



TUGAS AKHIR – MO 141326

**DAMPAK INSTALASI *HEAVE PLATE* PADA *KEEL CLASSIC SPAR*
TERHADAP KARAKTERISTIK MASSA TAMBAH DAN REDAMAN VISKOS
MELALUI STUDI ANALITIS, EKSPERIMEN DAN NUMERIS**

Brian Ishom Abraar

NRP. 04311540000013

Dosen Pembimbing :

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

Murdjito, M.Sc., Eng.

Erdina Arianti, S.T., M.T

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA

2019



FINAL PROJECT – MO 141326

**THE IMPACT OF HEAVE PLATE INSTALLATION AT CLASSIC SPAR'S
KEEL OF ADDED MASS AND VISCOUS DAMPING CHARACTERISTICS BY
ANALYTICAL, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES**

Brian Ishom Abraar

NRP. 04311540000013

Supervisors :

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

Murdjito, M.Sc., Eng.

Erdina Arianti, S.T., M.T

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2019

**Dampak Instalasi Heave Plate Pada Keel Classic SPAR Terhadap
Karakteristik Massa Tambah dan Redaman Viskos Melalui Studi Analitis,
Eksperimen dan Numeris**

**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:

Brian Ishom Abraar

NRP. 0431154000013

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D (Pembimbing 1)
2. Murdjito, M.Sc., Eng (Pembimbing 2)
3. Erdina Arianti, S.T., M.T (Pembimbing 3)
4. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T (Penguji 1)
5. Dr. Ir. Wisnu Wardhana, S.E., M.Sc (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2019



LEMBAR PERBAIKAN, TUGAS TAMBAHAN ATAU SARAN

UJIAN AKHIR TA (P3)

Nama / NRP. : Brian Ishom Abraar/04311540000013

| No | Tanggapan dari Tim Penguji |
|----|---|
| 1. | Judul revisi → kopus : "Degan Varian... .. Pundhutan" ganti degan : "Melaki" |
| 2. | Eple gelombang 0022 akhir lengkap, polidibian ditata sarah direvisi. |
| 3. | Digambarkan antara beban dan kekakuan untuk menunjukkan linearitas hubungan |
| 4. | Poin 1 feibed dimasukkan ke saran |
| 5. | Tertambat di modelkan dg NOTES/ORETA |
| 6. | Yuhanti (2013) ditulis di referensi |
| 7. | Include Copy persamaan di Maklup. Cdan P. Al. ditand Lumpangta |
| 8. | Dirubah grafik respons PAZ dg rumus experiment |
| 9. | |

Surabaya, 15 07 2019

Ketua Tim Penguji


Rudi Waluyo

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Dampak Instalasi *Heave Plate* Pada *Keel Classic* SPAR Terhadap Karakteristik Massa Tambah dan Redaman Viskos Melalui Studi Analitis, Eksperimen dan Numeris

Nama : Brian Ishom Abraar
NRP : 04311540000013
Departemen : Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Kelautan – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
: Murdjito, M.Sc., Eng
: Erdina Arianti, S.T., M.T

ABSTRAK

Classic SPAR adalah struktur lentur – terapung (*compliant – floating*) dengan kedalaman operasional di laut dalam yang memiliki karakteristik *damping* yang kecil dan periode natural yang besar (berada diantara 20 – 30 sekon). Saat struktur alami beban eksternal lingkungan seperti gelombang periode panjang, maka struktur *Classic* SPAR mengalami pergerakan *heave* yang signifikan yang menyebabkan potensi kerusakan pada *risers* pada *Classic* SPAR. Untuk mereduksi dampak pergerakan *heave* yang signifikan, penggunaan *heave plate* pada struktur *Classic* SPAR adalah salah satu cara yang direkomendasikan, dikarenakan dapat memfasilitasi penambahan redaman viskos (*viscous damping*) dan massa tambah (*added mass*) pada gerak *heave* yang dampaknya mempengaruhi respon gerakan *heave* melalui parameter *damping ratio*. Dalam studi kasus Tugas Akhir ini, dengan melakukan variasi *diameter ratio* 1.3, 1.4 dan 1.5 melalui dengan pendekatan uji eksperimen di kolam *Maneuvering and Ocean Basin* (MOB) yang dibandingkan hasilnya oleh pendekatan numeris dengan *software* MOSES, kemudian dimodelkan grafik analitisnya oleh *Strip Theory Model* dengan bantuan *software* MATLAB pada kondisi tertambat taut dengan variasi *diameter heave plate* didapatkan grafik *heave decay* respon *heave* dengan peningkatan maksimum untuk parameter periode natural sebesar +4,67%, *damping ratio* sebesar +28,79%, massa tambah sebesar +154,43% dan redaman viskos sebesar +34,80%. Untuk reduksi respon *heave* saat kondisi resonansi, didapatkan bahwa terdapat reduksi sebesar (-16,19)% untuk *diameter ratio* 1.4 dan (-28,79)% untuk *diameter ratio* 1.5, relatif terhadap *diameter ratio* 1.3.

Kata Kunci — *Heave Plate*, *Classic* SPAR, Massa Tambah, Redaman Viskos, *Damping Ratio*.

The Impact of Heave Plate Installation at Classic SPAR's Keel of Added Mass and Viscous Damping Characteristics by Analytical, Experimental and Numerical Studies

Name : Brian Ishom Abraar
NRP : 04311540000013
Departement : Ocean Engineering, Faculty of Marine Technology – ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D
: Murdjito, M.Sc., Eng
: Erdina Arianti, S.T., M.T

ABSTRACT

In this Final Project, by variation of diameter ratio (ratio diameter between heave plate and hull of Classic SPAR) by 1.3, 1.4, and 1.5, through experimental study at Maneuvering and Ocean Basin (MOB), then comparing the results by numerical study by MOSES software in taut mooring draft condition, then comparing by modelling the heave decay graph by using analytical study of floating structure motion from Strip Theory Model with MATLAB software to compare with heave decay graph that occurs in experimental study, acquire results that with the variation of diameter ratio increase the natural period up to 4.67%, damping ratio up to 28.79%, added mass up to 154.43% and viscous damping up to 34.80%. In the interest of reduction of Classic SPAR heave response by effect of wave load at resonance condition, acquire results of reduction rate by 16.19% for diameter ratio 1.4 and 28.79% for diameter ratio 1.5, relatively to diameter ratio 1.3.

Keywords—Heave Plate, Classic SPAR, Added Mass, Viscous Damping, Damping Ratio.

KATA PENGANTAR

Terima kasih dan rasa syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala karunia yang diberikan-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Laporan ini disusun untuk memenuhi syarat kelulusan mata kuliah Tugas Akhir di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS. Laporan Tugas Akhir ini menjabarkan hasil pengerjaan Penulis perihal studi hidro – eksperimen terhadap model *Classic* SPAR yang dilakukan di kolam *Maneuvering and Ocean Basin* (MOB) milik Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT ITS pada tanggal 21 – 24 Januari 2019.

Laporan Tugas Akhir ini berjudul “**Dampak Instalasi Heave Plate Pada Keel Classic SPAR Terhadap Karakteristik Massa Tambah dan Redaman Viskos Melalui Studi Analitis, Eksperimen dan Numeris**” dimana analisisnya berfokus pada studi eksperimen *heave decay* pada *Classic* SPAR pada kondisi tertambat taut dengan variasi diameter *heave plate* terhadap *hull Classic* SPAR (*diameter ratio*) untuk kemudian menganalisis pengaruhnya terhadap parameter – parameter seperti massa tambah, redaman viskos, periode natural dan *viscous damping ratio*.

Saya menyadari bahwa baik dalam proses maupun hasil yang didapatkan dari pengerjaan laporan Tugas Akhir ini tidak luput dari kekeliruan diakibatkan oleh berbagai faktor. Oleh karenanya, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk evaluasi laporan ini kedepannya, atau untuk penelitian selanjutnya dengan tema yang sejenis.

Demikian laporan Tugas Akhir ini saya susun dengan sebaik – baiknya. Saya berharap laporan ini dapat bermanfaat bagi saya khususnya serta bagi khalayak pada umumnya. Atas perhatiannya, saya ucapkan terima kasih.

Surabaya, 1 Agustus 2019

Brian Ishom Abraar

NRP. 04311540000013

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kepada Allah SWT dikarenakan Tugas Akhir ini dapat selesai sesuai dengan rencana tidak terlepas dari bantuan oleh berbagai pihak yang telah membantu Penulis dalam pengerjaan laporan Tugas Akhir ini, baik secara teknis maupun non - teknis. Untuk itu, saya mengucapkan terima kasih kepada pihak – pihak terkait, yaitu:

1. Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D sebagai Pembimbing 1 Tugas Akhir dari Departemen Teknik Kelautan FTK – ITS atas bimbingan dan arahnya selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
2. Bapak Murdjito, M.Sc., Eng sebagai Pembimbing 2 Tugas Akhir dari Departemen Teknik Kelautan FTK – ITS atas bimbingan dan arahnya selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
3. Ibu Erdina Arianti, S.T., M.T sebagai Pembimbing 3 Tugas Akhir dari Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT yang membantu dalam pengujian eksperimen di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia.
4. Bapak Baharuddin Ali, S.T., M.Eng dari Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT yang membantu dalam proses pengujian model dan pengolahan data untuk Tugas Akhir ini, beserta seluruh karyawan Balai Teknologi Hidrodinamika yang telah membantu.
5. Ibu Palupi dan Shalima Adzraa Ariffah, ibu dan adik dari penulis yang telah memberi dukungan penuh selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Prof. Daniel Muhammad Rosyid, Ph.D., M.RINA sebagai Dosen Wali Penulis yang telah membantu Penulis selama beradaptasi dalam mengikuti perkuliahan di kampus dan memberi masukan – masukan yang berharga bagi Penulis.
7. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir Eksperimen SPAR tahun ini, yaitu Nur Muhammad Hanif (04311540000095), Gilrandi Adi Negoro (04311540000104), dan Fikri Ardhianutama (0431540000110) yang selalu saling membantu satu sama lain mulai dari awal hingga akhir penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Rekan – rekan Teknik Kelautan 2015 (TRITONOUS) yang telah membantu dan mendukung Penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| COVER | i |
| HALAMAN JUDUL | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| ABSTRAK (BAHASA INDONESIA) | v |
| ABSTRAK (BAHASA INGGRIS) | vi |
| KATA PENGANTAR | vii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | viii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xx |
| BAB 1 PENDAHULUAN | |
| 1.1 LATAR BELAKANG..... | 1 |
| 1.2 RUMUSAN MASALAH..... | 5 |
| 1.3 TUJUAN PENELITIAN..... | 5 |
| 1.4 MANFAAT PENELITIAN..... | 5 |
| 1.5 BATASAN MASALAH..... | 5 |
| 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN..... | 6 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI | |
| 2.1 TINJAUAN PUSTAKA..... | 9 |
| 2.2 DASAR TEORI..... | 10 |
| 2.2.1 <i>SINGLE POINT ANCHOR RESERVOIR (SPAR)</i> | 10 |
| 2.2.1.1 Sejarah Konstruksi SPAR..... | 10 |
| 2.2.1.2 Jenis – Jenis Konstruksi SPAR..... | 12 |
| 2.2.1.2.1 <i>Classic</i> SPAR..... | 12 |
| 2.2.1.2.2 <i>Truss</i> SPAR..... | 13 |
| 2.2.1.2.3 <i>Cell</i> SPAR..... | 15 |
| 2.2.1.3 <i>Heave Plate</i> Pada <i>Keel Classic</i> SPAR..... | 16 |

| | |
|--|----|
| 2.2.2 PEMODELAN EKSPERIMEN..... | 18 |
| 2.2.2.1 Geometri..... | 19 |
| 2.2.2.2 Kinematika Fluida..... | 19 |
| 2.2.2.3 Dinamika Struktur Akibat Beban Fluida..... | 20 |
| 2.2.3 GERAKAN STRUKTUR <i>CLASSIC SPAR</i> | 22 |
| 2.2.4 INTERAKSI HIDRO – STRUKTUR..... | 23 |
| 2.2.4.1 Definisi..... | 23 |
| 2.2.4.2 Jenis – Jenis Beban Interaksi..... | 24 |
| 2.2.4.2.1 Permasalahan Difraksi..... | 24 |
| 2.2.4.2.1.1 <i>Froude – Krylov</i> | 24 |
| 2.2.4.2.1.2 Difraksi..... | 25 |
| 2.2.4.2.2 Permasalahan Radiasi..... | 27 |
| 2.2.4.2.2.1 Massa Tambah..... | 27 |
| 2.2.4.2.2.2 Redaman..... | 29 |
| 2.2.4.2.2.3 Kekakuan..... | 32 |
| 2.2.5 PERSAMAAN GERAK STRUKTUR <i>CLASSIC SPAR</i> | 33 |
| 2.2.6 <i>FREE DECAY TEST</i> | 34 |
| 2.2.7 RESPON STRUKTUR TERHADAP BEBAN EKSTERNAL..... | 36 |
| 2.2.8 SISTEM TAMBAT..... | 38 |
| 2.2.9 ANALISIS <i>STRIP THEORY</i> | 43 |

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

| | |
|---|----|
| 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN..... | 45 |
| 3.2 PENJABARAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN..... | 48 |
| 3.2.1 STUDI PUSTAKA DAN PENGUMPULAN DATA..... | 49 |
| 3.2.2 PERMODELAN STRUKTUR..... | 50 |
| 3.2.3 PERANCANGAN <i>SCALE MODEL</i> | 53 |
| 3.2.4 VALIDASI MODEL..... | 56 |
| 3.2.5 SISTEM TALI TAMBAT..... | 56 |
| 3.2.6 INSTRUMEN LABORATORIUM..... | 60 |

| | |
|--|----|
| 3.2.7 LANGKAH UJI EKSPERIMEN..... | 62 |
| 3.2.8 LANGKAH UJI NUMERIS..... | 63 |
| 3.2.9 LANGKAH KALKULASI ANALITIS..... | 64 |
| 3.2.10 ANALISIS DAN PERBANDINGAN PARAMETER HASIL PENGUJIAN..... | 64 |
| 3.2.11 ANALISIS DAMPAK VARIASI <i>DIAMETER RATIO</i> TERHADAP PARAMETER TINJAUAN..... | 65 |
| 3.2.12 ANALISIS RESPON STRUKTUR SAAT FASE RESONANSI..... | 65 |
| BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1 MODEL UJI EKSPERIMEN <i>CLASSIC SPAR</i> | 67 |
| 4.1.1 TINJAUAN MASSA SISTEM..... | 67 |
| 4.1.2 TINJAUAN <i>CENTRE OF GRAVITY</i> (COG)..... | 68 |
| 4.1.3 TINJAUAN RADIUS GIRASI..... | 68 |
| 4.1.4 TINJAUAN VOLUME <i>DISPLACEMENT</i> | 70 |
| 4.1.5 <i>SUMMARY</i> DIMENSI <i>CLASSIC SPAR</i> | 70 |
| 4.1.6 MODEL UJI EKSPERIMEN <i>HEAVE PLATE</i> | 71 |
| 4.2 MODEL NUMERIS <i>CLASSIC SPAR</i> DAN <i>HEAVE PLATE</i> | 73 |
| 4.3 PARAMETER KEKAKUAN SISTEM MODEL <i>CLASSIC SPAR</i> | 74 |
| 4.3.1 KEKAKUAN HIDROSTATIK..... | 74 |
| 4.3.2 KEKAKUAN TALI TAMBAT..... | 76 |
| 4.4 ANALISIS EKSPERIMEN..... | 82 |
| 4.4.1. UJI <i>HEAVE DECAY</i> | 83 |
| 4.4.2 PARAMETER <i>HEAVE VISCOUS DAMPING RATIO</i> | 88 |
| 4.4.3 PARAMETER PERIODE NATURAL <i>HEAVE</i> | 91 |
| 4.4.4 PARAMETER MASSA TAMBAH <i>HEAVE</i> | 93 |
| 4.4.5 PARAMETER REDAMAN VISKOS <i>HEAVE</i> | 94 |
| 4.4 ANALISIS ANALITIS..... | 95 |
| 4.4.1. GRAFIK <i>HEAVE DECAY</i> | 95 |
| 4.4.2 PARAMETER <i>HEAVE VISCOUS DAMPING RATIO</i> | 97 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.3 PARAMETER MASSA TAMBAH <i>HEAVE</i> | 99 |
| 4.4.4 PARAMETER PERIODE NATURAL <i>HEAVE</i> | 100 |
| 4.4.5 PARAMETER REDAMAN VISKOS <i>HEAVE</i> | 101 |
| 4.6 ANALISIS NUMERIS..... | 102 |
| 4.4.1. PARAMETER MASSA TAMBAH <i>HEAVE</i> | 102 |
| 4.4.2 PARAMETER REDAMAN VISKOS <i>HEAVE</i> | 103 |
| 4.4.3 PARAMETER <i>HEAVE VISCOUS DAMPING RATIO</i> | 104 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN | |
| 5.1 KESIMPULAN..... | 107 |
| 5.2 SARAN..... | 108 |
| DAFTAR PUSTAKA | 109 |
| LAMPIRAN | |
| BIODATA PENULIS | |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 1.1 | Generasi Struktur SPAR..... | 2 |
| Gambar 1.2 | <i>Heave Plate</i> di <i>keel Classic</i> SPAR..... | 4 |
| Gambar 2.1 | <i>Oryx Neptune</i> SPAR Platform..... | 10 |
| Gambar 2.2 | Grafik Biaya Instalasi Bangunan Lepas Pantai Terhadap Kedalaman Perairan di Teluk Meksiko..... | 11 |
| Gambar 2.3 | Kedalaman Operasional Bangunan Lepas Pantai..... | 11 |
| Gambar 2.4 | Skema SPAR dengan Posisi <i>Centre of Buoyancy</i> dan <i>Centre of Gravity</i> | 12 |
| Gambar 2.5 | Konstruksi <i>Classic</i> SPAR..... | 13 |
| Gambar 2.6 | <i>Perdido</i> SPAR Platform..... | 14 |
| Gambar 2.7 | Konstruksi <i>Truss</i> SPAR..... | 15 |
| Gambar 2.8 | <i>Red Hawk</i> SPAR Platform..... | 15 |
| Gambar 2.9 | Konstruksi <i>Cell</i> SPAR..... | 16 |
| Gambar 2.10 | Diameter Rasio antara <i>Heave Plate</i> di <i>keel</i> dengan <i>Classic</i> SPAR..... | 18 |
| Gambar 2.11 | Penskalaan Model Secara Geometri..... | 19 |
| Gambar 2.12 | Penskalaan Model Secara Kinematika Fluida..... | 20 |
| Gambar 2.13 | Gerakan Enam Derajat Kebebasan Struktur <i>Classic</i> SPAR..... | 23 |
| Gambar 2.14 | Interaksi Hidro – Struktur..... | 24 |
| Gambar 2.15 | Massa Tambah Akibat Pergerakan Fluida di <i>Heave Plate</i> <i>keel Classic</i> SPAR..... | 28 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 2.16 | Variasi Peletakkan <i>Heave Plate</i> dan Dampak Terhadap Karakteristik Massa Tambah Arah <i>Heave</i> | 29 |
| Gambar 2.17 | Grafik Osilasi Mode <i>Underdamped</i> | 31 |
| Gambar 2.18 | <i>Heave Displacement</i> Berbasis <i>Time History</i> Hasil Uji <i>Free Decay</i> | 35 |
| Gambar 2.19 | Respon Amplitudo Struktur Akibat Gaya Harmonik Eksternal..... | 37 |
| Gambar 2.20 | Sudut Fase Respon Struktur Akibat Gaya Harmonik Eksternal..... | 38 |
| Gambar 2.21 | Sistem Tambat <i>Catenary Mooring</i> | 39 |
| Gambar 2.22 | Sistem Tambat <i>Taut Mooring</i> | 40 |
| Gambar 2.23 | Kalkulasi Kekakuan Tali Tambat..... | 42 |
| Gambar 3.1 | Diagram Alir Metodologi Penelitian..... | 45 |
| Gambar 3.2 | Fasilitas <i>Maneuvering and Ocean Basin (MOB)</i> Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT | 50 |
| Gambar 3.3 | Model Eksperimen Classic SPAR..... | 51 |
| Gambar 3.4 | Visualisasi Model <i>Classic SPAR</i> Pada <i>Software</i> MOSES..... | 52 |
| Gambar 3.5 | Komponen Model Eksperimen Classic SPAR..... | 52 |
| Gambar 3.6 | <i>Heave Plate</i> Pada <i>Keel Classic SPAR</i> Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 54 |
| Gambar 3.7 | Kalibrasi <i>Centre of Gravity (COG)</i> | 55 |
| Gambar 3.8 | Kalibrasi Radius Girasi..... | 56 |
| Gambar 3.9 | Konfigurasi Tali Tambat Uji Eksperimen (Tampak Atas)..... | 56 |
| Gambar 3.10 | Sudut Konfigurasi Instalasi Tali Tambat Relatif Terhadap <i>Fairlead</i> dan Dasar Kolam Uji..... | 57 |
| Gambar 3.11 | Komponen – Komponen Pada Tali Tambat Uji Eksperimen..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Gambar 3.12 Komponen <i>Carabiner</i> | 57 |
| Gambar 3.13 Komponen <i>Tumbuckle</i> | 58 |
| Gambar 3.14 Komponen <i>Wire Sling</i> | 59 |
| Gambar 3.15 Uji Kalibrasi Kekakuan Tali Tambat Akibat Pembebanan..... | 60 |
| Gambar 3.16 QUALYSIS <i>Motion Capture Camera</i> | 60 |
| Gambar 3.17 <i>Passive Markers</i> | 61 |
| Gambar 3.18 <i>Calibration Kit</i> | 61 |
| Gambar 4.1 Pengukuran beban konstruksi <i>Classic SPAR</i> (a) <i>hull SPAR</i> dan <i>topside</i> (b) <i>ballast</i> dan ulir..... | 68 |
| Gambar 4.2 Konfigurasi Model Eksperimen <i>Classic SPAR</i> | 68 |
| Gambar 4.3 <i>Heave Plate</i> pada <i>keel Classic SPAR</i> | 72 |
| Gambar 4.4 Model Numeris <i>Classic SPAR</i> dan <i>Heave Plate</i> (a) Tampak Samping (b) Tampak Atas..... | 73 |
| Gambar 4.5 Parameter Kekakuan Hidrostatik <i>Heave</i> Kondisi <i>Free Floating</i> | 75 |
| Gambar 4.6 Linierisasi Kurva Kekakuan Tali Tambat Bahan Karet..... | 77 |
| Gambar 4.7 Respon <i>Heave Classic SPAR</i> Dan <i>Heave Plate</i> Variasi Terhadap Fungsi Waktu Uji Eksperimen <i>Heave Decay</i> | 83 |
| Gambar 4.8 Anomali Amplitudo Puncak Mode <i>Peak Up</i> Respon <i>Heave</i> Uji <i>Heave Decay Classic SPAR</i> dan <i>Heave Plate</i> Variasi <i>Diameter Ratio</i> 1,3 (n = 4 hingga n = 7)..... | 87 |
| Gambar 4.9 Grafik Fungsi <i>Diameter Ratio</i> Terhadap <i>Viscous</i> <i>Damping Ratio Heave Classic SPAR + Heave Plate</i> | 89 |
| Gambar 4.10 Grafik Fungsi Faktor Perubahan Amplitudo Respon Sistem Massa – Pegas Akibat Beban Harmonik Eksternal..... | 90 |
| Gambar 4.11 Grafik Fungsi <i>Diameter Ratio</i> Terhadap Periode Natural <i>Heave Classic SPAR + Heave Plate</i> | 92 |
| Gambar 4.12 Grafik Fungsi <i>Diameter Ratio</i> Terhadap Massa Tambah <i>Heave Classic SPAR + Heave Plate</i> | 94 |

| | |
|---|-----|
| Gambar 4.13 Grafik Fungsi <i>Diameter Ratio</i> Terhadap Redaman <i>Heave</i> <i>Classic SPAR + Heave Plate</i> | 95 |
| Gambar 4.14 Respon <i>Heave Classic SPAR</i> Dan <i>Heave Plate</i> Variasi Terhadap Fungsi Waktu Model Analitis..... | 96 |
| Gambar 4.15 <i>Viscous Damping Ratio</i> Kondisi Tertambat Taut Variasi <i>Diameter Ratio (Strip Theory included)</i> | 98 |
| Gambar 4.16 Massa Tambah Kondisi Tertambat Taut Variasi <i>Diameter Ratio (Analitis included)</i> | 99 |
| Gambar 4.17 Periode Natural Kondisi Tertambat Taut Variasi <i>Diameter Ratio (Analitis included)</i> | 101 |
| Gambar 4.18 Redaman Viskos Kondisi Tertambat Taut Variasi <i>Diameter Ratio (Analitis included)</i> | 102 |
| Gambar 4.19 Perbandingan Massa Tambah Uji Eksperimen dan Numeris Variasi <i>Diameter Ratio (Numeris included)</i> | 103 |
| Gambar 4.20 Perbandingan Massa Tambah Uji Eksperimen dan Numeris Variasi <i>Diameter Ratio (Numeris included)</i> | 104 |
| Gambar 4.21 Perbandingan <i>Viscous Damping Ratio</i> Uji Eksperimen dan Numeris Variasi <i>Diameter Ratio (Numeris included)</i> | 105 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|-------------------|---|----|
| Tabel 2.1 | Dimensi Mini SPAR <i>Joint Industry Project</i> | 16 |
| Tabel 2.2 | Penskalaan Model Pada Variabel Mekanik Dengan Hukum Model <i>Froude</i> | 21 |
| Tabel 3.1 | Data Variasi Ukuran <i>Heave Plate</i> | 49 |
| Tabel 3.2 | Data Fasilitas Kolam MOB Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT..... | 49 |
| Tabel 3.3 | Data Permodelan <i>Classic</i> SPAR Model Eksperimen..... | 50 |
| Tabel 3.4 | Modulus Elastisitas Bahan..... | 58 |
| Tabel 4.1 | Hasil Pengukuran Distribusi Massa Material Struktur | 67 |
| Tabel 4.2 | Hasil Kalibrasi <i>Centre of Gravity</i> (CoG) <i>Classic</i> SPAR..... | 69 |
| Tabel 4.3 | Hasil Kalibrasi Radius Girasi <i>Classic</i> SPAR..... | 70 |
| Tabel 4.4 | Hasil Kalkulasi <i>Volume Displacement</i> <i>Classic</i> SPAR..... | 70 |
| Tabel 4.5 | <i>Summary</i> Dimensi Model Fisik Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 71 |
| Tabel 4.6 | Dimensi Model Fisik Eksperimen dan <i>Full Scale</i> Berdasarkan Hukum Penskalaan <i>Froude</i> | 71 |
| Tabel 4.7 | Hasil Pengukuran Massa <i>Heave Plate</i> | 72 |
| Tabel 4.8 | Sarat Akibat Penambahan <i>Heave Plate</i> Kondisi <i>Free Floating</i> | 73 |
| Tabel 4.9 | Validasi Model Eksperimen dan Model Numeris (MOSES)..... | 74 |
| Tabel 4.10 | Kekakuan Hidrostatik <i>Classic</i> SPAR..... | 75 |
| Tabel 4.11 | Kekakuan Hidrostatik <i>Classic</i> SPAR dan <i>Heave Plate</i> | 75 |
| Tabel 4.12 | <i>Summary</i> Dimensi Tali Tambat Bahan Karet Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 76 |
| Tabel 4.13 | Hasil Kalibrasi Kekakuan Tali Tambat Kondisi <i>Freshwater</i> Model Eksperimen..... | 76 |
| Tabel 4.14 | Rerata Kekakuan Bahan Karet Hasil Linierisasi..... | 77 |
| Tabel 4.15 | Kekakuan Tali Tambat Karet Uji Eksperimen Kondisi <i>Seawater</i> Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 77 |
| Tabel 4.16 | Modulus Elastisitas <i>Wire Sling Selected</i> Untuk Uji <i>Heave Decay</i> | 78 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabel 4.17 | <i>Summary</i> Dimensi Tali Tambat <i>Wire Sling</i> Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 78 |
| Tabel 4.18 | Kekakuan Tali Tambat <i>Wire Sling</i> Uji Eksperimen Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 79 |
| Tabel 4.19 | Kekakuan Tali Tambat Gabungan Uji Eksperimen Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 79 |
| Tabel 4.20 | Sarat Akibat Penambahan <i>Heave Plate</i> Kondisi Tertambat Taut..... | 80 |
| Tabel 4.21 | Sudut Tali Tambat Terhadap <i>Fairlead</i> dan Dasar Kolam Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 81 |
| Tabel 4.22 | Beban dan <i>Pre – Tension</i> Tali Tambat Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 81 |
| Tabel 4.23 | Panjang Tali Tambat Pasca <i>Pre – Tension</i> Model Eksperimen dan <i>Full Scale</i> | 82 |
| Tabel 4.24 | Kekakuan Komponen <i>Heave</i> Tali Tambat..... | 82 |
| Tabel 4.25 | Fungsi Amplitudo Puncak Terhadap Siklus Osilasi Hasil Uji <i>Heave Decay Classic</i> SPAR dan <i>Heave Plate</i> Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 84 |
| Tabel 4.26 | Fungsi Amplitudo Puncak Siklus <i>Peak - Up</i> Respon <i>Heave</i> Terhadap Fungsi Waktu dan Interval Siklus Hasil Uji <i>Heave Decay Classic</i> SPAR dan <i>Heave Plate</i> Dengan <i>Diameter Ratio</i> 1,3..... | 87 |
| Tabel 4.27 | Frekuensi Teredam Arah <i>Heave</i> Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 87 |
| Tabel 4.28 | Kalkulasi <i>Logarithmic Decrement</i> Uji <i>Heave Decay</i> Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 88 |
| Tabel 4.29 | Persentase Perubahan <i>Viscous Damping Ratio Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 88 |
| Tabel 4.30 | Persentase Reduksi Respon Perubahan Amplitudo Fase Resonansi Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 90 |
| Tabel 4.31 | Persentase Perubahan Periode Natural <i>Heave Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 91 |
| Tabel 4.32 | Parameter dan Persentase Perubahan Massa Tambah <i>Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 93 |
| Tabel 4.33 | Parameter dan Persentase Perubahan Redaman Viskos <i>Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 94 |
| Tabel 4.34 | Parameter <i>v Strip Theory</i> Grafik <i>Heave Decay</i> Model Numeris | 95 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tabel 4.35 | Perbandingan Amplitudo Puncak Tiap Siklus Hasil Uji Eksperimen dengan Pendekatan <i>Strip Theory</i> | 97 |
| Tabel 4.36 | Kalkulasi <i>Logarithmic Decrement</i> Uji <i>Heave Decay</i> Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 98 |
| Tabel 4.37 | Persentase Perubahan <i>Viscous Damping Ratio Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 98 |
| Tabel 4.38 | Parameter dan Persentase Perubahan Massa Tambah <i>Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 99 |
| Tabel 4.39 | Persentase Perubahan Periode Natural <i>Heave Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 100 |
| Tabel 4.40 | Parameter dan Persentase Perubahan Redaman Viskos <i>Classic</i> SPAR Dengan Variasi <i>Diameter Ratio</i> | 101 |
| Tabel 4.41 | Perbandingan Parameter Massa Tambah <i>Heave</i> Pendekatan Numeris dan Eksperimen..... | 102 |
| Tabel 4.42 | Perbandingan Parameter Redaman Viskos <i>Heave</i> Pendekatan Numeris dan Eksperimen..... | 103 |
| Tabel 4.43 | Perbandingan Parameter <i>Viscous Damping Ratio Heave</i> Pendekatan Numeris dan Eksperimen..... | 104 |

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A KALKULASI *CENTRE OF GRAVITY* DAN RADIUS GIRASI

LAMPIRAN B *OUTPUT* MOSES KONDISI *FREE FLOATING*

LAMPIRAN C *SCRIPT FILE* MATLAB (*STRIP THEORY*)

**LAMPIRAN D KALKULASI HASIL EKSPERIMEN *DIAMETER RATIO 1.3*
KONDISI TERTAMBAT TAUT**

**LAMPIRAN E KALKULASI HASIL EKSPERIMEN *DIAMETER RATIO 1.4*
KONDISI TERTAMBAT TAUT**

**LAMPIRAN F KALKULASI HASIL EKSPERIMEN *DIAMETER RATIO 1.5*
KONDISI TERTAMBAT TAUT**

**LAMPIRAN G MODEL NUMERIS *DIAMETER RATIO 1.3* KONDISI TERTAMBAT
TAUT**

**LAMPIRAN H MODEL NUMERIS *DIAMETER RATIO 1.4* KONDISI TERTAMBAT
TAUT**

**LAMPIRAN I MODEL NUMERIS *DIAMETER RATIO 1.3* KONDISI TERTAMBAT
TAUT**

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

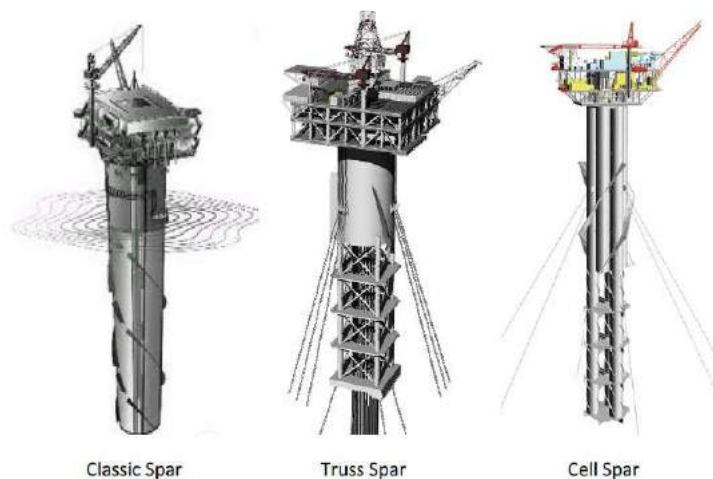
Perkembangan industri perminyakan dan gas sangat mempengaruhi dinamika perkembangan industri kemaritiman, khususnya dalam bidang *offshore* (lepas pantai) yang ditunjukkan dengan aktivitas eksplorasi dan eksploitasi ladang minyak dan gas yang pertama kali dilakukan pada tahun 1947 di Teluk Meksiko (Garrido-Mendoza, 2015). Sedangkan pada perkembangannya di masa kini, permintaan akan kebutuhan konsumsi minyak dan gas semakin besar diakibatkan oleh faktor peningkatan populasi manusia dan perkembangan perekonomian, mengakibatkan produksi perminyakan pada laut lepas (*offshore*) menjadi semakin *profitable* (He, 2003 ; Vu *et al.*, 2008 ; Philip *et al.*, 2012) dan hal ini didukung dengan banyaknya penemuan ladang minyak dan gas di lingkungan laut dalam dibandingkan masa - masa sebelumnya dikarenakan perkembangan teknologi yang semakin pesat.

Namun pada praktiknya, tidak semua struktur bangunan lepas pantai yang ada, terutama jenis struktur terpancang (*fixed platform/jacket*) yang umum digunakan, bagaimanapun canggihnya teknologi yang dimiliki, memenuhi karakteristik operasi yang baik dan efisien di laut dalam, dimana banyak ladang minyak dan gas berada. Hal ini dikarenakan faktor kondisi lingkungan laut dalam yang keras serta jangkauan struktur terpancang yang memiliki keterbatasan sehingga operasionalnya menjadi tidak ekonomis (Koo, 2003 ; Montasir *et al.*, 2008). Untuk mengakomodir hal tersebut, pengembangan struktur bangunan lepas pantai *Single Point Anchor Reservoir* atau (SPAR) yang merupakan salah satu struktur bangunan lepas pantai terapung – lentur (*compliant – floating*) dilakukan untuk menunjang proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas di laut dalam (Tao *et al.*, 2007 ; Sudhakar and Nallayarasu, 2013 ; Kurian *et al.*, 2014 ; Nallayarasu and Mathai, 2015). Hal ini dikarenakan efisiensi dan efektivitas yang ditawarkan dalam pengoperasiannya dibandingkan struktur bangunan lepas pantai yang telah dikembangkan sebelumnya untuk beroperasi di laut dalam (Haslum, 2000, Subbulakshmi *et al.*, 2015 ; Horoub, 2016), dimana aspek penunjang dalam hal ini adalah pemanfaatan SPAR untuk proses pengeboran, produksi serta penyimpanan hasil minyak dan gas yang didapatkan dari laut dalam (Sudhakar and Nallayarasu, 2013 ; Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016).

Konstruksi SPAR berdasarkan pengembangannya, disimpulkan bahwa SPAR dapat dikategorikan dalam tiga generasi struktural (Chua *et al.*, 2005 ; Kurian *et al.*, 2014 ; Horoub, 2016), yaitu:

- *Classic* SPAR,
- *Truss* SPAR, dan
- *Cell* SPAR

Visualisasi struktur SPAR pada tiap generasinya, ditunjukkan pada **Gambar 1.1** di bawah ini.



Gambar 1.1 Generasi Struktur SPAR

(sumber: Kurian *et al.*, 2014)

Dalam studi kasus Tugas Akhir ini, pemodelan SPAR akan menggunakan tipe *Classic* SPAR, dimana ukuran utamanya mengambil referensi dari pemodelan *Mini SPAR Platform Joint Industry Project* oleh Deep Oil Technolgy Inc. (1995) dengan perubahan seperlunya.

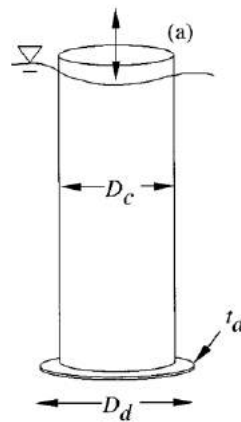
Komponen utama *Classic* SPAR adalah *floating chamber* penopang *topside* struktur berbahan *caisson* yang memiliki *draft* atau sarat air yang dalam sehingga berdampak terhadap kestabilan struktur akibat minimalnya beban angin, gelombang maupun arus yang mempengaruhi gerak *heave* dikarenakan *displacement* struktur yang besar (Chua *et al.*, 2005 ; Sudhakar and Nallayarasu, 2013) yang dapat menunjang instalasi *riser* (Haslum, 2000 ; Lake *et al.*, 2000 ; Koo, 2003 ; Tao *et al.*, 2007 ; Kurian *et al.*, 2014). *Floating chamber* dari *Classic* SPAR berbentuk silindris dengan lubang di bagian tengahnya (*hollow cylindrical hull*) yang digunakan untuk melindungi peralatan – peralatan penunjang produksi seperti *riser* terhadap beban eksternal lingkungan secara langsung (He, 2003 ; Uma, 2017) serta menyediakan kapasitas penampungan untuk minyak dan gas yang diproduksi. Sementara di bagian

bawah dari *floating chamber* ditambahkan dengan *ballast* dengan tujuan untuk mengontrol trim serta sarat dari struktur *Classic SPAR* (Kurian *et al.*, 2014 ; Horoub, 2016). Struktur *Classic SPAR* memiliki titik berat gravitasi yang selalu berada dibawah dari titik *buoyancy* – nya sepanjang waktu sehingga apabila terjadi momen *overtuning* pada struktur yang disebabkan oleh beban angin atau gelombang, maka struktur akan kembali pada posisi semula dikarenakan momen reaksi yang melawan momen *overturning* tersebut (Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016 ; Sultania and Manuel, 2018).

Dikarenakan struktur *Classic SPAR* merupakan salah satu jenis struktur yang operasionalnya dilakukan pada kondisi terapung (*floating*), menyebabkan struktur *Classic SPAR* akan mengalami gerakan enam derajat kebebasan ketika mengalami kontak dengan beban eksitasi gelombang dimana respon reaksi gerakan struktur ini dapat dikategorikan dalam gerak translasional pada tiga sumbu kartesian (x, y dan z) seperti *sway*, *surge*, *heave* maupun gerak rotasional dengan pusat rotasi pada tiga sumbu kartesian (x,y dan z) seperti *roll*, *pitch* dan *yaw* (Journee and Massie, 2001 ; Horoub, 2016). Dalam kasus *Classic SPAR* yang memiliki karakteristik *damping* yang kecil dan periode natural yang besar (berada diantara 20 – 30 sekon), pada saat mendapat beban eksitasi dari lingkungan, terutama beban gelombang dikarenakan merupakan beban dari lingkungan yang paling mempengaruhi pergerakan struktur yang beroperasi di laut dalam, struktur *Classic SPAR* akan mengalami pergerakan translasi pada arah sumbu – z atau *heave* yang signifikan (He, 2003 ; Lu *et al.*, 2003 ; Tao *et al.*, 2007 ; Vu *et al.*, 2008 ; Garrido-Mendoza, 2015 ; Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016 ; Uma, 2017) yang berdampak pada kerusakan dari peralatan – peralatan produksi dan penyimpanan apabila tidak ditanggulangi.

Untuk mereduksi dampak pergerakan *heave* tersebut, penambahan *heave plate* pada struktur *Classic SPAR* adalah salah satu cara yang direkomendasikan. Hal ini dikarenakan dengan penambahan *heave plate* pada *Classic SPAR* dapat memfasilitasi penambahan karakteristik redaman (*damping*) dan massa tambah (*added mass*) pada gerak *heave* (gerak translasional arah sumbu – z) yang dampaknya mempengaruhi respongerakan *heave Classic SPAR* secara positif dengan mereduksinya (Molin *et al.*, 2007 ; Tao and Dray, 2008 ; Li *et al.*, 2013 ; Sudhakar and Nallayarasu, 2013 ; Tian *et al.*, 2013 ; Yang *et al.*, 2014 ; Garrido-Mendoza, 2015 ; Nallayarasu and Mathai, 2015 ; Subbulakshmi *et al.*, 2015 ; Rao *et al.*, 2016 ; Tian *et al.*, 2016), dimana besarnya kedua karakteristik tersebut sangat dipengaruhi oleh bentuk, ukuran,

porositas, jumlah dan peletakkan dari *heave plate* pada struktur *Classic SPAR* tersebut (Holmes *et al.*, 2001 ; Philip *et al.*, 2013 ; Tian *et al.* 2016). **Gambar 1.2** menunjukkan visualisasi *heave plate* yang diletakkan di bagian *keel Classic SPAR*.



Gambar 1.2 *Heave Plate* di *keel Classic SPAR*

(sumber: Lake *et al.*, 2000)

Dikarenakan hal tersebut, pada studi kasus Tugas Akhir ini, Penulis merencanakan untuk melakukan studi mengenai dampak pemasangan *heave plate* di bagian *keel Classic SPAR* terhadap parameter – parameter seperti periode natural, *viscous damping ratio*, redaman viskos (*viscous damping*), massa tambah (*added mass*), dan kekakuan sistem (*spring system*) dengan variasi perbandingan diameter antara *heave plate* dan *Classic SPAR* atau diameter rasio (d_r), yaitu sebesar 1.3, 1.4 dan 1.5 pada kondisi *free floating* maupun ditambatkan secara taut (*taut mooring*).

Studi eksperimen pada Tugas Akhir ini telah dilakukan di fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT – ITS pada tanggal 21 – 24 Januari 2019 dengan objek *Classic SPAR* yang merupakan model fisik dengan skala 1:125 terhadap model *full scale* dengan referensi ukurannya didapatkan dari model *Mini SPAR Joint Industry Project* dari *Deep Oil Technology* (Inc.).

Studi kondisi tertambat secara taut selain dilakukan dengan pendekatan eksperimen, juga dilakukan studi secara analitis dengan pendekatan gerak osilasi struktur terapung pada model *Strip Theory* dengan bantuan MATLAB dan persamaan – persamaan terkait parameter tinjauan dari jurnal – jurnal terkait serta pendekatan pemodelan secara numeris dengan *software* MOSES. Studi numeris akan dilakukan dengan bantuan perangkat *software* seperti MOSES dengan pemodelan 3D *Diffraction* untuk *draft* kondisi tertambat taut.

1.2 RUMUSAN MASALAH

- a. Bagaimana hasil studi eksperimen, analitis dan numeris nilai dari parameter – parameter yang ditinjau pada arah *heave* struktur *Classic* SPAR kondisi tertambat taut terhadap instalasi *heave plate* di bagian *keel* *Classic* SPAR dengan variasi *diameter ratio* antara *heave plate* dengan *Classic* SPAR sebesar 1.3, 1.4 dan 1.5?
- b. Bagaimana dampak variasi *diameter ratio* tersebut terhadap perubahan parameter – parameter yang ditinjau pada kondisi tertambat taut?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

- a. Mendapatkan hasil dari parameter – parameter yang ditinjau dari masing – masing variasi *diameter ratio* 1.3, 1.4 dan 1.5 pada model *Classic* SPAR dan *heave plate* di *keel* kondisi tertambat taut dengan studi eksperimen, analitis dan numeris.
- b. Menganalisis dampak variasi *diameter ratio* tersebut terhadap parameter – parameter yang ditinjau, baik pada kondisi tertambat taut.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

- a. Dapat melakukan studi eksperimen, analitis dan numeris nilai dari parameter – parameter yang ditinjau pada arah *heave* struktur *Classic* SPAR kondisi tertambat taut terhadap instalasi *heave plate* di bagian *keel* *Classic* SPAR dengan variasi rasio diameter antara *heave plate* dengan *Classic* SPAR sebesar 1.3, 1.4 dan 1.5.
- b. Dapat menyimpulkan dampak variasi *diameter ratio* tersebut terhadap parameter – parameter yang ditinjau, baik pada kondisi tertambat taut.

1.5 BATASAN MASALAH

- a. Eksperimen dilakukan di fasilitas *Maneuvering and Ocean Engineering Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT – ITS pada tanggal 21 – 24 Januari 2019.
- b. Model eksperimen *Classic* SPAR yang dijadikan obyek studi pada tugas akhir ini dimensi utamanya berasal dari model *Mini* SPAR *Joint Industry Project* dengan skala 1 : 125 terhadap model *full scale* mengikuti Hukum Pemodelan *Froude*.
- c. Bentuk *heave plate* adalah *circular disk* dengan bahan *solid* dari akrilik, ketebalan 5 mm dan ditempatkan di *keel* pada *Classic* SPAR.
- d. Variasi perbandingan diameter rasio antara *heave plate* dengan *Classic* SPAR adalah 1.3, 1.4 dan 1.5.

- e. Pengaruh *heave plate* terhadap karakteristik yang ditinjau hanya terhadap arah *heave* dari *Classic SPAR (Single Degree of Freedom (SDOF))*.
- f. Analisis dilakukan pada kondisi tertambat taut.
- g. Uji *heave decay* pada model eksperimen *Classic SPAR* dilakukan pada kondisi tertambat taut sebanyak 4 *mooring lines*.
- h. Parameter – parameter yang ditinjau dalam studi ini pada kondisi tertambat taut adalah massa tambah, redaman viskos, kekakuan, *viscous damping ratio*, periode natural dan kekakuan *heave*
- i. Faktor redaman yang mempengaruhi respon struktur *Classic SPAR* hanya *viscous damping*.
- j. Penelitian perihal pola aliran disekitar struktur *Classic SPAR* dan *heave plate* tidak dilakukan.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

a. BAB 1 PENDAHULUAN

Terdiri atas beberapa bagian, yaitu:

- i. **Latar Belakang**, membahas alasan yang melatarbelakangi dilakukannya penelitian dalam studi kasus Tugas Akhir ini beserta penjelasan singkat mengenai studi kasus yang dibahas berdasarkan *cross – reference* dari jurnal – jurnal nasional maupun internasional, disertasi dan tesis.
- ii. **Rumusan Masalah**, adalah daftar pertanyaan – pertanyaan yang direncanakan akan diajukan sebagai permasalahan untuk kemudian akan dijawab dalam penelitian Tugas Akhir ini.
- iii. **Tujuan Penelitian**, membahas tujuan dilakukannya penelitian dalam studi kasus Tugas Akhir ini berdasarkan Rumusan Masalah yang telah diajukan sebelumnya.
- iv. **Manfaat Penelitian**, merupakan dampak positif dilakukannya penelitian dalam studi kasus Tugas Akhir ini yang didapatkan oleh Penulis.
- v. **Batasan Masalah**, berisi variabel – variabel yang membatasi pembahasan dalam studi kasus Tugas Akhir ini dikarenakan keterbatasan kemampuan dan waktu, selain juga agar pembahasan dalam penelitian ini tidak melebar keluar dari topik yang telah direncanakan.

- vi. **Sistematika Penulisan**, menjelaskan mengenai tata atur penulisan pada laporan penelitian Tugas Akhir ini, per bab dengan penjelasan singkat isi dari bab tersebut.

b. **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Terdiri atas beberapa bagian, yaitu:

- i. **Tinjauan Pustaka**, membahas perihal jurnal – jurnal maupun buku – buku yang dijadikan acuan dalam pengerjaan laporan studi kasus Tugas Akhir ini.
- ii. **Dasar Teori**, membahas mengenai dasar – dasar teori yang digunakan dalam laporan untuk menyelesaikan permasalahan dalam studi kasus yang telah dirumuskan beserta persamaan – persamaannya.

c. **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Terdiri atas beberapa bagian, yaitu:

- i. **Diagram Alir**, menggambarkan langkah pengerjaan dalam analisis penyelesaian permasalahan pada studi kasus Tugas Akhir ini secara sistematis dan terencana, berdasarkan metode keilmiah.
- ii. **Penjabaran Diagram Alir**, penjelasan secara lebih lengkap mengenai langkah pengerjaan pada penyelesaian permasalahan dalam studi kasus Tugas Akhir ini bersama teknik validasinya, serta pembahasan data yang dipergunakan dalam laporan ini.
- iii. **Jadwal Penelitian**, perencanaan pengerjaan laporan berdasarkan jadwal yang telah disusun dan direncanakan oleh Penulis untuk menyelesaikan laporan beserta langkah – langkah pengerjaan penelitian yang telah digambarkan pada Diagram Alir.

d. **BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Analisis untuk membahas hasil penelitian yang telah dilakukan dengan langkah pengerjaan mengikuti Metodologi Penelitian dengan dasar teori penyelesaian yang mengacu pada Bab Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori.

e. **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Terdiri atas beberapa bagian, yaitu:

- i. **Kesimpulan**, membahas keluaran dari studi kasus Tugas Akhir ini yang didapatkan dari Bab Analisis dan Pembahasan, menjawab pertanyaan – pertanyaan yang telah diajukan pada Rumusan Masalah.
- ii. **Saran**, merupakan masukan dari Penulis untuk penelitian Tugas Akhir ataupun jurnal yang mengambil ataupun melanjutkan topik yang sama

dengan Tugas Akhir ini sebagai salah satu referensi pengerjaannya di kemudian hari.

f. **DAFTAR PUSTAKA**

Referensi pada pengerjaan laporan Tugas Akhir di bagian Latar Belakang maupun di Bab Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori serta sumber dokumentasi – dokumentasi gambar, tabel – tabel dan persamaan – persamaan yang digunakan dalam laporan Tugas Akhir ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Studi mengenai dampak penambahan *heave plate* terhadap struktur *Single Point Anchor Reservoir* (SPAR) telah dilakukan sebelumnya dan dipublikasikan di jurnal – jurnal maupun konferensi internasional. Studi analisis SPAR secara numeris telah dilakukan oleh Holmes *et al.* (2001), Tao and Cai (2004), Tao *et al.* (2007), Li *et al.* (2011), Phillip *et al.* (2013), Yang *et al.* (2014), Garrido – Mendoza (2015), Subbulakshmi *et al.* (2015), Rao *et al.* (2016), Subbulakshmi and Sundaravadivelu (2016), sedangkan analisis secara eksperimen telah dilakukan oleh Lake *et al.* (2000), He (2003), Chua *et al.* (2005), Molin *et al.* (2007), Tao and Dray (2008), Vu *et al.* (2008), Li *et al.* (2013), Phillip *et al.* (2013), Tian *et al.* (2013), Subbulakshmi *et al.* (2015), Rao *et al.* (2016), Subbulakshmi and Sundaravadivelu (2016), Tian *et al.* (2016), Uma (2017). Studi dampak *heave plate* pada karakteristik massa tambah dan redaman SPAR telah dilakukan dengan berbagai kasus yang dijadikan fokus penelitian, yaitu faktor pengaruh bentuk *heave plate* yang dianalisis oleh Holmes *et al.* (2001), Tao and Dray (2008), Li *et al.* (2013), Tian *et al.* (2013), Uma (2017), kemudian faktor ukuran *heave plate* relatif terhadap ukuran SPAR yang telah dilakukan penelitiannya oleh Thiagarajan *et al.* (2002), Phillip *et al.* (2013), Subbulakshmi and Sundaravadivelu (2016), faktor pengaruh ketebalan *heave plate* yang diteliti oleh Thiagarajan *et al.* (2002) dan He (2003), faktor porositas atau lubang kecil yang dibuat pada permukaan *heave plate* yang dilakukan oleh Chua *et al.* (2005), Molin *et al.* (2007), Tao and Dray (2008), Vu *et al.* (2008), Tian *et al.* (2013), Tian *et al.* (2016) serta faktor kuantitas serta pemberian *spacing* atau jarak antar *heave plate* pada kasus *double heave plate* maupun *multi – heave plate* yang telah dianalisis oleh Tao *et al.* (2007), Phillip *et al.* (2013), Sudhakar and Nallayarasu (2013), Subbulakshmi *et al.* (2015), Subbulakshmi and Sundaravadivelu (2016), Tian *et al.* (2016). Penelitian – penelitian tersebut memberikan kesimpulan umum bahwa dengan pemasangan *heave plate* pada *Classic* SPAR, memberikan dampak terhadap penambahan nilai karakteristik dari massa tambah dan redaman pada struktur *Classic* SPAR dibandingkan dengan struktur *Classic* SPAR tanpa *heave plate*, hal ini penting agar dapat meninjau pengaruh perubahan karakteristik massa tambah dan redaman akibat pemasangan *heave plate* tersebut terhadap respon pergerakan struktur.

Sedangkan dalam penelitian ini, fokus yang ditinjau untuk dianalisis adalah pengaruh variasi diameter *heave plate* yang diletakkan pada *keel Classic SPAR* dibandingkan dengan diameter lambung *Classic SPAR* terhadap perubahan karakteristik periode natural, *diameter ratio* dan karakteristik hidromekanik seperti massa tambah, redaman dan kekakuan sistem.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 SINGLE POINT ANCHOR RESERVOIR (SPAR)

2.2.1.1 SEJARAH KONTRUKSI SPAR

Konstruksi *Single Point Anchor Reservoir* (SPAR) untuk produksi pertama kali diinstalasi pada September tahun 1996 di Teluk Meksiko, tepatnya di *Vioska Knoll Block 826* dengan *Oryx Neptune SPAR Platform* yang beroperasi di kedalaman perairan mencapai 1.930 ft atau 588,26 m pada tahun 1997 (Prislin *et al.*, 1999). Konstruksi *Oryx Neptune SPAR Platform* difungsikan untuk memfasilitasi produksi minyak dan gas dikarenakan kondisi lingkungan di lokasi tersebut sulit untuk mengoperasikan bangunan struktur terpancang (*fixed platform*) yang umum digunakan pada waktu itu secara efektif, efisien dan ekonomis. Visualisasi struktur *Oryx Neptune SPAR Platform* ditunjukkan oleh **Gambar 2.1** sebagai berikut.



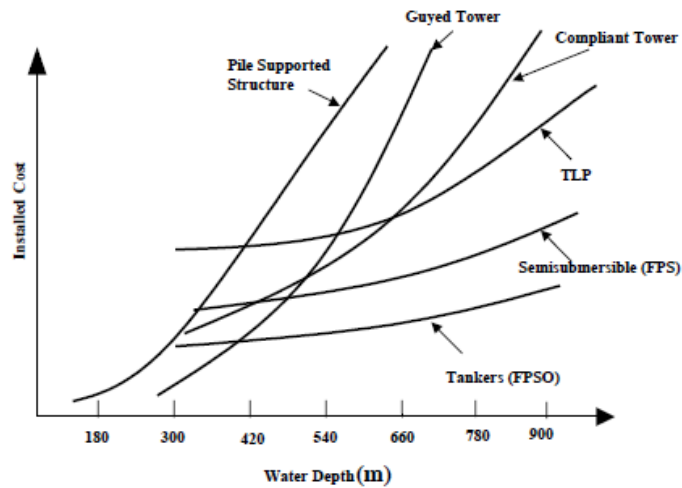
Gambar 2.1 *Oryx Neptune SPAR Platform*

(sumber: <https://www.offshore-mag.com>, 1997)

Latar belakang pengembangan struktur SPAR didasarkan dari keunggulan konstruksi SPAR pada saat dioperasikan dibandingkan terhadap struktur – struktur lepas pantai lainnya, yaitu:

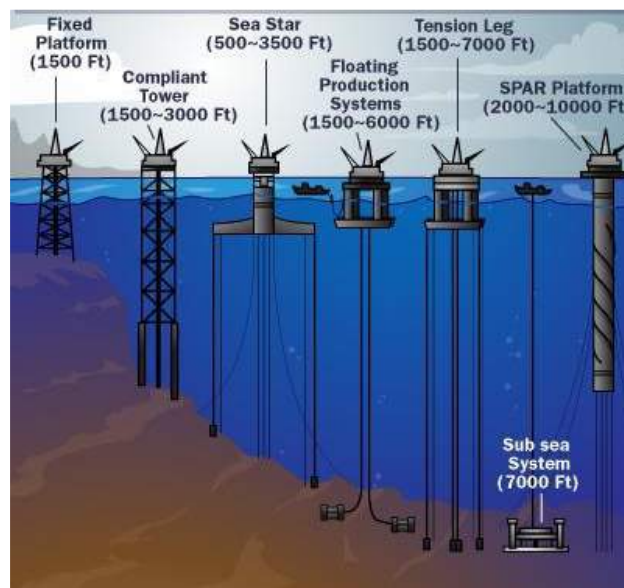
- a. Efisiensi, ekonomis dan efektivitas yang ditawarkan dalam instalasi dan pengoperasiannya, terutama di lingkungan laut dalam (Haslum, 2000, Koo, 2003 ; Subbulakshmi *et al.*, 2015 ; Horoub, 2016) dikarenakan merupakan tipe

struktur terapung (*floating*) seperti halnya struktur *semi – submersible* dan *Tension Leg Platform* (TLP) yang terlebih dahulu telah dikembangkan dan cocok untuk kondisi di perairan tersebut. Grafik biaya instalasi bangunan lepas pantai terhadap kedalaman perairan di Teluk Meksiko ditunjukkan dengan **Gambar 2.2** berikut ini.



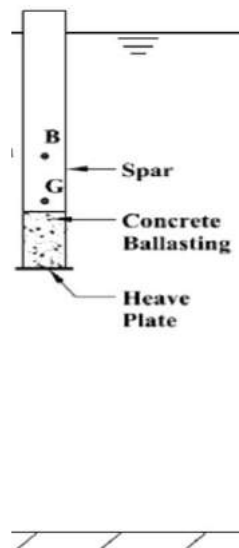
Gambar 2.2 Grafik Fungsi Kedalaman Perairan Terhadap Biaya Instalasi Bangunan Lepas Pantai di Teluk Meksiko (sumber: Günther *et al.*, 1988 dalam Koo, 2003)

- b. Dapat dioperasikan hingga kedalaman laut 10.000 ft atau 3.048 m (Koo, 2003 ; Sadeghi, 2005 ; Horoub, 2016). Infografis kedalaman operasional masing – masing struktur bangunan lepas pantai ditunjukkan oleh **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Kedalaman Operasional Bangunan Lepas Pantai (sumber: Horoub, 2016)

- c. Dapat menopang *topside* atau bangunan atas dengan ukuran yang besar (Chua *et al.*, 2005 ; Sudhakar and Nallayarasu, 2013),
- d. Menunjang operasional sistem *riser* secara lebih optimal dan meningkatkan aspek keamanan atau *safety* dikarenakan diposisikan di bagian tengah dari lambung SPAR sehingga lebih terlindungi dari beban lingkungan eksternal. (Haslum, 2000 ; Lake *et al.*, 2000 ; He, 2003 ; Tao *et al.*, 2007 ; Kurian *et al.*, 2014 ; Uma, 2017), dan
- e. Selalu stabil dikarenakan posisi *Centre of Buoyancy* mutlak berada di atas *Centre of Gravity* sepanjang waktu (Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016 ; Sultania and Manuel, 2018). Posisi *Centre of Buoyancy* dan *Centre of Gravity* pada struktur SPAR ditunjukkan oleh **Gambar 2.4** sebagai berikut.



Gambar 2.4 Skema SPAR dengan Posisi *Centre of Buoyancy* dan *Centre of Gravity*
(sumber: Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016)

2.2.1.2 JENIS – JENIS KONSTRUKSI SPAR

Menurut Chua *et al.* (2005) ; Kurian *et al.* (2014) dan Horoub (2016) pengembangan struktur SPAR terdiri atas tiga generasi struktural, yaitu:

2.2.1.2.1 CLASSIC SPAR

Merupakan generasi pertama dari pengembangan struktur SPAR, contoh utamanya adalah konstruksi *Oryx Neptune SPAR Platform* yang penampakkan strukturnya ditunjukkan pada **Gambar 2.1**. Struktur *Classic* SPAR terdiri dari lambung berbentuk silinder berbahan *caisson* dengan *draft* yang dalam berfungsi untuk menunjang *topside* struktur, tempat penampung hasil minyak dan gas yang telah diproduksi (Sudhakar and Nallayarasu, 2013 ; Subbulakshmi and

Sundaravadivelu, 2016) serta menjaga kestabilan struktur dari beban lingkungan seperti beban gelombang, arus, angin dan sebagainya diakibatkan oleh *displacement* struktur yang besar (Chua *et al.*, 2005 ; Sudhakar and Nallayarasu, 2013). Lambung *Classic* SPAR yang berbentuk silinder tersebut pada bagian tengahnya berlubang (*hollow cylindrical hull*) digunakan untuk memfasilitasi instalasi dan operasional *riser* serta melindunginya dari beban lingkungan yang berpotensi menimbulkan kerusakan (He, 2003 ; Uma, 2017). Kemudian terdapat *ballast* di bagian bawah untuk menjaga level sarat dan trim dari *Classic* SPAR agar tetap berada dalam keadaan yang ditentukan sehingga menunjang operasional struktur *Classic* SPAR agar dapat berjalan dengan baik (Kurian *et al.*, 2014 ; Horoub, 2016). Visualisasi *Classic* SPAR ditunjukkan dengan **Gambar 2.5** berikut ini.



