ini digunakan perangkat alat rekam yaitu *Qualysis Motion Capture Camera* yang dapat merekam gerakan respons SPAR pada arah x, y, dan z baik translasi maupun rotasi, dengan cara merekam perpindahan dari bola *qualysis* yang diletakkan di atas *topside* SPAR. Alat ini perlu dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan, dengan cara merekam posisi awal SPAR sehingga alat perekam dapat mengetahui titik nol dari bola-bola yang dipasang di atas *topside* SPAR agar dapat merekam jarak perpindahan bola dengan presisi. Hasil dari rekaman perpindahan bola-bola ini kemudian dikelompokkan berdasarkan enam arah derajat kebebasan sesuai teori gerak bangunan apung, lalu dibuat *time history* pada masing-masing gerakan untuk kemudian dianalisis pada metode berikutnya. Gambar 4.7 *Qualysis Motion Capture Camera* yang telah dipasang untuk merekam gerakan eksperimen SPAR.

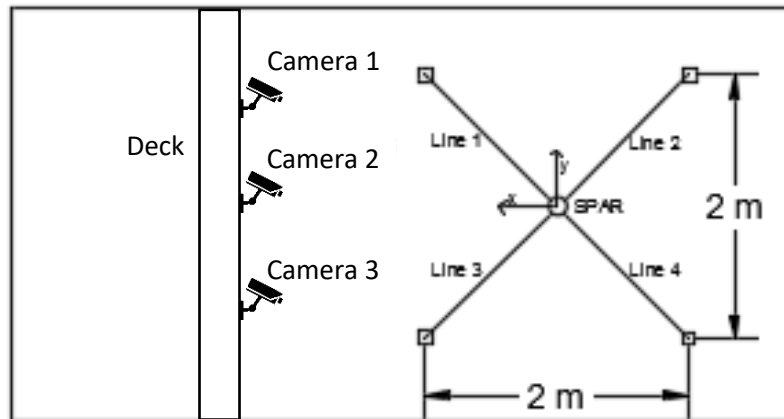


Gambar 4.7 *Qualysis Motion Capture Camera* yang telah dipasang

4.5 Analisis Metode Ekperimen

Analisis eksperimen dilakukan pada kolam *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT. SPAR dan tali tambatnya dirangkai pada kolam uji menyesuaikan dengan

kondisi kolam MOB BTH – BPPT. Konfigurasi instalasi SPAR dan alat perekam *Qualysis* dapat dilihat pada Gambar 4.8 di bawah ini.



Gambar 4.8 Konfigurasi Instalasi SPAR dan Alat Perekam

Pengujian eksperimen dilakukan pada 2 kondisi yaitu:

1. *Free Decay Test* pada SPAR tanpa *heave plate*
2. *Free Decay Test* pada SPAR dengan *heave plate*

Titik koordinat dari *Passive Markers* seperti tampak pada Gambar 4.9 di bawah ini. Saat eksperimen *Free Decay Test* akibat getaran *heave* atau searah sumbu z, direkam oleh *Qualysis* yang hasilnya akan diplot menjadi grafik *heave decay* seperti dijelaskan pada sub-bab berikut ini.

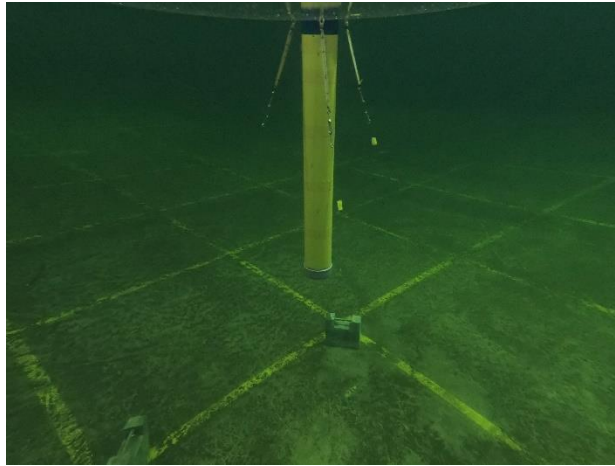


Gambar 4.9 Model SPAR Tertambat dengan *Passive Markers* Berada Di *Topside*

4.5.1 Analisis Eksperimen *Free Decay Test*

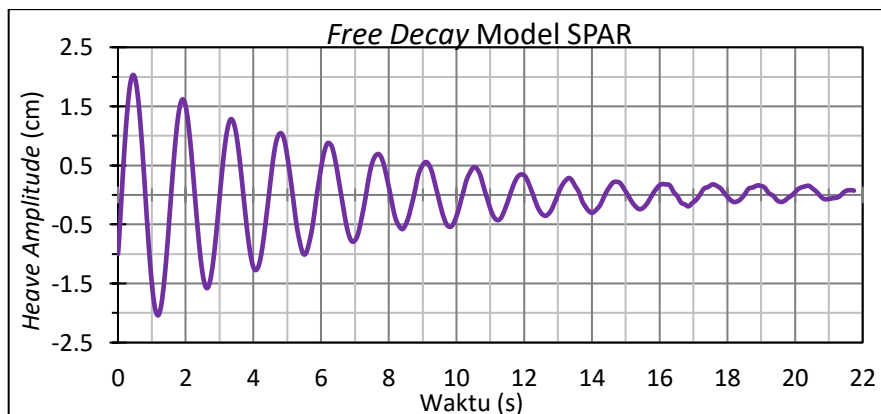
Pengujian eksperimen *free decay test* dilakukan pada model SPAR yang telah tertambat pada kolam MOB – Balai Teknologi Hidrodinamika. Dengan dua kondisi model yaitu SPAR tanpa *heave plate* dan SPAR dengan *heave plate*, pengujian dilakukan dengan menggetarkan searah mode *heave* yaitu pada

sumbu z negatif (-) dengan amplitudo awal sebesar 1 cm. Skala yang digunakan pada eksperimen ini sebesar 1:125. Gambar 4.10 di bawah ini menampilkan model SPAR tertambat di bawah air.



Gambar 4.10 Model SPAR Tertambat Tampak Dari Bawah Air

Pengujian dilakukan 1x pada setiap kondisi model. Jika hasil pengujian tidak begitu baik, maka pengujian akan diulang. Pada kondisi SPAR tanpa *heave plate* pengujian dilakukan 1x, sedangkan untuk kondisi SPAR dengan *heave plate*, dilakukan 2x pengujian. Data *decay* hasil olahan dari *Qualysis* baik sebelum maupun sesudah diskala dapat dilihat pada bagian Lampiran B. Seperti dijelaskan sebelumnya, hasil eksperimen *free decay test* merupakan titik koordinat yang menunjukkan posisi struktur pada salah satu derajat kebebasan. Yang pada eksperimen kali ini diwakilkan dalam mode gerakan *heave*. Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menunjukkan grafik *heave decay* pada SPAR tanpa dan dengan adanya penambahan *heave plate* dengan ukuran berdasarkan model yang belum diskalakan.



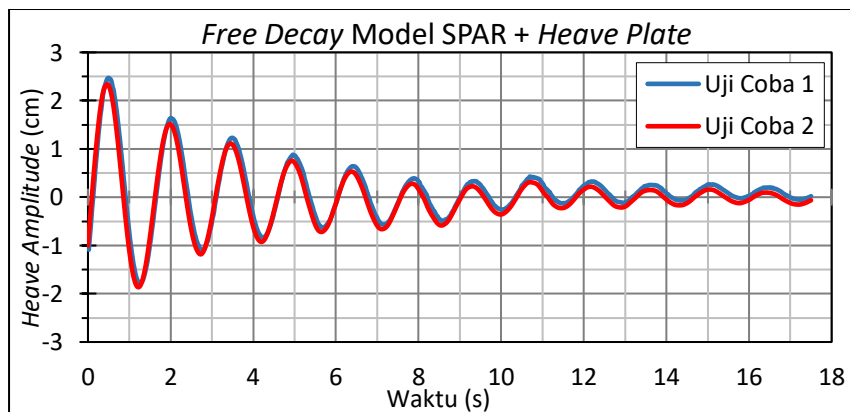
Gambar 4.11 Grafik *Free Decay* Model SPAR Sebelum Diskalakan

Dari grafik *decay* diatas, dapat dinalisis besar penurunan amplitudo puncak yang terjadi serta periode nya. Dengan menjumlah seluruh periode dan membaginya dengan jumlah siklus, maka akan didapat periode rata-rata atau nilai periode natural mode gerak *heave* (T_n). Tabel 4.12 di bawah ini berisi data siklus sesuai grafik *decay* SPAR di atas.

Tabel 4.12 Amplitudo Puncak *Decay* SPAR Model

Siklus ke-	Periode, T (s)	Amplitudo Puncak, z (cm)
1	1.461	2.030
2	1.440	1.618
3	1.450	1.283
4	1.414	1.046
5	1.452	0.880
6	1.421	0.693
7	1.431	0.557
8	1.402	0.469
9	1.411	0.348
10	1.393	0.286
11	1.398	0.223
12	1.406	0.184
13	1.314	0.177
14	1.420	0.161
15	1.440	0.156
Periode Rata-Rata, T_n (s)	1.417	

Dari Tabel 4.12 di atas dapat diketahui bahwa model SPAR tanpa *heave plate* memiliki periode natural *heave* sebesar 1.417 s. Berikutnya Gambar 4.12 menunjukkan grafik *heave decay* pada SPAR dengan penambahan *heave plate* sesuai ukuran berdasarkan model yang belum diskalakan.



Gambar 4.12 Grafik *Free Decay Model SPAR + Heave Plate* Sebelum Diskalakan

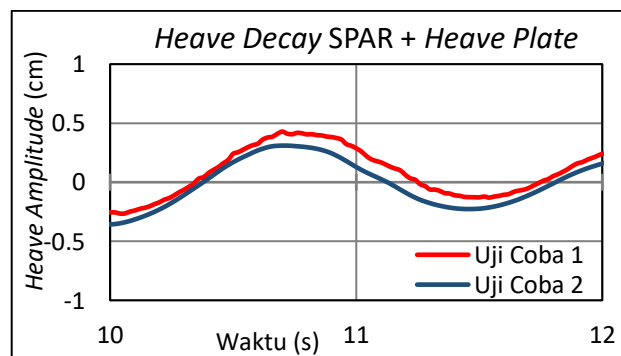
Seperti Tabel 4.12, Tabel 4.13 juga berisi data siklus sesuai grafik *decay* SPAR + *Heave Plate* di atas. Namun karena terdapat 2 uji coba, maka Tabel 4.13 turut disertai dengan perbandingan nilai amplitudo maupun periode. Serta besar penurunan puncak amplitudo pada tiap siklus yang ditulis sebagai $(z_1 - z_2)$.

Tabel 4.13 Amplitudo Puncak *Decay* SPAR + *Heave Plate* Model

Siklus ke-	Periode, T (s)		Selisih T (%)	Amplitudo Puncak, z (cm)				Selisih z (%)
	Uji Coba-1	Uji Coba-2		Uji Coba-1		Uji Coba-2		
				z	$z_1 - z_2$	z	$z_1 - z_2$	
1	1.523	1.529	0.4%	2.47	0.83	2.34	0.83	5%
2	1.459	1.465	0.4%	1.64	0.41	1.51	0.40	8%
3	1.489	1.497	0.6%	1.23	0.35	1.11	0.36	10%
4	1.455	1.463	0.5%	0.88	0.24	0.75	0.22	14%
5	1.511	1.524	0.9%	0.64	0.25	0.53	0.25	17%
6	1.443	1.460	1.2%	0.39	0.06	0.28	0.05	29%
7	1.341	1.348	0.5%	0.33	-0.09	0.22	-0.08	33%
8	1.403	1.432	2.1%	0.43	0.10	0.31	0.09	28%
9	1.422	1.458	2.5%	0.32	0.07	0.22	0.07	33%
10	1.406	1.411	0.3%	0.25	-0.01	0.15	-0.01	42%
11	1.345	1.422	5.8%	0.27		0.16		40%
T_n (s)	1.436	1.455	1.3 %					

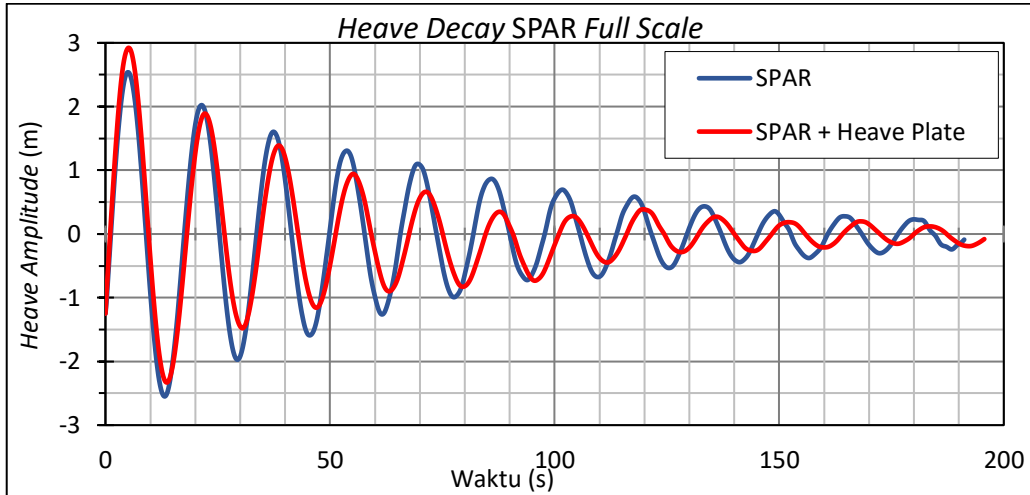
Tabel 4.13 di atas menunjukkan bahwa terdapat selisih puncak amplitudo yang cukup signifikan antara uji coba pertama dan uji coba kedua. Serta perbedaan nilai periode natural sebesar 1.3 %.

Namun dari kedua grafik *free decay* model SPAR diatas, dapat dilihat bahwa uji coba eksperimen SPAR tanpa *heave plate* tampak baik dan halus, maka uji coba hanya dilakukan 1x. Sedangkan untuk uji coba eksperimen SPAR + *Heave Plate*, terdapat bagian grafik yang kurang halus yaitu waktu 10 – 12 s seperti Gambar 4.13 di bawah ini.



Gambar 4.13 Ketidakhulusan Uji Coba 1 Pada Grafik Hasil *Free Decay Test*

Dengan mengikuti teori pemodelan, hasil analisis *free decay test* diubah ke faktor skala baik dari waktu maupun amplitudo mode gerak *heave*. Gambar 4.14 menunjukkan grafik *heave decay* SPAR tanpa dan dengan *heave plate* dengan ukuran yang sudah diskalakan.



Gambar 4.14 Grafik *Heave Decay* SPAR Dengan Dan Tanpa *Heave Plate* Dengan Faktor Skala 1:125

Berikutnya Tabel 4.14 menjelaskan penurunan puncak amplitudo yang terjadi dan rentang periode nya dalam satu siklus redaman dengan skala *full scale*. Serta selisih periode dan puncak amplitudo nya antara SPAR tanpa *heave plate* dengan SPAR + *heave plate*.

Tabel 4.14 Amplitudo Puncak *Decay Full Scale*

Siklus ke-	Periode, T (s)		Selisih (%)	Amplitudo Puncak, z (m)		Selisih (%)
	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>		SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	
1	16.334	17.091	4.6%	2.54	2.92	15%
2	16.102	16.378	1.7%	2.02	1.89	7%
3	16.206	16.739	3.3%	1.60	1.39	13%
4	15.814	16.351	3.4%	1.31	0.94	28%
5	16.239	17.036	4.9%	1.10	0.66	40%
6	15.889	16.325	2.7%	0.87	0.35	60%
7	16.004	15.067	5.9%	0.70	0.28	60%
8	15.675	16.015	2.2%	0.59	0.39	34%
9	15.776	16.296	3.3%	0.43	0.27	37%
10	15.571	15.770	1.3%	0.36	0.19	48%
11	15.631	15.904	1.7%	0.28	0.20	29%
T_n (s)	15.841	16.270	2.7%			

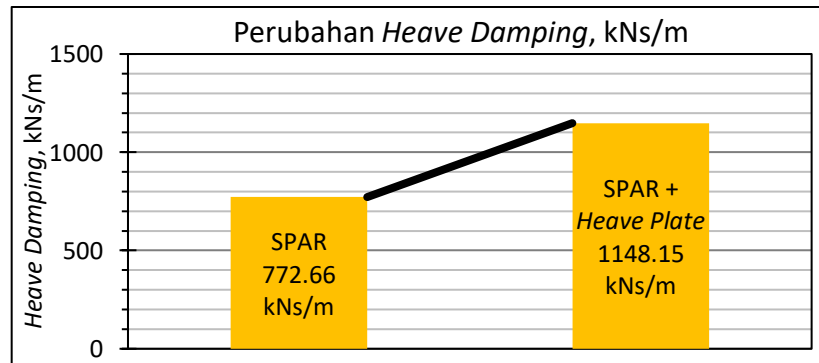
Dari Tabel 4.14 di atas, dapat dilihat bahwa adanya *heave plate* berpengaruh terhadap puncak amplitudonya yang menandakan bahwa sistem tersebut lebih cepat teredam, akibat periode nya yang lebih panjang pada beberapa siklus.

Setelah mengetahui besarnya periode natural, kita dapat mencari besarnya *heave added mass* dengan menerapkan Persamaan 2.48. Lalu dengan menggunakan persamaan yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.2.9, kita dapat mengetahui besarnya *damping ratio* serta *heave damping* dari hasil eksperimen *free decay test* tersebut. Besarnya *heave damping* ditentukan dari analisis puncak terakhir pada eksperimen *free decay test* dengan mengetahui nilai *damping ratio* terlebih dahulu. Secara lebih jelasnya, tabel perhitungan *heave damping* dapat dilihat pada bagian Lampiran D. Tabel 4.15 dibawah menunjukkan hasil eksperimen dari uji coba *free decay test* pada SPAR.

Tabel 4.15 Hasil Eksperimen *Free Decay Test*

Parameter	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	Peningkatan
Periode Natural <i>Heave</i> , T_n	15.84 s	16.27 s	3 %
<i>Heave Damping Ratio</i> , b_f	0.029 (2.92 %)	0.043 (4.28 %)	47 %
<i>Heave Added Mass</i> , A_{33}	1488 ton	2536 ton	70 %
<i>Heave Damping</i> , B_{33}	772.66 kNs/m	1148.15 kNs/m	49 %

Untuk memudahkan analisis eksperimen, dari Tabel 4.15 diatas dibuatlah grafik yang menunjukkan sejauh mana peningkatan besarnya *heave damping* dari SPAR akibat dari penambahan *heave plate*. Grafik ditunjukkan pada Gambar 4.15 dibawah ini.



Gambar 4.15 Grafik Perubahan *Heave Damping*

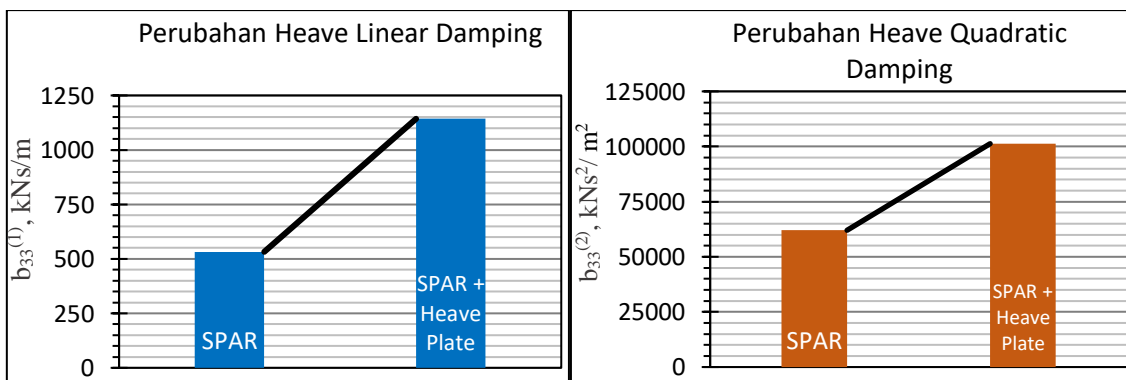
Dari grafik Gambar 4.15 dan Tabel 4.15 dapat dilihat bahwa adanya penambahan *heave plate* di *keel* SPAR dapat menambah besarnya *heave damping* hingga 49%. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai tersebut, yaitu besarnya nilai *damping ratio*, untuk SPAR memiliki nilai sebesar 0.029 dan SPAR + *Heave Plate* sebesar 0.043 dimana nilai tersebut berada kurang dari satu ($b_f < 1.0$) yang berarti sistem dari dua jenis struktur model SPAR ini adalah *underdamped* atau kurang teredam (Djatkiko, 2012).

Berikutnya, analisis perubahan *heave damping* dilanjutkan dengan mengetahui bagaimana pengaruh *linear* dan *quadratic damping* terhadap sistem SPAR. Untuk menganalisisnya, diharuskan untuk menganalisis nilai p dan q terlebih dahulu dengan bantuan grafik *PQ Analysis*. Grafik didapatkan dengan bantuan *software* MATLAB seperti tampak pada Gambar 2.7. Dari gambar grafik tersebut, nilai p dan q dari setiap kondisi SPAR akan diketahui yang kemudian selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai *Linear* dan *Quadratic Damping*. Untuk hasil analisisnya dapat dilihat pada Tabel 4.16 di bawah ini.

Tabel 4.16 Hasil Analisis *Linear* dan *Quadratic Damping*

Parameter	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	Peningkatan
<i>Linear Heave Damping</i> , $b_{33}^{(1)}$	532 kNs/m	1143 kNs/m	115 %
<i>Quadratic Heave Damping</i> , $b_{33}^{(2)}$	62001 kNs ² / m ²	101287 kNs ² / m ²	63 %

Untuk memudahkan analisis pengaruh adanya penambahan *heave plate* pada SPAR terhadap besarnya *linear* dan *quadratic heave damping*, Gambar 4.16 di bawah ini menunjukkan sejauh mana perubahan besarnya *linear* dan *quadratic damping* pada SPAR.

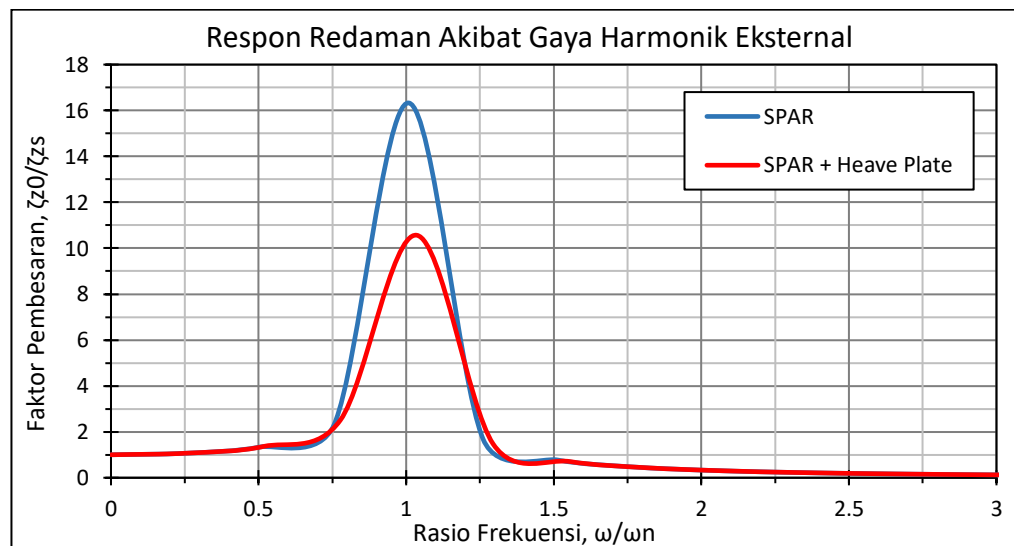


Gambar 4.16 Perubahan Koefisien *Linear* dan *Quadratic Heave Damping* pada SPAR

Dari Tabel 4.16 dan Gambar 4.16 di atas dapat diperhatikan bahwa adanya peningkatan *heave damping* sebesar 49 % akibat penambahan *heave plate* pada *keel* SPAR, dipengaruhi oleh 2 kriteria yaitu peningkatan *linear damping*, $b_{33}^{(1)}$ sebesar 610 kNs/m atau 115 % serta *quadratic damping*, $b_{33}^{(2)}$ sebesar 39285 kNs²/m² atau 63 %.