Gambar 2.5 Konstruksi *Classic* SPAR

(sumber: Koo, 2003)

2.2.1.2.2 TRUSS SPAR

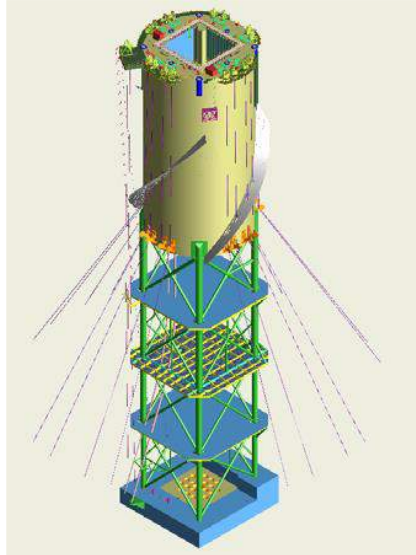
Merupakan pengembangan lebih lanjut dari tipe *Classic* SPAR yang telah lebih dahulu dikembangkan. Contoh *platform* dengan tipe *Truss* SPAR adalah *Perdido* SPAR *Platform* yang beroperasi di Teluk Meksiko, tepatnya di *Alaminos Canyon Block* 857 mulai tahun 2010. *Perdido* SPAR *Platform* merupakan *platform* SPAR dengan lingkungan operasional pada laut paling dalam yang pernah dicapai, yaitu dengan kedalaman perairan mencapai 8.038 ft (2.450 m). Penampakan struktur *Perdido* SPAR *Platform* ditunjukkan oleh **Gambar 2.6** sebagai berikut.



Gambar 2.6 *Perdido SPAR Platform*

(sumber: <https://www.shell.com>, 2010)

Truss SPAR 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 dan menjaga stabilitas struktur dari beban lingkungan. Lambung *Truss* SPAR pada bagian tengahnya juga memiliki lubang (*hollow cylindrical hull*) untuk menunjang operasional *riser* dan pada bagian dasarnya memiliki *ballast tank* yang berfungsi menjaga level trim dan sarat dari *Truss* SPAR. Hal 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. Struktur *truss* tersebut terdiri atas rangka penegar (*brace*) dengan konfigurasi membentuk huruf X yang berfungsi selayaknya *heave plate* pada *Classic* SPAR untuk menambah karakteristik massa tambah dan redaman struktur (Lu *et al.*, 2003), sehingga apabila dibandingkan dengan *Classic* SPAR dengan dimensi utama yang identik, *Truss* SPAR memiliki keunggulan dalam hal konstruksi yang lebih ringan yang berdampak pada *cost* yang lebih ekonomis (Chua *et al.*, 2005). Adapun kekurangan dari generasi struktur ini adalah berkurangnya kapasitas tampung untuk hasil minyak dan gas yang dapat disimpan pada lambung *Truss* SPAR relatif terhadap *Classic* SPAR. Visualisasi *Truss* SPAR ditunjukkan dengan **Gambar 2.7** berikut ini.



Gambar 2.7 Konstruksi *Truss* SPAR

(sumber: Lu *et al.*, 2003)

2.2.1.2.3 CELL SPAR

Merupakan pengembangan termutakhir dari teknologi konstruksi SPAR. Contoh *platform* dengan tipe *Cell* SPAR adalah *Red Hawk* SPAR *Platform* yang beroperasi di Teluk Meksiko mulai tahun 2004, tepatnya berlokasi di *Garden Banks Block 877* dan telah mengalami proses *decommissioning* pada tahun 2014. Penampakan struktur *Red Hawk* SPAR *Platform* ditunjukkan oleh **Gambar 2.8** sebagai berikut.



Gambar 2.8 *Red Hawk* SPAR *Platform*

(sumber: <https://www.offshore-technology.com>, 2004)

Berbeda dengan kedua generasi SPAR sebelumnya, yaitu *Classic* SPAR dan *Truss* SPAR, *Cell* SPAR terdiri atas konfigurasi sel – sel berbentuk silinder – silinder berukuran kecil yang memiliki gaya *buoyancy* masing – masing dan dipasang secara berdekatan mengelilingi silinder utama yang berada di tengah lambung struktur *Cell* SPAR. Fungsi sel – sel dan silinder utama di bagian tengah tersebut adalah sama dengan fungsi lambung vertikal pada *Classic* maupun *Truss* SPAR (Chua *et al.*, 2005). Dengan desain konstruksi tersebut, fabrikasi *Cell* SPAR menjadi lebih mudah dan ekonomis dibandingkan dengan *Classic* SPAR dan *Truss* SPAR dikarenakan beban struktur yang lebih ringan dan dapat diproduksi pada fasilitas galangan yang terbatas. Visualisasi *Cell* SPAR ditunjukkan dengan **Gambar 2.9** sebagai berikut.



Gambar 2.9 Konstruksi *Cell* SPAR

(sumber: Sadeghi, 2005)

2.2.1.3 HEAVE PLATE PADA KEEL CLASSIC SPAR

Dalam studi kasus Tugas Akhir ini, model eksperimen merupakan model *Classic* SPAR dengan dimensi utama yang berasal dari Model *Prototype Mini* SPAR *Joint Industry Project* yang ditunjukkan oleh **Tabel 2.1** di bawah ini.

Tabel 2.1 Dimensi *Mini* SPAR *Joint Industry Project*

(sumber: *Deep Oil Technology Inc.*, 1995 dengan perubahan seperlunya)

| Deskripsi | Model <i>Prototype Mini</i> SPAR | |
|----------------|----------------------------------|--------|
| | Nilai | Satuan |
| Massa Total | 31949,219 | ton |
| Lambung | | |
| Diameter | 17,5 | m |

Tabel 2.1 Dimensi Mini SPAR *Joint Industry Project (cont.)*

(sumber: *Deep Oil Technology Inc.*, 1995 dengan perubahan seperlunya)

| Deskripsi | Model <i>Prototype</i> Mini SPAR | |
|--|----------------------------------|--------|
| | Nilai | Satuan |
| Lambung | | |
| Tinggi | 154,25 | m |
| Sarat | 129,25 | m |
| Posisi <i>Fairlead</i> terhadap <i>keel</i> | 146,25 | m |
| Deck | | |
| Panjang | 50,29 | m |
| Lebar | 50,29 | m |
| Tinggi | 19,57 | m |

Struktur *Classic* SPAR pada umumnya memiliki karakteristik redaman yang kecil dan periode natural struktur yang besar (berada dikisaran antara 20 – 30 sekon) dalam kondisi *free floating* dan apabila mendapat beban lingkungan seperti gelombang akan berdampak signifikan terhadap peningkatan respon gerakan *heave* (He, 2003 ; Lu *et al.*, 2003 ; Tao *et al.*, 2007 ; Vu *et al.*, 2008 ; Garrido-Mendoza, 2015 ; Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016 ; Uma, 2017). Dikarenakan hal tersebut untuk mereduksi peningkatan respon *heave* ini, 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*, 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 (Molin *et al.*, 2007 ; Tao and Dray, 2008 ; Li *et al.*, 2013 ; Sudhakar and Nallayarasu, 2013 ; Tian *et al.*, 2013 ; Yang *et al.*, 2014 ; Garrido-Mendoza, 2015 ; Nallayarasu and Mathai, 2015 ; Subbulakshmi *et al.*, 2015 ; Rao *et al.*, 2016 ; Tian *et al.*, 2016). Hal ini ditunjukkan dengan persamaan matematis untuk mendapatkan nilai periode natural struktur *Classic* SPAR yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.1** di bawah ini.

$$T_N = 2\pi \sqrt{\frac{T_d(C_a+1)}{g}} \quad (2.1)$$

(sumber: Tao *et al.*, 2007)

Dimana:

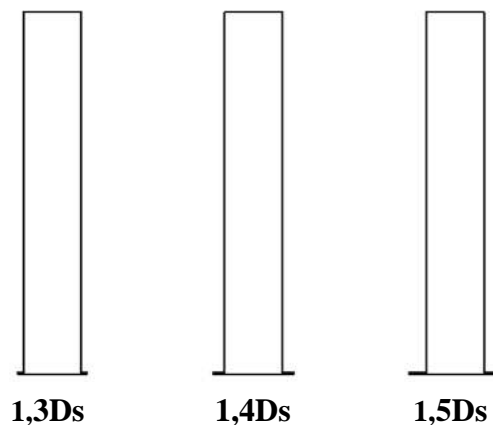
T_N = Periode Natural *Classic* SPAR (s)

T_d = *draft* dari *Classic* SPAR (m)

C_a = koefisien massa tambah (parameter non – dimensional)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

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 ; Philip *et al.*, 2013 ; Tian *et al.* 2016). Dalam studi kasus Tugas Akhir ini, analisis akan berfokus terhadap dampak variasi ukuran diameter *heave plate* yang diletakkan di *keel* *Classic* SPAR dengan diameter lambung struktur *Classic* SPAR terhadap perubahan nilai karakteristik yang ditinjau, yaitu karakteristik hidromekanik seperti massa tambah, redaman dan kekakuan sistem, periode natural dan *viscous damping ratio* dan dampaknya terhadap respon struktur saat resonansi. yang divisualisasikan dengan **Gambar 2.10** sebagai berikut.



Gambar 2.10 Diameter Rasio Antara *Heave Plate*
Pada *Keel* Dengan *Classic* SPAR

(sumber: Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016)

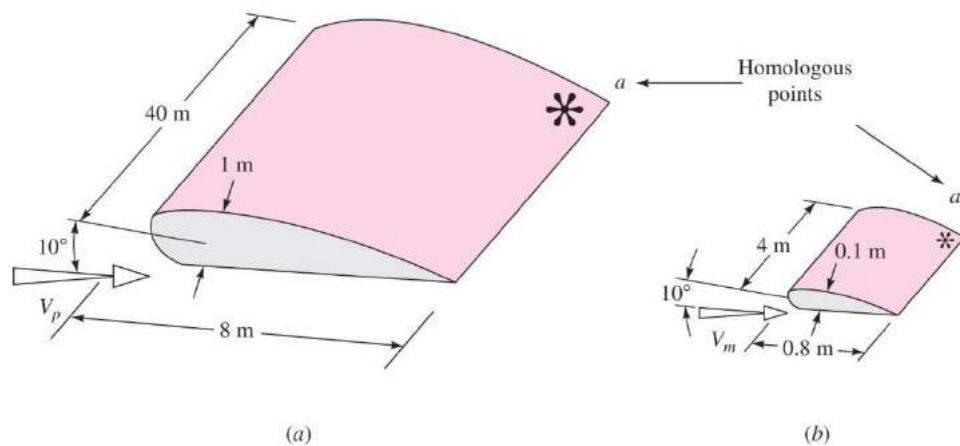
2.2.2 PEMODELAN EKSPERIMEN

Untuk melakukan sebuah pemodelan eksperimen berdasarkan model *prototype* yang dijadikan acuan, dimana dalam studi kasus Tugas Akhir ini dimensi utama *Classic* SPAR mengacu dari Mini SPAR *Platform Joint Industry Project* oleh Deep Oil Technology Inc. (1995) yang ditunjukkan pada **Tabel 2.1**, hal – hal penting yang harus dipertimbangkan dalam pemodelan agar model yang digunakan dalam

eksperimen dapat mewakili model *prototype* dengan keadaan yang sesungguhnya menurut Chakrabarti (2008) dan Munson *et al.* (2013) adalah sebagai berikut.

2.2.2.1 GEOMETRI

Dalam pertimbangan geometri, bentuk antara model eksperimen dengan model *prototype* adalah sama, sedangkan ukuran antara kedua model tersebut dikorelasikan dengan suatu perbandingan konstan antar ukuran kedua model, dimana perbandingan konstan antar ukuran kedua model tersebut merupakan faktor penskalaan (λ). Ilustrasi penskalaan model *prototype* ke eksperimen secara geometri ditunjukkan dengan **Gambar 2.11** di bawah ini.



Gambar 2.11 Penskalaan Model Secara Geometri

(a) *Prototype* (b) Eksperimen

(sumber: Yoon, 2014)

Persamaan matematis yang menjelaskan perbandingan konstan secara geometri tersebut diberikan pada **Persamaan 2.2** sebagai berikut.

$$\frac{l_p}{l_e} = \lambda \quad (2.2)$$

(sumber: Chakrabarti, 1998)

Dimana:

λ = Faktor Skala

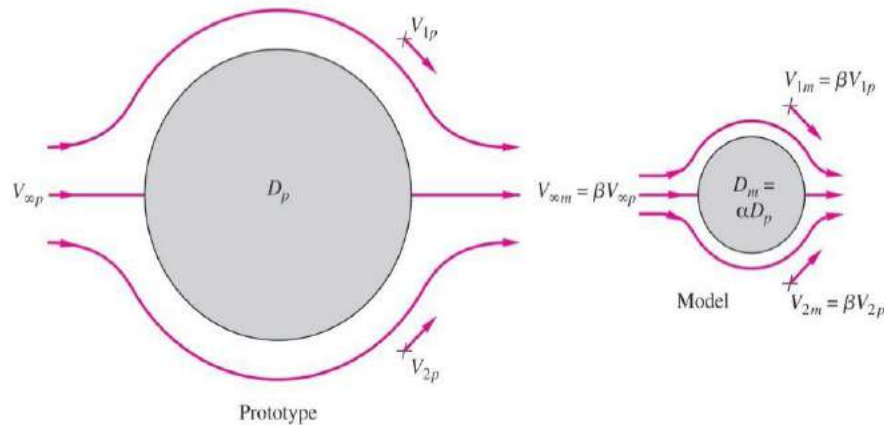
l_p = dimensi ukuran pada model *prototype*

l_e = dimensi ukuran pada model eksperimen

2.2.2.2 KINEMATIKA FLUIDA

Dalam pertimbangan kinematika fluida, rasio variabel kecepatan maupun percepatan antara model eksperimen dengan *prototype* memiliki rasio yang konstan, namun rasio kecepatan pada pertimbangan ini memiliki nilai yang berbeda

dengan percepatan. Visualisasi penskalaan model *prototype* ke eksperimen dengan pertimbangan kinematika fluida ditunjukkan dengan **Gambar 2.12** di bawah ini.



Gambar 2.12 Penskalaan Model Secara Kinematika Fluida

(sumber: Yoon, 2014)

2.2.2.3 DINAMIKA STRUKTUR AKIBAT BEBAN FLUIDA

Dalam pertimbangan dinamika struktur akibat beban fluida, hal yang menentukan dalam penentuan skala adalah gaya yang dialami oleh struktur tersebut. Oleh karenanya memahami proses fisik yang dialami struktur akibat beban fluida sangat diperlukan untuk kemudian menentukan hukum skala yang paling sesuai dalam menjelaskan perilaku yang dialami oleh struktur tersebut.

Berdasarkan ketiga pertimbangan di atas, maka dapat ditentukan faktor – faktor penskalaan dari variabel – variabel yang mewakili dimensi atau ukuran utama dari struktur dan karakteristik mekanik gelombang secara geometris, serta sifat kinematis dan dinamisnya yang ditunjukkan oleh **Tabel 2.2** yang bersumber dari Chakrabarti (1994). Hukum skala yang digunakan untuk melakukan pemodelan eksperimen adalah Hukum Model *Froude*, dimana bilangan *Froude* adalah bilangan hidromekanik yang menunjukkan rasio gaya pada struktur antara inersia dan gravitasi pada sebuah *medium* (Chakrabarti, 1998). Persamaan matematis bilangan *Froude* ditunjukkan dengan **Persamaan 2.3** sebagai berikut.

$$\frac{u^2}{(gD)} = Fr \quad (2.3)$$

(sumber: Chakrabarti, 1998)

Dimana:

Fr = Bilangan *Froude* (parameter non – dimensional)

u = kecepatan aliran fluida (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

D = Karakteristik dimensi *Classic* SPAR (m)

Faktor penskalaan pemodelan dihubungkan berdasarkan ukuran dari model *prototype* dibandingkan dengan model eksperimen, maka kedua model tersebut harus memiliki hubungan secara matematis dengan memasukkan **Persamaan 2.2** ke dalam **Persamaan 2.3**, sehingga menghasilkan **Persamaan 2.4 (a)** dan **(b)** di bawah ini:

$$Fr_{prototype} = Fr_{eksperimen} \quad (2.4a)$$

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_e^2}{(gD_e)} \quad (2.4b)$$

(sumber: Chakrabarti, 1998)

Dimana:

u_p = kecepatan aliran fluida pada model *prototype* (m/s)

u_e = kecepatan aliran fluida pada model eksperimen (m/s)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

D_p = Karakteristik dimensi model *prototype Classic* SPAR (m)

D_e = Karakteristik dimensi model eksperimen *Classic* SPAR (m)

Tabel 2.2 Penskalaan Model Pada Variabel Mekanik Dengan Hukum Model *Froude*

(sumber: Chakrabarti, 1994)

| Variabel | Dimensi | Faktor Skala | Keterangan |
|--------------------------|---------|-----------------|--|
| GEOMETRI STRUKTUR | | | |
| Panjang | L | λ | Seluruh ukuran pada obyek yang menggunakan dimensi panjang |
| Volume | L^3 | λ^3 | Seluruh bagian pada obyek yang menggunakan dimensi volume |
| Sudut | - | 1 | Ukuran antara dua bidang pada obyek secara rotasional |
| Radius Girasi | L | λ | Diukur dari <i>fixed point</i> |
| Momen Inersia Massa | ML^2 | λ^5 | Diambil di <i>fixed point</i> |
| <i>Centre of Gravity</i> | L | λ | Diukur dari <i>reference point</i> |
| Periode Natural | T | $\lambda^{1/2}$ | Periode saat Gaya Inersia sama dengan Gaya Pemulih |

Tabel 2.2 Penskalaan Model Pada Variabel MekanikDengan Hukum Model *Froude* (cont.)

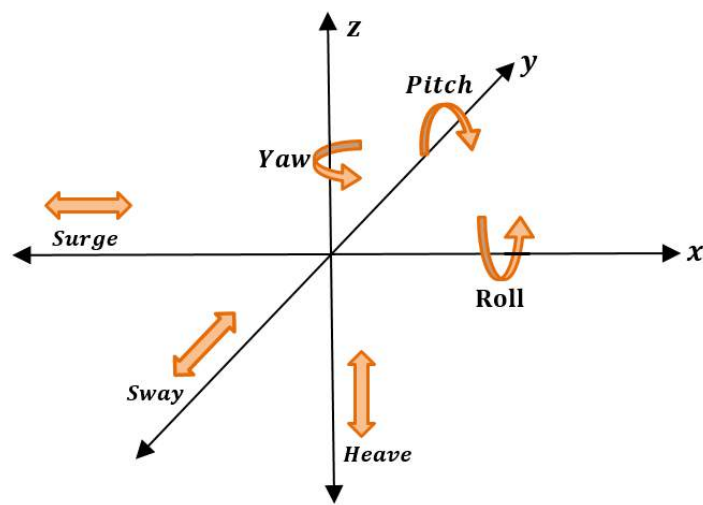
(sumber: Chakrabarti, 1994)

| Variabel | Dimensi | Faktor Skala | Keterangan |
|--------------------------------|-----------|-----------------|---|
| MEKANIKA GELOMBANG | | | |
| Tinggi | L | λ | Jarak Puncak ke Lembah |
| Periode | T | $\lambda^{1/2}$ | Waktu diantara dua puncak berturutan melalui titik referensi |
| Panjang | L | λ | Jarak antara dua puncak berturutan |
| Elevasi/Amplitudo | L | λ | Jarak dari puncak/lembah dari <i>still waterline</i> |
| KINEMATIKA DAN DINAMIKA | | | |
| Waktu | T | $\lambda^{1/2}$ | Waktu mulai ditentukan sebagai waktu nol, dengan <i>reference point</i> yang sama |
| Perpindahan | L | λ | Posisi awal ditentukan sebagai <i>displacement</i> nol |
| Konstanta Kekakuan | MT^{-2} | λ^2 | Gaya per unit panjang ekstensi |
| Faktor Redaman | - | 1 | Rasio redaman dan koefisien redaman kritis |

2.2.3 GERAKAN STRUKTUR *CLASSIC* SPAR

Struktur *Classic* SPAR yang dijadikan obyek eksperimen untuk studi kasus Tugas Akhir ini merupakan bangunan tipe lentur – terapung (*compliant – floating*) (Tao *et al.*, 2007 ; Sudhakar and Nallayarasu, 2013 ; Kurian *et al.*, 2014 ; Nallayarasu and Mathai, 2015). Dikarenakan hal tersebut, struktur *Classic* SPAR memiliki kebebasan untuk bergerak pada tiga sumbu utama gerak (sumbu x,y dan z), gerakan tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satu diantaranya adalah pengaruh beban lingkungan yang diterima oleh struktur, sehingga struktur tersebut mengalami perpindahan posisi relatif terhadap titik acuan awal dimana struktur terapung tersebut belum mendapat beban eksternal dari lingkungan. Gerak struktur terapung terdiri atas

2 kelompok besar (Journee and Massie, 2001 ; Horoub, 2016), yaitu gerak translasi yang merupakan gerak dari bangunan terapung dengan lintasan *linier* dan gerak rotasi yang merupakan gerak dari bangunan terapung dengan lintasan rotasional. Gerak translasi terdiri atas 3 gerak berdasarkan arah sumbu gerakannya, yaitu *surge* untuk gerak terhadap sumbu – x, *sway* untuk gerak terhadap sumbu – y dan *heave* untuk gerak terhadap sumbu – z. Sedangkan gerak rotasi juga terdiri atas 3 gerak berdasarkan sumbu rotasinya, yaitu *roll* untuk gerak terhadap sumbu – x, *pitch* untuk gerak terhadap sumbu – y dan *yaw* untuk gerak terhadap sumbu – z. Keenam gerakan tersebut dikenal sebagai *six degrees of freedom* atau enam derajat gerak kebebasan yang ditunjukkan oleh **Gambar 2.13** sebagai berikut.



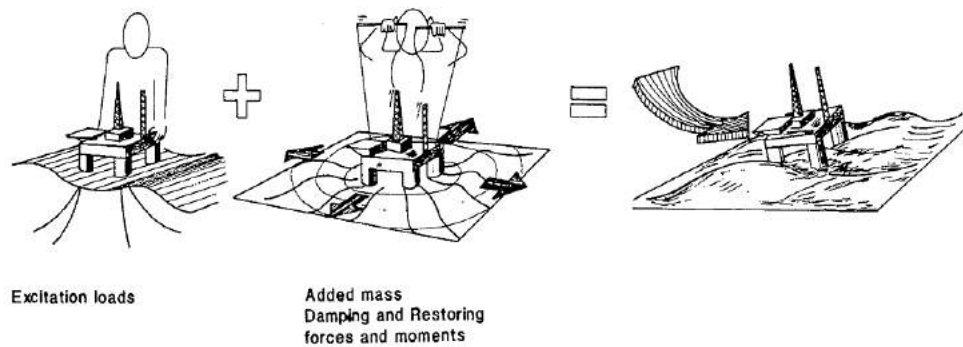
Gambar 2.13 Gerakan Enam Derajat Kebebasan Struktur *Classic* SPAR

(sumber: Horoub, 2016)

2.2.4 INTERAKSI HIDRO – STRUKTUR

2.2.4.1 DEFINISI

Interaksi hidro – struktur terjadi dikarenakan adanya beban – beban yang dialami oleh struktur terapung akibat kombinasi antara faktor karakteristik struktur dengan gelombang yang datang mengenai struktur sehingga struktur tersebut mengalami respon getaran atau berosilasi (Faltinsen, 1990). Visualisasi interaksi hidro – struktur ditunjukkan pada **Gambar 2.14** sebagai berikut.



Gambar 2.14 Interaksi Hidro – Struktur Bangunan Apung

(sumber: Faltinsen, 1990)

2.2.4.2 JENIS – JENIS BEBAN INTERAKSI

Pengelompokkan beban interaksi hidro – struktur berdasarkan faktor – faktor permasalahan yang menyebabkan terjadinya interaksi ditinjau dari lingkup proses terjadinya respon dari struktur terapung tersebut antara lain:

2.2.4.2.1 PERMASALAHAN DIFRAKSI

Permasalahan difraksi terjadi dengan gaya dan momen yang dialami oleh struktur terapung akibat struktur mendapatkan getaran dari gelombang yang datang mengenainya, namun dengan keadaan ditahan untuk beresilasi dengan sengaja, sehingga struktur menerima beban eksitasi yang berasal dari gelombang. Komponen – komponen beban yang berpengaruh pada permasalahan difraksi antara lain:

2.2.4.2.1.1 FROUDE – KRYLOV

Beban *Froude – Krylov* adalah beban yang terjadi diakibatkan oleh aliran fluida gelombang yang bergerak ke struktur menyebabkan distribusi tekanan gelombang pada struktur yang tidak merata (Faltinsen, 1990). Besarnya beban *Froude – Krylov* pada arah *heave* didapatkan dengan cara mengintegrasikan tekanan dari aliran fluida yang bergerak ke struktur terhadap fungsi luas penampang melintang dari struktur *Classic SPAR* (Haslum, 2000 ; Philip *et al.*, 2013). Besarnya nilai tekanan dari ini didapatkan dari Persamaan Bernoulli (Philip *et al.*, 2012). Persamaan beban *Froude – Krylov* ditunjukkan pada **Persamaan 2.5** di bawah ini.

$$F_{FK} = \int_S p n_3 dS \quad (2.5)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; He, 2003 ; Philip *et al.*, 2013)

Dimana:

F_{FK} = Beban *Froude – Krylov* (m/s)

S = Luasan rerata permukaan basah pada *Classic SPAR* (m²)

p = Tekanan dari gelombang *undisturbed* (N/m²)

n_3 = unit vektor arah komponen vertikal pada luasan permukaan *Classic SPAR*

2.2.4.2.1.2 DIFRAKSI

Beban Difraksi adalah beban tekanan yang muncul akibat perubahan distribusi tekanan pada struktur yang berasal dari aliran fluida dikarenakan keberadaan struktur terapung dengan ukuran yang signifikan (Haslum, 2000 ; Philip *et al.*, 2013). Untuk menghitung beban difraksi sebenarnya perlu dilakukan peninjauan kondisi batas dari tiap kasus yang terjadi serta memerlukan pendekatan matematis secara kompleks (Faltinsen, 1990). Namun dengan mengasumsikan bahwa panjang gelombang datang yang mengenai struktur sangat panjang, dengan menggunakan pendekatan teori gelombang linier (Philip *et al.*, 2012), besaran beban difraksi dapat disederhanakan dengan persamaan matematis pada **Persamaan 2.6** di bawah ini.

$$F_D = A_{33}a_3 \quad (2.6)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; Philip *et al.*, 2012)

Dimana:

F_D = Beban difraksi (N)

A_{33} = Massa tambah arah *heave* (kg)

a_3 = Akselerasi *Classic SPAR* arah *heave* akibat gelombang *undisturbed* (m/s²)

Untuk struktur *Classic SPAR*, nilai dari beban *Froude – Krylov* lebih besar dibandingkan dengan beban difraksi, hal ini dikarenakan karakteristik struktur *Classic SPAR* secara natural yang memiliki nilai karakteristik massa tambah yang rendah, hal ini ditunjukkan dengan nilai dari koefisien massa tambahnya. Sehingga apabila ingin mereduksi nilai beban vertikal (*heave*) gelombang terhadap struktur, maka langkah – langkah yang dapat dilakukan adalah (Haslum, 2000):

- Melawan beban *Froude – Krylov* dengan memperbesar beban difraksi, yaitu memperbesar karakteristik massa tambah, atau
- Memperkecil beban *Froude – Krylov*, yaitu dengan memperkecil diameter silinder lambung vertikal dari *Classic SPAR*

Kedua pernyataan hubungan di atas dapat diselidiki kebenarannya berdasarkan **Persamaan 2.8** sementara persamaan gabungan diantara beban *Froude – Krylov* dan Difraksi yang menunjukkan beban eksitasi gelombang pada arah *heave* ditunjukkan pada **Persamaan 2.7** berikut ini.

$$F_3 \approx - \underbrace{\int_S p_{FK} n_3 ds}_{FK} + \underbrace{A_{33} a_z}_{DIFF} = A_w p|_{z=-d} + A_{33} a_z|_{z=-d} \quad (2.7)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; Philip *et al.*, 2012)

Dimana:

- F_3 = Beban eksitasi gelombang arah *heave* (N)
- S = Luasan rerata permukaan basah pada *Classic* SPAR (m²)
- p = Tekanan dari gelombang *undisturbed* (N/m²)
- n_3 = unit vektor arah komponen vertikal pada luasan permukaan *Classic* SPAR
- A_{33} = Massa tambah arah *heave* (kg)
- a_3 = Akselerasi gelombang *undisturbed* pada *Classic* SPAR arah *heave* (m/s²)
- d = Sarat *Classic* SPAR (m)
- A_w = Luasan penampang melintang *Classic* SPAR (m²)

Sehingga, dengan memasukkan syarat kondisi batas struktur, didapatkan persamaan final beban eksitasi gelombang pada arah *heave* yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.8** sebagai berikut.

$$F_3 = \left\{ \rho g \frac{H \pi D^2}{2 \cdot 4} \frac{\cosh(k(d+h))}{\cosh kd} - \omega^2 A_{33} \frac{H \sinh(k(d+h))}{2 \sinh kd} \right\} \cos(kx - \omega t). \quad (2.8)$$

(sumber: Faltinsen, 1990 ; Philip *et al.*, 2012)

Dimana:

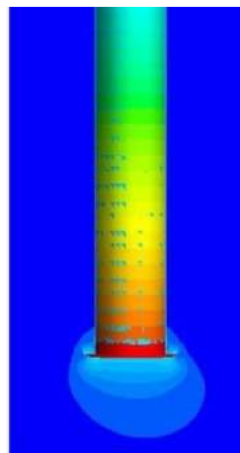
- F_3 = Beban eksitasi gelombang arah *heave* (N)
- ρ = Massa jenis fluida di sekitar *Classic* SPAR (kg/m³)
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)
- H = Tinggi gelombang (m)
- D = Diameter penampang melintang *Classic* SPAR (m²)
- ω = frekuensi gelombang (rad/s), dimana $\omega = 2\pi/T$
- T = Periode gelombang (s)
- A_{33} = Massa Tambah arah *heave* (kg)
- k = bilangan gelombang
- d = Sarat *Classic* SPAR (m)
- h = Tinggi *Classic* SPAR relatif terhadap *stillwater* (m)
- x = Koordinat horisontal (m)
- t = Waktu (s)

2.2.4.2.2 PERMASALAHAN RADIASI

Permasalahan radiasi terjadi dengan gaya dan momen yang dialami oleh struktur terapung akibat struktur diberikan getaran yang disengaja (*forced oscillation*) dengan frekuensi yang sama dengan eksitasi gelombang datang, namun dengan keadaan tidak ada gelombang yang datang mengenai struktur tersebut yang disebut sebagai uji *heave decay*. Komponen – komponen beban tersebut, yang disebut sebagai karakteristik hidromekanik yang berpengaruh pada permasalahan radiasi menurut Haslum (2000) dan He (2003) antara lain:

2.2.4.2.2.1 MASSA TAMBAH

Massa tambah atau *added mass* adalah penambahan gaya inersia pada sistem struktur terapung dikarenakan pergerakan dari struktur menyebabkan perpindahan fluida yang berada di sekeliling struktur tersebut sehingga menyebabkan timbulnya penambahan massa struktur (Imlay, 1961 ; Ghassemi and Yari, 2011 ; Konstantinidis, 2013). Hal ini dikarenakan pergerakan fluida tersebut menyebabkan penambahan energi kinetik yang kemudian berdampak terhadap penambahan gaya eksternal yang bekerja pada struktur terapung (Brennen, 1982), sehingga apabila gaya eksternal tersebut dibagi dengan percepatan struktur maka akan menghasilkan variabel massa yang disebut sebagai massa tambah yang besar nilainya bergantung dari karakteristik struktur dan mode gerak struktur terapung tersebut (Sarpkaya, 2010). Visualisasi massa tambah yang dialami oleh struktur akibat pergerakan fluida di *heave plate* yang diposisikan di *keel Classic SPAR* yang ditunjukkan pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15 Visualisasi Massa Tambah Akibat Pergerakan Fluida di *Heave Plate keel Classic SPAR*

(sumber: Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016)

Persamaan yang menunjukkan hubungan antara beban inersia akibat massa tambah, nilai dari massa tambah dan percepatan mode gerak struktur terapung memenuhi kaidah Hukum Newton II yang diberikan pada **Persamaan 2.9** di bawah ini.

$$F_A = A_i \eta^{**}_i \quad (2.9)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; Konstantinidis, 2013 ; Philip *et al.*, 2013)

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

F_A = Beban Inersia akibat massa tambah (N)

M = massa struktur *Classic SPAR* (kg)

A = massa tambah struktur (kg)

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

η^{**} = percepatan respon gerak struktur (m/s^2)

Besar nilai karakteristik massa tambah tersebut dalam berbagai kondisi konfigurasi struktur dalam keadaan *free floating* berdasarkan Tao *et al.* (2007) pada **Persamaan 2.11** dan Philip *et al.* (2013) pada **Persamaan 2.12** dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

a. Tao *et al.*, 2007 (**Persamaan 2.11**).

$$A_{33} = \frac{1}{12} \rho (2D_d^3 + 3\pi D_d^2 \left(\frac{1}{\pi} \sqrt{D_d^2 - D_s^2} \right) - \left(\pi \left(\frac{1}{\pi} \sqrt{D_d^2 - D_s^2} \right) \right)^3 - 3\pi D_s^2 \left(\frac{1}{\pi} \sqrt{D_d^2 - D_s^2} \right)) \quad (2.11)$$

b. Philip *et al.*, 2013 (**Persamaan 2.12**)

$$A_{33} = \rho \left(\frac{\pi D_s^3}{12} + \frac{D_d^3 - D_s^3}{6} + \frac{(D_d^2 - D_s^2)^{3/2}}{6} \right) \quad (2.12)$$

Dimana:

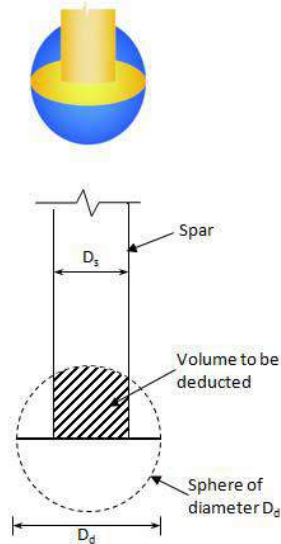
A_{33} = Massa tambah arah *heave* (kg)

ρ = Massa jenis fluida di sekitar *Classic SPAR* (kg/m^3)

D_s = Diameter silinder vertikal *Classic SPAR* (m)

D_d = Diameter *heave plate* (m)

Visualisasi variasi peletakkan *heave plate* pada silinder vertikal *Classic SPAR* terhadap penambahan karakteristik massa tambah arah *heave* ditunjukkan pada **Gambar 2.16** di bawah ini.



Gambar 2.16 Peletakkan *Heave Plate* Pada *keel* dan Dampak Terhadap Karakteristik Massa Tambah Arah *Heave*

(sumber: Philip *et al.*, 2012)

Nilai koefisien massa tambah (C_A) pada arah *heave* struktur dapat didapatkan setelah diketahuinya besar massa tambah arah *heave* (A_{33}) yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.13** sebagai berikut.

$$C_A = \frac{A_{33}}{(M + A_{33})} \quad (2.13)$$

(sumber: Yuen, 1985 ; Tao *et al.*, 2007)

Dimana:

A_{33} = Massa tambah arah *heave* (kg)

M = Massa struktur *Classic SPAR* (kg)

C_A = Koefisien massa tambah (parameter non – dimensional)

2.2.4.2.2.2 REDAMAN

Redaman merupakan proses dimana getaran bebas dari sebuah struktur mengalami reduksi nilai dari amplitudonya, hal ini terjadi akibat adanya disipasi energi yang disebabkan oleh berkurangnya energi kinetik dari struktur pada saat mengalami osilasi pada sebuah medium tertentu sehingga gerakannya akan semakin berkurang dengan berjalannya waktu akibat gesekan dengan permukaan medium tersebut (Chopra, 1995). Secara umum, redaman yang muncul akibat berasal dari pembangkitan gelombang oleh struktur terapung (*radiation damping*) maupun beban viskos akibat efek aliran di sekitar struktur (*viscous damping*) memberi pengaruh terhadap nilai redaman total pada struktur terapung (Chen and Chung, 1976). Dalam kasus perhitungan redaman pada struktur *Classic SPAR* ini, faktor redaman yang

dipertimbangkan hanya berasal dari *viscous damping* dikarenakan pada uji *heave decay* pada eksperimen, struktur melakukan respon gerak akibat *forced oscillation* dengan pemberian simpangan awal dan tidak ada gaya gelombang yang mengenai struktur. Persamaan yang menunjukkan hubungan antara beban redaman, nilai dari redaman sistem dan kecepatan mode gerak struktur terapung diberikan pada **Persamaan 2.14**.

$$F_B = B_i \eta^*_i \quad (2.14)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; Philip *et al.*, 2013 ; Rao *et al.*, 2016)

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

F_B = Beban Redaman Viskos (N)

B = redaman sistem (N/(m/s))

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

η^* = kecepatan respon gerak struktur (m/s)

Sedangkan untuk perhitungan redaman viskos pada arah *heave* dapat menggunakan pendekatan pada **Persamaan 2.15** sebagai berikut.

$$B_{33} = 2\xi_3 \sqrt{(M + A_{33})C_{33}} \quad (2.15)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; Philip *et al.*, 2013)

Dimana,

B_{33} = Redaman Viskos arah *heave* (N/(m/s))

ξ_3 = Rasio redaman *heave*

M = Massa struktur (kg)

A_{33} = Massa tambah struktur (kg)

C_{33} = Kekakuan struktur (N/m)

Rasio redaman atau *viscous damping ratio* (ξ) arah *heave* adalah parameter yang menunjukkan perbandingan antara redaman aktual arah *heave* yang terjadi pada struktur akibat pengaruh aliran fluida yang bergerak disekitar struktur saat berosilasi secara vertikal (redaman viskos) dengan redaman kritis (B_{cr}) dari struktur. Persamaan untuk redaman kritis ditunjukkan pada **Persamaan 2.16** di bawah ini.

$$B_{cr} = 2\sqrt{(M + A_{33})C_{33}} \quad (2.16)$$

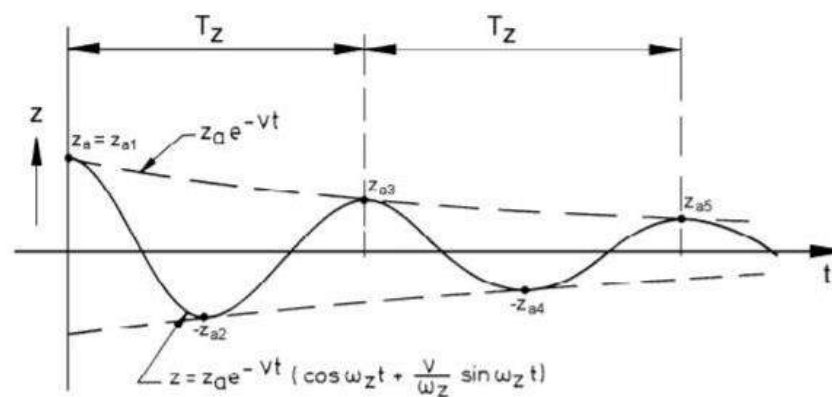
Dimana,

B_{cr} = Redaman kritis (N/(m/s))

Parameter ini menentukan nilai respon amplifikasi struktur, terutama disaat kondisi resonansi sistem dimana periode natural struktur mendekati dengan periode gelombang *encounter* yang datang mengenai struktur serta sudut fase respon, parameter yang menunjukkan gerakan dari struktur pasca gelombang *encounter* melewatinya atau berada di belakangnya, sehingga disebut sebagai sudut fase melambat atau *lagging phase angle* (Djatkiko, 2012) yang akan dijelaskan lebih lanjut pada **Subbab 2.2.7**. Mode dari rasio redaman ditinjau dari nilai redaman aktualnya, dapat dibagi menjadi tiga mode, yaitu:

- Redaman sub – kritis (*underdamped*) ($B_{33} < B_{cr}$)
- Redaman kritis (*critical damped*) ($B_{33} = B_{cr}$)
- Redaman super – kritis (*overdamped*) ($B_{33} > B_{cr}$)

Dalam studi kasus Tugas Akhir ini, pembahasan akan lebih dirincikan pada mode redaman sub – kritis (*underdamped*), dikarenakan harga dari koefisien redaman untuk struktur umumnya lebih kecil dari koefisien redaman kritis dengan *range* hingga 20% (Journee and Massie, 2001). Grafik visualisasi osilasi mode *underdamped* ditunjukkan pada **Gambar 2.17**.



Gambar 2.17 Grafik Osilasi Mode *Underdamped*

(sumber: Journee and Massie, 2001)

Apabila ditentukan kondisi awal (*initial condition*) dari perpindahan posisi vertikal (y_0) dan kecepatan (v_0) pada osilasi *underdamped*, dapat dirumuskan persamaan yang mengatur fungsi posisi vertikal terhadap waktu ($y(t)$) yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.17**.

$$y(t) = A e^{-\xi \omega_{n3} t} \cos(\omega_d t - \gamma) \quad (2.17)$$

Dimana nilai variabel A dan γ dapat ditentukan dengan **Persamaan 2.18** dan **Persamaan 2.19**.

$$A = \sqrt{y_0^2 + \frac{(v_0 + y_0 \cdot \xi \cdot \omega_{n3})^2}{\omega_d^2}} \quad (2.18)$$

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{(v_0 + y_0 \cdot \xi \cdot \omega_{n3})}{\omega_d \cdot y_0}\right) \quad (2.19)$$

2.2.4.2.2.3 KEKAKUAN

Beban kekakuan atau *restoring force* adalah beban yang muncul sebagai reaksi pengembali posisi struktur untuk kembali kepada keadaan semula. Dalam keadaan struktur *Classic SPAR* berada di kondisi *free floating*, maka hanya faktor pengaruh kekakuan hidrostatis pada struktur yang memberi kontribusi pada penyebab terjadinya beban kekakuan yang bekerja pada tiga mode gerak struktur, yaitu *heave*, *roll* dan *pitch* (Haslum, 2000 ; Djatmiko, 2012). Sedangkan dalam kondisi tertambat, kekakuan tambat menjadi faktor dominan yang menyebabkan struktur mendapat respon pada enam mode gerak struktur yang akan dibahas lebih lanjut pada **Subbab 2.2.8**. Persamaan beban kekakuan ditunjukkan pada **Persamaan 2.20** sebagai berikut.

$$F_c = C_i \eta_i \quad (2.20)$$

(sumber: sumber: Haslum, 2000 ; Philip *et al.*, 2013)

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

F_c = Beban Kekakuan (N)

C = Kekakuan Struktur (N/m)

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

η = respon gerak struktur (m)

Dengan nilai kekakuan hidrostatis *Classic SPAR* pada mode gerak struktur *heave* ditunjukkan pada **Persamaan 2.21**.

$$C_{33} = \rho g A_{wp} \quad (2.21)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; He, 2003 ; Philip *et al.*, 2013)

Dimana fungsi luas permukaan A_{wp} ditunjukkan pada **Persamaan 2.22** di bawah ini:

$$A_{wp} = \frac{1}{4} \pi D^2 \quad (2.22)$$

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

C_{33} = Kekakuan struktur arah *heave* (N/m)

ρ = Massa jenis air yang mengelilingi struktur (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

A_{wp} = Luas permukaan melintang struktur (m²)

D = Diameter silinder vertikal *Classic* SPAR (m)

Beban total pada permasalahan radiasi yang ditimbulkan oleh massa tambah, redaman viskos dan kekakuan hidrostatik sehingga struktur melakukan beban reaksi sebagai respon dari beban eksitasi yang diberikan oleh gelombang adalah ditunjukkan pada **Persamaan 2.23**.

$$F_{Reaksi(3)} = F_{A(33)} + F_{B(33)} + F_{C(33)} \quad (2.23)$$

(sumber: Haslum, 2000)

Dimana,

F_A = Beban Inersia akibat Massa Tambah (N)

F_B = Beban Redaman Viskos (N)

F_C = Beban Kekakuan Hidrostatik (N)

2.2.5 PERSAMAAN GERAK STRUKTUR CLASSIC SPAR

Gerak struktur *Classic* SPAR yang merupakan bangunan terapung akibat interaksi hidro – struktur memenuhi kaidah Hukum II Newton sesuai **Persamaan 2.24** dan dan Hukum III Newton sesuai **Persamaan 2.25**.

$$\sum F = M_i \eta^{**i} \quad (2.25)$$

(sumber: Haslum, 2000)

dengan keterangan variabel sebagai berikut:

F = Beban yang dialami oleh bangunan apung (N)

M = massa struktur (kg)

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

η^{**} = percepatan respon gerak struktur (m/s²)

$$\sum F = F_{Eksitasi} - F_{Reaksi} \quad (2.26)$$

(sumber: Haslum, 2000)

Dimana,

F = Beban Total yang dialami struktur terapung akibat interaksi hidro – struktur (N)

F_{EKSITASI} = Beban yang dialami struktur karena pengaruh eksitasi gelombang (N)

F_{REAKSI} = Beban yang dilakukan struktur untuk melawan beban eksitasi (N)

Dengan substitusi **Persamaan 2.8** dan **Persamaan 2.23** ke dalam **Persamaan 2.25** sehingga didapatkan **Persamaan 2.26** yang menunjukkan persamaan gerak struktur pada arah *heave*.

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 = F_3(t) \quad (2.26)$$

(sumber: Haslum, 2000 ; Vu *et al.*, 2007)

Masukkan **Persamaan 2.15** ke dalam **Persamaan 2.26**, sehingga didapatkan persamaan yang menunjukkan rasio redaman pada arah *heave* (ξ_3) yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.27**.

$$\xi_3 = \frac{F_3 - (M + A_{33})\ddot{\eta}_3 - C_{33}\eta_3}{2\dot{\eta}_3\sqrt{(A_{33} + M)C_{33}}}, \quad (2.27)$$

(sumber: Philip *et al.*, 2013)

Dimana:

ξ_3 = Rasio redaman arah *heave*

$F_3(t)$ = Beban yang menggerakkan struktur ke arah *heave* (N)

M = Massa struktur (kg)

A_{33} = Massa tambah struktur pada arah *heave* (kg)

B_{33} = Redaman viskos struktur pada arah *heave* (N/(m/s))

C_{33} = Kekakuan hidrostatis struktur arah *heave* (N/m)

η^{**} = percepatan respon gerak struktur (m/s²)

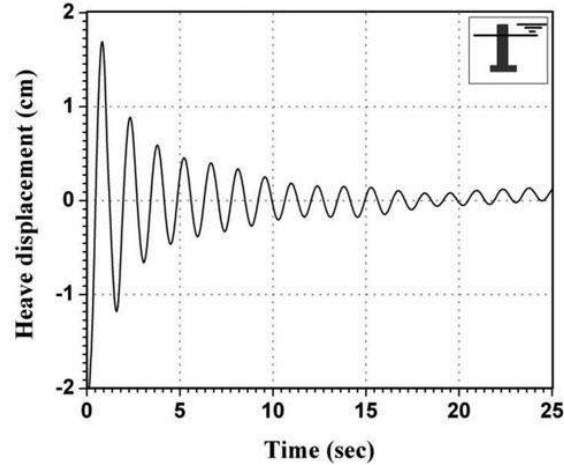
η^* = kecepatan respon gerak struktur (m/s)

η = *displacement* respon gerak struktur (m)

2.2.6 HEAVE DECAY TEST (INVESTIGASI EKSPERIMEN)

Heave decay Test atau *Forced Oscillation Method* adalah uji yang dilakukan pada struktur terapung untuk menentukan karakteristik – karakteristik seperti *viscous damping ratio*, periode natural dan parameter hidromekanik seperti massa tambah, redaman dan kekakuan sistem yang dilakukan dengan memberi simpangan atau amplitudo dan frekuensi dengan besaran tertentu di kondisi awal (*intial condition*) kepada sistem struktur *Classic SPAR* untuk dapat berosilasi (He, 2003 ; Philip *et al.*,

2013 ; Subbulakshmi and Sundaravadivelu, 2016). Visualisasi uji *heave decay* pada struktur *Classic SPAR* dengan dengan pemasangan *heave plate* di *keel Classic SPAR* dan dampaknya pada *heave displacement* dengan data berbasis *time history* yang ditunjukkan pada **Gambar 2.18**.



Gambar 2.18 *Heave Responses* Berbasis *Time History* Hasil Uji *Heave decay* Pada *Classic SPAR* Dengan *Heave Plate* di *keel*
(sumber: Philip *et al.*, 2013)

Hasil *output* yang didapatkan dari pengujian *heave decay* ini adalah parameter periode natural struktur arah *heave* (T_{33}) dan *heave viscous damping ratio* (ξ_3) dengan pendekatan secara *logarithmic decrement*. *Logarithmic decrement* adalah sebuah parameter yang menunjukkan rasio fungsi eksponensial antara amplitudo puncak awal dengan amplitudo puncak siklus ke n dari respon *heave* struktur saat mengalami uji *heave decay* dengan jumlah siklus puncak gelombang yang terjadi ($n - 1$ siklus). Persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai masing – masing dari kedua parameter tersebut ditunjukkan pada **Persamaan 2.28** untuk *logarithmic decrement* (δ) dan **Persamaan 2.29** untuk rasio redaman (ξ_3) berdasarkan Paz (1991) sebagai berikut.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} \quad (2.28)$$

$$\xi_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{\delta}\right)^2}} \quad (2.29)$$

Dimana:

δ = *Logarithmic Decrement* amplitudo respon *heave* saat uji *heave decay*

n = Jumlah siklus puncak gelombang

- A_0 = Amplitudo puncak awal (*initial condition*) (m)
 A_n = Amplitudo puncak saat siklus ke – n (m)
 ξ_3 = Rasio Redaman arah *heave*

Berdasarkan *Logarithmic Decrement* amplitudo *heave* (δ) dan rasio redaman arah *heave* (ξ_3) yang didapatkan pada **Persamaan 2.28** dan **2.29**, dapat ditentukan parameter – parameter lainnya seperti frekuensi redaman arah *heave* (ω_d) yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.30**, frekuensi tak teredam arah *heave* (ω_{n3}) pada **Persamaan 2.31** dan periode natural tak teredam arah *heave* (T_{n3}) pada **Persamaan 2.32** dan variasi kalkulasi massa tambah hasil eksperimen pada **Persamaan 2.33** berdasarkan Philip *et al.* (2013) dan Subbulakshmi and Sundaravadivelu (2016) di bawah ini.

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_a} \quad (2.30)$$

$$\omega_{n3} = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \xi_3^2}} \quad (2.31)$$

$$T_{n3} = \frac{2\pi}{\omega_{n3}} \quad (2.32)$$

$$A_{33} = C_{33} \left(\frac{T_{n3}}{2\pi} \right)^2 - M \quad (2.33)$$

Dimana:

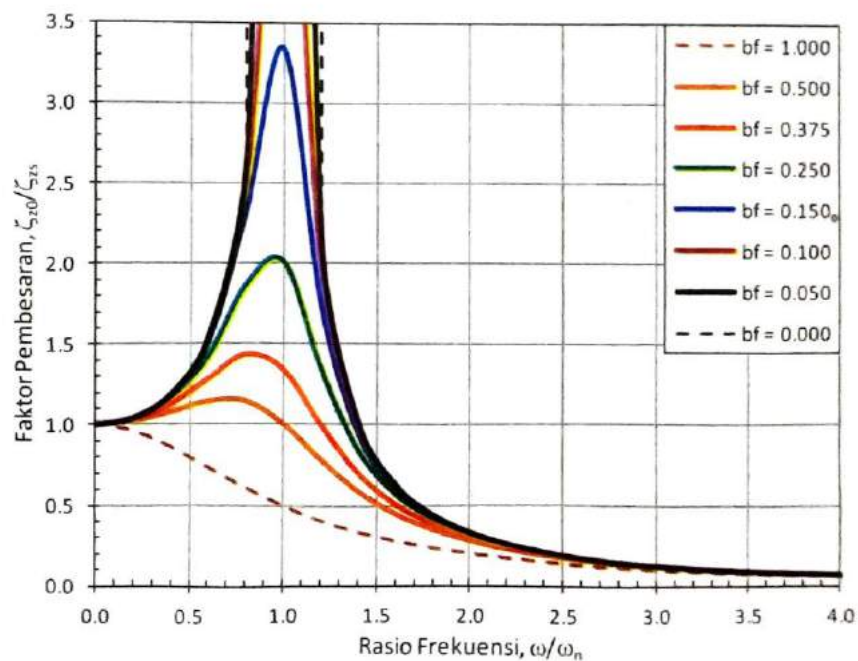
- ω_d = frekuensi redaman arah *heave* (rad/s)
 ω_{n3} = frekuensi natural tak teredam arah *heave* (rad/s)
 T_{n3} = periode natural tak teredam arah *heave* (s)
 T_a = Periode natural teredam/waktu diantara dua amplitudo puncak (s)

2.2.7 RESPON STRUKTUR TERHADAP BEBAN EKSTERNAL

Struktur *Classic* SPAR akan mengalami gerakan respon saat menerima beban eksitasi dari gelombang yang datang menuju struktur dengan periode atau frekuensi tertentu (Djarmiko, 2012). Mengingat bahwa gerakan struktur *Classic* SPAR berada dalam suatu medium fluida dengan tingkat redaman tertentu dan struktur juga mengalami proses penambatan akibat tambat taut yang dioperasikan, membuat respon dari struktur sangat bergantung terhadap besarnya nilai dari parameter *viscous damping ratio* yang dikalkulasikan berdasarkan **Persamaan 2.29**. Nilai parameter *viscous damping ratio* sendiri memiliki perubahan yang signifikan saat *Classic* SPAR diberikan tambahan komponen redaman berupa *heave plate* yang diletakkan di *keel*

beserta perubahan variasi diameternya terhadap *hull Classic* SPAR atau *diameter ratio* dikarenakan perubahan dari parameter massa tambah yang dikalkulasikan pada **Persamaan 2.11** dan **Persamaan 2.12** dan kemudian dilanjutkan pada **Persamaan 2.15** (Philip *et al.*, 2013). Kombinasi dari rasio perbandingan antara frekuensi gelombang datang dengan frekuensi natural struktur yang dikalkulasikan pada **Persamaan 2.32**, dengan diketahui nilai parameter *viscous damping ratio*, akan menentukan faktor amplifikasi atau pembesaran yang menunjukkan seberapa besar respon amplitudo struktur mengalami peningkatan apabila dibandingkan dengan amplitudo gelombang datang. Hubungan ini ditunjukkan pada **Persamaan 2.34** berdasarkan Djatmiko (2012) dan grafik respon amplitudo dengan variasi *viscous damping ratio* ditunjukkan pada **Gambar 2.19** sebagai berikut.

$$\frac{\zeta_{z0}}{\zeta_{zs}} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + [2\xi_3(\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2}} \quad (2.34)$$

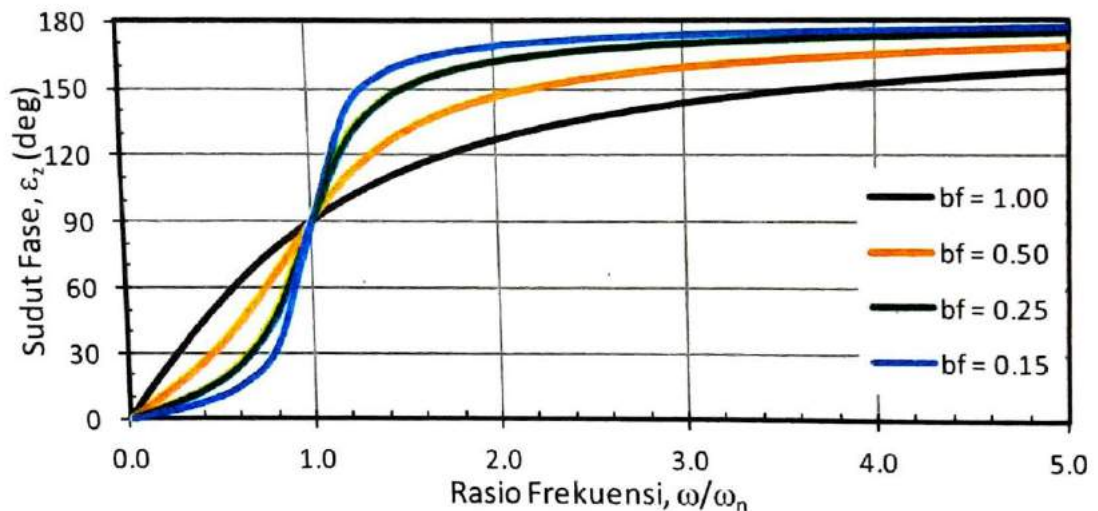


Gambar 2.19 Respon Amplitudo Struktur Akibat Gaya Harmonik Eksternal
(sumber: Djatmiko, 2012)

Selain parameter respon amplitudo struktur terhadap beban gelombang, dampak lain dari beban gelombang yang mengenai struktur adalah munculnya sudut fase respon, parameter ini menunjukkan gerakan dari struktur pasca gelombang datang melewatinya atau berada di belakangnya, sehingga disebut sebagai sudut fase melambat atau *lagging phase angle*. Hal ini mengakibatkan saat gelombang pertama

propagasi melewati struktur, struktur akan diam sejenak untuk kemudian baru bergerak. Selisih waktu antara gelombang datang dan osilasi reaksi dari struktur inilah yang disebut sebagai sudut fase yang diukur dengan cara membagi waktu antara dua puncak gelombang yang berturutan dengan periode gerakan lalu dikalikan dengan satu siklus gerakan atau 2π radian (Djtmiko, 2012). Parameter ini juga dipengaruhi besarnya dengan nilai dari *viscous damping ratio* yang menunjukkan respon pada struktur *Classic SPAR* saat di uji *heave decay*. Kalkulasi dari parameter sudut fase respon ditunjukkan pada **Persamaan 2.35** dan grafik kurva sudut fase respon struktur dengan variasi *viscous damping ratio* ditunjukkan pada **Gambar 2.20**.

$$\tan \varepsilon_z = \frac{2\xi_z \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (2.35)$$



Gambar 2.20 Sudut Fase Respon Struktur Akibat Gaya Harmonik Eksternal
(sumber: Djtmiko, 2012)

Dimana:

- ζ_{z0} = Amplitudo respon *heave* struktur (m)
- ζ_{zs} = Amplitudo gelombang eksternal (m)
- ε_z = Sudut fase respon ($^{\circ}$)
- ω = Frekuensi gelombang eksternal (rad/s)

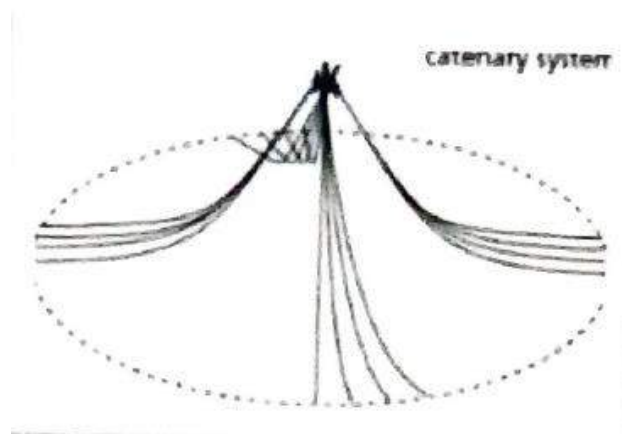
2.2.8 SISTEM TAMBAT

Sistem tambat pada struktur *Classic SPAR* berfungsi untuk mempertahankan posisi struktur agar tetap berada pada posisi perencanaan awal saat beroperasi dari beban – beban eksternal dari lingkungan seperti gelombang, angin dan arus. Bahan

karakteristik sistem tambat terbuat dari salah satu dari rantai, kabel atau kabel sintetis atau kombinasi dari bahan – bahan tersebut. Bagian atas dari *mooring lines* dipasang pada bagian struktur, yang dalam studi kasus *Classic SPAR* ini, ditempatkan pada *fairlead* dan bagian bawahnya dijangkarkan pada *seabed* atau pemberat. Tipe dari sistem tambat menyebar (*spread mooring*) pada struktur terapung dikelompokkan sebagai berikut:

- *Catenary Mooring*

Sistem *catenary mooring* merupakan tipe tambat yang gaya pengembalinya dihasilkan dari berat tali tambat tersebut dan hanya dikenakan beban horisontal dikarenakan untuk menunjang posisi *mooring* di dasar laut. Konfigurasi dari model *catenary mooring* ditunjukkan pada **Gambar 2.21**

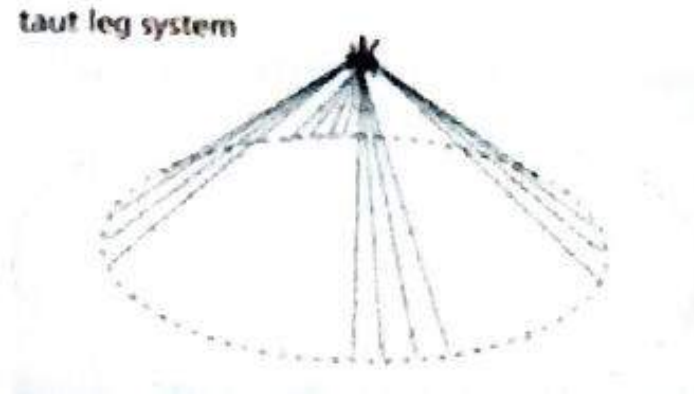


Gambar 2.21 Sistem Tambat *Catenary Mooring*

(sumber: rigzone.com, 1999)

- *Taut Mooring*

Sistem *taut mooring* merupakan tipe tambat yang memerlukan jangkar dalam menahan beban horisontal dan vertikal, dikarenakan posisi *mooring* yang membentuk sudut terhadap dasar laut. Gaya pengembali yang dihasilkan oleh tambat dihasilkan oleh berat *mooring lines*. *Taut mooring* memiliki radius tambatan yang lebih kecil dibandingkan dengan *catenary mooring*. Konfigurasi dari model *taut mooring* ditunjukkan pada **Gambar 2.22**.