4.5.2 Respon Redaman Struktur

Setelah kita analisis nilai-nilai dari hasil Eksperimen *Heave Decay Test* seperti *damping ratio*, *heave damping*, baik *linear* maupun *quadratic damping*. Serta sejauh mana perbedaan dengan adanya penambahan *heave plate* di *keel* SPAR terhadap parameter-parameter tersebut. Selanjutnya analisis dilanjutkan bagaimana pengaruh nilai-nilai tersebut terhadap respon struktur akibat gaya harmonik eksternal. Sebelumnya pada bab dasar teori, telah dijelaskan secara teoritis mengenai aspek ini. Pengaruh nilai *damping ratio* (b_f) terhadap respon lebih mudahnya akan didefinisikan menggunakan grafik respon sistem massa-pegas dengan hubungan yang ditampilkan adalah antara ζ_{z0}/ζ_{zs} dan ω/ω_n dengan kurva yang berubah mengikuti besarnya harga faktor redaman atau *damping ratio* (b_f). Gambar 4.17 dibawah ini merupakan grafik respon SPAR dengan dan tanpa *heave plate* akibat gaya harmonik eksternal.



Gambar 4.17 Respon Sistem Massa-Pegas SPAR Akibat Gaya Harmonik Eksternal

Memperhatikan Gambar 4.17 di atas, nilai ζ_{z0}/ζ_{zs} adalah nilai yang dihitung berdasarkan Persamaan (2.28), sedangkan harga ω merupakan frekuensi gelombang yang divariasikan antara 0 hingga 1.6 rad/s. sedangkan ω_n

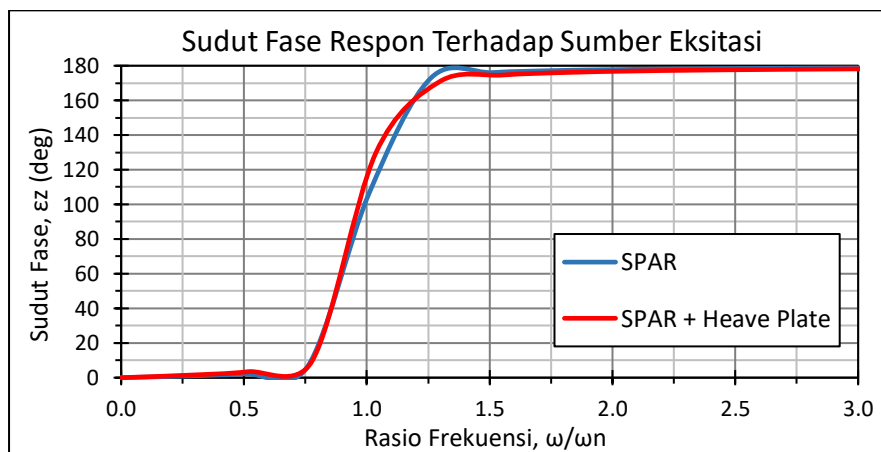
merupakan frekuensi natural struktur yang telah ditentukan pada sub-bab sebelumnya. Hasilnya, adanya penambahan *heave plate* pada *keel* SPAR berdampak pada energi yang dibangkitkan akibat adanya pembangkitan gelombang yang terjadi. Respon maksimum dan respon area dari SPAR dengan dan tanpa *heave plate* dapat dilihat pada Tabel 4.17 di bawah ini.

Tabel 4.17 Hasil Analisis Respon Redaman SPAR

	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	Reduksi
Respon Maksimum	16.33 m/m	10.57 m/m	54 %
Respon Area	6.51 m ²	5.1 m ²	30 %

Memperhatikan Tabel 4.17 di atas, dapat diketahui bahwa adanya penambahan *heave plate* pada *keel* SPAR dapat mengurangi respon maksimum hingga 54 % serta pembangkitan energi respon yang berkurang sebesar 30 % akibat dari gaya harmonik eksternal yang ditumbulkan. Sehingga risiko terjadinya resonansi pun akan semakin berkurang akibat penambahan *heave plate* tersebut.

Berikutnya selain meninjau grafik perbandingan diatas, penting juga untuk menganalisis sudut fase respon dari SPAR tanpa maupun dengan *heave plate*. Dengan mengacu Persamaan (2.29), hasil perhitungan dari persamaan tersebut telah diplot dalam grafik pada Gambar 4.18, sebagai fungsi perubahan rasio frekuensi ω/ω_n untuk sejumlah variasi nilai *damping ratio*, b_f .



Gambar 4.18 Grafik Sudut Fase Respon SPAR Terhadap Sumber Eksitasi

Memperhatikan Gambar 4.18 diatas, adanya penambahan *heave plate* pada SPAR, tidak lantas membuat kurva sudut fase menjadi lebih landai. Meskipun adanya penambahan *heave plate* dapat memperbesar nilai faktor redaman (b_f)

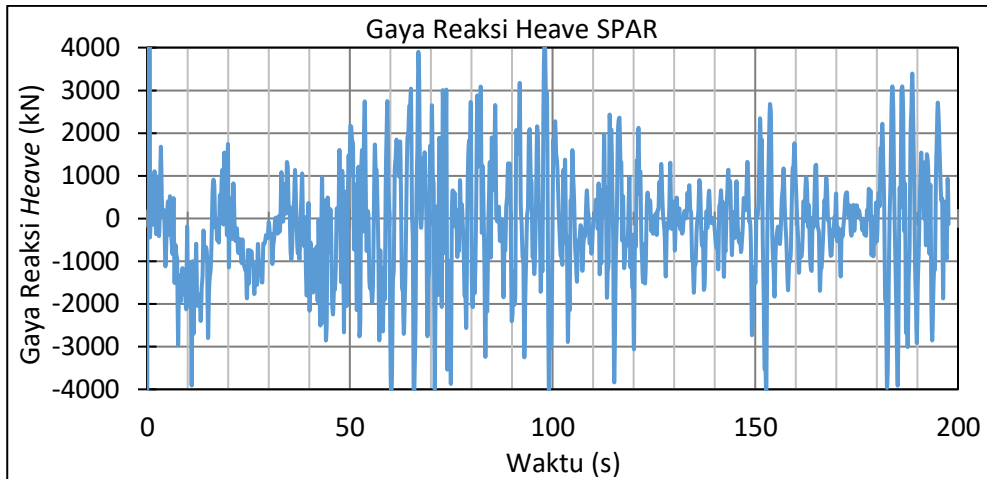
dan mengurangi besar respon yang terjadi, akan tetapi tidak membuat kurva sudut fase lebih landai yang juga tidak terlalu signifikan. Hal ini dikarenakan nilai faktor redaman yang dihasilkan dari eksperimen sangat kecil ($b_f < 0.05$). Namun dibalik fenomena tersebut, dapat dilihat bahwa perubahan sudut fase respon yang muncul pada awalnya sangat lambat lalu saat mendekati rasio frekuensi satu, perubahan sudut fase menjadi sangat cepat, lalu melambat lagi saat ω/ω_n mulai membesar. Karena perubahan sudut fase yang tidak bersamaan dengan perubahan rasio frekuensi tersebut, dapat disimpulkan bahwa kemungkinan struktur SPAR mengalami resonansi akan sangat kecil baik itu tanpa maupun dengan adanya penambahan *heave plate*.

4.5.3 Gaya Reaksi Struktur

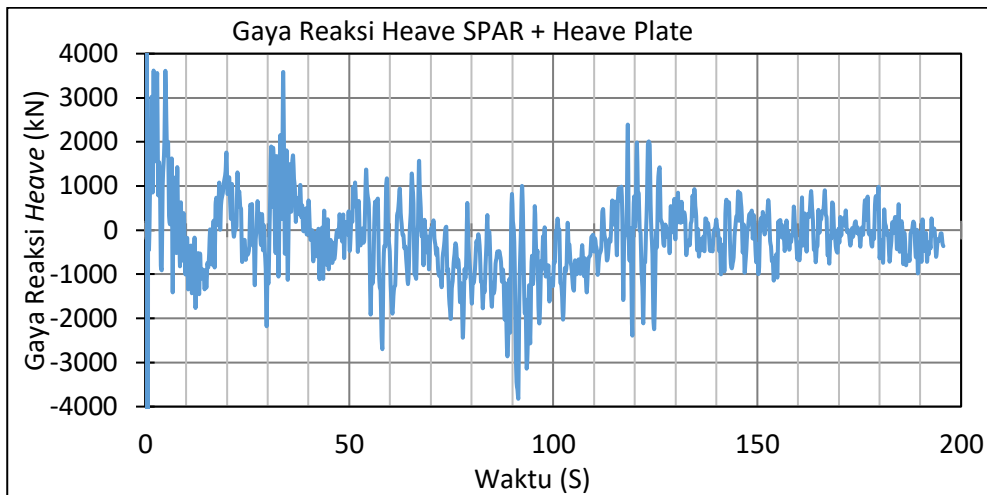
Dapat diketahui bahwa Eksperimen *Free Decay Test* yang dilakukan pada struktur SPAR adalah dengan memberikan getaran awal pada struktur dengan amplitudo tertentu lalu membiarkan model bergetar sampai berhenti. Hasil berupa grafik gaya reaksi *heave* SPAR dengan dan tanpa *heave plate* dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan 4.20 di bawah ini. Akibat dari getaran tersebut, maka struktur SPAR mengalami gaya reaksi akibat dari perubahan massa tambah (gaya inersia), gaya redaman, serta gaya kekakuan. Dari data *decay test*, dapat dianalisis dengan mengetahui gaya reaksi struktur dari setiap perubahan posisi yang muncul akibat getaran yang terjadi.

Dari kedua grafik tersebut, dapat dilihat bahwa penambahan *heave plate* pada *keel* SPAR selain dapat mengurangi respon, penambahan plat tersebut juga berpengaruh terhadap gaya reaksi yang timbul akibat getaran yang diberikan. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan *heave plate* pada SPAR dapat mengurangi gaya reaksi pada struktur SPAR itu sendiri.

Untuk mengetahui besarnya pengurangan gaya reaksi yang terjadi, Tabel 4.18 dibawah ini menunjukkan beberapa parameter stokastik dari gaya reaksi yang berkurang akibat dari penambahan *heave plate* dengan menggunakan formulasi *simpson*. Parameter-parameter yang dianalisis adalah gaya reaksi F_{rms} , gaya rata-rata, gaya signifikan, gaya maksimum, gaya reaksi $F_{1/10}$, dan gaya ekstrem pada setiap kondisi SPAR. Tabel perhitungan parameter stokastik gaya reaksi *heave* ditampilkan pada bagian Lampiran E.



Gambar 4.19 Gaya Reaksi *Heave* SPAR



Gambar 4.20 Gaya Reaksi *Heave* SPAR + *Heave Plate*

Tabel 4.18 Parameter Stokastik Gaya Reaksi *Heave*

	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	
m0	2.4×10^5	1.3×10^5	
m1	1.9×10^7	1.0×10^7	
m2	3.5×10^{10}	1.1×10^{10}	
m4	1.1×10^{19}	9.9×10^{16}	
Gaya Reaksi (kN)	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	Reduksi
F_{rms}	1344	875	35 %
F_{avg}	1218	904	26 %
$F_{signifikan}$	1379	1024	26 %
F_{max}	4064	3599	11 %
$F_{1/10}$	1761	1307	26 %
$F_{extreme}$	3992	2910	27 %

4.6 Analisis Metode Analitis

Metode pendekatan analitis dilakukan untuk menentukan besarnya massa tambah, koefisien massa tambah, kekakuan, *damping ratio* atau faktor redaman, *heave damping* (B_{33}), serta periode natural. Perhitungan metode analitis yang dilakukan mengikuti Persamaan-Persamaan dari (Philip, 2012).

4.6.1 Massa Tambah

Massa tambah mode gerak *heave* untuk silinder maupun silinder dengan *plate* berada di bagian *keel* berdasarkan Tao dan Molin (2007) sesuai persamaan-persamaan yang terdapat pada sub-bab 2.2.7. Dengan massa jenis (ρ) 1.025 kg/m^3 , diameter SPAR (D_s) 17.5 m, dan diameter *heave plate* (D_p) 22.75 m. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.6.2 Damping

Perhitungan analitis nilai *heave damping ratio* adalah untuk mengoreksi besarnya *heave damping ratio* dari hasil eksperimen. Berdasarkan sub-bab 4.5.3 dengan mengetahui besar gaya reaksi *heave* (F_3) yang terjadi, gaya reaksi dapat diketahui dengan mengetahui parameter diatas terlebih dahulu yaitu massa tambah, kekakuan, serta *damping*. *Damping* dihitung dengan mengetahui nilai *damping ratio* dari hasil eksperimen. Sehingga dapat diketahui nilai *damping* analitis dengan menggunakan Persamaan 2.40. Besar nilai waktu, perpindahan, kecepatan, serta percepatan ditentukan dari data eksperimen *free decay test*. Massa SPAR sebesar 31949.22 ton dan massa *heave plate* 283.2 ton. Hasil perhitungan *heave damping ratio* (b_f) dan *heave damping* (B_{33}) dapat dilihat pada Tabel 4.19. Tabel perhitungan *damping* dapat dilihat pada bagian Lampiran E.

4.6.3 Periode Natural

Selain *heave damping*, penting juga untuk mengetahui nilai periode natural struktur. Periode natural analitis dihitung menggunakan Persamaan 2.37 dengan disesuaikan berdasarkan nilai massa tambah. Periode natural disini merupakan periode natural SPAR dengan kondisi *free floating*. Karena hanya bergantung pada nilai massa tambah dan geometri struktur. Berbeda dengan periode natural hasil eksperimen yang

merupakan kondisi tertambat dan didapatkan dari grafik *free decay test*. Hasil perhitungan analitis untuk periode natural kondisi *free floating* dapat dilihat pada Tabel 4.19.

4.6.4 Kekakuan

Kekakuan mode gerak *heave* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.48. Dengan mengetahui besar *heave added mass* dan periode natural tertambat yang telah dihitung sebelumnya, serta massa struktur yang tetap, besar kekakuan *heave* untuk SPAR tanpa dan dengan *heave plate* ditampilkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Parameter Hasil Perhitungan Analitis

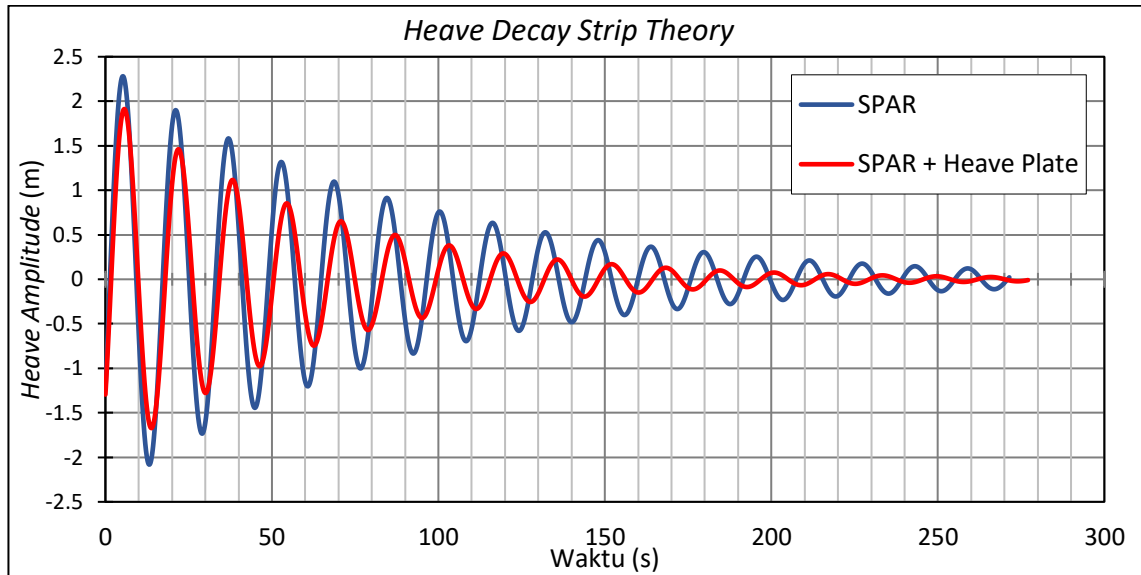
Parameter	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	Peningkatan
Periode Natural , T_n (<i>free floating</i>)	24.17 s	24.58 s	2 %
<i>Damping Ratio</i> , b_f	0.029 (2.92 %)	0.044 (4.44 %)	52 %
Massa Tambah, A_{33}	1435 ton	2536 ton	77 %
Koefisien Massa Tambah, C_a	0.043	0.073	71 %
<i>Heave Damping</i> , B_{33}	771.36 kNs/m	1192.46 kNs/m	55 %
Kekakuan <i>Heave</i> , C_{33}	5252 kN/m	5185 kN/m	-1 %

4.7 Analisis Metode *Strip Theory*

Analisis metode *Strip Theory* utamanya merupakan analisis yang digunakan untuk membandingkan hasil dari eksperimen dengan hasil dari analisis menggunakan metode *Strip Theory*. Selain pada itu, analisis ini juga digunakan untuk membuktikan apakah hasil metode *Strip Theory* dapat digunakan pada kedua kondisi SPAR yang tanpa maupun dengan *heave plate*. Hal tersebut diindikasikan dari seberapa besar *error* yang dihasilkan dari perbandingan antara hasil analisis *Strip Theory* dengan hasil metode eksperimen.

Analisis metode ini dihitung dengan bantuan program Matlab berdasarkan Persamaan (2.66). Nilai frekuensi natural yang digunakan merupakan hasil dari eksperimen. Amplitudo awal yang diberikan disamakan dengan eksperimen yaitu 1 cm dalam skala model atau 1.25 m sesuai *full scale*. Rentang waktu

yang diinput disamakan juga dengan eksperimen. *Coding script* serta data *output decay* dari Matlab ditampilkan dalam bagian Lampiran F dan G. Hasil grafik *decay* dari perhitungan *Strip Theory* terlihat seperti pada Gambar 4.21 di bawah ini.



Gambar 4.21 Grafik *Heave Decay* Hasil Perhitungan *Strip Theory*

Seperti pada analisis metode eksperimen, dalam perhitungan *Strip Theory* pun grafik *heave decay* di atas akan dianalisis untuk beberapa parameter untuk dibandingkan dengan hasil eksperimen. Tabel 4.20 menampilkan parameter-parameter hasil perhitungan *Strip Theory* yang didapatkan dengan bantuan program Matlab. Nilai-nilai yang dianalisis pun sama dengan analisis hasil eksperimen. Yaitu periode natural, *damping ratio*, *heave damping*, serta *heave added mass*. Persamaan yang digunakan untuk analisis pada program Matlab pun sama dengan analisis metode eksperimen.

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan *Strip Theory*

Parameter	SPAR	SPAR + <i>Heave Plate</i>	Peningkatan
Periode Natural <i>Heave</i> , T_n	15.844 s	16.279 s	3%
<i>Heave Damping Ratio</i> , b_f	0.029 (2.91 %)	0.043 (4.28 %)	47%
<i>Heave Damping</i> , B_{33}	770.68 kNs/m	1149.94 kNs/m	49%
<i>Heave Added Mass</i> , A_{33}	1446.59 ton	2572.34 ton	77%

Setelah mengetahui nilai-nilai seperti tampak pada Tabel 4.20 di atas, kemudian studi dilanjutkan dengan membandingkan hasil eksperimen dengan perhitungan analitis serta *Strip Theory*.

4.8 Perbandingan Hasil Studi Analisis

4.8.1 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis

Seluruh analisis baik dari percobaan eksperimen *free decay test*, perhitungan analitis, dan perhitungan *Strip Theory* telah dilakukan. Perbandingan hasil analisis terdiri dari 2 yaitu antara hasil eksperimen dengan perhitungan analitis serta hasil eksperimen dengan perhitungan *Strip Theory* yang disajikan dalam bentuk persentase perbedaan (%). Inti dari tugas akhir ini merupakan eksperimen *heave decay* pada SPAR akibat penambahan *heave plate*. Oleh karena itu perbandingan antara perhitungan analitis dan perhitungan *Strip Theory* tidak ditampilkan. Perbandingan antara hasil eksperimen dengan perhitungan analitis ditampilkan pada Tabel 4.21.

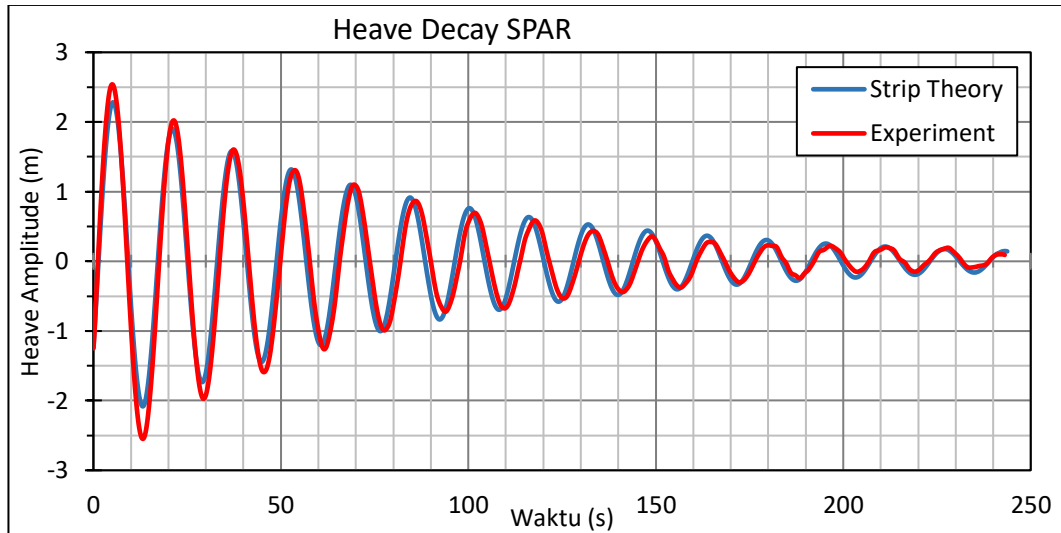
Tabel 4.21 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis

Parameter	Kondisi	Eksperimen	Analitis	Perbedaan
<i>Heave Damping Ratio, b_f</i>	SPAR	2.9150 %	2.9153 %	0.01 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	4.2755 %	4.4406 %	3.86 %
<i>Heave Added Mass, A_{33}</i>	SPAR	1488.45 ton	1435.14 ton	3.58 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	2535.69 ton	2536.24 ton	0.02 %
<i>Heave Damping, B_{33}</i>	SPAR	772.66 kNs/m	771.36 kNs/m	0.17 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	1148.15 kNs/m	1192.46 kNs/m	3.86 %

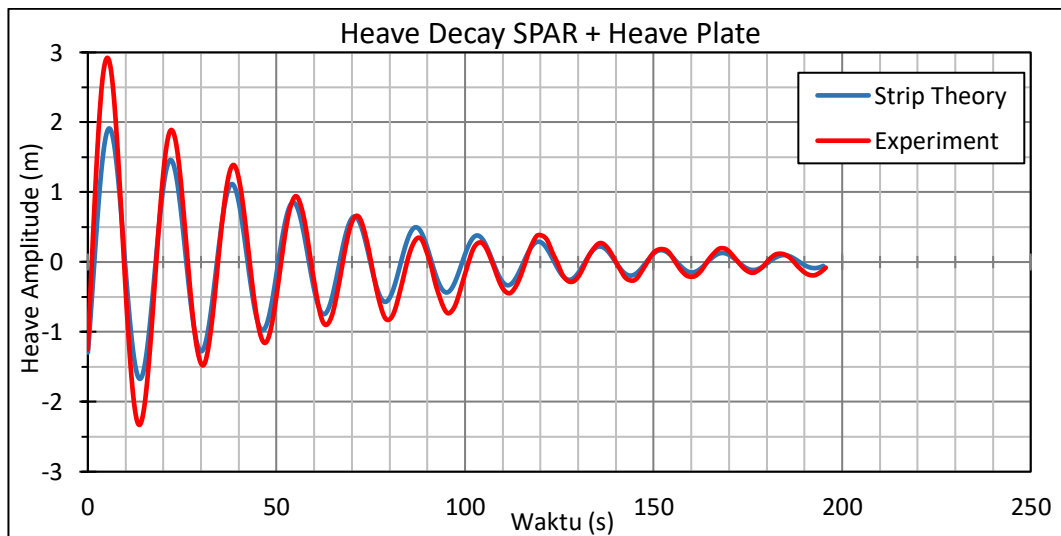
4.8.2 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan *Strip Theory*

Perbandingan hasil eksperimen dengan perhitungan *Strip Theory* dapat diketahui dengan membandingkan grafik *heave decay* yang dihasilkan dengan menganalisis puncak amplitudonya pada tiap siklus. Dengan menganalisis beberapa parameter nilai seperti *damping ratio*, *heave damping*, periode natural, dan massa tambah, maka hasil beberapa parameter itu pun dapat dibandingkan juga dengan parameter-parameter dari hasil eksperimen.