Gambar 2.22 Sistem Tambat *Taut Mooring*

(sumber: *rigzone.com*, 1999)

Kekakuan dari tali tambat akan memberi pengaruh penambahan yang signifikan terhadap kekakuan sistem dari struktur, pengaruh kekakuan dari tali tambat juga mempengaruhi keenam mode gerak (*surge, sway, heave, roll, pitch* dan *yaw*) dari struktur untuk bergerak (memberi respon) saat mendapat gaya eksternal (Djarmiko, 2012). Dikarenakan terdapat dua bahan pembentuk konfigurasi tali tambat eksperimen, yaitu karet dan *wire sling*, langkah kalkulasi kekakuannya menggunakan pendekatan yang berbeda. Kekakuan dari satuan tali tambat jenis karet yang akan digunakan dalam eksperimen diukur dengan metode kalibrasi dengan pemberian beban dan kemudian mengukur elongasi dari tali tambat karet akibat pembebanan, kemudian nilai kekakuan karet dapat dihitung dengan memodifikasi **Persamaan 2.20** menjadi **Persamaan 2.36** sebagai berikut.

$$C_K = \frac{F_k}{(L_n - L_0)} \quad (2.36)$$

(sumber: Haslum, 2000)

Sedangkan berdasarkan Hukum *Hooke*, nilai dari kekakuan karakteristik tali tambat *wire sling* ditentukan dengan **Persamaan 2.37** sebagai berikut.

$$C_W = \frac{EA}{L_0} \quad (2.37)$$

(sumber: Haslum, 2000)

Dengan dilakukan penentuan gaya tarik awal (*pre - tension*), dapat ditentukan panjang tali tambat eksperimen akibat pengaruh *pre - tension* yang persamaannya ditunjukkan pada **Persamaan 2.38** di bawah ini.

$$L = L_0 \left(1 + \frac{T_{PT}}{EA} \right) \quad (2.38)$$

(sumber: Faltinsen, 1990)

Dengan:

C_K/C_W = Kekakuan tali tambat bahan karet/kawat *sling* (N/m)

F_k = Beban eksternal kalibrasi (kg)

L_n = Panjang tali tambat kalibrasi pasca pembebanan (m)

L_0 = Panjang tali tambat awal (m)

L = Panjang tali tambat akibat *pre – tension* (m)

T = *Pre – tension* tali tambat (N)

E = Modulus Elastisitas Young (N/m²)

A = Luas Penampang tali tambat (m²)

Dimana nilai dari beban yang menyebabkan timbulnya *pre – tension* pada tali tambat taut yang direncanakan dapat ditentukan nilainya, mempertimbangkan *displacement* dari struktur *Classic* SPAR, perubahan sarat pasca dilakukannya penambatan yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.39**.

$$F_{PT} = (\rho_f \pi D^2 \Delta T_s) / (16 \cos(\beta)) \quad (2.39)$$

Sedangkan nilai dari tegangan *pre – tension* dapat ditentukan setelah didapatkan parameter beban pada **Persamaan 2.39** dengan menggunakan **Persamaan 2.40**.

$$T_{PT} = F_{PT} g \quad (2.40)$$

Sedangkan apabila parameter *pre – tension* ini akan di skalakan ke ukuran *full scale* dengan metode penskalaan *Froude*, terlebih dahulu harus dikalikan dengan rasio antara densitas air laut (*seawater*) dengan air pada kolam uji MOB (*freshwater*) dikarenakan perbedaan kondisi lingkungan diantara keduanya. Hubungan rasio ini ditunjukkan pada **Persamaan 2.41** sebagai berikut.

$$\varepsilon = \frac{\rho_s}{\rho_f} \approx 1,025 \quad (2.41)$$

(sumber: Bhattacharya, 1978)

Dimana,

F_{PT} = Beban penyebab *pre – tension* tali tambat (kg)

T_{PT} = Tegangan *pre – tension* tali tambat (N)

ρ_f = Densitas air kolam MOB (kg/m³)

ρ_s = Densitas air laut (kg/m³)

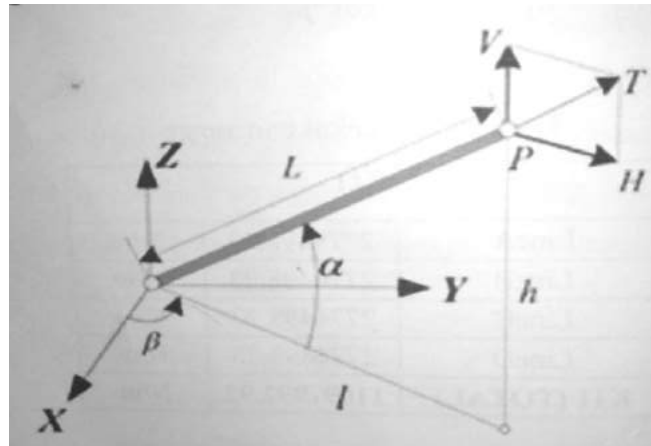
D = Diameter luar *hull Classic* SPAR (m)

T_s = Selisih sarat akibat penambatan (m)

β = Sudut antara tali tambat dan *fairlead* (°)

ε = Rasio densitas

Kalkulasi kekakuan tali tambat pada arah *heave* dapat dilakukan berdasarkan pendekatan yang dilakukan oleh Al – Solihat dan Nahon (2015) dimana konfigurasi tali tambatnya ditunjukkan pada **Gambar 2.23**.



Gambar 2.23 Kalkulasi kekakuan Tali Tambat

(sumber: Al – Solihat dan Nahon, 2015)

Persamaan kekakuan tali tambat yang didapatkan, berada dalam fungsi matriks komponen kekakuan pada tiap arah mode gerak yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.42**.

$$C^p = \begin{bmatrix} C_{11}^p & C_{13}^p \\ C_{31}^p & C_{33}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_{ml}}{\partial l_{ml}} & \frac{\partial H_{ml}}{\partial h_{ml}} \\ \frac{\partial V_{ml}}{\partial l_{ml}} & \frac{\partial V_{ml}}{\partial h_{ml}} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Dimana, hubungan kekakuan *heave* tali tambat terhadap matriks komponen kekakuan pada **Persamaan 2.42** ditunjukkan pada **Persamaan 2.43**.

$$C_{33} = C_{33}^p = \frac{\partial V_{ml}}{\partial h_{ml}} \quad (2.43)$$

Didapatkan persamaan untuk penentuan variabel – variabel pada **Persamaan 2.43** yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.44** untuk variabel V_{ml} dan **Persamaan 2.42** untuk variabel h_{ml} di bawah ini.

$$V_{ml} = T_{PT} \sin \alpha \quad (2.45)$$

$$h_{ml} = L \sin \alpha \quad (2.46)$$

Dengan dilakukan penurunan persamaan pada **Persamaan 2.45 – 2.46**, didapatkan **Persamaan 2.47** sebagai berikut.

$$C_{ml}^{33} = C_{ml} \sin^2 \alpha + \frac{T_{PT}}{L} \cos^2 \alpha \quad (2.47)$$

Akhirnya, nilai kekakuan total dari sistem tali tambat berdasarkan konfigurasinya didapatkan pada **Persamaan 2.48**.

$$C_{ML} = \sum_{i=1}^N [C_{33}^{pi}] \quad (2.48)$$

Dimana,

C^P = Komponen kekakuan tali tambat (N/m)

H_{ml} = Tegangan *pre – tension* komponen horisontal tali tambat (N)

V_{ml} = Tegangan *pre – tension* komponen vertikal tali tambat (N)

l_{ml} = Jarak horisontal antara *anchor* dengan *fairlead* (m)

h_{ml} = Jarak vertikal (tinggi) antara *anchor* dengan *fairlead* (m)

α = Sudut antara tali tambat dan *base* ($^{\circ}$)

C_{ML} = Kekakuan total tali tambat arah *heave* (N/m)

2.2.9 ANALISIS STRIP THEORY

Analisis ini dilakukan untuk memperoleh grafik *heave decay* struktur pada saat dilakukan pengujian dengan pemberian simpangan awal (*forced oscillation*), sehingga dapat diketahui beberapa parameter tinjauan seperti *viscous damping ratio*, redaman viskos, periode natural, dan massa tambah dengan menampilkan grafik *decay* pada setiap variasi *diameter ratio* pada *Classic SPAR* dan *heave plate*. Grafik *heave decay* didapatkan dari simulasi numeris dengan *Strip Theory Program “SEAWAY for Windows”* (Journee dan Adegeest, 2003) yang dibantu dengan bantuan *software* MATLAB. Dasar persamaan di *script coding* MATLAB yang digunakan pada analisis ini adalah persamaan gerak struktur bangunan terapung pada **Persamaan 2.26** dan dimodifikasi persamaannya oleh **Journee and Massie** (2001) menjadi **Persamaan 2.49**.

$$\ddot{z} + 2v.\dot{z} + \omega_{n3}^2.z = 0 \quad (2.49)$$

Dengan parameter ω_0 adalah frekuensi natural tak teredam yang dapat dicari dengan memodifikasi **Persamaan 2.32** dan **2.33** menjadi **Persamaan 2.50**, sementara parameter v (koefisien redaman viskos) dapat dicari menggunakan **Persamaan 2.51**.

$$\omega_{n3} = \sqrt{\frac{C_{33}}{M + A_{33}}} \quad (2.50)$$

$$v = \frac{B_{33}}{2(M + A_{33})} \quad (2.51)$$

Dengan menggabungkan **Persamaan 2.50** dengan **2.51**, maka parameter koefisien redaman non – dimensional (*viscous damping ratio*), dapat ditentukan dengan menggunakan **Persamaan 2.52**.

$$\xi = \frac{v}{\omega_{n3}} \quad (2.52)$$

Sehingga **Persamaan 2.49** dapat ditulis kembali dengan men – substitusikan parameter v pada **Persamaan 2.52**, sehingga menjadi **Persamaan 2.53**.

$$\ddot{z} + 2\xi\omega_{n3} \cdot \dot{z} + \omega_{n3}^2 \cdot z = 0 \quad (2.53)$$

Dengan pemberian *initial condition* berupa simpangan posisi vertikal terhadap kondisi awal pada uji *heave decay*, maka solusi penyelesaian dari **Persamaan 2.49** dapat dituliskan sebagaimana ditunjukkan pada **Persamaan 2.54**.

$$z = z_a \cdot e^{-v \cdot t} \cdot \left\{ \cos(\omega_{n3} \cdot t) + \frac{v}{\omega_{n3}} \cdot \sin(\omega_{n3} \cdot t) \right\} \quad (2.54)$$

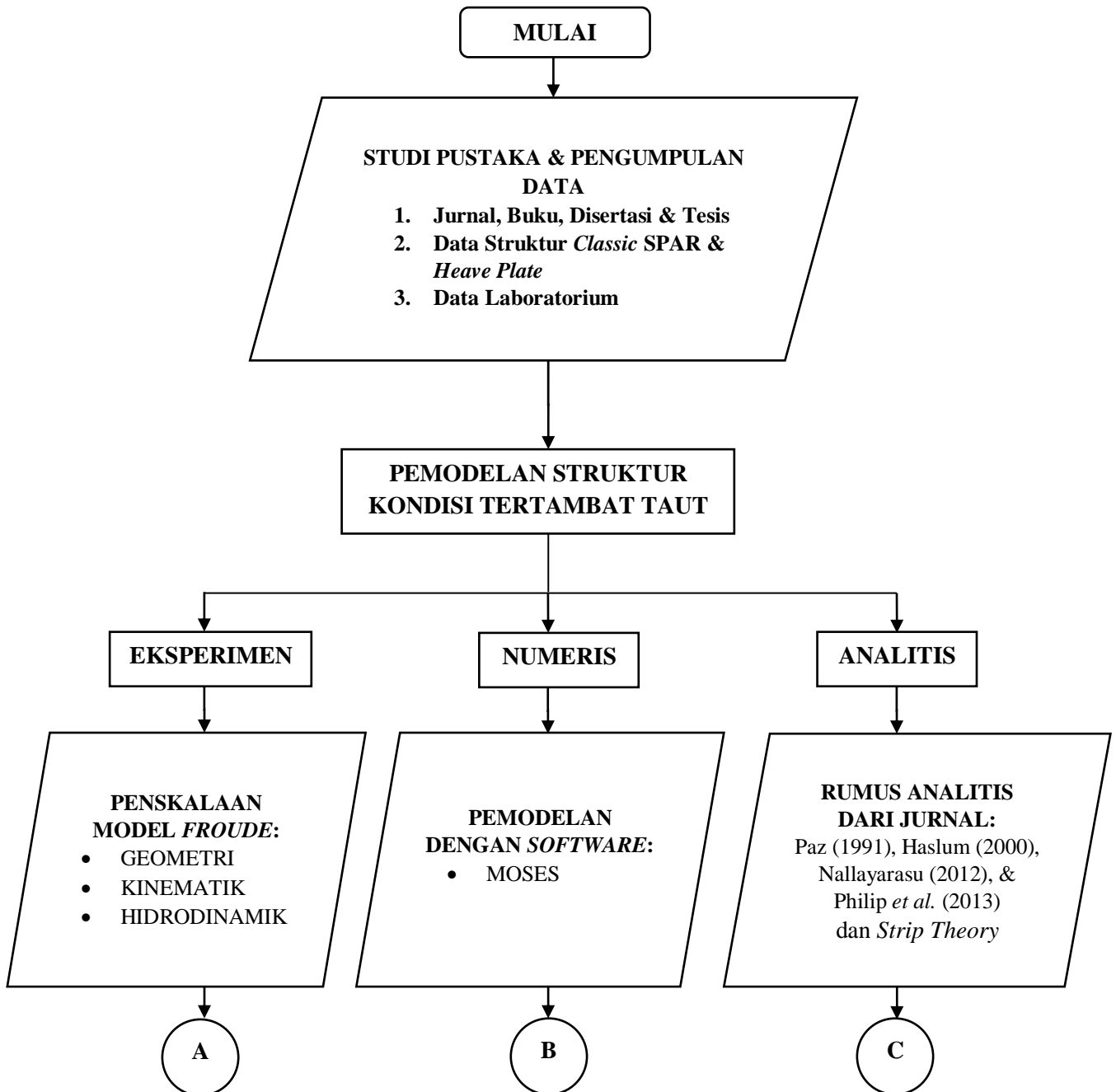
Dalam *script coding* MATLAB (Dilampirkan pada **Lampiran C**) untuk mendapatkan grafik respon *heave* struktur saat mengalami osilasi, parameter yang dijadikan input adalah parameter *viscous damping ratio* dan frekuensi natural *heave*, dimana *heave viscous damping ratio* yang akan dicari pada **Subbab 4.4** untuk kondisi *free floating* (diasumsikan sama dengan kondisi tertambat taut) dan **Subbab 4.5** untuk kondisi tertambat taut sedangkan nilai parameter frekuensi natural *heave* yang digunakan merupakan hasil dari pengujian dari model eksperimen, tujuan analisis ini adalah sebagai pendekatan empiris terhadap parameter – parameter tinjauan yang didapatkan dari percobaan eksperimen.

BAB 3

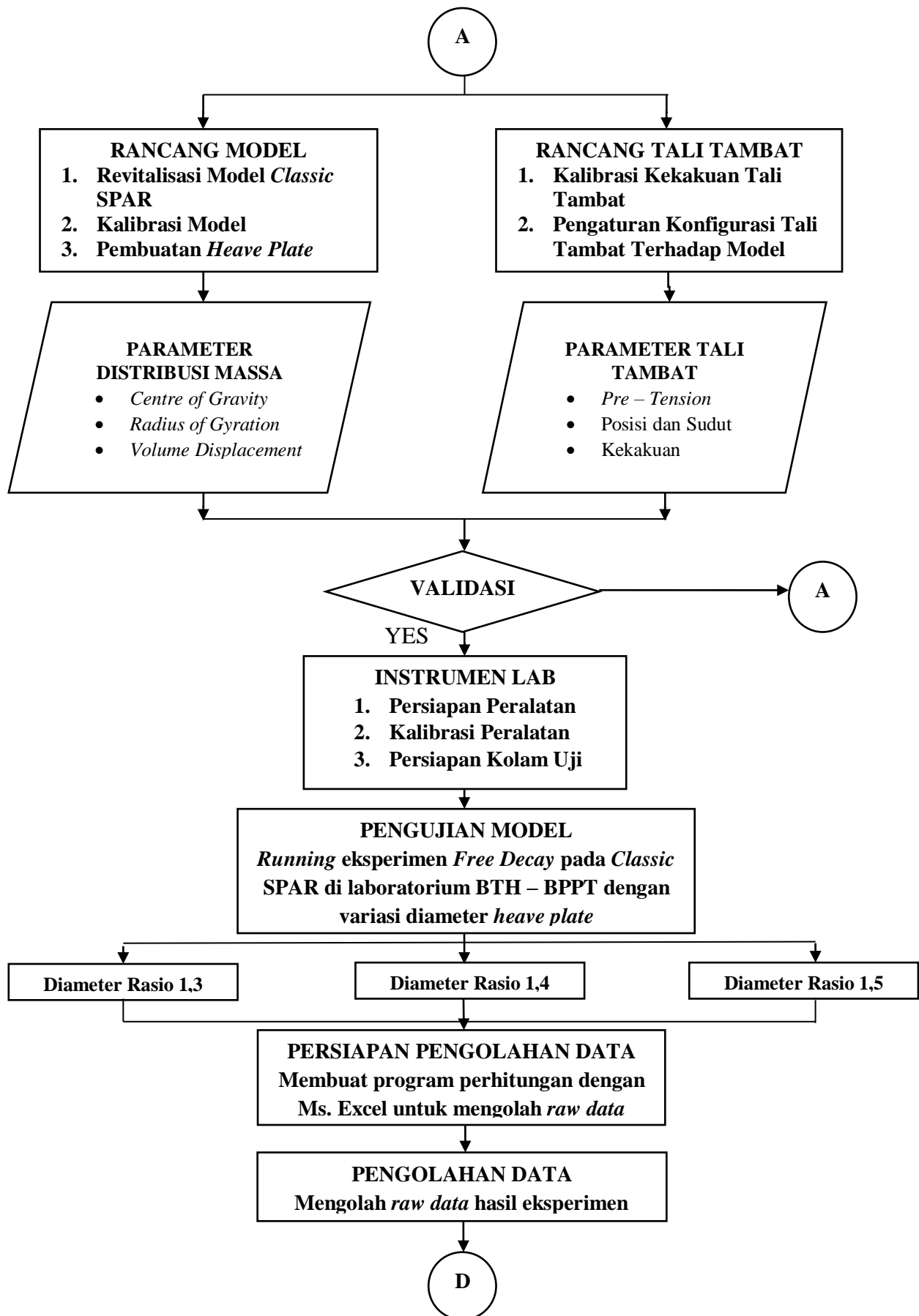
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

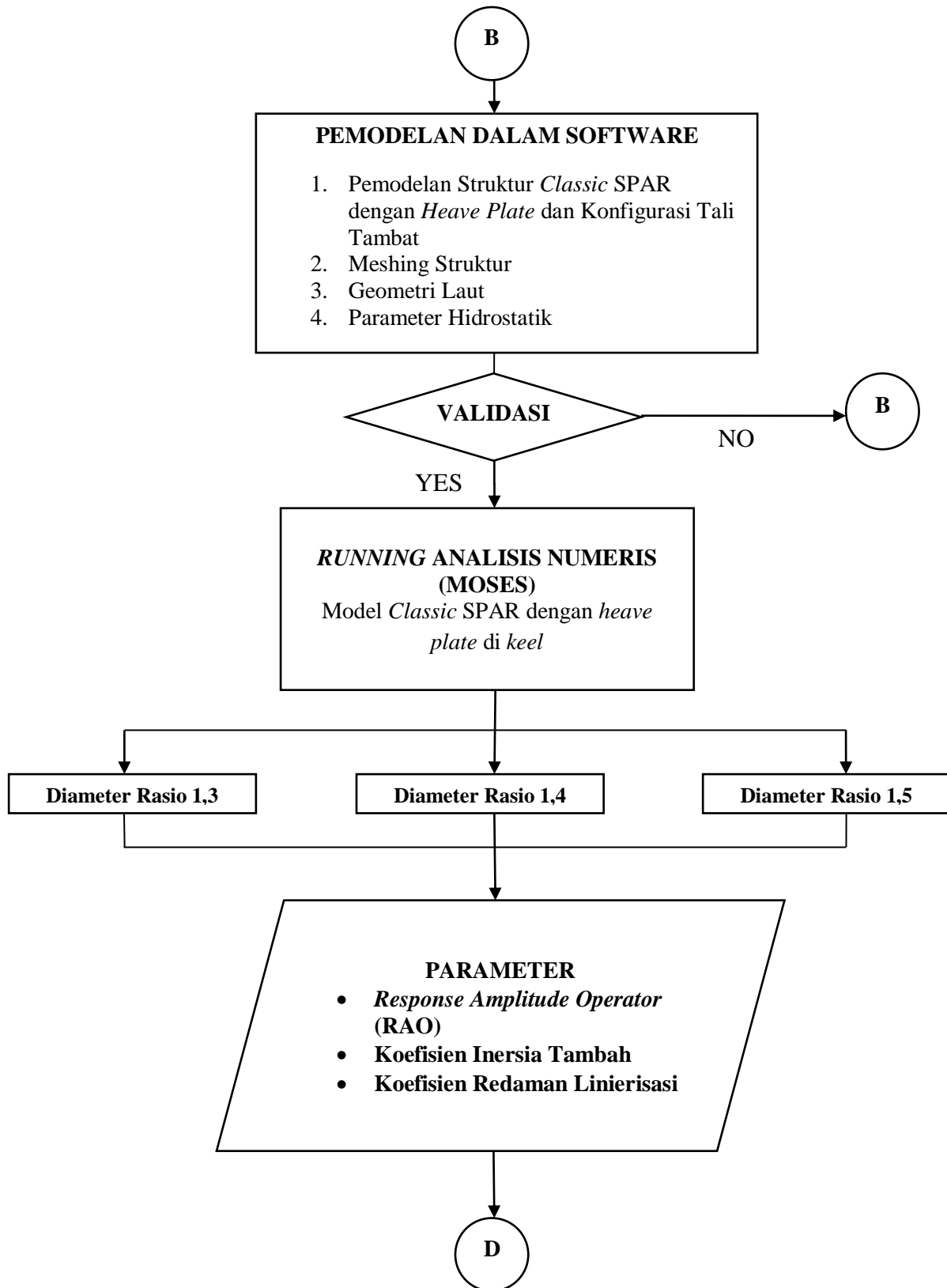
Metodologi penelitian yang direncanakan untuk dilakukan dalam studi kasus tugas akhir ini ditampilkan dengan diagram alir di bawah ini:



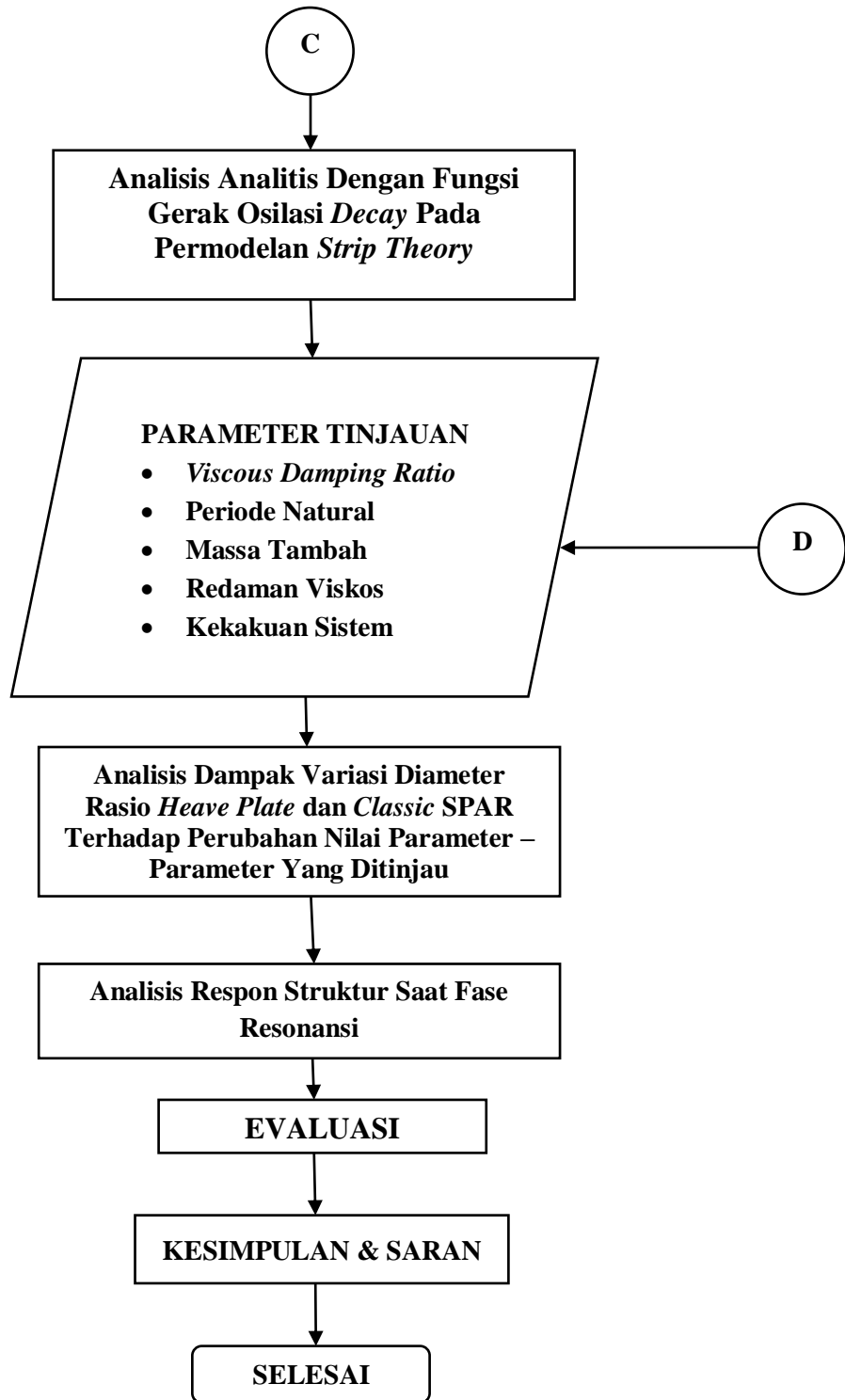
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (Bag.1)



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (Bag.2)



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (Bag.3)



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (Bag.4)

3.2 PENJABARAN DIAGRAM ALIR PENELITIAN

3.2.1 STUDI PUSTAKA DAN PENGUMPULAN DATA

Studi pustaka dilakukan bersumber dari berbagai pustaka seperti jurnal internasional, buku, disertasi dan tesis. Pustaka yang digunakan dalam referensi

pengerjaan memiliki korelasi dengan studi numeris dan eksperimen dari *Classic* SPAR, pengaruh penggunaan *heave plate* terhadap karakteristik redaman dan massa tambah pada arah *heave* dan teori dasar mengenai hidrodinamika yang kemudian akan digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini. Pengujian model fisik *Classic* SPAR yang datanya berasal dari *Mini SPAR Joint Industry Project (JIP)* dari *Deep Oil Technology (Inc.)* (datanya telah ditunjukkan pada **Tabel 2.1**) dengan variasi ukuran rasio diameter *heave plate* relatif terhadap diameter *Classic* SPAR yang diposisikan di *keel* dari *Classic* SPAR (data ukurannya ditunjukkan pada **Tabel 3.1**) dilakukan di fasilitas *Maneuvering and Ocean Basin (MOB)* Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT dengan ukuran dari kolam fasilitas tersebut dan visualisasinya ditunjukkan pada **Tabel 3.2** dan **Gambar 3.2** di bawah ini.

Tabel 3.1 Data Variasi Ukuran *Heave Plate*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Rasio D_p/D_s |
|--|--------|--------|-----------------|
| Diameter <i>Heave Plate</i> 1 (HP ₁) | 0,182 | m | 1,3 |
| Diameter <i>Heave Plate</i> 2(HP ₂) | 0,196 | m | 1,4 |
| Diameter <i>Heave Plate</i> 3 (HP ₃) | 0,21 | m | 1,5 |

Tabel 3.2 Data Fasilitas Kolam MOB Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT

(sumber: bth.bppt.go.id)

| Deskripsi | Kuantitas | Satuan |
|-----------------------------|-----------|--------|
| Panjang | 60 | m |
| Lebar | 35 | m |
| Kedalaman (penuh) | 2,5 | m |
| Kedalaman (operasi) | 2,5 | m |
| Periode Gelombang Maksimum | 0,5 – 3 | s |
| Arah Datang Gelombang | 0 – 90 | ° |
| Tinggi Gelombang Signifikan | 0 – 0,3 | m |



Gambar 3.2 Fasilitas *Maneuvering & Ocean Basin* (MOB)
Balai Teknologi Hidrodinamika – BPPT
(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

3.2.2 PEMODELAN STRUKTUR

a. Model Eksperimen

Data *Classic* SPAR yang didapatkan dari *Mini SPAR Joint Industry Project* (JIP) dari *Deep Oil Technology* (Inc.) yang ditunjukkan pada **Tabel 2.1** kemudian akan dijadikan acuan dalam pemodelan pada studi kasus tugas akhir ini. Pemodelan struktur *Classic* SPAR secara eksperimen dilakukan dengan memodelkan secara fisik mengacu pada data ukuran *Classic* SPAR pada **Tabel 2.1** dengan melakukan metode penskalaan berdasarkan Hukum Model *Froude* yang berdampak pada faktor penskalaan variabel – variabel yang berkaitan dengan geometri struktur dan gelombang, kinematika fluida serta dinamika struktur akibat beban gelombang yang ditunjukkan pada **Tabel 2.2**. Dengan mempertimbangkan kondisi laboratorium eksperimen di fasilitas kolam *Maneuvering and Ocean Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT dan ketersediaan peralatan yang akan digunakan dalam eksperimen, maka skala yang ditentukan adalah sebesar 1:125. Data pemodelan fisik eksperimen ditunjukkan pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Data Pemodelan *Classic* SPAR Model Eksperimen

| Deskripsi | Model Eksperimen (Skala 1:125) | |
|-------------|-----------------------------------|--------|
| | Nilai | Satuan |
| Massa Total | 16,358 | kg |

Tabel 3.3 Data Pemodelan *Classic* SPAR Model Eksperimen (*cont.*)

| Deskripsi | Model Eksperimen (Skala 1:125) | |
|--|-----------------------------------|--------|
| | Nilai | Satuan |
| Lambung | | |
| Diameter | 0,14 | m |
| Tinggi | 1,234 | m |
| Sarat | 1,034 | m |
| Posisi <i>Fairlead</i> terhadap <i>keel</i> | 1,17 | m |
| Deck | | |
| Panjang | 0,402 | m |
| Lebar | 0,402 | m |
| Tinggi | 0,157 | m |

Data pada **Tabel 3.3** akan digunakan baik untuk kebutuhan kalkulasi pemodelan struktur, baik dengan langkah eksperimen, numeris maupun analitis, pada kondisi tertambat taut. Visualisasi model eksperimen *Classic* SPAR dengan skala 1:125 terhadap model *prototype* ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Model Eksperimen *Classic* SPAR

(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

b. Model Numeris

Pemodelan numeris dilakukan menggunakan *software* MOSES. Dengan menginput parameter – parameter dimensi *Classic* SPAR semisal diameter, *draft* dan sebagainya yang ditunjukkan pada **Tabel 3.3** serta parameter distribusi massa seperti titik *Centre of Gravity* (CoG) dan radius girasi yang akan dikalibrasikan ukurannya serta *displacement* pada model eksperimen *Classic* SPAR di **Subbab 3.2.3** tentang Perancangan *Scale* Model. Pemodelan secara numeris pada model *Classic* SPAR dilakukan pada kondisi tertambat taut dengan variasi *diameter ratio* antara *heave plate* dengan *Classic* SPAR, yaitu *diameter ratio* 1,3, 1,4 dan 1,5 yang visualnya ditunjukkan pada **Gambar 3.6**. Pemodelan numeris pada kondisi tertambat taut dilakukan dengan *software* MOSES untuk mendapatkan grafik *Response Amplitude Operator* (RAO) untuk kemudian mendapatkan parameter – parameter tinjauan untuk sebagai komparasi hasil pada kondisi tertambat taut. Sedangkan pendekatan empiris dilakukan dengan *software* MATLAB dengan *script coding* yang bersumber dari fungsi osilasi *decay* pada struktur terapung dengan hukum permodelan *Strip Theory* sehingga didapatkan grafik *heave decay* empiris yang kemudian digunakan untuk komparasi hasil parameter – parameter yang didapatkan dari kondisi tertambat taut. Visualisasi model *Classic* SPAR pada *software* MOSES ditunjukkan pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Visualisasi Model *Classic* SPAR Pada *Software* MOSES

3.2.3 PERANCANGAN *SCALE MODEL*

Tahapan dalam Perancangan *Scale Model* dalam uji eksperimen adalah:

1. Revitalisasi Model

Model *Classic SPAR* dalam tahap ini mengalami sedikit modifikasi. Modifikasi tersebut dilakukan untuk menunjang tujuan dari eksperimen yang akan dilakukan. Pada *Classic SPAR*, struktur diberikan perangkat *heave plate* berbentuk lingkaran tipis *solid* berbahan akrilik dan diletakkan di bagian bawah *keel* SPAR. Peralatan untuk membuat model eksperimen antara lain, pipa PVC untuk bagian silinder vertikal lambung *Classic SPAR*, akrilik pada bagian dasar *Classic SPAR* atau *keel*, besi pemberat (*ballast*) dan besi ulir. Hal ini ditunjukkan pada **Gambar 3.5** sebagai berikut.



(a)

(b)

Gambar 3.5 Komponen Model Eksperimen *Classic SPAR* dengan:

(a) Lambung silinder vertikal dengan *heave plate* di *keel*

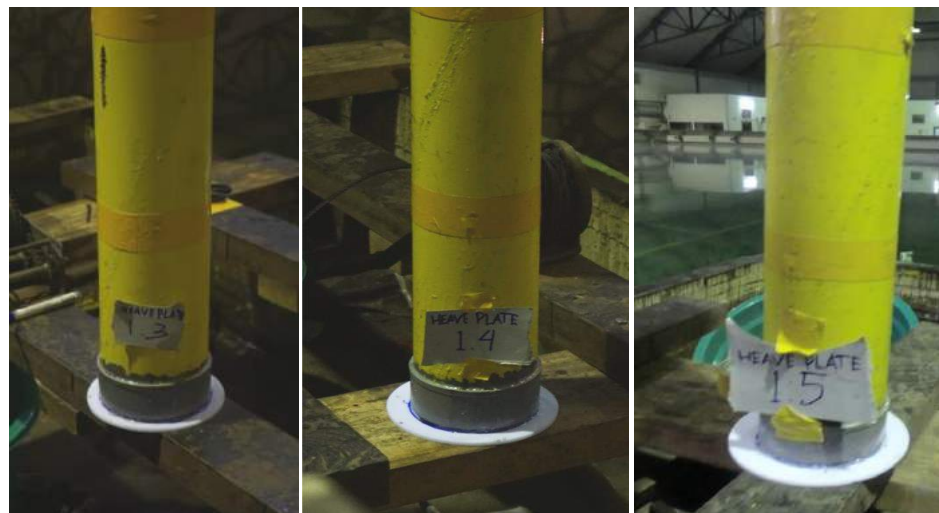
(b) *ballast*, besi ulir dan *topside deck*

(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

Selanjutnya pada *Classic SPAR* dilakukan pengukuran kembali dalam distribusi beban karena ketidakakuratan dalam perhitungan *Centre of Gravity* (CoG) yang berpengaruh terhadap pertimbangan kesamaan geometri serta kestabilan struktur, sehingga pengukuran kembali distribusi berat ini penting untuk mencari posisi *Centre of Gravity* (CoG) dan radius girasi struktur *Classic SPAR* yang baru.

2. Pemasangan *Heave Plate*

Heave Plate dimodelkan sebagai piringan tipis solid berbentuk lingkaran yang diletakkan di *keel* struktur *Classic* SPAR dengan melakukan proses perekatan dengan lem tembak. Bahan *heave plate* berasal dari akrilik dikarenakan bahannya yang ringan sehingga posisi titik *Centre of Gravity* (CoG) dan jari-jari girasi tidak berubah terlalu signifikan akibat pemasangan *heave plate* pada *Classic* SPAR. Diameter *heave plate* yang digunakan memiliki variasi ukuran sebesar 18,2 cm (*diameter ratio* 1,3), 19,6 cm (*diameter ratio* 1,4) dan 21 cm (*diameter ratio* 1,5) seperti halnya yang ditunjukkan pada **Tabel 3.1** dengan ketebalan 0,5 cm. Visualisasi penempatan *heave plate* dengan variasi *diameter ratio* – nya pada *keel* *Classic* SPAR ditunjukkan pada **Gambar 3.6** sebagai berikut.



(a)

(b)

(c)

Gambar 3.6 *Heave Plate* Pada *Keel* *Classic* SPAR

Dengan Variasi Diameter Rasio

(a) 1,3 (b) 1,4 (c) 1,5

(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

3. Kalibrasi Model

Kalibrasi model memiliki fungsi agar pengukuran dimensi yang dilakukan pada model uji seperti posisi dari titik *Centre of Gravity* (CoG) dan radius girasi yang menunjukkan distribusi massa dari struktur *Classic* SPAR untuk kemudian dapat digunakan dalam kalkulasi mendapatkan valuasi parameter – parameter yang dicari dalam studi kasus tugas akhir ini. Pengukuran *Centre of Gravity* (CoG) *Classic* SPAR dilakukan dengan peletakkan objek eksperimen pada meja osilator, kemudian digunakan *waterpass* sebagai mistar pengukur parameter ini yang diletakkan pada

permukaan meja osilator. Inti dari percobaan kalibrasi ini adalah agar menyeimbangkan posisi dari model uji *Classic SPAR* agar fluida pada *waterpass* menunjukkan level permukaan yang sama, menandakan bahwa keseimbangan telah dicapai, lalu kemudian dilakukan pengukuran jarak antara titik rotasi meja osilator dengan *keel Classic SPAR* sehingga didapatkan nilai parameternya. Proses kalibrasi posisi *Centre of Gravity* (CoG) pada model eksperimen struktur *Classic SPAR* ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Kalibrasi *Centre of Gravity* (CoG)

Model Eksperimen *Classic SPAR*

(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

Sedangkan untuk kalibrasi parameter radius girasi dilakukan dengan cara mengukur periode natural meja osilator dengan *stopwatch* kondisi tanpa pembebanan dari model uji eksperimen *Classic SPAR* dengan diberikan simpangan untuk berosilasi, hal yang sama diberlakukan pada meja osilator dengan model uji *Classic SPAR* diletakkan di bagian atasnya dengan kondisi tidak dirubah titik kesetimbangannya (posisi *Centre of Gravity*). Parameter yang didapatkan dari uji ini, baik dengan kondisi meja osilator dengan dan tanpa model uji adalah inersia, sehingga dapat ditentukan inersia model uji yang didapatkan dari selisih inersia dari kedua mode uji yang dilakukan. Dengan melakukan operasi hitung pembagian antara parameter inersia model dengan massa model, didapatkan parameter radius girasi dimana pada model uji eksperimen *Classic SPAR* dikarenakan lambungnya yang berbentuk silinder, maka nilai radius girasi pada sumbu x (*roll*) dan y (*pitch*) memiliki nilai yang identik. Visualisasi uji radius girasi pada model uji eksperimen *Classic SPAR* ditunjukkan pada **Gambar 3.8**.



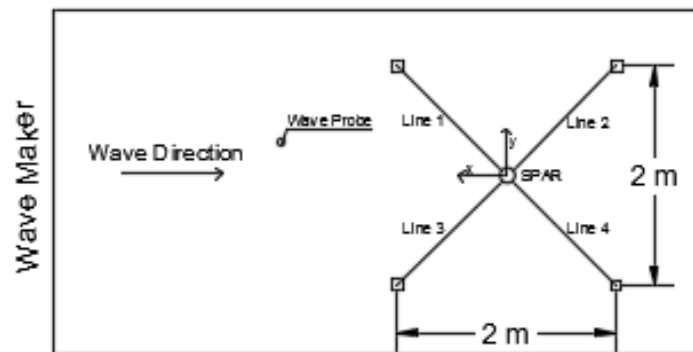
Gambar 3.8 Kalibrasi Radius Girasi Model Eksperimen *Classic SPAR*
(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

3.2.4 VALIDASI MODEL

Model yang telah dibuat secara fisik untuk eksperimen perlu divalidasi dengan model numeris MOSES agar hasil yang didapatkan tidak menyimpang terlalu jauh dengan persentase penyimpangan yang disyaratkan sebesar 5%. Parameter yang perlu divalidasi antara lain: *displacement*, *Centre of Gravity* (CoG) dan radius girasi.

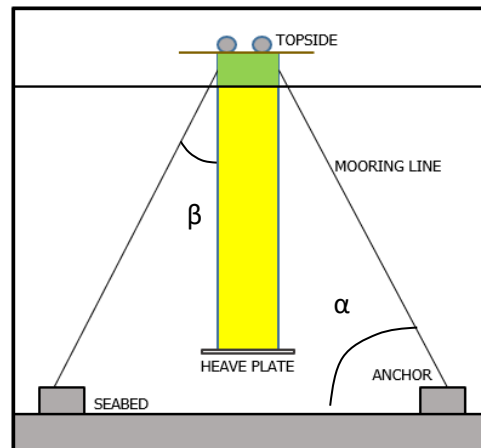
3.2.5 KONFIGURASI SISTEM TALI TAMBAT

Pada pemodelan *Classic SPAR* dan *heave plate* dengan variasi diameter kondisi tertambat taut. Terdapat sejumlah empat buah tali tambat yang digunakan dengan konfigurasi *line* melalui tampak atas dengan sudut pembentukan sebesar 90^0 sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.



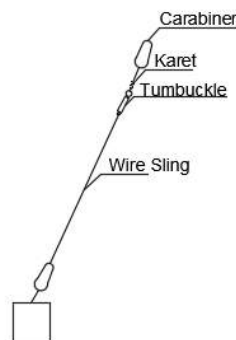
Gambar 3.9 Konfigurasi Tali Tambat Uji Eksperimen (Tampak Atas)

Instalasi tali tambat pada *fairlead Classic SPAR* membentuk sudut terhadap *fairlead* (β) dan terhadap dasar kolam uji (α). Visualisasi instalasi tali tambat ini ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3.10 Sudut Konfigurasi Instalasi Tali Tambat Relatif Terhadap *Fairlead* dan Dasar Kolam Uji

Setiap *line* tali tambat yang direncanakan untuk di set, terdiri atas komponen – komponen dengan fungsinya masing – masing yang ditunjukkan pada **Gambar 3.11**.



Gambar 3.11 Komponen – Komponen Pada Tali Tambat Uji Eksperimen

- *carabiner* yang berfungsi sebagai pengait dan pengunci tali tambat terhadap *fairlead* dan pemberat, visualisasi dari komponen *carabiner* untuk uji eksperimen ditunjukkan pada **Gambar 3.12**.



Gambar 3.12 Komponen *Carabiner*
(sumber: www.graininger.com, 2019)

- *tumbuckle* yang berfungsi menghubungkan karet dengan *wire sling* sekaligus untuk alat pengatur tegangan dan panjang dari tali tambat sesuai kebutuhan. Visualisasi *tumbuckle* ditunjukkan pada **Gambar 3.13**.



Gambar 3.13 Komponen *Tumbuckle*

(sumber: www.kompasstools.com, 2019)

- *wire sling* adalah komponen berbahan kawat berbahan *stainless steel* yang berfungsi untuk menghubungkan pemberat beton sebagai jangkar yang dikaitkan dengan *carabiner* dengan karet elastis, sekaligus sebagai komponen faktor kekakuan sistem tali tambat. Nilai kekakuan bahan dari *wire sling* dapat ditentukan dengan menggunakan **Persamaan 2.37** dengan nilai Modulus Young bahan *stainless steel* variasi *strand* yang ditunjukkan pada **Tabel 3.4** dan konfigurasi kekakuannya terhadap tali tambat bahan karet membentuk rangkaian seri. Visualisasi *wire sling* yang digunakan dalam uji eksperimen ditunjukkan pada **Gambar 3.14**.

Tabel 3.4 Modulus Elastisitas Bahan

(sumber: www.wardayacollege.com, 2019)

| Bahan | Modulus Young (N/m^2) |
|-----------|-------------------------------------|
| Tungsten | 35×10^{10} |
| Baja | 20×10^{10} |
| Tembaga | 11×10^{10} |
| Brass | $9,1 \times 10^{10}$ |
| Aluminium | 7×10^{10} |
| Glass | $7,8 \times 10^{10}$ |
| Air | - |
| Raksa | - |



Gambar 3.14 Komponen *Wire Sling*

(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

- pemberat dengan bahan dari beton yang berfungsi sebagai jangkar tali tambat terhadap *seabed* memiliki berat sebesar 50 kilogram sejumlah empat buah dengan konfigurasi peletakkannya sesuai pada **Gambar 3.9.**
- karet elastis yang berfungsi untuk mengizinkan elongasi tali tambat akibat kondisi pembebanan tarik awal (*pre - tension*),

Proses kalibrasi dari model tali tambat (karet) yang digunakan dalam eksperimen dilakukan ujicoba sebanyak dua kali dengan teknis sebagai berikut:

- Percobaan 1 dilakukan dengan memberikan penambahan beban secara bertahap pada tali tambat dengan besar beban 0,2 kilogram hingga bertambah 1 kilogram dari kondisi pra – pembebanan.
- Percobaan 2 dilakukan dengan mengurangi beban yang telah diberikan pada percobaan 1 secara bertahap tiap 0,2 kilogram hingga mencapai kondisi awal pra – pembebanan.

Kalibrasi dilakukan di kolam MOB Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) untuk kemudian dilakukan pengukuran terhadap penambahan panjang dengan mistar ukur (penggaris) dengan akurasi satu milimeter dengan ketidakakuratan pengukuran sebesar 0,5 milimeter akibat pembebanan tersebut, sehingga didapatkan perkiraan nilai kekakuan bahan tali tambat dengan menggunakan rumus **Persamaan 2.36** sebagaimana aktivitas uji kalibrasi tali tambat karet tersebut ditunjukkan pada **Gambar 3.15** di bawah ini.



Gambar 3.15 Uji Kalibrasi Kekakuan Tali Tambat Karet Akibat Pembebanan
(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

3.2.6 INSTRUMEN LABORATORIUM

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

1. *Motion Capture Camera*

Kamera ini dapat menangkap posisi *Passive Marker* yang dipasang pada bagian *topside deck Classic SPAR*. Posisi *Passive Marker* yang berubah – ubah dapat ditangkap kamera dengan *frame rate* sekitar 180 – 1750 *frames per second* (FPS). Visualisasi dari *Motion Capture Camera* yang digunakan dalam pengujian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.16**.



Gambar 3.16 QUALYSIS *Motion Capture Camera*
(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

2. *Passive Marker*

Marker ini khusus digunakan untuk menandakan posisi titik dimana *Classic SPAR* itu berada. Ketika *Classic SPAR* dikenai beban gelombang atau beban eksternal pada uji *heave decay* selama berlangsungnya eksperimen, posisi *marker* di setiap waktu akan ditangkap oleh sensor kamera dan dikumpulkan menjadi data berbasis *time history*. **Gambar 3.17** menunjukkan visualisasi dari *Passive Marker* sebagai berikut.



Gambar 3.17 *Passive Marker*

(sumber: www.qualisys.com, 2019)

3. *Calibration Kit*

Alat ini digunakan untuk mengkalibrasi posisi sumbu gerak *Motion Capture Camera* dengan bahan dari *Passive Markers* pada enam mode gerak agar akurasi kamera saat menangkap gerakan akurat. Kalibrasi posisi sumbu gerak penting untuk dilakukan agar tidak terjadi kesalahan dalam membaca gerak dari *Classic SPAR* saat mengalami pergerakan respon akibat beban eksternal. *Calibration Kit* yang digunakan dalam eksperimen ini ditunjukkan pada **Gambar 3.18** sebagai berikut.



Gambar 3.18 *Calibration Kit*

(sumber: Dokumentasi Pribadi, 2019)

3.2.7 LANGKAH UJI EKSPERIMEN

Pada uji eksperimen *heave decay*, kondisi struktur *Classic* SPAR hanya berada dalam kondisi tertambat taut dan tidak dalam kondisi *free floating* dikarenakan keterbatasan waktu. Langkah – langkah yang dilakukan dalam pengujian ini adalah:

1. Model uji *Classic* SPAR yang telah dikalibrasikan diinstalasi pada kolam MOB, kemudian *heave plate* dengan variasi *diameter ratio* dipasangkan pada bagian *keel* dari *Classic* SPAR
2. Instalasi tali tambat dengan konfigurasi taut dengan sudut relatif terhadap *fairlead* adalah (β) dan (α) terhadap *seabed* pada *Classic* SPAR dan membentuk sudut 90^0 antar tali tambat sejumlah empat buah dengan spesifikasi yang telah dijelaskan pada **Subbab 3.2.5**.
3. Pada bagian *topside* *Classic* SPAR diinstalasikan *Passive Markers* sejumlah tiga buah yang difungsikan untuk mentransformasikan gerakan struktur *Classic* SPAR yang bergerak pada enam mode gerak dalam sebuah rekaman data respon perpindahan untuk translasi dalam centimeter (cm) dan derajat (0) untuk rotasi. Gerakan pada *Passive Markers* akan direkam oleh *Motion Capture Camera* yang telah dikalibrasikan dengan *Calibration Kit*, dimana dalam studi kasus ini mode gerakan yang hanya ditinjau saat uji *heave decay* adalah pada arah translasi sumbu – z atau *heave*.
4. Pada tiap uji *decay* pada *Classic* SPAR dengan *heave plate* dengan variasi diameternya (diameter rasio 1,3, 1,4 dan 1,5), diberikan simpangan awal pada *initial condition* saat $t = 0$ sekon sebesar -1 centimeter relatif terhadap kondisi sarat awal sebelum diberikan simpangan, kemudian uji *decay* dilaksanakan hingga $t = 16$ sekon dikarenakan keterbatasan waktu pengujian.
5. Data respon mode gerakan *heave* berdasarkan fungsi waktu yang didapatkan dari rekaman *motion capture camera* akibat uji *decay*, yang kemudian disebut data mentah (*raw data*), kemudian diolah dengan *software* Ms. Excel untuk mendapatkan grafik fungsi respon *heave* struktur terhadap waktu pada tiap variasi *diameter ratio*.
6. Berdasarkan grafik fungsi respon *heave* struktur berdasarkan fungsi waktu akibat uji *heave decay*, kemudian ditentukan amplitudo puncak pada tiap siklus osilasi respon struktur dan waktu terjadinya, hal ini dilakukan agar dapat dilakukan langkah kalkulasi *logarithmic decrement* seperti halnya yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.28**.

7. Setelah kalkulasi *logarithmic decrement* diimplementasikan, kemudian dilakukan kalkulasi dengan **Persamaan 2.29** untuk mendapatkan parameter *viscous damping ratio*, parameter ini akan menentukan nilai dari frekuensi tak teredam (*undamped frequency*) sebagaimana ditunjukkan pada **Persamaan 2.31**, setelah sebelumnya dilakukan kalkulasi frekuensi teredam (*damped frequency*) dengan menentukan waktu interval antar amplitudo puncak respon tiap siklus yang berdekatan, sebagaimana ditunjukkan pada **Persamaan 2.30**. Sehingga dapat ditentukan parameter periode natural struktur, memanfaatkan valuasi dari frekuensi tak teredam (*undamped frequency*) yang didapatkan dengan menggunakan **Persamaan 2.32**.
8. Kalkulasikan parameter kekakuan sistem tambat taut dengan konfigurasi yang telah ditentukan sebagaimana dijelaskan pada **Subbab 3.2.5** berdasarkan pendekatan oleh **Al – Solihat dan Nahon (2015)** pada **Persamaan 2.42 – 2.48**. Hal ini kemudian dapat menentukan nilai dari parameter massa tambah yang dihasilkan dari uji eksperimen sesuai **Persamaan 2.33** dan akhirnya dapat menentukan besaran parameter redaman viskos yang terjadi pada struktur akibat osilasi dengan menggunakan **Persamaan 2.15**.

3.2.8 LANGKAH UJI NUMERIS

Langkah uji numeris dilakukan sebagai validasi terhadap hasil pemodelan struktur, baik dalam kondisi *free floating* dan tertambat taut, dimana *software* yang digunakan untuk menunjang pengerjaan dengan langkah numeris pada studi kasus tugas akhir ini adalah MOSES untuk kondisi tertambat taut. Langkah pengerjaannya adalah sebagai berikut:

1. Membuat model *Classic* SPAR dengan lambungnya yang berbentuk silinder dengan *heave plate* yang berbentuk piringan. Dimensi ukuran yang dimasukkan menyesuaikan pada **Tabel 3.1** untuk *heave plate* dan **Tabel 3.3** untuk *Classic* SPAR. Jenis *file script* yang digunakan adalah dengan ekstensi *.dat* dengan pengaturan penyelesaian model dengan *3D Diffraction*.
2. Kemudian dilakukan pembuatan *file script* dengan ekstensi *.cif* dan *.dat* dengan mengkondisikan struktur pada keadaan *free floating*, lalu memasukkan parameter distribusi massa (*Centre of Gravity* dan *Radius Girasi*).

3. Kemudian dilakukan analisis berbasis frekuensi pada struktur terhadap gelombang dengan memasukkan parameter – parameternya, dengan arah datang gelombang berasal dari 0 derajat sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.9**.
4. *Output* hasil yang didapatkan dari *running* MOSES adalah *Response Amplitude Operator* (RAO) pada enam arah derajat kebebasan (*surge*, *sway* dan *heave* untuk translasi) dan (*roll*, *pitch* dan *yaw* untuk rotasi) dimana dalam studi kasus ini yang dipertimbangkan hanya terhadap arah *heave* saja.
5. Pada tiap – tiap kondisi variasi *diameter ratio* dapat diketahui nilai dari parameter – parameter massa tambah dan redaman, untuk tiap frekuensi gelombang *encounter* pada arah *heave* untuk kemudian dibandingkan hasilnya, pada kondisi tertambat taut.

3.2.9 LANGKAH KALKULASI ANALITIS

Langkah uji analitis digunakan dengan permodelan *heave decay graph* dengan menggunakan persamaan gerak bangunan terapung pada model *Strip Theory* dengan bantuan *software* MATLAB. Langkah pengerjaan kalkulasi parameter pada struktur *Classic SPAR* dan *heave plate* dengan variasi diameternya adalah sebagai berikut:

1. Buat *script coding* penyelesaian persamaan gerak bangunan terapung saat osilasi *decay* pada *software* MATLAB.
2. Input hasil parameter frekuensi natural *heave* dan *viscous damping ratio* yang telah didapatkan dari uji eksperimen pada *software* MATLAB untuk didapatkan hasilnya berupa grafik fungsi gerak osilasi *heave* struktur akibat uji *decay*.
3. Langkah kalkulasi selanjutnya adalah sama dengan pendekatan eksperimen untuk mendapatkan parameter – parameter tinjauan seperti massa tambah, redaman viskos, kekakuan *heave* dan lain – lain berdasarkan persamaan – persamaan dari jurnal – jurnal terkait

3.2.10 ANALISIS DAN PERBANDINGAN PARAMETER HASIL PENGUJIAN

Setelah pengujian telah dilakukan, langkah selanjutnya adalah menganalisis hasil dari masing – masing pendekatan dan membandingkannya. Langkah perbandingan hasil tiap metode dengan variasi kondisi (tertambat taut, variasi *diameter ratio*) dibutuhkan untuk mengkomparasikan hasil parameter tinjauan yang didapatkan melalui uji eksperimen sebagai patokan utama terhadap pendekatan lainnya (analitis dan numeris) dengan persentase perubahan maksimum sebesar 5%. Analisis yang akan dilakukan menjawab daripada rumusan – rumusan masalah yang

telah dicantumkan pada bab Pendahuluan di tugas akhir ini. Hal tersebut meliputi, pengaruh variasi diameter *heave plate* terhadap parameter – parameter yang ditentukan (*viscous damping ratio*, periode natural, massa tambah, redaman dan kekakuan).

3.2.11 ANALISIS DAMPAK VARIASI *DIAMETER RATIO* TERHADAP PARAMETER TINJAUAN

Setelah diketahui nilai parameter – parameter yang ditinjau pada kondisi tertambat taut untuk tiap variasi *diameter ratio* (1.3, 1.4 dan 1.5), maka langkah selanjutnya adalah menganalisis dampak persentase perubahan parameter tersebut dalam fungsi *diameter ratio*, baik parameter massa tambah, redaman viskos, periode natural, *viscous damping ratio* dan kekakuan *heave*, sehingga didapatkan parameter mana yang terdampak paling signifikan akibat penambahan diameter *heave plate* pada *keel Classic SPAR*.

3.2.12 ANALISIS RESPON STRUKTUR SAAT FASE RESONANSI

Analisis ini akan bertumpu pada aspek perihal respon amplitudo struktur pada fase resonansi atau saat frekuensi gelombang *encounter* sama dengan frekuensi natural struktur, sehingga didapatkan rasio antara amplitudo respon struktur dengan amplitudo gelombang *encounter*, berdasarkan fungsi variasi *diameter ratio* akan didapatkan pengaruh penambahan diameter *heave plate* terhadap respon struktur.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 MODEL UJI EKSPERIMEN *CLASSIC* SPAR

4.1.1 TINJAUAN MASSA SISTEM

Distribusi massa struktur *Classic* SPAR yang digunakan dalam model eksperimen yang diuraikan dalam data per komponen konstruksi *Classic* SPAR, berat per material dan jumlah per unit material serta koversinya ke dalam ukuran *full scale* ditunjukkan pada **Tabel 4.1** sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Distribusi Massa Material Struktur

| Komponen | | Tebal (m) | Model Skala | Tebal (<i>Full Scale</i>) (m) | Unit | Berat Total (kg) | Model Skala | Berat Total (<i>Full Scale</i>) (ton) | |
|----------------------------------|------------------|-----------|-------------|---------------------------------|------|------------------|-------------|---|-----------|
| Blok A | <i>Ballast 1</i> | 0,02 | λ | 2,5 | 1 | 10,941 | λ^3 | 21369,141 | |
| | <i>Ballast 2</i> | 0,02 | | 2,5 | 1 | | | | |
| | <i>Ballast 3</i> | 0,025 | | 3,125 | 1 | | | | |
| | <i>Ballast 4</i> | 0,01 | | 1,25 | 1 | | | | |
| Blok B | <i>Ballast 5</i> | 0,025 | | 3,25 | 1 | | | | |
| | <i>Ballast 6</i> | 0,005 | | 3,25 | 1 | | | | |
| Rangka | Ulir | - | | - | 1 | 4,810 | | | 9394,531 |
| Pipa PVC + Pelindung keel | | - | | - | 1 | | | | |
| Topside (<i>Plywood</i>) | | - | | - | 1 | | | | |
| TOTAL | | | | | | 16,358 | | | 31949,219 |

Visualisasi dari penimbangan komponen – komponen konstruksi model eksperimen *Classic* SPAR ditunjukkan pada **Gambar 4.1 (a)** dan **(b)** sebagai berikut:



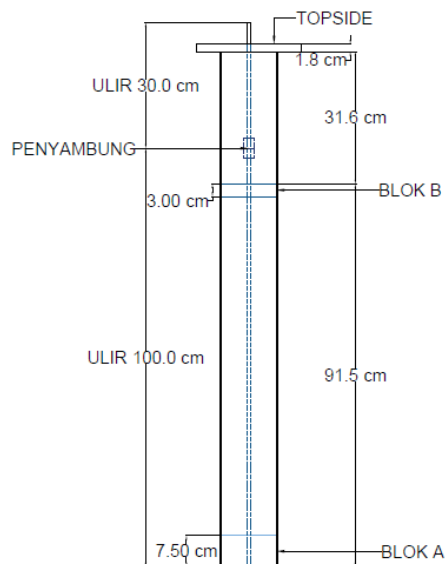
(a)

(b)

Gambar 4.1 Pengukuran beban konstruksi *Classic SPAR*

(a) *hull SPAR dan topside* (b) *ballast dan ulir*

Konfigurasi peletakkan komponen – komponen pada *Classic SPAR* ditunjukkan pada **Gambar 4.2** di bawah ini:



Gambar 4.2 Konfigurasi Model Eksperimen *Classic SPAR*

4.1.2 TINJAUAN CENTRE OF GRAVITY (CoG)

Pengukuran *Centre of Gravity* (CoG) *Classic* SPAR dilakukan dengan peletakkan objek eksperimen pada meja osilator, kemudian digunakan *waterpass* sebagai mistar pengukur parameter ini yang diletakkan pada permukaan meja osilator. Inti dari percobaan kalibrasi ini adalah agar menyeimbangkan posisi dari model uji *Classic* SPAR agar fluida pada *waterpass* menunjukkan level permukaan yang sama, menandakan bahwa keseimbangan telah dicapai, lalu kemudian dilakukan pengukuran jarak antara titik rotasi meja osilator dengan *keel Classic* SPAR sehingga didapatkan nilai parameterinya, hal ini telah dijelaskan pada **Subbab 3.2.3** mengenai Kalibrasi Model. Proses kalibrasi *Centre of Gravity* (CoG) model eksperimen *Classic* SPAR ditunjukkan pada **Gambar 3.6**. Sedangkan pengukuran *Centre of Gravity* (CoG) *Classic* SPAR menunjukkan hasil sebagaimana yang ditunjukkan pada **Tabel 4.2**. (Hitungan CoG dilampirkan pada **Lampiran A**)

Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi *Centre of Gravity* (CoG) *Classic* SPAR

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (Full Scale) | Satuan |
|-----------------------------|--------|--------|-------------|---------------------|--------|
| <i>Keel to Gravity</i> (KG) | 0,457 | m | λ | 57,125 | m |

4.1.3 TINJAUAN RADIUS GIRASI

Kalibrasi parameter radius girasi dilakukan dengan cara mengukur periode natural meja osilator dengan *stopwatch* kondisi tanpa pembebanan dari model uji eksperimen *Classic* SPAR dengan diberikan simpangan untuk berosilasi, hal yang sama diberlakukan pada meja osilator dengan model uji *Classic* SPAR diletakkan di bagian atasnya dengan kondisi tidak dirubah titik kesetimbangannya (posisi *Centre of Gravity*). Parameter yang didapatkan dari uji ini, baik dengan kondisi meja osilator dengan dan tanpa model uji adalah inersia, sehingga dapat ditentukan inersia model uji yang didapatkan dari selisih inersia dari kedua mode uji yang dilakukan. Dengan melakukan operasi hitung pembagian antara parameter inersia model dengan massa model, didapatkan parameter radius girasi dimana pada model uji eksperimen *Classic* SPAR dikarenakan lambungnya yang berbentuk silinder, maka nilai radius girasi pada sumbu x (*roll*) dan y (*pitch*) memiliki nilai yang identik. Proses kalibrasi radius girasi model eksperimen *Classic* SPAR ditunjukkan pada **Gambar 3.7**. Sedangkan

pengukuran radius girasi *Classic* SPAR menunjukkan hasil sebagaimana yang ditunjukkan pada **Tabel 4.3**. (Hitungan Radius Girasi dilampirkan pada **Lampiran A**)

Tabel 4.3 Hasil Kalibrasi Radius Girasi *Classic* SPAR

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|--------------------------------------|--------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Radius Girasi ($R_{xx}=R_{yy}$) | 0,55 | m | λ | 68,75 | m |

4.1.4 TINJAUAN *VOLUME DISPLACEMENT*

Parameter *Volume Displacement Classic* SPAR model eksperimen didapatkan dengan menempatkan model tersebut pada permukaan air yang tenang dan terapung bebas (*free floating*). Segera setelah mencapai kesetimbangan posisi, dilakukan pengukuran jarak dari *keel* menuju ke garis air (*waterline*) dengan menggunakan mistar ukur. Dikarenakan bentuk dari lambung model yang berbentuk silinder dan diameter lambung model telah ditentukan sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 3.3**, maka *volume displacement* dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 2.39** secara parsial pada model eksperimen maupun *full scale* dengan hasil yang ditunjukkan pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4.4 Hasil Kalkulasi *Volume Displacement Classic* SPAR Kondisi *Free Floating*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|----------------------------|--------|----------------|-------------|------------------------------|----------------|
| <i>Volume Displacement</i> | 0,016 | m ³ | λ^3 | 31088,27 | m ³ |

4.1.5 SUMMARY DIMENSI CLASSIC SPAR

Berdasarkan Hukum Penskalaan Froude pada **Tabel 2.2** yang diberlakukan pada dimensi ukuran model eksperimen *Classic* SPAR yang ditunjukkan pada **Tabel 3.3** dan kalibrasi *Centre of Gravity* dan Radius Girasi model eksperimen yang hasil pengukurannya ditunjukkan pada **Tabel 4.2** dan **Tabel 4.3**, sehingga didapat *summary* dimensi ukuran model *Classic* SPAR eksperimen dan *full scale* yang ditunjukkan pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Summary Dimensi Model Eksperimen dan *Full Scale* Kondisi *Free Floating*

| Deskripsi | Model Eksperimen (Skala 1:125) | | Model Skala | Model <i>Full Scale</i> | |
|---|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | Nilai | Satuan | | Nilai | Satuan |
| Massa | 16,358 | kg | λ^3 | 31949,219 | ton |
| <i>Volume Displacement</i> | 0,016 | m ³ | | 31088,27 | m ³ |
| <i>Centre of Gravity</i> | 0,457 | m | λ | 57,125 | m |
| Radius Girasi | 0,55 | m | | 68,75 | m |
| Lambung | | | | | |
| Diameter | 0,14 | m | λ | 17,5 | m |
| Tinggi | 1,234 | m | | 154,25 | m |
| Sarat | 1,034 | m | | 129,25 | m |
| Posisi <i>Fairlead</i> terhadap <i>keel</i> | 1,17 | m | | 146,25 | m |
| Deck | | | | | |
| Panjang | 0,402 | m | λ | 50,29 | m |
| Lebar | 0,402 | m | | 50,29 | m |
| Tinggi | 0,157 | m | | 19,57 | m |

4.1.6 MODEL UJI EKSPERIMEN *HEAVE PLATE*

Model *heave plate* yang digunakan dalam eksperimen memiliki bahan akrilik berbentuk lingkaran, dimensi ukuran diameter dan ketebalan *heave plate* variasi *diameter ratio* dalam model eksperimen maupun *full scale* ditunjukkan pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4.6 Dimensi Model Fisik Eksperimen dan *Full Scale*

Berdasarkan Hukum Penskalaan Froude

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|--------------------------------------|--------|--------|----------------|---------------------------------|--------|
| <i>Heave Plate 1</i> ($D_r = 1,3$) | 0,182 | m | λ | 22,75 | m |
| <i>Heave Plate 2</i> ($D_r = 1,4$) | 0,196 | m | | 24,5 | m |
| <i>Heave Plate 3</i> ($D_r = 1,5$) | 0,21 | m | | 26,25 | m |
| Tebal | 0,005 | m | | 0,625 | m |

Visualisasi posisi peletakkan *heave plate* di *keel Classic* SPAR model eksperimen ditunjukkan pada **Gambar 4.3** di bawah ini:



Gambar 4.3 *Heave Plate* pada *keel Classic* SPAR

Massa *heave plate* yang divariasikan dalam perbandingan diameter antara *heave plate* dengan *hull Classic* SPAR diletakkan pada *keel Classic* SPAR yang diukur pada peralatan timbangan digital di Laboratorium Hidrodinamika Indonesia (LHI) hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 4.7** di bawah ini:

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Massa *Heave Plate*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|---|--------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| <i>Heave Plate 1</i> ($D_r = 1,3$) | 0,145 | kg | λ^3 | 283,203 | ton |
| <i>Heave Plate 2</i> ($D_r = 1,4$) | 0,155 | kg | | 302,013 | ton |
| <i>Heave Plate 3</i> ($D_r = 1,5$) | 0,177 | kg | | 346,699 | ton |

Dikarenakan penambahan *heave plate* pada *keel* model eksperimen, menyebabkan struktur mengalami penambahan level sarat pada kondisi *free floating* diukur dengan mistar ukur yang hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 4.8**.

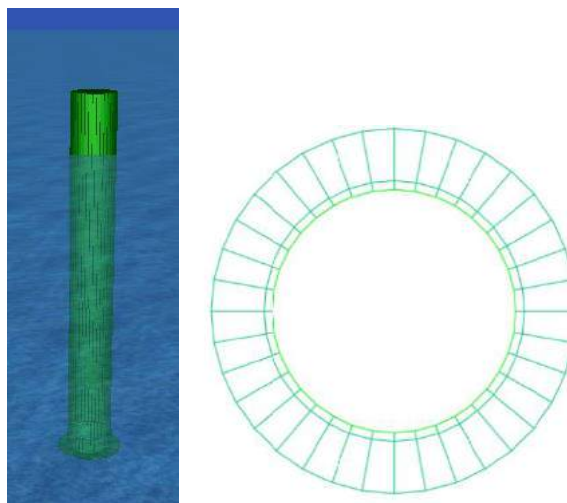
Tabel 4.8 Sarat Akibat Penambahan *Heave Plate* Kondisi *Free Floating*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|--|--------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Sarat Akibat Penambahan <i>Heave Plate</i> | 1,039 | m | λ | 129,875 | m |

Berdasarkan **Tabel 4.8**, ditunjukkan bahwa penambahan *heave plate* menyebabkan sarat struktur mengalami penambahan sebesar 5 milimeter pada kondisi *free floating* dikarenakan penambahan pembebanan. Hasil ini kemudian akan dijadikan acuan selisih sarat hasil penambatan pada kondisi tertambat taut sesuai konfigurasi yang direncanakan.

4.2 MODEL NUMERIS CLASSIC SPAR DAN HEAVE PLATE

Pemodelan numeris *Classic SPAR* dengan *heave plate* variasi *diameter ratio* dilakukan pada *software* MOSES dengan menginput dimensi ukuran utama dari model *Classic SPAR* berdasarkan pada **Tabel 4.5**, **4.6** maupun *heave plate* pada **Tabel 4.7**. Pemodelan *heave plate* di *keel Classic SPAR* dan juga pelindung *base cap* dimodelkan seakurat mungkin untuk menyesuaikan dengan model eksperimen yang diujikan, dikarenakan akan menentukan dalam akurasi hasil parameter – parameter yang didapatkan dalam pemodelan numeris yang kemudian dijadikan perbandingan terhadap hasil eksperimen kondisi tertambat taut yaitu massa tambah, periode natural dan redaman viskos, visualisasi model *Classic SPAR* dan *heave plate* tampak samping dan atas ditunjukkan pada **Gambar 4.4**.



(a)

(b)

Gambar 4.4 Model Numeris *Classic* SPAR dan *Heave Plate*

(a) Tampak Samping (b) Tampak Atas

Sehingga dari pemodelan struktur pada *software* MOSES ukuran *full scale*, didapatkan parameter – parameter hasil pemodelan numeris yang dijadikan acuan validasi bagi ukuran model eksperimen, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4.9 Validasi Model Eksperimen dan Model Numeris (MOSES)

| Parameter | | Eksperimen | MOSES | Error |
|--|----------------------|------------|----------|--------------|
| Diameter <i>Classic</i> SPAR (m) | | 17,5 | 17,5 | 0% |
| Draft with heave plate (1.3) (m) | <i>Free floating</i> | 129,875 | 129,305 | 0,44% |
| | <i>Moored</i> | 139,875 | 139,520 | 0,25% |
| <i>Hullheight</i> (m) | | 154,25 | 154,25 | 0% |
| <i>Keel cylinder height</i> (m) | | 6,625 | 6,625 | 0% |
| <i>Fairlead height from keel</i> (m) | | 146,25 | 146,25 | 0% |
| <i>Displacement of SPAR without heave plate</i> (ton) | | 31949,219 | 31967,04 | 0.06% |
| <i>Displacement of SPAR with heave plate</i> (1.3) (ton) | | 32232,422 | 32314,75 | 0.25% |
| <i>Keel to Gravity without heave plate</i> , KG (m) | | 57,125 | 57,125 | 0% |
| <i>Keel to Gravity of SPAR with heave plate</i> (1.3) KG (m) | | 56,508 | 56,508 | 0% |
| <i>Roll radius of gyration, Kxx</i> (m) | | 68,75 | 68,75 | 0% |
| <i>Pitch radius of gyration, Kyy</i> (m) | | 68,75 | 68,75 | 0% |
| <i>Heave plate diameter</i> (m) | | 22,75 | 22,75 | 0% |
| <i>Heave plate thickness</i> (m) | | 0,625 | 0,625 | 0% |

4.3 PARAMETER KEKAKUAN SISTEM MODEL CLASSIC SPAR

4.3.1 KEKAKUAN HIDROSTATIK

Berdasarkan kalkulasi pada **Persamaan 2.21**, dimana luas penampang atau *waterline Classic* SPAR dapat dikalkulasikan berdasarkan **Persamaan 2.22**, dapat ditentukan nilai dari kekakuan hidrostatis pada model eksperimen maupun *full scale* sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.10**.

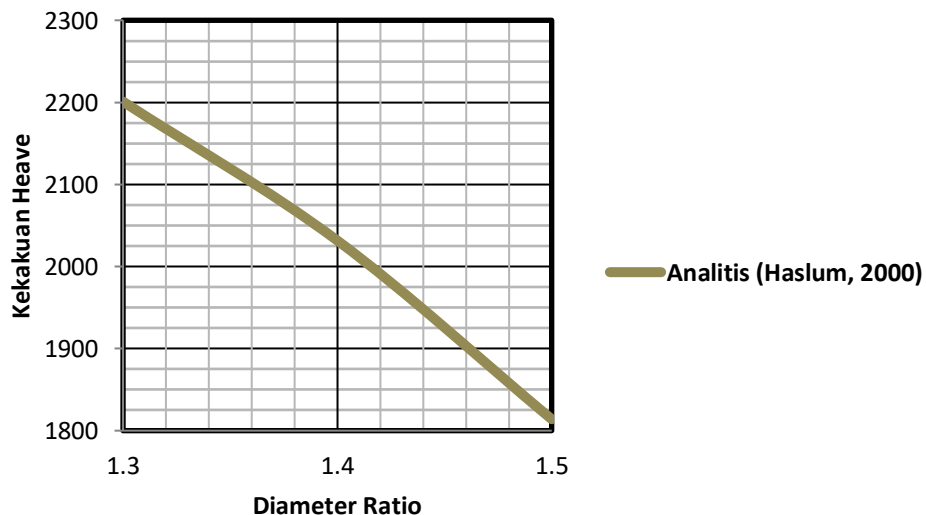
Tabel 4.10 Kekakuan Hidrostatik *Classic* SPAR

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|------------------------|---------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| <i>Non Heave Plate</i> | 154,789 | N/m | λ^2 | 2418,571 | kN/m |

Nilai kekakuan hidrostatik yang didapatkan pada **Tabel 4.10** ini berada dalam kondisi tanpa *heave plate*, sedangkan pengaruh diameter *heave plate* yang divariasikan akan menghasilkan kekakuan hidrostatik sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.11** dan grafiknya pada **Gambar 4.5**.

Tabel 4.11 Kekakuan Hidrostatik *Classic* SPAR dan *Heave Plate*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan | Perubahan (%) |
|---------------------------|---------|--------|-------------|------------------------------|--------|---------------|
| <i>Diameter Ratio 1.3</i> | 140,858 | N/m | λ^2 | 2200,90 | kN/m | - |
| <i>Diameter Ratio 1.4</i> | 130,022 | N/m | | 2031,60 | kN/m | -7,69 |
| <i>Diameter Ratio 1.5</i> | 116,091 | N/m | | 1813,93 | kN/m | -17,58 |



Gambar 4.5 Parameter Kekakuan Hidrostatik *Heave* Kondisi *Free Floating* Hasil yang didapatkan pada **Tabel 4.11** kemudian dipergunakan kemudian untuk kalkulasi parameter – parameter lainnya yang terkait.

4.3.2 KEKAKUAN TALI TAMBAT

Terdapat dua komponen tali tambat yang akan ditentukan nilai kekakuan bahannya, yaitu komponen karet dan *wire sling*, dengan langkah kalkulasi kekakuan bahan masing – masing sebagai berikut:

a. Karet

Untuk mengetahui nilai kekakuan tali tambat bahan karet yang akan digunakan, maka terlebih dahulu dilakukan kalibrasi uji kekakuan dari model tali tambat karet yang akan digunakan dalam eksperimen dengan visualisasi sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 3.15**. Spesifikasi model tali tambat bahan karet yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 4.12**.

Tabel 4.12 Summary Dimensi Tali Tambat Bahan Karet
Model Eksperimen dan *Full Scale*

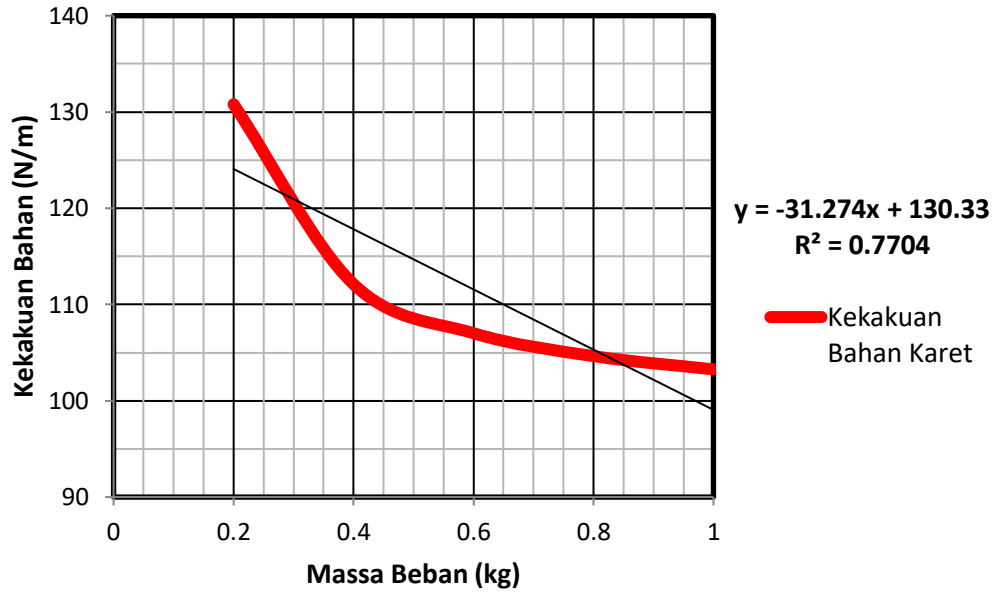
| Deskripsi | Model Eksperimen (Skala 1:125) | | Model Skala | Model <i>Full Scale</i> | |
|-----------|-----------------------------------|--------|----------------|----------------------------|--------|
| | Nilai | Satuan | | Nilai | Satuan |
| Panjang | 0,2 | m | λ | 25 | m |
| Lebar | 0,014 | m | | 1,75 | m |
| Tebal | 0,001 | m | | 0,125 | m |

Hasil uji kalibrasi kekakuan tali tambat di kolam *Maneuvering and Ocean Basin* (MOB) untuk model eksperimen dapat ditunjukkan pada **Tabel 4.13**.

Tabel 4.13 Hasil Kalibrasi Kekakuan Karet Model Eksperimen

| Beban (kg) | Percepatan Gravitasi (m/s ²) | F _K (N) | Uji Coba 1 | Uji Coba 2 | C _K (N/m) |
|---------------|--|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| | | | L ₀ (m) | L _n (m) | |
| | | | 0,2 | 0,2 | |
| 0,02 | 9,81 | 0,196 | 0,2015 | 0,2015 | 130,800 |
| 0,04 | | 0,392 | 0,2035 | 0,2035 | 112,114 |
| 0,06 | | 0,589 | 0,2055 | 0,2055 | 107,018 |
| 0,08 | | 0,785 | 0,2075 | 0,2075 | 104,640 |
| 0,1 | | 0,981 | 0,2095 | 0,2095 | 103,263 |

Dimana hasil kalkulasi kekakuan bahan untuk tiap perubahan pembebanan ditunjukkan dengan kurva pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4.6 Linierisasi Kurva Kekakuan Tali Tambat Bahan Karet

Dikarenakan kurva kekakuan yang terbentuk dari hasil kalkulasi tidak membentuk garis yang linier sehingga perlu untuk dilakukan linierisasi pada kurva kekakuan dengan bantuan *trendline* linier sehingga didapatkan fungsi linierisasi kekakuan untuk kemudian dihitung reratanya sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.14**.

Tabel 4.14 Rerata Kekakuan Bahan Karet Hasil Linierisasi

| Beban (kg) | C _K (linierisasi) | C _K (rerata) |
|------------|------------------------------|-------------------------|
| | N/m | (N/m) |
| 0,02 | 124,046 | 111,538 |
| 0,04 | 117,792 | |
| 0,06 | 111,538 | |
| 0,08 | 105,284 | |
| 0,1 | 99,030 | |

Dikarenakan pada kondisi fluida di kolam *Maneuvering and Ocean Basin* (MOB) merupakan tipe *freshwater*, maka sebelum diubah ke model *full scale*, dimana model *full scale* tersebut beroperasi di laut lepas (*seawater*) yang memiliki densitas yang berbeda, terlebih dahulu nilai kekakuan rerata yang didapatkan dari uji kalibrasi pada **Tabel 4.14** harus dikalikan dengan rasio densitas sebesar 1,025 sebagaimana yang ditunjukkan pada **Persamaan 2.41** baru kemudian model skalakan ke *full scale* mengikuti Hukum *Froude*, hasil kalkulasinya ditunjukkan pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4.15 Kekakuan Tali Tambat Karet Uji Eksperimen
Kondisi *Seawater* Model Eksperimen dan *Full Scale*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|--------------------------|---------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Kekakuan Karet (C_k) | 114,356 | N/m | λ^2 | 1786,817 | kN/m |

b. *Wire Sling*

Diketahui bahwa bahan *wire sling* adalah *stainless steel*, maka dengan hal tersebut nilai parameter Modulus Young (E) bahan *wire sling* yang digunakan dalam eksperimen dapat ditentukan dengan melihat referensi pada **Tabel 4.16**.

Tabel 4.16 Modulus Elastisitas *Wire Sling*
Selected Untuk Uji *Heave Decay*

| Bahan | Modulus Young (N/m^2) |
|-----------|---------------------------|
| Tungsten | 35×10^{10} |
| Baja | 20×10^{10} |
| Tembaga | 11×10^{10} |
| Brass | $9,1 \times 10^{10}$ |
| Aluminium | 7×10^{10} |
| Glass | $7,8 \times 10^{10}$ |
| Air | - |
| Raksa | - |

Kemudian dapat ditentukan spesifikasi dari *wire sling* yang akan digunakan dalam uji eksperimen yang ukurannya ditunjukkan pada **Tabel 4.17**.

Tabel 4.17 *Summary* Dimensi Tali Tambat *Wire Sling*
Model Eksperimen dan *Full Scale*

| Deskripsi | Model Eksperimen (Skala 1:125) | | Model Skala | Model <i>Full Scale</i> | |
|---------------|--------------------------------|---------|-------------|-------------------------|---------|
| | Nilai | Satuan | | Nilai | Satuan |
| Modulus Young | 200×10^9 | N/m^2 | - | 200×10^9 | N/m^2 |
| Diameter | $1,5 \times 10^{-4}$ | m | λ | 0,01875 | m |

Tabel 4.17 Summary Dimensi Tali Tambat *Wire Sling*Model Eksperimen dan *Full Scale* (cont.)

| Deskripsi | Model Eksperimen (Skala 1:125) | | Model Skala | Model <i>Full Scale</i> | |
|----------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|----------------|
| | Nilai | Satuan | | Nilai | Satuan |
| Panjang | 2,04 | m | λ | 255 | m |
| Luas penampang | 0,0177 | m ² | λ^2 | 276,563 | m ² |

Berdasarkan dari data – data tersebut dapat disimpulkan nilai kekakuan *wire sling* model eksperimen dan *full scale* (setelah dikalikan dengan rasio densitas akibat perbedaan fluida) berdasarkan **Tabel 4.18**.

Tabel 4.18 Kekakuan Tali Tambat *Wire Sling* Uji EksperimenModel Eksperimen dan *Full Scale*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|--------------------------------------|----------|--------|----------------|---------------------------------|--------|
| Kekakuan <i>Wire Sling</i> (C_w) | 1732,496 | N/m | λ^2 | 27747,005 | kN/m |

Setelah didapatkan parameter kekakuan tali tambat baik bahan karet dan *wire sling*, maka langkah selanjutnya adalah mengkalkulasi nilai kekakuan gabungan keduanya. Dikarenakan konfigurasi tali tambat diantara kedua bahan tersebut adalah seri, kalkulasi penjumlahan kekakuan gabungannya menggunakan kaidah penjumlahan 1/k sebagaimana ditunjukkan pada **Persamaan 4.4** dan **4.5**, sehingga dari kaidah tersebut dapat ditentukan nilai kekakuan tali tambat (C_{ml}) yang ditunjukkan pada **Tabel 4.19**.

$$\frac{1}{C_{ml}} = \frac{1}{C_K} + \frac{1}{C_W} \quad (4.4)$$

$$C_{ml} = \frac{C_K C_W}{C_K + C_W} \quad (4.5)$$

Tabel 4.19 Kekakuan Tali Tambat GabunganUji Eksperimen Model Eksperimen dan *Full Scale*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|----------------------|---------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Kekakuan Tali Tambat | 104,817 | N/m | λ^2 | 1678,712 | kN/m |

Kemudian, setelah diketahui kekakuan gabungan dari unit tali tambat yang akan digunakan dalam uji eksperimen, selanjutnya ditentukan sudut terhadap *fairlead* maupun dasar kolam dengan aturan *pythagoras* (menentukan panjang tali tambat dalam posisi diagonal yang dibutuhkan dalam konfigurasi) berdasarkan perencanaan posisi dan ukuran yang ditunjukkan pada **Gambar 3.9**, serta aturan Sinus dan identitas Trigonometri untuk menentukan nilai sudut relatif terhadap *fairlead* (β) dan dasar kolam (α) yang ditunjukkan pada **Gambar 3.10**.

Berdasarkan hasil pengukuran sarat pasca penambatan dengan mistar ukur, diketahui bahwa terjadi perubahan level sarat sebagai mana ditunjukkan pada **Tabel 4.20**.

Tabel 4.20 Sarat dan Volume *Displacement* Kondisi Tertambat Taut

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|---------------------|--------|----------------|-------------|------------------------------|----------------|
| Sarat | 1,114 | m | λ | 139,875 | m |
| Volume Displacement | 0,017 | m ³ | λ^3 | 33493,55 | m ³ |

Dengan membandingkan level sarat pada kondisi *free floating* dan tertambat taut pada **Tabel 4.8** dan **4.19**, dapat disimpulkan penambahan tali tambat dengan konfigurasi yang direncanakan menambah sarat sebesar 8 centimeter pada model eksperimen terhadap kondisi awal pra - penambatan. Kemudian diketahui bahwa nilai jarak horisontal antara *anchor* dengan *fairlead* (l_{ml}) adalah 1,334 meter (Jarak antara *anchor* dan *fairlead* dikurangi setengah diameter *Classic SPAR*) dan jarak vertikal (tinggi) antara *anchor* dengan *fairlead* (h_{ml}) adalah 2,556 meter (Penjumlahan antara kedalaman kolam dan jarak antara sarat terhadap *fairlead* dikurangi perubahan sarat akibat penambatan sebesar 0,08 meter). Dikarenakan terdapat sejumlah empat *line* tali tambat, dalam model eksperimen dirancang bahwa keempat tali tambat tersebut memiliki sudut relatif terhadap *fairlead* (β) dan dasar kolam (α) yang sama besarnya. Kalkulasi nilai – nilai sudut tersebut ditunjukkan pada **Persamaan 4.6** dan **4.7** sementara nilai sudut yang didapatkan dari kalkulasi baik pada model eksperimen maupun *full scale* ditunjukkan di **Tabel 4.21**.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{h_{ml}}{\sqrt{(h_{ml}^2 + l_{ml}^2)}}\right) \quad (4.6)$$

$$\beta = \sin^{-1}(\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}) \quad (4.7)$$

Tabel 4.21 Sudut Tali Tambat Terhadap *Fairlead* dan Dasar Kolam
Model Eksperimen dan *Full Scale*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|-----------------------------------|--------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Sudut <i>Fairlead</i> (β) | 27,8 | 0 | - | 27,8 | 0 |
| Sudut Dasar Kolam (α) | 62,2 | | | 62,2 | |

Dengan ditentukan nilai besaran sudutnya, langkah berikutnya adalah menentukan besarnya *pre – tension* pada tali tambat yang pada uji eksperimen. Nilai beban dan tegangan *pre – tension* dapat ditentukan menggunakan **Persamaan 2.39** dan **Persamaan 2.40** dan menghasilkan nilai tiap parameter sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.22**.

Tabel 4.22 Beban dan *Pre – Tension* Tali Tambat
Model Eksperimen dan *Full Scale*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|-----------------------------------|--------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Beban (F_{PT}) | 0,357 | kg | λ^3 | 697,39 | ton |
| <i>Pre - Tension</i> (T_{PT}) | 3,5 | N | | 6841,40 | kN |

Dengan didapatkan nilai tegangan *pre – tension* pada **Tabel 4.22**, maka dapat ditentukan nilai dari panjang tali tambat pasca pengaturan *pre – tension* berdasarkan **Persamaan 2.38**. Namun dikarenakan terdapat dua jenis tali dengan bahan yang berbeda, yaitu karet dengan panjang awal 0,2 meter dan *wire sling* dengan panjang awal 2,04 meter dengan konfigurasi seri dan terdapat komponen pendukung tali tambat seperti *tumbuckle* dan *carabiner* yang diabaikan kemungkinan penambahan panjangnya akibat *pre - tension*, maka panjang tali bahan (karet dan *wire sling*) akibat *pre – tension* dan panjang tali total pasca *pre – tension* hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 4.23** di bawah ini.

Tabel 4.23 Panjang Tali Tambat Pasca *Pre – Tension*
Model Eksperimen dan *Full Scale*

| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|--|--------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Panjang Tali <i>pre - tension</i> bahan karet (L_k) | 0,231 | m | λ | 28,92 | m |
| Panjang Tali <i>pre - tension</i> bahan <i>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 |

Dengan demikian, dapat dikalkulasikan kekakuan *heave* tali tambat uji eksperimen menggunakan pendekatan **Al – Solihat dan Nahon** (2015) pada **Persamaan 2.47** dan kekakuan total tali tambat arah *heave* berdasarkan jumlah tali tambat (4 unit) yang digunakan pada uji eksperimen berdasarkan **Persamaan 2.48** dimana hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 4.24**.

Tabel 4.24 Kekakuan Komponen *Heave* Tali Tambat

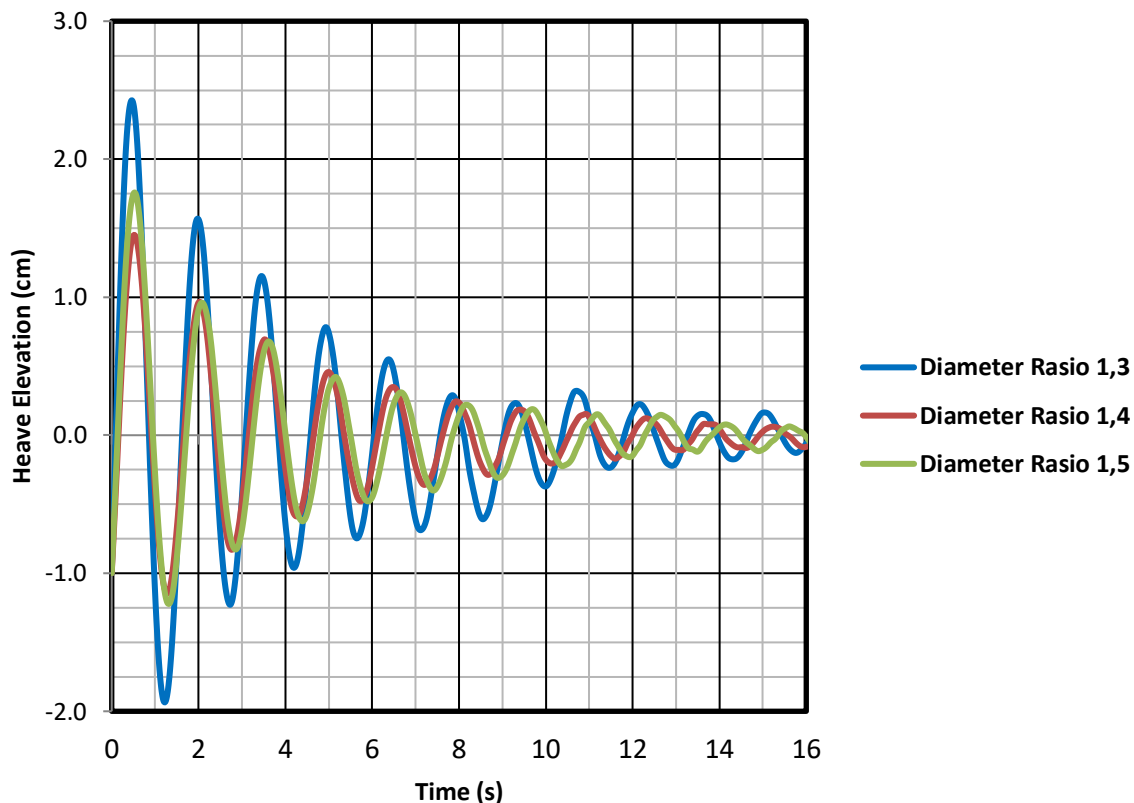
| Deskripsi | Ukuran | Satuan | Model Skala | Ukuran (<i>Full Scale</i>) | Satuan |
|--|---------|--------|-------------|------------------------------|--------|
| Kekakuan <i>heave</i> Tali Tambat (C_{ml}) | 82,126 | N/m | λ^2 | 1315,302 | kN/m |
| Kekakuan total <i>heave</i> Tali Tambat (C_{ML}) | 328,505 | N/m | | 5261,207 | kN/m |

Nilai kekakuan yang didapatkan pada **Tabel 4.24** adalah sama pada ketiga variasi diameter *heave plate*. Sedangkan pengaruh kekakuan hidrostatis diabaikan dalam kondisi tertambat dikarenakan pengaruhnya yang insignifikan terhadap kekakuan sistem total *Classic SPAR* dan *heave plate*. Parameter kekakuan ini kemudian akan dipergunakan untuk kalkulasi parameter – parameter lainnya yang terkait pada kondisi tertambat taut.

4.4 ANALISIS EKSPERIMEN

4.4.1 Uji *Heave Decay*

Berdasarkan uji *heave decay* yang dilakukan pada model eksperimen *Classic* SPAR dan *heave plate* dengan variasi *diameter ratio* 1,3, 1,4 dan 1,5 selama 16,1 sekon dikarenakan keterbatasan waktu pengujian eksperimen, didapatkan grafik fungsi posisi *heave* terhadap waktu pada model eksperimen yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7** di bawah ini.



Gambar 4.7 Respon *Heave Classic* SPAR Dan *Heave Plate*

Variasi Terhadap Fungsi Waktu Uji Eksperimen *Heave Decay*

Kondisi awal dari uji eksperimen *heave decay* pada ketiga variasi dilakukan dengan memberi simpangan awal ke arah sumbu z arah negatif sebesar 1 centimeter terhadap sarat awal dengan kondisi struktur *Classic* SPAR dan *heave plate* yang diletakkan di *keel* dan tertambat oleh taliambat konfigurasi taut sejumlah empat buah. Hasil yang didapatkan dari uji *heave decay* pada ketiga kondisi tersebut adalah fungsi respon *heave* struktur berdasarkan fungsi waktu sebagai akibat dari reaksi gaya dari pemberian simpangan pada *initial condition*. Kemudian dari fungsi respon *heave* yang telah didapatkan, dilakukan analisis pada bagian puncak amplitudo pada tiap siklus pada uji *heave decay*, baik pada posisi siklus *peak – up* (amplitudo puncak maksimum

bernilai elevasi positif maupun siklus *peak – down* (amplitudo puncak maksimum bernilai elevasi negatif) dimana dalam studi kasus ini diseragamkan terdapat sepuluh siklus ($n = 10$) pada masing – masing variasi *diameter ratio*.

Nilai amplitudo puncak (*peak – up* dan *peak down*) *heave* n - siklus pada tiap variasi *diameter ratio* diseleksi terlebih dahulu sebelum dipergunakan, hal ini dilakukan untuk meminimalisir data yang invalid yang justru kontradiktif terhadap parameter – parameter yang akan dicari selanjutnya dalam uji *heave decay* dengan kondisi tertambat taut. Berdasarkan Djatmiko (2012), diketahui pada saat model berosilasi pada sebuah medium fluida, maka akan ada fase dimana respon amplitudo puncak seiring berjalannya waktu akan mengalami reduksi secara eksponensial atau disebut sebagai fase *transient* dimana faktor redaman masih dominan mempengaruhi respon struktur dan ada fase dimana respon amplitudo puncak akan bernilai relatif sama atau disebut fase *steady* dimana pengaruh redaman menjadi insignifikan atau tak teredam (*undamped*). Berdasarkan dari hal inilah kemudian akan diseleksi data mana yang akan digunakan pada masing – masing variasi *diameter ratio*, baik dalam mode amplitudo *peak – up* ataupun *peak – down* pada model eksperimen setelah dilakukan uji *heave decay* yang datanya relatif terhadap jumlah siklus osilasi (n) ditunjukkan pada **Tabel 4.25**.

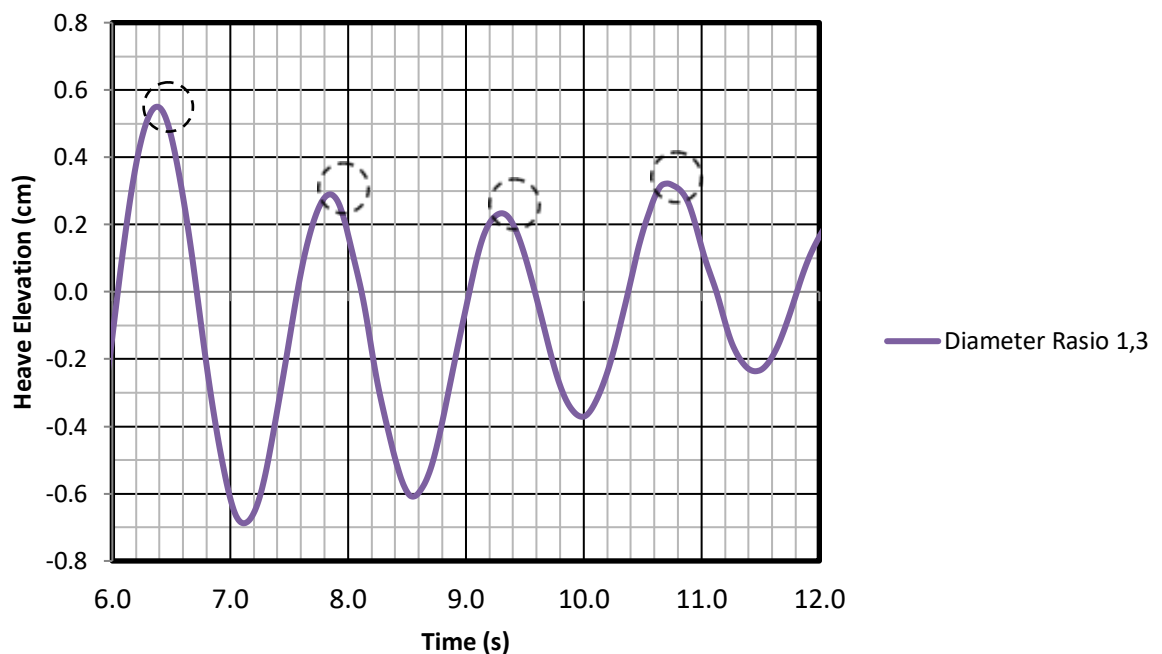
Tabel 4.25 Fungsi Amplitudo Puncak Terhadap Siklus Osilasi

Hasil Uji *Heave Decay Classic SPAR* dan *Heave Plate Variasi Diameter Ratio*

| Siklus (n) | <i>Diameter Ratio</i> 1,3 | | <i>Diameter Ratio</i> 1,4 | | <i>Diameter Ratio</i> 1,5 | |
|------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
| | Amplitudo (cm) | | | | | |
| | <i>Peak Up</i> | <i>Peak Down</i> | <i>Peak Up</i> | <i>Peak Down</i> | <i>Peak Up</i> | <i>Peak Down</i> |
| - | 2,43 | -1,94 | 1,45 | -1,15 | 1,76 | -1,22 |
| 1 | 1,57 | -1,23 | 0,97 | -0,83 | 0,96 | -0,83 |
| 2 | 1,15 | -0,96 | 0,69 | -0,59 | 0,68 | -0,62 |
| 3 | 0,78 | -0,75 | 0,46 | -0,48 | 0,42 | -0,48 |
| 4 | 0,55 | -0,69 | 0,35 | -0,36 | 0,31 | -0,40 |
| 5 | 0,29 | -0,61 | 0,25 | -0,29 | 0,22 | -0,31 |
| 6 | 0,23 | -0,37 | 0,19 | -0,21 | 0,19 | -0,22 |
| 7 | 0,32 | -0,24 | 0,15 | -0,17 | 0,15 | -0,17 |
| 8 | 0,23 | -0,22 | 0,12 | -0,11 | 0,15 | -0,12 |
| 9 | 0,15 | -0,17 | 0,08 | -0,09 | 0,08 | -0,12 |
| 10 | 0,16 | -0,13 | 0,06 | -0,09 | 0,06 | -0,13 |

Berdasarkan data puncak amplitudo tiap mode (*peak up* dan *peak down*) variasi *diameter ratio* yang ditunjukkan pada **Tabel 4.25**, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Ditinjau dari *diameter ratio* 1,3 pada amplitudo puncak mode *peak – up*, amplitudo awal terjadi penurunan respon puncak amplitudo arah *heave* pada tiap siklus hingga $n = 6$ (fase *transient*), kemudian terdapat anomali amplitudo puncak dimana nilai amplitudo puncak ke $- 7$ ($n = 7$) memiliki nilai yang lebih besar ketimbang amplitudo puncak ke $- 6$ ($n = 6$) dengan selisih yang signifikan, hal ini kemungkinan terjadi karena pemberian simpangan awal yang tidak tepat berada di tengah lambung *Classic SPAR*, sehingga mode gerak struktur saat uji *decay* tidak hanya berupa *heave* saja, berdampak pada gerak *coupled* antara *heave* dengan mode gerak lain (*surge*, *pitch* dan sebagainya) ataupun posisi konfigurasi dari tali tambat yang tidak 100% simetris dan presisi seperti halnya pada perencanaan awal. Visualisasi grafik anomali puncak amplitudo *heave* berturut – turut dari $n = 4$ dan $n = 7$, mode *peak – up* pada variasi *diameter ratio* 1,3 ditunjukkan pada **Gambar 4.8**. (Hasil data respon *heave* struktur akibat uji *heave decay diameter ratio* 1.3 dilampirkan pada **Lampiran D**)



Gambar 4.8 Anomali Amplitudo Puncak Mode *Peak Up*
Respon *Heave* Uji *Heave Decay Classic SPAR* dan *Heave Plate*
Variasi *Diameter Ratio* 1,3 ($n = 4$ hingga $n = 7$)

Dibandingkan dengan amplitudo puncak mode *peak – down* yang konsisten penurunan amplitudo puncaknya hingga siklus ke – 10 (fase *transient*), maka dalam kasus *diameter ratio* 1,3 data yang digunakan untuk menentukan parameter – parameter tinjauan adalah amplitudo puncak mode *peak – down*.

- Ditinjau dari *diameter ratio* 1,4, baik pada mode *peak – up* maupun *peak – down* mengalami penurunan nilai amplitudo puncak *heave* tiap siklusnya secara konsisten ($n = 10$ untuk *peak – up* dan $n = 9$ untuk *peak – down* sebelum masuk fase *steady*), sehingga dalam kasus ini data yang digunakan untuk menentukan parameter – parameter lanjutan uji *heave decay* adalah mode *peak – up* dikarenakan jumlah siklus (n) yang lebih banyak sehingga lebih mewakili keseluruhan data hasil eksperimen yang didapatkan. (Hasil data respon *heave* struktur akibat uji *heave decay diameter ratio* 1.4 dilampirkan pada **Lampiran E**)
- Ditinjau dari *diameter ratio* 1,5, terjadi anomali pada siklus amplitudo puncak (n) ke – 10 dimana didapatkan hasil yang lebih besar dibandingkan amplitudo puncak ke – 9 di mode *peak – down*, setelah sebelumnya mengalami penurunan dari amplitudo awal hingga amplitudo ke – 9. Sedangkan pada mode *peak – up*, terjadi kesamaan nilai amplitudo puncak pada siklus ke – 7 dan 8 setelah sebelumnya mengalami penurunan yang konsisten dari amplitudo awal hingga ke – 6. Sehingga pada studi kasus *diameter ratio* 1,5 data yang digunakan untuk menentukan parameter – parameter lanjutan uji *heave decay* adalah mode *peak – up* dengan pertimbangan inkonsistensi (anomali) penurunan amplitudo puncak pada mode *peak – down*. (Hasil data respon *heave* struktur akibat uji *heave decay diameter ratio* 1.5 dilampirkan pada **Lampiran F**)

Setelah menentukan data mana yang akan digunakan hasil uji *heave decay* pada masing – masing variasi *diameter ratio*, maka langkah selanjutnya adalah melakukan skala pemodelan fungsi amplitudo puncak tiap siklus, waktu terjadinya dan interval waktu antar puncak amplitudo yang berdekatan dari model eksperimen ke model *full scale*. Hasil skala pemodelan hasil uji *heave decay* untuk variasi *diameter ratio* 1,3 ditunjukkan pada **Tabel 4.26**.

Tabel 4.26 Fungsi Amplitudo Puncak Siklus *Peak - Up Respon Heave*

Terhadap Fungsi Waktu dan Interval Siklus

Hasil Uji *Heave Decay Classic SPAR* dan *Heave Plate* Dengan *Diameter Ratio* 1,3

| Siklus (n) | Waktu (s) | Interval Waktu per Siklus (s) | Faktor Skala | Waktu (<i>Full Scale</i>) (s) | Interval Waktu per Siklus (<i>Full Scale</i>) (s) | Amplitudo (m) | Faktor Skala | Amplitudo (<i>Full Scale</i>) (m) |
|------------|-----------|-------------------------------|-----------------|---------------------------------|---|---------------|--------------|-------------------------------------|
| - | 1,22 | - | $\lambda^{1/2}$ | 13,64 | - | -0,0194 | λ | -2,42 |
| 1 | 2,72 | 1,50 | | 30,41 | 16,77 | -0,0123 | | -1,53 |
| 2 | 4,20 | 1,48 | | 46,96 | 16,55 | -0,0096 | | -1,20 |
| 3 | 5,64 | 1,44 | | 63,06 | 16,10 | -0,0075 | | -0,93 |
| 4 | 7,12 | 1,48 | | 79,60 | 16,55 | -0,0069 | | -0,86 |
| 5 | 8,56 | 1,44 | | 95,70 | 16,10 | -0,0061 | | -0,76 |
| 6 | 9,98 | 1,42 | | 111,58 | 15,88 | -0,0037 | | -0,46 |
| 7 | 11,46 | 1,48 | | 128,13 | 16,55 | -0,0024 | | -0,29 |
| 8 | 12,90 | 1,44 | | 144,23 | 16,10 | -0,0022 | | -0,28 |
| 9 | 14,30 | 1,40 | | 159,88 | 15,65 | -0,0017 | | -0,22 |
| 10 | 15,76 | 1,46 | | 176,20 | 16,32 | -0,0013 | | -0,16 |
| Rerata | | 1,45 | | | | | | |

Interval waktu per siklus amplitudo puncak berturutan yang didapatkan pada kolom ke – 3 **Tabel 4.26** kemudian dicari reratanya (T_a) untuk kemudian digunakan sebagai bahan kalkulasi frekuensi teredam arah *heave* (ω_d) sebagaimana ditunjukkan pada **Persamaan 2.30**. Hasil parameter frekuensi teredam arah *heave* variasi *diameter ratio* ditunjukkan pada **Tabel 4.27**.

Tabel 4.27 Frekuensi Teredam Arah *Heave* Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik Frekuensi Teredam <i>Heave</i> | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|--|-----------------------|-------|-------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Model Eksperimen (rad/s) | 4,321 | 4,274 | 4,126 |
| Faktor Skala | $\lambda^{1/2}$ | | |
| Model <i>Full Scale</i> (rad/s) | 0,387 | 0,382 | 0,369 |

4.4.2 Parameter *Heave Viscous Damping Ratio*

Penentuan nilai n – siklus pada masing – masing variasi *diameter ratio* adalah sebagai berikut:

- *Diameter Ratio* 1,3, menggunakan data amplitudo puncak mode *peak – down* pada siklus osilasi (n) ke – 10,
- *Diameter Ratio* 1,4 menggunakan data amplitudo puncak mode *peak – up* pada siklus osilasi (n) ke – 10,
- *Diameter Ratio* 1,5 menggunakan data amplitudo puncak mode *peak – up* pada siklus osilasi (n) ke – 7.

Dengan ditentukannya nilai siklus osilasi (n), maka kalkulasi *logarithmic decrement* tiap variasi *diameter ratio* dapat dilakukan dan hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 4.28**.

Tabel 4.28 Kalkulasi *Logarithmic Decrement* Uji *Heave Decay*

Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|---|-----------------------|-------|-------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| <i>Logarithmic Decrement</i> (δ) | 0,272 | 0,316 | 0,350 |

Dengan didapatkannya parameter *logarithmic decrement* sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.28**, dapat ditentukan nilai parameter *heave viscous damping ratio* dengan menggunakan **Persamaan 2.29**, dimana hasil kalkulasinya untuk semua variasi *diameter ratio* dan persentase perubahan parameter relatif terhadap *diameter ratio* 1,3 ditunjukkan pada **Tabel 4.29**.

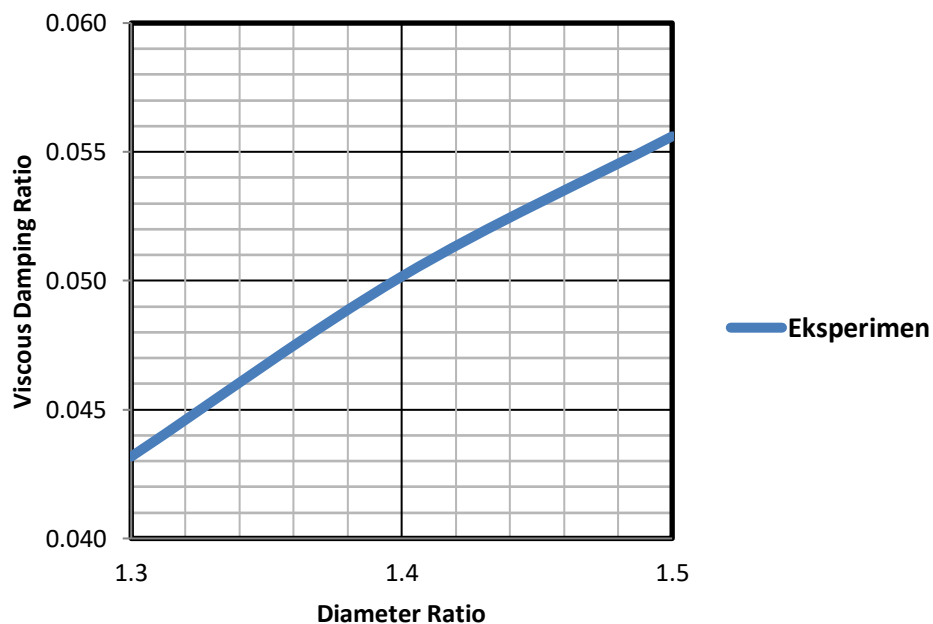
Tabel 4.29 Persentase Perubahan *Viscous Damping Ratio Classic* SPAR

Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|--|-----------------------|--------|--------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| <i>Viscous Damping Ratio</i> (ξ_3) | 0,0432 | 0,0502 | 0,0556 |
| % Perubahan | - | +16,19 | +28,79 |

Dengan nilai dari *viscous damping ratio* pada semua variasi *diameter ratio* menunjukkan nilai yang lebih besar dari nol, namun lebih kecil dari satu menandakan

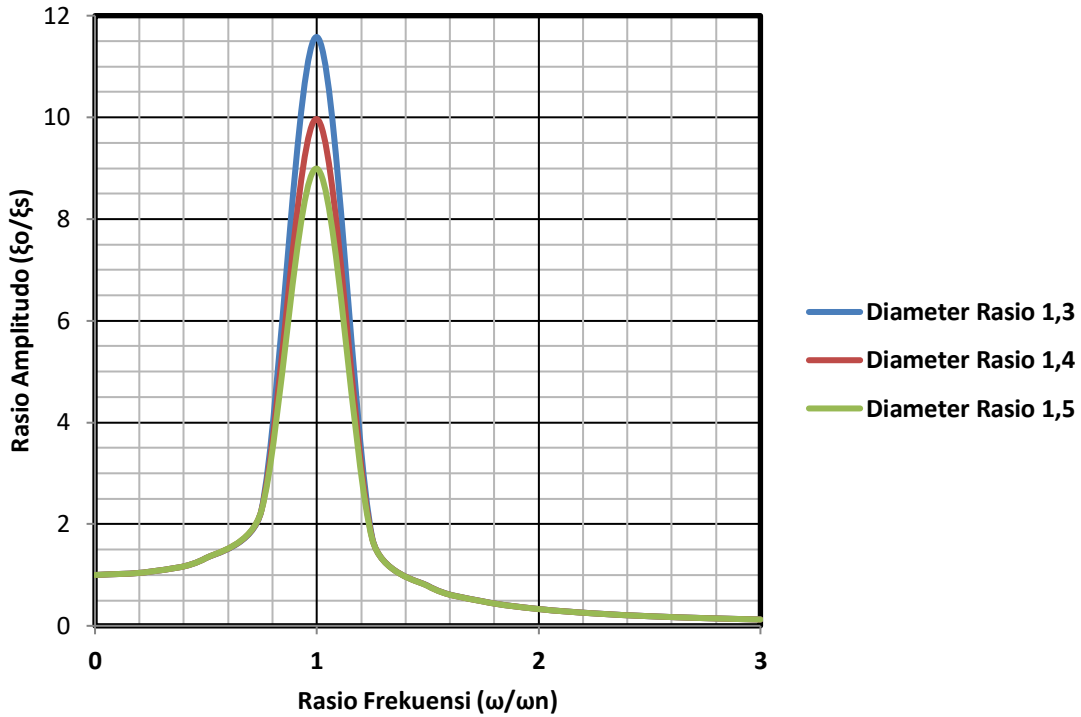
bahwa mode redaman yang dialami oleh struktur pada kondisi tertambat taut adalah mode *underdamped* ($b_f < 1$). Berdasarkan **Tabel 4.29** diketahui bahwa pada *diameter ratio* 1.3, *viscous damping ratio* bernilai 0,0432 sedangkan pada *diameter ratio* 1.4 bernilai 0,0502 atau meningkat sebesar 16,19% sedangkan pada *diameter ratio* 1.5 bernilai 0,0556 atau meningkat sebesar 28,79% relatif terhadap *diameter ratio* 1.3. Dengan nilai dari *viscous damping ratio* pada semua variasi *diameter ratio* menunjukkan nilai yang lebih besar dari nol, namun lebih kecil dari satu menandakan bahwa mode redaman yang dialami oleh struktur pada kondisi tertambat taut adalah mode *underdamped* ($b_f < 1$). Kurva yang menunjukkan tren penambahan *heave viscous damping ratio* berdasarkan fungsi *diameter ratio* ditunjukkan pada **Gambar 4.9** di bawah ini.



Gambar 4.9 Grafik Fungsi *Diameter Ratio* Terhadap

Viscous Damping Ratio Heave Classic SPAR + Heave Plate

Parameter *heave viscous damping ratio* mempengaruhi nilai parameter respon amplitudo struktur *Classic SPAR* terhadap amplitudo gelombang datang dengan variasi *diameter ratio* 1,3, 1,4 dan 1,5 sehingga didapatkan hubungan fungsi rasio antara frekuensi gelombang dan frekuensi natural struktur dengan faktor ekspansi amplitudo berupa respon sistem massa – pegas akibat gaya harmonik eksternal sesuai **Persamaan 2.34** yang ditunjukkan pada **Gambar 4.10** di bawah ini.



Gambar 4.10 Grafik Fungsi Faktor Perubahan Amplitudo Respon Sistem Massa – Pegas Akibat Beban Harmonik Eksternal

Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada **Gambar 4.10** didapatkan hasil bahwa dengan variasi *diameter ratio* terjadi reduksi pada respon amplitudo struktur relatif terhadap amplitudo gelombang yang secara signifikan terjadi pada fase resonansi, atau saat nilai rasio frekuensi (ω/ω_n) sama dengan 1, hal ini ditunjukkan dengan nilai parameter faktor ekspansi amplitudo yang mengalami penurunan dengan peningkatan *diameter ratio* antara *heave plate* dengan *Classic SPAR*. Kalkulasi persentase reduksi respon amplitudo terhadap fungsi *diameter ratio* ditunjukkan pada **Tabel 4.30**.

Tabel 4.30 Persentase Reduksi Respon Perubahan Amplitudo Fase Resonansi Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|----------------------------------|-----------------------|--------|--------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Respon Amplitudo Resonansi (m/m) | 11,581 | 9,967 | 8,992 |
| % Perubahan | 0,00 | -16,19 | -28,79 |

Berdasarkan **Tabel 4.30**, pada saat fase resonansi, respon amplitudo struktur pada *diameter ratio* 1.3 adalah 11,581 m/m, sedangkan untuk *diameter ratio* 1.4 respon amplitudonya menjadi 9,967 m/m atau mengalami penurunan sebesar 16,19%

begitupula untuk *diameter ratio* 1.5 dengan respon amplitudonya sebesar 8,992 m/m atau mengalami reduksi sebesar 28,79% relatif terhadap kondisi awal *diameter ratio* 1,3, menunjukkan bahwa pengaruh penambahan diameter *heave plate* terhadap *viscous damping ratio* menentukan terhadap besarnya reduksi respon yang dialami oleh struktur akibat beban eksternal harmonik seperti gelombang *encounter* dan dengan semakin lebar diameter dari *heave plate Classic SPAR* secara teoritis akan menambah nilai parameter *viscous damping ratio* hingga mendekati nilai 1 (redaman kritis) dan kemudian semakin mereduksi nilai respon amplitudo struktur pada fase resonansi.

4.4.3 Parameter Periode Natural Heave

Nilai parameter periode natural *heave* dan persentase perubahannya dengan variasi *diameter ratio* relatif terhadap *diameter ratio* 1,3 ukuran model eksperimen dan *full scale* ditunjukkan pada **Tabel 4.31**.

Tabel 4.31 Persentase Perubahan Periode Natural *Heave Classic SPAR*
Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|-----------------------------|-----------------------|--------|--------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Periode Natural | | | |
| Model Eksperimen (s) | 1,453 | 1,478 | 1,521 |
| Faktor Skala | $\lambda^{1/2}$ | | |
| Model <i>Full Scale</i> (s) | 16,241 | 16,526 | 17,000 |
| % Perubahan | 0,00 | +1,75 | +4,67 |

Berdasarkan **Tabel 4.31** menunjukkan bahwa nilai parameter periode natural pada *diameter ratio* 1.3 sebesar 16,241 sekon, sedangkan pada *diameter ratio* 1.4 sebesar 16,526 sekon atau mengalami peningkatan sebesar 1,75%, sementara pada *diameter ratio* 1.5 sebesar 17,00 sekon atau mengalami peningkatan sebesar 4,67% relatif terhadap kondisi awal *diameter ratio* 1.3. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menambahkan diameter dari *heave plate* dapat menggeser periode natural ke kanan terhadap sumbu – x yang berdampak pada implikasi apabila saat struktur *Classic SPAR* dan *heave plate* dengan *diameter ratio* 1,3 memiliki periode natural yang sama dengan periode gelombang *encounter* yang kemudian berakibat pada munculnya fase

resonansi, dengan menambah diameter *heave plate* akan menggeser rasio frekuensi antara gelombang *encounter* dengan frekuensi natural struktur ke arah kanan menjauhi fase resonansi (ω/ω_n) sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.17**. Kurva yang menunjukkan tren penambahan periode natural *heave* berdasarkan fungsi *diameter ratio* ditunjukkan pada **Gambar 4.11** di bawah ini.



Gambar 4.11 Grafik Fungsi *Diameter Ratio* Terhadap Periode Natural *Heave Classic SPAR + Heave Plate*

Dengan telah ditentukannya parameter frekuensi teredam, *viscous damping ratio*, periode natural pada arah *heave*, dan diketahui bahwa pada saat *initial condition* osilasi pada uji *heave decay*, posisi awal (y_0) benda adalah 1 centimeter di bawah level sarat awal dan kecepatan awal (v_0) adalah nol atau diam. Maka dapat dibuat persamaan matematis gerak osilasi uji *heave decay* mode *underdamped* untuk ketiga variasi *diameter ratio*, sesuai dengan **Persamaan 2.17 – 2.19**. Lalu kemudian didapatkan rumus pendekatan persamaan osilasi matematis grafik uji *heave decay* untuk masing – masing variasi *diameter ratio* pada model eksperimen yang ditunjukkan pada **Persamaan 4.8 – 4.10 (a)** untuk ukuran model eksperimen dan **(b)** untuk model *full scale* sebagai berikut.

- *Diameter Ratio* 1,3 $\Rightarrow y_{(t)} = 0,01e^{-0,187t} \cos(4,321t - 2,48)$ **(4.8a)**

- $\Rightarrow y_{(t)} = 1,25e^{-0,017t} \cos(0,387t - 2,48)$ **(4.8b)**

- *Diameter Ratio* 1,4 $\Rightarrow y_{(t)} = 0,01e^{-0,213t}\cos(4,274t - 2,86)$ **(4.9a)**

$$\Rightarrow y_{(t)} = 1,25e^{-0,019t}\cos(0,382t - 2,86)$$
 (4.9b)

- *Diameter Ratio* 1,5 $\Rightarrow y_{(t)} = 0,01e^{-0,230t}\cos(4,126t - 3,2)$ **(4.10a)**

$$\Rightarrow y_{(t)} = 1,25e^{-0,021t}\cos(0,369t - 3,2)$$
 (4.11b)

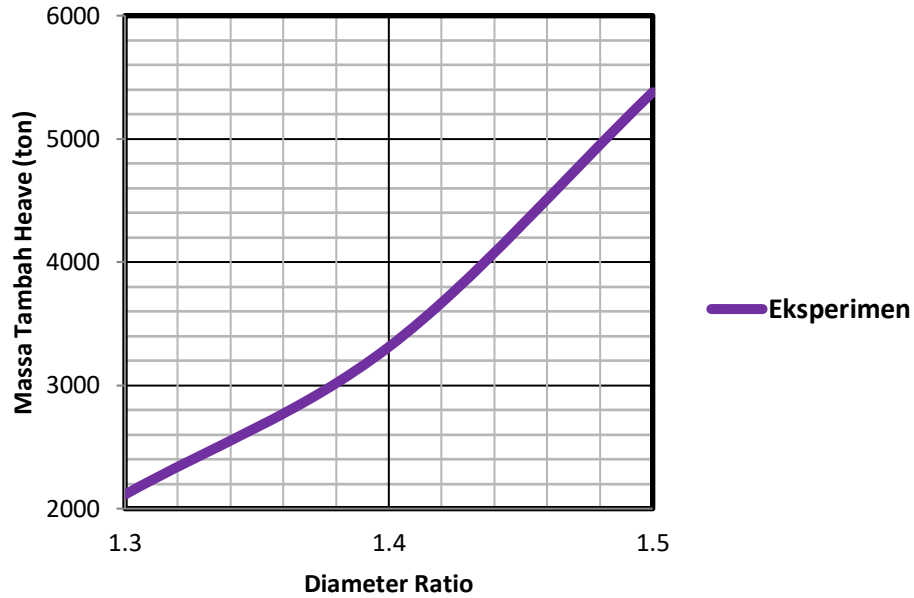
4.4.4 Parameter Massa Tambah *Heave*

Hasil kalkulasi hasil eksperimen parameter massa tambah *heave* variasi *diameter ratio* ukuran model eksperimen dan *full scale* ditunjukkan pada **Tabel 4.32**.

Tabel 4.32 Parameter dan Persentase Perubahan Massa Tambah *Classic* SPAR Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik Massa Tambah | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|-------------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Model Eksperimen (kg) | 1,056 | 1,719 | 2,687 |
| Faktor Skala | λ^3 | | |
| Model <i>Full Scale</i> (ton) | 2114,098 | 3441,603 | 5378,831 |
| % Perubahan | 0,00% | 62,79% | 154,43% |

Hasil analisis parameter massa tambah arah *heave* uji *heave decay* pada *Classic* SPAR dan *heave plate* pada **Tabel 4.32** menunjukkan bahwa nilai parameter massa tambah pada *diameter ratio* 1.3 sebesar 2114,098 ton, sedangkan pada *diameter ratio* 1.4 sebesar 3441,603 ton atau mengalami peningkatan sebesar 62,79%, sementara pada *diameter ratio* 1.5 sebesar 5378,831 ton atau mengalami peningkatan sebesar 154,43% relatif terhadap kondisi awal *diameter ratio* 1.3. Grafik fungsi *diameter ratio* terhadap parameter massa tambah *heave* hasil eksperimen ditunjukkan pada **Gambar 4.12**.



Gambar 4.12 Grafik Fungsi *Diameter Ratio* Terhadap Massa Tambah *Heave Classic SPAR + Heave Plate*

4.4.5 Parameter Redaman Viskos *Heave*

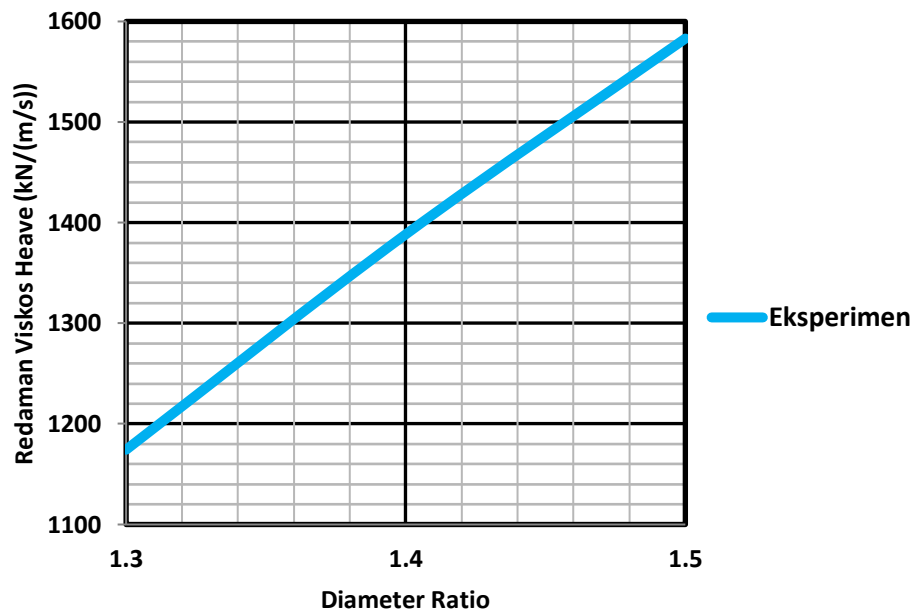
Hasil perhitungan nilai karakteristik redaman pada tiap variasi *diameter ratio* pada ukuran model eksperimen dan *full scale* ditunjukkan pada **Tabel 4.33**.