Berikutnya untuk perbandingan antara hasil eksperimen dengan perhitungan *Strip Theory* disajikan dalam grafik *decay* dan tabel. Grafik seperti pada Gambar 4.22 dan 4.23 merupakan perbandingan *heave decay* antara hasil eksperimen yang telah diubah dalam *full scale* dengan hasil perhitungan *Strip Theory*.



Gambar 4.22 Grafik *Decay* SPAR Perbandingan Eksperimen dan *Strip Theory*



Gambar 4.23 Grafik *Decay* SPAR + *Heave Plate* Perbandingan Eksperimen dan *Strip Theory*

Berikutnya dari grafik *decay* di atas, maka dianalisis bagaimana perbedaan puncak amplitudonya yang ditampilkan pada Tabel 4.22. Selain grafik tersebut, Tabel 4.23 di bawah ini menampilkan perbandingan antara hasil eksperimen dengan perhitungan *Strip Theory* untuk beberapa parameter.

Tabel 4.22 Perbandingan Amplitudo (m) Hasil Eksperimen dengan *Strip Theory*

Siklus ke-	SPAR			SPAR + <i>Heave Plate</i>		
	<i>Strip Theory</i>	Eksperimen	%	<i>Strip Theory</i>	Eksperimen	%
1	2.28	2.54	11%	1.91	2.92	53%
2	1.90	2.02	6%	1.46	1.89	29%
3	1.58	1.60	1%	1.12	1.39	24%
4	1.32	1.31	-1%	0.85	0.94	11%
5	1.10	1.10	0%	0.65	0.66	2%
6	0.91	0.87	-5%	0.50	0.35	-30%
7	0.76	0.70	-9%	0.38	0.28	-26%
8	0.63	0.59	-8%	0.29	0.39	33%
9	0.53	0.43	-18%	0.22	0.27	22%
10	0.44	0.36	-19%	0.17	0.19	9%
11	0.37	0.28	-24%	0.13	0.20	53%
12	0.31	0.23	-25%			
13	0.25	0.22	-13%			
14	0.21	0.20	-5%			
15	0.18	0.20	11%			

Dari Tabel 4.22 di atas dapat disimpulkan bahwa ternyata *Strip Theory* memiliki error yang lebih besar jika bentuk geometri struktur nya lebih kompleks. Dapat dilihat bahwa adanya penambahan *heave plate* membuat grafik *decay* hasil *Strip Theory* memiliki perbedaan puncak amplitudo yang cukup besar jika dibandingkan dengan hasil eksperimen. Terlihat pada siklus pertama dan terakhir *decay* SPAR + *Heave Plate*, puncak amplitudo *Strip Theory* memiliki perbedaan yang paling besar diantara yang lain yaitu sebesar 53%. Hal ini lah yang menyebabkan *Strip Theory* hanya berlaku untuk struktur yang bentuknya *rigid*, serta tidak mempertimbangkan pola atau kecepatan aliran viskositas fluida yang bergerak. Namun daripada itu, kita bisa meninjau bagaimana perbandingan parameter lainnya meliputi periode natural, *added mass*, dan *damping* yang terdapat pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23 Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen dengan *Strip Theory*

Parameter	Kondisi	Eksperimen	<i>Strip Theory</i>	Perbedaan
Periode Natural <i>Heave, Tn</i>	SPAR	15.840 s	15.844 s	0.03 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	16.270 s	16.279 s	0.05 %

Tabel 4.23 Perbandingan Parameter Hasil Eksperimen dengan *Strip Theory* (lanjutan)

Parameter	Kondisi	Eksperimen	<i>Strip Theory</i>	Perbedaan
<i>Heave Damping Ratio, b_f</i>	SPAR	2.915 %	2.910 %	0.17 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	4.276 %	4.280 %	0.10 %
<i>Heave Added Mass, A_{33}</i>	SPAR	1488.45 ton	1446.59 ton	2.81 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	2535.69 ton	2572.34 ton	1.45 %
<i>Heave Damping, B_{33}</i>	SPAR	772.66 kNs/m	770.68 kNs/m	0.26 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	1148.15 kNs/m	1149.94 kNs/m	0.16 %

Dari Tabel 4.23 di atas dapat disimpulkan kembali walaupun amplitudonya memiliki perbedaan yang cukup jauh pada beberapa sikus, fenomena itu tidak terlalu berpengaruh terhadap perubahan parameter yang terjadi. Perbedaan nilai parameter yang terjadi hanyalah dibawa angka 3%.

4.8.3 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis dan *Strip Theory*

Untuk memudahkan hasil akhir analisis, maka perbandingan dari ketiga metode baik dari eksperimen, analitis, dan *Strip Theory*, ditampilkan dalam Tabel 4.24.

Tabel 4.24 Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Analitis dan *Strip Theory*

Parameter	Kondisi	Eksperimen	Analitis	<i>Strip Theory</i>	% Exp. dan Analitis	% Exp. dan <i>Strip Theory</i>
Periode Natural <i>Heave</i> (s)	SPAR	15.840	-	15.844	-	0.03 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	16.270		16.279		0.05 %
<i>Heave Damping Ratio</i> (%)	SPAR	2.9150	2.9153	2.9102	0.01 %	0.17 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	4.2755	4.4406	4.2800	3.86 %	0.10 %
<i>Heave Added Mass</i> (ton)	SPAR	1488.45	1435.14	1446.59	3.58 %	2.81 %
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	2535.69	2536.24	2572.34	0.02 %	1.45 %
<i>Heave Damping</i> (kNs/m)	SPAR	772.66	771.36	770.68	0.17 %	0.26%
	SPAR + <i>Heave Plate</i>	1148.15	1192.46	1149.94	3.86 %	0.16 %

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari semua analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV, maka hasilnya haruslah menjawab dari rumusan-rumusan masalah pada tugas akhir ini. Kesimpulan dari seluruh analisis tersebut adalah

1. Studi analisis dari metode eksperimen *free decay test* menunjukkan bahwa adanya penambahan *heave plate* pada *keel* SPAR dengan rasio diameter *heave plate* sebesar 1.3x dari diameter SPAR, dapat menambah besarnya *heave damping* hingga 49%.
 - Peningkatan besarnya *heave damping* disebabkan oleh hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa adanya *heave plate* dapat mengurangi besarnya amplitudo pada tiap siklus serta mempercepat redaman yang terjadi.
 - Peningkatan nilai *heave damping* yang terjadi, sebagian besar dipengaruhi oleh adanya *linear heave damping*. Yang mana juga akan berpengaruh terhadap besarnya respon serta gaya reaksi yang terjadi pada struktur SPAR. Dari analisis tersebut, diketahui bahwa *heave plate* yang terdapat pada *keel* SPAR dapat mengurangi besarnya respon hingga 54% serta gaya reaksi hingga 35%.
2. Studi analisis metode analitis dan *Strip Theory* menunjukkan hasil yang tidak jauh dari hasil eksperimen.
 - Untuk SPAR tanpa *heave plate*, perbedaan besarnya *heave damping* antara hasil eksperimen dengan analitis dan *Strip Theory* berada dibawah 0.3%.
 - Untuk SPAR dengan *heave plate*, perbedaan *heave damping* yang terjadi antara hasil eksperimen dengan analitis adalah sebesar 4%. Sedangkan antara hasil eksperimen dengan *Strip Theory*, perbedaan besar *heave damping*-nya yaitu sebesar 0.2%.
 - Analisis metode *Strip Theory* menunjukkan bahwa metode ini hanya bisa dilakukan pada bentuk SPAR yang rigid atau silinder polos. Karena

semakin kompleks bentuk strukturnya, maka *error* yang dihasilkan pada *decay*-nya pun akan lebih besar. Hal ini terlihat pada perbandingan grafik *decay* SPAR + *Heave Plate* yang menunjukkan besar *error* amplitudonya mencapai 53% pada siklus pertama dan terakhir.

3. Dari seluruh analisis baik dari metode eksperimen, analitis, dan *Strip Theory* menunjukkan bahwa parameter *heave added mass* juga bertambah akibat dari adanya *heave plate* pada *keel* SPAR.
 - Peningkatan nilai *added mass* yang terjadi yaitu hingga 77%.
 - Peningkatan tersebut diakibatkan oleh bentuk dari *heave plate* yang ditambahkan pada arah gerakan *heave*-nya, serta perbedaan besarnya periode natural yang juga bertambah 3%.

5.2 Saran

Pada proses pengerjaan penelitian tugas akhir ini, masih banyak kekurangan yang ada, sehingga diharapkan akan terdapat penelitian-penelitian sejenis berikutnya. Beberapa saran yang diberikan penulis antara lain:

1. Uji coba eksperimen *free decay test* dilakukan minimal tiga kali percobaan.
2. Disertai eksperimen perhitungan tegangan tali tambat menggunakan *load cell*.
3. Uji coba eksperimen dengan variasi kondisi SPAR *free floating* dan tertambat.
4. Dilakukan pemodelan numerik aliran fluida di sekitar *heave plate* dengan ANSYS CFD.
5. Variasi SPAR dengan *double heave plates*.
6. Uji *free decay* dilakukan pada 3 gerakan (*surge, roll, heave*).

DAFTAR PUSTAKA

- ABS. 2003. *Guide for Building and Classing Floating Production Installation*. Texas: American Bureau of Shipping.
- Chakrabarti, S.K. 1994. *Hydrodynamics of Offshore Structure*. Dorchester: Computational Mechanics Publications.
- Chakrabarti, Subrata. 2005. *Handbook of Offshore Engineering Volume I*. USA: Elsevier.
- Chan, H. S. 1990. *A Three Dimensional Technique for Predicting First- and Second-Order Hydrodynamic Forces on a Marine Vehicle Advancing in Waves*. Thesis, Departmenr of NA & OE, University of Glasgow, UK.
- Dev, Arun dan Nigel Tan Tai Dou. 2016. *Comparative Analysis on Mooring of SPAR Platforms*. Proceedings of 7th PAAMES and AMEC2016, Hong Kong.
- Djarmiko, Eko Budi. 1992. *Hydro-structural studies on swath type vessel*. Glasgow: Glasgow Theses Service.
- Djarmiko, Eko Budi. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press.
- Dinaryo, Muhammad. 2016. *Studi Operabilitas SPAR Platform Tipe Truss di Selat Makassar dengan Sistem Tambat Taut*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Faltinsen, O.M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Finn, L. & Maher, J., 2003. *The Cell Spar for Marginal Field Development*. Marseille: Deep Offshore Technology Conference.
- Gumelar, Grandhis. 2018. *Studi Numerik dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat Taut SPAR Helical Strakes dengan Variasi Ketinggian Fairlead*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Haslum, Herbjorn Alf. 2000. *Simplified Methods Applied to Nonlinear Motion of a SPAR Platforms*. Trondheim, Norwegia: Norwegian University of Science and Technology.

- Herdayanditya, Ivandito. 2017. *Studi Analitis, Numeris, dan Eksperimen Olah Gerak dan Dinamika Tegangan Tali Tambat SPAR dengan Variasi Heading Gelombang*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Herwanzah, Fachrul. 2015. *Analisis Tegangan Dinamis Flexible Riser Akibat Gerakan Semi-Submersible Pada Kondisi Operasi*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Holmes, Samuel et al. 2001. "Heave Plate with Computational Fluid Dynamics". *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- Jain, A.K. dan Agarwal, A.K. 2002 *Dynamic Analysis of Offshore SPAR Platforms*. New Delhi: Indian Institute of Technology.
- Jameel et al. 2017. *Effect of Moorings Drag and Inertia on Response of SPAR Platform*. KSCE Journal of Civil Engineering.
- 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: 14-12-2003*.
- Journee, J.M.J. dan Massie, W.W. 2001. *Offshore Hydromechanics First Edition*. Delft University of Technology.
- Koo, B.J. et al. 2004. *Mathieu Instability of A SPAR Platform with Mooring and Risers*. Texas: Texas A&M University.
- Kurian, V. J. 2011. Effect of Slowly Varying Drift Forces on The Motion Characteristics of Truss SPAR Platforms. *Ocean Engineering 38 (2011) 1417-1429*.
- Li, Hao S et al. 2011. *China Offshore Platform*. China: IOP Conference Series
- Liew, M.s. et al. 2012. "Dynamic Responses of Truss Spar Due to Wave Actions". *Research Journal of Applied Sciences, Engineering, and Technology*. Malaysia.
- Lloyd, A. R. J. M., 1989. *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Water 1st ed*. Chichester: Ellis Horwood Limited.
- Marval, Juan Pablo. 2017. *SPAR Platform Design*. Oceanhub Post 26633.
- Munson, B. R. et al. 2013. *Fundamentals of Fluid Mechanics 7th ed*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Newman, J. N. 2017. *Marine Hydrodynamics*. Cambridge: The MIT Press.

- Philip, Nimmy Thankom et al. 2012. "Damping Characteristics of Heave Plates Attached to SPAR Hull". *Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering*. India.
- Sarpkaya, Turgut. 2010. *Wave Forces on Offshore Structures*. Cambridge University Press.
- Shen, W J dan Tang Y G. 2011. "Fracture Analysis for Torsion Problems of a SPAR Platform with Cracks under Wind Load". *Journal of Marine Science and Applications*. China.
- Soedjono, J. J. 1999. *Teknologi Produksi dan Perawatan Bangunan Laut*. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan ITS.
- Stendal, L. C. 2015. *Analysis Methods for Mooring Systems with Focus on Accidental Limit State*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Subbulakshmi, et al. 2015. *Effect of Viscous Damping on Hydrodynamic Response of SPAR with Heave Plate*. Chennai: Indian Institute of Technology Madras.
- Sudhakar, S. Dan Nallayarasu, S. 2014. "Hydrodynamic Responses of a SPAR Hull with Single and Double Heave Plates in Random Waves". *International Journal of Ocean System Engineering*. Chennai, India.
- Tao, Longbin dan Cai, Shunqing. 2004. *Heave Motion Suppression of a SPAR with a Heave Plate*. Australia: Griffith University.
- Tao, L. Dan Molin, B. 2007. "Spacing Effects on Hydrodynamics of Heave Plates on Offshore Structures". *Journal of Fluids and Structures*, 23, 1119-1136.
- Uma, P. 2017. "Heave Damping Effects Due To Circular Plates Attached at Keel To SPAR Hull". *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*.
- Wijaya, Moh. Sueni. 2011. *Analisis Tegangan Dinamis Flexible Riser Akibat Motion FPSO saat Kondisi Fully Loaded dan Ballast dengan Variasi Panjang Flexible Riser*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- MARIN Report No.22808-3-OB
https://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=307, diakses 14 Februari 2018.

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN KALIBRASI
JARI-JARI GIRASI

APPARATUS FOR MEASUREMENT OF SHIP MODEL PITCH INERTIA MOMENT

Determination of the required natural period of the oscillation table with the model to realize a specified mass distribution for the complete ballasted model

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

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

Mass of weight:	Mw =	<input type="text" value="0.653"/>	kg
Position of weight:	x =	<input type="text" value="2.000"/>	m
	z =	<input type="text" value="0.095"/>	m
Measured inclination angle due to weight:	phi =	<input type="text" value="2.723"/>	deg
	in radians: phi =	0.0475	rad
Springmoment constant: $Cy = g \cdot Mw (x / \phi - z)$	Cy =	269.013	Nm / rad

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

Measured natural period:	Tnt =	<input type="text" value="3.352"/>	s
Natural frequency:	$Wnt = 2 \cdot \pi / Tnt$	Wnt =	1.874 rad / s
Mass moment of inertia of the table:	$Iyt = Cy / Wn^2$	Iyt =	76.564 kg m ²

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

Required total mass of model:	Mm =	<input type="text" value="16.600"/>	kg
Required radius of gyration of model:	kym =	<input type="text" value="0.492"/>	m
Mass moment of inertia of the model:	$Iym = Mm \cdot ky^2$	Iym =	4.018 kg m ²

Required natural frequency of oscillation table with model:

$$Wn = (Cy / (Iyt + Iym))^{1/2} \quad Wn = 1.827 \text{ rad / s}$$

Required natural period:

$$Tn = 2 \cdot \pi / Wn$$

Tn = 3.439 s

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

Measured natural period:	Tn =	3.460	s
Measured natural frequency:	Wn =	1.816	rad/sec
"Measured" mass moment of inertia:	Iym =	5.013	kg m ²
"Measured" radius of gyration:	kym =	0.550	m

LAMPIRAN B

DATA OUTPUT EKSPERIMEN *FREE DECAY TEST*

SPAR

t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)	t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)	t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)
0	-1	0	-1.3	1.56	-0.07	17.44133022	-0.08	3.12	0.648	34.88266045	0.81
0.02	-0.86	0.223606798	-1.1	1.58	0.086	17.66493702	0.107	3.14	0.75	35.10626725	0.94
0.04	-0.67	0.447213595	-0.8	1.6	0.237	17.88854382	0.296	3.16	0.844	35.32987404	1.05
0.06	-0.47	0.670820393	-0.6	1.62	0.385	18.11215062	0.481	3.18	0.929	35.55348084	1.16
0.08	-0.27	0.894427191	-0.3	1.64	0.528	18.33575742	0.661	3.2	1.005	35.77708764	1.26
0.1	-0.08	1.118033989	-0.1	1.66	0.667	18.55936421	0.834	3.22	1.073	36.00069444	1.34
0.12	0.119	1.341640786	0.15	1.68	0.799	18.78297101	0.999	3.24	1.131	36.22430124	1.41
0.14	0.312	1.565247584	0.39	1.7	0.925	19.00657781	1.157	3.26	1.182	36.44790803	1.48
0.16	0.501	1.788854382	0.63	1.72	1.043	19.23018461	1.304	3.28	1.224	36.67151483	1.53
0.18	0.684	2.01246118	0.85	1.74	1.152	19.4537914	1.44	3.3	1.255	36.89512163	1.57
0.2	0.858	2.236067977	1.07	1.76	1.25	19.6773982	1.562	3.32	1.274	37.11872843	1.59
0.22	1.025	2.459674775	1.28	1.78	1.339	19.901005	1.673	3.34	1.283	37.34233522	1.6
0.24	1.183	2.683281573	1.48	1.8	1.415	20.1246118	1.768	3.36	1.281	37.56594202	1.61
0.26	1.328	2.906888371	1.66	1.82	1.479	20.3482186	1.849	3.38	1.269	37.78954882	1.59
0.28	1.463	3.130495168	1.83	1.84	1.532	20.57182539	1.915	3.4	1.247	38.01315562	1.56
0.3	1.586	3.354101966	1.98	1.86	1.572	20.79543219	1.965	3.42	1.217	38.23676242	1.52
0.32	1.696	3.577708764	2.12	1.88	1.6	21.01903899	1.999	3.44	1.178	38.46036921	1.47
0.34	1.791	3.801315562	2.24	1.9	1.615	21.24264579	2.019	3.46	1.129	38.68397601	1.41
0.36	1.872	4.024922359	2.34	1.92	1.618	21.46625258	2.022	3.48	1.072	38.90758281	1.34
0.38	1.937	4.248529157	2.42	1.94	1.608	21.68985938	2.01	3.5	1.006	39.13118961	1.26
0.4	1.984	4.472135955	2.48	1.96	1.585	21.91346618	1.981	3.52	0.931	39.3547964	1.16
0.42	2.015	4.695742753	2.52	1.98	1.549	22.13707298	1.936	3.54	0.849	39.5784032	1.06
0.44	2.03	4.91934955	2.54	2	1.501	22.36067977	1.877	3.56	0.762	39.80201	0.95
0.46	2.03	5.142956348	2.54	2.02	1.441	22.58428657	1.802	3.58	0.667	40.0256168	0.83
0.48	2.013	5.366563146	2.52	2.04	1.37	22.80789337	1.713	3.6	0.568	40.24922359	0.71
0.5	1.981	5.590169944	2.48	2.06	1.289	23.03150017	1.611	3.62	0.465	40.47283039	0.58
0.52	1.935	5.813776741	2.42	2.08	1.198	23.25510697	1.497	3.64	0.358	40.69643719	0.45
0.54	1.873	6.037383539	2.34	2.1	1.097	23.47871376	1.372	3.66	0.248	40.92004399	0.31
0.56	1.796	6.260990337	2.25	2.12	0.989	23.70232056	1.236	3.68	0.137	41.14365079	0.17
0.58	1.707	6.484597135	2.13	2.14	0.872	23.92592736	1.091	3.7	0.024	41.36725758	0.03
0.6	1.605	6.708203932	2.01	2.16	0.749	24.14953416	0.937	3.72	-0.09	41.59086438	-0.01
0.62	1.49	6.93181073	1.86	2.18	0.621	24.37314095	0.776	3.74	-0.2	41.81447118	-0.2
0.64	1.364	7.155417528	1.71	2.2	0.487	24.59674775	0.608	3.76	-0.31	42.03807798	-0.4
0.66	1.228	7.379024326	1.54	2.22	0.35	24.82035455	0.437	3.78	-0.41	42.26168477	-0.5
0.68	1.081	7.602631123	1.35	2.24	0.21	25.04396135	0.263	3.8	-0.52	42.48529157	-0.6
0.7	0.926	7.826237921	1.16	2.26	0.07	25.26756815	0.087	3.82	-0.62	42.70889837	-0.8
0.72	0.763	8.049844719	0.95	2.28	-0.07	25.49117494	-0.09	3.84	-0.71	42.93250517	-0.9
0.74	0.595	8.273451517	0.74	2.3	-0.21	25.71478174	-0.26	3.86	-0.8	43.15611197	-1
0.76	0.422	8.497058314	0.53	2.32	-0.35	25.93838854	-0.43	3.88	-0.88	43.37971876	-1.1
0.78	0.247	8.720665112	0.31	2.34	-0.48	26.16199534	-0.6	3.9	-0.96	43.60332556	-1.2
0.8	0.07	8.94427191	0.09	2.36	-0.61	26.38560213	-0.76	3.92	-1.03	43.82693236	-1.3
0.82	-0.11	9.167878708	-0.1	2.38	-0.74	26.60920893	-0.92	3.94	-1.09	44.05053916	-1.4
0.84	-0.28	9.391485505	-0.4	2.4	-0.85	26.83281573	-1.07	3.96	-1.14	44.27414595	-1.4
0.86	-0.46	9.615092303	-0.6	2.42	-0.97	27.05642253	-1.21	3.98	-1.19	44.49775275	-1.5
0.88	-0.63	9.838699101	-0.8	2.44	-1.07	27.28002933	-1.34	4	-1.22	44.72135955	-1.5
0.9	-0.79	10.0623059	-1	2.46	-1.17	27.50363612	-1.46	4.02	-1.25	44.94496635	-1.6
0.92	-0.95	10.2859127	-1.2	2.48	-1.26	27.72724292	-1.57	4.04	-1.27	45.16857315	-1.6
0.94	-1.1	10.50951949	-1.4	2.5	-1.33	27.95084972	-1.67	4.06	-1.27	45.39217994	-1.6
0.96	-1.24	10.73312629	-1.5	2.52	-1.4	28.17445652	-1.75	4.08	-1.27	45.61578674	-1.6
0.98	-1.37	10.95673309	-1.7	2.54	-1.46	28.39806331	-1.83	4.1	-1.26	45.83939354	-1.6
1	-1.49	11.18033989	-1.9	2.56	-1.51	28.62167011	-1.88	4.12	-1.25	46.06300034	-1.6
1.02	-1.61	11.40394669	-2	2.58	-1.54	28.84527691	-1.93	4.14	-1.22	46.28660713	-1.5
1.04	-1.71	11.62755348	-2.1	2.6	-1.57	29.06888371	-1.96	4.16	-1.19	46.51021393	-1.5
1.06	-1.8	11.85116028	-2.2	2.62	-1.58	29.29249051	-1.97	4.18	-1.15	46.73382073	-1.4
1.08	-1.87	12.07476708	-2.3	2.64	-1.58	29.5160973	-1.97	4.2	-1.11	46.95742753	-1.4
1.1	-1.93	12.29837388	-2.4	2.66	-1.56	29.7397041	-1.96	4.22	-1.05	47.18103433	-1.3
1.12	-1.98	12.52198067	-2.5	2.68	-1.54	29.9633109	-1.93	4.24	-0.98	47.40464112	-1.2
1.14	-2.01	12.74558747	-2.5	2.7	-1.51	30.1869177	-1.88	4.26	-0.91	47.62824792	-1.1
1.16	-2.03	12.96919427	-2.5	2.72	-1.46	30.41052449	-1.82	4.28	-0.83	47.85185472	-1.1
1.18	-2.04	13.19280107	-2.5	2.74	-1.4	30.63413129	-1.75	4.3	-0.75	48.07546152	-0.9
1.2	-2.03	13.41640786	-2.5	2.76	-1.34	30.85773809	-1.67	4.32	-0.66	48.29906831	-0.8
1.22	-2.01	13.64001466	-2.5	2.78	-1.26	31.08134489	-1.58	4.34	-0.57	48.52267511	-0.7
1.24	-1.97	13.86362146	-2.5	2.8	-1.18	31.30495168	-1.48	4.36	-0.48	48.74628191	-0.6
1.26	-1.92	14.08722826	-2.4	2.82	-1.09	31.52855848	-1.36	4.38	-0.38	48.96988871	-0.5
1.28	-1.86	14.31083506	-2.3	2.84	-0.99	31.75216528	-1.24	4.4	-0.29	49.1934955	-0.4
1.3	-1.78	14.53444185	-2.2	2.86	-0.89	31.97577208	-1.11	4.42	-0.19	49.4171023	-0.2
1.32	-1.69	14.75804865	-2.1	2.88	-0.78	32.19937888	-0.97	4.44	-0.09	49.6407091	-0.1
1.34	-1.6	14.98165545	-2	2.9	-0.66	32.42298567	-0.83	4.46	0.007	49.8643159	0.01
1.36	-1.49	15.20526225	-1.9	2.92	-0.55	32.64659247	-0.68	4.48	0.107	50.0879227	0.13
1.38	-1.38	15.42886904	-1.7	2.94	-0.43	32.87019927	-0.53	4.5	0.207	50.31152949	0.26
1.4	-1.25	15.65247584	-1.6	2.96	-0.3	33.09380607	-0.38	4.52	0.307	50.53513629	0.38
1.42	-1.12	15.87608264	-1.4	2.98	-0.18	33.31741286	-0.22	4.54	0.405	50.75874309	0.51
1.44	-0.98	16.09968944	-1.2	3	-0.06	33.54101966	-0.07	4.56	0.497	50.98234989	0.62
1.46	-0.84	16.32329624	-1	3.02	0.068	33.76462646	0.085	4.58	0.585	51.20595668	0.73
1.48	-0.69	16.54690303	-0.9	3.04	0.19	33.98823326	0.238	4.6	0.668	51.42956348	0.83
1.5	-0.53	16.77050983	-0.7	3.06	0.309	34.21184006	0.387	4.62	0.742	51.65317028	0.93
1.52	-0.38	16.99411663	-0.5	3.08	0.426	34.43544685	0.533	4.64	0.807	51.87677708	1.01
1.54	-0.22	17.21772343	-0.3	3.1	0.54	34.65905365	0.674	4.66	0.867	52.10038388	1.08

t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)	t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)	t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)
14.52	0.134	162.3385352	0.17	16.16	0.18	180.6742926	0.224	17.8	0.112	199.01005	0.14
14.54	0.151	162.562142	0.19	16.18	0.178	180.8978994	0.222	17.82	0.1	199.2336568	0.13
14.56	0.168	162.7857488	0.21	16.2	0.176	181.1215062	0.221	17.84	0.087	199.4572636	0.11
14.58	0.182	163.0093556	0.23	16.22	0.176	181.345113	0.22	17.86	0.073	199.6808704	0.09
14.6	0.196	163.2329624	0.24	16.24	0.176	181.5687198	0.221	17.88	0.056	199.9044772	0.07
14.62	0.207	163.4565692	0.26	16.26	0.176	181.7923266	0.219	17.9	0.04	200.128084	0.05
14.64	0.215	163.680176	0.27	16.28	0.171	182.0159334	0.214	17.92	0.024	200.3516908	0.03
14.66	0.219	163.9037828	0.27	16.3	0.163	182.2395402	0.204	17.94	0.01	200.5752976	0.01
14.68	0.222	164.1273895	0.28	16.32	0.149	182.463147	0.186	17.96	-0	200.7989044	-0.01
14.7	0.223	164.3509963	0.28	16.34	0.13	182.6867538	0.163	17.98	-0.02	201.0225112	-0
14.72	0.222	164.5746031	0.28	16.36	0.108	182.9103606	0.136	18	-0.03	201.246118	-0.1
14.74	0.222	164.7982099	0.28	16.38	0.086	183.1339674	0.108	18.02	-0.04	201.4697248	-0.1
14.76	0.221	165.0218167	0.28	16.4	0.065	183.3575742	0.081	18.04	-0.05	201.6933316	-0.1
14.78	0.218	165.2454235	0.27	16.42	0.046	183.581181	0.058	18.06	-0.07	201.9169384	-0.1
14.8	0.213	165.4690303	0.27	16.44	0.031	183.8047878	0.039	18.08	-0.08	202.1405452	-0.1
14.82	0.207	165.6926371	0.26	16.46	0.019	184.0283945	0.024	18.1	-0.09	202.364152	-0.1
14.84	0.197	165.9162439	0.25	16.48	0.008	184.2520013	0.01	18.12	-0.1	202.5877588	-0.1
14.86	0.184	166.1398507	0.23	16.5	-0	184.4756081	-0	18.14	-0.1	202.8113656	-0.1
14.88	0.168	166.3634575	0.21	16.52	-0.02	184.6992149	-0.02	18.16	-0.11	203.0349724	-0.1
14.9	0.151	166.5870643	0.19	16.54	-0.03	184.9228217	-0.04	18.18	-0.12	203.2585792	-0.1
14.92	0.132	166.8106711	0.17	16.56	-0.06	185.1464285	-0.07	18.2	-0.12	203.482186	-0.1
14.94	0.113	167.0342779	0.14	16.58	-0.08	185.3700353	-0.1	18.22	-0.12	203.7057928	-0.2
14.96	0.094	167.2578847	0.12	16.6	-0.1	185.5936421	-0.12	18.24	-0.12	203.9293995	-0.1
14.98	0.075	167.4814915	0.09	16.62	-0.12	185.8172489	-0.15	18.26	-0.12	204.1530063	-0.1
15	0.057	167.7050983	0.07	16.64	-0.13	186.0408557	-0.17	18.28	-0.11	204.3766131	-0.1
15.02	0.039	167.9287051	0.05	16.66	-0.14	186.2644625	-0.18	18.3	-0.11	204.6002199	-0.1
15.04	0.02	168.1523119	0.03	16.68	-0.15	186.4880693	-0.18	18.32	-0.1	204.8238267	-0.1
15.06	0.001	168.3759187	0	16.7	-0.15	186.7116761	-0.19	18.34	-0.1	205.0474335	-0.1
15.08	-0.02	168.5995255	-0	16.72	-0.15	186.9352829	-0.19	18.36	-0.09	205.2710403	-0.1
15.1	-0.04	168.8231323	-0	16.74	-0.16	187.1588897	-0.2	18.38	-0.08	205.4946471	-0.1
15.12	-0.06	169.0467391	-0.1	16.76	-0.16	187.3824965	-0.21	18.4	-0.07	205.7182539	-0.1
15.14	-0.08	169.2703459	-0.1	16.78	-0.17	187.6061033	-0.22	18.42	-0.06	205.9418607	-0.1
15.16	-0.1	169.4939527	-0.1	16.8	-0.18	187.8297101	-0.23	18.44	-0.05	206.1654675	-0.1
15.18	-0.12	169.7175595	-0.1	16.82	-0.19	188.0533169	-0.24	18.46	-0.03	206.3890743	-0
15.2	-0.13	169.9411663	-0.2	16.84	-0.19	188.2769237	-0.24	18.48	-0.02	206.6126811	-0
15.22	-0.15	170.1647731	-0.2	16.86	-0.19	188.5005305	-0.24	18.5	-0	206.8362879	-0
15.24	-0.16	170.3883799	-0.2	16.88	-0.19	188.7241373	-0.23	18.52	0.016	207.0598947	0.02
15.26	-0.18	170.6119867	-0.2	16.9	-0.18	188.9477441	-0.22	18.54	0.035	207.2835015	0.04
15.28	-0.19	170.8355935	-0.2	16.92	-0.16	189.1713509	-0.2	18.56	0.051	207.5071083	0.06
15.3	-0.2	171.0592003	-0.3	16.94	-0.15	189.3949577	-0.19	18.58	0.069	207.7307151	0.09
15.32	-0.21	171.2828071	-0.3	16.96	-0.14	189.6185645	-0.17	18.6	0.087	207.9543219	0.11
15.34	-0.22	171.5064139	-0.3	16.98	-0.13	189.8421713	-0.16	18.62	0.099	208.1779287	0.12
15.36	-0.23	171.7300207	-0.3	17	-0.12	190.0657781	-0.15	18.64	0.109	208.4015355	0.14
15.38	-0.24	171.9536275	-0.3	17.02	-0.12	190.2893849	-0.14	18.66	0.115	208.6251423	0.14
15.4	-0.24	172.1772343	-0.3	17.04	-0.11	190.5129917	-0.13	18.68	0.119	208.8487491	0.15
15.42	-0.24	172.4008411	-0.3	17.06	-0.1	190.7365985	-0.12	18.7	0.12	209.0723559	0.15
15.44	-0.24	172.6244479	-0.3	17.08	-0.08	190.9602053	-0.11	18.72	0.123	209.2959627	0.15
15.46	-0.24	172.8480547	-0.3	17.1	-0.07	191.1838121	-0.09	18.74	0.125	209.5195695	0.16
15.48	-0.23	173.0716615	-0.3	17.12	-0.06	191.4074189	-0.07	18.76	0.128	209.7431763	0.16
15.5	-0.22	173.2952683	-0.3	17.14	-0.04	191.6310257	-0.05	18.78	0.133	209.9667831	0.17
15.52	-0.22	173.5188751	-0.3	17.16	-0.02	191.8546325	-0.03	18.8	0.138	210.1903899	0.17
15.54	-0.21	173.7424819	-0.3	17.18	-0.01	192.0782393	-0.01	18.82	0.144	210.4139967	0.18
15.56	-0.19	173.9660886	-0.2	17.2	0.011	192.3018461	0.013	18.84	0.149	210.6376035	0.19
15.58	-0.18	174.1896954	-0.2	17.22	0.03	192.5254529	0.037	18.86	0.155	210.8612103	0.19
15.6	-0.17	174.4133022	-0.2	17.24	0.049	192.7490597	0.061	18.88	0.159	211.0848171	0.2
15.62	-0.15	174.636909	-0.2	17.26	0.067	192.9726665	0.084	18.9	0.161	211.3084239	0.2
15.64	-0.14	174.8605158	-0.2	17.28	0.085	193.1962733	0.106	18.92	0.161	211.5320307	0.2
15.66	-0.12	175.0841226	-0.1	17.3	0.1	193.4198801	0.125	18.94	0.16	211.7556375	0.2
15.68	-0.1	175.3077294	-0.1	17.32	0.11	193.6434869	0.138	18.96	0.157	211.9792443	0.2
15.7	-0.08	175.5313362	-0.1	17.34	0.117	193.8670936	0.147	18.98	0.154	212.2028511	0.19
15.72	-0.06	175.754943	-0.1	17.36	0.122	194.0907004	0.153	19	0.151	212.4264579	0.19
15.74	-0.04	175.9785498	-0.1	17.38	0.125	194.3143072	0.156	19.02	0.148	212.6500647	0.18
15.76	-0.02	176.2021566	-0	17.4	0.127	194.537914	0.159	19.04	0.145	212.8736715	0.18
15.78	-0	176.4257634	-0	17.42	0.13	194.7615208	0.163	19.06	0.141	213.0972783	0.18
15.8	0.017	176.6493702	0.02	17.44	0.136	194.9851276	0.17	19.08	0.135	213.3208851	0.17
15.82	0.036	176.872977	0.04	17.46	0.144	195.2087344	0.179	19.1	0.126	213.5444919	0.16
15.84	0.053	177.0965838	0.07	17.48	0.152	195.4323412	0.19	19.12	0.114	213.7680986	0.14
15.86	0.07	177.3201906	0.09	17.5	0.16	195.655948	0.2	19.14	0.099	213.9917054	0.12
15.88	0.086	177.5437974	0.11	17.52	0.167	195.8795548	0.208	19.16	0.081	214.2153122	0.1
15.9	0.101	177.7674042	0.13	17.54	0.173	196.1031616	0.216	19.18	0.065	214.438919	0.08
15.92	0.115	177.991011	0.14	17.56	0.176	196.3267684	0.22	19.2	0.049	214.6625258	0.06
15.94	0.129	178.2146178	0.16	17.58	0.177	196.5503752	0.222	19.22	0.035	214.8861326	0.04
15.96	0.143	178.4382246	0.18	17.6	0.177	196.773982	0.221	19.24	0.024	215.1097394	0.03
15.98	0.154	178.6618314	0.19	17.62	0.174	196.9975888	0.217	19.26	0.016	215.3333462	0.02
16	0.164	178.8854382	0.21	17.64	0.169	197.2211956	0.211	19.28	0.01	215.556953	0.01
16.02	0.172	179.109045	0.21	17.66	0.163	197.4448024	0.204	19.3	0.005	215.7805598	0.01
16.04	0.177	179.3326518	0.22	17.68	0.156	197.6684092	0.195	19.32	-0	216.0041666	-0.01
16.06	0.181	179.5562586	0.23	17.7	0.149	197.892016	0.186	19.34	-0.01	216.2277734	-0
16.08	0.184	179.7798654	0.23	17.72	0.143	198.1156228	0.179	19.36	-0.02	216.4513802	-0
16.1	0.184	180.0034722	0.23	17.74	0.136	198.3392296	0.171	19.38	-0.03	216.674987	-0
16.12	0.183	180.227079	0.23	17.76	0.129	198.5628364	0.161	19.4	-0.04	216.8985938	-0.1
16.14	0.182	180.4506858	0.23	17.78	0.121	198.7864432	0.152	19.42	-0.06	217.1222006	-0.1

t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)
13.08	-0.15	146.2388457	-0.2
13.1	-0.13	146.4624525	-0.2
13.12	-0.11	146.6860593	-0.1
13.14	-0.1	146.9096661	-0.1
13.16	-0.08	147.1332729	-0.1
13.18	-0.07	147.3568797	-0.1
13.2	-0.05	147.5804865	-0.1
13.22	-0.04	147.8040933	-0
13.24	-0.02	148.0277001	-0
13.26	-0.01	148.2513069	-0
13.28	0.01	148.4749137	0.01
13.3	0.026	148.6985205	0.03
13.32	0.042	148.9221273	0.05
13.34	0.058	149.1457341	0.07
13.36	0.073	149.3693409	0.09
13.38	0.087	149.5929477	0.11
13.4	0.099	149.8165545	0.12
13.42	0.11	150.0401613	0.14
13.44	0.119	150.2637681	0.15
13.46	0.125	150.4873749	0.16
13.48	0.131	150.7109817	0.16
13.5	0.137	150.9345885	0.17
13.52	0.141	151.1581953	0.18
13.54	0.144	151.3818021	0.18
13.56	0.147	151.6054089	0.18
13.58	0.148	151.8290157	0.19
13.6	0.149	152.0526225	0.19
13.62	0.148	152.2762293	0.19
13.64	0.147	152.4998361	0.18
13.66	0.145	152.7234429	0.18
13.68	0.143	152.9470497	0.18
13.7	0.14	153.1706565	0.18
13.72	0.135	153.3942633	0.17
13.74	0.129	153.6178701	0.16
13.76	0.121	153.8414769	0.15
13.78	0.111	154.0650836	0.14
13.8	0.099	154.2886904	0.12
13.82	0.086	154.5122972	0.11
13.84	0.072	154.735904	0.09
13.86	0.057	154.9595108	0.07
13.88	0.041	155.1831176	0.05
13.9	0.026	155.4067244	0.03
13.92	0.01	155.6303312	0.01
13.94	-0	155.853938	-0
13.96	-0.02	156.0775448	-0
13.98	-0.03	156.3011516	-0
14	-0.05	156.5247584	-0.1
14.02	-0.06	156.7483652	-0.1
14.04	-0.08	156.971972	-0.1
14.06	-0.09	157.1955788	-0.1
14.08	-0.1	157.4191856	-0.1
14.1	-0.11	157.6427924	-0.1
14.12	-0.12	157.8663992	-0.2
14.14	-0.13	158.090006	-0.2
14.16	-0.14	158.3136128	-0.2
14.18	-0.15	158.5372196	-0.2
14.2	-0.16	158.7608264	-0.2
14.22	-0.16	158.9844332	-0.2
14.24	-0.16	159.20804	-0.2
14.26	-0.17	159.4316468	-0.2
14.28	-0.17	159.6552536	-0.2
14.3	-0.17	159.8788604	-0.2
14.32	-0.17	160.1024672	-0.2
14.34	-0.17	160.326074	-0.2
14.36	-0.17	160.5496808	-0.2
14.38	-0.16	160.7732876	-0.2
14.4	-0.16	160.9968944	-0.2
14.42	-0.15	161.2205012	-0.2
14.44	-0.15	161.444108	-0.2
14.46	-0.14	161.6677148	-0.2
14.48	-0.13	161.8913216	-0.2
14.5	-0.12	162.1149284	-0.2
14.52	-0.11	162.3385352	-0.1
14.54	-0.1	162.562142	-0.1
14.56	-0.09	162.7857488	-0.1
14.58	-0.08	163.0093556	-0.1

t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)
14.6	-0.06	163.2329624	-0.08
14.62	-0.04	163.4565692	-0.06
14.64	-0.03	163.680176	-0.04
14.66	-0.01	163.9037828	-0.02
14.68	0.001	164.1273895	0.001
14.7	0.015	164.3509963	0.019
14.72	0.028	164.5746031	0.035
14.74	0.04	164.7982099	0.05
14.76	0.052	165.0218167	0.066
14.78	0.064	165.2454235	0.08
14.8	0.075	165.4690303	0.094
14.82	0.086	165.6926371	0.108
14.84	0.097	165.9162439	0.121
14.86	0.107	166.1398507	0.133
14.88	0.116	166.3634575	0.146
14.9	0.126	166.5870643	0.158
14.92	0.135	166.8106711	0.169
14.94	0.144	167.0342779	0.18
14.96	0.15	167.2578847	0.188
14.98	0.155	167.4814915	0.194
15	0.158	167.7050983	0.197
15.02	0.159	167.9287051	0.199
15.04	0.159	168.1523119	0.199
15.06	0.158	168.3759187	0.198
15.08	0.157	168.5995255	0.197
15.1	0.155	168.8231323	0.194
15.12	0.152	169.0467391	0.19
15.14	0.147	169.2703459	0.184
15.16	0.141	169.4939527	0.176
15.18	0.133	169.7175595	0.166
15.2	0.124	169.9411663	0.155
15.22	0.114	170.1647731	0.143
15.24	0.104	170.3883799	0.13
15.26	0.093	170.6119867	0.116
15.28	0.082	170.8355935	0.102
15.3	0.07	171.0592003	0.088
15.32	0.059	171.2828071	0.074
15.34	0.047	171.5064139	0.059
15.36	0.036	171.7300207	0.045
15.38	0.025	171.9536275	0.031
15.4	0.013	172.1772343	0.017
15.42	0.002	172.4008411	0.002
15.44	-0.01	172.6244479	-0.01
15.46	-0.02	172.8480547	-0.03
15.48	-0.03	173.0716615	-0.04
15.5	-0.04	173.2952683	-0.05
15.52	-0.05	173.5188751	-0.07
15.54	-0.06	173.7424819	-0.08
15.56	-0.07	173.9660886	-0.09
15.58	-0.08	174.1896954	-0.1
15.6	-0.09	174.4133022	-0.11
15.62	-0.1	174.636909	-0.12
15.64	-0.1	174.8605158	-0.13
15.66	-0.11	175.0841226	-0.14
15.68	-0.11	175.3077294	-0.14
15.7	-0.12	175.5313362	-0.15
15.72	-0.12	175.754943	-0.15
15.74	-0.12	175.9785498	-0.15
15.76	-0.12	176.2021566	-0.15
15.78	-0.12	176.4257634	-0.15
15.8	-0.12	176.6493702	-0.15
15.82	-0.12	176.872977	-0.15
15.84	-0.11	177.0965838	-0.14
15.86	-0.11	177.3201906	-0.13
15.88	-0.1	177.5437974	-0.13
15.9	-0.09	177.7674042	-0.12
15.92	-0.09	177.991011	-0.11
15.94	-0.08	178.2146178	-0.1
15.96	-0.07	178.4382246	-0.09
15.98	-0.07	178.6618314	-0.08
16	-0.06	178.8854382	-0.07
16.02	-0.05	179.109045	-0.06
16.04	-0.04	179.3326518	-0.05
16.06	-0.02	179.5562586	-0.03
16.08	-0.01	179.7798654	-0.02
16.1	-0	180.0034722	-0

t model (s)	z(cm)	t full scale (s)	z(m)
16.12	0.011	180.227079	0.01
16.14	0.021	180.4506858	0.03
16.16	0.031	180.6742926	0.04
16.18	0.04	180.8978994	0.05
16.2	0.049	181.1215062	0.06
16.22	0.057	181.345113	0.07
16.24	0.065	181.5687198	0.08
16.26	0.073	181.7923266	0.09
16.28	0.079	182.0159334	0.1
16.3	0.085	182.2395402	0.11
16.32	0.089	182.463147	0.11
16.34	0.092	182.6867538	0.11
16.36	0.094	182.9103606	0.12
16.38	0.095	183.1339674	0.12
16.4	0.096	183.3575742	0.12
16.42	0.10	183.581181	0.12
16.44	0.095	183.8047878	0.12
16.46	0.095	184.0283945	0.12
16.48	0.093	184.2520013	0.12
16.5	0.09	184.4756081	0.11
16.52	0.087	184.6992149	0.11
16.54	0.083	184.9228217	0.1
16.56	0.078	185.1464285	0.1
16.58	0.073	185.3700353	0.09
16.6	0.068	185.5936421	0.08
16.62	0.061	185.8172489	0.08
16.64	0.054	186.0408557	0.07
16.66	0.046	186.2644625	0.06
16.68	0.037	186.4880693	0.05
16.7	0.027	186.7116761	0.03
16.72	0.017	186.9352829	0.02
16.74	0.006	187.1588897	0.01
16.76	-0.01	187.3824965	-0
16.78	-0.02	187.6061033	-0
16.8	-0.03	187.8297101	-0
16.82	-0.04	188.0533169	-0.1
16.84	-0.05	188.2769237	-0.1
16.86	-0.06	188.5005305	-0.1
16.88	-0.07	188.7241373	-0.1
16.9	-0.08	188.9477441	-0.1
16.92	-0.09	189.1713509	-0.1
16.94	-0.1	189.3949577	-0.1
16.96	-0.11	189.6185645	-0.1
16.98	-0.11	189.8421713	-0.1
17	-0.12	190.0657781	-0.2
17.02	-0.13	190.2893849	-0.2
17.04	-0.13	190.5129917	-0.2
17.06	-0.14	190.7365985	-0.2
17.08	-0.14	190.9602053	-0.2
17.1	-0.15	191.1838121	-0.2
17.12	-0.15	191.4074189	-0.2
17.14	-0.15	191.6310257	-0.2
17.16	-0.15	191.8546325	-0.2
17.18	-0.15	192.0782393	-0.2
17.2	-0.15	192.3018461	-0.2
17.22	-0.15	192.5254529	-0.2
17.24	-0.15	192.7490597	-0.2
17.26	-0.15	192.9726665	-0.2
17.28	-0.14	193.1962733	-0.2
17.3	-0.14	193.4198801	-0.2
17.32	-0.13	193.6434869	-0.2
17.34	-0.13	193.8670936	-0.2
17.36	-0.12	194.0907004	-0.2
17.38	-0.11	194.3143072	-0.1
17.4	-0.11	194.537914	-0.1
17.42	-0.1	194.7615208	-0.1
17.44	-0.09	194.9851276	-0.1
17.46	-0.08	195.2087344	-0.1
17.48	-0.07	195.4323412	-0.1
17.5	-0.06	195.655948	-0.1
17.48	195.4	-0.034516842	-0
17.5	195.7	-0.029397111	-0

LAMPIRAN C
CODING MATLAB
PENGOLAHAN DATA EKSPERIMEN

```

clear;clc;close all

filename = uigetfile('D*.xls','Pilih File');
A = xlsread(filename);
t = A(2:end,1);q = A(2:end,2);

k = 1:length(q); sfr = 1/(t(2)-t(1));
lenk = length(q);

jup = find( ( q(1:lenk-1) < 0 ) & ( q(2:lenk) > 0 ) );
njup = length( jup );
nwave = njup - 1 ;
xf1 = k(jup) + q(jup)' ./ ( q(jup)' - q(1+jup)' );
T1 = diff( xf1 );
T = T1 / sfr ;
Tn = mean(T);
for ii=1:nwave
    jj = [ jup(ii) : jup(ii+1) ] ;
    [ y2max(ii), x2max(ii) ] = max( q(jj) ) ;
    [ y2min(ii), x2min(ii) ] = min( q(jj) ) ;
end
Q=[y2max',y2min'];
%-----
for i=1:length(Q)
    pmax = find(q==y2max(i));
    pmaxi(i)=pmax(end);
    pmin = find(q==y2min(i));
    pmini(i)=pmin(end);
end

% qp qm dqm lihat di buku futai no ryutai riki gaku
%positif
qp = Q(:,1);
qm = abs((qp(1:end-1)+qp(2:end))/2);
dqm= abs(qp(1:end-1)-qp(2:end));

%negatif
qn = Q(:,2);
qmn = abs((qn(1:end-1)+qn(2:end))/2);
dqmn= abs(qn(1:end-1)-qn(2:end));

y0 = y2max(1); yn = y2max(end);
py0= find(y2max==y0);
n = length(y2max)-py0;
d=1/n*log(y0/yn);
s=1/sqrt(1+(2*pi/d)^2);

plot(t,q,t(pmaxi),y2max,'o',t(pmini),y2min,'o');grid
text(10,1.2,['Tn = ',num2str(Tn),' sec, Damp.ratio = ',num2str(s)]);

X = 0:0.25:3;
p1 = polyfit(qm,dqm./qm,1)
a = p1(1); b = p1(2); % y = ax + b
Y = a*X + b;