Tabel 4.33 Parameter dan Persentase Perubahan Redaman Viskos *Classic SPAR* Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik Redaman Viskos | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|------------------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Model Eksperimen (N/(m/s)) | 6,558 | 7,767 | 8,841 |
| Faktor Skala | $\lambda^{5/2}$ | | |
| Model <i>Full Scale</i> (kN/(m/s)) | 1174,328 | 1390,810 | 1583,025 |
| % Perubahan | 0,00 | +18,43 | +34,80 |

Hasil analisis redaman viskos arah *heave* uji *heave decay* pada *Classic SPAR* dan *heave plate* pada **Tabel 4.33** bahwa nilai parameter redaman viskos pada *diameter ratio* 1.3 sebesar 1174,328 kN/(m/s), sedangkan pada *diameter ratio* 1.4 sebesar 1390,81 kN/(m/s) atau mengalami peningkatan sebesar 18,43%, sementara pada *diameter ratio* 1.5 sebesar 1583,025 kN/(m/s) atau mengalami peningkatan sebesar

34,80% relatif terhadap kondisi awal *diameter ratio* 1.3. Kurva yang menunjukkan tren penambahan redaman viskos arah *heave* berdasarkan fungsi *diameter ratio* ditunjukkan pada **Gambar 4.13** di bawah ini.



Gambar 4.13 Grafik Fungsi *Diameter Ratio* Terhadap Redaman *Heave Classic SPAR + Heave Plate*

4.5. ANALISIS ANALITIS

4.5.1 Grafik *Heave Decay*

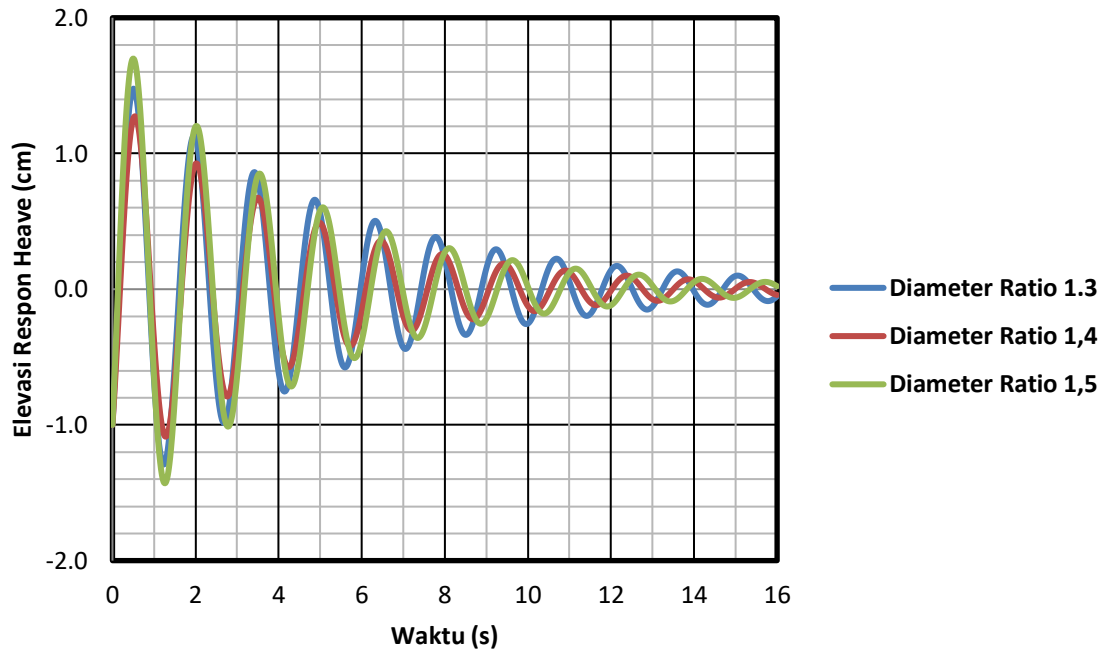
Dengan menggunakan pendekatan persamaan gerak bangunan terapung saat osilasi *decay* pada permodelan *Strip Theory* berdasarkan **Persamaan 2.54**, dan kemudian menentukan parameter v berdasarkan pada **Persamaan 2.52**, sehingga didapatkan masing – masing nilai v untuk tiap variasi *diameter ratio* yang ditunjukkan pada **Persamaan 4.8 – 4.10 (a)** untuk ukuran eksperimen, sebagaimana nilai masing – masing ada pada **Tabel 4.34**.

Tabel 4.34 Parameter v *Strip Theory* Grafik *Heave Decay* Model Numeris

| Parameter | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|-----------|-----------------------|-------|-------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| v | 0,187 | 0,213 | 0,230 |

Setelah ditentukan pendekatan nilai parameter v , maka dengan *coding script* dari *software* MATLAB kemudian diinput untuk mendapatkan grafik *heave decay* ideal untuk tiap variasi *diameter ratio*, dengan acuan *initial condition* disamakan

sebagaimana kondisi eksperimen, yaitu posisi awal -1 centimeter dan kecepatan awal nol. Hasil *running* grafik respon *heave decay* variasi *diameter ratio* ditunjukkan pada **Gambar 4.14**. (Hasil data respon *heave* struktur model numeris dengan *strip theory* untuk *diameter ratio* 1.3 dilampirkan pada **Lampiran G**, *diameter ratio* 1.4 pada **Lampiran H** dan *diameter ratio* 1.5 pada **Lampiran I**)



Gambar 4.14 Respon *Heave Classic* SPAR Dan *Heave Plate*

Variasi Terhadap Fungsi Waktu Model Analitis

Berdasarkan grafik respon *heave* pada masing – masing variasi *diameter ratio*, dapat ditunjukkan bahwa amplitudo puncak *heave* mengalami penurunan respon pada tiap siklusnya, dikarenakan hal tersebut maka amplitudo puncak yang dijadikan pertimbangan kalkulasi adalah pada siklus ke – 10 mode *peak – up* ($n = 10$). Setelah menentukan data mana yang akan digunakan hasil uji *heave decay* pada masing – masing variasi *diameter ratio*. Kemudian membandingkan amplitudo puncak yang didapatkan dari hasil pengujian eksperimen maupun pendekatan *Strip Theory* untuk mengetahui persentasenya dengan patokan dari hasil eksperimen, untuk variasi *diameter ratio* 1.3 ditunjukkan pada **Tabel 4.35**.

Tabel 4.35 Perbandingan Amplitudo Puncak Tiap Siklus Hasil Uji Eksperimen dengan Pendekatan *Strip Theory*

| Siklus (n) | Diameter Ratio 1.3 (cm) | | % Perbedaan |
|------------|-------------------------|--------------|----------------|
| | Eksperimen | Strip Theory | |
| - | 2,427 | 1,477 | 39,15% |
| 1 | 1,570 | 1,129 | 28,08% |
| 2 | 1,153 | 0,862 | 25,19% |
| 3 | 0,783 | 0,659 | 15,84% |
| 4 | 0,550 | 0,503 | 8,47% |
| 5 | 0,289 | 0,385 | -32,97% |
| 6 | 0,233 | 0,294 | -25,94% |
| 7 | 0,322 | 0,225 | 30,19% |
| 8 | 0,226 | 0,172 | 24,02% |
| 9 | 0,154 | 0,131 | 14,97% |
| 10 | 0,165 | 0,100 | 39,27% |

Berdasarkan persentase perbedaan yang didapatkan pada **Tabel 4.35** yang seluruhnya melebihi 5% (variasi *diameter ratio* 1.3 mode *peak – up*), maka dapat disimpulkan bahwa pendekatan *Strip Theory* hanya mampu memprediksi reduksi amplitudo yang terjadi pada uji eksperimen akibat variasi *diameter* dari *heave plate* dan valuasi parameter – parameter tinjauan yang mengikutinya, namun tidak dapat memodelkan dinamika perubahan amplitudo puncak pada uji eksperimen yang tidak teratur yang erat kaitannya dengan pemberian simpangan awal pada *initial condition* yang tidak dilakukan pengukuran terlebih dahulu, posisi asimetris dari tali tambat yang diinstalasi pada model eksperimen, dan pemberian simpangan yang tidak tepat berada di sumbu gerak *heave*, sehingga menyebabkan munculnya efek gerak kopel pada gerak selain *heave*. Data lebih lengkap dapat dilihat pada **Lampiran G**. Hal ini juga berlaku pada variasi *diameter ratio* 1.4 dan 1.5 yang ditunjukkan pada **Lampiran H** untuk *diameter ratio* 1.4 dan **Lampiran I** untuk *diameter ratio* 1.5.

4.5.2 Parameter Heave Viscous Damping Ratio

Dengan telah ditentukannya nilai siklus osilasi (n), maka kalkulasi *logarithmic decrement* variasi *diameter ratio* dapat dilakukan dan hasilnya pada **Tabel 4.36**.

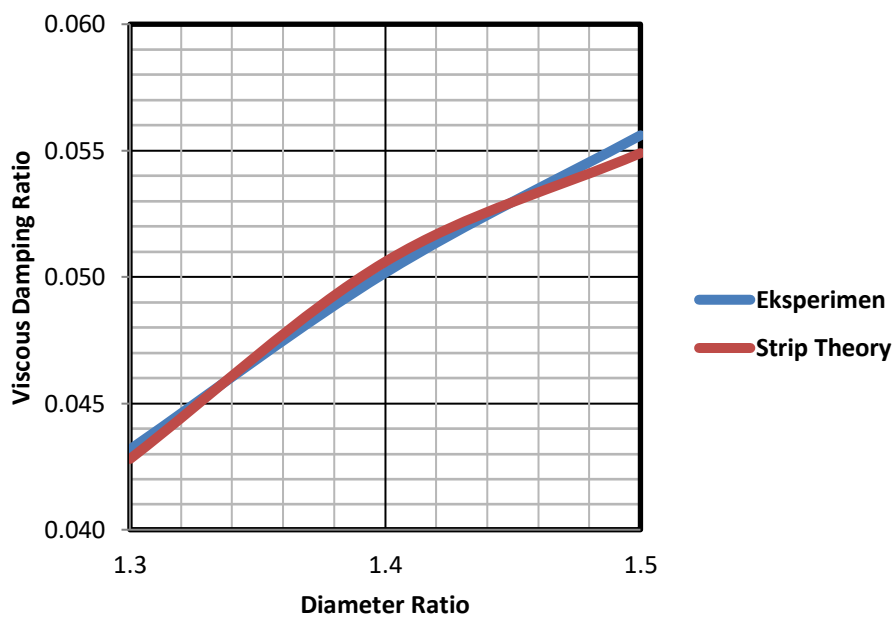
Tabel 4.36 Kalkulasi *Logarithmic Decrement* Uji Heave Decay
Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|---|-----------------------|-------|-------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| <i>Logarithmic Decrement</i> (δ) | 0,269 | 0,318 | 0,345 |

Dengan didaptkannya parameter *logarithmic decrement* sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4.36**, dapat ditentukan nilai parameter *heave viscous damping ratio* dengan menggunakan **Persamaan 2.29**, dimana hasil kalkulasinya untuk semua variasi *diameter ratio* dan kemudian dikomparasikan dengan hasil uji eksperimen ditunjukkan pada **Tabel 4.37** dan grafiknya pada **Gambar 4.15**.

Tabel 4.37 Persentase Perubahan *Viscous Damping Ratio Classic SPAR*
Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik <i>Viscous Damping Ratio</i> | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|--|-----------------------|--------|--------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Analitis (<i>Strip Theory</i>) | 0,0428 | 0,0506 | 0,0549 |
| Eksperimen | 0,0432 | 0,0502 | 0,0556 |
| % Perubahan | 0,91 | -0,83 | 1,31 |



Gambar 4.15 *Viscous Damping Ratio* Kondisi Tertambat Taut
Variasi *Diameter Ratio* (*Strip Theory* included)

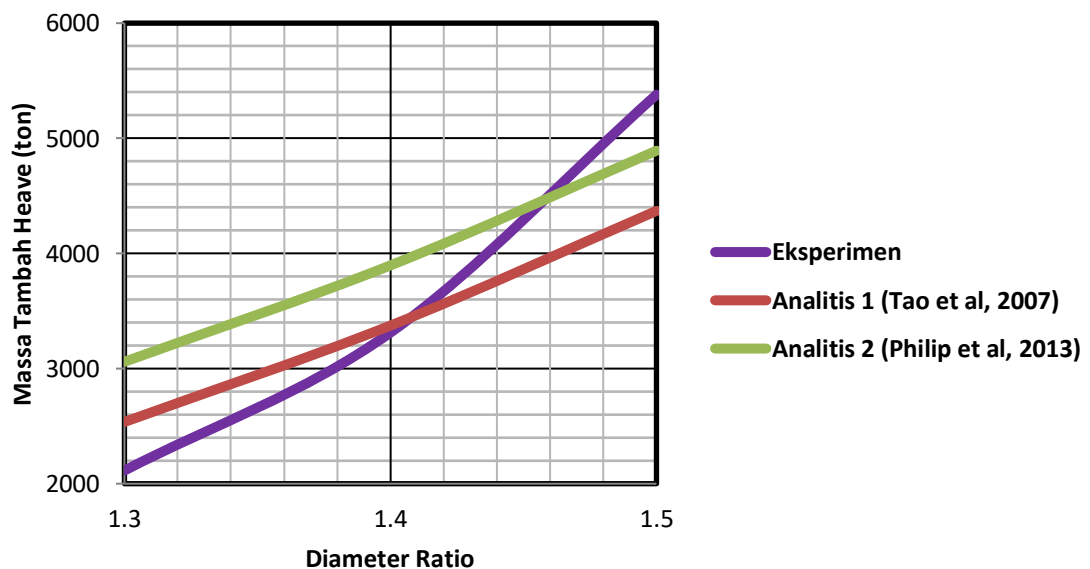
Berdasarkan perbandingan hasil eksperimen dan analitis (*strip theory*), didapatkan bahwa nilai persentase perubahan bervariasi antara 0,83 – 1,31 %, dengan nilai tersebut, dapat disimpulkan bahwa pendekatan dengan *strip theory* dapat digunakan untuk memperoleh parameter *heave viscous damping ratio* secara **valid**, dikarenakan berada di bawah 5%.

4.5.3 Parameter Massa Tambah *Heave*

Nilai parameter massa tambah *heave* hasil pendekatan analitis dari **Tao et al** pada **Persamaan 2.11 (Analitis 1)** dan **Philip et al** pada **Persamaan 2.12 (Analitis 2)** dan kemudian dikomparasikan dengan hasil uji eksperimen ditunjukkan pada **Tabel 4.38**.

Tabel 4.38 Parameter dan Persentase Perubahan Massa Tambah *Classic* SPAR Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik Massa Tambah (ton) | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|----------------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Analitis 1 | 2536,245 | 3373,476 | 4369,549 |
| Analitis 2 | 3058,843 | 3896,074 | 4892,147 |
| Eksperimen | 2114,098 | 3312,658 | 5378,831 |
| % Perubahan Minimum | -19,97 | -1,84 | +9,05 |



Gambar 4.16 Massa Tambah Kondisi Tertambat Taut Variasi *Diameter Ratio* (Analitis included)

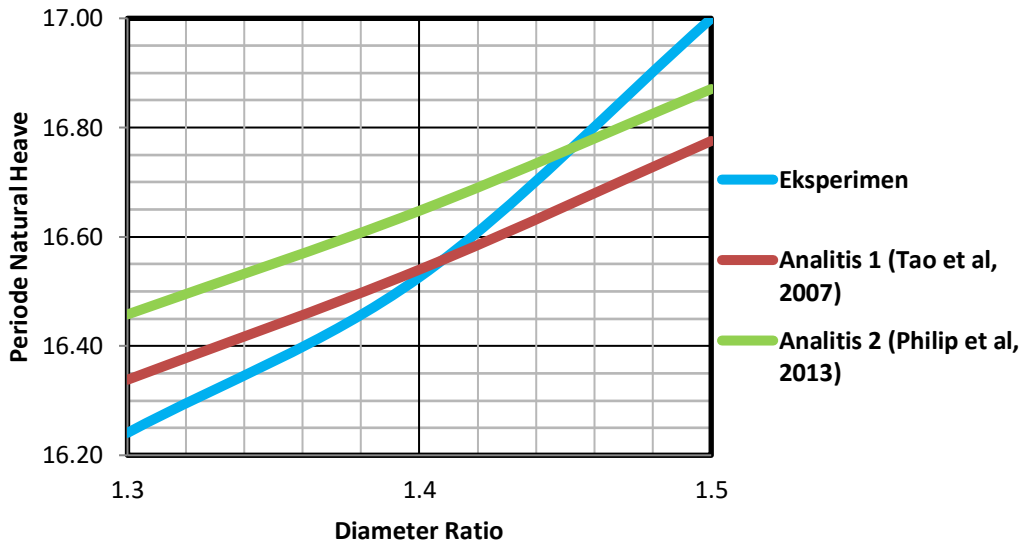
Berdasarkan perbandingan hasil eksperimen dan analitis, didapatkan bahwa nilai persentase perubahan bervariasi antara 1,84 – 19,97 %, dengan nilai tersebut, dapat disimpulkan bahwa parameter massa tambah *heave* berdasarkan pendekatan analitis dari **Tao et al** dan **Philip et al** dapat digunakan untuk parameter massa tambah yang dihasilkan dari uji eksperimen. Hal ini ditunjukkan dengan kurva massa tambah hasil eksperimen memotong kurva massa tambah pendekatan analitis. Perbedaan massa tambah dimungkinkan terjadi karena pengaruh dari *base cap* yang berperan menambah nilai massa tambah struktur, selain pengaruh dari *heave plate* yang tidak dirumuskan pada **Persamaan 2.11** dan **2.12** yang menunjukkan pengaruh *Classic SPAR* dengan *heave plate*.

4.5.4 Parameter Periode Natural *Heave*

Nilai parameter periode natural *heave* hasil model numeris dan kemudian dikomparasikan dengan hasil uji eksperimen ditunjukkan pada **Tabel 4.39** dan grafiknya pada **Gambar 4.17**.

Tabel 4.39 Persentase Perubahan Periode Natural *Heave Classic SPAR*
Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik Periode Natural (s) | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|--------------------------------------|-----------------------|--------|--------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Analitis 1 | 16,338 | 16,540 | 16,775 |
| Analitis 2 | 16,458 | 16,648 | 16,871 |
| Eksperimen | 16,241 | 16,526 | 17,000 |
| % Perubahan Minimum | -0,60 | -0,08 | +0,76 |



Gambar 4.17 Periode Natural Kondisi Tertambat Taut Variasi *Diameter Ratio*
(Analitis included)

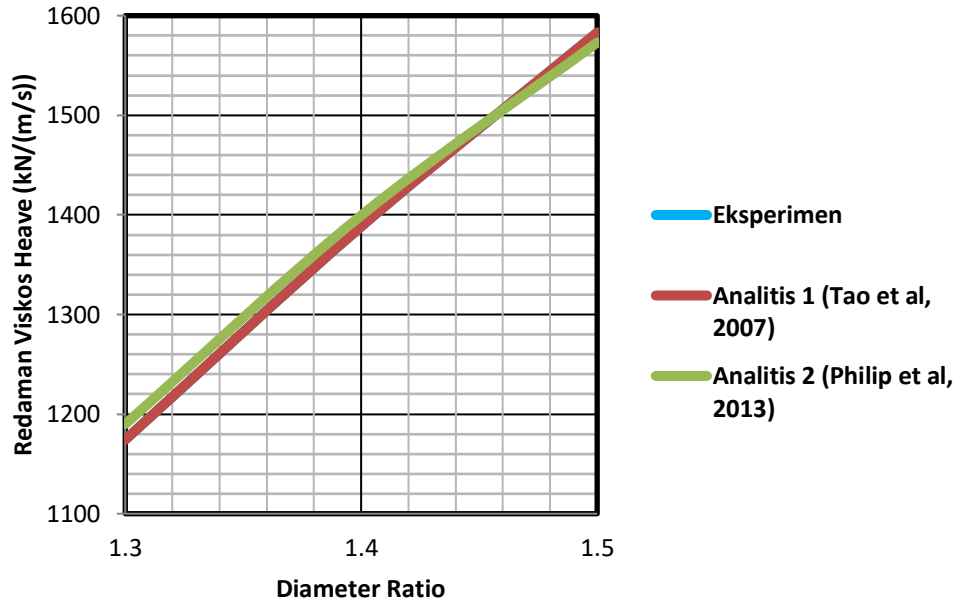
Berdasarkan perbandingan hasil eksperimen dan analitis, didapatkan bahwa nilai persentase perubahan minimum bervariasi antara 0,08 – 0,76 %, dengan nilai tersebut, dapat disimpulkan bahwa parameter periode natural *heave* hasil dari pendekatan analitis dapat mewakili hasil dari pengujian eksperimen, karena berada di bawah 5%

4.5.5 Parameter Redaman Viskos *Heave*

Nilai parameter redaman viskos *heave* hasil model numeris dan kemudian dikomparasikan dengan hasil uji eksperimen ditunjukkan pada **Tabel 4.40**.

Tabel 4.40 Parameter dan Persentase Perubahan Redaman Viskos *Classic* SPAR
Dengan Variasi *Diameter Ratio*

| Karakteristik Redaman Viskos (kN/(m/s)) | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|---|-----------------------|----------|----------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Analitis 1 | 1181,358 | 1389,513 | 1562,145 |
| Analitis 2 | 1190,004 | 1399,436 | 1572,991 |
| Eksperimen | 1174,328 | 1390,810 | 1583,025 |
| % Perubahan Minimum | -0,60% | +0,08% | +0,63% |



Gambar 4.18 Redaman Viskos Kondisi Tertambat Taut Variasi *Diameter Ratio*
(Analitis included)

Berdasarkan perbandingan hasil eksperimen dan analitis, didapatkan bahwa nilai persentase perubahan minimum bervariasi antara 0,08 – 0,63 %, dengan nilai tersebut, dapat disimpulkan bahwa parameter redaman viskos *heave* hasil dari pendekatan analitis dapat mewakili hasil dari pengujian eksperimen, karena berada di bawah 5%

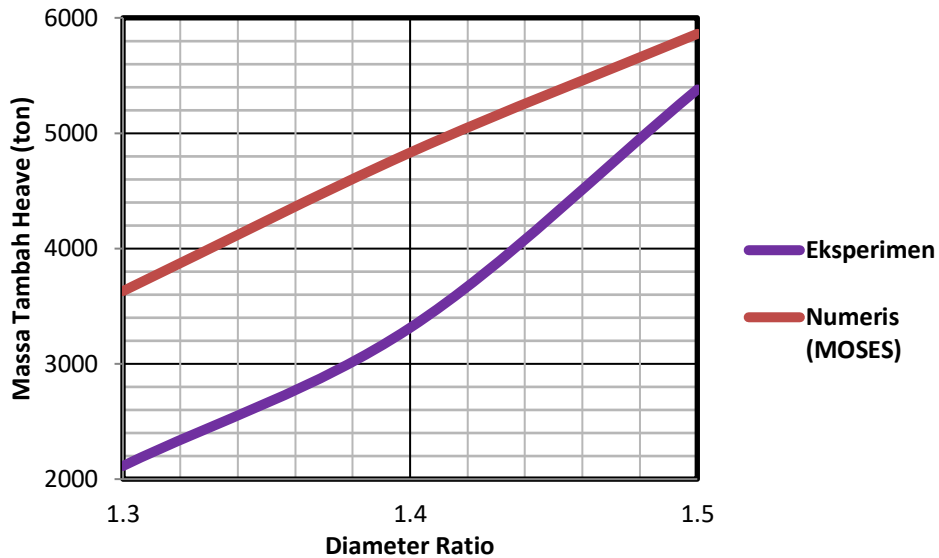
4.6. ANALISIS NUMERIS

4.6.1 Parameter Massa Tambah *Heave*

Nilai parameter massa tambah *heave* model numeris didapatkan dari *running* MOSES pada struktur dengan kondisi *draft* tertambat dan kemudian dikomparasikan dengan hasil uji eksperimen kondisi tertambat taut ditunjukkan pada **Tabel 4.41** dan grafiknya pada **Gambar 4.19**.

Tabel 4.41 Perbandingan Parameter Massa Tambah *Heave*
Pendekatan Numeris dan Eksperimen

| Karakteristik Massa Tambah (ton) | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|-------------------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Numeris (MOSES) | 3630,343 | 4831,595 | 5861,168 |
| Eksperimen | 2114,098 | 3441,603 | 5378,831 |
| % Perubahan | -71,72 | -45,85 | -8,97 |



Gambar 4.19 Perbandingan Massa Tambah Uji Eksperimen dan Numeris Variasi *Diameter Ratio* (Numeris included)

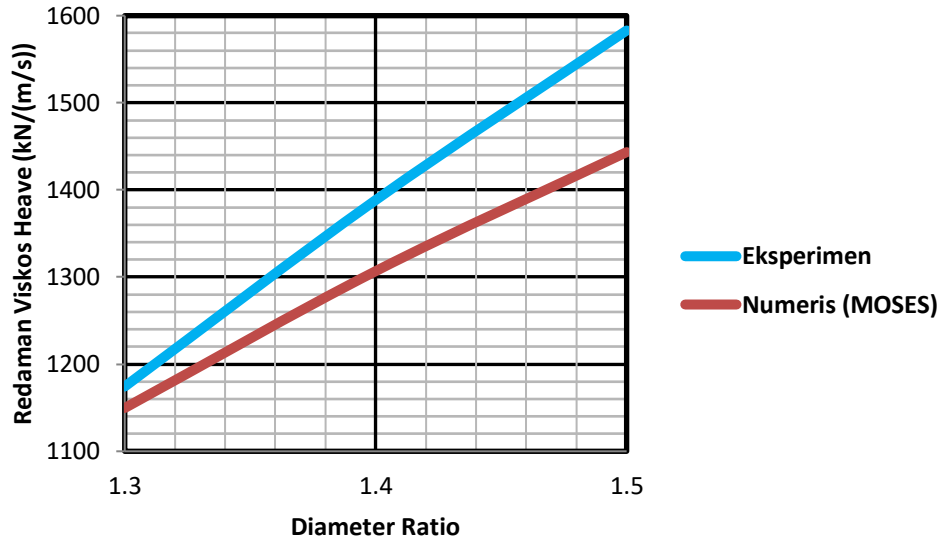
Dengan persentase perbedaan yang bervariasi antara 8,97 – 71,72% dengan massa tambah yang dihasilkan oleh numeris MOSES lebih besar ketimbang hasil eksperimen, maka dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan diameter *heave plate* memperbesar nilai massa tambah struktur.

4.6.2 Parameter Redaman Viskos *Heave*

Nilai parameter redaman viskos *heave* model numeris didapatkan dari *running* MOSES pada struktur dengan kondisi *draft* tertambat dan kemudian dikomparasikan dengan hasil uji eksperimen kondisi tertambat taut ditunjukkan pada **Tabel 4.42** dan grafiknya pada **Gambar 4.20**.

Tabel 4.42 Perbandingan Parameter Redaman Viskos *Heave* Pendekatan Numeris dan Eksperimen

| Karakteristik Redaman Viskos (kN/(m/s)) | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|---|-----------------------|----------|----------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Numeris (MOSES) | 1149,663 | 1306,800 | 1443,374 |
| Eksperimen | 1174,328 | 1390,810 | 1583,025 |
| % Perubahan | 2,10 | 5,87 | 8,82 |



Gambar 4.20 Perbandingan Massa Tambah Uji Eksperimen dan Numeris Variasi *Diameter Ratio* (Numeris included)

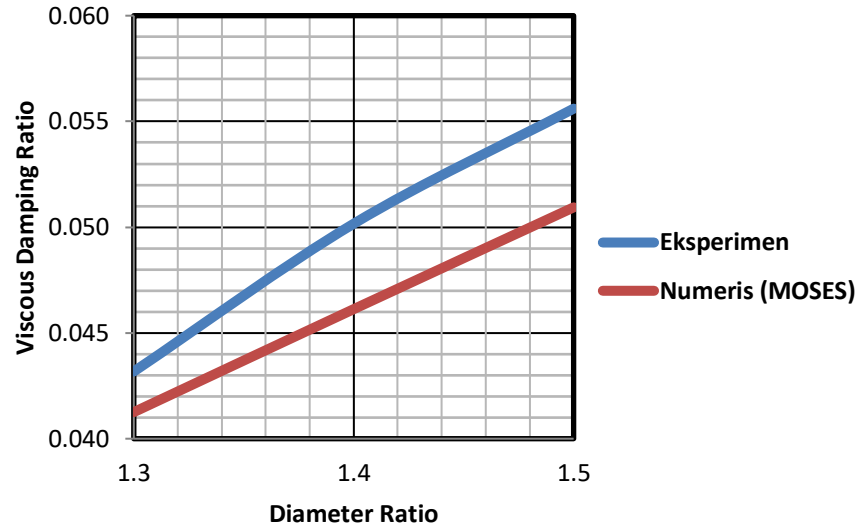
Dengan persentase perbedaan yang bervariasi antara 2,10 – 8,82% dengan redaman viskos yang dihasilkan oleh numeris MOSES lebih kecil ketimbang hasil eksperimen namun trennya selalu meningkat, maka dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan diameter *heave plate* memperbesar nilai redaman viskos struktur.

4.6.3 Parameter *Viscous Damping Ratio*

Nilai parameter *viscous damping ratio* pada arah *heave* model numeris didapatkan dari parameter – parameter massa tambah dan redaman yang didapatkan dari *running* MOSES pada struktur dengan kondisi *draft* tertambat lalu dikalkulasi dengan **Persamaan 2.15** dan kemudian dikomparasikan dengan hasil uji eksperimen kondisi tertambat taut ditunjukkan pada **Tabel 4.43** dan grafiknya pada **Gambar 4.21**.

Tabel 4.43 Perbandingan Parameter *Viscous Damping Ratio Heave* Pendekatan Numeris dan Eksperimen

| Karakteristik Redaman Viskos (kN/(m/s)) | <i>Diameter Ratio</i> | | |
|---|-----------------------|--------|--------|
| | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| Numeris (MOSES) | 0,0413 | 0,0461 | 0,0509 |
| Eksperimen | 0,0432 | 0,0502 | 0,0556 |
| % Perubahan | 4,45 | 8,05 | 8,39 |



Gambar 4.21 Perbandingan *Viscous Damping Ratio* Uji Eksperimen dan Numeris Variasi *Diameter Ratio* (Numeris included)

Dengan persentase perbedaan yang bervariasi antara 4,45 – 8,39% dengan *viscous damping ratio* yang dihasilkan oleh numeris MOSES lebih besar ketimbang hasil eksperimen, maka dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan diameter *heave plate* memperbesar nilai *viscous damping ratio* struktur.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Dalam uji eksperimen kondisi tertambat taut, variasi *diameter ratio* (1.3, 1.4 dan 1.5) atau penambahan diameter *heave plate* relatif terhadap *Classic SPAR*, parameter *heave viscous damping ratio* berturut – turut nilainya sebesar 0,0432, 0,0502 dan 0,0556, kemudian parameter periode natural berturut – turut nilainya sebesar 16,24 sekon, 16,53 sekon, dan 17,00 sekon, kemudian parameter massa tambah berturut – turut nilainya sebesar 2114 ton, 3442 ton, dan 5379 ton, kemudian parameter redaman viskos berturut – turut nilainya sebesar 1174 kN/(m/s), 1391 kN/(m/s), dan 1583 kN/(m/s) serta parameter kekakuan *heave* pada semua variasi *diameter ratio* sebesar 5261 kN/m. Pendekatan dengan studi analitis menunjukkan nilai *viscous damping ratio* berturut – turut nilainya sebesar 0,0428, 0,0506 dan 0,0549, kemudian parameter massa tambah berturut – turut nilainya sebesar 2536 – 3059 ton, 3373 – 3896 ton dan 4370 – 4892 ton, kemudian parameter periode natural berturut – turut nilainya sebesar 16,34 – 16,46 sekon, 16,54 – 16,65 sekon dan 16,78 – 16,87 sekon, kemudian redaman viskos berturut – turut nilainya sebesar 1181 -1190 kN/(m/s), 1390 – 1399 kN/(m/s) dan 1562 – 1573 kN/(m/s). Pendekatan dengan studi numeris menunjukkan nilai *viscous damping ratio* berturut – turut nilainya sebesar 0,0413, 0,0461 dan 0,0509, kemudian parameter massa tambah berturut – turut nilainya sebesar 3630 ton, 4832 ton dan 5861 ton, lalu parameter redaman viskos berturut – turut nilainya sebesar 1150 kN/(m/s), 1307 kN/(m/s) dan 1443 kN/(m/s).
2. Parameter massa tambah merupakan parameter paling signifikan terdampak terhadap variasi *diameter ratio* dengan acuan awal *diameter ratio* 1.3, pada kondisi tertambat taut dimana parameter ini mengalami peningkatan hingga mencapai 154,43% pada kondisi tertambat taut, kemudian disusul parameter redaman viskos yang mengalami peningkatan sebesar 34,80%, lalu parameter *viscous damping ratio* yang meningkat sebesar 28,79% pada kondisi tertambat taut, kemudian parameter periode natural yang mengalami kenaikan 4,67% pada kondisi tertambat taut. Kemudian respon amplitudo struktur juga mengalami perubahan saat fase resonansi terjadi akibat variasi *diameter ratio*, dengan *diameter ratio* 1.3 sebesar 11,581 m/m, *diameter ratio* 1.4 sebesar 9,967 m/m atau reduksi sebesar 16,19%, dan *diameter ratio* 1.5 sebesar 8,992 m/m atau reduksi sebesar 28,79%.

5.2 SARAN

1. Diperlukan analisis uji secara eksperimen struktur *Classic* SPAR dan *heave plate* variasi *diameter ratio* pada kondisi *free floating* untuk mengetahui secara pasti nilai karakteristik – karakteristik yang direncanakan, sehingga dapat divalidasikan dengan pendekatan baik analitis maupun eksperimen.
2. Sebaiknya dilakukan pemodelan secara numeris terlebih dahulu sebelum dilakukan uji eksperimen, agar hasil yang didapat semakin akurat, serta pemodelan yang direncanakan memiliki kesesuaian baik pada model numeris maupun model eksperimen.
3. Perlu adanya alat pengukur berupa *load cell* pada tiap – tiap tali tambat untuk mengukur tegangan yang dialami oleh masing – masing tali tambat selama berosilasi, sehingga dapat dianalisis lebih lanjut mengenai dampak kekakuan tali tambat tersebut terhadap respon struktur saat uji *heave decay*.
4. Perlu ditinjau dinamika pola aliran disekitar permukaan *Classic* SPAR dan *heave plate* serta pengaruhnya terhadap karakteristik tinjauan dengan pemodelan CFD.
5. Perencanaan konfigurasi tali tambat pada bagian *fairlead* dari model eksperimen sebaiknya ditempatkan di posisi di bawah sarat atau mendekati titik *Centre of Gravity* (COG) sehingga struktur lebih stabil saat menerima beban eksternal.

DAFTAR PUSTAKA

- Brennen, C.E. 1982. **A Review Of Added Mass and Fluid Inertial Forces**. Technical Report no. CR 82.010, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme.
- Chakrabarti, S.K. 1994. **Hydrodynamics of Offshore Structures**. Dorchester: Computational Mechanics Publications.
- _____. 1998. Physical Model Testing of Floating Offshore Structures. **Proceedings of Dynamic Positioning Conference: 1 – 32**.
- Chen, S.S., and Chung, H. 1976. **Design Guide For Calculating Hydrodynamic Mass Part 1: Circular Cylindrical Structures**. Components Technology Division, Argonne National Laboratory. Argonne, Illinois.
- Chua, K.H., Clelland, D., and Huang, S., and Sworn, A. 2005. Model Experiments of Hydrodynamic Forces on Heave Plates. **Proceedings of the 24th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering: 1 – 6**.
- Deep Oil Technology Inc. 1995. **SPAR Model Test Joint Industry Project**. California: Deep Oil Technology Inc.
- Djarmiko, E.B. 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak**. Surabaya: ITS Press.
- Faltinsen, O.M. 1990. **Sea Loads on Ships and Offshore Structures**. Cambridge: University of Cambridge
- Garrido-Mendoza, C.A. 2015. **Hydrodynamic Forces on Heave Plates for Offshore Systems Oscillating Close to the Seabed or the Free Surface**. Thesis: School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Technical University of Madrid.
- Ghassemi, H., and Yari, E. 2011. The Added Mass Coefficient Computation of Sphere, Ellipsoid and Marine Propellers Using Boundary Element Method. **Polish Maritime Research** Vol. 18: 17 – 26.
- Günther, C., Eike, L., and Casten, Ö. 1988. **Offshore Structures**. Springer – Verlag, New York, Vol. 1: 132 – 135.
- Haslum, H.A. 2000. **Simplified Methods Applied to Non – Linear Motion of SPAR Platforms**. Thesis: Department of Marine Hydrodynamics, Norwegian University of Science and Technology.
- He, H. 2003. **Hydrodynamics of Thin Plates**. Dissertation: Naval Architecture & Marine Engineering, University of Michigan.
- Holmes, S., Bhat, S., Beynet, P., Sablok, A., and Prislun, I. 2001. Heave Plate Design With

- Computational Fluid Dynamics. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering** Vol. 123: 1 – 19.
- Horoub, M.M. 2016. **Motion of a Floating Cable – Driven Platform**. Dissertation: Mechanical Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals.
- Imlay, F. 1961. **The Complete Expressions For Added Mass Of A Rigid Body Moving In A Ideal Fluid**. Technical Report no. 1528, Hydromechanics Laboratory, David Taylor Model Basin.
- Journee, J.M.J., and Massie, W.W. 2001. **Offshore Hydromechanics**. Delft: TU Delft.
- Konstantinidis, E. 2013. Added Mass Of A Circular Cylinder Oscillating In A Free Stream. **Proceedings of The Royal Society** 469: 1 – 9.
- Koo, B.J. 2003. **Evaluation of the Effect of Contact Between Risers and Guide Frames on Offshore SPAR Platform Motions**. Dissertation: Ocean Engineering, Texas A&M University.
- Kurian, V.J., Ng, C.Y., and Liew, M.S. 2014. Dynamic Responses of Truss SPAR Due to Wave Actions. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**: 1 – 7.
- Lake, M., He, H., Troesch, A.W., Perlin, M., and Thiagarajan, K.P. 2000. Hydrodynamic Coefficient Estimation for TLP and SPAR Structures. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering** Vol. 122: 118 – 124.
- Li, B., Ou, J.P., Teng, B. 2011. Numerical Investigation of Damping Effects on Coupled Heave and Pitch Motion of An Innovative Deep Draft Multi – SPAR. **Journal of Marine Science and Technology** Vol. 19, No.2: 231 – 244.
- Li, J., Liu, S., Zhao, M., Teng, B. 2013. Experimental Investigation of the Hydrodynamic Characteristics of Heave Plates Using Forced Oscillation. **Ocean Engineering** 66: 82 – 91.
- Lu, R.R., Wang, J.J., Erdal, E. 2003. Time Domain Strength and Fatigue Analysis of Truss SPAR Heave Plate. **Proceedings of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference**: 272 – 279.
- Molin, B., Remy, F., and Rippol, T. 2007. Experimental Study of the Heave Added Mass and Damping of Solid and Perforated Disks Close to the Free Surface. **International Congress of International Maritime Association of the Mediterranean**: 1 – 8.
- Montasir, O.A.A., Kurian, V.J., Narayanan, S.P., Mubarak, M.A.W. 2008. Dynamic Response of SPAR Platforms Subjected to Waves and Current. **1st International Conference on Construction and Building Technology (ICCBT)**: 173 – 182.

- Nallayarasu, S., and Mathai, T..P. 2015. Effect of Mathieu Instability on Motion Response of SPAR Hull With Heave Damping Plate. **Journal of Ships and Offshore Structure**, DOI: [10.1080/17445302.2015.1073866](https://doi.org/10.1080/17445302.2015.1073866): 1 – 6.
- Paz, M. 1991. **Structural Dynamics: Theory and Computations**. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Philip, N.T., Nallayarasu, S., and Bhattacharya, S.K. 2012. Damping Characteristic of Heave Plate Attached to SPAR Hull. **Proceedings of the ASME 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**: 1 – 12.
- _____, Nallayarasu, S., and Bhattacharya, S.K.. 2013. Experimental Investigation and CFD Simulation of Heave Damping Effects Due to Circular Plates Attached to SPAR Hull. **Journal of Ships and Offshore Structure**: 1 – 7. DOI: [10.1080/17445302.2013.835146](https://doi.org/10.1080/17445302.2013.835146).
- Prislin, I., Halkyard, J., DeBord Jr., F., Collins, J.I., and Lewis, J.M. 1999. Full – Scale Measurements of the Oryx Neptune Production SPAR Platform Performance. **Offshore Technology Conference (OTC) 10952**: 1 – 9.
- Rao, M.J., Nallayarasu, S., and Bhattacharya, S.K. 2016. Assessment of Nonlinear Heave Damping Model For SPAR With Heave Plate Using Free Decay Tests. **Proceedings of the ASME 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**: 1 – 9.
- Sadeghi, K. 2005. **Classical and Approximate Methods In The Dynamic Response Analysis Of A Truss SPAR In Waves**. Thesis: School of Marine Science and Technology University of Newcastle Upon Tyne.
- Sarpkaya, T. 2010. **Wave Forces on Offshore Structures**. New York. Cambridge University Press.
- Subbulakshmi, A., Jose, J., Sundaravadivelu, R., Selvam, R.P. 2015. Effect of Viscous Damping on Hydrodynamics Response of SPAR with Heave Plate. **International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering Vol.4**: 508 – 515.
- _____ and Sundaravadivelu, R. 2016. Heave Damping of SPAR Platform for Offshore Wind Turbine With Heave Plate. **Ocean Engineering** 121: 24 – 36.
- Sudhakar, S., and *Tao et al*, S. 2013. Hydrodynamics Response of SPAR with Single and Double Heave Plates in Regular Waves. **International Journal of Ocean System Engineering** 3: 188 – 208.
- Sultania, A., and Manuel, L. 2018. Reliability Analysis For a SPAR – Supported Floating

- Offshore Wind Turbine. **Journal of Wind Engineering** Vol. 42, Issues 1: 51 – 65.
- Tao, L., and Cai, S. 2004. Heave Motion Suppression of a SPAR with a Heave Plate. **Journal of Ocean Engineering** Vol.31, Issues 5 – 6: 669 – 692.
- _____ and Dray, D. 2008. Hydrodynamic Performance of Solid and Porous Heave Plate. **Ocean Engineering** 35: 1006 – 1014.
- _____ Molin, B., Scolan, Y.M., and Thiagarajan, K.P. 2007. Spacing Effects on Hydrodynamics of Heave Plates on Offshore Structures. **Journal of Fluids and Structures** 23: 1119 – 1136.
- Thiagarajan, K., Datta, I., Ran, A., Tao, L., and Halkyard, J. 2002. Influence of Heave Plate Geometry on the Heave Response of Classic SPAR. **Proceedings of 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**: 621 – 627.
- Tian, X., Tao, L., Li, X., and Yang, J. 2016. Hydrodynamic Coefficients of Oscillating Flat Plates at $0,15 \leq KC \leq 3,5$. **Journal of Marine Science and Technology** Vol. 22 Issues 1: 101 – 113.
- _____ Yang, J., Li, X., and Peng, T. 2013. Experimental Investigations on the Hydrodynamic Characteristics of Heave Plate. **Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering**: 1 – 7.
- 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** Vol.4, No.12: 184 – 193.
- Vu, K.H., Chenu, B., and Thiagarajan, K.P. 2008. Hydrodynamic Damping Due to Porous Plates. **Proceedings of World Science Engineering Academy Society**: 1 – 5.
- Yang, J., Tian, X., and Li, X. 2014. Hydrodynamic Characteristics of an Oscillating Circular Disk Under Steady In – Plane Current Conditions. **Ocean Engineering** 75: 53 – 63.
- Yoon, H. 2014. **Similarity and Model Testing**. IIHR – Hydroscience & Engineering.
- Yuen, N.Q.S. 1985. **Oscillating Flow About Circular Cylinder At Low Keulegan – Carpenter Numbers**. Thesis: Department of The Navy, Naval Postgraduate School. Monterey, California.
- <https://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-57/issue-4/news/general-interest/neptune-platform-in-gulf-for-oryx-completes-aker39s-floater-line-up.html>
- <https://www.shell.com/about-us/major-projects/perdido.html>
- <https://www.offshore-technology.com/projects/red-hawk/rigzone.com>

BIODATA PENULIS



Brian Ishom Abraar merupakan putra pertama dari Amron Dwi Wiratno dan Palupi yang lahir di Batam, pada tanggal 27 Maret 1997. Pendidikan formal yang penulis tempuh secara berjenjang adalah TK Global Indo – Asia Batam (2001 – 2003), SD Islam Al – Barkah Batam (2003 – 2009), SMP Negeri 5 Yogyakarta (2009 – 2012) dan SMA Negeri 1 Yogyakarta (2012 – 2015). Setelah menempuh pendidikan SMA, penulis diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN pada tahun 2015. Selama dalam proses perkuliahan, Penulis mendapat kesempatan untuk mendapatkan pengalaman baik dalam bidang akademik maupun non – akademik. Di bidang non – akademik, pada tahun 2016, Penulis mendapatkan kesempatan untuk berorganisasi dalam *event* GERIGI ITS, kemudian mengikuti organisasi TMI (Teknokrat Muda ITS) yang berkecimpung di dunia kemahasiswaan dengan segala dinamikanya. Kemudian pada tahun 2017, Penulis mengikuti kepanitiaan *event* OCEANO di bidang lomba *Paper Competition*. Lalu, pada tahun 2018, Penulis turut aktif sebagai kepanitiaan SENTA 2018 yang merupakan konferensi tingkat internasional ke – 3 yang diselenggarakan oleh Fakultas Teknologi Kelautan – ITS dan pada tahun 2019, terlibat dalam kepanitiaan Seminar Nasional hasil kerjasama antara ITS dengan ITB dalam rangka Peringatan 1 Abad ITB. Sedangkan dalam bidang akademik, Penulis berkesempatan untuk menjalani Kerja Praktek di PT. Krakatau Bandar Samudera, anak perusahaan dari PT. Krakatau Steel yang berlokasi di Cilegon, Banten pada pertengahan tahun 2018. Pada tahun terakhir perkuliahan, Penulis menjadi pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK – ITS serta mengambil topik Tugas Akhir mengenai hidro – eksperimen meninjau parameter struktur SPAR dengan penambahan diameter *heave plate* dan pengaruhnya terhadap respon struktur.

Apabila pembaca memiliki pertanyaan berkaitan dengan tema Tugas Akhir ini, Penulis dapat dihubungi pada,

No.HP : +(62)896 8805 3204

Email : brianabraar01@gmail.com



LAMPIRAN A

KALKULASI CENTRE OF GRAVITY DAN RADIUS GIRASI



Centroid of a rectangular plate is at the intersection of the diagonals.

The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.



The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.

The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.



The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.

The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.

The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.

The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.

The distance from the bottom-left corner to the center of gravity is $\frac{1}{2} \sqrt{10^2 + 15^2}$.

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 spring constant constant of the empty oscillation table by attaching to the table a weight M_w 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:

$M_w = 0.653 \text{ kg}$

Position of weight:

$x = 2.690 \text{ m}$

$z = 0.694 \text{ m}$

Measured inclination angle due to weight:

$\phi = 2.723 \text{ deg}$

Spring moment constant $C_y = g \cdot M_w \cdot x / \phi$

$C_y = 259.013 \text{ Nm/rad}$

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

Measured natural period:

$T_n = 3.352 \text{ s}$

Natural frequency:

$\omega_n = 1.874 \text{ rad/s}$

Mass moment of inertia of the table:

$I_y = 76.564 \text{ kg m}^2$

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

Required total mass of model:

$M_m = 76.600 \text{ kg}$

Required radius of gyration of model:

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

Mass moment of inertia of the model:

$I_{ym} = 4.078 \text{ kg m}^2$

Required natural frequency of oscillation table with model:

$\omega_n = 1.827 \text{ rad/s}$

$$\omega_n = (C_y / (I_y + I_{ym}))^{1/2}$$

Required natural period:

$$T_n = 2\pi / \omega_n$$

$T_n = 3.439 \text{ s}$

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

Measured natural period:

$T_n = 3.450 \text{ s}$

Measured natural frequency:

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

Measured mass moment of inertia:

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

Measured radius of gyration:

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

LAMPIRAN B

OUTPUT MOSES KONDISI FREE FLOATING

(Faint, illegible text, likely a table or list of data)

LAMPIRAN C

*** MOSES ***

7 July, 2019

MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE 1.3

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Brian Ishorn Abraar

* Draft = 129.9 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 7.7 Meters *

* Roll Gy. Radius = 68.8 Meters Pitch Gy. Radius = 68.8 Meters Yaw Gy. Radius = 68.8 Meters *

* Heading = 0.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/20 *

*** MOTION RESPONSE OPERATORS ***

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 50.7

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

| ENCOUNTER | | Surge / | | Sway / | | Heave / | | Roll / | | Pitch / | | Yaw / | |
|-------------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Frequency | Period | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. |
| -(Rad/Sec)- | -(Sec)- | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase |
| 0.2094 | 30.00 | 0.817 | 91 | 0.000 | 0 | 1.495 | -16 | 0.000 | 0 | 0.209 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2108 | 29.80 | 0.811 | 91 | 0.000 | 0 | 1.509 | -17 | 0.000 | 0 | 0.209 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2123 | 29.60 | 0.805 | 91 | 0.000 | 0 | 1.524 | -18 | 0.000 | 0 | 0.208 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2137 | 29.40 | 0.800 | 91 | 0.000 | 0 | 1.539 | -19 | 0.000 | 0 | 0.207 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2152 | 29.20 | 0.794 | 91 | 0.000 | 0 | 1.554 | -20 | 0.000 | 0 | 0.207 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2167 | 29.00 | 0.788 | 91 | 0.000 | 0 | 1.569 | -21 | 0.000 | 0 | 0.206 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2182 | 28.80 | 0.782 | 91 | 0.000 | 0 | 1.584 | -22 | 0.000 | 0 | 0.206 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2197 | 28.60 | 0.777 | 91 | 0.000 | 0 | 1.599 | -24 | 0.000 | 0 | 0.205 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2212 | 28.40 | 0.771 | 91 | 0.000 | 0 | 1.614 | -25 | 0.000 | 0 | 0.205 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2228 | 28.20 | 0.765 | 91 | 0.000 | 0 | 1.629 | -26 | 0.000 | 0 | 0.204 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2244 | 28.00 | 0.759 | 91 | 0.000 | 0 | 1.643 | -28 | 0.000 | 0 | 0.204 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2260 | 27.80 | 0.753 | 91 | 0.000 | 0 | 1.657 | -30 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2277 | 27.60 | 0.747 | 91 | 0.000 | 0 | 1.671 | -31 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|----|-------|---|-------|------|-------|---|-------|----|-------|---|
| 0.2292 | 27.40 | 0.741 | 91 | 0.000 | 0 | 1.683 | -33 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2310 | 27.20 | 0.736 | 91 | 0.000 | 0 | 1.694 | -35 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2327 | 27.00 | 0.729 | 91 | 0.000 | 0 | 1.704 | -37 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2344 | 26.80 | 0.723 | 91 | 0.000 | 0 | 1.712 | -39 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2362 | 26.60 | 0.718 | 91 | 0.000 | 0 | 1.719 | -42 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2380 | 26.40 | 0.712 | 91 | 0.000 | 0 | 1.724 | -44 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2398 | 26.20 | 0.707 | 91 | 0.000 | 0 | 1.726 | -47 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2417 | 26.00 | 0.701 | 91 | 0.000 | 0 | 1.726 | -49 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2435 | 25.80 | 0.695 | 91 | 0.000 | 0 | 1.724 | -52 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2454 | 25.60 | 0.689 | 91 | 0.000 | 0 | 1.719 | -55 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2474 | 25.40 | 0.683 | 91 | 0.000 | 0 | 1.710 | -58 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2493 | 25.20 | 0.677 | 91 | 0.000 | 0 | 1.699 | -61 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2513 | 25.00 | 0.672 | 91 | 0.000 | 0 | 1.684 | -65 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2534 | 24.80 | 0.666 | 92 | 0.000 | 0 | 1.665 | -68 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2554 | 24.60 | 0.660 | 92 | 0.000 | 0 | 1.643 | -72 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2575 | 24.40 | 0.654 | 92 | 0.000 | 0 | 1.617 | -75 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2596 | 24.20 | 0.649 | 92 | 0.000 | 0 | 1.587 | -79 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2618 | 24.00 | 0.644 | 92 | 0.000 | 0 | 1.552 | -83 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2640 | 23.80 | 0.638 | 92 | 0.000 | 0 | 1.514 | -87 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2662 | 23.60 | 0.632 | 92 | 0.000 | 0 | 1.471 | -91 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2685 | 23.40 | 0.627 | 92 | 0.000 | 0 | 1.425 | -96 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2708 | 23.20 | 0.622 | 92 | 0.000 | 0 | 1.375 | -100 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2732 | 23.00 | 0.616 | 92 | 0.000 | 0 | 1.321 | -104 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2756 | 22.80 | 0.607 | 92 | 0.000 | 0 | 1.263 | -109 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2780 | 22.60 | 0.605 | 92 | 0.000 | 0 | 1.211 | -113 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2805 | 22.40 | 0.600 | 92 | 0.000 | 0 | 1.150 | -117 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2830 | 22.20 | 0.595 | 92 | 0.000 | 0 | 1.087 | -121 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2856 | 22.00 | 0.589 | 92 | 0.000 | 0 | 1.022 | -126 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2882 | 21.80 | 0.584 | 92 | 0.000 | 0 | 0.957 | -130 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2909 | 21.60 | 0.579 | 92 | 0.000 | 0 | 0.892 | -134 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2936 | 21.40 | 0.574 | 92 | 0.000 | 0 | 0.829 | -138 | 0.000 | 0 | 0.204 | 90 | 0.000 | 0 |

*** MOSES ***

7 July, 2019

MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE 1.3
OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Nur Muhammad Hanif
Draft = 129.9 Meters Trim Angle = 0.00 Deg.

*** ADDED INERTIA COEFFICIENTS FOR SPAR ***

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 56.7

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

| Encounter Period Sec. | Values Normalized By Mass with Weight = 317695.5 | | | | | |
|-----------------------------|--|-------------------------|---------|--------|-------------------------|-------|
| | Added Mass Coefficients | Added Mass Coefficients | | | Added Radii of Gyration | |
| | -Surge- | -Sway- | -Heave- | -Roll- | -Pitch- | -Yaw- |
| 30.00 | 0.9919 | 0.9919 | 0.1286 | 36.629 | 36.629 | 0.000 |
| 29.80 | 0.9920 | 0.9920 | 0.1286 | 36.632 | 36.632 | 0.000 |
| 29.60 | 0.9922 | 0.9922 | 0.1285 | 36.635 | 36.636 | 0.000 |
| 29.40 | 0.9923 | 0.9923 | 0.1285 | 36.639 | 36.639 | 0.000 |
| 29.20 | 0.9924 | 0.9924 | 0.1284 | 36.643 | 36.643 | 0.000 |
| 29.00 | 0.9926 | 0.9926 | 0.1284 | 36.647 | 36.647 | 0.000 |
| 28.80 | 0.9927 | 0.9927 | 0.1283 | 36.651 | 36.651 | 0.000 |
| 28.60 | 0.9929 | 0.9929 | 0.1283 | 36.655 | 36.655 | 0.000 |
| 28.40 | 0.9930 | 0.9930 | 0.1282 | 36.659 | 36.659 | 0.000 |
| 28.20 | 0.9932 | 0.9932 | 0.1282 | 36.663 | 36.663 | 0.000 |
| 28.00 | 0.9933 | 0.9933 | 0.1281 | 36.668 | 36.668 | 0.000 |

| | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 27.00 | 0.9935 | 0.9935 | 0.1281 | 36.672 | 36.672 | 0.000 |
| 27.60 | 0.9937 | 0.9937 | 0.1281 | 36.677 | 36.677 | 0.000 |
| 27.40 | 0.9938 | 0.9938 | 0.1280 | 36.682 | 36.682 | 0.000 |
| 27.20 | 0.9940 | 0.9940 | 0.1280 | 36.687 | 36.687 | 0.000 |
| 27.00 | 0.9942 | 0.9942 | 0.1279 | 36.692 | 36.692 | 0.000 |
| 26.80 | 0.9944 | 0.9944 | 0.1279 | 36.697 | 36.697 | 0.000 |
| 26.60 | 0.9946 | 0.9946 | 0.1278 | 36.703 | 36.703 | 0.000 |
| 26.40 | 0.9948 | 0.9948 | 0.1278 | 36.709 | 36.709 | 0.000 |
| 26.20 | 0.9950 | 0.9950 | 0.1277 | 36.714 | 36.715 | 0.000 |
| 26.00 | 0.9952 | 0.9952 | 0.1277 | 36.721 | 36.721 | 0.000 |
| 25.80 | 0.9954 | 0.9954 | 0.1276 | 36.727 | 36.727 | 0.000 |
| 25.60 | 0.9956 | 0.9956 | 0.1276 | 36.733 | 36.733 | 0.000 |
| 25.40 | 0.9959 | 0.9958 | 0.1275 | 36.740 | 36.740 | 0.000 |
| 25.20 | 0.9961 | 0.9961 | 0.1274 | 36.747 | 36.747 | 0.000 |
| 25.00 | 0.9963 | 0.9963 | 0.1274 | 36.754 | 36.754 | 0.000 |
| 24.80 | 0.9966 | 0.9966 | 0.1273 | 36.761 | 36.761 | 0.000 |
| 24.60 | 0.9968 | 0.9968 | 0.1272 | 36.768 | 36.768 | 0.000 |
| 24.40 | 0.9970 | 0.9970 | 0.1271 | 36.776 | 36.776 | 0.000 |
| 24.20 | 0.9969 | 0.9969 | 0.1273 | 36.792 | 36.792 | 0.000 |
| 24.00 | 0.9968 | 0.9968 | 0.1275 | 36.802 | 36.802 | 0.000 |
| 23.80 | 0.9968 | 0.9968 | 0.1278 | 36.812 | 36.817 | 0.000 |
| 23.60 | 0.9956 | 0.9956 | 0.1280 | 36.763 | 36.764 | 0.000 |
| 23.40 | 0.9949 | 0.9949 | 0.1283 | 36.746 | 36.746 | 0.000 |
| 23.20 | 0.9944 | 0.9944 | 0.1283 | 36.721 | 36.721 | 0.000 |
| 23.00 | 0.9969 | 0.9969 | 0.1282 | 36.831 | 36.831 | 0.000 |
| 22.80 | 0.9938 | 0.9938 | 0.1280 | 36.915 | 36.915 | 0.000 |
| 22.60 | 0.9928 | 0.9928 | 0.1260 | 37.010 | 37.010 | 0.000 |
| 22.40 | 0.9468 | 0.9468 | 0.1257 | 36.857 | 36.857 | 0.000 |
| 22.20 | 0.9208 | 0.9208 | 0.1255 | 36.850 | 36.850 | 0.000 |
| 22.00 | 0.8958 | 0.8958 | 0.1255 | 36.764 | 36.764 | 0.000 |
| 21.80 | 0.8752 | 0.8752 | 0.1255 | 36.767 | 36.767 | 0.000 |
| 21.60 | 0.8848 | 0.8848 | 0.1253 | 36.830 | 36.830 | 0.000 |
| 21.40 | 0.8602 | 0.8602 | 0.1251 | 36.750 | 36.750 | 0.000 |

*** MOSES ***

7 July, 2019

MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE 1.4

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Brian Ishom Abraar

* Draft = 129.9 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 7.7 Meters *

* Roll Gy. Radius = 68.8 Meters Pitch Gy. Radius = 68.8 Meters Yaw Gy. Radius = 68.8 Meters *

* Heading = 0.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/20 *

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS +++

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 56.6

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

| ENCOUNTER | Surge / | Sway / | Heave / | Roll / | Pitch / | Yaw / | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|-------|---|-------|----|-------|---|
| Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | | | | | | | |
| Frequency | Period | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | | | | | | |
| (Rad/Sec) | (Sec) | | | | | | | | | | | | |
| 0.2094 | 30.00 | 0.816 | 91 | 0.000 | 0 | 1.492 | -21 | 0.000 | 0 | 0.209 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2108 | 29.80 | 0.810 | 91 | 0.000 | 0 | 1.503 | 23 | 0.000 | 0 | 0.208 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2123 | 29.60 | 0.804 | 91 | 0.000 | 0 | 1.513 | -24 | 0.000 | 0 | 0.208 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2137 | 29.40 | 0.799 | 91 | 0.000 | 0 | 1.524 | -25 | 0.000 | 0 | 0.207 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2152 | 29.20 | 0.793 | 91 | 0.000 | 0 | 1.534 | -26 | 0.000 | 0 | 0.207 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2167 | 29.00 | 0.787 | 91 | 0.000 | 0 | 1.544 | -27 | 0.000 | 0 | 0.206 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2182 | 28.80 | 0.781 | 91 | 0.000 | 0 | 1.554 | -29 | 0.000 | 0 | 0.205 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2197 | 28.60 | 0.775 | 91 | 0.000 | 0 | 1.563 | -30 | 0.000 | 0 | 0.205 | 92 | 0.000 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|----|-------|---|-------|------|-------|---|-------|----|-------|---|
| 0.2212 | 28.40 | 0.770 | 91 | 0.000 | 0 | 1.571 | -32 | 0.000 | 0 | 0.204 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2228 | 28.20 | 0.764 | 91 | 0.000 | 0 | 1.579 | -33 | 0.000 | 0 | 0.204 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2244 | 28.00 | 0.757 | 91 | 0.000 | 0 | 1.586 | -35 | 0.000 | 0 | 0.203 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2260 | 27.80 | 0.751 | 91 | 0.000 | 0 | 1.591 | -37 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2277 | 27.60 | 0.747 | 91 | 0.000 | 0 | 1.595 | -39 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2293 | 27.40 | 0.741 | 91 | 0.000 | 0 | 1.599 | -41 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2310 | 27.20 | 0.736 | 91 | 0.000 | 0 | 1.601 | -43 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2327 | 27.00 | 0.730 | 91 | 0.000 | 0 | 1.601 | -45 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2344 | 26.80 | 0.724 | 91 | 0.000 | 0 | 1.600 | -47 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2362 | 26.60 | 0.718 | 91 | 0.000 | 0 | 1.596 | -50 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2380 | 26.40 | 0.713 | 91 | 0.000 | 0 | 1.591 | -52 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2398 | 26.20 | 0.707 | 91 | 0.000 | 0 | 1.584 | -55 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2417 | 26.00 | 0.701 | 91 | 0.000 | 0 | 1.574 | -57 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2435 | 25.80 | 0.695 | 91 | 0.000 | 0 | 1.562 | -60 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2454 | 25.60 | 0.690 | 91 | 0.000 | 0 | 1.548 | -63 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2474 | 25.40 | 0.684 | 91 | 0.000 | 0 | 1.531 | -66 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2493 | 25.20 | 0.678 | 91 | 0.000 | 0 | 1.512 | -69 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2513 | 25.00 | 0.672 | 91 | 0.000 | 0 | 1.488 | -72 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2534 | 24.80 | 0.667 | 92 | 0.000 | 0 | 1.462 | -75 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2554 | 24.60 | 0.661 | 92 | 0.000 | 0 | 1.434 | -79 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2575 | 24.40 | 0.656 | 92 | 0.000 | 0 | 1.401 | -82 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2596 | 24.20 | 0.650 | 92 | 0.000 | 0 | 1.365 | -86 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2618 | 24.00 | 0.645 | 92 | 0.000 | 0 | 1.329 | -90 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2640 | 23.80 | 0.640 | 92 | 0.000 | 0 | 1.288 | -93 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2662 | 23.60 | 0.634 | 92 | 0.000 | 0 | 1.244 | -97 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2685 | 23.40 | 0.629 | 92 | 0.000 | 0 | 1.199 | -101 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2708 | 23.20 | 0.623 | 92 | 0.000 | 0 | 1.150 | -105 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2732 | 23.00 | 0.618 | 92 | 0.000 | 0 | 1.098 | -109 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2756 | 22.80 | 0.613 | 92 | 0.000 | 0 | 1.049 | -113 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2780 | 22.60 | 0.608 | 92 | 0.000 | 0 | 1.003 | -117 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2805 | 22.40 | 0.602 | 92 | 0.000 | 0 | 0.959 | -120 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2830 | 22.20 | 0.597 | 92 | 0.000 | 0 | 0.905 | -124 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2856 | 22.00 | 0.591 | 92 | 0.000 | 0 | 0.849 | -128 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|----|-------|---|-------|------|-------|---|-------|----|-------|---|
| 0.2882 | 21.80 | 0.586 | 92 | 0.000 | 0 | 0.795 | -132 | 0.000 | 0 | 0.204 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2909 | 21.60 | 0.581 | 92 | 0.000 | 0 | 0.742 | -135 | 0.000 | 0 | 0.204 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2936 | 21.40 | 0.575 | 92 | 0.000 | 0 | 0.689 | -139 | 0.000 | 0 | 0.204 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2964 | 21.20 | 0.636 | 81 | 0.000 | 0 | 0.673 | -148 | 0.000 | 0 | 0.210 | 87 | 0.000 | 0 |
| 0.2992 | 21.00 | 0.621 | 82 | 0.000 | 0 | 0.612 | -151 | 0.000 | 0 | 0.210 | 87 | 0.000 | 0 |
| 0.3021 | 20.80 | 0.609 | 83 | 0.000 | 0 | 0.559 | -153 | 0.000 | 0 | 0.209 | 88 | 0.000 | 0 |
| 0.3050 | 20.60 | 0.555 | 92 | 0.000 | 0 | 0.494 | -150 | 0.000 | 0 | 0.205 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.3080 | 20.40 | 0.549 | 92 | 0.000 | 0 | 0.454 | -153 | 0.000 | 0 | 0.206 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.3110 | 20.20 | 0.544 | 92 | 0.000 | 0 | 0.417 | -155 | 0.000 | 0 | 0.206 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.3142 | 20.00 | 0.539 | 92 | 0.000 | 0 | 0.383 | -157 | 0.000 | 0 | 0.206 | 90 | 0.000 | 0 |

*** MOSES ***

7 July, 2019

MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE 1.4
OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Gilrandi Adi Negoro
Draft = 129.9 Meters Trim Angle = 0.00 Deg.

+++ ADDED INERTIA COEFFICIENTS FOR SPAR +++

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 56.6

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

| Encounter Period Sec. | Values Normalized By Mass with Weight = 318107.0 | | | Added Radii of Gyration | | |
|-----------------------------|--|--------|---------|-------------------------|---------|-------|
| | -Surge- | -Sway- | -Heave- | -Roll- | -Pitch- | -Yaw- |
| 30.00 | 0.9898 | 0.9898 | 0.1740 | 36.548 | 36.548 | 0.000 |
| 29.80 | 0.9899 | 0.9899 | 0.1740 | 36.551 | 36.552 | 0.000 |
| 29.60 | 0.9900 | 0.9900 | 0.1739 | 36.555 | 36.555 | 0.000 |
| 29.40 | 0.9902 | 0.9902 | 0.1738 | 36.559 | 36.559 | 0.000 |
| 29.20 | 0.9903 | 0.9903 | 0.1738 | 36.562 | 36.563 | 0.000 |
| 29.00 | 0.9904 | 0.9904 | 0.1737 | 36.566 | 36.566 | 0.000 |
| 28.80 | 0.9906 | 0.9906 | 0.1737 | 36.570 | 36.570 | 0.000 |
| 28.60 | 0.9907 | 0.9907 | 0.1736 | 36.574 | 36.574 | 0.000 |
| 28.40 | 0.9909 | 0.9909 | 0.1735 | 36.578 | 36.579 | 0.000 |
| 28.20 | 0.9910 | 0.9910 | 0.1735 | 36.583 | 36.583 | 0.000 |
| 28.00 | 0.9912 | 0.9912 | 0.1734 | 36.587 | 36.588 | 0.000 |

| | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 27.80 | 0.9914 | 0.9914 | 0.1734 | 36.592 | 36.592 | 0.000 |
| 27.60 | 0.9915 | 0.9915 | 0.1733 | 36.596 | 36.597 | 0.000 |
| 27.40 | 0.9917 | 0.9917 | 0.1732 | 36.601 | 36.602 | 0.000 |
| 27.20 | 0.9919 | 0.9919 | 0.1731 | 36.606 | 36.607 | 0.000 |
| 27.00 | 0.9921 | 0.9921 | 0.1731 | 36.612 | 36.612 | 0.000 |
| 26.80 | 0.9922 | 0.9922 | 0.1730 | 36.617 | 36.617 | 0.000 |
| 26.60 | 0.9924 | 0.9924 | 0.1729 | 36.623 | 36.623 | 0.000 |
| 26.40 | 0.9926 | 0.9926 | 0.1729 | 36.628 | 36.629 | 0.000 |
| 26.20 | 0.9928 | 0.9928 | 0.1728 | 36.634 | 36.634 | 0.000 |
| 26.00 | 0.9930 | 0.9930 | 0.1727 | 36.640 | 36.640 | 0.000 |
| 25.80 | 0.9933 | 0.9932 | 0.1726 | 36.646 | 36.647 | 0.000 |
| 25.60 | 0.9935 | 0.9935 | 0.1726 | 36.653 | 36.653 | 0.000 |
| 25.40 | 0.9937 | 0.9937 | 0.1725 | 36.660 | 36.660 | 0.000 |
| 25.20 | 0.9939 | 0.9939 | 0.1720 | 36.666 | 36.666 | 0.000 |
| 25.00 | 0.9941 | 0.9941 | 0.1729 | 36.673 | 36.673 | 0.000 |
| 24.80 | 0.9939 | 0.9939 | 0.1732 | 36.689 | 36.689 | 0.000 |
| 24.60 | 0.9939 | 0.9939 | 0.1735 | 36.702 | 36.703 | 0.000 |
| 24.40 | 0.9938 | 0.9938 | 0.1742 | 36.713 | 36.713 | 0.000 |
| 24.20 | 0.9939 | 0.9939 | 0.1752 | 36.712 | 36.712 | 0.000 |
| 24.00 | 0.9933 | 0.9933 | 0.1747 | 36.699 | 36.699 | 0.000 |
| 23.80 | 0.9903 | 0.9903 | 0.1748 | 36.565 | 36.565 | 0.000 |
| 23.60 | 0.9917 | 0.9917 | 0.1756 | 36.632 | 36.632 | 0.000 |
| 23.40 | 0.9950 | 0.9950 | 0.1754 | 36.773 | 36.773 | 0.000 |
| 23.20 | 0.9960 | 0.9960 | 0.1753 | 36.814 | 36.814 | 0.000 |
| 23.00 | 0.9961 | 0.9961 | 0.1763 | 36.823 | 36.823 | 0.000 |
| 22.80 | 0.9941 | 0.9941 | 0.1750 | 36.960 | 36.961 | 0.000 |
| 22.60 | 0.9907 | 0.9907 | 0.1719 | 36.952 | 36.952 | 0.000 |
| 22.40 | 0.9468 | 0.9468 | 0.1677 | 36.884 | 36.885 | 0.000 |
| 22.20 | 0.9189 | 0.9189 | 0.1672 | 36.794 | 36.794 | 0.000 |
| 22.00 | 0.8939 | 0.8939 | 0.1675 | 36.708 | 36.708 | 0.000 |
| 21.80 | 0.8740 | 0.8740 | 0.1671 | 36.733 | 36.733 | 0.000 |
| 21.60 | 0.8830 | 0.8830 | 0.1668 | 36.773 | 36.773 | 0.000 |
| 21.40 | 0.8577 | 0.8577 | 0.1669 | 36.663 | 36.663 | 0.000 |

*** MOSES ***

7 July, 2019

* MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE 1.5 *
* OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Brian Ishom Abraar *
* Draft = 129.9 Meters Trim Angle = 0.00 Deg. GMT = 7.7 Meters *
* Roll Gy. Radius = 68.8 Meters Pitch Gy. Radius = 68.8 Meters Yaw Gy. Radius = 68.8 Meters *
* Heading = 0.00 Deg. Forward Speed = 0.00 Knots Linearization Based on 1/ 20 *

+++ MOTION RESPONSE OPERATORS +++

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 56.5

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

| ENCOUNTER | Surge / | | Sway / | | Heave / | | Roll / | | Pitch / | | Yaw / | | |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | Wave Ampl. | |
| Frequency | Period | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase | Ampl. | Phase |
| -(Rad/Sec)- | -(Sec)- | | | | | | | | | | | | |
| 0.2094 | 30.00 | 0.815 | 91 | 0.000 | 0 | 1.459 | -26 | 0.000 | 0 | 0.209 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2108 | 29.80 | 0.809 | 91 | 0.000 | 0 | 1.465 | -27 | 0.000 | 0 | 0.208 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2123 | 29.60 | 0.803 | 91 | 0.000 | 0 | 1.472 | -28 | 0.000 | 0 | 0.207 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2137 | 29.40 | 0.798 | 91 | 0.000 | 0 | 1.478 | -29 | 0.000 | 0 | 0.207 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2152 | 29.20 | 0.792 | 91 | 0.000 | 0 | 1.484 | -31 | 0.000 | 0 | 0.206 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2167 | 29.00 | 0.786 | 91 | 0.000 | 0 | 1.489 | -32 | 0.000 | 0 | 0.206 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2182 | 28.80 | 0.780 | 91 | 0.000 | 0 | 1.493 | -34 | 0.000 | 0 | 0.205 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2197 | 28.60 | 0.774 | 91 | 0.000 | 0 | 1.497 | -35 | 0.000 | 0 | 0.204 | 92 | 0.000 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|----|-------|---|-------|------|-------|---|-------|----|-------|---|
| 0.2212 | 28.00 | 0.769 | 91 | 0.000 | 0 | 1.499 | -37 | 0.000 | 0 | 0.204 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2228 | 28.20 | 0.764 | 91 | 0.000 | 0 | 1.501 | -38 | 0.000 | 0 | 0.204 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2244 | 28.00 | 0.758 | 91 | 0.000 | 0 | 1.502 | -40 | 0.000 | 0 | 0.203 | 92 | 0.000 | 0 |
| 0.2260 | 27.80 | 0.753 | 91 | 0.000 | 0 | 1.502 | -42 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2277 | 27.60 | 0.747 | 91 | 0.000 | 0 | 1.501 | -44 | 0.000 | 0 | 0.203 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2293 | 27.40 | 0.742 | 91 | 0.000 | 0 | 1.498 | -46 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2310 | 27.20 | 0.736 | 91 | 0.000 | 0 | 1.494 | -48 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2327 | 27.00 | 0.730 | 91 | 0.000 | 0 | 1.488 | -50 | 0.000 | 0 | 0.202 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2344 | 26.80 | 0.724 | 91 | 0.000 | 0 | 1.481 | -52 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2362 | 26.60 | 0.719 | 91 | 0.000 | 0 | 1.473 | -54 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2380 | 26.40 | 0.713 | 91 | 0.000 | 0 | 1.462 | -57 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2398 | 26.20 | 0.707 | 91 | 0.000 | 0 | 1.450 | -59 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2417 | 26.00 | 0.702 | 91 | 0.000 | 0 | 1.436 | -62 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2435 | 25.80 | 0.696 | 91 | 0.000 | 0 | 1.419 | -64 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2454 | 25.60 | 0.690 | 91 | 0.000 | 0 | 1.399 | -67 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2474 | 25.40 | 0.685 | 91 | 0.000 | 0 | 1.378 | -70 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2493 | 25.20 | 0.679 | 91 | 0.000 | 0 | 1.354 | -73 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2513 | 25.00 | 0.674 | 91 | 0.000 | 0 | 1.329 | -76 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2534 | 24.80 | 0.668 | 91 | 0.000 | 0 | 1.300 | -79 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2554 | 24.60 | 0.663 | 92 | 0.000 | 0 | 1.271 | -83 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2575 | 24.40 | 0.657 | 92 | 0.000 | 0 | 1.236 | -86 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2596 | 24.20 | 0.652 | 92 | 0.000 | 0 | 1.201 | -89 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2618 | 24.00 | 0.646 | 92 | 0.000 | 0 | 1.166 | -93 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2640 | 23.80 | 0.641 | 92 | 0.000 | 0 | 1.125 | -96 | 0.000 | 0 | 0.201 | 91 | 0.000 | 0 |
| 0.2662 | 23.60 | 0.636 | 92 | 0.000 | 0 | 1.083 | -100 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2685 | 23.40 | 0.630 | 92 | 0.000 | 0 | 1.041 | -104 | 0.000 | 0 | 0.201 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2708 | 23.20 | 0.625 | 92 | 0.000 | 0 | 0.998 | -107 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2732 | 23.00 | 0.620 | 92 | 0.000 | 0 | 0.947 | -111 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2756 | 22.80 | 0.614 | 92 | 0.000 | 0 | 0.908 | -114 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2780 | 22.60 | 0.609 | 92 | 0.000 | 0 | 0.871 | -117 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2805 | 22.40 | 0.603 | 92 | 0.000 | 0 | 0.835 | -120 | 0.000 | 0 | 0.202 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2830 | 22.20 | 0.598 | 92 | 0.000 | 0 | 0.799 | -123 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |
| 0.2856 | 22.00 | 0.592 | 92 | 0.000 | 0 | 0.750 | -127 | 0.000 | 0 | 0.203 | 90 | 0.000 | 0 |

*** MOSES *** 7 July, 2019

* **MODELLING & RAO ANALYSIS OF SPAR WITH HEAVE PLATE 1.5** *

* **OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT ITS - FINAL PROJECT | by Gilrandi Adi Negara** *

* **Draft = 129.9 Meters Trim Angle = 0.00 Deg.** *

=====
+++ ADDED INERTIA COEFFICIENTS FOR SPAR +++
 =====

Results are in Body System

Of Point On Body SPAR At X = 0.0 Y = -0.0 Z = 56.5

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

| Encounter Period Sec. | Values Normalized By Mass with Weight = 310548.8 | | | | | |
|-----------------------------|--|--------|------------------|-----------------|------------------------------------|---------------|
| | --- Added Mass Coefficients ---/ -Surge- | -Sway- | ----/ -Heave- | /---- -Roll- | Added Radii of Gyration -Pitch- | ---/ -Yaw- |
| 30.00 | 0.9919 | 0.9919 | 0.2057 | 36.722 | 36.724 | 0.000 |
| 29.80 | 0.9921 | 0.9920 | 0.2056 | 36.725 | 36.727 | 0.000 |
| 29.60 | 0.9922 | 0.9922 | 0.2056 | 36.729 | 36.731 | 0.000 |
| 29.40 | 0.9923 | 0.9923 | 0.2055 | 36.732 | 36.734 | 0.000 |
| 29.20 | 0.9924 | 0.9924 | 0.2055 | 36.736 | 36.738 | 0.000 |
| 29.00 | 0.9926 | 0.9926 | 0.2054 | 36.740 | 36.742 | 0.000 |
| 28.80 | 0.9927 | 0.9927 | 0.2053 | 36.744 | 36.746 | 0.000 |
| 28.60 | 0.9929 | 0.9928 | 0.2053 | 36.748 | 36.750 | 0.000 |
| 28.40 | 0.9930 | 0.9930 | 0.2052 | 36.752 | 36.754 | 0.000 |
| 28.20 | 0.9932 | 0.9932 | 0.2051 | 36.756 | 36.758 | 0.000 |
| 28.00 | 0.9933 | 0.9933 | 0.2051 | 36.761 | 36.763 | 0.000 |

| | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 27.80 | 0.9935 | 0.9935 | 0.2050 | 36.766 | 36.767 | 0.000 |
| 27.60 | 0.9937 | 0.9936 | 0.2049 | 36.770 | 36.772 | 0.000 |
| 27.40 | 0.9938 | 0.9938 | 0.2049 | 36.775 | 36.777 | 0.000 |
| 27.20 | 0.9940 | 0.9940 | 0.2048 | 36.780 | 36.782 | 0.000 |
| 27.00 | 0.9942 | 0.9942 | 0.2047 | 36.785 | 36.787 | 0.000 |
| 26.80 | 0.9944 | 0.9944 | 0.2047 | 36.791 | 36.793 | 0.000 |
| 26.60 | 0.9946 | 0.9945 | 0.2046 | 36.796 | 36.798 | 0.000 |
| 26.40 | 0.9948 | 0.9948 | 0.2046 | 36.802 | 36.804 | 0.000 |
| 26.20 | 0.9950 | 0.9950 | 0.2045 | 36.808 | 36.810 | 0.000 |
| 26.00 | 0.9952 | 0.9952 | 0.2039 | 36.814 | 36.816 | 0.000 |
| 25.80 | 0.9954 | 0.9954 | 0.2048 | 36.820 | 36.822 | 0.000 |
| 25.60 | 0.9956 | 0.9956 | 0.2064 | 36.825 | 36.827 | 0.000 |
| 25.40 | 0.9954 | 0.9953 | 0.2064 | 36.844 | 36.846 | 0.000 |
| 25.20 | 0.9953 | 0.9953 | 0.2074 | 36.859 | 36.861 | 0.000 |
| 25.00 | 0.9953 | 0.9953 | 0.2073 | 36.873 | 36.875 | 0.000 |
| 24.80 | 0.9955 | 0.9955 | 0.2090 | 36.880 | 36.881 | 0.000 |
| 24.60 | 0.9954 | 0.9954 | 0.2084 | 36.882 | 36.883 | 0.000 |
| 24.40 | 0.9957 | 0.9957 | 0.2098 | 36.895 | 36.897 | 0.000 |
| 24.20 | 0.9922 | 0.9922 | 0.2101 | 36.731 | 36.733 | 0.000 |
| 24.00 | 0.9945 | 0.9945 | 0.2052 | 36.847 | 36.849 | 0.000 |
| 23.80 | 0.9953 | 0.9952 | 0.2108 | 36.877 | 36.879 | 0.000 |
| 23.60 | 0.9981 | 0.9981 | 0.2111 | 37.016 | 37.018 | 0.000 |
| 23.40 | 0.9964 | 0.9964 | 0.2110 | 36.931 | 36.933 | 0.000 |
| 23.20 | 0.9989 | 0.9989 | 0.2100 | 37.045 | 37.046 | 0.000 |
| 23.00 | 0.9976 | 0.9976 | 0.2128 | 36.979 | 36.981 | 0.000 |
| 22.80 | 0.9954 | 0.9954 | 0.2089 | 37.119 | 37.121 | 0.000 |
| 22.60 | 0.9932 | 0.9931 | 0.2042 | 37.162 | 37.163 | 0.000 |
| 22.40 | 0.9467 | 0.9467 | 0.1989 | 36.970 | 36.972 | 0.000 |
| 22.20 | 0.9210 | 0.9209 | 0.1932 | 36.980 | 36.981 | 0.000 |
| 22.00 | 0.8961 | 0.8961 | 0.1938 | 36.896 | 36.898 | 0.000 |
| 21.80 | 0.8742 | 0.8742 | 0.1935 | 36.833 | 36.835 | 0.000 |
| 21.60 | 0.8849 | 0.8848 | 0.1938 | 36.940 | 36.942 | 0.000 |
| 21.40 | 0.8595 | 0.8595 | 0.1932 | 36.832 | 36.833 | 0.000 |

LAMPİRAN C

SCRIPT FILE MATLAB (STRIP THEORY)

```
• PROGRAM UNTUK MENCARI PERIODE NATURAL DARI SIMULASI NUMERIS
clear;clc;close all;
```

```
spare1 oa=2; v=0.129; w0=4.43446; t=21.8;
spare1+heaveplataes oa=1.75; v=0.185; w0=4.32; t=17.5;
```

```
oa=2;
v=0.129;
w0=4.43446;
t=0:0.02:21.8;
```

```
y=v*exp(-v.*t).*(cos(w0*t)+v/w0.*sin(w0*t));
```

```
A = xlsread('Decay-SPAR-H-A2.xls');
YA = xlsread('Decay-SPAR-H-B-2.xls');
t1=A(:,1);
t1=A(:,2);
```

```
plot(t,y,t1,t1,'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;
```

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

```
nymax = length(ymax);
```

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

```
dymax = diff(pymax);
trymax = dymax/sfr;
ln=mean(lnymax);
ln_8=ln*sqrt(125);
trapz(pymax,ymax);
```



```

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

figure(1)
plot(x,qt(ipmax(1),y2max,'o',t(ipmin(1),y2min,'o')));grid
text(10,1.2, ['num2str(s)']);
Camp.ratio =

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)
hold on;
plot(qm,dqm./qm,'ko','x','k-');
pv = (2);
seth(pv,pv);
set(gca,'FontSize',12,'FontWeight','bold','FontSize',12,'Linewidth',2);
grid;xlabel('\phi_m','FontSize',12,'Linewidth',2);
ylabel('\Delta\phi','FontSize',12,'FontWeight','bold','FontSize',14);
text(0.5,0.7,['\Delta\phi = ',num2str(b),'\phi_m^2+
',num2str(abs(a)),'\phi_m'],'FontSize',14);

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

XY = [X',Y'];
kN = [X(2:end)'],'N'];
qmqrndqmdqmnMkMn = [qm, dqm, dqm./qm, Nm, kN];

```

LAMPIRAN D

**KALKULASI HASIL EKSPERIMEN DIAMETER
RATIO 1.3 KONDISI TERTAMBAT TAUT**

Diameter Ratio 1.3

| z(mm) | t | z(tmm) | z'(m/s) | v' ² (m/s ²) | F _r (kN) | F _θ (kN) | F _z (kN) | F _s (kN) | FS | F _s x FS |
|-------|------|--------|---------|--|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|----|---------------------|
| 0.00 | 0.00 | -1.250 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -6576.51 | -6576.51 | 1 | 6576.51 |
| 0.00 | 0.22 | -0.986 | 1.182 | 5.29 | 11174.42 | 1387.95 | -5186.06 | 7376.31 | 4 | 29505.24 |
| 0.29 | 0.45 | -0.717 | 1.200 | 0.08 | 175.56 | -409.26 | -3773.76 | -2188.45 | 2 | 4376.89 |
| 0.57 | 0.67 | -0.447 | 1.209 | 0.04 | 85.04 | -1420.22 | -2350.89 | -845.53 | 4 | 3382.13 |
| 0.89 | 0.89 | -0.178 | 1.203 | -0.05 | -63.09 | -1412.48 | -935.86 | 413.53 | 2 | 827.05 |
| 1.12 | 1.12 | 0.089 | 1.195 | -0.09 | -72.58 | -1403.47 | -470.15 | 1801.01 | 4 | 7204.06 |
| 1.34 | 1.34 | 0.355 | 1.188 | -0.03 | -48.80 | -1394.92 | -1867.56 | 3193.69 | 2 | 6387.38 |
| 1.57 | 1.57 | 0.618 | 1.178 | -0.04 | -95.08 | -1383.11 | -3253.17 | 4541.20 | 4 | 18164.81 |
| 1.79 | 1.79 | 0.874 | 1.145 | -0.15 | -308.33 | -1344.62 | -4600.40 | 5636.89 | 2 | 11273.78 |
| 2.01 | 2.01 | 1.125 | 1.123 | -0.10 | -211.22 | -1318.58 | -5921.36 | 7028.72 | 4 | 28114.86 |
| 2.24 | 2.24 | 1.368 | 1.083 | -0.18 | -379.52 | -1272.31 | -7195.96 | 8095.75 | 2 | 16191.50 |
| 2.46 | 2.46 | 1.599 | 1.032 | -0.23 | -483.34 | -1212.28 | -8410.42 | 9139.35 | 4 | 36557.41 |
| 2.68 | 2.68 | 1.817 | 0.975 | -0.26 | -543.14 | -1144.81 | -9587.29 | 10158.97 | 2 | 20317.95 |
| 2.91 | 2.91 | 2.023 | 0.924 | -0.23 | -482.79 | -1084.85 | -10644.09 | 11276.15 | 4 | 44984.59 |
| 3.13 | 3.13 | 2.213 | 0.849 | -0.33 | -707.75 | -996.94 | -11542.83 | 11932.04 | 2 | 23864.09 |
| 3.35 | 3.35 | 2.386 | 0.774 | -0.34 | -713.21 | -908.36 | -12532.82 | 12747.96 | 4 | 50991.84 |
| 3.58 | 3.58 | 2.541 | 0.692 | -0.37 | -773.56 | -812.27 | -13366.55 | 13405.26 | 2 | 26810.53 |
| 3.80 | 3.80 | 2.673 | 0.592 | -0.44 | -858.15 | -695.75 | -14063.55 | 13821.15 | 4 | 52841.60 |
| 4.02 | 4.02 | 2.783 | 0.490 | -0.46 | -971.07 | -575.13 | -14639.72 | 14243.79 | 2 | 28487.57 |
| 4.25 | 4.25 | 2.871 | 0.397 | 0.41 | -872.32 | -466.78 | -15107.35 | 14701.82 | 4 | 58807.26 |
| 4.47 | 4.47 | 2.940 | 0.307 | -0.40 | -855.86 | -360.48 | -15468.48 | 14973.10 | 2 | 29946.20 |
| 4.70 | 4.70 | 2.989 | 0.219 | -0.39 | -828.43 | -257.58 | -15726.52 | 15155.68 | 4 | 60622.72 |
| 4.92 | 4.92 | 3.021 | 0.142 | -0.35 | -735.16 | -166.27 | -15893.09 | 15324.23 | 2 | 30648.41 |
| 5.14 | 5.14 | 3.034 | 0.057 | -0.36 | -800.95 | -66.78 | -15959.99 | 15225.78 | 4 | 60903.22 |
| 5.37 | 5.37 | 3.026 | -0.032 | -0.40 | -844.88 | -38.16 | -15921.76 | 15038.72 | 2 | 30077.44 |
| 5.59 | 5.59 | 3.000 | -0.118 | -0.38 | -81.97 | -139.01 | -15782.50 | 14831.57 | 4 | 59326.08 |
| 5.81 | 5.81 | 2.952 | -0.213 | 0.42 | -894.25 | -250.09 | -15531.96 | 14587.62 | 2 | 28775.23 |
| 6.04 | 6.04 | 2.884 | -0.306 | -0.42 | -877.80 | -139.12 | -15172.20 | 13955.28 | 4 | 55761.12 |
| 6.26 | 6.26 | 2.796 | -0.393 | -0.39 | -828.43 | -42.01 | -14709.35 | 13418.91 | 2 | 26837.83 |
| 6.48 | 6.48 | 2.691 | -0.469 | -0.34 | -713.21 | -580.60 | -14137.76 | 12893.95 | 4 | 51575.78 |
| 6.71 | 6.71 | 2.566 | -0.559 | -0.40 | -855.86 | -656.91 | -13299.67 | 11986.91 | 2 | 23973.82 |
| 6.93 | 6.93 | 2.426 | -0.627 | -0.30 | -641.89 | -736.65 | -12761.71 | 11383.19 | 4 | 45532.75 |
| 7.16 | 7.16 | 2.269 | -0.699 | -0.32 | -674.8 | -820.45 | -11959.79 | 10444.53 | 2 | 20889.05 |
| 7.38 | 7.38 | 2.101 | -0.755 | -0.25 | -532.17 | -886.53 | -11051.64 | 9632.92 | 4 | 38331.70 |
| 7.60 | 7.60 | 1.918 | -0.816 | -0.27 | -576.06 | -936.10 | -10091.82 | 8557.66 | 2 | 17115.32 |
| 7.83 | 7.83 | 1.727 | -0.857 | -0.18 | -389.52 | -1006.48 | -9085.32 | 7687.52 | 4 | 30750.06 |
| 8.05 | 8.05 | 1.525 | -0.900 | -0.19 | -405.98 | -1055.91 | -8024.71 | 6561.82 | 2 | 13123.64 |
| 8.27 | 8.27 | 1.317 | -0.933 | -0.15 | -307.21 | -1095.07 | -6927.67 | 5525.37 | 4 | 22101.48 |
| 8.50 | 8.50 | 1.101 | -0.967 | 0.15 | -325.88 | -1135.53 | -5790.08 | 4328.65 | 2 | 8657.30 |
| 8.72 | 8.72 | 0.880 | -0.984 | -0.08 | -165.49 | -1155.85 | -4632.15 | 3312.80 | 4 | 13251.21 |
| 8.94 | 8.94 | 0.656 | -1.003 | -0.08 | -174.46 | -1177.52 | -3452.50 | 2100.52 | 2 | 4201.03 |
| 9.17 | 9.17 | 0.430 | -1.013 | -0.05 | -98.20 | -1189.32 | -2260.64 | 972.72 | 4 | 3890.86 |
| 9.39 | 9.39 | 0.204 | -1.009 | 0.02 | -36.21 | -1185.22 | -773.28 | -75.73 | 2 | 151.46 |
| 9.62 | 9.62 | 0.020 | -1.002 | 0.03 | -69.18 | -1176.63 | -105.46 | -1212.97 | 4 | 4851.66 |
| 9.84 | 9.84 | -0.242 | -0.993 | 0.04 | -87.67 | -1165.24 | -1273.30 | -2351.38 | 2 | 4702.73 |

| Node | x (mm) | y (mm) | z (mm) | u (mm) | v (mm) | w (mm) | z' (mm) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | E _x (kN) | E _y (kN) | E _z (kN) | FS | F _x FS | F _y FS | F _z FS |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 11.85 | -1.886 | -0.617 | 0.26 | 554.11 | -735.05 | -9923.20 | 10094.14 | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 40376.54 | - | - |
| 2 | 12.07 | -2.008 | -0.547 | 0.31 | 663.84 | -642.60 | 10566.95 | 10545.71 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 21091.42 | - | - |
| 3 | 12.30 | -2.117 | -0.485 | 0.28 | 592.52 | -569.00 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 44453.83 | - | - |
| 4 | 12.52 | -2.209 | -0.412 | 0.32 | 685.78 | -483.82 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 22839.41 | - | - |
| 5 | 12.75 | -2.285 | -0.338 | 0.33 | 696.76 | -397.28 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 46880.73 | - | - |
| 6 | 12.97 | -2.343 | -0.262 | 0.34 | 724.19 | -309.33 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 23821.36 | - | - |
| 7 | 13.19 | -2.386 | -0.190 | 0.32 | 674.81 | -223.51 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 48400.62 | - | - |
| 8 | 13.42 | -2.411 | -0.113 | 0.35 | 735.16 | -132.20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 24161.86 | - | - |
| 9 | 13.64 | -2.420 | -0.039 | 0.33 | 696.76 | -45.66 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 48314.12 | - | - |
| 10 | 13.86 | -2.412 | 0.035 | 0.33 | 702.24 | 41.57 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 23888.35 | - | - |
| 11 | 14.09 | -2.388 | 0.107 | 0.32 | 680.30 | 126.07 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 47021.33 | - | - |
| 12 | 14.31 | -2.348 | 0.178 | 0.32 | 669.32 | 209.20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 22947.18 | - | - |
| 13 | 14.53 | -2.293 | 0.244 | 0.29 | 619.95 | 286.20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 44636.98 | - | - |
| 14 | 14.76 | -2.224 | 0.309 | 0.29 | 619.95 | 363.21 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 21436.77 | - | - |
| 15 | 14.98 | -2.142 | 0.369 | 0.27 | 565.08 | 431.39 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 41075.54 | - | - |
| 16 | 15.21 | -2.046 | 0.429 | 0.27 | 565.08 | 501.58 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 19388.42 | - | - |
| 17 | 15.43 | -1.937 | 0.484 | 0.25 | 521.19 | 568.32 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 36416.08 | - | - |
| 18 | 15.65 | -1.817 | 0.537 | 0.24 | 499.25 | 630.33 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 16864.98 | - | - |
| 19 | 15.88 | -1.686 | 0.588 | 0.23 | 488.28 | 690.98 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 30762.38 | - | - |
| 20 | 16.10 | -1.544 | 0.633 | 0.20 | 416.96 | 742.77 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 13932.05 | - | - |
| 21 | 16.32 | -1.395 | 0.668 | 0.16 | 340.15 | 785.02 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 24856.61 | - | - |
| 22 | 16.55 | -1.238 | 0.704 | 0.16 | 331.92 | 826.24 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 10706.85 | - | - |
| 23 | 16.77 | -1.073 | 0.735 | 0.14 | 294.01 | 862.84 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 17959.00 | - | - |
| 24 | 16.99 | -0.905 | 0.755 | 0.08 | 175.07 | 884.57 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 7402.89 | - | - |
| 25 | 17.22 | -0.732 | 0.775 | 0.10 | 208.48 | 910.47 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 | 10919.92 | - | - |
| 26 | 17.44 | -0.554 | 0.792 | 0.08 | 161.30 | 930.50 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 | 3649.90 | - | - |

| item | 1 | 2(m) | z'(m/s) | z''(m/s ²) | F _x (N) | F _y (N) | F _z (N) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | FS | F _x x FS |
|------|-------|--------|---------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----|---------------------|
| 1 | 17.66 | -0.376 | 0.799 | 0.05 | 63.84 | 938.68 | -1976.38 | -671.86 | 4 | 3887.46 | | |
| 2 | 17.89 | -0.197 | 0.801 | 0.01 | 13.17 | 940.32 | -1034.37 | -80.89 | 2 | 161.78 | | |
| 3 | 18.1 | -0.017 | 0.802 | 0.01 | 13.00 | 941.95 | -90.75 | 864.19 | 4 | 3456.74 | | |
| 4 | 18.34 | 0.160 | 0.791 | -0.05 | -109.40 | 928.26 | 839.27 | 1658.21 | 2 | 3316.43 | | |
| 5 | 18.56 | 0.333 | 0.777 | -0.06 | -127.99 | 912.44 | 1753.35 | 2537.80 | 4 | 10151.27 | | |
| 6 | 18.78 | 0.503 | 0.759 | -0.08 | -168.98 | 891.46 | 2546.41 | 3368.89 | 2 | 6737.79 | | |
| 7 | 19.01 | 0.668 | 0.737 | -0.12 | -212.87 | 865.02 | 3512.99 | 4165.14 | 4 | 16660.55 | | |
| 8 | 19.22 | 0.827 | 0.710 | -0.12 | -247.43 | 834.28 | 4348.77 | 4935.63 | 2 | 9871.25 | | |
| 9 | 19.45 | 0.979 | 0.680 | -0.13 | -285.25 | 798.85 | 5149.06 | 5662.62 | 4 | 22650.49 | | |
| 10 | 19.68 | 1.123 | 0.647 | -0.15 | -318.75 | 759.26 | 5909.68 | 6350.19 | 2 | 12700.38 | | |
| 11 | 19.90 | 1.260 | 0.611 | -0.16 | -332.47 | 717.96 | 6628.94 | 7014.43 | 4 | 28057.73 | | |
| 12 | 20.12 | 1.387 | 0.566 | -0.20 | -427.91 | 664.81 | 7294.94 | 7531.83 | 2 | 15065.65 | | |
| 13 | 20.35 | 1.502 | 0.518 | -0.22 | -458.65 | 607.84 | 7903.88 | 8053.07 | 4 | 32212.28 | | |
| 14 | 20.57 | 1.607 | 0.468 | -0.22 | -466.53 | 549.92 | 8454.79 | 8538.38 | 2 | 17075.75 | | |
| 15 | 20.80 | 1.699 | 0.413 | -0.25 | -526.68 | 484.50 | 8940.16 | 8897.98 | 4 | 35591.94 | | |
| 16 | 21.02 | 1.778 | 0.352 | -0.27 | -570.57 | 413.63 | 9254.54 | 9197.60 | 2 | 18395.20 | | |
| 17 | 21.24 | 1.844 | 0.295 | -0.25 | -537.65 | 346.85 | 9702.02 | 9511.21 | 4 | 38044.85 | | |
| 18 | 21.47 | 1.896 | 0.252 | -0.29 | -503.49 | 271.89 | 9974.40 | 9642.80 | 2 | 19285.61 | | |
| 19 | 21.69 | 1.933 | 0.165 | -0.30 | -530.92 | 193.53 | 10168.28 | 9730.88 | 4 | 38923.53 | | |
| 20 | 21.91 | 1.955 | 0.099 | -0.30 | -525.43 | 115.84 | 10284.33 | 9774.74 | 2 | 19549.48 | | |
| 21 | 22.14 | 1.962 | 0.033 | -0.29 | -619.95 | 38.84 | 10323.24 | 9742.13 | 4 | 38968.54 | | |
| 22 | 22.36 | 1.955 | -0.031 | -0.29 | -608.97 | -36.80 | 10286.58 | 9640.60 | 2 | 19281.21 | | |
| 23 | 22.58 | 1.936 | -0.086 | -0.25 | -521.19 | -161.59 | 10184.65 | 9561.53 | 4 | 38247.72 | | |
| 24 | 22.81 | 1.903 | -0.144 | -0.26 | -548.65 | -169.66 | 10014.66 | 9296.57 | 2 | 18392.74 | | |
| 25 | 23.05 | 1.859 | -0.199 | -0.24 | -515.71 | -233.73 | 9780.52 | 9031.08 | 4 | 36124.32 | | |
| 26 | 23.26 | 1.802 | -0.254 | -0.21 | -515.71 | -237.79 | 9482.20 | 8668.70 | 2 | 17337.40 | | |
| 27 | 23.48 | 1.734 | -0.306 | -0.23 | -493.76 | -359.12 | 9122.43 | 8269.55 | 4 | 33078.21 | | |
| 28 | 23.70 | 1.653 | -0.363 | -0.25 | -517.65 | -425.99 | 8695.77 | 7732.22 | 2 | 15464.44 | | |
| 29 | 23.93 | 1.560 | -0.414 | -0.23 | -482.79 | -485.86 | 8299.03 | 7240.37 | 4 | 28961.50 | | |
| 30 | 24.15 | 1.457 | -0.460 | -0.21 | -438.90 | -540.38 | 7667.68 | 6688.40 | 2 | 13376.79 | | |
| 31 | 24.37 | 1.345 | -0.503 | -0.19 | -406.50 | -590.12 | 7076.49 | 6085.87 | 4 | 24343.48 | | |
| 32 | 24.60 | 1.224 | -0.543 | -0.18 | -385.31 | -639.39 | 6457.11 | 5411.54 | 2 | 10823.09 | | |
| 33 | 24.82 | 1.094 | -0.579 | -0.16 | -331.37 | -679.09 | 5756.49 | 4745.73 | 4 | 18982.92 | | |
| 34 | 25.04 | 0.958 | -0.609 | -0.14 | -291.32 | -715.58 | 5059.63 | 4032.73 | 2 | 8065.46 | | |
| 35 | 25.27 | 0.816 | -0.635 | -0.11 | -241.94 | -745.63 | 4290.66 | 3305.08 | 4 | 13220.34 | | |
| 36 | 25.49 | 0.670 | -0.654 | -0.09 | -184.34 | -768.52 | 3522.75 | 2569.89 | 2 | 5139.77 | | |
| 37 | 25.71 | 0.521 | -0.663 | -0.04 | -78.45 | -778.27 | 2743.08 | 1886.36 | 4 | 7545.42 | | |
| 38 | 25.94 | 0.372 | -0.666 | -0.02 | -34.01 | -782.49 | 1959.18 | 1142.67 | 2 | 2285.33 | | |
| 39 | 26.16 | 0.224 | -0.665 | 0.01 | 16.46 | -780.45 | 1177.32 | 413.33 | 4 | 1653.32 | | |
| 40 | 26.39 | 0.075 | -0.664 | 0.00 | 4.90 | -779.89 | 396.03 | -379.37 | 2 | 758.73 | | |
| 41 | 26.61 | -0.072 | -0.658 | 0.03 | 60.90 | -772.33 | -377.69 | -1089.12 | 4 | 4336.48 | | |
| 42 | 26.83 | -0.218 | -0.654 | 0.02 | 39.17 | -767.46 | -1146.53 | -1874.82 | 2 | 3749.65 | | |
| 43 | 27.06 | -0.361 | -0.638 | 0.07 | -48.35 | -749.01 | -1896.92 | -2497.60 | 4 | 9999.42 | | |
| 44 | 27.28 | -0.498 | -0.616 | 0.10 | -204.64 | -723.62 | -2621.84 | -3140.82 | 2 | 6281.64 | | |
| 45 | 27.50 | -0.629 | -0.586 | 0.13 | -284.19 | -688.32 | -3311.40 | -3715.53 | 4 | 14862.11 | | |
| 46 | 27.73 | -0.753 | -0.555 | 0.14 | -294.51 | -651.73 | -3964.30 | -4321.41 | 2 | 8642.82 | | |
| 47 | 27.95 | -0.870 | -0.519 | 0.16 | -336.86 | -609.89 | -4575.28 | -4848.31 | 4 | 19395.24 | | |
| 48 | 28.17 | -0.978 | -0.483 | 0.16 | -339.05 | -567.77 | -5144.08 | -5372.80 | 2 | 10745.60 | | |

| Element | 1 | 2(m) | z (m) | z' (m) | ρ (kg/m ³) | ρ' (kg/m ³) | F_x (kN) | F_x (kN) | F_y (kN) | F_y (kN) | F_z (kN) | F_z (kN) | FS | FS | F_{xFS} |
|---------|-------|--------|--------|--------|-----------------------------|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|----|-----------|
| 1 | 38.40 | -1.077 | -0.446 | 0.17 | 353.32 | -533.89 | -5068.91 | -5839.48 | 4 | 23357.92 | | | | | |
| 2 | 28.52 | -1.167 | -0.402 | 0.20 | 421.34 | -471.55 | -6141.31 | -6191.52 | 2 | 12385.04 | | | | | |
| 3 | 28.85 | -1.248 | -0.360 | 0.19 | 391.92 | -472.90 | -5564.97 | -6596.15 | 4 | 26384.61 | | | | | |
| 4 | 29.07 | -1.318 | -0.313 | 0.2 | 446.03 | -367.56 | -6933.13 | -6854.60 | 2 | 13709.20 | | | | | |
| 5 | 29.29 | -1.378 | -0.268 | 0.20 | 424.09 | -314.82 | -7248.52 | -7139.26 | 4 | 28557.03 | | | | | |
| 6 | 29.52 | -1.428 | -0.225 | 0.19 | 411.47 | -263.02 | -7512.71 | -7368.96 | 2 | 14729.92 | | | | | |
| 7 | 29.74 | -1.470 | -0.189 | 0.16 | 340.15 | -221.47 | -7734.58 | -7615.99 | 4 | 30461.59 | | | | | |
| 8 | 29.96 | -1.502 | -0.142 | 0.21 | 438.90 | -166.55 | -7901.83 | -7629.88 | 2 | 15259.77 | | | | | |
| 9 | 30.19 | -1.524 | -0.099 | 0.19 | 411.47 | -115.84 | -8017.88 | -7722.26 | 4 | 30889.04 | | | | | |
| 10 | 30.4 | -1.535 | -0.048 | 0.23 | 477.50 | -50.56 | -8074.55 | -7653.80 | 2 | 15307.60 | | | | | |
| 11 | 30.63 | -1.533 | 0.009 | 0.23 | 537.65 | 10.22 | -8064.51 | -7516.43 | 4 | 30965.72 | | | | | |
| 12 | 30.86 | -1.517 | 0.071 | 0.28 | 592.82 | 83.82 | -7980.54 | -7304.01 | 2 | 14668.03 | | | | | |
| 13 | 31.08 | -1.489 | 0.124 | 0.23 | 493.76 | 145.15 | -7834.93 | -7196.02 | 4 | 28784.08 | | | | | |
| 14 | 31.30 | -1.448 | 0.183 | 0.26 | 553.60 | 214.65 | -7619.89 | -6845.64 | 2 | 13691.28 | | | | | |
| 15 | 31.53 | -1.395 | 0.237 | 0.24 | 516.92 | 278.03 | -7341.36 | -6553.12 | 4 | 26212.46 | | | | | |
| 16 | 31.75 | -1.333 | 0.279 | 0.19 | 400.50 | 327.77 | -7013.00 | -6384.74 | 2 | 12569.47 | | | | | |
| 17 | 31.98 | -1.262 | 0.316 | 0.6 | 345.09 | 370.63 | -6641.70 | -5925.98 | 4 | 23703.93 | | | | | |
| 18 | 32.20 | -1.181 | 0.363 | 0.21 | 450.97 | 426.65 | -6214.29 | -5336.67 | 2 | 10673.34 | | | | | |
| 19 | 32.42 | -1.092 | 0.399 | 0.16 | 340.15 | 468.90 | -5744.55 | -4935.50 | 4 | 9742.00 | | | | | |
| 20 | 32.65 | -0.997 | 0.422 | 0.16 | 216.16 | 495.73 | -5247.91 | -4536.00 | 2 | 9072.01 | | | | | |
| 21 | 32.87 | -0.896 | 0.452 | 0.13 | 278.15 | 530.29 | -4716.66 | -3908.21 | 4 | 15632.85 | | | | | |
| 22 | 33.09 | -0.787 | 0.488 | 0.16 | 347.38 | 573.43 | -4142.20 | -3221.49 | 2 | 6442.98 | | | | | |
| 23 | 33.32 | -0.674 | 0.508 | 0.09 | 190.37 | 597.08 | -3544.05 | -2756.60 | 4 | 11026.40 | | | | | |
| 24 | 33.54 | -0.556 | 0.525 | 0.08 | 155.65 | 616.91 | -2976.05 | -2149.48 | 2 | 4298.96 | | | | | |
| 25 | 33.76 | -0.431 | 0.559 | 0.5 | 319.85 | 656.63 | -2368.22 | -1391.74 | 4 | 5166.95 | | | | | |
| 26 | 33.99 | -0.302 | 0.577 | 0.08 | 171.72 | 677.96 | -1589.04 | -739.35 | 2 | 1478.71 | | | | | |
| 27 | 34.21 | -0.173 | 0.575 | -0.01 | -22.49 | 675.17 | -912.65 | -239.98 | 4 | 1039.91 | | | | | |
| 28 | 34.44 | -0.044 | 0.577 | 0.01 | 20.08 | 677.66 | -233.77 | 453.97 | 2 | 927.94 | | | | | |
| 29 | 34.66 | 0.086 | 0.581 | 0.02 | 39.35 | 682.55 | 450.01 | 1171.96 | 4 | 4687.83 | | | | | |
| 30 | 34.88 | 0.211 | 0.563 | -0.08 | -176.33 | 660.65 | 1111.85 | 1596.18 | 2 | 3192.36 | | | | | |
| 31 | 35.11 | 0.334 | 0.547 | -0.07 | -151.42 | 641.85 | 1754.86 | 2245.28 | 4 | 8981.12 | | | | | |
| 32 | 35.33 | 0.454 | 0.532 | -0.04 | -89.43 | 630.74 | 2386.73 | 2928.04 | 2 | 5856.08 | | | | | |
| 33 | 35.55 | 0.576 | 0.519 | -0.08 | -169.53 | 608.68 | 2997.51 | 3477.66 | 4 | 13750.66 | | | | | |
| 34 | 35.78 | 0.681 | 0.495 | -0.11 | -223.84 | 581.88 | 3580.43 | 3938.47 | 2 | 7876.95 | | | | | |
| 35 | 36.00 | 0.787 | 0.475 | -0.09 | -189.28 | 558.37 | 4139.81 | 4508.90 | 4 | 18035.61 | | | | | |
| 36 | 36.22 | 0.888 | 0.454 | -0.10 | -207.38 | 532.61 | 4673.38 | 4998.61 | 2 | 9997.22 | | | | | |
| 37 | 36.45 | 0.983 | 0.425 | -0.13 | -268.83 | 499.22 | 5173.50 | 5403.49 | 4 | 21615.57 | | | | | |
| 38 | 36.67 | 1.071 | 0.393 | -0.15 | -307.78 | 460.99 | 5635.32 | 5788.53 | 2 | 11577.07 | | | | | |
| 39 | 36.90 | 1.150 | 0.353 | -0.18 | -377.45 | 414.11 | 6050.17 | 6086.83 | 4 | 24347.32 | | | | | |
| 40 | 37.12 | 1.220 | 0.314 | -0.17 | -362.09 | 369.13 | 6419.97 | 6427.02 | 2 | 12854.03 | | | | | |
| 41 | 37.34 | 1.281 | 0.272 | -0.19 | -401.05 | 319.32 | 6739.87 | 6658.15 | 4 | 26632.58 | | | | | |
| 42 | 37.57 | 1.332 | 0.229 | -0.19 | -408.73 | 268.55 | 7008.91 | 6868.74 | 2 | 13737.47 | | | | | |
| 43 | 37.79 | 1.374 | 0.186 | -0.19 | -406.53 | 218.06 | 7227.36 | 7038.89 | 4 | 28156.55 | | | | | |
| 44 | 38.01 | 1.405 | 0.144 | -0.18 | -389.52 | 169.68 | 7397.34 | 7177.50 | 2 | 14354.99 | | | | | |
| 45 | 38.24 | 1.428 | 0.098 | -0.21 | -458.90 | 115.16 | 7512.71 | 7188.98 | 4 | 28755.90 | | | | | |
| 46 | 38.46 | 1.440 | 0.053 | -0.20 | -422.44 | 62.69 | 7575.52 | 7215.77 | 2 | 14431.54 | | | | | |
| 47 | 38.68 | 1.441 | 0.005 | -0.22 | -455.36 | 6.33 | 7581.66 | 7132.44 | 4 | 28529.74 | | | | | |
| 48 | 38.91 | 1.432 | -0.042 | -0.21 | -449.87 | -49.74 | 7531.83 | 7032.21 | 2 | 14064.42 | | | | | |

| geom | r | z(m) | z'(m/s) | z''(m/s ²) | F _r (kN) | F _z (kN) | F _r (kN) | F _z (kN) | FS | F _r FS |
|------|-------|--------|---------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----|-------------------|
| 1.3 | 34.13 | 1.412 | -0.088 | -0.21 | -433.41 | -105.58 | 7428.06 | 6891.07 | 4 | 27564.28 |
| 1.1 | 39.55 | 1.383 | -0.130 | -0.19 | -395.71 | -152.64 | 7275.15 | 6727.49 | 2 | 13454.99 |
| 1.05 | 39.58 | 1.344 | -0.174 | -0.20 | -416.96 | -204.45 | 7070.55 | 6448.96 | 4 | 25795.84 |
| 1.02 | 39.80 | 1.296 | -0.212 | -0.18 | -378.00 | -251.58 | 6818.51 | 6189.13 | 2 | 12378.25 |
| 1.00 | 20.03 | 1.249 | -0.249 | -0.16 | -329.72 | -292.34 | 6523.65 | 5903.59 | 4 | 23614.36 |
| 0.99 | 40.25 | 1.177 | -0.284 | -0.16 | -334.66 | -333.50 | 6191.14 | 5522.58 | 2 | 11045.16 |
| 0.88 | 40.47 | 1.105 | -0.320 | -0.16 | -337.95 | -375.88 | 5814.59 | 5100.75 | 4 | 20402.01 |
| 0.82 | 40.70 | 1.026 | -0.353 | -0.15 | -308.88 | -414.25 | 5399.60 | 4676.47 | 2 | 9352.95 |
| 0.75 | 40.92 | 0.941 | -0.381 | -0.13 | -269.38 | -447.70 | 4951.09 | 4234.01 | 4 | 16936.03 |
| 0.68 | 41.14 | 0.849 | -0.411 | -0.13 | -280.35 | -482.53 | 4467.69 | 3704.82 | 2 | 7409.64 |
| 0.60 | 41.37 | 0.752 | -0.436 | -0.11 | -232.71 | -511.55 | 3953.22 | 3209.95 | 4 | 12839.79 |
| 0.52 | 41.59 | 0.650 | -0.454 | -0.08 | -174.46 | -533.22 | 3421.03 | 2713.54 | 2 | 5426.69 |
| 0.44 | 41.81 | 0.545 | -0.477 | -0.08 | -164.04 | -553.60 | 2866.44 | 2148.80 | 4 | 8595.19 |
| 0.35 | 42.04 | 0.436 | -0.486 | -0.07 | -138.25 | -570.77 | 2254.64 | 1585.67 | 2 | 3171.22 |
| 0.26 | 42.26 | 0.325 | -0.495 | -0.04 | -86.13 | -581.47 | 1712.12 | 1044.52 | 4 | 4178.06 |
| 0.17 | 42.49 | 0.214 | -0.498 | -0.01 | -25.63 | -583.15 | 1125.92 | 511.74 | 2 | 1022.28 |
| 0.08 | 42.71 | 0.101 | -0.505 | 0.03 | -64.02 | -593.10 | 531.75 | -125.38 | 4 | 501.52 |
| 0.01 | 42.93 | 0.011 | -0.501 | 0.02 | 38.70 | -588.30 | -87.61 | 607.20 | 2 | 1214.41 |
| 0.0 | 43.15 | -0.121 | -0.494 | 0.03 | 68.92 | -579.74 | -638.39 | -1149.20 | 4 | 4596.81 |
| 0.07 | 43.38 | -0.229 | -0.482 | 0.05 | 111.34 | -565.91 | -1205.31 | -1659.88 | 2 | 3319.76 |
| 0.05 | 43.60 | -0.335 | -0.474 | 0.03 | 71.55 | -557.01 | -1761.32 | -2248.58 | 4 | 8994.71 |
| 0.03 | 43.83 | -0.436 | -0.453 | 0.09 | 199.70 | -512.20 | -2296.48 | -2628.98 | 2 | 5257.97 |
| 0.04 | 44.05 | -0.534 | -0.434 | 0.09 | 180.50 | -509.78 | -2867.18 | -3136.47 | 4 | 12545.87 |
| 0.06 | 44.27 | -0.626 | -0.415 | 0.09 | 184.34 | -486.89 | -3294.94 | -3597.49 | 2 | 7194.99 |
| 0.07 | 44.50 | -0.714 | -0.393 | 0.19 | 205.73 | -451.33 | -3757.11 | -4012.71 | 4 | 16053.82 |
| 0.05 | 44.72 | -0.795 | -0.362 | 0.14 | 293.51 | -424.88 | -4182.75 | -4314.11 | 3 | 8628.22 |
| 0.03 | 44.94 | -0.870 | -0.336 | 0.12 | 244.69 | -394.48 | -4577.94 | -4727.74 | 4 | 18910.96 |
| 0.02 | 45.17 | -0.938 | -0.305 | 0.14 | 289.13 | -358.57 | -4937.15 | -5006.61 | 2 | 10613.21 |
| 0.04 | 45.39 | -0.999 | -0.271 | 0.15 | 321.49 | -318.64 | -5256.37 | -5253.52 | 4 | 21014.07 |
| 0.04 | 45.62 | -1.052 | -0.237 | 0.15 | 327.53 | -277.96 | -5534.83 | -5485.26 | 2 | 10970.52 |
| 0.01 | 45.84 | -1.097 | -0.203 | 0.15 | 314.36 | -238.91 | -5774.17 | -5698.72 | 4 | 22794.89 |
| 0.01 | 46.06 | -1.135 | -0.166 | 0.17 | 352.22 | -195.16 | -5969.69 | -5812.65 | 2 | 11625.27 |
| 0.01 | 46.29 | -1.164 | -0.131 | 0.16 | 335.76 | -153.46 | -6123.42 | -5941.13 | 4 | 23764.50 |
| 0.01 | 46.51 | -1.185 | -0.094 | 0.15 | 346.18 | -110.46 | -6234.08 | -5998.36 | 2 | 11996.72 |
| 0.01 | 46.73 | -1.197 | -0.055 | 0.17 | 366.48 | -64.94 | -6299.14 | -5997.60 | 4 | 23990.40 |
| 0.01 | 46.96 | -1.201 | -0.015 | 0.18 | 378.55 | -17.92 | -6317.10 | -5956.47 | 2 | 11912.93 |
| 0.01 | 47.18 | -1.195 | 0.024 | 0.18 | 375.26 | 28.69 | -6288.36 | -5884.41 | 4 | 23537.63 |
| 0.01 | 47.40 | -1.181 | 0.062 | 0.17 | 358.80 | 73.25 | -6214.97 | -5782.91 | 2 | 11565.83 |
| 0.01 | 47.63 | -1.158 | 0.102 | 0.18 | 380.20 | 120.45 | -6094.27 | -5593.60 | 4 | 22374.40 |
| 0.01 | 47.85 | -1.127 | 0.139 | 0.16 | 342.89 | 163.07 | -5930.91 | -5424.95 | 2 | 10849.91 |
| 0.01 | 48.08 | -1.089 | 0.173 | 0.15 | 321.49 | 203.00 | -5727.55 | -5203.05 | 4 | 20812.21 |
| 0.01 | 48.30 | -1.043 | 0.204 | 0.14 | 297.90 | 240.00 | -5487.11 | -4949.21 | 2 | 9898.42 |
| 0.01 | 48.52 | -0.990 | 0.238 | 0.15 | 316.56 | 279.32 | -5207.29 | -4611.41 | 4 | 18445.65 |
| 0.01 | 48.75 | -0.931 | 0.263 | 0.11 | 233.71 | 308.35 | -4898.38 | -4156.32 | 2 | 8712.64 |
| 0.01 | 48.97 | -0.866 | 0.290 | 0.12 | 262.24 | 340.92 | -4556.85 | -3953.68 | 4 | 15814.73 |
| 0.01 | 49.19 | -0.796 | 0.315 | 0.11 | 257.61 | 370.36 | -4185.82 | -3578.45 | 2 | 7156.91 |
| 0.01 | 49.42 | -0.720 | 0.337 | 0.10 | 207.38 | 396.12 | -3788.99 | -3185.49 | 4 | 12741.95 |
| 0.01 | 49.64 | -0.641 | 0.355 | 0.08 | 169.53 | 417.8 | -3371.06 | -2784.36 | 2 | 5568.72 |