```

```

figure(2)
h=plot(qm,dqm./qm,'ko',X,Y,'k-');
pn = {'Linewidth'};
pv = {2};
set(h,pn,pv);
set(gca,'FontWeight','bold','FontSize',12,'LineWidth',2);
grid;xlabel('\phi_m','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('\Delta\phi / \phi_m','FontWeight','bold','FontSize',14);

p2 = polyfit([qm;qmn;0],[dqm;dqmn;0],2)
a = p2(2); b = p2(1);
Y = b*X.^2 + a*X; % y = bx^2 + ax

Nm = dqm./qm.^2;
NmN = dqmn./qmn.^2;
N = a./X(2:end) + b;

figure(3)
h=plot(qm,dqm,'ko',qmn,dqmn,'ks',X,Y,'k-');
pn = {'Linewidth'};
pv = {2};
set(h,pn,pv);
set(gca,'FontWeight','bold','FontSize',12,'LineWidth',2);
legend('maxima','minima');
grid;xlabel('\phi_m','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('\Delta\phi','FontWeight','bold','FontSize',14);
text(0.5,0.7,['\Delta\phi = ',num2str(b),'\phi_m^2+
',num2str(abs(a)),'\phi_m'],'FontWeight','bold','FontSize',14);

k = log(qp(1:end-1)./qp(2:end));
figure(4)
plot(qm,k,'o');

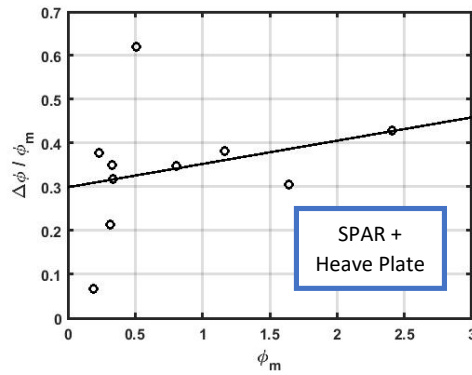
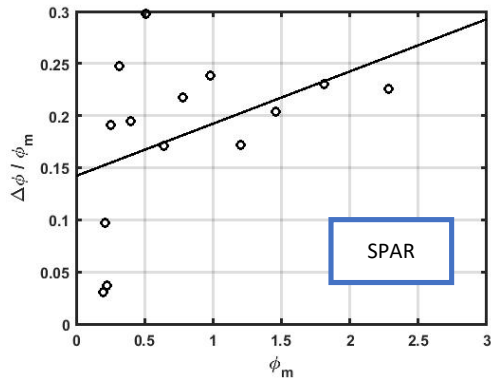
XY = [X',Y']
XN= [(X(2:end))',N']
qm,qmn,dqm,dqmn,Nm,NmN = [qm,qmn,dqm,dqmn,Nm,NmN]

```


LAMPIRAN D
TABEL PERHITUNGAN
PENGOLAHAN DATA EKSPERIMEN

HASIL PENGOLAHAN DATA EKSPERIMEN

➤ Grafik PQ Analysis



PERHITUNGAN TOTAL

Parameter	Tanpa Heave Plate	Dengan Heave Plate
Logarithmic Decrement (δ) =	0.18	0.27
Draught + plate=	139.875	
Draught=	139.25	139.875
Skala=	125	
N =	15	11
Amp.Punc -1 =	0.2012	0.1986
Amp.Punc =	0.1951	0.1858
H-D=	15	
Tebal Heave Plate (Model)=	0.005	
Tebal Heave Plate (Full Scale)=	0.625	
Ds=	17.5	
Dd=	22.75	
Model kg M=	16.358	16.503
Full Scale kg M=	31949218.8	32232421.9
t M=	31949.22	32232.42
z=	4.63	
Aw=	240.53	
Displacement=	28251.10	28534.30
A33=	1435	2536
p=	0.1421	0.2992
q=	5.571	8.693

TABEL PERHITUNGAN ANALISIS RESPON

SPAR				SPAR + Heave Plate			
ωn	bf			ωn	bf		
0.397	0.029			0.386	0.043		
$\zeta z_0 / \zeta z_s$	ω	$\omega / \omega n$	ϵz	$\zeta z_0 / \zeta z_s$	ω	$\omega / \omega n$	ϵz
1.00	0.0	0.00	0.00	1.00	0.0	0.00	0.00
1.07	0.1	0.25	0.90	1.07	0.1	0.26	1.36
1.34	0.2	0.50	2.26	1.37	0.2	0.52	3.47
2.32	0.3	0.76	5.89	2.51	0.3	0.78	9.52
16.33	0.4	1.01	106.18	10.57	0.4	1.04	129.41
1.68	0.5	1.26	172.89	1.47	0.5	1.29	170.70
0.77	0.6	1.51	176.08	0.71	0.6	1.55	174.63
0.47	0.7	1.76	177.21	0.44	0.7	1.81	176.12
0.33	0.8	2.02	177.80	0.30	0.8	2.07	176.92
0.24	0.9	2.27	178.17	0.23	0.9	2.33	177.42
0.19	1.0	2.52	178.43	0.18	1.0	2.59	177.78
0.15	1.1	2.77	178.62	0.14	1.1	2.85	178.04
0.12	1.2	3.03	178.76	0.12	1.2	3.11	178.24
0.10	1.3	3.28	178.88	0.10	1.3	3.37	178.40
0.09	1.4	3.53	178.97	0.08	1.4	3.63	178.54
0.08	1.5	3.78	179.05	0.07	1.5	3.88	178.65
0.07	1.6	4.03	179.12	0.06	1.6	4.14	178.74

TABEL PERHITUNGAN HEAVE DAMPING DARI EKSPERIMEN FREE DECAY TEST

SPAR

Fungsi amplitudo puncak (peak - up):

Cycle (n)	Time (s)	Amplitude (m)	Interval time per cycle (s)	Logarithmic Decrement	Damping Ratio (ζ)	Heave Frequency (damped) (rad/s)	Heave Frequency (undamped) (rad/s)	Natural Heave Period (undamped) (s)	Heave Added Mass (ton)	Coeff. Added Mass	Heave Damping	Coeff. Damping
0	5.367	2.538	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	21.913	2.022	16.547	0.227	0.036	0.380	0.380	16.536	4492.015	0.123	999.433	0.014
2	36.672	1.604	14.758	0.229	0.036	0.426	0.426	14.748	-2962.070	0.102	900.765	0.016
3	54.113	1.308	17.441	0.221	0.035	0.360	0.360	17.431	8540.784	0.211	1026.198	0.013
4	69.989	1.101	15.876	0.209	0.033	0.396	0.396	15.867	1603.896	0.048	882.727	0.013
5	86.312	0.866	16.323	0.215	0.034	0.385	0.385	16.314	3518.487	0.099	934.372	0.013
6	102.188	0.696	15.876	0.216	0.034	0.396	0.396	15.867	1601.444	0.048	911.427	0.014
7	121.307	0.586	19.118	0.209	0.033	0.329	0.329	19.108	16707.882	0.343	1065.373	0.011
8	133.717	0.434	12.410	0.221	0.035	0.506	0.507	12.403	-11449.565	0.559	728.851	0.018
9	149.369	0.357	15.652	0.218	0.035	0.401	0.402	15.643	662.246	0.020	907.471	0.014
10	164.798	0.279	15.429	0.221	0.035	0.407	0.407	15.419	-263.959	0.008	907.379	0.014
11	180.451	0.230	15.652	0.218	0.035	0.401	0.402	15.643	662.087	0.020	909.305	0.014
12	196.998	0.222	16.547	0.203	0.032	0.380	0.380	16.538	4501.449	0.123	894.873	0.012
13	211.979	0.201	14.982	0.195	0.031	0.419	0.420	14.974	-2066.004	0.069	777.765	0.013
14	228.303	0.195	16.323	0.183	0.029	0.385	0.385	16.316	3529.847	0.099	772.661	0.011

SPAR + Heave Plate

Fungsi amplitudo puncak (peak - up):

Cycle (n)	Time (s)	Amplitude (m)	Interval time per cycle (s)	Logarithmic Decrement	Damping Ratio (ζ)	Heave Frequency (damped) (rad/s)	Heave Frequency (undamped) (rad/s)	Natural Heave Period (undamped) (s)	Heave Added Mass (ton)	Coeff. Added Mass	Heave Damping (kNs/m)	Coeff. Damping
0	5.143	2.922	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	22.137	1.890	16.994	0.436	0.069	0.370	0.371	16.953	5517.836	0.146	1935.648	0.026
2	38.684	1.388	16.547	0.372	0.059	0.380	0.380	16.518	3603.474	0.101	1612.057	0.022
3	55.231	0.942	16.547	0.377	0.060	0.380	0.380	16.517	3600.017	0.100	1633.988	0.023
4	71.331	0.662	16.100	0.371	0.059	0.390	0.391	16.072	1693.282	0.050	1563.840	0.023
5	87.654	0.349	16.323	0.425	0.068	0.385	0.386	16.286	2604.226	0.075	1815.335	0.026
6	103.977	0.281	16.323	0.390	0.062	0.385	0.386	16.292	2629.341	0.075	1667.004	0.024
7	119.853	0.387	15.876	0.289	0.046	0.396	0.396	15.859	802.755	0.024	1201.512	0.018
8	135.953	0.272	16.100	0.297	0.047	0.390	0.391	16.082	1735.823	0.051	1252.319	0.018
9	152.053	0.186	16.100	0.306	0.049	0.390	0.391	16.081	1730.948	0.051	1291.875	0.019
10	167.929	0.199	15.876	0.269	0.043	0.396	0.396	15.862	811.989	0.025	1148.148	0.017

SUMMARY OF EXPERIMENT CALCULATION

	SPAR	SPAR + Heave Plate
Damping Ratio	= 0.0292	0.0428
Natural Heave Period (s)	= 15.8414	16.270131
A33 (ton)	= 1488.4512	2535.6851
B33 (kNs/m)	= 772.6608	1148.148
Gaya kekakuan SPAR (kN/m)	5261.207	5261.21

Tabel Gaya Reaksi diambil sampel hanya sampai rentang waktu 0.4 s pada setiap pada tiap 0.02 s
Yang sebenarnya sampai pada rentang waktu 17.5 s (Model)

Tabel Gaya Reaksi Eksperimen SPAR

Model				Full Scale													
t(sec)	z (cm)	z' (cm/s)	z'' (cm/s ²)	t (sec)	z (m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	SUM S	3232985 F3*S	2.58E+08 t*F3*S	4.76E+11 t*F3^2*S	1.45E+20 t*F3^4*S	F3^2
0	-1	0	0	0	-1.25	0	0	0	0	-6576.5	-6576.5	1	6576.509	0	0	0	43250467
0.02	-0.86	6.9995	349.975	0.22361	-1.08	0.7826	3.49975	117023	604.66	-5655.9	111972	4	447889.1	100151.1	1.12E+10	1.41E+20	1.25E+10
0.04	-0.667	9.6495	132.5	0.44721	-0.83	1.0788	1.325	44304.9	833.583	-4386.7	40751.8	2	81503.67	36449.55	1.49E+09	2.47E+18	1.66E+09
0.06	-0.472	9.758	5.425	0.67082	-0.59	1.091	0.05425	1813.99	842.956	-3103.2	-446.24	4	1784.969	1197.393	534327.5	1.06E+11	199132.1
0.08	-0.275	9.85	4.6	0.89443	-0.34	1.1013	0.046	1538.13	850.903	-1807.6	581.417	2	1162.834	1040.07	604714.1	2.04E+11	338045.5
0.1	-0.077	9.8833	1.665	1.11803	-0.1	1.105	0.01665	556.737	853.78	-507.67	902.85	4	3611.4	4037.668	3645408	2.97E+12	815138.1
0.12	0.119	9.8107	-3.63	1.34164	0.149	1.0969	-0.0363	-1213.8	847.508	782.736	416.457	2	832.9137	1117.471	465378.4	8.07E+10	173436.3
0.14	0.312	9.6295	-9.06	1.56525	0.39	1.0766	-0.0906	-3029.5	831.855	2049.31	-148.29	4	593.168	928.4547	137682.4	3.03E+09	21990.52
0.16	0.501	9.45	-8.975	1.78885	0.626	1.0565	-0.08975	-3001	816.349	3292.27	1107.58	2	2215.168	3962.613	4388926	5.38E+12	1226742
0.18	0.684	9.145	-15.25	2.01246	0.854	1.0224	-0.1525	-5099.2	790.001	4495.11	185.866	4	743.4631	1496.191	278090.6	9.61E+09	34546.08
0.2	0.858	8.74	-20.25	2.23607	1.073	0.9772	-0.2025	-6771.1	755.015	5644.68	-371.43	2	742.8607	1661.087	616978.2	8.51E+10	137960.5
0.22	1.025	8.3295	-20.525	2.45967	1.281	0.9313	-0.20525	-6863.1	719.553	6740.26	596.735	4	2386.941	5871.097	3503490	1.25E+12	356092.8
0.24	1.183	7.88	-22.475	2.68328	1.478	0.881	-0.22475	-7515.1	680.723	7776.72	942.328	2	1884.656	5057.062	4765410	4.23E+12	887981.7
0.26	1.328	7.295	-29.25	2.90689	1.661	0.8156	-0.2925	-9780.5	630.187	8736.23	-414.1	4	1656.39	4814.942	1993856	3.42E+11	171476.8
0.28	1.463	6.715	-29	3.1305	1.828	0.7508	-0.29	-9696.9	580.083	9619.46	502.618	2	1005.236	3146.885	1581680	4E+11	252624.6
0.3	1.586	6.16	-27.75	3.3541	1.982	0.6887	-0.2775	-9279	532.138	10429.7	1682.87	4	6731.481	22578.07	37995967	1.08E+14	2832052
0.32	1.696	5.495	-33.25	3.57771	2.12	0.6144	-0.3325	-11118	474.692	11152.4	509.11	2	1018.22	3642.894	1854634	4.81E+11	259192.9
0.34	1.791	4.77	-36.25	3.80132	2.239	0.5333	-0.3625	-12121	412.062	11779.8	70.7488	4	282.9953	1075.755	76108.38	3.81E+08	5005.398
0.36	1.872	4.025	-37.25	4.02492	2.34	0.45	-0.3725	-12456	347.704	12309.3	201.423	2	402.8469	1621.427	326593.5	1.33E+10	40571.4
0.38	1.937	3.24	-39.25	4.24853	2.421	0.3622	-0.3925	-13124	279.891	12735.4	-108.99	4	435.9411	1852.109	201852.6	2.4E+09	11877.79
0.4	1.984	2.38	-43	4.47214	2.48	0.2661	-0.43	-14378	205.599	13048.5	-1124.1	2	2248.296	10054.69	11302957	1.43E+13	1263709

Tabel Gaya Reaksi Eksperimen SPAR + Heave Plate

Model				Full Scale													
t(sec)	z(cm)	z' (cm/s)	z'' (cm/s ²)	t (sec)	z (m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	SUM S	1798476 F3*S	1.37E+08 t*F3*S	1.46E+11 t*F3^2*S	1.35E+18 t*F3^4*S	F3^2
0	-1	0	0	0	-1.25	0	0	0	0	-6481.5	-6481.5	1	6481.502	0	0	0	42009874
0.02	-0.76	12.016	600.8	0.22361	-0.95	1.3434	6.008	-29066	1327.83	-3583	-31321	4	125285.1	28014.61	8.77E+08	8.61E+17	9.81E+08
0.04	-0.553	10.344	-83.6	0.44721	-0.69	1.1565	-0.836	1347.26	1337.77	-2232	453.004	2	906.0076	405.1789	183547.6	3.77E+10	205212.5
0.06	-0.344	10.422	3.875	0.67082	-0.43	1.1652	0.03875	-999.58	1330.39	-888.55	-557.74	4	2230.955	1496.57	834694.9	2.6E+11	311072.4
0.08	-0.137	10.364	-2.875	0.89443	-0.17	1.1587	-0.02875	-1150	1321.9	446.362	618.309	2	1236.617	1106.064	683888.9	2.61E+11	382305.5
0.1	0.069	10.298	-3.3075	1.11803	0.086	1.1513	-0.03307	-1090	1313.85	1773.14	1997.02	4	7988.072	8930.936	17835239	7.11E+13	3988081
0.12	0.274	10.235	-3.135	1.34164	0.342	1.1443	-0.03135	-1506.3	1302.73	3088.7	2885.1	2	5770.195	7741.529	22335065	1.86E+14	8323787
0.14	0.477	10.149	-4.3325	1.56525	0.596	1.1346	-0.04333	-4884.9	1266.66	4367.82	749.56	4	2998.24	4692.989	3517677	1.98E+12	561840.3
0.16	0.674	9.8675	-14.05	1.78885	0.842	1.1032	-0.1405	-3346.4	1241.95	5621.99	3517.51	2	7035.018	12584.62	44266523	5.48E+14	12372869
0.18	0.867	9.675	-9.625	2.01246	1.084	1.0817	-0.09625	-5901.9	1198.37	6832.15	2128.63	4	8514.535	17135.17	36474508	1.65E+14	4531082
0.2	1.054	9.3355	-16.975	2.23607	1.318	1.0437	-0.16975	-7657.7	1141.82	7985.21	1469.36	2	2938.716	6571.17	9655402	2.08E+13	2159013
0.22	1.232	8.895	-22.025	2.45967	1.54	0.9945	-0.22025	-8605.1	1078.28	9074.1	1547.28	4	6189.112	15223.2	23554530	5.64E+13	2394070
0.24	1.4	8.4	-24.75	2.68328	1.75	0.9391	-0.2475	-7649	1021.8	10106	3478.77	2	6957.55	18669.06	64945473	7.86E+14	12101874
0.26	1.559	7.96	-22	2.90689	1.949	0.89	-0.22	-11213	939.003	11054.2	780.491	4	3121.964	9075.202	7083114	4.31E+12	609166.4
0.28	1.706	7.315	-32.25	3.1305	2.132	0.8178	-0.3225	-11300	855.565	11918.2	1474.12	2	2948.233	9229.43	13605257	2.96E+13	2173020
0.3	1.839	6.665	-32.5	3.3541	2.299	0.7452	-0.325	-12256	765.066	12690.8	1200.09	4	4800.361	16100.9	19322533	2.78E+13	1440217
0.32	1.958	5.96	-35.25	3.57771	2.448	0.6663	-0.3525	-14863	655.313	13352.5	-855.51	2	1711.02	6121.531	5237031	3.83E+12	731897.4
0.34	2.06	5.105	-42.75	3.80132	2.575	0.5708	-0.4275	-15385	541.708	13899.6	-943.6	4	3774.39	14347.65	13538402	1.21E+13	890376.1
0.36	2.145	4.22	-44.25	4.02492	2.681	0.4718	-0.4425	-13820	439.656	14434.6	962.899	2	1925.797	7751.185	7463606	6.92E+12	927173.9
0.38	2.213	3.425	-39.75	4.24853	2.766	0.3829	-0.3975	-13560	339.53	14686.4	1466.4	4	5865.619	24920.26	36543184	7.86E+13	2150343
0.4	2.266	2.645	-39	4.47214	2.832	0.2957	-0.39	-13125	242.613	14931.4	2049.09	2	4098.18	18327.62	37554941	1.58E+14	4198770

SUMMARY

	SPAR	SPAR + Heave Plate	%
m0	237495.74	131888	
m1	18981944.58	10082329	
m2	35023537021	1.07E+10	
m4	1.07229E+19	9.88E+16	
Fs	1379.16	1023.60	26%
Favg	1218.34	904.24	26%
F1/10	1760.50	1306.63	26%
Frms	1344.25	875.22	35%
Feks	3992.46	2909.71	27%
Fmax	4063.961103	3598.878	11%

LAMPIRAN E

TABEL PERHITUNGAN ANALITIS

Full Scaled Calculation

Simpangan awal saat t = 0 sekon:	-1.25 m
Densitas fluida (kg/m ³)	1.025 ton/m ³
Percepatan Gravitasi (m/s ²)	9.81 m/s ²
Diameter SPAR	17.5 m
Diameter Heave Plate	22.75 m
Tebal Heave Plate	0.625 m
Massa SPAR	31949.2 ton
Massa Heave Plate	283.203 ton
Gaya kekakuan SPAR (kN/m)	5251.87 kN/m
Gaya kekakuan SPAR + Heave Plate (kN/m)	5185.20 kN/m
Tinggi SPAR (m)	154.25 m
Draft SPAR (m)	139.25 m

Hasil Analitis	SPAR	SPAR + Heave Plate
Natural Period <i>free floating</i> (s)	24.172	24.576
SPAR + HEAVE PLATE (A33) (ton)	1435.140	2536.245
Damping Ratio	0.029	0.044
Damping (B33) (kNs/m)	771.360	1192.464

Tabel Gaya Reaksi diambil sampel hanya sampai rentang waktu 24.15 s pada setiap pada tiap 0.22 s Yang sebenarnya sampai pada rentang waktu 200 s (*Full Scale*)

Tabel Gaya Reaksi Analitis SPAR

t(sec)	z(m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	Damping Ratio
0.000	-1.250	0.000	0.000	0.000	0.000	-6564.843	-6564.843	-
0.224	-1.075	0.783	3.500	116836.910	604.115	-5645.831	111795.193	0.02915
0.447	-0.834	1.079	1.325	44234.276	832.831	-4378.882	40688.225	0.02915
0.671	-0.590	1.091	0.054	1811.101	842.196	-3097.687	-444.390	0.02915
0.894	-0.344	1.101	0.046	1535.681	850.136	-1804.413	581.404	0.02915
1.118	-0.096	1.105	0.017	555.850	853.010	-506.767	902.093	0.02915
1.342	0.149	1.097	-0.036	-1211.852	846.744	781.348	416.240	0.02915
1.565	0.390	1.077	-0.091	-3024.623	831.105	2045.671	-147.847	0.02915
1.789	0.626	1.057	-0.090	-2996.246	815.613	3286.426	1105.793	0.02915
2.012	0.854	1.022	-0.152	-5091.115	789.289	4487.136	185.310	0.02915
2.236	1.073	0.977	-0.203	-6760.333	754.334	5634.671	-371.328	0.02915
2.460	1.281	0.931	-0.205	-6852.140	718.904	6728.308	595.073	0.02915
2.683	1.478	0.881	-0.225	-7503.135	680.109	7762.927	939.902	0.02915
2.907	1.661	0.816	-0.293	-9764.925	629.619	8720.738	-414.568	0.02915
3.130	1.828	0.751	-0.290	-9681.464	579.560	9602.397	500.492	0.02915
3.354	1.982	0.689	-0.277	-9264.160	531.659	10411.185	1678.684	0.02915
3.578	2.120	0.614	-0.333	-11100.299	474.264	11132.662	506.626	0.02915
3.801	2.239	0.533	-0.362	-12101.830	411.690	11758.948	68.808	0.02915
4.025	2.340	0.450	-0.372	-12435.674	347.391	12287.418	199.135	0.02915
4.249	2.421	0.362	-0.392	-13103.361	279.639	12712.819	-110.903	0.02915
4.472	2.480	0.266	-0.430	-14355.274	205.414	13025.306	-1124.555	0.02915
4.696	2.519	0.17274	-0.4175	-13937.97	133.348	13228.16	-576.46209	0.02915
4.919	2.538	0.08385	-0.3975	-13270.283	64.7321	13326.63	121.081717	0.02915
5.143	2.537	-0.0028	-0.3875	-12936.439	-2.1577	13323.35	384.753054	0.02915
5.367	2.516	-0.0934	-0.405	-13520.665	-72.068	13213.72	-379.01677	0.02915

Tabel Gaya Reaksi Analitis SPAR + Heave Plate

t(sec)	z(m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	Damping Ratio
0.000	-1.250	0.000	0.000	0.000	0.000	-6481.502	-6481.502	-
0.224	-0.950	1.343	6.008	208890.149	1542.441	-4923.868	205508.722	0.04441
0.447	-0.691	1.156	-0.836	-29066.605	1327.814	-3582.975	-31321.766	0.04441
0.671	-0.430	1.165	0.039	1347.286	1337.762	-2232.035	453.013	0.04441
0.894	-0.171	1.159	-0.029	-999.599	1330.381	-888.549	-557.767	0.04441
1.118	0.086	1.151	-0.033	-1149.974	1321.890	446.362	618.278	0.04441
1.342	0.342	1.144	-0.031	-1089.998	1313.842	1773.145	1996.988	0.04441
1.565	0.596	1.135	-0.043	-1506.352	1302.719	3088.695	2885.061	0.04441
1.789	0.842	1.103	-0.140	-4884.998	1266.648	4367.820	749.470	0.04441
2.012	1.084	1.082	-0.096	-3346.484	1241.938	5621.990	3517.444	0.04441
2.236	1.318	1.044	-0.170	-5901.981	1198.357	6832.152	2128.528	0.04441
2.460	1.540	0.994	-0.220	-7657.799	1141.812	7985.211	1469.225	0.04441
2.683	1.750	0.939	-0.247	-8605.245	1078.271	9074.103	1547.130	0.04441
2.907	1.949	0.890	-0.220	-7649.107	1021.790	10105.959	3478.642	0.04441
3.130	2.132	0.818	-0.322	-11212.895	938.995	11054.202	780.302	0.04441
3.354	2.299	0.745	-0.325	-11299.817	855.557	11918.187	1473.927	0.04441
3.578	2.448	0.666	-0.353	-12255.955	765.059	12690.782	1199.886	0.04441
3.801	2.575	0.571	-0.427	-14863.605	655.307	13352.543	-855.755	0.04441
4.025	2.681	0.472	-0.442	-15385.135	541.703	13899.582	-943.850	0.04441
4.249	2.766	0.383	-0.398	-13820.545	439.652	14343.565	962.672	0.04441
4.472	2.832	0.296	-0.390	-13559.780	339.527	14686.436	1466.184	0.04441
4.696	2.88	0.21131	-0.3775	-13125.172	242.6133	14931.44	2048.8788	0.04441
4.919	2.91	0.1364	-0.335	-11647.503	156.6075	15089.59	3598.69003	0.04441
5.143	2.922	0.05478	-0.365	-12690.563	62.89973	15153.1	2525.44099	0.04441
5.367	2.915	-0.0313	-0.385	-13385.937	-35.9427	15116.81	1694.9288	0.04441

Tabel Gaya Reaksi Analitis SPAR (lanjutan)

t(sec)	z(m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	Damping Ratio
5.59	2.477	-0.1761	-0.37	-12352.213	-135.94	13006.92	518.774219	0.02915
5.814	2.418	-0.2611	-0.38	-12686.056	-201.53	12700.35	-187.24275	0.02915
6.037	2.341	-0.3455	-0.3775	-12602.595	-266.7	12294.64	-574.65282	0.02915
6.261	2.245	-0.4276	-0.3675	-12268.752	-330.13	11792.43	-806.45721	0.02915
6.485	2.134	-0.497	-0.31	-10349.151	-383.65	11208.81	476.016977	0.02915
6.708	2.006	-0.5747	-0.3475	-11601.065	-443.63	10533.95	-1510.7475	0.02915
6.932	1.862	-0.6412	-0.2975	-9931.8468	-494.98	9780.96	-645.8712	0.02915
7.155	1.705	-0.7032	-0.2775	-9264.1596	-542.89	8955.103	-851.94308	0.02915
7.379	1.535	-0.7597	-0.2525	-8429.5506	-586.47	8062.941	-953.08261	0.02915
7.603	1.351	-0.8229	-0.2825	-9431.0814	-635.24	7096.596	-2969.7232	0.02915
7.826	1.157	-0.8682	-0.20275	-6768.6788	-670.24	6077.01	-1361.9049	0.02915
8.05	0.954	-0.9078	-0.17725	-5917.3776	-700.83	5010.879	-1607.331	0.02915
8.273	0.743	-0.9421	-0.15325	-5116.153	-727.29	3904.506	-1938.9333	0.02915
8.497	0.528	-0.9653	-0.1035	-3455.2811	-745.15	2770.955	-1429.4791	0.02915
8.721	0.309	-0.9788	-0.06075	-2028.0998	-755.64	1621.451	-1162.2884	0.02915
8.944	0.088	-0.9876	-0.039175	-1307.8323	-762.4	461.6595	-1608.5744	0.02915
9.168	-0.133	-0.9895	-0.0084	-280.42861	-763.85	-700.3375	-1744.6178	0.02915
9.391	-0.353	-0.9843	0.023325	778.690171	-759.83	-1856.209	-1837.3446	0.02915
9.615	-0.571	-0.9732	0.0495	1652.52576	-751.28	-2999.083	-2097.838	0.02915
9.839	-0.782	-0.9421	0.13925	4648.77197	-727.24	-4105.391	-183.86204	0.02915
10.06	-0.987	-0.9164	0.11475	3830.85518	-707.44	-5181.565	-2058.1456	0.02915
10.29	-1.183	-0.8774	0.1745	5825.57063	-677.31	-6211.918	-1063.6603	0.02915
10.51	-1.37	-0.8377	0.17725	5917.37761	-646.72	-7195.725	-1925.0641	0.02915
10.73	-1.547	-0.7893	0.2165	7227.7137	-609.34	-8122.681	-1504.3119	0.02915
10.96	-1.715	-0.7513	0.17	5675.34101	-580	-9004.996	-3909.6544	0.02915
11.18	-1.869	-0.6887	0.28	9347.62049	-531.67	-9813.785	-997.8303	0.02915
11.4	-2.01	-0.6328	0.25	8346.08972	-488.51	-10556.92	-2699.3466	0.02915
11.63	-2.136	-0.5646	0.305	10182.2295	-435.86	-11219.97	-1473.6073	0.02915
11.85	-2.247	-0.4947	0.3125	10432.6122	-381.92	-11800.96	-1750.2699	0.02915
12.07	-2.34	-0.4142	0.36	12018.3692	-319.78	-12287.42	-588.8249	0.02915
12.3	-2.416	-0.341	0.3275	10933.3775	-263.24	-12687.87	-2017.7393	0.02915
12.52	-2.475	-0.2644	0.3425	11434.1429	-204.12	-12998.39	-1768.3691	0.02915
12.75	-2.517	-0.1873	0.345	11517.6038	-144.57	-13218.31	-1845.2769	0.02915
12.97	-2.541	-0.1096	0.3475	11601.0647	-84.583	-13346.98	-1830.5019	0.02915
13.19	-2.549	-0.0358	0.33	11016.8384	-27.619	-13389	-2399.7789	0.02915
13.42	-2.54	0.04249	0.35	11684.5256	32.7976	-13339.11	-1621.7823	0.02915
13.64	-2.513	0.12131	0.3525	11767.9865	93.6458	-1335.065	-1335.065	0.02915
13.86	-2.467	0.20516	0.375	12519.1346	158.378	-12955.72	-278.20619	0.02915
14.09	-2.404	0.2823	0.345	11517.6038	217.931	-12624.19	-888.65883	0.02915
14.31	-2.324	0.35777	0.3375	11267.2211	276.19	-12204.04	-660.63266	0.02915
14.53	-2.228	0.42933	0.32	10682.9948	331.428	-11699.86	-685.4409	0.02915
14.76	-2.117	0.49529	0.295	9848.38587	382.351	-11118.22	-887.48216	0.02915

Tabel Gaya Reaksi Analitis SPAR + Heave Plate (lanjutan)

t(sec)	z(m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	Damping Ratio
5.59	2.89	-0.114	-0.37	-12864.407	-130.934	14984.59	1989.24472	0.04441
5.814	2.844	-0.2052	-0.4075	-14168.232	-235.553	14746.71	342.929634	0.04441
6.037	2.778	-0.2946	-0.4	-13907.467	-338.247	14405.14	159.426011	0.04441
6.261	2.693	-0.379	-0.3775	-13125.172	-435.163	13965.69	405.358206	0.04441
6.485	2.592	-0.4517	-0.325	-11299.817	-518.602	13441.99	1623.56938	0.04441
6.708	2.472	-0.5389	-0.39	-13559.78	-618.728	12817.17	-1361.3369	0.04441
6.932	2.337	-0.6043	-0.2925	-10169.835	-693.823	12116.52	1252.86311	0.04441
7.155	2.186	-0.6731	-0.3075	-10691.365	-772.768	11336.15	-127.98537	0.04441
7.379	2.024	-0.7273	-0.2425	-8431.4016	-835.026	10492.9	1226.47659	0.04441
7.603	1.848	-0.786	-0.2625	-9126.775	-902.419	9581.605	-447.58856	0.04441
7.826	1.663	-0.8257	-0.1775	-6171.4383	-947.989	8624.287	1504.85997	0.04441
8.05	1.469	-0.867	-0.185	-6432.2033	-995.485	7619.006	191.318228	0.04441
8.273	1.269	-0.8983	-0.14	-4867.6133	-1031.43	6577.429	678.388077	0.04441
8.497	1.06	-0.9315	-0.1485	-5163.147	-1069.55	5497.351	-735.3481	0.04441
8.721	0.848	-0.9482	-0.0745	-2590.2657	-1088.68	4397.959	719.014132	0.04441
8.944	0.632	-0.966	-0.0795	-2764.109	-1109.09	3277.955	-595.24314	0.04441
9.168	0.414	-0.976	-0.04475	-1555.8978	-1120.58	2146.35	-530.12632	0.04441
9.391	0.197	-0.9723	0.0165	573.682998	-1116.34	1019.022	476.362892	0.04441
9.615	-0.019	-0.9652	0.031525	1096.08221	-1108.25	-100.1327	-112.29891	0.04441
9.839	-0.233	-0.9563	0.03995	1389.00823	-1097.99	-1208.93	-917.91349	0.04441
10.06	-0.442	-0.936	0.091025	3164.81787	-1074.62	-2294.128	-203.93262	0.04441
10.29	-0.646	-0.9084	0.12325	4285.23815	-1042.98	-3347.372	-105.11407	0.04441
10.51	-0.843	-0.8819	0.1185	4120.08699	-1012.56	-4369.894	-1262.3641	0.04441
10.73	-1.032	-0.8441	0.169	5875.90465	-969.169	-5348.601	-441.86536	0.04441
10.96	-1.211	-0.8047	0.17625	6127.97748	-923.92	-6281.613	-1077.5555	0.04441
11.18	-1.38	-0.7549	0.22275	7744.72048	-866.733	-7156.875	-278.88718	0.04441
11.4	-1.538	-0.7072	0.2135	7423.11031	-811.92	-7976.785	-1365.5948	0.04441
11.63	-1.684	-0.6513	0.25	8692.16664	-747.737	-8731.88	-787.45008	0.04441
11.85	-1.817	-0.5948	0.2525	8779.08831	-682.911	-9421.512	-1325.335	0.04441
12.07	-1.935	-0.5272	0.3025	10517.5216	-605.249	-10032.72	-120.44547	0.04441
12.3	-2.039	-0.4668	0.27	9387.53997	-535.931	-10573.92	-1722.3145	0.04441
12.52	-2.128	-0.3969	0.3125	10865.2083	-455.702	-11034.11	-624.60361	0.04441
12.75	-2.201	-0.3259	0.3175	11039.0516	-374.189	-11411.98	-747.11895	0.04441
12.97	-2.257	-0.2521	0.33	11473.66	-289.467	-11704.3	-520.10428	0.04441
13.19	-2.298	-0.1834	0.3075	10691.365	-210.522	-11916.89	-1436.047	0.04441
13.42	-2.323	-0.1084	0.335	11647.5033	-124.516	-12042.63	-519.64403	0.04441
13.64	-2.331	-0.0375	0.3175	11039.0516	-43.0029	-12086.06	-1090.0088	0.04441
13.86	-2.323	0.0341	0.32	11125.9733	39.15188	-12046.52	-881.39526	0.04441
14.09	-2.3	0.10342	0.31	10778.2866	118.7393	-11926.61	-1029.5867	0.04441
14.31	-2.262	0.17162	0.305	10604.4433	197.043	-11727.63	-926.14416	0.04441
14.53	-2.209	0.23479	0.2825	9822.14831	269.5703	-11455.41	-1363.6888	0.04441
14.76	-2.143	0.29796	0.2825	9822.14831	342.0975	-11109.94	-945.69749	0.04441

Tabel Gaya Reaksi Analitis SPAR (lanjutan)

t(sec)	z(m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	Damping Ratio
14.98	-1.995	0.54392	0.2175	7261.09806	419.896	-10479.46	-2798.4661	0.02915
15.21	-1.863	0.59424	0.225	7511.48075	458.735	-9781.617	-1811.4013	0.02915
15.43	-1.719	0.64231	0.215	7177.63716	495.848	-9027.316	-1353.8313	0.02915
15.65	-1.566	0.68591	0.195	6509.94998	529.509	-8221.81	-1182.3515	0.02915
15.88	-1.403	0.7284	0.19	6343.02819	562.306	-7366.411	-461.07657	0.02915
16.1	-1.23	0.77172	0.19375	6468.21953	595.751	-6460.134	603.836332	0.02915
16.32	-1.049	0.81052	0.1735	5792.18627	625.7	-5508.298	909.589104	0.02915
16.55	-0.861	0.84154	0.13875	4632.0798	649.651	-4520.026	761.705046	0.02915
16.77	-0.669	0.85932	0.0795	2654.05653	663.374	-3510.878	-193.44727	0.02915
16.99	-0.474	0.87145	0.05425	1811.10147	672.739	-2487.485	-3.6443077	0.02915
17.22	-0.278	0.87335	0.0085	283.767051	674.206	-1461.859	-503.88597	0.02915
17.44	-0.084	0.86855	-0.021475	-716.92911	670.499	-441.8731	-488.30282	0.02915
17.66	0.107	0.85662	-0.053375	-1781.8902	661.286	564.0973	-556.50705	0.02915
17.89	0.296	0.84547	-0.049825	-1663.3757	652.685	1556.984	546.293315	0.02915
18.11	0.481	0.82483	-0.092325	-3082.2109	636.748	2525.627	80.1636775	0.02915
18.34	0.661	0.80331	-0.09625	-3213.2445	620.133	3468.995	875.883508	0.02915
18.56	0.834	0.77737	-0.116	-3872.5856	600.11	4381.902	1109.42576	0.02915
18.78	0.999	0.73746	-0.1785	-5959.1081	569.297	5247.936	-141.87499	0.02915
19.01	1.157	0.70347	-0.152	-5074.4226	543.059	6074.056	1542.69235	0.02915
19.23	1.304	0.65774	-0.2045	-6827.1014	507.759	6846.475	527.132422	0.02915
19.45	1.44	0.60765	-0.224	-7478.0964	469.092	7560.074	551.069274	0.02915
19.68	1.562	0.54728	-0.27	-9013.7769	422.485	8202.772	-388.52016	0.02915
19.9	1.673	0.49753	-0.2225	-7428.0199	384.077	8787.043	1743.10024	0.02915
20.12	1.768	0.42541	-0.3225	-10766.456	328.407	9286.628	-1151.4207	0.02915
20.35	1.849	0.36001	-0.2925	-9764.925	277.916	9709.404	222.394999	0.02915
20.57	1.915	0.29404	-0.295	-9848.3859	226.994	10054.71	433.322289	0.02915
20.8	1.965	0.22696	-0.3	-10015.308	175.208	10321.25	481.147466	0.02915
21.02	1.999	0.15261	-0.3325	-11100.299	117.812	10500.47	-482.01976	0.02915
21.24	2.019	0.08665	-0.295	-9848.3859	66.8898	10602.22	820.726192	0.02915
21.47	2.022	0.01621	-0.315	-10516.073	12.5149	10621.26	117.702102	0.02915
21.69	2.01	-0.0576	-0.33	-11016.838	-44.449	10553.64	-507.64541	0.02915
21.91	1.981	-0.1291	-0.32	-10682.995	-99.687	10401.99	-380.68776	0.02915
22.14	1.936	-0.1979	-0.3075	-10265.69	-152.77	10169.6	-248.85905	0.02915
22.36	1.877	-0.2678	-0.3125	-10432.612	-206.71	9855.143	-784.18026	0.02915
22.58	1.802	-0.3349	-0.3	-10015.308	-258.5	9461.909	-811.89557	0.02915
22.81	1.713	-0.3963	-0.275	-9180.6987	-305.97	8996.462	-490.20421	0.02915
23.03	1.611	-0.4545	-0.26	-8679.9333	-350.85	8462.74	-568.04152	0.02915
23.26	1.497	-0.5115	-0.255	-8513.0115	-394.87	7862.057	-1045.8207	0.02915
23.48	1.372	-0.5601	-0.2175	-7261.0981	-432.41	7204.259	-489.2492	0.02915
23.7	1.236	-0.6075	-0.212	-7077.4841	-469.01	6490.792	-1055.6976	0.02915
23.93	1.091	-0.65	-0.18975	-6334.6821	-501.76	5727.498	-1108.9444	0.02915
24.15	0.937	-0.6875	-0.16775	-5600.2262	-530.72	4920.153	-1210.7898	0.02915

Tabel Gaya Reaksi Analitis SPAR + Heave Plate (lanjutan)

t(sec)	z(m)	z' (m/s)	z'' (m/s ²)	FA (kN)	FB (kN)	FC (kN)	F3 (kN)	Damping Ratio
14.98	-2.063	0.35553	0.2575	8952.93164	408.2064	-10697.72	-1336.5817	0.04441
15.21	-1.971	0.41311	0.2575	8952.93164	474.3153	-10218.74	-791.48976	0.04441
15.43	-1.867	0.46622	0.2375	8257.55831	535.2896	-9678.179	-885.33155	0.04441
15.65	-1.751	0.51709	0.2275	7909.87165	593.6965	-9078.64	-575.07235	0.04441
15.88	-1.624	0.56684	0.2225	7736.02831	650.8197	-8421.416	-34.568105	0.04441
16.1	-1.488	0.60933	0.19	6606.04665	699.5991	-7714.932	-409.28662	0.04441
16.32	-1.344	0.64399	0.155	5389.14332	739.3928	-6968.263	-839.72716	0.04441
16.55	-1.192	0.67781	0.15125	5258.76082	778.2238	-6182.381	-145.39653	0.04441
16.77	-1.034	0.70783	0.13425	4667.69349	812.6902	-5361.693	118.690467	0.04441
16.99	-0.872	0.72566	0.07975	2772.80116	833.1647	-4520.329	-914.36352	0.04441
17.22	-0.705	0.7469	0.095	3303.02332	857.5544	-3654.336	506.241875	0.04441
17.44	-0.534	0.76334	0.0735	2555.49699	876.4244	-2769.287	662.634622	0.04441
17.66	-0.362	0.77005	0.03	1043.06	884.1264	-1876.46	50.7265959	0.04441
17.89	-0.189	0.77139	0.006	208.611999	885.6668	-982.0772	112.201521	0.04441
18.11	-0.017	0.77271	0.005925	206.004349	887.1879	-86.15861	1007.03366	0.04441
18.34	0.154	0.76157	-0.04985	-1733.218	874.3897	796.8359	-61.992371	0.04441
18.56	0.321	0.74852	-0.058325	-2027.8825	859.4158	1664.709	496.242369	0.04441
18.78	0.485	0.73131	-0.077	-2677.1873	839.6473	2512.619	675.079182	0.04441
19.01	0.643	0.70962	-0.097	-3372.5607	814.7441	3335.381	777.56461	0.04441
19.23	0.796	0.6844	-0.11275	-3920.1672	785.7974	4128.911	994.54174	0.04441
19.45	0.943	0.65534	-0.13	-4519.9267	752.422	4888.738	1121.2334	0.04441
19.68	1.082	0.62286	-0.14525	-5050.1488	715.1315	5610.907	1275.88968	0.04441
19.9	1.214	0.58898	-0.1515	-5267.453	676.2363	6293.798	1702.58147	0.04441
20.12	1.336	0.54538	-0.195	-6779.89	626.1733	6926.134	772.4168	0.04441
20.35	1.447	0.49864	-0.209	-7266.6513	572.516	7504.284	810.148161	0.04441
20.57	1.548	0.45113	-0.2125	-7388.3416	517.9601	8027.341	1156.95918	0.04441
20.8	1.637	0.39746	-0.24	-8344.48	456.344	8488.176	600.039609	0.04441
21.02	1.713	0.33932	-0.26	-9039.8533	389.5933	8881.603	231.342737	0.04441
21.24	1.777	0.28454	-0.245	-8518.3233	326.6935	9211.511	1019.88148	0.04441
21.47	1.826	0.22305	-0.275	-9561.3833	256.0918	9470.123	164.831683	0.04441
21.69	1.862	0.15876	-0.2875	-9995.9916	182.2809	9654.198	-159.51289	0.04441
21.91	1.883	0.09503	-0.285	-9909.07	109.1118	9764.383	-35.574764	0.04441
22.14	1.89	0.03186	-0.2825	-9822.1483	36.58454	9801.328	15.7642215	0.04441
22.36	1.884	-0.0302	-0.2775	-9648.305	-34.659	9766.328	83.3638644	0.04441
22.58	1.865	-0.0833	-0.2375	-8257.5583	-95.6333	9669.753	1316.56191	0.04441
22.81	1.834	-0.1392	-0.25	-8692.1666	-159.817	9508.364	656.380763	0.04441
23.03	1.791	-0.1917	-0.235	-8170.6366	-220.149	9286.049	895.26283	0.04441
23.26	1.736	-0.2443	-0.235	-8170.6366	-280.481	9002.807	551.688775	0.04441
23.48	1.67	-0.2946	-0.225	-7822.95	-338.247	8661.232	500.0352	0.04441
23.7	1.592	-0.3494	-0.245	-8518.3233	-401.146	8256.138	-663.33177	0.04441
23.93	1.503	-0.3986	-0.22	-7649.1066	-457.628	7794.007	-312.72762	0.04441
24.15	1.404	-0.4433	-0.2	-6953.7333	-508.974	7280.024	-182.68416	0.04441

LAMPIRAN F
CODING MATLAB
PENGOLAHAN DATA STRIP THEORY

- PROGRAM UNTUK Mencari Damping Ratio dari Strip Theory

```

clear;clc;close all

%spar% oa=-1; v=0.129; w0=4.43446; t=21.8;
%spar+heaveplate% oa=-1; v=0.185; w0=4.32; t=17.5;

oa=-1;%Amplitudo Awal
v=0.185; %dari Persamaan (2.62)
w0=4.32; %Frekuensi Natural dari Eksperimen
t=0:0.02:17.5; %Waktu yang disamakan dengan Eksperimen

q=oa*exp(-v.*t).*(cos(w0*t)+v/w0.*sin(w0*t));%Persamaan (2.66)

%A = xlsread('Decay-SPAR-H-A2.xls'); %SPAR
A = xlsread('Decay-SPAR-H-B-2.xls'); %SPAR+Heave Plate

t1=A(:,1);
r1=A(:,2);

plot(t,q,t1,r1,'r');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
k = 1:length(q); sfr = 1/(t(2)-t(1));
lenk = length(q);

jup = find( ( q(1:lenk-1) < 0 ) & ( q(2:lenk) > 0 ) );
njup = length( jup );
nwave = njup - 1 ;
xf1 = k(jup) + q(jup)' ./ ( q(jup)' - q(1+jup)' );
T1 = diff( xf1 );
T = T1 / sfr ;
Tn = mean(T);
for ii=1:nwave
    jj = [ jup(ii) : jup(ii+1) ] ;
    [ y2max(ii), x2max(ii) ] = max( q(jj) ) ;
    [ y2min(ii), x2min(ii) ] = min( q(jj) ) ;
end
Q=[y2max',y2min'];
%-----
for i=1:length(Q)
    pmax = find(q==y2max(i));
    pmxi(i)=pmax(end);
    pmin = find(q==y2min(i));
    pmini(i)=pmin(end);
end

% qp qm dqm lihat di buku futai no ryutai riki gaku
%positif
qp = Q(:,1);
qm = abs((qp(1:end-1)+qp(2:end))/2);
dqm= abs(qp(1:end-1)-qp(2:end));

%negatif
qn = Q(:,2);
qmn = abs((qn(1:end-1)+qn(2:end))/2);
dqmn= abs(qn(1:end-1)-qn(2:end));