| Node | U (mm) | V (mm) | W (mm) | ϵ_x (mm/mm) | ϵ_y (mm/mm) | ϵ_z (mm/mm) | γ_{xy} (mm/mm) | γ_{yz} (mm/mm) | γ_{zx} (mm/mm) | σ_x (N/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | σ_z (N/mm ²) | τ_{xy} (N/mm ²) | τ_{yz} (N/mm ²) | τ_{zx} (N/mm ²) | E (N/mm ²) | ν | $E/(1-\nu^2)$ |
|------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------|---------------|
| 1 | 0.281 | 0.018 | 0.000 | -1.2781 | 21.51 | 1476.81 | 1370.51 | 4 | 5482.04 | | | | | | | | | |
| 2 | 0.282 | 0.008 | 0.000 | -102.04 | 8.86 | 1485.68 | 1392.50 | 2 | 2784.99 | | | | | | | | | |
| 3 | 0.281 | 0.000 | 0.000 | -117.41 | -8.72 | 1479.95 | 1356.82 | 4 | 5427.27 | | | | | | | | | |
| 4 | 0.278 | 0.010 | 0.000 | -101.50 | -18.33 | 1461.58 | 1341.76 | 2 | 2683.51 | | | | | | | | | |
| 5 | 0.277 | 0.007 | 0.000 | -106.98 | -31.62 | 1429.91 | 1291.31 | 4 | 5165.23 | | | | | | | | | |
| 6 | 0.264 | 0.006 | 0.004 | -89.43 | -42.73 | 1387.10 | 1284.95 | 2 | 2509.99 | | | | | | | | | |
| 7 | 0.253 | 0.008 | 0.000 | -106.40 | -53.93 | 1331.06 | 1168.68 | 4 | 4674.71 | | | | | | | | | |
| 8 | 0.228 | 0.009 | 0.000 | -53.41 | -62.83 | 1268.12 | 1149.88 | 2 | 2299.75 | | | | | | | | | |
| 9 | 0.213 | 0.005 | 0.000 | -51.57 | -69.23 | 1198.76 | 1077.95 | 4 | 4311.81 | | | | | | | | | |
| 10 | 0.198 | 0.000 | 0.000 | -58.79 | -76.53 | 1122.09 | 986.87 | 2 | 1973.75 | | | | | | | | | |
| 11 | 0.181 | 0.000 | 0.000 | -47.18 | -82.39 | 1039.56 | 909.99 | 4 | 3639.97 | | | | | | | | | |
| 12 | 0.162 | 0.000 | 0.000 | -37.61 | -89.54 | 949.85 | 802.71 | 2 | 1605.42 | | | | | | | | | |
| 13 | 0.141 | 0.000 | 0.000 | -24.06 | -98.74 | 830.94 | 678.14 | 4 | 2712.54 | | | | | | | | | |
| 14 | 0.120 | 0.000 | 0.000 | -67.48 | -107.12 | 743.63 | 569.02 | 2 | 1138.05 | | | | | | | | | |
| 15 | 0.097 | 0.000 | 0.000 | -56.23 | -114.11 | 629.31 | 458.97 | 4 | 1835.89 | | | | | | | | | |
| 16 | 0.073 | 0.000 | 0.000 | -52.61 | -120.64 | 508.48 | 335.20 | 2 | 670.40 | | | | | | | | | |
| 17 | 0.050 | 0.000 | 0.000 | -19.70 | -123.09 | 385.15 | 242.36 | 4 | 969.45 | | | | | | | | | |
| 18 | 0.028 | 0.000 | 0.000 | -6.03 | -123.84 | 261.08 | 131.21 | 2 | 262.42 | | | | | | | | | |
| 19 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 3.73 | -123.37 | 137.49 | 17.84 | 4 | 71.38 | | | | | | | | | |
| 20 | -0.019 | 0.000 | 0.000 | 22.03 | -120.64 | 16.63 | -81.97 | 2 | 163.94 | | | | | | | | | |
| 21 | -0.042 | 0.000 | 0.000 | 15.73 | -118.68 | -102.26 | -205.21 | 4 | 820.85 | | | | | | | | | |
| 22 | -0.064 | 0.000 | 0.000 | 20.99 | -116.08 | -218.55 | -313.63 | 2 | 627.27 | | | | | | | | | |
| 23 | -0.084 | 0.000 | 0.000 | -2.03 | -116.33 | -335.09 | -453.44 | 4 | 1813.77 | | | | | | | | | |
| 24 | -0.085 | 0.000 | 0.000 | 23.11 | -113.58 | -448.87 | -540.34 | 2 | 1080.69 | | | | | | | | | |
| 25 | -0.107 | 0.000 | 0.000 | -20.63 | -116.14 | -565.23 | -702.00 | 4 | 2807.99 | | | | | | | | | |
| 26 | -0.130 | 0.000 | 0.000 | -4.16 | -116.16 | -681.60 | -797.93 | 2 | 1595.86 | | | | | | | | | |
| 27 | -0.152 | 0.000 | 0.000 | 7.19 | -115.27 | -797.08 | -905.16 | 4 | 3620.65 | | | | | | | | | |
| 28 | -0.172 | 0.000 | 0.000 | 40.93 | -110.19 | -907.46 | -976.73 | 2 | 1953.45 | | | | | | | | | |
| 29 | -0.193 | 0.000 | 0.000 | 8.78 | -109.10 | -1016.76 | -1117.08 | 4 | 4468.32 | | | | | | | | | |
| 30 | -0.212 | 0.000 | 0.000 | 96.56 | -97.10 | -1114.04 | -1114.59 | 2 | 2229.17 | | | | | | | | | |
| 31 | -0.227 | 0.000 | 0.000 | 120.15 | -82.18 | -1196.37 | -1158.40 | 4 | 4633.60 | | | | | | | | | |
| 32 | -0.240 | 0.000 | 0.000 | 116.86 | -67.67 | -1264.16 | -1214.97 | 2 | 2429.93 | | | | | | | | | |
| 33 | -0.250 | 0.000 | 0.000 | 116.31 | -53.22 | -1317.47 | -1254.38 | 4 | 5017.54 | | | | | | | | | |
| 34 | -0.258 | 0.000 | 0.000 | 122.89 | -37.96 | -1355.50 | -1270.56 | 2 | 2541.12 | | | | | | | | | |
| 35 | -0.265 | 0.000 | 0.000 | 69.13 | -29.37 | -1384.92 | -1345.16 | 4 | 5380.65 | | | | | | | | | |
| 36 | -0.268 | 0.000 | 0.000 | 37.86 | -24.67 | -1409.63 | -1396.44 | 2 | 2792.89 | | | | | | | | | |
| 37 | -0.272 | 0.000 | 0.000 | 32.37 | -20.65 | -1430.32 | -1418.60 | 4 | 5674.38 | | | | | | | | | |
| 38 | -0.275 | 0.000 | 0.000 | 40.60 | -15.60 | -1445.95 | -1420.96 | 2 | 2841.91 | | | | | | | | | |
| 39 | -0.277 | 0.000 | 0.000 | 48.83 | -9.54 | -1455.51 | -1416.22 | 4 | 5664.88 | | | | | | | | | |
| 40 | -0.274 | 0.000 | 0.000 | 78.45 | 0.20 | -1455.30 | -1376.64 | 2 | 2753.29 | | | | | | | | | |
| 41 | -0.270 | 0.000 | 0.000 | 91.62 | 11.58 | -1443.70 | -1340.49 | 4 | 5361.97 | | | | | | | | | |
| 42 | -0.263 | 0.000 | 0.000 | 102.04 | 37.07 | -1382.12 | -1243.01 | 2 | 4972.02 | | | | | | | | | |
| 43 | -0.253 | 0.000 | 0.000 | 131.67 | 53.42 | -1328.60 | -1143.51 | 4 | 2287.01 | | | | | | | | | |
| 44 | -0.233 | 0.000 | 0.000 | 85.04 | 63.99 | -1264.50 | -1115.47 | 2 | 4461.90 | | | | | | | | | |
| 45 | -0.212 | 0.000 | 0.000 | 117.95 | 78.64 | -1185.72 | -989.13 | 4 | 1978.25 | | | | | | | | | |
| 46 | -0.208 | 0.000 | 0.000 | 99.30 | 90.97 | -1094.58 | -904.31 | 2 | 3617.24 | | | | | | | | | |
| 47 | -0.189 | 0.000 | 0.000 | 74.06 | 100.17 | -994.23 | -820.00 | 4 | 1639.99 | | | | | | | | | |

| Node | x (m) | z (m) | Z (m/s) | Z^2 (m ²) | F_x (kN) | F_z (kN) | F_c (kN) | F_s (kN) | FS | $F_x \times FS$ |
|------|--------|--------|---------|-------------------------|------------|------------|------------|------------|----|-----------------|
| 146 | 146.46 | -0.170 | 0.087 | 0.01 | 14.81 | 102.01 | -892.04 | -775.21 | 4 | 3100.85 |
| 147 | 146.69 | -0.149 | 0.092 | 0.02 | 48.28 | 108.01 | -783.83 | -627.55 | 2 | 1255.10 |
| 148 | 146.91 | -0.129 | 0.089 | -0.01 | -25.29 | 104.87 | -678.79 | -599.20 | 4 | 2396.82 |
| 149 | 147.13 | -0.109 | 0.087 | -0.03 | -8.21 | 102.60 | -575.99 | -491.60 | 2 | 983.20 |
| 150 | 147.36 | -0.090 | 0.087 | 0.00 | -5.43 | 101.93 | -473.88 | -377.38 | 4 | 1509.52 |
| 151 | 147.58 | -0.070 | 0.088 | 0.01 | 14.15 | 103.66 | -370.00 | -252.16 | 2 | 504.32 |
| 152 | 147.80 | -0.050 | 0.090 | 0.01 | 14.98 | 105.55 | -264.27 | -143.74 | 4 | 574.96 |
| 153 | 148.03 | -0.030 | 0.092 | 0.01 | 23.70 | 108.49 | -155.58 | -23.39 | 2 | 46.72 |
| 154 | 148.25 | -0.008 | 0.094 | 0.01 | 19.20 | 110.88 | -44.50 | 85.57 | 4 | 342.28 |
| 155 | 148.47 | 0.013 | 0.095 | 0.00 | 3.29 | 111.28 | 66.98 | 181.56 | 2 | 363.12 |
| 156 | 148.70 | 0.034 | 0.096 | 0.00 | 9.34 | 112.45 | 179.63 | 301.42 | 4 | 1205.67 |
| 157 | 148.92 | 0.055 | 0.092 | -0.02 | -36.28 | 107.94 | 287.76 | 359.41 | 2 | 718.86 |
| 158 | 149.15 | 0.075 | 0.091 | 0.00 | -9.18 | 106.77 | 394.73 | 492.12 | 4 | 1968.49 |
| 159 | 149.37 | 0.095 | 0.088 | -0.01 | -29.95 | 103.05 | 497.97 | 571.07 | 2 | 1142.14 |
| 160 | 149.59 | 0.113 | 0.080 | 0.03 | -70.50 | 94.30 | 592.44 | 616.23 | 4 | 2464.94 |
| 161 | 149.82 | 0.128 | 0.071 | -0.04 | -91.95 | 82.88 | 675.46 | 666.39 | 2 | 1332.78 |
| 162 | 150.04 | 0.143 | 0.063 | -0.03 | -69.51 | 74.26 | 749.84 | 754.57 | 4 | 3018.28 |
| 163 | 150.26 | 0.154 | 0.051 | -0.05 | -114.94 | 58.97 | 809.91 | 754.94 | 2 | 1509.88 |
| 164 | 150.49 | 0.165 | 0.040 | -0.05 | -106.93 | 46.08 | 856.67 | 796.37 | 4 | 3185.48 |
| 165 | 150.71 | 0.171 | 0.035 | -0.02 | -47.73 | 40.75 | 897.50 | 890.52 | 2 | 1781.03 |
| 166 | 150.93 | 0.177 | 0.030 | -0.02 | -41.15 | 35.64 | 933.20 | 927.69 | 4 | 3710.77 |
| 167 | 151.15 | 0.183 | 0.024 | -0.03 | -59.80 | 28.21 | 961.46 | 929.87 | 2 | 1859.75 |
| 168 | 151.38 | 0.187 | 0.020 | -0.02 | -34.56 | 23.92 | 985.42 | 924.78 | 4 | 3899.12 |
| 169 | 151.61 | 0.191 | 0.015 | -0.02 | -51.02 | 17.58 | 1005.04 | 969.60 | 2 | 1939.19 |
| 170 | 151.83 | 0.192 | 0.008 | -0.03 | -67.48 | 9.20 | 1012.25 | 953.97 | 4 | 3815.89 |
| 171 | 152.05 | 0.193 | 0.002 | -0.03 | -56.51 | 2.18 | 1014.44 | 960.11 | 2 | 1920.22 |
| 172 | 152.28 | 0.192 | -0.003 | -0.02 | -44.99 | -3.41 | 1011.62 | 962.65 | 4 | 3850.52 |
| 173 | 152.50 | 0.191 | -0.007 | -0.02 | -36.21 | -7.90 | 1008.11 | 958.99 | 2 | 1917.98 |
| 174 | 152.72 | 0.189 | -0.008 | -0.01 | -15.91 | -9.88 | 993.21 | 957.42 | 4 | 3869.67 |
| 175 | 152.95 | 0.186 | -0.012 | -0.02 | -35.11 | -14.24 | 978.94 | 929.59 | 2 | 1859.12 |
| 176 | 153.17 | 0.182 | -0.020 | -0.03 | -71.52 | -21.10 | 955.82 | 861.38 | 4 | 3445.50 |
| 177 | 153.39 | 0.175 | -0.028 | 0.04 | -76.25 | -32.57 | 923.17 | 814.33 | 2 | 1528.67 |
| 178 | 153.62 | 0.167 | -0.038 | 0.04 | -94.36 | -44.29 | 878.79 | 740.14 | 4 | 2960.54 |
| 179 | 153.84 | 0.157 | -0.047 | -0.04 | -86.13 | -54.99 | 823.70 | 682.58 | 2 | 1365.15 |
| 180 | 154.07 | 0.143 | -0.059 | 0.05 | -113.02 | -69.05 | 754.55 | 572.50 | 4 | 2290.01 |
| 181 | 154.29 | 0.128 | -0.067 | -0.04 | -79.50 | -78.90 | 675.50 | 517.10 | 2 | 1034.21 |
| 182 | 154.51 | 0.112 | -0.075 | -0.03 | -69.13 | -87.45 | 587.86 | 431.24 | 4 | 1724.95 |
| 183 | 154.74 | 0.094 | -0.081 | -0.03 | -58.54 | -94.76 | 492.92 | 339.63 | 2 | 679.25 |
| 184 | 154.96 | 0.074 | -0.090 | 0.04 | -83.34 | -105.11 | 387.62 | 199.18 | 4 | 796.70 |
| 185 | 155.18 | 0.054 | -0.089 | 0.00 | 0.88 | -105.00 | 282.43 | 178.31 | 2 | 356.61 |
| 186 | 155.41 | 0.033 | -0.091 | -0.01 | -14.04 | -106.75 | 175.49 | 54.70 | 4 | 218.80 |
| 187 | 155.63 | 0.013 | -0.089 | 0.01 | 16.90 | -104.55 | 70.66 | -17.09 | 2 | 34.19 |
| 188 | 155.85 | -0.006 | -0.088 | 0.01 | 12.30 | -103.12 | -32.65 | -123.47 | 4 | 493.84 |
| 189 | 156.08 | -0.025 | -0.086 | 0.01 | 21.54 | -100.45 | -133.28 | -212.18 | 2 | 424.37 |
| 190 | 156.30 | -0.044 | -0.085 | 0.00 | 8.94 | -99.35 | -232.80 | -322.30 | 4 | 1293.22 |
| 191 | 156.52 | -0.062 | -0.082 | 0.01 | 23.32 | -96.45 | -329.45 | -402.56 | 2 | 805.12 |
| 192 | 156.75 | -0.081 | -0.082 | 0.00 | 1.81 | -96.23 | -425.85 | -520.24 | 4 | 2080.96 |
| 193 | 156.97 | -0.099 | -0.079 | 0.01 | 29.85 | -92.52 | -518.51 | -581.18 | 2 | 1162.37 |

| Key | 1 | 2(m) | z (m/s) | z' | E _A (kN) | E _B (kN) | E _C (kN) | E _D (kN) | E _E (kN) | |
|------|--------|--------|---------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------|
| 0.29 | 157.20 | -0.115 | -0.073 | 0.03 | 55.52 | -85.62 | -604.29 | -634.39 | 4 | 2537.55 |
| 0.10 | 157.62 | -0.130 | -0.069 | 0.02 | 38.07 | -80.89 | -685.33 | -728.14 | 2 | 1456.29 |
| 0.12 | 157.64 | -0.145 | -0.064 | 0.02 | 48.31 | -74.89 | -760.35 | -786.91 | 4 | 3147.63 |
| 0.13 | 157.87 | -0.158 | -0.061 | 0.01 | 26.33 | -71.62 | -832.10 | -877.38 | 2 | 1754.77 |
| 0.14 | 158.09 | -0.171 | -0.056 | 0.02 | 42.79 | -66.30 | -898.52 | -922.03 | 4 | 3688.13 |
| 0.15 | 158.31 | -0.182 | -0.052 | 0.02 | 44.44 | 60.78 | 959.42 | -975.76 | 2 | 1951.52 |
| 0.15 | 158.54 | -0.193 | -0.046 | 0.03 | 57.61 | -51.63 | -1013.14 | -1039.16 | 4 | 4036.66 |
| 0.16 | 158.76 | -0.201 | -0.039 | 0.03 | 59.25 | -46.27 | -1059.49 | -1046.51 | 2 | 2093.02 |
| 0.17 | 158.98 | -0.208 | -0.029 | 0.05 | 101.50 | -33.66 | -1093.22 | -1025.38 | 4 | 4101.54 |
| 0.17 | 159.27 | -0.212 | -0.020 | 0.04 | 81.25 | -23.58 | -1116.81 | -1059.22 | 2 | 2118.44 |
| 0.17 | 159.43 | -0.215 | -0.013 | 0.03 | 66.38 | -15.33 | -1132.20 | -1081.15 | 4 | 4324.58 |
| 0.17 | 159.65 | -0.217 | -0.008 | 0.02 | 45.54 | -9.68 | -1141.89 | -1106.03 | 2 | 2212.06 |
| 0.15 | 159.88 | -0.218 | -0.005 | 0.01 | 27.43 | -5.29 | -1148.17 | -1127.01 | 4 | 4508.04 |
| 0.17 | 160.10 | -0.218 | 0.000 | 0.02 | 51.02 | 0.97 | -1148.19 | -1097.31 | 2 | 2194.03 |
| 0.17 | 160.33 | -0.218 | 0.003 | 0.01 | 25.24 | 3.20 | -1144.93 | -1116.46 | 4 | 4465.82 |
| 0.17 | 160.55 | -0.216 | 0.007 | 0.02 | 38.40 | 7.97 | -1136.91 | -1090.53 | 2 | 2181.06 |
| 0.17 | 160.77 | -0.213 | 0.014 | 0.03 | 56.95 | 16.29 | -1120.59 | -1037.37 | 4 | 4149.49 |
| 0.17 | 161.00 | -0.207 | 0.026 | 0.05 | 110.27 | 29.98 | -1090.56 | -950.36 | 2 | 1900.60 |
| 0.18 | 161.22 | -0.201 | 0.030 | 0.02 | 38.95 | 34.82 | -1055.67 | -981.50 | 4 | 3927.59 |
| 0.15 | 161.44 | -0.192 | 0.037 | 0.03 | 69.68 | 43.48 | -1012.12 | -898.97 | 2 | 1797.93 |
| 0.15 | 161.67 | -0.182 | 0.045 | 0.04 | 77.90 | 53.15 | -958.87 | -827.81 | 4 | 3311.25 |
| 0.14 | 161.89 | -0.171 | 0.051 | 0.03 | 56.51 | 60.17 | -898.59 | -781.91 | 2 | 1563.82 |
| 0.13 | 162.11 | -0.159 | 0.055 | 0.01 | 15.35 | 62.08 | -836.40 | -758.96 | 4 | 3025.84 |
| 0.12 | 162.34 | -0.146 | 0.059 | 0.03 | 62.54 | 69.85 | -766.43 | -634.04 | 2 | 1268.07 |
| 0.10 | 162.56 | -0.131 | 0.066 | 0.03 | 59.86 | 77.27 | -689.01 | -551.94 | 4 | 2207.75 |
| 0.09 | 162.79 | -0.115 | 0.071 | 0.02 | 50.33 | 83.52 | -605.33 | -471.57 | 2 | 943.15 |
| 0.08 | 163.01 | -0.098 | 0.078 | 0.03 | 62.16 | 91.24 | -512.94 | -350.55 | 4 | 1442.19 |
| 0.06 | 163.23 | -0.079 | 0.086 | 0.04 | 74.23 | 100.46 | -413.31 | -238.62 | 2 | 477.24 |
| 0.05 | 163.45 | -0.058 | 0.090 | 0.02 | 44.22 | 105.95 | -307.16 | -157.00 | 4 | 627.98 |
| 0.02 | 163.68 | -0.038 | 0.092 | 0.01 | 18.05 | 108.19 | -138.78 | -72.34 | 2 | 145.07 |
| 0.02 | 163.90 | -0.018 | 0.089 | -0.01 | -28.75 | 104.62 | -91.97 | -18.10 | 4 | 72.38 |
| 0.00 | 164.13 | 0.001 | 0.086 | -0.01 | -26.73 | 91.30 | 7.51 | 82.08 | 2 | 164.16 |
| 0.02 | 164.35 | 0.019 | 0.080 | -0.03 | -58.12 | 94.08 | 101.76 | 37.72 | 4 | 550.90 |
| 0.02 | 164.57 | 0.035 | 0.076 | -0.02 | -43.36 | 86.70 | 90.62 | 235.96 | 2 | 471.92 |
| 0.04 | 164.80 | 0.052 | 0.071 | -0.07 | -43.01 | 83.35 | 274.12 | 317.46 | 4 | 1257.85 |
| 0.05 | 165.02 | 0.068 | 0.071 | 0.00 | 2.19 | 83.63 | 357.90 | 443.72 | 2 | 887.04 |
| 0.07 | 165.25 | 0.083 | 0.067 | -0.02 | -35.17 | 79.26 | 437.30 | 481.39 | 4 | 1925.57 |
| 0.08 | 165.47 | 0.098 | 0.065 | -0.01 | -22.22 | 76.50 | 513.94 | 568.22 | 2 | 1136.43 |
| 0.09 | 165.69 | 0.112 | 0.063 | -0.01 | -24.14 | 73.50 | 587.57 | 636.93 | 4 | 2547.72 |
| 0.10 | 165.92 | 0.125 | 0.061 | 0.01 | -17.34 | 71.35 | 659.04 | 713.05 | 2 | 1426.11 |
| 0.11 | 166.14 | 0.138 | 0.058 | -0.01 | -21.95 | 68.62 | 727.79 | 774.46 | 4 | 3097.85 |
| 0.12 | 166.36 | 0.151 | 0.057 | -0.01 | -15.36 | 66.71 | 794.62 | 845.97 | 2 | 1691.94 |
| 0.13 | 166.59 | 0.164 | 0.057 | 0.00 | 1.10 | 66.85 | 861.59 | 929.54 | 4 | 3718.14 |
| 0.14 | 166.81 | 0.176 | 0.053 | -0.02 | -36.21 | 62.75 | 924.05 | 997.20 | 2 | 1900.39 |
| 0.15 | 167.03 | 0.186 | 0.048 | -0.02 | -45.54 | 56.76 | 980.85 | 1097.01 | 4 | 3968.04 |
| 0.15 | 167.25 | 0.195 | 0.038 | -0.05 | -99.85 | 44.29 | 1025.22 | 1669.67 | 2 | 1939.34 |
| 0.15 | 167.48 | 0.201 | 0.027 | -0.05 | -97.66 | 32.16 | 1057.45 | 1991.95 | 4 | 3967.82 |
| 0.16 | 167.71 | 0.204 | 0.015 | -0.05 | -113.02 | 18.13 | 1075.60 | 1980.71 | 2 | 1961.43 |

| Elem | t | x(m) | z (m/s) | z' (m/s ²) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | E _x (kN) | P _x | E _y (kN) | P _y | E _z (kN) | P _z | E _x x E _y |
|------|--------|--------|---------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------------------|
| 016 | 167.91 | 0.206 | 0.008 | -0.33 | -73.52 | 8.99 | 1084.62 | 1020.10 | 4 | 4080.38 | | | | |
| 016 | 168.15 | 0.206 | 0.010 | -0.04 | -76.81 | -0.55 | 1084.07 | 1006.72 | 2 | 2013.43 | | | | |
| 016 | 168.38 | 0.205 | -0.003 | -0.01 | -25.24 | 3.68 | 1080.38 | 1051.47 | 4 | 4205.87 | | | | |
| 016 | 168.60 | 0.204 | -0.006 | -0.01 | -26.88 | -7.02 | 1075.35 | 1039.45 | 2 | 2078.90 | | | | |
| 016 | 168.82 | 0.201 | -0.012 | -0.03 | -61.45 | -14.65 | 1058.67 | 982.58 | 4 | 3930.31 | | | | |
| 016 | 169.05 | 0.197 | -0.019 | -0.03 | -65.84 | -22.83 | 1035.85 | 947.14 | 2 | 1894.28 | | | | |
| 016 | 169.27 | 0.191 | -0.028 | -0.04 | -81.20 | -32.91 | 1002.83 | 888.72 | 4 | 3554.89 | | | | |
| 016 | 169.49 | 0.182 | 0.037 | -0.04 | -85.04 | -43.48 | 959.28 | 830.77 | 2 | 1561.53 | | | | |
| 016 | 169.72 | 0.172 | -0.046 | -0.04 | -82.81 | -53.77 | 905.42 | 768.81 | 4 | 3075.24 | | | | |
| 016 | 169.94 | 0.161 | -0.051 | -0.02 | -44.99 | -59.35 | 845.96 | 741.62 | 2 | 1483.23 | | | | |
| 016 | 170.16 | 0.148 | -0.057 | -0.03 | -56.35 | -66.85 | 778.99 | 651.79 | 4 | 2607.16 | | | | |
| 016 | 170.39 | 0.135 | -0.059 | -0.01 | -19.20 | -69.23 | 709.63 | 621.19 | 2 | 1242.39 | | | | |
| 016 | 170.61 | 0.121 | -0.063 | -0.02 | -41.09 | -74.34 | 635.16 | 519.73 | 4 | 2078.91 | | | | |
| 016 | 170.84 | 0.106 | -0.065 | -0.01 | -13.77 | -76.05 | 558.97 | 469.15 | 2 | 938.31 | | | | |
| 016 | 171.06 | 0.091 | -0.066 | -0.01 | -16.07 | 78.05 | 480.79 | 386.67 | 4 | 1546.67 | | | | |
| 016 | 171.28 | 0.076 | -0.067 | 0.00 | -1.26 | -78.20 | 402.44 | 322.98 | 2 | 645.96 | | | | |
| 016 | 171.51 | 0.061 | -0.067 | 0.00 | -7.79 | -79.17 | 323.13 | 236.17 | 4 | 944.69 | | | | |
| 016 | 171.73 | 0.047 | -0.065 | 0.01 | 18.43 | -76.88 | 246.11 | 187.67 | 2 | 375.34 | | | | |
| 016 | 171.95 | 0.032 | -0.066 | 0.00 | -5.76 | 77.60 | 168.58 | 85.02 | 4 | 340.09 | | | | |
| 016 | 172.18 | 0.017 | -0.066 | 0.00 | -3.68 | -78.05 | 90.19 | 8.46 | 2 | 16.92 | | | | |
| 016 | 172.40 | 0.002 | -0.066 | 0.00 | 3.79 | -77.58 | 12.47 | -61.33 | 4 | 245.32 | | | | |
| 016 | 172.62 | -0.012 | -0.066 | 0.00 | -1.62 | -77.28 | -65.46 | -144.87 | 2 | 289.75 | | | | |
| 016 | 172.85 | -0.027 | -0.067 | 0.00 | -8.44 | -78.83 | -144.43 | -231.20 | 4 | 926.80 | | | | |
| 016 | 173.07 | -0.042 | -0.066 | 0.00 | 6.22 | -78.06 | -222.63 | -294.47 | 2 | 588.93 | | | | |
| 016 | 173.30 | -0.057 | 0.064 | 0.01 | 25.02 | -74.88 | -297.64 | -346.90 | 4 | 1387.59 | | | | |
| 016 | 173.52 | -0.070 | 0.062 | 0.01 | 17.45 | -72.71 | -370.48 | -425.74 | 2 | 851.49 | | | | |
| 016 | 173.74 | -0.083 | -0.058 | 0.02 | 32.31 | -68.70 | -439.36 | -475.68 | 4 | 1907.73 | | | | |
| 016 | 173.97 | -0.096 | -0.054 | 0.02 | 44.99 | -63.11 | -502.52 | -520.64 | 2 | 1041.29 | | | | |
| 016 | 174.19 | -0.106 | 0.049 | 0.02 | 49.49 | -56.96 | -559.59 | -567.06 | 4 | 2268.25 | | | | |
| 016 | 174.41 | -0.116 | -0.045 | 0.02 | 36.26 | -52.46 | -612.14 | -628.33 | 2 | 1256.66 | | | | |
| 016 | 174.64 | -0.124 | 0.040 | 0.02 | 46.41 | -46.69 | -658.91 | -659.19 | 4 | 2636.77 | | | | |
| 016 | 174.86 | -0.133 | 0.036 | 0.02 | 39.12 | -41.83 | -700.82 | -703.54 | 2 | 1407.08 | | | | |
| 016 | 175.08 | -0.140 | 0.031 | 0.03 | 39.45 | -36.93 | -737.82 | -735.31 | 4 | 2941.24 | | | | |
| 016 | 175.31 | -0.147 | -0.029 | 0.01 | 24.69 | -33.87 | -771.75 | -780.93 | 2 | 1561.86 | | | | |
| 016 | 175.53 | -0.152 | -0.024 | 0.02 | 49.92 | -27.67 | -799.47 | -777.21 | 4 | 3108.84 | | | | |
| 016 | 175.75 | -0.156 | -0.018 | 0.03 | 54.31 | -20.92 | -820.43 | -787.03 | 2 | 1574.06 | | | | |
| 016 | 175.98 | -0.159 | -0.013 | 0.02 | 44.74 | -15.40 | -835.85 | -806.82 | 4 | 3227.26 | | | | |
| 016 | 176.20 | -0.160 | -0.006 | 0.03 | 70.77 | -6.61 | -842.48 | -778.31 | 2 | 1556.62 | | | | |
| 016 | 176.43 | -0.159 | 0.004 | 0.04 | 92.72 | 4.97 | -837.56 | -739.94 | 4 | 2959.74 | | | | |
| 016 | 176.65 | -0.157 | 0.011 | 0.03 | 63.64 | 12.81 | -824.73 | -748.27 | 2 | 1496.55 | | | | |
| 016 | 176.87 | -0.153 | 0.018 | 0.03 | 65.84 | 20.99 | -803.70 | -716.88 | 4 | 2867.51 | | | | |
| 016 | 177.10 | -0.147 | 0.028 | 0.04 | 92.17 | 32.44 | -771.21 | -646.60 | 2 | 1293.20 | | | | |
| 016 | 177.32 | -0.139 | 0.032 | 0.02 | 38.40 | 37.21 | -733.93 | -658.32 | 4 | 2633.29 | | | | |
| 016 | 177.54 | -0.132 | 0.035 | 0.02 | 32.57 | 41.23 | -692.63 | -619.03 | 2 | 1238.07 | | | | |
| 016 | 177.77 | -0.123 | 0.039 | 0.02 | 34.03 | 45.45 | -647.10 | -567.63 | 4 | 2270.52 | | | | |
| 016 | 177.99 | -0.114 | 0.040 | 0.01 | 13.17 | 47.09 | -599.92 | -539.67 | 2 | 1079.34 | | | | |
| 016 | 178.21 | -0.103 | 0.041 | 0.00 | 6.86 | 47.94 | -551.90 | -497.10 | 4 | 1988.41 | | | | |
| 016 | 178.44 | -0.095 | 0.044 | 0.01 | 25.68 | 51.13 | -500.68 | -423.88 | 2 | 847.75 | | | | |

| | Q185 | L186 | Q187 | F1 (Q18) | F2 (Q19) | F3 (Q20) | F4 (Q21) | F5 (Q22) | FS | F x FS |
|------|------|------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|--------|
| Q185 | 4078 | L186 | 4079 | 11,28 | 52,9 | -46,00 | -383,74 | 4 | 1514,96 | |
| Q186 | L187 | 4080 | 57,52 | 52,48 | -388,42 | -273,43 | 2 | 546,85 | | |
| Q187 | L188 | 4081 | 63,79 | 52,28 | -220,91 | -189,83 | 4 | 759,32 | | |
| Q188 | L189 | 4082 | 40,43 | 72,41 | -248,37 | -138,53 | 2 | 271,06 | | |
| Q189 | L190 | 4083 | 46,96 | 78,24 | -189,09 | -44,79 | 4 | 179,14 | | |
| Q190 | L191 | 4084 | 40,2 | 52,0 | -84,25 | 50,62 | 2 | 121,24 | | |
| Q191 | L192 | 4085 | 43,12 | 52,75 | -5,84 | 33,28 | 4 | 133,13 | | |
| Q192 | L193 | 4086 | -21,28 | 76,96 | 72,60 | 117,74 | 1 | 117,74 | | |
| SUM | | | | | | | | | 6800577,65 | |

$$= \frac{1}{3} \times \text{AT} \times (\text{SUM}(F_1 \times \text{FS}))$$

$$= \frac{1}{3} \times (180,25 - 180) \times 6800577,65$$

$$= 506885,13$$

Fungsi amplitudo puncak (peak - up):

| Cycle (n) | Time (s) | Amplitude (cm) | Interval time per cycle (s) | Logarithmic Decrement | Damping Ratio (ζ) | Heave Frequency (damped) (rad/s) | Heave Frequency (undamped) (rad/s) |
|---------------------------|----------|----------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| - | 0,46 | 2,43 | - | - | - | - | - |
| 1 | 1,98 | 1,57 | 1,52 | 0,436 | 0,069 | 4,315 | 4,326 |
| 2 | 3,46 | 1,15 | 1,48 | 0,372 | 0,059 | 4,315 | 4,323 |
| 3 | 4,94 | 0,78 | 1,48 | 0,377 | 0,060 | 4,315 | 4,323 |
| 4 | 6,38 | 0,55 | 1,44 | 0,371 | 0,059 | 4,315 | 4,323 |
| 5 | 7,81 | 0,29 | 1,46 | 0,425 | 0,068 | 4,315 | 4,325 |
| 6 | 9,30 | 0,23 | 1,45 | 0,590 | 0,062 | 4,315 | 4,324 |
| 7 | 10,72 | 0,12 | 1,42 | 0,689 | 0,066 | 4,315 | 4,324 |
| 8 | 12,16 | 0,07 | 1,44 | 0,80 | 0,067 | 4,315 | 4,324 |
| 9 | 13,60 | 0,04 | 1,44 | 0,90 | 0,068 | 4,315 | 4,324 |
| 10 | 15,02 | 0,02 | 1,42 | 0,90 | 0,068 | 4,315 | 4,324 |
| Rerata Interval (T_d) | | | 1,46 | | | | |

| Natural Heave Period (undamped) (s) | Heave Added Mass (kg) | Coeff Added Mass | Heave Spring (N/m) | Heave Damping (N/(m/s)) | Coeff Damping |
|-------------------------------------|---------------------------|------------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| - | - | - | - | - | - |
| 1,455 | 1,528 | 0,093 | 328,505 | 6,58 | 0,182 |
| | Nimmy <i>et al</i> (2013) | | | | |
| | 1,267 | 0,077 | 328,505 | 6,53 | 0,184 |
| Nallayarasu (2012) | | | | | |

| Cycle (n) | Time (s) | Amplitude (cm) | Interval time per cycle (s) | Logarithmic Decrement | Damping Ratio (ζ) | Heave Frequency (damped) (rad/s) | Heave Frequency (undamped) (rad/s) |
|-----------------------------------|----------|----------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | 1,22 | -1,94 | - | - | - | - | - |
| 1 | 2,72 | -1,23 | 1,50 | 0,455 | 0,072 | 4,321 | 4,333 |
| 2 | 4,20 | -0,96 | 1,48 | 0,350 | 0,056 | 4,321 | 4,328 |
| 3 | 5,64 | -0,75 | 1,44 | 0,317 | 0,050 | 4,321 | 4,327 |
| 4 | 7,12 | -0,69 | 1,48 | 0,259 | 0,041 | 4,321 | 4,325 |
| 5 | 8,56 | -0,61 | 1,44 | 0,232 | 0,037 | 4,321 | 4,324 |
| 6 | 9,98 | -0,37 | 1,42 | 0,275 | 0,044 | 4,321 | 4,325 |
| 7 | 11,46 | -0,24 | 1,48 | 0,301 | 0,048 | 4,321 | 4,326 |
| 8 | 12,90 | -0,22 | 1,44 | 0,271 | 0,043 | 4,321 | 4,325 |
| 9 | 14,30 | -0,17 | 1,40 | 0,267 | 0,043 | 4,321 | 4,325 |
| 10 | 15,76 | -0,13 | 1,46 | 0,272 | 0,043 | 4,321 | 4,325 |
| Rerata Interval (T _a) | | | 1,45 | | | | |

| Natural Heave Period (undamped) (s) | Heave Added Mass (kg) | Coeff. Added Mass | Heave Spring (N/m) | Heave Damping (N/(m/s)) | Coeff. Damping |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|----------------|
| - | - | - | - | - | - |
| 1,453 | 1,528 | 0,093 | 328,505 | 6,65 | 0,186 |
| | <i>Nimmy et al (2013)</i> | | | | |
| | 1,267 | 0,077 | 328,505 | 6,60 | 0,187 |
| <i>Nallayarasu (2012)</i> | | | | | |

LAMPIRAN E

**KALKULASI HASIL EKSPERIMEN DIAMETER
RATIO 1.4 KONDISI TERTAMBAT TAVT**

Problemas Resolvidos 1.4

| gpm | θ (mm) | α (mm/s) | r^2 (mm ²) | F_1 (DN) | F_2 (DN) | F_3 (DN) | F_4 (DN) | F_5 (DN) | FS | $F_1 \times FS$ |
|-----|---------------|-----------------|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|----|-----------------|
| 128 | 0,00 | -1,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4576,509 | 4576,51 | 6576,51 | 1 | 6576,51 |
| 128 | 0,22 | -1,10 | 0,67 | 9883,6 | 926,43 | -5791,487 | 5020,54 | 20082,15 | 4 | 20082,15 |
| 128 | 0,43 | -0,95 | 0,69 | 0 | 955,97 | -4981,833 | -1710,25 | 7420,49 | 2 | 7420,49 |
| 128 | 0,67 | -0,79 | 0,71 | 315,22 | 980,29 | -4150,773 | -2910,99 | 11641,95 | 4 | 11641,95 |
| 128 | 0,89 | -0,63 | 0,71 | 0,03 | 990,06 | -3311,832 | -2217,20 | 4434,99 | 2 | 4434,99 |
| 127 | 1,12 | -0,47 | 0,73 | 0,08 | 278,60 | 1016,17 | -2450,767 | -1156,00 | 4 | 4623,99 |
| 129 | 1,34 | -0,30 | 0,74 | 0,05 | 172,75 | 1032,36 | -1575,985 | -370,90 | 2 | 741,79 |
| 129 | 1,57 | -0,13 | 0,75 | 0,03 | 101,09 | 1041,83 | -693,176 | 449,75 | 4 | 1798,99 |
| 129 | 1,79 | 0,04 | 0,75 | 0,01 | 34,94 | 1045,10 | 192,409 | 1272,46 | 2 | 2544,92 |
| 128 | 2,01 | 0,20 | 0,75 | -0,02 | -79,44 | 1037,66 | 1071,685 | 2029,90 | 4 | 8119,61 |
| 129 | 2,24 | 0,37 | 0,73 | -0,08 | -258,78 | 1013,41 | 1930,411 | 2685,04 | 2 | 5370,08 |
| 126 | 2,46 | 0,52 | 0,71 | -0,11 | -366,96 | 979,02 | 2759,997 | 3372,06 | 4 | 13488,23 |
| 128 | 2,68 | 0,68 | 0,68 | -0,09 | -302,48 | 950,67 | 3565,562 | 4213,75 | 2 | 8427,50 |
| 128 | 2,91 | 0,82 | 0,65 | -0,14 | -468,05 | 906,81 | 4333,960 | 4772,72 | 4 | 19090,86 |
| 127 | 3,13 | 0,96 | 0,62 | -0,15 | -499,89 | 859,96 | 5062,660 | 5422,73 | 2 | 10845,46 |
| 127 | 3,35 | 1,09 | 0,58 | -0,19 | -626,46 | 801,25 | 5741,613 | 5916,41 | 4 | 23665,64 |
| 127 | 3,58 | 1,21 | 0,54 | -0,19 | -615,31 | 743,59 | 6371,704 | 6499,98 | 2 | 12999,96 |
| 126 | 3,80 | 1,32 | 0,48 | -0,23 | -754,61 | 672,87 | 6941,870 | 6860,13 | 4 | 27440,51 |
| 124 | 4,02 | 1,42 | 0,44 | -0,18 | -597,00 | 616,92 | 7464,628 | 7484,55 | 2 | 14969,09 |
| 121 | 4,25 | 1,51 | 0,40 | -0,18 | -589,04 | 561,72 | 7940,609 | 7913,28 | 4 | 31653,14 |
| 127 | 4,47 | 1,59 | 0,36 | -0,20 | -668,64 | 499,06 | 8363,493 | 8193,91 | 2 | 16387,81 |
| 123 | 4,70 | 1,66 | 0,31 | -0,22 | -716,41 | 431,92 | 8729,487 | 8445,06 | 4 | 33780,01 |
| 123 | 4,92 | 1,72 | 0,26 | -0,23 | -764,17 | 360,31 | 9034,798 | 8630,94 | 2 | 17261,88 |
| 121 | 5,14 | 1,76 | 0,19 | -0,29 | -971,13 | 269,30 | 9262,991 | 8361,16 | 4 | 34244,64 |
| 121 | 5,37 | 1,79 | 0,13 | -0,28 | -915,43 | 183,51 | 9418,491 | 8686,59 | 2 | 17373,19 |
| 125 | 5,59 | 1,81 | 0,08 | -0,22 | -724,37 | 115,63 | 9516,468 | 8907,73 | 4 | 35630,92 |
| 125 | 5,81 | 1,81 | 0,03 | -0,25 | -835,81 | 37,30 | 9548,074 | 8749,57 | 2 | 17499,13 |

| Node | x (m) | y (m) | z (m) | θ_x (rad) | θ_y (rad) | θ_z (rad) | F_x (kN) | F_y (kN) | F_z (kN) | M_x (kNm) | M_y (kNm) | M_z (kNm) | FS | $F_x \times FS$ |
|------|-------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------------|
| 1 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1 | 0.00 |
| 2 | 4.04 | 1.81 | -0.03 | -0.28 | -0.31 | -0.28 | -831.73 | -42.57 | 9512.047 | 8617.80 | 8617.80 | 4 | 34471.19 | |
| 3 | 6.26 | 1.79 | -0.08 | -0.24 | -0.24 | -0.24 | -780.09 | -115.63 | 9418.066 | 8318.33 | 8318.33 | 2 | 17036.71 | |
| 4 | 6.48 | 1.76 | -0.14 | -0.26 | -0.26 | -0.26 | -851.73 | -195.65 | 9248.452 | 8201.28 | 8201.28 | 4 | 32805.12 | |
| 5 | 6.71 | 1.71 | -0.20 | -0.26 | -0.26 | -0.26 | -867.65 | -276.76 | 9013.938 | 7869.53 | 7869.53 | 2 | 15739.07 | |
| 6 | 6.93 | 1.66 | -0.25 | -0.20 | -0.20 | -0.20 | -676.61 | -340.16 | 8723.694 | 7708.92 | 7708.92 | 4 | 30835.70 | |
| 7 | 7.16 | 1.59 | -0.29 | -0.19 | -0.19 | -0.19 | -628.84 | -399.10 | 8287.514 | 7398.57 | 7398.57 | 2 | 14779.14 | |
| 8 | 7.38 | 1.52 | -0.33 | -0.17 | -0.17 | -0.17 | -573.12 | -452.81 | 8003.821 | 6977.89 | 6977.89 | 4 | 27911.56 | |
| 9 | 7.60 | 1.44 | -0.36 | -0.16 | -0.16 | -0.16 | -541.28 | -503.53 | 7577.144 | 6532.33 | 6532.33 | 2 | 13064.65 | |
| 10 | 7.83 | 1.37 | -0.40 | -0.17 | -0.17 | -0.17 | -549.24 | -555.01 | 7106.852 | 6002.60 | 6002.60 | 4 | 24010.41 | |
| 11 | 8.05 | 1.25 | -0.44 | -0.20 | -0.20 | -0.20 | -460.64 | -616.92 | 6584.094 | 5306.49 | 5306.49 | 2 | 10672.97 | |
| 12 | 8.27 | 1.14 | -0.48 | -0.16 | -0.16 | -0.16 | -542.08 | -667.72 | 6018.289 | 4808.49 | 4808.49 | 4 | 19231.95 | |
| 13 | 8.50 | 1.03 | -0.51 | -0.14 | -0.14 | -0.14 | -473.62 | -712.11 | 5414.874 | 4229.14 | 4229.14 | 2 | 8458.28 | |
| 14 | 8.72 | 0.91 | -0.54 | -0.12 | -0.12 | -0.12 | -408.35 | -750.38 | 4779.031 | 3620.30 | 3620.30 | 4 | 14481.21 | |
| 15 | 8.94 | 0.78 | -0.57 | -0.12 | -0.12 | -0.12 | -386.86 | -786.63 | 4112.467 | 2938.98 | 2938.98 | 2 | 5877.95 | |
| 16 | 9.17 | 0.65 | -0.58 | -0.05 | -0.05 | -0.05 | -360.00 | -801.63 | 3403.198 | 2471.58 | 2471.58 | 4 | 9886.30 | |
| 17 | 9.39 | 0.52 | -0.59 | -0.05 | -0.05 | -0.05 | -322.83 | -815.95 | 2741.792 | 1773.01 | 1773.01 | 2 | 3546.02 | |
| 18 | 9.62 | 0.39 | -0.60 | -0.04 | -0.04 | -0.04 | -318.60 | -827.06 | 2040.968 | 1095.30 | 1095.30 | 4 | 4381.20 | |
| 19 | 9.84 | 0.25 | -0.60 | -0.01 | -0.01 | -0.01 | -31.04 | -829.97 | 1337.679 | 476.66 | 476.66 | 2 | 953.32 | |
| 20 | 10.06 | 0.12 | -0.59 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 60.50 | -824.30 | 639.193 | -124.61 | -124.61 | 4 | -498.45 | |
| 21 | 10.29 | -0.01 | -0.59 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 19.88 | -822.44 | -57.714 | -860.28 | -860.28 | 2 | 1720.56 | |
| 22 | 10.51 | -0.14 | -0.58 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 121.64 | -811.10 | -245.089 | -1435.07 | -1435.07 | 4 | -5740.26 | |
| 23 | 10.73 | -0.27 | -0.57 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 170.32 | -795.14 | -1418.779 | -2043.59 | -2043.59 | 2 | -4087.18 | |
| 24 | 10.96 | -0.39 | -0.56 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 180.27 | -777.68 | -2077.757 | -2669.17 | -2669.17 | 4 | -10676.68 | |
| 25 | 11.18 | -0.52 | -0.54 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 246.76 | -754.55 | -2717.140 | -3224.93 | -3224.93 | 2 | -6449.86 | |
| 26 | 11.40 | -0.63 | -0.52 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 296.91 | -726.73 | -3332.945 | -3762.76 | -3762.76 | 4 | -15051.06 | |
| 27 | 11.63 | -0.75 | -0.50 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 333.53 | -695.47 | -3922.204 | -4284.21 | -4284.21 | 2 | -8568.42 | |
| 28 | 11.85 | -0.85 | -0.48 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 371.73 | -660.64 | -4482.064 | -4770.97 | -4770.97 | 4 | -19083.86 | |
| 29 | 12.07 | -0.95 | -0.44 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 458.50 | -617.67 | -5003.454 | -5164.62 | -5164.62 | 2 | -10329.24 | |

| z(cm) | l | z(cm) | z'(m/s) | z''(m/s ²) | E _x (N) | E _y (N) | E _z (N) | F _x (N) | F _y (N) | F _z (N) | PS | F _y x1/S |
|-------|-------|-------|---------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----|---------------------|
| 0.83 | 12.33 | -1.04 | -0.41 | 0.17 | 54.02 | -565.75 | -548.849 | -5496.58 | 4 | 21986.31 | | |
| 0.90 | 12.52 | -1.12 | -0.37 | 0.17 | 578.20 | -511.52 | -5918.289 | -5851.11 | 2 | 11702.22 | | |
| 0.96 | 12.75 | -1.20 | -0.33 | 0.18 | 585.06 | -456.69 | -6305.269 | -6176.89 | 4 | 24707.56 | | |
| 1.01 | 12.97 | -1.26 | -0.28 | 0.20 | 677.40 | -393.20 | -6638.456 | -6354.26 | 2 | 12708.52 | | |
| 1.05 | 13.19 | -1.31 | -0.24 | 0.20 | 569.44 | -330.47 | -6918.482 | -6579.51 | 4 | 26318.03 | | |
| 1.09 | 13.42 | -1.36 | -0.20 | 0.18 | 597.00 | -274.52 | -7151.100 | -6828.61 | 2 | 13657.23 | | |
| 1.11 | 13.64 | -1.39 | -0.15 | 0.20 | 660.68 | -212.60 | -7331.252 | -6883.17 | 4 | 27532.68 | | |
| 1.13 | 13.86 | -1.42 | -0.10 | 0.22 | 716.41 | -145.47 | -7454.514 | -6883.57 | 2 | 13767.15 | | |
| 1.14 | 14.09 | -1.43 | -0.06 | 0.19 | 644.76 | -85.04 | -7526.575 | -6966.85 | 4 | 27867.41 | | |
| 1.15 | 14.31 | -1.43 | -0.02 | 0.20 | 652.72 | -23.87 | -7546.803 | -6917.95 | 2 | 13835.90 | | |
| 1.14 | 14.53 | -1.43 | 0.03 | 0.22 | 724.37 | 44.01 | -7509.508 | -6741.15 | 4 | 26964.52 | | |
| 1.13 | 14.76 | -1.41 | 0.08 | 0.21 | 684.57 | 108.17 | -7417.852 | -6625.12 | 2 | 13250.24 | | |
| 1.11 | 14.98 | -1.38 | 0.12 | 0.20 | 660.68 | 170.08 | -7273.750 | -6442.96 | 4 | 25771.85 | | |
| 1.08 | 15.21 | -1.35 | 0.17 | 0.20 | 668.64 | 232.74 | -7076.510 | -6175.12 | 2 | 12350.24 | | |
| 1.04 | 15.43 | -1.30 | 0.21 | 0.21 | 692.53 | 297.64 | -6824.297 | -5834.19 | 4 | 23336.51 | | |
| 0.99 | 15.65 | -1.24 | 0.26 | 0.19 | 628.84 | 356.58 | -6522.147 | -5536.73 | 2 | 11073.45 | | |
| 0.94 | 15.88 | -1.17 | 0.30 | 0.18 | 610.54 | 413.79 | -6171.513 | -5147.18 | 4 | 20588.74 | | |
| 0.88 | 16.10 | -1.10 | 0.33 | 0.16 | 515.00 | 462.43 | -5779.666 | -4798.24 | 2 | 9596.48 | | |
| 0.81 | 16.32 | -1.02 | 0.36 | 0.13 | 434.62 | 503.16 | -5333.306 | -4415.53 | 4 | 17662.10 | | |
| 0.75 | 16.55 | -0.93 | 0.38 | 0.09 | 290.54 | 530.39 | -4903.873 | -4082.94 | 2 | 8165.88 | | |
| 0.67 | 16.77 | -0.84 | 0.40 | 0.08 | 262.68 | 555.01 | -4433.581 | -3615.89 | 4 | 14463.57 | | |
| 0.60 | 16.99 | -0.75 | 0.41 | 0.05 | 175.92 | 571.49 | -3949.319 | -3201.91 | 2 | 6403.82 | | |
| 0.52 | 17.22 | -0.66 | 0.43 | 0.06 | 214.92 | 591.63 | -3443.989 | -2641.43 | 4 | 10565.74 | | |
| 0.44 | 17.44 | -0.56 | 0.44 | 0.08 | 264.27 | 616.40 | -2925.674 | -2045.00 | 2 | 4090.00 | | |
| 0.36 | 17.66 | -0.45 | 0.46 | 0.08 | 252.33 | 640.05 | -2381.321 | -1490.94 | 4 | 5963.76 | | |
| 0.28 | 17.89 | -0.35 | 0.47 | 0.05 | 172.73 | 656.23 | -1827.250 | -998.28 | 2 | 1996.56 | | |
| 0.19 | 18.11 | -0.24 | 0.48 | 0.04 | 140.10 | 669.36 | -1260.055 | -450.59 | 4 | 1802.38 | | |
| 0.11 | 18.34 | -0.13 | 0.49 | 0.02 | 81.19 | 676.97 | -686.412 | -71.75 | 2 | 143.51 | | |

| Node | L | q(m) | θ (rads) | δ'' (mm) | V_0 (kN) | V_0 (kN) | F_0 (kN) | F_0 (kN) | FS | ΣF_x (kN) |
|------|-------|------|-----------------|--------------------|------------|------------|------------|---------------|----|-------------------|
| 001 | 18.56 | 0.02 | 0.49 | 0.02 | 74.81 | 683.96 | -106.852 | 651.61 | 4 | 2606.44 |
| 002 | 18.78 | 0.09 | 0.49 | 0.01 | 26.03 | 686.39 | 474.774 | 1187.20 | 2 | 2374.40 |
| 010 | 19.01 | 0.20 | 0.49 | -0.01 | -41.55 | 682.80 | 1053.101 | 1694.05 | 4 | 6776.20 |
| 020 | 19.23 | 0.31 | 0.49 | -0.02 | -74.90 | 675.48 | 1525.480 | 2226.06 | 2 | 4452.11 |
| 030 | 19.45 | 0.41 | 0.47 | -0.06 | -190.25 | 657.65 | 2182.751 | 2650.16 | 4 | 10600.62 |
| 041 | 19.68 | 0.51 | 0.45 | -0.13 | -414.72 | 618.79 | 2707.089 | 2911.16 | 2 | 3822.31 |
| 049 | 19.90 | 0.61 | 0.42 | -0.14 | -452.93 | 576.34 | 3195.460 | 3118.87 | 4 | 13275.49 |
| 059 | 20.12 | 0.69 | 0.39 | -0.13 | -424.27 | 536.58 | 3650.139 | 3762.45 | 2 | 7524.90 |
| 062 | 20.35 | 0.77 | 0.36 | -0.14 | -452.13 | 494.21 | 4068.914 | 4110.99 | 4 | 16443.97 |
| 068 | 20.57 | 0.85 | 0.33 | -0.13 | -440.19 | 452.96 | 4452.734 | 4465.50 | 2 | 8931.00 |
| 073 | 20.80 | 0.91 | 0.30 | -0.12 | -396.41 | 415.81 | 4805.074 | 4824.47 | 4 | 19297.88 |
| 078 | 21.02 | 0.97 | 0.28 | -0.11 | -357.41 | 382.31 | 5129.032 | 5153.94 | 2 | 10307.88 |
| 082 | 21.24 | 1.03 | 0.25 | -0.12 | -394.82 | 345.31 | 5421.637 | 5372.12 | 4 | 21488.52 |
| 086 | 21.47 | 1.08 | 0.22 | -0.12 | -408.35 | 307.04 | 5681.815 | 5580.51 | 2 | 11161.02 |
| 090 | 21.69 | 1.12 | 0.19 | -0.14 | -466.46 | 263.33 | 5904.951 | 5701.82 | 4 | 22807.28 |
| 095 | 21.91 | 1.16 | 0.16 | -0.15 | -493.52 | 217.08 | 6088.896 | 5812.45 | 2 | 11624.90 |
| 098 | 22.14 | 1.18 | 0.12 | -0.17 | -536.41 | 164.94 | 6228.656 | 5837.18 | 4 | 23348.73 |
| 096 | 22.36 | 1.20 | 0.08 | -0.17 | -563.57 | 112.12 | 6323.663 | 5872.21 | 2 | 11744.42 |
| 097 | 22.58 | 1.21 | 0.03 | -0.23 | -758.59 | 41.03 | 6358.429 | 5640.86 | 4 | 22563.46 |
| 096 | 22.81 | 1.21 | -0.02 | -0.20 | -660.68 | -23.89 | 6340.730 | 5659.16 | 2 | 11318.32 |
| 095 | 23.03 | 1.19 | -0.06 | -0.19 | -613.72 | -78.40 | 6274.295 | 5582.17 | 4 | 22328.69 |
| 094 | 23.26 | 1.17 | -0.10 | -0.20 | -670.24 | -141.21 | 6154.636 | 5343.19 | 2 | 10686.37 |
| 091 | 23.48 | 1.14 | -0.14 | -0.19 | -634.42 | -200.67 | 5984.597 | 5149.51 | 4 | 20598.05 |
| 088 | 23.70 | 1.10 | -0.17 | -0.19 | -535.91 | -232.15 | 5787.884 | 5219.82 | 2 | 10439.64 |
| 085 | 23.93 | 1.06 | -0.19 | -0.12 | -388.45 | -268.55 | 5560.323 | 4903.32 | 4 | 19613.28 |
| 081 | 24.15 | 1.01 | -0.22 | -0.14 | -464.67 | -312.04 | 5295.910 | 4519.80 | 2 | 9039.59 |
| 076 | 24.37 | 0.95 | -0.25 | -0.11 | -362.18 | -345.98 | 5002.736 | 4294.57 | 4 | 17178.28 |
| 071 | 24.60 | 0.89 | -0.28 | -0.14 | -451.34 | -388.28 | 4673.721 | 3834.10 | 2 | 7668.21 |

| z(m) | 1 | z(m) | z (m/s) | z' ² (m/s ²) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | F ₃ (kN) | F ₃ (kN) | F ₃ (kN) | FS | F ₃ x FS |
|-------|-------|-------|---------|--|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----|---------------------|
| 0.56 | 24.82 | 0.82 | -0.31 | -0.14 | -465.66 | -431.92 | 4307.727 | 3410.14 | 4 | 13640.57 | | |
| 0.59 | 25.04 | 0.74 | -0.34 | -0.13 | -436.01 | -472.80 | 3907.093 | 2998.08 | 2 | 5996.17 | | |
| 0.53 | 25.27 | 0.66 | -0.36 | -0.07 | -217.31 | -493.16 | 3489.203 | 2778.73 | 4 | 11114.92 | | |
| 0.46 | 25.49 | 0.58 | -0.37 | -0.08 | -263.48 | -517.86 | 3050.390 | 2269.06 | 2 | 4538.11 | | |
| 0.40 | 25.71 | 0.49 | -0.38 | -0.04 | -124.18 | -529.49 | 2601.715 | 1948.05 | 4 | 7792.18 | | |
| 0.33 | 25.94 | 0.41 | -0.39 | -0.06 | -187.86 | -547.10 | 2138.124 | 1403.17 | 2 | 2806.34 | | |
| 0.25 | 26.16 | 0.32 | -0.40 | -0.04 | -131.31 | -559.41 | 1664.102 | 973.35 | 4 | 3893.42 | | |
| 0.18 | 26.39 | 0.22 | -0.41 | -0.05 | -178.31 | -576.12 | 1175.921 | 421.50 | 2 | 843.00 | | |
| 0.11 | 26.61 | 0.13 | -0.41 | 0.01 | 49.35 | -571.49 | 691.659 | 169.52 | 4 | 678.08 | | |
| 0.03 | 26.83 | 0.04 | -0.41 | 0.02 | 80.56 | -563.94 | 213.793 | -269.59 | 2 | 539.19 | | |
| -0.04 | 27.05 | -0.05 | -0.40 | 0.03 | 81.82 | -556.09 | -257.416 | -729.68 | 4 | 2918.73 | | |
| -0.11 | 27.28 | -0.14 | -0.39 | 0.03 | 113.67 | -545.43 | -719.598 | -1151.36 | 2 | 2302.73 | | |
| -0.18 | 27.50 | -0.22 | -0.39 | 0.03 | 102.45 | -535.83 | -1173.645 | -1607.03 | 4 | 6428.13 | | |
| -0.25 | 27.73 | -0.31 | -0.39 | 0.00 | 7.16 | -535.16 | -1627.123 | -2155.12 | 2 | 4310.24 | | |
| -0.32 | 27.95 | -0.40 | -0.39 | 0.00 | -3.98 | -535.54 | -2080.918 | -2620.43 | 4 | 10481.73 | | |
| -0.38 | 28.17 | -0.48 | -0.37 | 0.05 | 175.92 | -519.05 | -2520.742 | -2863.87 | 2 | 5727.75 | | |
| -0.45 | 28.40 | -0.56 | -0.36 | 0.06 | 187.86 | -501.44 | -2945.649 | -3259.24 | 4 | 13036.94 | | |
| -0.51 | 28.62 | -0.64 | -0.34 | 0.08 | 277.81 | -475.41 | -3348.495 | -3546.10 | 2 | 7092.20 | | |
| -0.57 | 28.85 | -0.71 | -0.32 | 0.10 | 321.59 | -445.27 | -3725.803 | -3849.49 | 4 | 15397.96 | | |
| -0.62 | 29.07 | -0.77 | -0.30 | 0.11 | 359.39 | -411.55 | -4074.540 | -4126.30 | 2 | 8252.60 | | |
| -0.67 | 29.29 | -0.83 | -0.27 | 0.12 | 405.17 | -373.58 | -4391.103 | -4359.52 | 4 | 17438.08 | | |
| -0.71 | 29.52 | -0.89 | -0.24 | 0.14 | 472.83 | -329.27 | -4670.118 | -4526.56 | 2 | 9053.13 | | |
| -0.75 | 29.74 | -0.93 | -0.20 | 0.17 | 554.82 | -277.28 | -4905.074 | -4627.54 | 4 | 18510.15 | | |
| -0.78 | 29.96 | -0.97 | -0.16 | 0.16 | 522.18 | -228.34 | -5098.564 | -4804.73 | 2 | 9609.45 | | |
| -0.80 | 30.19 | -1.00 | -0.13 | 0.17 | 579.49 | -174.04 | -5266.036 | -4840.58 | 4 | 19362.32 | | |
| -0.81 | 30.41 | -1.02 | -0.09 | 0.15 | 500.69 | -127.11 | -5353.748 | -4980.17 | 2 | 9960.35 | | |
| -0.82 | 30.63 | -1.03 | -0.06 | 0.15 | 484.77 | -81.68 | -5422.965 | -5019.88 | 4 | 20079.53 | | |
| -0.83 | 30.86 | -1.04 | -0.03 | 0.14 | 448.15 | -39.69 | -5456.593 | -5048.13 | 2 | 10096.26 | | |

| Elem | x (mm) | y (mm) | z (mm) | z' (mm/s) | θ' (deg/s) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | F _x (kN) | F _y (kN) | F _z (kN) | FS | F _x x FS |
|------|--------|--------|--------|-----------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----|---------------------|
| 005 | 156.30 | 0.07 | -0.04 | -0.04 | -0.04 | -116.06 | -60.86 | 356.114 | 179.19 | 4 | 716.77 | | | | | |
| 005 | 156.52 | 0.06 | -0.05 | -0.05 | -0.02 | -78.80 | -68.25 | 298.282 | 151.23 | 2 | 302.46 | | | | | |
| 004 | 156.75 | 0.05 | -0.05 | -0.05 | -0.01 | -38.61 | -71.87 | 237.384 | 126.91 | 4 | 507.64 | | | | | |
| 003 | 156.97 | 0.03 | -0.05 | -0.05 | 0.00 | -10.03 | -72.81 | 175.690 | 92.85 | 2 | 185.71 | | | | | |
| 002 | 157.20 | 0.02 | -0.05 | -0.05 | 0.00 | -8.20 | -73.5E | 113.344 | 31.57 | 4 | 126.28 | | | | | |
| 001 | 157.42 | 0.01 | -0.05 | -0.05 | 0.00 | -10.64 | -74.57 | 50.154 | -35.06 | 2 | 70.12 | | | | | |
| 000 | 157.64 | 0.00 | -0.06 | -0.06 | -0.01 | -26.40 | -77.05 | -15.133 | -118.58 | 4 | 474.34 | | | | | |
| 001 | 157.87 | -0.01 | -0.05 | -0.05 | 0.01 | 43.90 | -72.93 | 76.935 | -105.97 | 2 | 211.94 | | | | | |
| 002 | 158.09 | -0.03 | -0.05 | -0.05 | 0.01 | 29.21 | -70.20 | -136.416 | -177.41 | 4 | 709.63 | | | | | |
| 003 | 158.31 | -0.04 | -0.04 | -0.04 | 0.03 | 104.28 | -60.42 | -187.618 | -143.76 | 2 | 287.53 | | | | | |
| 004 | 158.54 | -0.04 | -0.04 | -0.04 | 0.02 | 80.79 | -52.85 | -232.403 | -204.46 | 4 | 817.84 | | | | | |
| 004 | 158.76 | -0.05 | -0.03 | -0.03 | 0.02 | 78.25 | -43.52 | -270.974 | -238.25 | 2 | 476.19 | | | | | |
| 005 | 158.98 | -0.06 | -0.03 | -0.03 | 0.00 | 13.35 | -44.30 | -308.509 | -339.75 | 4 | 1359.00 | | | | | |
| 005 | 159.21 | -0.07 | -0.03 | -0.03 | 0.01 | 29.85 | -41.50 | -343.674 | -335.32 | 2 | 710.64 | | | | | |
| 006 | 159.43 | -0.07 | -0.03 | -0.03 | -0.01 | -24.84 | -43.85 | -380.810 | -449.47 | 4 | 1797.89 | | | | | |
| 006 | 159.66 | -0.08 | -0.03 | -0.03 | 0.00 | 14.81 | -42.44 | -416.771 | -444.40 | 2 | 888.81 | | | | | |
| 007 | 159.88 | -0.09 | -0.03 | -0.03 | 0.01 | 27.86 | -39.83 | -450.520 | -462.49 | 4 | 1849.95 | | | | | |
| 007 | 160.10 | -0.09 | -0.03 | -0.03 | 0.01 | 35.26 | -36.52 | -481.468 | -482.73 | 2 | 965.46 | | | | | |
| 008 | 160.33 | -0.10 | -0.02 | -0.02 | 0.02 | 53.33 | -31.52 | -508.181 | -486.37 | 4 | 1945.50 | | | | | |
| 008 | 160.55 | -0.10 | -0.02 | -0.02 | 0.01 | 35.66 | -28.18 | -532.063 | -524.58 | 2 | 1049.17 | | | | | |
| 008 | 160.77 | -0.11 | -0.02 | -0.02 | 0.01 | 31.76 | -25.21 | -553.422 | -546.87 | 4 | 2187.47 | | | | | |
| 009 | 161.00 | -0.11 | -0.01 | -0.01 | 0.02 | 80.95 | -17.62 | -568.352 | -505.02 | 2 | 1010.04 | | | | | |
| 009 | 161.22 | -0.11 | -0.01 | -0.01 | 0.02 | 77.13 | -10.39 | -577.158 | -510.42 | 4 | 2041.66 | | | | | |
| 009 | 161.44 | -0.11 | 0.00 | 0.02 | 65.19 | -4.28 | -580.786 | -519.87 | 2 | 1039.73 | | | | | | |
| 009 | 161.67 | -0.11 | 0.00 | 0.02 | 82.15 | 3.42 | -577.891 | -492.33 | 4 | 1569.31 | | | | | | |
| 009 | 161.89 | -0.11 | 0.00 | 0.01 | 23.40 | 5.61 | -573.137 | -544.12 | 2 | 1088.25 | | | | | | |
| 009 | 162.11 | -0.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -13.93 | 4.30 | -569.490 | -579.12 | 4 | 2316.46 | | | | | |
| 009 | 162.34 | -0.11 | 0.00 | -0.02 | -61.85 | -1.49 | -570.754 | -634.10 | 2 | 1268.19 | | | | | | |