```

```

y0 = y2max(1); yn = y2max(end);
py0= find(y2max==y0);
n = length(y2max)-py0;
d=1/n*log(y0/yn);
s=1/sqrt(1+(2*pi/d)^2); %cari damping ratio

plot(t,q,t(pmaxi),y2max,'o',t(pmini),y2min,'o');grid
text(10,1.2,['                                Damp.ratio =
',num2str(s)]);

X = 0:0.25:3;
p1 = polyfit(qm,dqm./qm,1)
a = p1(1); b = p1(2); % y = ax + b
Y = a*X + b;
figure(2)
h=plot(qm,dqm./qm,'ko',X,Y,'k-');
pn = {'Linewidth'};
pv = {2};
set(h,pn,pv);
set(gca,'FontWeight','bold','FontSize',12,'LineWidth',2);
grid;xlabel('\phi_m','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('\Delta\phi / \phi_m','FontWeight','bold','FontSize',14);

p2 = polyfit([qm;qmn;0],[dqm;dqmn;0],2)
a = p2(2); b = p2(1);
Y = b*X.^2 + a*X; % y = bx^2 + ax

Nm = dqm./qm.^2;
NmN = dqmn./qmn.^2;
N = a./X(2:end) + b;

figure(3)
h=plot(qm,dqm,'ko',qmn,dqmn,'ks',X,Y,'k-');
pn = {'Linewidth'};
pv = {2};
set(h,pn,pv);
set(gca,'FontWeight','bold','FontSize',12,'LineWidth',2);
legend('maxima','minima');
grid;xlabel('\phi_m','FontWeight','bold','FontSize',14);
ylabel('\Delta\phi','FontWeight','bold','FontSize',14);
text(0.5,0.7,['\Delta\phi = ',num2str(b),'\phi_m^2+
',num2str(abs(a)),'\phi_m'],'FontWeight','bold','FontSize',14);

k = log(qp(1:end-1)./qp(2:end));
figure(4)
plot(qm,k,'o');

XY = [X',Y']
XN= [(X(2:end))',N']
qm,qmn,dqm,dqmn,Nm,NmN = [qm,qmn,dqm,dqmn,Nm,NmN]

```

- PROGRAM UNTUK Mencari PERIODE NATURAL DARI STRIP THEORY

```

clear;clc;close all

%spar% oa=-1; v=0.129; w0=4.43446; t=21.8;
%spar+heaveplate% oa=-1; v=0.185; w0=4.32; t=17.5;

oa=-1;%Amplitudo Awal
v=0.185; %dari Persamaan (2.62)
w0=4.32; %Frekuensi Natural dari Eksperimen
t=0:0.02:17.5; %Waktu yang disamakan dengan Eksperimen

q=oa*exp(-v.*t).*(cos(w0*t)+v/w0.*sin(w0*t));%Persamaan (2.66)

%A = xlsread('Decay-SPAR-H-A2.xls'); %SPAR
A = xlsread('Decay-SPAR-H-B-2.xls'); %SPAR+Heave Plate

t1=A(:,1);
r1=A(:,2);

plot(t,y,t1,r1,'r');

tor = [t',y'];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
sfr = 1/(t(2)-t(1));
n=length(y);
k = find(y(1:n-1)<0 & y(2:n)>0);
nk = length(k);
nwave = nk-1; %cari periode

for i=1:nwave
    j = k(i):k(i+1);
    ymax(i) = max(y(j)); %cari amplitudo
end

nymax = length(ymax);

for i=1:nymax
    pymax(i) = find(y==ymax(i));
end

dymax = diff(pymax);
tnymax = dymax/sfr;
tn=mean(tnymax); %periode natural model
tn_s=tn*sqrt(125);%periode natural full scale
trapz(pymax,ymax);

```

LAMPIRAN G
DATA *HEAVE DECAY*
OUTPUT STRIP THEORY MATLAB

SPAR

t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)
0	0	-0.99	-1.24	1.56	17.44133022	0.15673	0.196	3.12	34.88266045	0.8684	1.086
0.02	0.223606798	-0.836	-1.05	1.58	17.66493702	0.29516	0.369	3.14	35.10626725	0.9479	1.185
0.04	0.447213595	-0.677	-0.85	1.6	17.88854382	0.43056	0.538	3.16	35.32987404	1.0195	1.274
0.06	0.670820393	-0.513	-0.64	1.62	18.11215062	0.56189	0.702	3.18	35.55348084	1.0828	1.353
0.08	0.894427191	-0.345	-0.43	1.64	18.33575742	0.68813	0.86	3.2	35.77708764	1.1372	1.422
0.1	1.118033989	-0.176	-0.22	1.66	18.55936421	0.80833	1.01	3.22	36.00069444	1.1825	1.478
0.12	1.341640786	-0.007	-0.01	1.68	18.78297101	0.92156	1.152	3.24	36.22430124	1.2182	1.523
0.14	1.565247584	0.1622	0.203	1.7	19.00657781	1.02698	1.284	3.26	36.44790803	1.2442	1.555
0.16	1.788854382	0.3288	0.411	1.72	19.23018461	1.1238	1.405	3.28	36.67151483	1.2602	1.575
0.18	2.01246118	0.492	0.615	1.74	19.4537914	1.2113	1.514	3.3	36.89512163	1.2664	1.583
0.2	2.236067977	0.6505	0.813	1.76	19.6773982	1.28884	1.611	3.32	37.11872843	1.2625	1.578
0.22	2.459674775	0.8031	1.004	1.78	19.901005	1.35587	1.695	3.34	37.34233522	1.2488	1.561
0.24	2.683281573	0.9486	1.186	1.8	20.1246118	1.41192	1.765	3.36	37.56594202	1.2253	1.532
0.26	2.906888371	1.0859	1.357	1.82	20.3482186	1.4566	1.821	3.38	37.78954882	1.1923	1.49
0.28	3.130495168	1.214	1.517	1.84	20.57182539	1.48962	1.862	3.4	38.01315562	1.1502	1.438
0.3	3.354101966	1.3319	1.665	1.86	20.79543219	1.51078	1.888	3.42	38.23676242	1.0992	1.374
0.32	3.577708764	1.4387	1.798	1.88	21.01903899	1.51998	1.9	3.44	38.46036921	1.0399	1.3
0.34	3.801315562	1.5337	1.917	1.9	21.24264579	1.5172	1.896	3.46	38.68397601	0.9727	1.216
0.36	4.024922359	1.6162	2.02	1.92	21.46625258	1.50253	1.878	3.48	38.90758281	0.8982	1.123
0.38	4.248529157	1.6855	2.107	1.94	21.68985938	1.47615	1.845	3.5	39.13118961	0.8171	1.021
0.4	4.472135955	1.7413	2.177	1.96	21.91346618	1.43832	1.798	3.52	39.3547964	0.73	0.912
0.42	4.695742753	1.7831	2.229	1.98	22.13707298	1.38939	1.737	3.54	39.5784032	0.6376	0.797
0.44	4.91934955	1.8108	2.263	2	22.36067977	1.32982	1.662	3.56	39.80201	0.5407	0.676
0.46	5.142956348	1.824	2.28	2.02	22.58428657	1.26012	1.575	3.58	40.0256168	0.44	0.55
0.48	5.366563146	1.8229	2.279	2.04	22.80789337	1.18088	1.476	3.6	40.24922359	0.3364	0.42
0.5	5.590169944	1.8075	2.259	2.06	23.03150017	1.09279	1.366	3.62	40.47283039	0.2307	0.288
0.52	5.813776741	1.778	2.223	2.08	23.25510697	0.99658	1.246	3.64	40.69643719	0.1237	0.155
0.54	6.037383539	1.7347	2.168	2.1	23.47871376	0.89304	1.116	3.66	40.92004399	0.0163	0.02
0.56	6.260990337	1.678	2.097	2.12	23.70232056	0.78303	0.979	3.68	41.14365079	-0.091	-0.11
0.58	6.484597135	1.6084	2.011	2.14	23.92592736	0.66744	0.834	3.7	41.36725758	-0.196	-0.25
0.6	6.708203932	1.5266	1.908	2.16	24.14953416	0.54721	0.684	3.72	41.59086438	-0.3	-0.38
0.62	6.93181073	1.4332	1.791	2.18	24.37314095	0.4233	0.529	3.74	41.81447118	-0.401	-0.5
0.64	7.155417528	1.329	1.661	2.2	24.59674775	0.29671	0.371	3.76	42.03807798	-0.498	-0.62
0.66	7.379024326	1.215	1.519	2.22	24.82035455	0.16844	0.211	3.78	42.26168477	-0.591	-0.74
0.68	7.602631123	1.0919	1.365	2.24	25.04396135	0.03951	0.049	3.8	42.48529157	-0.678	-0.85
0.7	7.826237921	0.961	1.201	2.26	25.26756815	-0.0891	-0.11	3.82	42.70889837	-0.76	-0.95
0.72	8.049844719	0.8232	1.029	2.28	25.49117494	-0.2163	-0.27	3.84	42.93250517	-0.835	-1.04
0.74	8.273451517	0.6796	0.85	2.3	25.71478174	-0.3411	-0.43	3.86	43.15611197	-0.904	-1.13
0.76	8.497058314	0.5315	0.664	2.32	25.93838854	-0.4627	-0.58	3.88	43.37971876	-0.965	-1.21
0.78	8.720665112	0.3799	0.475	2.34	26.16199534	-0.58	-0.72	3.9	43.60332556	-1.018	-1.27
0.8	8.94427191	0.2262	0.283	2.36	26.38560213	-0.6921	-0.87	3.92	43.82693236	-1.063	-1.33
0.82	9.167878708	0.0714	0.089	2.38	26.60920893	-0.7982	-1	3.94	44.05053916	-1.099	-1.37
0.84	9.391485505	-0.083	-0.1	2.4	26.83281573	-0.8976	-1.12	3.96	44.27414595	-1.127	-1.41
0.86	9.615092303	-0.236	-0.3	2.42	27.05642253	-0.9893	-1.24	3.98	44.49775275	-1.145	-1.43
0.88	9.838699101	-0.387	-0.48	2.44	27.28002933	-1.0728	-1.34	4	44.72135955	-1.155	-1.44
0.9	10.0623059	-0.533	-0.67	2.46	27.50363612	-1.1475	-1.43	4.02	44.94496635	-1.155	-1.44
0.92	10.2859127	-0.675	-0.84	2.48	27.72724292	-1.2128	-1.52	4.04	45.16857315	-1.146	-1.43
0.94	10.50951949	-0.81	-1.01	2.5	27.95084972	-1.2682	-1.59	4.06	45.39217994	-1.128	-1.41
0.96	10.73312629	-0.939	-1.17	2.52	28.17445652	-1.3134	-1.64	4.08	45.61578674	-1.102	-1.38
0.98	10.95673309	-1.06	-1.32	2.54	28.39806331	-1.3481	-1.69	4.1	45.83939354	-1.067	-1.33
1	11.18033989	-1.171	-1.46	2.56	28.62167011	-1.372	-1.72	4.12	46.06300304	-1.024	-1.28
1.02	11.40394669	-1.273	-1.59	2.58	28.84527691	-1.385	-1.73	4.14	46.28660713	-0.973	-1.22
1.04	11.62755348	-1.364	-1.71	2.6	29.06888371	-1.3871	-1.73	4.16	46.51021393	-0.915	-1.14
1.06	11.85116028	-1.445	-1.81	2.62	29.29249051	-1.3783	-1.72	4.18	46.73382073	-0.849	-1.06
1.08	12.07476708	-1.513	-1.89	2.64	29.5160973	-1.3587	-1.7	4.2	46.95742753	-0.778	-0.97
1.1	12.29837388	-1.569	-1.96	2.66	29.7397041	-1.3285	-1.66	4.22	47.18103433	-0.7	-0.88
1.12	12.52198067	-1.613	-2.02	2.68	29.9633109	-1.2881	-1.61	4.24	47.40464112	-0.618	-0.77
1.14	12.74558747	-1.644	-2.05	2.7	30.1869177	-1.2378	-1.55	4.26	47.62824792	-0.531	-0.66
1.16	12.96919427	-1.661	-2.08	2.72	30.41052449	-1.178	-1.47	4.28	47.85185472	-0.441	-0.55
1.18	13.19280107	-1.666	-2.08	2.74	30.63413129	-1.1093	-1.39	4.3	48.07546152	-0.347	-0.43
1.2	13.41640786	-1.657	-2.07	2.76	30.85773809	-1.0323	-1.29	4.32	48.29906831	-0.251	-0.31
1.22	13.64001466	-1.636	-2.04	2.78	31.08134489	-0.9475	-1.18	4.34	48.52267511	-0.154	-0.19
1.24	13.86362146	-1.601	-2	2.8	31.30495168	-0.8557	-1.07	4.36	48.74628191	-0.056	-0.07
1.26	14.08722826	-1.555	-1.94	2.82	31.52855848	-0.7577	-0.95	4.38	48.96988871	0.0416	0.052
1.28	14.31083506	-1.496	-1.87	2.84	31.75216528	-0.6543	-0.82	4.4	49.1934955	0.1387	0.173
1.3	14.53444185	-1.426	-1.78	2.86	31.97577208	-0.5462	-0.68	4.42	49.4171023	0.2342	0.293
1.32	14.75804865	-1.345	-1.68	2.88	32.19937888	-0.4345	-0.54	4.44	49.6407091	0.3273	0.409
1.34	14.98165545	-1.254	-1.57	2.9	32.42298567	-0.3198	-0.4	4.46	49.8643159	0.4174	0.522
1.36	15.20526225	-1.154	-1.44	2.92	32.64659247	-0.2033	-0.25	4.48	50.0879227	0.5038	0.63
1.38	15.42886904	-1.045	-1.31	2.94	32.87019927	-0.0858	-0.11	4.5	50.31152949	0.5857	0.732
1.4	15.65247584	-0.928	-1.16	2.96	33.09380607	0.03181	0.04	4.52	50.53513629	0.6627	0.828
1.42	15.87608264	-0.805	-1.01	2.98	33.31741286	0.14855	0.186	4.54	50.75874309	0.734	0.918
1.44	16.09968944	-0.676	-0.85	3	33.54101966	0.26352	0.329	4.56	50.98234989	0.7992	0.999
1.46	16.32329624	-0.543	-0.68	3.02	33.76462646	0.37584	0.47	4.58	51.20595668	0.8578	1.072
1.48	16.54690303	-0.406	-0.51	3.04	33.98823326	0.48463	0.606	4.6	51.42956348	0.9094	1.137
1.5	16.77050983	-0.266	-0.33	3.06	34.21184006	0.58905	0.736	4.62	51.65317028	0.9536	1.192
1.52	16.99411663	-0.125	-0.16	3.08	34.43544685	0.68832	0.86	4.64	51.87677708	0.9901	1.238
1.54	17.21772343	0.0163	0.02	3.1	34.65905365	0.78167	0.977	4.66	52.10038388	1.0186	1.273

t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)
4.68	52.32399067	1.0389	1.299	6.32	70.65974809	0.60623	0.758	7.96	88.9955055	-0.142	-0.18
4.7	52.54759747	1.0511	1.314	6.34	70.88335489	0.5486	0.686	7.98	89.2191123	-0.201	-0.25
4.72	52.77120427	1.0549	1.319	6.36	71.10696168	0.48697	0.609	8	89.4427191	-0.258	-0.32
4.74	52.99481107	1.0504	1.313	6.38	71.33056848	0.42183	0.527	8.02	89.6663259	-0.313	-0.39
4.76	53.21841786	1.0377	1.297	6.4	71.55417528	0.35371	0.442	8.04	89.8899327	-0.365	-0.46
4.78	53.44202466	1.0169	1.271	6.42	71.77778208	0.28317	0.354	8.06	90.11353949	-0.414	-0.52
4.8	53.66563146	0.9882	1.235	6.44	72.00138888	0.21077	0.263	8.08	90.33714629	-0.46	-0.57
4.82	53.88923826	0.9519	1.19	6.46	72.22499567	0.13708	0.171	8.1	90.56075309	-0.502	-0.63
4.84	54.11284506	0.9084	1.135	6.48	72.44860247	0.06271	0.078	8.12	90.78435989	-0.539	-0.67
4.86	54.33645185	0.8579	1.072	6.5	72.67220927	-0.0118	-0.01	8.14	91.00796668	-0.572	-0.72
4.88	54.56005865	0.801	1.001	6.52	72.89581607	-0.0858	-0.11	8.16	91.23157348	-0.601	-0.75
4.9	54.78366545	0.7381	0.923	6.54	73.11942286	-0.1588	-0.2	8.18	91.45518028	-0.625	-0.78
4.92	55.00727225	0.6697	0.837	6.56	73.34302966	-0.2301	-0.29	8.2	91.67878708	-0.643	-0.8
4.94	55.23087904	0.5964	0.745	6.58	73.56663646	-0.2993	-0.37	8.22	91.90239388	-0.657	-0.82
4.96	55.45448584	0.5188	0.648	6.6	73.79024326	-0.3657	-0.46	8.24	92.12600067	-0.665	-0.83
4.98	55.67809264	0.4375	0.547	6.62	74.01385006	-0.429	-0.54	8.26	92.34960747	-0.668	-0.83
5	55.90169944	0.3532	0.442	6.64	74.23745685	-0.4885	-0.61	8.28	92.57321427	-0.666	-0.83
5.02	56.12530624	0.2666	0.333	6.66	74.46106365	-0.5439	-0.68	8.3	92.79682107	-0.658	-0.82
5.04	56.34891303	0.1784	0.223	6.68	74.68467045	-0.5948	-0.74	8.32	93.02042786	-0.646	-0.81
5.06	56.57251983	0.0891	0.111	6.7	74.90827725	-0.6407	-0.8	8.34	93.24403466	-0.628	-0.79
5.08	56.79612663	-3E-04	-0	6.72	75.13188404	-0.6814	-0.85	8.36	93.46764146	-0.606	-0.76
5.1	57.01973343	-0.089	-0.11	6.74	75.35549084	-0.7165	-0.9	8.38	93.69124826	-0.579	-0.72
5.12	57.24334022	-0.177	-0.22	6.76	75.57909764	-0.7458	-0.93	8.4	93.91485505	-0.547	-0.68
5.14	57.46694702	-0.263	-0.33	6.78	75.80270444	-0.7691	-0.96	8.42	94.13846185	-0.511	-0.64
5.16	57.69055382	-0.347	-0.43	6.8	76.02631123	-0.7863	-0.98	8.44	94.36206865	-0.472	-0.59
5.18	57.91416062	-0.427	-0.53	6.82	76.24991803	-0.7972	-1	8.46	94.58567545	-0.429	-0.54
5.2	58.13776741	-0.503	-0.63	6.84	76.47352483	-0.8018	-1	8.48	94.80928225	-0.383	-0.48
5.22	58.36137421	-0.576	-0.72	6.86	76.69713163	-0.8	-1	8.5	95.03288904	-0.334	-0.42
5.24	58.58498101	-0.643	-0.8	6.88	76.92073843	-0.792	-0.99	8.52	95.25649584	-0.283	-0.35
5.26	58.80858781	-0.705	-0.88	6.9	77.14434522	-0.7778	-0.97	8.54	95.48010264	-0.23	-0.29
5.28	59.03219461	-0.761	-0.95	6.92	77.36795202	-0.7576	-0.95	8.56	95.70370944	-0.175	-0.22
5.3	59.2558014	-0.811	-1.01	6.94	77.59155882	-0.7316	-0.91	8.58	95.92731623	-0.119	-0.15
5.32	59.4794082	-0.854	-1.07	6.96	77.81516562	-0.6999	-0.87	8.6	96.15092303	-0.063	-0.08
5.34	59.703015	-0.89	-1.11	6.98	78.03877241	-0.663	-0.83	8.62	96.37452983	-0.006	-0.01
5.36	59.9266218	-0.92	-1.15	7	78.26237921	-0.621	-0.78	8.64	96.59813663	0.0502	0.063
5.38	60.15022859	-0.941	-1.18	7.02	78.48598601	-0.5743	-0.72	8.66	96.82174343	0.106	0.132
5.4	60.37383539	-0.956	-1.19	7.04	78.70959281	-0.5234	-0.65	8.68	97.04535022	0.1606	0.201
5.42	60.59744219	-0.962	-1.2	7.06	78.93319961	-0.4686	-0.59	8.7	97.26895702	0.2136	0.267
5.44	60.82104899	-0.961	-1.2	7.08	79.1568064	-0.4105	-0.51	8.72	97.49256382	0.2647	0.331
5.46	61.04465579	-0.953	-1.19	7.1	79.3804132	-0.3494	-0.44	8.74	97.71617062	0.3135	0.392
5.48	61.26826258	-0.937	-1.17	7.12	79.60402	-0.2859	-0.36	8.76	97.93977741	0.3596	0.449
5.5	61.49186938	-0.914	-1.14	7.14	79.8276268	-0.2204	-0.28	8.78	98.16338421	0.4026	0.503
5.52	61.71547618	-0.884	-1.1	7.16	80.05123359	-0.1536	-0.19	8.8	98.38699101	0.4422	0.553
5.54	61.93908298	-0.847	-1.06	7.18	80.27484039	-0.086	-0.11	8.82	98.61059781	0.4781	0.598
5.56	62.16268977	-0.803	-1	7.2	80.49844719	-0.0179	-0.02	8.84	98.83420461	0.5101	0.638
5.58	62.38629657	-0.754	-0.94	7.22	80.72205399	0.04985	0.062	8.86	99.0578114	0.538	0.672
5.6	62.60990337	-0.699	-0.87	7.24	80.94566079	0.11691	0.146	8.88	99.2814182	0.5615	0.702
5.62	62.83351017	-0.638	-0.8	7.26	81.16926758	0.1827	0.228	8.9	99.505025	0.5804	0.726
5.64	63.05711697	-0.573	-0.72	7.28	81.39287438	0.24672	0.308	8.92	99.7286318	0.5947	0.743
5.66	63.28072376	-0.504	-0.63	7.3	81.61648118	0.30848	0.386	8.94	99.95223859	0.6043	0.755
5.68	63.50433056	-0.431	-0.54	7.32	81.84008798	0.36749	0.459	8.96	100.1758454	0.609	0.761
5.7	63.72793736	-0.355	-0.44	7.34	82.06369777	0.42332	0.529	8.98	100.3994522	0.609	0.761
5.72	63.95154416	-0.277	-0.35	7.36	82.28730157	0.47554	0.594	9	100.623059	0.6042	0.755
5.74	64.17515095	-0.197	-0.25	7.38	82.51090837	0.52376	0.655	9.02	100.8466658	0.5947	0.743
5.76	64.39875775	-0.116	-0.14	7.4	82.73451517	0.56763	0.71	9.04	101.0702726	0.5805	0.726
5.78	64.62236455	-0.034	-0.04	7.42	82.95812197	0.60681	0.759	9.06	101.2938794	0.5619	0.702
5.8	64.84597135	0.0473	0.059	7.44	83.18172876	0.64103	0.801	9.08	101.5174862	0.5389	0.674
5.82	65.06957815	0.128	0.16	7.46	83.40533556	0.67004	0.838	9.1	101.741093	0.5119	0.64
5.84	65.29318494	0.2072	0.259	7.48	83.62894236	0.69365	0.867	9.12	101.9646998	0.4809	0.601
5.86	65.51679174	0.2844	0.356	7.5	83.85254916	0.71169	0.89	9.14	102.1883066	0.4464	0.558
5.88	65.74039854	0.359	0.449	7.52	84.07615595	0.72405	0.905	9.16	102.4119134	0.4085	0.511
5.9	65.96400534	0.4304	0.538	7.54	84.29976275	0.73067	0.913	9.18	102.6355202	0.3676	0.46
5.92	66.18761213	0.4981	0.623	7.56	84.52336955	0.73152	0.914	9.2	102.859127	0.3241	0.405
5.94	66.41121893	0.5615	0.702	7.58	84.74697635	0.72662	0.908	9.22	103.0827338	0.2782	0.348
5.96	66.63482573	0.6202	0.775	7.6	84.97058314	0.71605	0.895	9.24	103.3063406	0.2304	0.288
5.98	66.85843253	0.6737	0.842	7.62	85.19418994	0.69992	0.875	9.26	103.5299474	0.181	0.226
6	67.08203932	0.7216	0.902	7.64	85.41779674	0.67838	0.848	9.28	103.7535542	0.1305	0.163
6.02	67.30564612	0.7636	0.955	7.66	85.64140354	0.65162	0.815	9.3	103.977161	0.0791	0.099
6.04	67.52925292	0.7994	0.999	7.68	85.86501034	0.61989	0.775	9.32	104.2007678	0.0275	0.034
6.06	67.75285972	0.8288	1.036	7.7	86.08861713	0.58345	0.729	9.34	104.4243745	-0.024	-0.03
6.08	67.97646652	0.8515	1.064	7.72	86.31222393	0.54263	0.678	9.36	104.6479813	-0.075	-0.09
6.1	68.20007331	0.8674	1.084	7.74	86.53583073	0.49776	0.622	9.38	104.8715881	-0.126	-0.16
6.12	68.42368011	0.8764	1.096	7.76	86.75943753	0.44921	0.562	9.4	105.0951949	-0.175	-0.22
6.14	68.64728691	0.8785	1.098	7.78	86.98304432	0.39739	0.497	9.42	105.3188017	-0.222	-0.28
6.16	68.87089371	0.8737	1.092	7.8	87.20665112	0.34272	0.428	9.44	105.5424085	-0.268	-0.33
6.18	69.0945005	0.8621	1.078	7.82	87.43025792	0.28563	0.357	9.46	105.7660153	-0.311	-0.39
6.2	69.3181073	0.8437	1.055	7.84	87.65386472	0.22661	0.283	9.48	105.9896221	-0.351	-0.44
6.22	69.5417141	0.8188	1.024	7.86	87.87747152	0.1661	0.208	9.5	106.2132289	-0.389	-0.49
6.24	69.7653209	0.7877	0.985	7.88	88.10107831	0.10461	0.131	9.52	106.4368357	-0.423	-0.53
6.26	69.9889277	0.7505	0.938	7.9	88.32468511	0.04261	0.053	9.54	106.6604425	-0.454	-0.57
6.28	70.21253449	0.7076	0.885	7.92	88.54829191	-0.0194	-0.02	9.56	106.8840493	-0.481	-0.6
6.3	70.43614129	0.6594	0.824	7.94	88.77189871	-0.081	-0.1	9.58	107.1076561	-0.504	-0.63

t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)
9.6	107.3312629	-0.523	-0.65	11.24	125.6670203	-0.3722	-0.47	12.88	144.0027778	0.0116	0.015
9.62	107.5548697	-0.538	-0.67	11.26	125.8906271	-0.3466	-0.43	12.9	144.2263845	0.0441	0.055
9.64	107.7784765	-0.548	-0.69	11.28	126.1142339	-0.3185	-0.4	12.92	144.4499913	0.076	0.095
9.66	108.0020833	-0.555	-0.69	11.3	126.3378407	-0.288	-0.36	12.94	144.6735981	0.1072	0.134
9.68	108.2256901	-0.556	-0.7	11.32	126.5614475	-0.2554	-0.32	12.96	144.8972049	0.1373	0.172
9.7	108.4492969	-0.554	-0.69	11.34	126.7850543	-0.221	-0.28	12.98	145.1208117	0.1663	0.208
9.72	108.6729037	-0.547	-0.68	11.36	127.0086611	-0.185	-0.23	13	145.3444185	0.1938	0.242
9.74	108.8965105	-0.536	-0.67	11.38	127.2322679	-0.1477	-0.18	13.02	145.5680253	0.2196	0.274
9.76	109.1201173	-0.52	-0.65	11.4	127.4558747	-0.1095	-0.14	13.04	145.7916321	0.2435	0.304
9.78	109.3437241	-0.501	-0.63	11.42	127.6794815	-0.0706	-0.09	13.06	146.0152389	0.2655	0.332
9.8	109.5673309	-0.478	-0.6	11.44	127.9030883	-0.0314	-0.04	13.08	146.2388457	0.2852	0.357
9.82	109.7909377	-0.451	-0.56	11.46	128.1266951	0.00788	0.01	13.1	146.4624525	0.3026	0.378
9.84	110.0145445	-0.421	-0.53	11.48	128.3503019	0.0469	0.059	13.12	146.6860593	0.3175	0.397
9.86	110.2381513	-0.388	-0.48	11.5	128.5739087	0.08535	0.107	13.14	146.9096661	0.3299	0.412
9.88	110.4617581	-0.352	-0.44	11.52	128.7975155	0.12293	0.154	13.16	147.1332729	0.3396	0.425
9.9	110.6853649	-0.313	-0.39	11.54	129.0211223	0.15936	0.199	13.18	147.3568797	0.3466	0.433
9.92	110.9089717	-0.272	-0.34	11.56	129.2447291	0.19434	0.243	13.2	147.5804865	0.3508	0.439
9.94	111.1325785	-0.229	-0.29	11.58	129.4683359	0.22763	0.285	13.22	147.8040933	0.3523	0.44
9.96	111.3561853	-0.184	-0.23	11.6	129.6919427	0.25895	0.324	13.24	148.0277001	0.351	0.439
9.98	111.5797921	-0.139	-0.17	11.62	129.9155495	0.28808	0.36	13.26	148.2513069	0.3469	0.434
10	111.8033989	-0.092	-0.12	11.64	130.1391563	0.3148	0.394	13.28	148.4749137	0.3402	0.425
10.02	112.0270057	-0.045	-0.06	11.66	130.3627631	0.33891	0.424	13.3	148.6985205	0.3308	0.413
10.04	112.2506125	0.0022	0.003	11.68	130.5863699	0.36024	0.45	13.32	148.9221273	0.3189	0.399
10.06	112.4742193	0.0491	0.061	11.7	130.8099767	0.37863	0.473	13.34	149.1457341	0.3045	0.381
10.08	112.6978261	0.0954	0.119	11.72	131.0335835	0.39396	0.492	13.36	149.3693409	0.2878	0.36
10.1	112.9214329	0.1407	0.176	11.74	131.2571903	0.40612	0.508	13.38	149.5929477	0.2689	0.336
10.12	113.1450397	0.1846	0.231	11.76	131.4807971	0.41502	0.519	13.4	149.8165545	0.248	0.31
10.14	113.3686465	0.2269	0.284	11.78	131.7044039	0.42063	0.526	13.42	150.0401613	0.2253	0.282
10.16	113.5922533	0.2672	0.334	11.8	131.9280107	0.4229	0.529	13.44	150.2637681	0.2009	0.251
10.18	113.8158601	0.3052	0.382	11.82	132.1516175	0.42185	0.527	13.46	150.4873749	0.1751	0.219
10.2	114.0394669	0.3406	0.426	11.84	132.3752243	0.41749	0.522	13.48	150.7109817	0.1481	0.185
10.22	114.2630737	0.3732	0.466	11.86	132.5988311	0.40987	0.512	13.5	150.9345885	0.12	0.15
10.24	114.4866804	0.4026	0.503	11.88	132.8224379	0.39908	0.499	13.52	151.1581953	0.0911	0.114
10.26	114.7102872	0.4287	0.536	11.9	133.0460447	0.38521	0.482	13.54	151.3818021	0.0616	0.077
10.28	114.933894	0.4514	0.564	11.92	133.2696515	0.3684	0.46	13.56	151.6054089	0.0319	0.04
10.3	115.1575008	0.4704	0.588	11.94	133.4932583	0.34877	0.436	13.58	151.8290157	0.002	0.002
10.32	115.3811076	0.4856	0.607	11.96	133.7168651	0.32652	0.408	13.6	152.0526225	-0.028	-0.03
10.34	115.6047144	0.4969	0.621	11.98	133.9404719	0.30181	0.377	13.62	152.2762293	-0.057	-0.07
10.36	115.8283212	0.5042	0.63	12	134.1640786	0.27486	0.344	13.64	152.4998361	-0.086	-0.11
10.38	116.051928	0.5076	0.634	12.02	134.3876854	0.2459	0.307	13.66	152.7234429	-0.114	-0.14
10.4	116.2755348	0.5069	0.634	12.04	134.6112922	0.21515	0.269	13.68	152.9470497	-0.141	-0.18
10.42	116.4991416	0.5023	0.628	12.06	134.834899	0.18287	0.229	13.7	153.1706565	-0.166	-0.21
10.44	116.7227484	0.4937	0.617	12.08	135.0585058	0.14933	0.187	13.72	153.3942633	-0.191	-0.24
10.46	116.9463552	0.4814	0.602	12.1	135.2821126	0.11479	0.143	13.74	153.6178701	-0.213	-0.27
10.48	117.169962	0.4653	0.582	12.12	135.5057194	0.07952	0.099	13.76	153.8414769	-0.234	-0.29
10.5	117.3935688	0.4456	0.557	12.14	135.7293262	0.04381	0.055	13.78	154.0650836	-0.253	-0.32
10.52	117.6171756	0.4226	0.528	12.16	135.952933	0.00794	0.01	13.8	154.2886904	-0.27	-0.34
10.54	117.8407824	0.3963	0.495	12.18	136.1765398	-0.0278	-0.03	13.82	154.5122972	-0.284	-0.36
10.56	118.0643892	0.3671	0.459	12.2	136.4001466	-0.0632	-0.08	13.84	154.735904	-0.297	-0.37
10.58	118.287996	0.3352	0.419	12.22	136.6237534	-0.0978	-0.12	13.86	154.9595108	-0.306	-0.38
10.6	118.5116028	0.3007	0.376	12.24	136.8473602	-0.1315	-0.16	13.88	155.1831176	-0.314	-0.39
10.62	118.7352096	0.2641	0.33	12.26	137.070967	-0.1641	-0.21	13.9	155.4067244	-0.319	-0.4
10.64	118.9588164	0.2257	0.282	12.28	137.2945738	-0.1951	-0.24	13.92	155.6303312	-0.321	-0.4
10.66	119.1824232	0.1856	0.232	12.3	137.5181806	-0.2245	-0.28	13.94	155.853938	-0.321	-0.4
10.68	119.40603	0.1443	0.18	12.32	137.7417874	-0.2519	-0.31	13.96	156.0775448	-0.319	-0.4
10.7	119.6296368	0.1021	0.128	12.34	137.9653942	-0.2773	-0.35	13.98	156.3011516	-0.313	-0.39
10.72	119.8532436	0.0593	0.074	12.36	138.189001	-0.3003	-0.38	14	156.5247584	-0.306	-0.38
10.74	120.0768504	0.0162	0.02	12.38	138.4126078	-0.3209	-0.4	14.02	156.7483652	-0.296	-0.37
10.76	120.3004572	-0.027	-0.03	12.4	138.6362146	-0.3388	-0.42	14.04	156.971972	-0.284	-0.35
10.78	120.524064	-0.069	-0.09	12.42	138.8598214	-0.354	-0.44	14.06	157.1955788	-0.269	-0.34
10.8	120.7476708	-0.111	-0.14	12.44	139.0834282	-0.3663	-0.46	14.08	157.4191856	-0.253	-0.32
10.82	120.9712776	-0.152	-0.19	12.46	139.307035	-0.3757	-0.47	14.1	157.6427924	-0.235	-0.29
10.84	121.1948844	-0.191	-0.24	12.48	139.5306418	-0.3821	-0.48	14.12	157.8663992	-0.215	-0.27
10.86	121.4184912	-0.229	-0.29	12.5	139.7542486	-0.3855	-0.48	14.14	158.090006	-0.193	-0.24
10.88	121.642098	-0.264	-0.33	12.52	139.9778554	-0.3858	-0.48	14.16	158.3136128	-0.17	-0.21
10.9	121.8657048	-0.298	-0.37	12.54	140.2014622	-0.3831	-0.48	14.18	158.5372196	-0.146	-0.18
10.92	122.0893116	-0.328	-0.41	12.56	140.425069	-0.3774	-0.47	14.2	158.7608264	-0.12	-0.15
10.94	122.3129184	-0.356	-0.45	12.58	140.6486758	-0.3687	-0.46	14.22	158.9844332	-0.094	-0.12
10.96	122.5365252	-0.382	-0.48	12.6	140.8722826	-0.3573	-0.45	14.24	159.20804	-0.068	-0.08
10.98	122.760132	-0.404	-0.5	12.62	141.0958894	-0.343	-0.43	14.26	159.4316468	-0.041	-0.05
11	122.9837388	-0.422	-0.53	12.64	141.3194962	-0.3262	-0.41	14.28	159.6552536	-0.013	-0.02
11.02	123.2073456	-0.438	-0.55	12.66	141.543103	-0.3069	-0.38	14.3	159.8788604	0.0139	0.017
11.04	123.4309524	-0.45	-0.56	12.68	141.7667098	-0.2852	-0.36	14.32	160.1024672	0.0409	0.051
11.06	123.6545592	-0.458	-0.57	12.7	141.9903166	-0.2615	-0.33	14.34	160.326074	0.0674	0.084
11.08	123.878166	-0.462	-0.58	12.72	142.2139234	-0.2358	-0.29	14.36	160.5496808	0.0932	0.117
11.1	124.1017728	-0.463	-0.58	12.74	142.4375302	-0.2084	-0.26	14.38	160.7732876	0.1182	0.148
11.12	124.3253795	-0.461	-0.58	12.76	142.661137	-0.1795	-0.22	14.4	160.9968944	0.1421	0.178
11.14	124.5489863	-0.454	-0.57	12.78	142.8847438	-0.1493	-0.19	14.42	161.2205012	0.1648	0.206
11.16	124.7725931	-0.445	-0.56	12.8	143.1083506	-0.1182	-0.15	14.44	161.444108	0.1861	0.233
11.18	124.9961999	-0.431	-0.54	12.82	143.3319574	-0.0862	-0.11	14.46	161.6677148	0.2058	0.257
11.2	125.2198067	-0.415	-0.52	12.84	143.5555642	-0.0538	-0.07	14.48	161.8913216	0.2238	0.28
11.22	125.4434135	-0.395	-0.49	12.86	143.779171	-0.0211	-0.03	14.5	162.1149284	0.2399	0.3

t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)	t model (s)	t full scale (s)	z (cm)	z (m)
13.04	145.7916321	-0.116	-0.15	14.56	162.7857488	-0.0638	-0.08	16.08	179.7798654	-0.026	-0.03
13.06	146.0152389	-0.107	-0.13	14.58	163.0093556	-0.0553	-0.07	16.1	180.0034722	-0.019	-0.02
13.08	146.2388457	-0.097	-0.12	14.6	163.2329624	-0.0464	-0.06	16.12	180.227079	-0.012	-0.01
13.1	146.4624525	-0.087	-0.11	14.62	163.4565692	-0.0372	-0.05	16.14	180.4506858	-0.005	-0.01
13.12	146.6860593	-0.075	-0.09	14.64	163.680176	-0.0278	-0.03	16.16	180.6742926	0.0028	0.003
13.14	146.9096661	-0.064	-0.08	14.66	163.9037828	-0.0182	-0.02	16.18	180.8978994	0.01	0.013
13.16	147.1332729	-0.052	-0.07	14.68	164.1273895	-0.0086	-0.01	16.2	181.1215062	0.0172	0.021
13.18	147.3568797	-0.04	-0.05	14.7	164.3509963	0.00099	0.001	16.22	181.345113	0.0241	0.03
13.2	147.5804865	-0.027	-0.03	14.72	164.5746031	0.01051	0.013	16.24	181.5687198	0.0308	0.039
13.22	147.8040933	-0.015	-0.02	14.74	164.7982099	0.01989	0.025	16.26	181.7923266	0.0372	0.047
13.24	148.0277001	-0.002	-0	14.76	165.0218167	0.02904	0.036	16.28	182.0159334	0.0433	0.054
13.26	148.2513069	0.0103	0.013	14.78	165.2454235	0.03792	0.047	16.3	182.2395402	0.0491	0.061
13.28	148.4749137	0.0226	0.028	14.8	165.4690303	0.04644	0.058	16.32	182.463147	0.0544	0.068
13.3	148.6985205	0.0347	0.043	14.82	165.6926371	0.05456	0.068	16.34	182.6867538	0.0593	0.074
13.32	148.9221273	0.0464	0.058	14.84	165.9162439	0.0622	0.078	16.36	182.9103066	0.0637	0.08
13.34	149.1457341	0.0577	0.072	14.86	166.1398507	0.06933	0.087	16.38	183.1339674	0.0676	0.085
13.36	149.3693409	0.0685	0.086	14.88	166.3634575	0.0759	0.095	16.4	183.3575742	0.071	0.089
13.38	149.5929477	0.0787	0.098	14.9	166.5870643	0.08184	0.102	16.42	183.581181	0.0738	0.092
13.4	149.8165545	0.0882	0.11	14.92	166.8106711	0.08714	0.109	16.44	183.8047878	0.076	0.095
13.42	150.0401613	0.097	0.121	14.94	167.0342779	0.09174	0.115	16.46	184.0283945	0.0777	0.097
13.44	150.2637681	0.105	0.131	14.96	167.2578847	0.09563	0.12	16.48	184.2520013	0.0788	0.098
13.46	150.4873749	0.1122	0.14	14.98	167.4814915	0.09878	0.123	16.5	184.4756081	0.0793	0.099
13.48	150.7109817	0.1185	0.148	15	167.7050983	0.10117	0.126	16.52	184.6992149	0.0791	0.099
13.5	150.9345885	0.1238	0.155	15.02	167.9287051	0.10279	0.128	16.54	184.9228217	0.0784	0.098
13.52	151.1581953	0.1282	0.16	15.04	168.1523119	0.10363	0.13	16.56	185.1464285	0.0772	0.096
13.54	151.3818021	0.1316	0.165	15.06	168.3759187	0.1037	0.13	16.58	185.3700353	0.0753	0.094
13.56	151.6054089	0.134	0.168	15.08	168.5995255	0.10299	0.129	16.6	185.5936421	0.0729	0.091
13.58	151.8290157	0.1354	0.169	15.1	168.8231323	0.10152	0.127	16.62	185.8172489	0.07	0.087
13.6	152.0526225	0.1358	0.17	15.12	169.0467391	0.0993	0.124	16.64	186.0408557	0.0666	0.083
13.62	152.2762293	0.1351	0.169	15.14	169.2703459	0.09636	0.12	16.66	186.2644625	0.0627	0.078
13.64	152.4998361	0.1335	0.167	15.16	169.4939527	0.09273	0.116	16.68	186.4880693	0.0583	0.073
13.66	152.7234429	0.1309	0.164	15.18	169.7175595	0.08843	0.111	16.7	186.7116761	0.0536	0.067
13.68	152.9470497	0.1273	0.159	15.2	169.9411663	0.0835	0.104	16.72	186.9352829	0.0485	0.061
13.7	153.1706565	0.1228	0.153	15.22	170.1647731	0.07799	0.097	16.74	187.1588897	0.0431	0.054
13.72	153.3942633	0.1174	0.147	15.24	170.3883799	0.07194	0.09	16.76	187.3824965	0.0374	0.047
13.74	153.6178701	0.1112	0.139	15.26	170.6119867	0.0654	0.082	16.78	187.6061033	0.0315	0.039
13.76	153.8414769	0.1042	0.13	15.28	170.8355935	0.05842	0.073	16.8	187.8297101	0.0253	0.032
13.78	154.0650836	0.0964	0.121	15.3	171.0592003	0.05105	0.064	16.82	188.0533169	0.0191	0.024
13.8	154.2886904	0.088	0.11	15.32	171.2828071	0.04336	0.054	16.84	188.2769237	0.0127	0.016
13.82	154.5122972	0.079	0.099	15.34	171.5064139	0.03541	0.044	16.86	188.5005305	0.0063	0.008
13.84	154.735904	0.0695	0.087	15.36	171.7300207	0.02725	0.034	16.88	188.7241373	-1E-04	-0
13.86	154.9595108	0.0596	0.074	15.38	171.9536275	0.01894	0.024	16.9	188.9477441	-0.006	-0.01
13.88	155.1831176	0.0493	0.062	15.4	172.1772343	0.01056	0.013	16.92	189.1713509	-0.013	-0.02
13.9	155.4067244	0.0386	0.048	15.42	172.4008411	0.00216	0.003	16.94	189.3949577	-0.019	-0.02
13.92	155.6303312	0.0278	0.035	15.44	172.6244479	-0.0062	-0.01	16.96	189.6185645	-0.025	-0.03
13.94	155.853938	0.0169	0.021	15.46	172.8480547	-0.0144	-0.02	16.98	189.8421713	-0.031	-0.04
13.96	156.0775448	0.0059	0.007	15.48	173.0716615	-0.0225	-0.03	17	190.0657781	-0.036	-0.04
13.98	156.3011516	-0.005	-0.01	15.5	173.2952683	-0.0304	-0.04	17.02	190.2893849	-0.041	-0.05
14	156.5247584	-0.016	-0.02	15.52	173.5188751	-0.0379	-0.05	17.04	190.5129917	-0.046	-0.06
14.02	156.7483652	-0.027	-0.03	15.54	173.7424819	-0.0452	-0.06	17.06	190.7365985	-0.05	-0.06
14.04	156.971972	-0.037	-0.05	15.56	173.9660886	-0.052	-0.07	17.08	190.9602053	-0.054	-0.07
14.06	157.1955788	-0.047	-0.06	15.58	174.1896954	-0.0584	-0.07	17.1	191.1838121	-0.058	-0.07
14.08	157.4191856	-0.057	-0.07	15.6	174.4133022	-0.0643	-0.08	17.12	191.4074189	-0.061	-0.08
14.1	157.6427924	-0.066	-0.08	15.62	174.636909	-0.0697	-0.09	17.14	191.6310257	-0.064	-0.08
14.12	157.8663992	-0.074	-0.09	15.64	174.8605158	-0.0746	-0.09	17.16	191.8546325	-0.066	-0.08
14.14	158.090006	-0.082	-0.1	15.66	175.0841226	-0.0788	-0.1	17.18	192.0782393	-0.067	-0.08
14.16	158.3136128	-0.089	-0.11	15.68	175.3077294	-0.0824	-0.1	17.2	192.3018461	-0.069	-0.09
14.18	158.5372196	-0.096	-0.12	15.7	175.5313362	-0.0854	-0.11	17.22	192.5254529	-0.069	-0.09
14.2	158.7608264	-0.102	-0.13	15.72	175.754943	-0.0878	-0.11	17.24	192.7490597	-0.069	-0.09
14.22	158.9844332	-0.107	-0.13	15.74	175.9785498	-0.0894	-0.11	17.26	192.9726665	-0.069	-0.09
14.24	159.20804	-0.111	-0.14	15.76	176.2021566	-0.0904	-0.11	17.28	193.1962733	-0.068	-0.08
14.26	159.4316468	-0.114	-0.14	15.78	176.4257634	-0.0907	-0.11	17.3	193.4198801	-0.066	-0.08
14.28	159.6552536	-0.117	-0.15	15.8	176.6493702	-0.0903	-0.11	17.32	193.6434869	-0.065	-0.08
14.3	159.8788604	-0.118	-0.15	15.82	176.872977	-0.0893	-0.11	17.34	193.8670936	-0.062	-0.08
14.32	160.1024672	-0.119	-0.15	15.84	177.0965838	-0.0876	-0.11	17.36	194.0907004	-0.059	-0.07
14.34	160.326074	-0.118	-0.15	15.86	177.3201906	-0.0852	-0.11	17.38	194.3143072	-0.056	-0.07
14.36	160.5496808	-0.117	-0.15	15.88	177.5437974	-0.0823	-0.1	17.4	194.537914	-0.052	-0.07
14.38	160.7732876	-0.115	-0.14	15.9	177.7674042	-0.0787	-0.1	17.42	194.7615208	-0.048	-0.06
14.4	160.9968944	-0.112	-0.14	15.92	177.991011	-0.0746	-0.09	17.44	194.9851276	-0.044	-0.06
14.42	161.2205012	-0.109	-0.14	15.94	178.2146178	-0.07	-0.09	17.46	195.2087344	-0.039	-0.05
14.44	161.444108	-0.104	-0.13	15.96	178.4382246	-0.0648	-0.08	17.48	195.4323412	-0.035	-0.04
14.46	161.6677148	-0.099	-0.12	15.98	178.6618314	-0.0593	-0.07	17.5	195.655948	-0.029	-0.04
14.48	161.8913216	-0.093	-0.12	16	178.8854382	-0.0533	-0.07				
14.5	162.1149284	-0.087	-0.11	16.02	179.109045	-0.047	-0.06				
14.52	162.3385352	-0.08	-0.1	16.04	179.3326518	-0.0404	-0.05				
14.54	162.562142	-0.072	-0.09	16.06	179.5562586	-0.0335	-0.04				

BIODATA PENULIS



Fikri Ardhanutama lahir di Kota Bandung, 01 Mei 1998, merupakan putra pertama dari pasangan Basuki Soewarno dan Supri Raharyani. Penulis telah melalui beberapa jenjang pendidikan mulai dari SD-IT At-Taqwim Katapang Kab. Bandung pada tahun 2003-2006 dan SD Muhammaadiyah 02 Bendan Pekalongan pada tahun 2006-2009. Lalu melanjutkan studi di SMP Negeri 33 Semarang dan SMA Negeri 1 Semarang hingga tahun 2015. Setelah menyelesaikan studi di masa sekolah, penulis diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa perkuliahan, penulis sangat aktif dalam berorganisasi di Televisi Kampus ITS atau ITS TV. Selain itu penulis juga sempat diamanahi menjadi Ketua ITS TV untuk periode 2018-2019. Pada tahun ketiga perkuliahan, penulis juga sempat melaksanakan program Kerja Praktek di PT Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java pada bagian Pipeline Repair and Replacement Project selama dua bulan. Penulis terdaftar juga sebagai anggota Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS serta melanjutkan penelitian tugas akhir SPAR di Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT. Penulis menyusun tugas akhir dengan judul “Studi Eksperimen Analisis Heave Damping Pada SPAR Akibat Penambahan *Heave Plate* di *Keel*” yang telah diselesaikan dalam kurun waktu 1 semester sehingga syarat kelulusan untuk mendapatkan gelar sarjana (S-1) telah terpenuhi.

Email: fikriardian15@gmail.com