| t (cm) | t | z (cm) | z (cm/s) | z^2 (cm ² /s ²) | F _A (kN) | F _B (kN) | F _C (kN) | F ₁ (mknks) (kN) | FS | F ₁ x FS |
|--------|--------|--------|----------|--|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|----|---------------------|
| -0.09 | 162.56 | -0.11 | -0.01 | -0.02 | -78.25 | -8.82 | -578.232 | -665.30 | 4 | 2661.22 |
| -0.09 | 162.75 | -0.11 | -0.01 | -0.01 | -43.06 | -12.86 | -589.130 | -645.05 | 2 | 1290.11 |
| -0.09 | 163.01 | -0.11 | -0.01 | 0.01 | 24.99 | -10.52 | -598.043 | -585.57 | 4 | 2334.26 |
| -0.09 | 163.23 | -0.12 | -0.01 | 0.00 | 5.97 | -9.96 | -606.481 | -610.47 | 2 | 1220.94 |
| -0.08 | 163.47 | -0.12 | 0.00 | 0.03 | 96.87 | -0.88 | -607.227 | -511.23 | 4 | 2044.93 |
| -0.09 | 163.68 | -0.11 | 0.01 | 0.04 | 118.53 | 10.23 | -598.561 | -469.81 | 2 | 939.62 |
| -0.09 | 163.90 | -0.11 | 0.01 | 0.03 | 94.65 | 19.10 | -582.379 | -468.64 | 4 | 1874.55 |
| -0.09 | 164.13 | -0.11 | 0.02 | 0.02 | 67.34 | 25.41 | -560.849 | -468.10 | 2 | 936.20 |
| -0.08 | 164.35 | -0.10 | 0.03 | 0.03 | 110.64 | 35.78 | -530.533 | -384.11 | 4 | 1536.44 |
| -0.08 | 164.57 | -0.09 | 0.03 | 0.02 | 66.71 | 42.03 | -494.920 | -386.19 | 2 | 772.37 |
| -0.07 | 164.80 | -0.09 | 0.03 | 0.02 | 60.42 | 47.69 | -454.509 | -345.40 | 4 | 1385.61 |
| -0.06 | 165.02 | -0.08 | 0.04 | 0.02 | 64.95 | 53.78 | -408.939 | -290.21 | 2 | 580.42 |
| -0.05 | 165.25 | -0.07 | 0.04 | 0.02 | 57.87 | 59.20 | -358.775 | -241.70 | 4 | 966.82 |
| -0.05 | 165.47 | -0.06 | 0.04 | 0.00 | 4.06 | 59.58 | -308.288 | -244.65 | 2 | 489.29 |
| -0.04 | 165.69 | -0.05 | 0.05 | 0.01 | 39.16 | 63.25 | -254.691 | -152.28 | 4 | 609.11 |
| -0.03 | 165.92 | -0.04 | 0.05 | 0.00 | 10.11 | 64.20 | -200.291 | -125.98 | 2 | 251.97 |
| -0.02 | 166.14 | -0.03 | 0.05 | 0.00 | -8.92 | 61.36 | -146.605 | -92.15 | 4 | 368.61 |
| -0.01 | 166.36 | -0.02 | 0.04 | 0.00 | -14.49 | 62.01 | -94.058 | -46.54 | 2 | 93.08 |
| -0.01 | 166.59 | -0.01 | 0.05 | 0.31 | 18.71 | 63.76 | -40.032 | 42.43 | 4 | 169.73 |
| 0.00 | 166.81 | 0.00 | 0.04 | -0.02 | -77.84 | 56.46 | 7.814 | -13.56 | 2 | 27.13 |
| 0.01 | 167.03 | 0.01 | 0.04 | -0.01 | -57.20 | 52.98 | 52.705 | 68.49 | 4 | 273.94 |
| 0.01 | 167.26 | 0.02 | 0.04 | -0.31 | -32.53 | 49.93 | 95.013 | 112.41 | 2 | 224.82 |
| 0.02 | 167.48 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | -10.59 | 48.94 | 136.480 | 174.82 | 4 | 699.28 |
| 0.03 | 167.71 | 0.03 | 0.03 | -0.01 | -40.91 | 45.10 | 174.697 | 178.88 | 2 | 357.77 |
| 0.03 | 167.93 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | -2.87 | 44.83 | 212.687 | 254.65 | 4 | 1018.62 |
| 0.04 | 168.15 | 0.05 | 0.03 | -0.01 | -45.29 | 40.59 | 247.081 | 242.38 | 2 | 484.75 |
| 0.04 | 168.38 | 0.05 | 0.03 | -0.01 | -33.27 | 37.47 | 278.832 | 283.03 | 4 | 1132.12 |
| 0.05 | 168.60 | 0.06 | 0.02 | -0.03 | -88.52 | 29.18 | 303.554 | 244.21 | 2 | 488.43 |

| z (mm) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F_x (kN) | F_y (kN) | F_z (kN) | F_x (kN) | F_y (kN) | F_z (kN) | $F_x \times FS$ | |
|--------|------------|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------|---------|
| 0.05 | 168.82 | 0.06 | 0.02 | -0.01 | -38.53 | 25.56 | 325.216 | 312.25 | 4 | 1249.02 |
| 0.05 | 169.05 | 0.07 | 0.02 | 0.00 | -14.09 | 24.24 | 345.760 | 355.91 | 2 | 711.83 |
| 0.06 | 169.27 | 0.07 | 0.02 | -0.01 | -28.10 | 21.61 | 364.072 | 357.58 | 4 | 1450.34 |
| 0.06 | 169.49 | 0.07 | 0.01 | -0.01 | -44.42 | 17.45 | 378.857 | 351.89 | 2 | 703.78 |
| 0.06 | 169.72 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 6.61 | 18.07 | 394.167 | 418.86 | 4 | 1675.37 |
| 0.06 | 169.94 | 0.08 | 0.01 | -0.02 | -67.50 | 11.74 | 404.116 | 348.36 | 2 | 696.71 |
| 0.06 | 170.10 | 0.08 | 0.00 | -0.03 | -92.10 | 3.11 | 406.752 | 317.77 | 4 | 1271.06 |
| 0.06 | 170.39 | 0.08 | 0.00 | -0.01 | -40.76 | -0.71 | 406.152 | 364.69 | 2 | 729.38 |
| 0.06 | 170.61 | 0.08 | 0.00 | -0.01 | -34.47 | -3.54 | 402.814 | 364.41 | 4 | 1457.63 |
| 0.06 | 170.84 | 0.07 | -0.01 | -0.02 | -72.12 | -10.70 | 393.750 | 310.93 | 2 | 621.87 |
| 0.06 | 171.06 | 0.07 | -0.01 | 0.00 | 13.69 | -9.41 | 385.775 | 360.05 | 4 | 1560.20 |
| 0.06 | 171.28 | 0.07 | -0.01 | -0.01 | -20.22 | -11.31 | 376.190 | 344.66 | 2 | 689.32 |
| 0.06 | 171.51 | 0.07 | -0.01 | -0.01 | -24.04 | -13.56 | 364.698 | 327.10 | 4 | 1308.39 |
| 0.05 | 171.73 | 0.07 | -0.01 | -0.02 | -61.85 | -19.36 | 348.295 | 267.09 | 2 | 534.17 |
| 0.05 | 171.95 | 0.06 | -0.02 | -0.01 | -35.82 | -22.71 | 329.047 | 270.51 | 4 | 1082.05 |
| 0.05 | 172.18 | 0.06 | -0.03 | -0.04 | -132.22 | -35.11 | 299.299 | 131.98 | 2 | 263.95 |
| 0.04 | 172.40 | 0.05 | -0.03 | -0.01 | -42.43 | -39.08 | 266.183 | 184.67 | 4 | 738.70 |
| 0.03 | 172.62 | 0.04 | -0.03 | -0.03 | -87.80 | -47.31 | 226.094 | 90.99 | 2 | 181.97 |
| 0.03 | 172.85 | 0.03 | -0.04 | -0.01 | -31.84 | -50.29 | 183.477 | 101.34 | 4 | 405.37 |
| 0.02 | 173.07 | 0.03 | -0.03 | 0.01 | 43.86 | -46.18 | 144.343 | 142.02 | 2 | 284.04 |
| 0.02 | 173.30 | 0.02 | -0.03 | 0.00 | 14.81 | -44.80 | 106.385 | 76.39 | 4 | 305.58 |
| 0.01 | 173.52 | 0.01 | -0.03 | 0.01 | 42.75 | -40.79 | 71.821 | 73.78 | 2 | 147.55 |
| 0.01 | 173.74 | 0.01 | -0.02 | 0.02 | 80.91 | -33.21 | 43.682 | 91.39 | 4 | 365.56 |
| 0.00 | 173.97 | 0.00 | -0.02 | 0.02 | 50.70 | -28.46 | 19.570 | 41.81 | 2 | 83.62 |
| 0.00 | 174.19 | 0.00 | -0.03 | -0.02 | -80.70 | -36.02 | -10.951 | -127.67 | 4 | 510.68 |
| -0.01 | 174.41 | -0.01 | -0.02 | 0.02 | 72.88 | -29.19 | -35.685 | 8.01 | 2 | 16.02 |
| -0.01 | 174.64 | -0.01 | -0.02 | -0.02 | -57.86 | -34.61 | -65.013 | -157.49 | 4 | 629.94 |
| -0.02 | 174.86 | -0.02 | -0.03 | -0.02 | -63.62 | -40.57 | -99.394 | -203.59 | 2 | 407.18 |

| z (mm) | x (mm) | z (mm/s) | z' (mm/s ²) | F _x (N) | F _y (DN) | F _z (RN) | F _{z'} (scaled) (RN) | FS | F _z x FS |
|--------|--------|----------|-------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|----|---------------------|
| 4.02 | 175.08 | -0.03 | -0.03 | -0.02 | -65.19 | -46.68 | -138.951 | 4 | 1003.31 |
| 4.03 | 175.31 | -0.05 | -0.03 | 0.00 | 0.64 | -46.62 | -178.458 | 2 | 468.89 |
| 4.03 | 175.53 | -0.04 | -0.04 | -0.02 | -69.57 | -53.14 | -223.490 | 4 | 1384.82 |
| 4.04 | 175.75 | -0.05 | -0.04 | 0.00 | -54.9 | -53.66 | -268.958 | 2 | 656.22 |
| 4.05 | 175.98 | -0.06 | -0.04 | 0.00 | 10.59 | -52.67 | -313.585 | 4 | 1422.65 |
| 4.05 | 176.20 | -0.07 | -0.04 | 0.01 | 32.88 | -49.58 | -355.602 | 2 | 744.62 |
| 4.06 | 176.43 | -0.08 | -0.05 | 0.01 | 25.55 | -47.19 | -395.589 | 4 | 1668.91 |
| 4.07 | 176.65 | -0.08 | -0.03 | 0.01 | 34.87 | -43.92 | -432.808 | 2 | 883.73 |
| 4.07 | 176.87 | -0.09 | -0.03 | 0.01 | 49.11 | -39.52 | -466.127 | 4 | 1825.35 |
| 4.08 | 177.10 | -0.09 | -0.02 | 0.01 | 46.65 | -34.95 | -495.741 | 2 | 968.09 |
| 4.08 | 177.32 | -0.10 | -0.02 | 0.02 | 55.24 | -29.77 | -520.965 | 4 | 1981.99 |
| 4.08 | 177.54 | -0.10 | -0.02 | 0.02 | 56.12 | -24.51 | -541.740 | 2 | 1020.27 |
| 4.08 | 177.77 | -0.11 | -0.01 | 0.02 | 64.32 | -18.49 | -557.404 | 4 | 2046.29 |
| 4.09 | 177.99 | -0.11 | -0.01 | 0.02 | 78.45 | -11.13 | -566.835 | 2 | 998.96 |
| 4.09 | 178.21 | -0.11 | 0.00 | 0.02 | 65.95 | -4.95 | -571.026 | 4 | 2039.93 |
| 4.09 | 178.44 | -0.11 | 0.00 | 0.02 | 57.63 | 0.46 | -570.646 | 2 | 1025.11 |
| 4.09 | 178.66 | -0.11 | 0.01 | 0.02 | 74.19 | 7.41 | -564.364 | 4 | 1931.07 |
| 4.08 | 178.89 | -0.11 | 0.01 | 0.02 | 70.13 | 13.98 | -552.518 | 2 | 936.82 |
| 4.08 | 179.11 | -0.10 | 0.01 | 0.01 | 34.94 | 17.25 | -537.897 | 4 | 1942.79 |
| 4.08 | 179.33 | -0.10 | 0.02 | 0.01 | 49.19 | 21.86 | -519.370 | 2 | 896.62 |
| 4.08 | 179.56 | -0.10 | 0.02 | 0.00 | 12.66 | 73.05 | -499.837 | 4 | 1856.52 |
| 4.07 | 179.78 | -0.09 | 0.02 | 0.00 | 0.40 | 23.09 | -480.273 | 2 | 913.58 |
| 4.07 | 180.00 | -0.09 | 0.02 | -0.01 | -20.62 | 21.16 | -462.347 | 4 | 1847.23 |
| 4.07 | 180.23 | -0.08 | 0.01 | 0.00 | -12.18 | 20.01 | -445.387 | 1 | 437.55 |
| | | | | | | | SUM | | 3963942.87 |

$$D_{avg} = \frac{1}{3} \times \Delta T \times \{ \text{SUM}(F_z \times FS) \}$$

$$= \frac{1}{3} \times (180.23 - 180) \times 3963942.87 = 295454.857$$

| Cycle (n) | Time (s) | Amplitude (cm) | Interval time per cycle (s) | Logarithmic Decrement | Damping Ratio (ζ) | Heave Frequency (damped) (rad/s) | Heave Frequency (undamped) (rad/s) |
|---------------------------|----------|----------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| - | 0,52 | 1,45 | - | - | - | - | - |
| 1 | 2,02 | 0,97 | 1,50 | 0,407 | 0,065 | 4,245 | 4,254 |
| 2 | 3,52 | 0,69 | 1,50 | 0,369 | 0,059 | 4,245 | 4,253 |
| 3 | 5,00 | 0,46 | 1,48 | 0,385 | 0,061 | 4,245 | 4,253 |
| 4 | 6,48 | 0,35 | 1,48 | 0,356 | 0,057 | 4,245 | 4,252 |
| 5 | 7,94 | 0,25 | 1,46 | 0,355 | 0,056 | 4,245 | 4,252 |
| 6 | 9,42 | 0,19 | 1,48 | 0,343 | 0,054 | 4,245 | 4,252 |
| 7 | 10,92 | 0,15 | 1,50 | 0,329 | 0,051 | 4,245 | 4,251 |
| 8 | 12,30 | 0,12 | 1,38 | 0,309 | 0,049 | 4,245 | 4,251 |
| 9 | 13,76 | 0,08 | 1,46 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 |
| 10 | 15,32 | 0,06 | 1,56 | 0,316 | 0,050 | 4,245 | 4,251 |
| Rerata Interval (T_D) | | | 1,48 | | | | |

| Natural Heave Period (undamped) (s) | Heave Added Mass (kg) | Coeff. Added Mass | Heave Spring (N/m) | Heave Damping (N/(m/s)) | Coeff. Damping |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|----------------|
| - | - | - | - | - | - |
| 1,478 | 1,946 | 0,119 | 328,505 | 7,82 | 0,212 |
| | <i>Nimmy et al (2013)</i> | | | | |
| | 1,685 | 0,103 | 328,505 | 7,76 | 0,213 |
| <i>Nallayarasu (2012)</i> | | | | | |

LAMPIRAN F

**KALKULASI HASIL EKSPERIMEN DIAMETER
RATIO 1.5 KONDISI TERTAMBAT TAUT**

```
* PROGRAM UNTUK MENCARI DAMPING RATIO DARI SIMULASI NUMERIS
clear;clc;close all
```

```
lspars ca=2; w=0.129; w0=4.43466; b=21.8;
lsparshevplates ca=1.75; v=0.385; w0=4.32; t=17.5;
```

```
ca=1.75;
w=0.385;
w0=4.32;
t=0.02:17.5;
```

```
qca=exp(-v.*t).*(cos(w0*t)+v/w0.*sin(w0*t));
```

```
SA = xisread('Decay-SPAR-H-A2.xls');
A = xisread('Decay-SPAR-H-B-2.xls');
```

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

```
plot(t,q,t1,r1,'r');
```

```
for i=1:length(q) %*****
lenk = length(q);
```

```
Jup = find( ( q(1:lenk-1) < 0 ) & ( q(2:lenk) > 0 ) );
```

```
nJup = length( Jup );
```

```
nwave = nJup - 1;
```

```
xJ1 = k(Jup) + q(Jup) / ( q(Jup) - q(1+Jup) );
```

```
T1 = diff( xJ1 );
```

```
T = T1 / nJup;
```

```
Tn = mean(T);
```

```
for i=1:nwave
```

```
jj = 1+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)
```

```
peax = find(q==y2max(i));
```

```
peax(i)=peax(end);
```

```
pmin = find(q==y2min(i));
```

```
pmin(i)=pmin(end);
```

```
end
```

```
% qp dan dgm lihat di buku futsal no fytat riki gaku
```

```
lpositif
```

```
qp = Q(:,1);
```

```
Qn = abs( (qp(1:end-1)+qp(2:end))/2 );
```

```
dgm = abs( qp(1:end-1) - qp(2:end) );
```

```
lnegatif
```

```
qn = Q(:,2);
```

```
qnm = abs( (qn(1:end-1)+qn(2:end))/2 );
```

```
dgm = abs( qn(1:end-1) - qn(2:end) );
```


Diameter Ratio 1.5

| z(cm) | t | z(m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F _A (kN) | F _B (kN) | F _C (kN) | F _D (reaksi) | FS | F _{3 x FS} |
|-------|------|-------|-------------|----------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|----|---------------------|
| -1.00 | 0.00 | -1.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -6576.51 | -6576.51 | 1 | 6576.51 |
| -0.80 | 0.22 | -1.07 | 0.80 | 3.56 | 19125.68 | 1258.64 | -5641.14 | 14743.19 | 4 | 58972.75 |
| -0.71 | 0.45 | -0.89 | 0.80 | 0.03 | 166.09 | 1269.57 | -4697.64 | -3261.98 | 2 | 6523.96 |
| -0.57 | 0.67 | -0.71 | 0.82 | 0.07 | 358.67 | 1293.17 | -3736.60 | -2084.76 | 4 | 8339.04 |
| -0.42 | 0.89 | -0.52 | 0.83 | 0.05 | 282.25 | 1311.75 | -2761.76 | -1167.77 | 2 | 2335.53 |
| -0.27 | 1.12 | -0.34 | 0.84 | 0.03 | 165.07 | 1322.61 | -1778.85 | -291.17 | 4 | 1164.68 |
| -0.12 | 1.34 | -0.15 | 0.83 | -0.02 | -117.18 | 1314.90 | -801.67 | 396.05 | 2 | 792.10 |
| 0.03 | 1.57 | 0.03 | 0.84 | 0.02 | 132.26 | 1323.60 | 181.98 | 1637.85 | 4 | 6551.38 |
| 0.18 | 1.79 | 0.22 | 0.84 | 0.00 | 4.48 | 1323.90 | 1165.85 | 2404.23 | 2 | 4988.47 |
| 0.32 | 2.01 | 0.40 | 0.82 | -0.09 | -493.38 | 1291.43 | 2125.59 | 2923.65 | 4 | 11694.59 |
| 0.47 | 2.24 | 0.58 | 0.80 | -0.07 | -354.59 | 1268.10 | 3067.99 | 3981.49 | 2 | 7962.98 |
| 0.61 | 2.46 | 0.76 | 0.78 | -0.09 | -457.51 | 1237.99 | 3988.01 | 4768.49 | 4 | 19073.97 |
| 0.74 | 2.68 | 0.93 | 0.75 | -0.13 | -672.51 | 1193.73 | 4875.15 | 5396.37 | 2 | 10792.74 |
| 0.87 | 2.91 | 1.09 | 0.72 | -0.17 | -938.45 | 1131.97 | 5716.38 | 5909.90 | 4 | 23639.62 |
| 0.98 | 3.13 | 1.24 | 0.69 | -0.12 | -653.15 | 1088.99 | 6525.68 | 6961.52 | 2 | 13923.04 |
| 1.11 | 3.35 | 1.39 | 0.65 | -0.18 | -957.81 | 1025.96 | 7288.13 | 7356.27 | 4 | 29423.09 |
| 1.22 | 3.58 | 1.52 | 0.60 | -0.22 | -1192.17 | 947.50 | 7992.27 | 7747.60 | 2 | 15495.21 |
| 1.33 | 3.80 | 1.64 | 0.55 | -0.22 | -1161.60 | 871.06 | 8639.61 | 8349.06 | 4 | 33396.26 |
| 1.40 | 4.02 | 1.75 | 0.50 | -0.22 | -1192.17 | 792.60 | 9228.64 | 8829.07 | 2 | 17658.14 |
| 1.48 | 4.25 | 1.85 | 0.44 | -0.27 | -1477.48 | 695.37 | 9745.41 | 8963.31 | 4 | 35853.22 |
| 1.55 | 4.47 | 1.94 | 0.38 | -0.27 | -1426.53 | 601.49 | 10192.42 | 9367.38 | 2 | 18734.76 |
| 1.61 | 4.70 | 2.01 | 0.33 | -0.22 | -1171.79 | 524.38 | 10582.11 | 9934.70 | 4 | 39738.80 |
| 1.66 | 4.92 | 2.07 | 0.28 | -0.25 | -1345.01 | 435.86 | 10906.03 | 9996.88 | 2 | 19993.76 |
| 1.70 | 5.14 | 2.12 | 0.22 | -0.24 | -1304.26 | 350.03 | 11166.16 | 10211.94 | 4 | 40847.75 |
| 1.73 | 5.37 | 2.16 | 0.17 | -0.23 | -1243.12 | 268.22 | 11365.49 | 10590.60 | 2 | 20781.20 |
| 1.75 | 5.59 | 2.19 | 0.11 | -0.25 | -1334.82 | 180.38 | 11499.55 | 10345.10 | 4 | 41380.41 |
| 1.76 | 5.81 | 2.20 | 0.05 | -0.27 | -1477.48 | 83.15 | 11561.34 | 10167.01 | 2 | 20334.02 |
| 1.76 | 6.04 | 2.20 | -0.01 | -0.28 | -1528.42 | -17.43 | 11548.38 | 10002.52 | 4 | 46010.10 |
| 1.74 | 6.26 | 2.18 | -0.08 | -0.29 | -1558.99 | -120.03 | 11459.18 | 9780.16 | 2 | 19560.32 |
| 1.72 | 6.48 | 2.15 | -0.14 | -0.27 | -1467.29 | -216.59 | 11298.22 | 9614.34 | 4 | 38457.37 |
| 1.68 | 6.71 | 2.10 | -0.20 | -0.29 | -1558.99 | -319.19 | 11061.01 | 9182.83 | 2 | 18365.67 |
| 1.64 | 6.93 | 2.04 | -0.26 | -0.26 | -1395.96 | -411.05 | 10755.53 | 8948.52 | 4 | 35794.08 |
| 1.58 | 7.16 | 1.98 | -0.31 | -0.22 | -1202.36 | -490.18 | 10391.25 | 8698.71 | 2 | 17397.43 |
| 1.52 | 7.38 | 1.90 | -0.36 | -0.21 | -1141.27 | -565.28 | 9971.16 | 8264.65 | 4 | 33058.61 |
| 1.44 | 7.60 | 1.80 | -0.41 | -0.23 | -1212.55 | -645.08 | 9491.76 | 7634.13 | 2 | 15268.26 |
| 1.36 | 7.83 | 1.70 | -0.44 | -0.16 | -876.30 | -702.75 | 8969.51 | 7190.46 | 4 | 29561.85 |
| 1.28 | 8.05 | 1.60 | -0.48 | -0.17 | -906.87 | -762.43 | 8402.90 | 6733.61 | 2 | 13467.22 |
| 1.18 | 8.27 | 1.48 | -0.52 | -0.18 | -947.62 | -824.79 | 7789.95 | 6017.54 | 4 | 24070.16 |
| 1.09 | 8.50 | 1.36 | -0.55 | -0.15 | -804.97 | -877.76 | 7137.63 | 5454.90 | 2 | 10909.80 |
| 0.98 | 8.72 | 1.23 | -0.58 | -0.13 | -682.70 | -922.69 | 6451.93 | 4846.34 | 4 | 19386.15 |
| 0.87 | 8.94 | 1.09 | -0.61 | -0.13 | -672.51 | -966.95 | 5733.33 | 4093.87 | 2 | 8187.75 |
| 0.76 | 9.17 | 0.95 | -0.63 | -0.09 | -478.91 | -998.46 | 4991.31 | 3513.94 | 4 | 14055.76 |

| t (s) | z (m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F _A (kN) | F _B (kN) | F _C (kN) | F _J (reaksi) (kN) | FS | F _J x FS |
|-------|-------|----------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|----|---------------------|
| 0.4 | 0.39 | 0.80 | -0.65 | -359.69 | -1022.13 | 4231.70 | 2849.88 | 2 | 5699.75 |
| 0.5 | 0.62 | 0.66 | -0.64 | 226.21 | -1037.02 | 3461.03 | 2197.80 | 4 | 8791.20 |
| 0.6 | 0.84 | 0.51 | -0.66 | -152.84 | -1047.08 | 2682.88 | 1482.96 | 2 | 2965.91 |
| 0.7 | 1.06 | 0.36 | -0.66 | 23.44 | -1048.62 | 1903.58 | 831.53 | 4 | 3326.11 |
| 0.8 | 1.29 | 0.21 | -0.66 | 6.11 | -1048.22 | 1124.59 | 82.48 | 2 | 164.97 |
| 0.9 | 1.51 | 0.07 | -0.66 | 159.57 | -1037.72 | 353.40 | -524.75 | 4 | 2099.01 |
| 1.0 | 1.75 | -0.08 | -0.65 | 170.47 | -1026.50 | -409.45 | -1265.49 | 2 | 2530.97 |
| 1.1 | 1.96 | -0.22 | -0.63 | 419.40 | -998.90 | -1151.80 | -1731.30 | 4 | 6925.19 |
| 1.2 | 2.18 | -0.36 | -0.61 | 424.39 | -970.97 | -1873.39 | -2419.96 | 2 | 4839.93 |
| 1.3 | 2.40 | -0.49 | -0.59 | 491.13 | -938.65 | -2570.95 | -3018.47 | 4 | 12073.88 |
| 1.4 | 2.63 | -0.62 | -0.57 | 556.35 | -902.04 | -3241.31 | -3587.00 | 2 | 7174.00 |
| 1.5 | 2.85 | -0.74 | -0.54 | 673.53 | -857.71 | -3878.73 | -4062.92 | 4 | 16251.67 |
| 1.6 | 3.07 | -0.85 | -0.52 | 609.33 | -817.61 | -4486.35 | -4694.63 | 2 | 9389.26 |
| 1.7 | 3.30 | -0.96 | -0.48 | 815.16 | -763.97 | -5054.10 | -5002.91 | 4 | 20011.63 |
| 1.8 | 3.52 | -1.06 | -0.45 | 889.54 | -705.45 | -5578.35 | -5394.23 | 2 | 10788.46 |
| 1.9 | 3.75 | -1.15 | -0.41 | 937.43 | -643.74 | -6056.75 | -5763.05 | 4 | 23052.20 |
| 2.0 | 3.97 | -1.23 | -0.36 | 1069.90 | -573.33 | -6482.82 | -5986.25 | 2 | 11972.51 |
| 2.1 | 4.21 | -1.30 | -0.32 | 1049.52 | -504.26 | -6857.57 | -6312.31 | 4 | 25249.23 |
| 2.2 | 4.43 | -1.37 | -0.28 | 988.38 | -439.22 | -7183.98 | -6634.81 | 2 | 13269.63 |
| 2.3 | 4.64 | -1.42 | -0.23 | 1090.28 | -367.47 | -7457.06 | -6734.25 | 4 | 26937.02 |
| 2.4 | 4.86 | -1.46 | -0.19 | 1090.28 | -295.72 | -7676.83 | -6882.27 | 2 | 13764.54 |
| 2.5 | 5.09 | -1.49 | -0.15 | 957.81 | -232.68 | -7849.75 | -7124.62 | 4 | 28498.49 |
| 2.6 | 5.31 | -1.51 | -0.10 | 1100.47 | -160.26 | -7968.85 | -7028.65 | 2 | 14057.30 |
| 2.7 | 5.53 | -1.53 | -0.05 | 1222.74 | -79.80 | -8028.15 | -6885.21 | 4 | 27540.85 |
| 2.8 | 5.76 | -1.53 | -0.01 | 1059.71 | -10.06 | -8035.63 | -6985.98 | 2 | 13971.96 |
| 2.9 | 5.98 | -1.52 | 0.03 | 968.00 | 53.64 | -7995.76 | -6974.12 | 4 | 27896.46 |
| 3.0 | 6.21 | -1.50 | 0.08 | 1161.60 | 130.09 | -7899.09 | -6807.39 | 2 | 13214.79 |
| 3.1 | 6.43 | -1.47 | 0.13 | 1059.71 | 199.83 | -7750.58 | -6491.05 | 4 | 25964.19 |
| 3.2 | 6.65 | -1.44 | 0.17 | 957.81 | 262.86 | -7555.24 | -6334.56 | 2 | 12669.13 |
| 3.3 | 6.88 | -1.39 | 0.21 | 1110.55 | 335.95 | -7305.57 | -5858.97 | 4 | 23435.86 |
| 3.4 | 7.10 | -1.33 | 0.26 | 1171.79 | 415.06 | -6998.60 | -5413.74 | 2 | 10827.48 |
| 3.5 | 7.32 | -1.26 | 0.30 | 825.35 | 467.38 | -6651.26 | -5358.53 | 4 | 21434.12 |
| 3.6 | 7.55 | -1.19 | 0.33 | 917.05 | 527.73 | -6259.07 | -4814.28 | 2 | 9628.57 |
| 3.7 | 7.77 | -1.11 | 0.36 | 692.89 | 573.33 | -5832.99 | -4566.78 | 4 | 18267.12 |
| 3.8 | 8.00 | -1.02 | 0.38 | 448.34 | 602.83 | -5384.99 | -4333.82 | 2 | 8667.64 |
| 3.9 | 8.22 | -0.93 | 0.40 | 528.83 | 637.64 | -4911.33 | -3744.66 | 4 | 14978.63 |
| 4.0 | 8.44 | -0.84 | 0.43 | 632.77 | 679.28 | -4406.32 | -3094.27 | 2 | 6188.54 |
| 4.1 | 8.66 | -0.74 | 0.44 | 308.74 | 699.60 | -3886.40 | -2878.07 | 4 | 11512.27 |
| 4.2 | 8.88 | -0.64 | 0.46 | 431.02 | 727.96 | -3345.41 | -2186.44 | 2 | 4372.88 |
| 4.3 | 9.11 | -0.53 | 0.48 | 503.36 | 761.09 | -2779.80 | -1515.36 | 4 | 6061.43 |
| 4.4 | 9.34 | -0.42 | 0.49 | 114.12 | 768.60 | -2208.61 | -1325.90 | 2 | 2651.79 |
| 4.5 | 9.56 | -0.31 | 0.49 | 101.89 | 775.30 | -1632.44 | -755.24 | 4 | 3020.98 |
| 4.6 | 9.78 | -0.20 | 0.49 | 84.57 | 780.87 | -1052.13 | -186.69 | 2 | 373.38 |
| 4.7 | 10.01 | -0.09 | 0.49 | 7.85 | 780.35 | -472.21 | 300.30 | 4 | 1201.19 |
| 4.8 | 10.23 | 0.02 | 0.49 | -42.68 | 777.58 | 105.66 | 841.16 | 2 | 1682.32 |

| z (m) | t | z (m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F _A (kN) | F _B (kN) | F _C (kN) | F ₃ (reaksi) (kN) | FS | F ₃ x FS |
|-------|-------|-------|----------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|----|---------------------|
| 0.10 | 19.45 | 0.13 | 0.50 | 0.02 | 110.76 | 784.87 | 688.95 | 1584.58 | 4 | 6338.30 |
| 0.10 | 19.68 | 0.24 | 0.48 | -0.07 | 350.21 | 161.82 | 1255.10 | 1666.71 | 2 | 3333.43 |
| 0.38 | 19.90 | 0.34 | 0.48 | -0.03 | -146.73 | 752.17 | 1814.08 | 2419.52 | 4 | 9678.09 |
| 0.58 | 20.12 | 0.45 | 0.46 | -0.08 | -423.88 | 724.27 | 2352.33 | 2652.72 | 2 | 5305.45 |
| 0.83 | 20.35 | 0.54 | 0.43 | -0.12 | -669.45 | 680.22 | 2857.84 | 2868.61 | 4 | 11474.44 |
| 0.91 | 20.57 | 0.63 | 0.40 | -0.14 | -757.08 | 639.39 | 3326.33 | 3199.64 | 2 | 6399.28 |
| 0.97 | 20.80 | 0.72 | 0.38 | -0.06 | -338.29 | 608.13 | 3778.27 | 4048.11 | 4 | 16192.42 |
| 0.94 | 21.02 | 0.80 | 0.35 | -0.13 | -711.23 | 561.33 | 4195.42 | 4045.52 | 2 | 8091.04 |
| 0.70 | 21.24 | 0.87 | 0.33 | -0.10 | -533.93 | 526.19 | 4586.46 | 4578.72 | 4 | 18314.89 |
| 0.75 | 21.47 | 0.94 | 0.31 | -0.12 | -654.17 | 483.14 | 4945.51 | 4774.49 | 2 | 9548.97 |
| 0.80 | 21.69 | 1.00 | 0.27 | -0.15 | -811.08 | 429.76 | 5264.89 | 4883.57 | 4 | 19534.29 |
| 0.84 | 21.91 | 1.05 | 0.24 | -0.16 | -865.09 | 372.83 | 5541.97 | 5049.71 | 2 | 10099.42 |
| 0.88 | 22.14 | 1.10 | 0.20 | -0.15 | -794.78 | 320.53 | 5780.17 | 5305.92 | 4 | 21223.67 |
| 0.91 | 22.36 | 1.13 | 0.16 | -0.18 | -978.19 | 256.15 | 5970.53 | 5248.50 | 2 | 10496.99 |
| 0.95 | 22.58 | 1.16 | 0.13 | -0.15 | -815.16 | 202.51 | 6121.03 | 5508.38 | 4 | 22033.52 |
| 0.98 | 22.81 | 1.18 | 0.09 | -0.15 | -825.35 | 148.19 | 6231.16 | 5554.01 | 2 | 11108.02 |
| 0.96 | 25.03 | 1.20 | 0.06 | -0.17 | -927.24 | 87.17 | 6295.95 | 5455.88 | 4 | 21823.50 |
| 0.96 | 25.26 | 1.20 | 0.02 | -0.17 | -906.87 | 27.49 | 6316.38 | 5437.01 | 2 | 10874.01 |
| 0.96 | 25.48 | 1.20 | -0.02 | -0.15 | -825.35 | -26.82 | 6296.45 | 5444.27 | 4 | 21777.09 |
| 0.95 | 25.70 | 1.19 | -0.05 | -0.15 | -825.35 | -81.14 | 6236.15 | 5329.66 | 2 | 10659.32 |
| 0.93 | 25.93 | 1.17 | -0.08 | -0.13 | -682.70 | -126.07 | 6142.46 | 5333.70 | 4 | 21534.79 |
| 0.91 | 24.15 | 1.14 | -0.11 | -0.14 | -754.02 | -175.69 | 6011.90 | 5082.19 | 2 | 10164.37 |
| 0.89 | 24.37 | 1.11 | -0.14 | -0.13 | -672.51 | -219.94 | 5848.44 | 4955.99 | 4 | 19823.97 |
| 0.86 | 24.60 | 1.07 | -0.17 | -0.13 | -713.26 | -266.88 | 5650.11 | 4669.96 | 2 | 9339.92 |
| 0.83 | 24.82 | 1.03 | -0.19 | -0.09 | -458.53 | -297.06 | 5429.34 | 4673.76 | 4 | 18695.04 |
| 0.79 | 25.04 | 0.98 | -0.22 | -0.13 | -672.51 | -341.31 | 5175.69 | 4161.87 | 2 | 8323.74 |
| 0.74 | 25.27 | 0.93 | -0.25 | -0.15 | -816.18 | -395.03 | 4882.12 | 3670.92 | 4 | 14683.58 |
| 0.69 | 25.49 | 0.86 | -0.29 | -0.17 | -916.04 | -455.31 | 4545.76 | 3172.41 | 2 | 6344.82 |
| 0.64 | 25.71 | 0.79 | -0.31 | -0.10 | -561.44 | -492.26 | 4177.93 | 3124.23 | 4 | 12496.92 |
| 0.57 | 25.94 | 0.72 | -0.35 | -0.15 | -823.31 | -546.44 | 3771.84 | 2402.09 | 2 | 4804.17 |
| 0.51 | 26.16 | 0.63 | -0.37 | -0.11 | -600.16 | -585.94 | 3336.39 | 2150.30 | 4 | 8601.19 |
| 0.44 | 26.39 | 0.55 | -0.37 | -0.02 | -199.03 | -593.11 | 2895.62 | 2193.48 | 2 | 4386.96 |
| 0.37 | 26.61 | 0.47 | -0.38 | -0.03 | -138.58 | -602.23 | 2448.06 | 1707.26 | 4 | 6829.03 |
| 0.30 | 26.83 | 0.38 | -0.40 | -0.07 | -374.97 | -626.91 | 1982.17 | 980.29 | 2 | 1960.58 |
| 0.23 | 27.06 | 0.28 | -0.41 | -0.08 | -425.92 | -654.94 | 1495.45 | 414.59 | 4 | 1658.37 |
| 0.15 | 27.28 | 0.19 | -0.42 | -0.04 | -207.87 | -668.62 | 998.56 | 122.08 | 2 | 244.16 |
| 0.07 | 27.50 | 0.09 | -0.44 | -0.07 | -356.12 | -692.05 | 484.26 | -563.92 | 4 | 2255.67 |
| 0.00 | 27.73 | 0.00 | -0.43 | 0.03 | 144.65 | -682.53 | -22.98 | -560.86 | 2 | 1121.71 |
| -0.08 | 27.95 | -0.10 | -0.42 | 0.03 | 150.38 | -672.64 | -522.85 | -1045.11 | 4 | 4180.44 |
| -0.15 | 28.17 | -0.19 | -0.41 | 0.08 | 448.30 | -643.13 | -1000.80 | -1195.64 | 2 | 2391.28 |
| -0.22 | 28.40 | -0.28 | -0.39 | 0.06 | 297.53 | -623.55 | -1464.20 | -1790.22 | 4 | 7160.90 |
| -0.29 | 28.62 | -0.36 | -0.38 | 0.08 | 417.77 | -596.06 | -1507.17 | -2085.46 | 2 | 4170.93 |
| -0.36 | 28.85 | -0.45 | -0.38 | 0.01 | 34.64 | -593.78 | -2348.45 | -2907.58 | 4 | 11630.33 |
| -0.42 | 29.07 | -0.53 | -0.36 | 0.08 | 415.73 | -566.42 | -2769.39 | -2920.08 | 2 | 5840.16 |
| -0.48 | 29.29 | -0.60 | -0.34 | 0.09 | 501.32 | -533.43 | -3165.81 | -3197.92 | 4 | 12791.68 |

| x (cm) | t | z (m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F_A (kN) | F_{ic} (kN) | F_c (kN) | F_3 (reaksi)(kN) | FS | $F_3 \times FS$ |
|----------|-------|---------|------------|---------------------------|------------|---------------|------------|--------------------|----|-----------------|
| 0.54 | 29.52 | -0.67 | -0.32 | 0.10 | 516.61 | 499.43 | 3536.97 | -3519.80 | 2 | 7039.60 |
| 0.59 | 29.74 | -0.74 | -0.29 | 0.10 | 502.46 | 462.42 | 3880.62 | -3780.58 | 4 | 15122.33 |
| 0.64 | 29.96 | -0.79 | -0.25 | 0.17 | 929.28 | 401.26 | 4178.83 | -3650.81 | 2 | 7301.61 |
| 0.68 | 30.19 | -0.85 | -0.23 | 0.11 | 581.82 | 362.97 | 4448.57 | 4229.73 | 4 | 16918.91 |
| 0.73 | 30.41 | -0.89 | -0.21 | 0.10 | 526.80 | 328.31 | 4692.56 | 4494.07 | 2 | 8988.14 |
| 0.74 | 30.63 | -0.93 | -0.17 | 0.16 | 840.63 | 272.98 | 4895.43 | 4327.78 | 4 | 17311.13 |
| 0.77 | 30.86 | -0.96 | -0.15 | 0.12 | 659.26 | 229.60 | 5066.06 | 4636.40 | 2 | 9272.80 |
| 0.79 | 31.08 | -0.99 | -0.12 | 0.09 | 503.36 | 196.47 | 5212.07 | 4905.18 | 4 | 19620.74 |
| 0.81 | 31.30 | -1.01 | -0.09 | 0.15 | 784.59 | 144.84 | 5319.71 | 4679.96 | 2 | 9359.92 |
| 0.82 | 31.53 | -1.02 | -0.06 | 0.14 | 764.21 | 94.55 | 5389.98 | 4720.31 | 4 | 18881.25 |
| 0.83 | 31.98 | -1.03 | -0.01 | 0.15 | 804.97 | 62.36 | 5436.32 | 5009.59 | 2 | 10019.18 |
| 0.82 | 32.20 | -1.03 | 0.03 | 0.15 | 784.59 | 9.39 | 5443.30 | 4647.72 | 4 | 18590.86 |
| 0.81 | 32.42 | -1.02 | 0.06 | 0.13 | 705.08 | 42.25 | 5411.90 | 4585.07 | 2 | 9170.13 |
| 0.80 | 32.65 | -1.00 | 0.09 | 0.14 | 754.02 | 88.51 | 5346.12 | 4554.53 | 4 | 18218.14 |
| 0.78 | 32.87 | -0.97 | 0.12 | 0.15 | 784.59 | 138.14 | 5243.47 | 4351.31 | 2 | 8702.62 |
| 0.75 | 33.09 | -0.94 | 0.15 | 0.12 | 626.65 | 189.77 | 5102.44 | 4128.08 | 4 | 16512.51 |
| 0.72 | 33.32 | -0.90 | 0.17 | 0.11 | 610.35 | 231.01 | 4930.76 | 4073.10 | 2 | 8146.20 |
| 0.68 | 33.54 | -0.85 | 0.20 | 0.12 | 642.96 | 271.17 | 4729.24 | 3847.71 | 4 | 15390.84 |
| 0.64 | 33.76 | -0.81 | 0.22 | 0.10 | 529.85 | 313.49 | 4496.26 | 3539.82 | 2 | 7079.64 |
| 0.60 | 33.99 | -0.75 | 0.24 | 0.11 | 577.74 | 348.36 | 4237.38 | 3359.17 | 4 | 13436.68 |
| 0.55 | 34.21 | -0.69 | 0.27 | 0.10 | 562.46 | 386.38 | 3950.24 | 2986.12 | 2 | 5972.24 |
| 0.50 | 34.44 | -0.63 | 0.28 | 0.08 | 416.75 | 423.59 | 3635.59 | 2649.74 | 4 | 10598.96 |
| 0.45 | 34.66 | -0.56 | 0.30 | 0.06 | 317.91 | 450.82 | 3300.56 | 2433.00 | 2 | 4865.99 |
| 0.39 | 34.88 | -0.49 | 0.31 | 0.07 | 352.56 | 471.74 | 2949.99 | 2160.33 | 4 | 8641.34 |
| 0.33 | 35.11 | -0.42 | 0.32 | 0.05 | 286.32 | 494.94 | 2582.17 | 1734.67 | 2 | 3469.34 |
| 0.28 | 35.33 | -0.34 | 0.33 | 0.02 | 85.59 | 513.78 | 2200.34 | 1400.23 | 4 | 5600.94 |
| 0.22 | 35.55 | -0.27 | 0.34 | 0.04 | 194.62 | 519.42 | 1814.33 | 1209.33 | 2 | 2418.65 |
| 0.15 | 35.78 | -0.19 | 0.34 | 0.02 | 123.29 | 532.22 | 1418.81 | 691.96 | 4 | 2767.85 |
| 0.09 | 36.00 | -0.12 | 0.34 | 0.01 | 45.85 | 540.34 | 1017.25 | 353.62 | 2 | 707.24 |
| 0.03 | 36.22 | -0.04 | 0.34 | -0.01 | -53.80 | 543.35 | 613.45 | 24.24 | 4 | 96.97 |
| 0.03 | 36.45 | 0.04 | 0.34 | 0.01 | 28.02 | 539.81 | 212.28 | 273.73 | 2 | 547.47 |
| 0.09 | 36.67 | 0.11 | 0.34 | -0.02 | -109.64 | 541.66 | 190.26 | 759.94 | 4 | 3039.75 |
| 0.15 | 36.90 | 0.19 | 0.33 | -0.02 | -108.11 | 534.44 | 587.44 | 1012.24 | 2 | 2024.48 |
| 0.21 | 37.12 | 0.26 | 0.32 | -0.05 | -250.66 | 527.33 | 978.33 | 1398.54 | 4 | 5594.17 |
| 0.26 | 37.34 | 0.33 | 0.31 | -0.05 | -279.39 | 510.83 | 1358.96 | 1619.13 | 2 | 3238.25 |
| 0.32 | 37.57 | 0.39 | 0.30 | -0.06 | -336.25 | 492.46 | 1724.93 | 1938.20 | 4 | 7752.80 |
| 0.37 | 37.79 | 0.46 | 0.28 | -0.06 | -306.70 | 470.33 | 2074.46 | 2208.54 | 2 | 4417.08 |
| 0.41 | 38.01 | 0.52 | 0.26 | -0.09 | -488.08 | 450.15 | 2408.99 | 2552.44 | 4 | 10209.75 |
| 0.46 | 38.24 | 0.57 | 0.25 | -0.07 | -395.35 | 418.03 | 2719.66 | 2649.61 | 2 | 5299.21 |
| 0.50 | 38.46 | 0.62 | 0.23 | -0.08 | -414.71 | 392.01 | 3010.98 | 3007.64 | 4 | 12030.55 |
| 0.54 | 38.68 | 0.67 | 0.21 | -0.10 | -549.21 | 364.72 | 3282.03 | 3232.03 | 2 | 6464.06 |
| 0.57 | 38.91 | 0.71 | 0.18 | -0.11 | -602.20 | 328.57 | 3526.21 | 3305.57 | 4 | 13222.28 |
| 0.60 | 39.13 | 0.75 | 0.16 | -0.09 | -466.68 | 288.94 | 3740.94 | 3427.69 | 2 | 6855.57 |
| 0.62 | 39.35 | 0.78 | 0.14 | -0.11 | -581.82 | 258.23 | 3932.85 | 3724.40 | 4 | 14897.61 |
| | | | | | | 219.94 | 4096.30 | 3734.43 | 2 | 7468.85 |

| cm | t | z(m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F _A (kN) | F _H (kN) | F _C (kN) | F ₁ (reaksi) (kN) | FS | F ₃ FS |
|----|-------|-------|-------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|----|-------------------|
| 64 | 39,58 | 0,80 | 0,11 | -0,12 | -638,88 | 177,90 | 4228,51 | 3767,53 | 4 | 15070,11 |
| 66 | 39,80 | 0,82 | 0,09 | -0,10 | -555,33 | 141,35 | 4333,56 | 3919,59 | 2 | 7839,17 |
| 67 | 40,03 | 0,84 | 0,07 | -0,10 | -562,46 | 104,34 | 4411,10 | 3952,98 | 4 | 15811,91 |
| 68 | 40,25 | 0,85 | 0,04 | -0,13 | -710,21 | 57,60 | 4453,91 | 3801,30 | 2 | 7602,60 |
| 68 | 40,70 | 0,85 | -0,02 | -0,11 | -584,88 | 14,28 | 4464,52 | 3820,56 | 4 | 15282,25 |
| 67 | 40,92 | 0,84 | -0,04 | -0,12 | -632,77 | -65,85 | 4397,59 | 3698,98 | 4 | 14795,91 |
| 66 | 41,14 | 0,82 | -0,07 | -0,12 | -665,37 | -109,64 | 4316,12 | 3541,11 | 2 | 7082,21 |
| 64 | 41,37 | 0,80 | -0,09 | -0,10 | -543,10 | -145,38 | 4208,08 | 3519,60 | 4 | 14078,40 |
| 62 | 41,59 | 0,77 | -0,12 | -0,11 | -609,33 | -185,48 | 4070,24 | 3275,43 | 2 | 6550,86 |
| 59 | 41,81 | 0,74 | -0,14 | -0,12 | -659,26 | -228,86 | 3900,16 | 3012,04 | 4 | 12048,14 |
| 56 | 42,04 | 0,70 | -0,17 | -0,11 | -566,54 | -266,15 | 3702,37 | 2869,69 | 2 | 5739,38 |
| 53 | 42,26 | 0,66 | -0,19 | -0,09 | -478,91 | -297,66 | 3481,16 | 2704,59 | 4 | 10818,37 |
| 49 | 42,49 | 0,62 | -0,21 | -0,09 | -484,08 | -329,51 | 3236,28 | 2422,76 | 2 | 4845,53 |
| 45 | 42,71 | 0,57 | -0,22 | -0,06 | -308,74 | -349,83 | 2976,30 | 2317,72 | 4 | 9270,90 |
| 41 | 42,93 | 0,51 | -0,23 | -0,05 | -262,89 | -367,13 | 2703,46 | 2073,44 | 2 | 4146,88 |
| 37 | 43,16 | 0,46 | -0,24 | -0,04 | -225,19 | -381,95 | 2419,61 | 1812,47 | 4 | 7249,88 |
| 32 | 43,38 | 0,40 | -0,25 | -0,05 | -291,42 | -401,13 | 2121,51 | 1428,96 | 2 | 2857,91 |
| 28 | 43,60 | 0,34 | -0,26 | -0,05 | -266,96 | -418,70 | 1810,35 | 1124,68 | 4 | 4498,74 |
| 23 | 43,83 | 0,28 | -0,28 | -0,06 | -324,03 | -440,02 | 1483,34 | 719,29 | 2 | 1438,58 |
| 17 | 44,05 | 0,22 | -0,29 | -0,04 | -309,90 | -453,83 | 1146,07 | 482,33 | 4 | 1929,32 |
| 12 | 44,27 | 0,15 | -0,30 | -0,04 | -238,43 | -469,53 | 797,13 | 89,17 | 2 | 178,35 |
| 07 | 44,50 | 0,08 | -0,30 | -0,01 | -39,94 | -472,15 | 446,25 | -65,85 | 4 | 263,40 |
| 01 | 44,72 | 0,02 | -0,30 | 0,01 | 29,45 | -470,22 | 96,80 | -343,97 | 2 | 687,94 |
| 04 | 44,94 | -0,05 | -0,29 | 0,02 | 89,97 | -464,30 | -248,24 | -622,57 | 4 | 2490,27 |
| 09 | 45,17 | -0,11 | -0,29 | 0,00 | 24,96 | -462,65 | -592,07 | -1029,76 | 2 | 2059,52 |
| 14 | 45,39 | -0,18 | -0,28 | 0,04 | 233,85 | -447,26 | -924,46 | -1137,87 | 4 | 4551,49 |
| 19 | 45,62 | -0,24 | -0,28 | 0,02 | 98,84 | -440,76 | -1252,01 | -1593,93 | 2 | 3187,87 |
| 24 | 45,84 | -0,30 | -0,27 | 0,03 | 170,16 | -429,56 | -1571,25 | -1830,64 | 4 | 7522,57 |
| 29 | 46,06 | -0,36 | -0,26 | 0,05 | 259,83 | -412,46 | -1877,77 | -2030,40 | 2 | 4060,80 |
| 33 | 46,29 | -0,41 | -0,25 | 0,07 | 351,54 | -389,33 | -2167,10 | -2204,89 | 4 | 8819,57 |
| 37 | 46,51 | -0,47 | -0,24 | 0,03 | 155,90 | -379,07 | -2448,81 | -2671,98 | 2 | 5343,96 |
| 41 | 46,73 | -0,52 | -0,22 | 0,07 | 371,92 | -354,59 | -2712,33 | -2695,01 | 4 | 10780,02 |
| 45 | 46,96 | -0,56 | -0,21 | 0,07 | 401,47 | -328,17 | -2956,21 | -2882,92 | 2 | 5765,84 |
| 48 | 47,18 | -0,60 | -0,19 | 0,07 | 374,97 | -303,50 | -3181,76 | -3110,28 | 4 | 12441,13 |
| 52 | 47,40 | -0,64 | -0,17 | 0,08 | 414,71 | -276,20 | -3387,02 | -3248,52 | 2 | 6497,03 |
| 54 | 47,63 | -0,68 | -0,15 | 0,11 | 609,33 | -235,10 | -3562,49 | -3189,26 | 4 | 12757,04 |
| 56 | 47,85 | -0,71 | -0,13 | 0,11 | 566,54 | -198,82 | -3710,24 | -3342,53 | 2 | 6685,06 |
| 58 | 48,08 | -0,73 | -0,10 | 0,10 | 518,65 | -164,69 | -3812,63 | -3478,68 | 4 | 13914,71 |
| 60 | 48,30 | -0,75 | -0,08 | 0,09 | 505,40 | -131,43 | -3930,31 | -3556,34 | 2 | 7112,68 |
| 61 | 48,52 | -0,76 | -0,06 | 0,09 | 487,06 | -99,38 | -4004,16 | -3616,48 | 4 | 14465,92 |
| 62 | 48,75 | -0,77 | -0,04 | 0,08 | 442,22 | -70,27 | -4056,39 | -3684,44 | 2 | 7368,87 |
| 62 | 48,97 | -0,78 | -0,03 | 0,07 | 397,39 | -44,12 | -4089,18 | -3735,91 | 4 | 14943,63 |
| 62 | 49,19 | -0,78 | -0,01 | 0,09 | 466,68 | -13,41 | -4099,14 | -3645,88 | 2 | 7291,75 |
| 62 | 49,42 | -0,78 | 0,01 | 0,10 | 534,95 | 21,79 | -4082,95 | -3526,21 | 4 | 14104,82 |

| m) | t | z(m) | (m/s) | $\frac{z}{(m/s^2)}$ | F_A (kN) | F_B (kN) | F_C (kN) | F_3 (reaksi) (kN) | FS | $F_3 \times FS$ |
|----|--------|-------|-------|---------------------|------------|------------|------------|---------------------|----|-----------------|
| 07 | 130,14 | -0,08 | -0,05 | 0,03 | 83,72 | -84,64 | -430,92 | -331,84 | 2 | 663,68 |
| 08 | 130,36 | -0,10 | -0,06 | -0,03 | -155,49 | 94,87 | -501,42 | -751,79 | 4 | 3007,14 |
| 09 | 130,59 | -0,11 | -0,06 | -0,01 | -31,79 | -96,96 | -573,48 | -702,24 | 2 | 1404,47 |
| 10 | 130,81 | -0,12 | -0,06 | -0,01 | -34,64 | 99,24 | -647,24 | -781,12 | 4 | 3124,49 |
| 11 | 131,03 | -0,14 | -0,06 | 0,01 | 71,33 | 94,55 | -717,50 | -740,72 | 2 | 1481,45 |
| 12 | 131,26 | -0,15 | -0,06 | 0,01 | 76,42 | -89,52 | -784,03 | -797,13 | 4 | 3188,51 |
| 13 | 131,48 | -0,16 | -0,05 | 0,05 | 252,70 | -72,89 | -838,20 | -658,39 | 2 | 1316,77 |
| 13 | 131,70 | -0,17 | -0,04 | 0,03 | 182,59 | -60,89 | -883,45 | -761,94 | 4 | 3047,76 |
| 14 | 131,93 | -0,17 | -0,03 | 0,04 | 232,32 | -45,60 | -917,33 | -730,61 | 2 | 1461,22 |
| 14 | 132,15 | -0,18 | -0,03 | 0,01 | 74,58 | -40,70 | -947,58 | -913,90 | 4 | 3655,60 |
| 15 | 132,38 | -0,19 | -0,02 | 0,01 | 79,48 | 35,47 | -973,94 | -929,94 | 2 | 1859,88 |
| 15 | 132,60 | -0,19 | -0,02 | 0,01 | 71,33 | -30,78 | -996,82 | -956,27 | 4 | 3825,08 |
| 15 | 132,82 | -0,19 | -0,02 | 0,01 | 57,06 | -27,02 | -1016,90 | -986,86 | 2 | 1973,72 |
| 16 | 133,05 | -0,20 | -0,02 | 0,01 | 44,83 | -24,07 | -1034,79 | -1014,03 | 4 | 4056,12 |
| 16 | 133,27 | -0,20 | -0,01 | 0,04 | 189,52 | -11,60 | -1043,41 | -865,49 | 2 | 1730,97 |
| 16 | 133,49 | -0,20 | 0,00 | 0,03 | 180,35 | 0,27 | -1043,21 | -862,59 | 4 | 3450,36 |
| 16 | 133,72 | -0,20 | 0,01 | 0,03 | 180,35 | 12,14 | -1034,19 | -841,70 | 2 | 1683,40 |
| 15 | 133,94 | -0,19 | 0,02 | 0,06 | 327,08 | 33,66 | -1009,18 | -648,43 | 4 | 2593,72 |
| 15 | 134,16 | -0,18 | 0,03 | 0,05 | 280,21 | 52,10 | -970,45 | -638,14 | 2 | 1276,28 |
| 14 | 134,39 | -0,17 | 0,04 | 0,05 | 270,02 | 69,87 | -918,53 | -578,63 | 4 | 2314,54 |
| 13 | 134,61 | -0,16 | 0,05 | 0,05 | 171,18 | 81,14 | -858,23 | -605,91 | 2 | 1211,82 |
| 12 | 134,83 | -0,15 | 0,06 | 0,03 | 173,22 | 92,54 | -789,46 | -523,70 | 4 | 2094,81 |
| 11 | 135,06 | -0,14 | 0,05 | -0,03 | -159,98 | 82,01 | -728,51 | -806,48 | 2 | 1612,96 |
| 10 | 135,28 | -0,13 | 0,05 | -0,02 | -99,86 | 75,44 | -672,45 | -696,87 | 4 | 2787,48 |
| 09 | 135,51 | -0,12 | 0,04 | -0,03 | -135,52 | 66,52 | -623,02 | -692,02 | 2 | 1384,03 |
| 09 | 135,73 | -0,11 | 0,04 | 0,00 | -4,08 | 66,25 | -573,78 | -511,61 | 4 | 2046,42 |
| 08 | 135,95 | -0,10 | 0,05 | 0,02 | 91,71 | 72,29 | -520,06 | -356,07 | 2 | 712,14 |
| 07 | 136,18 | -0,09 | 0,06 | 0,06 | 319,95 | 93,34 | -450,69 | -37,40 | 4 | 149,60 |
| 06 | 136,40 | -0,07 | 0,07 | 0,05 | 278,28 | 111,65 | -367,72 | 22,21 | 2 | 44,43 |
| 04 | 136,62 | -0,05 | 0,08 | 0,04 | 231,51 | 126,89 | -273,42 | 84,98 | 4 | 339,92 |
| 03 | 136,85 | -0,03 | 0,09 | 0,04 | 191,56 | 139,50 | -169,75 | 161,31 | 2 | 322,62 |
| 01 | 137,07 | -0,01 | 0,08 | -0,05 | -175,97 | 127,92 | -74,69 | -122,74 | 4 | 490,97 |
| 00 | 137,29 | 0,00 | 0,08 | -0,02 | -112,83 | 120,49 | 14,86 | 22,52 | 2 | 45,04 |
| 01 | 137,52 | 0,02 | 0,07 | -0,03 | -154,00 | 110,36 | 96,87 | 53,22 | 4 | 212,89 |
| 03 | 137,74 | 0,03 | 0,06 | -0,02 | -126,38 | 102,04 | 172,70 | 148,36 | 2 | 296,72 |
| 04 | 137,97 | 0,05 | 0,06 | -0,03 | -140,92 | 92,77 | 241,64 | 193,49 | 4 | 773,95 |
| 05 | 138,19 | 0,06 | 0,06 | 0,02 | 130,43 | 101,35 | 316,96 | 548,73 | 2 | 1097,47 |
| 06 | 138,41 | 0,08 | 0,07 | 0,01 | 54,51 | 104,94 | 394,94 | 554,39 | 4 | 2217,58 |
| 07 | 138,64 | 0,09 | 0,07 | 0,00 | 0,92 | 105,00 | 472,97 | 578,89 | 2 | 1157,77 |
| 08 | 138,86 | 0,10 | 0,07 | 0,00 | 15,39 | 106,01 | 551,75 | 673,15 | 4 | 2692,60 |
| 10 | 139,08 | 0,12 | 0,06 | -0,01 | -75,30 | 101,95 | 626,85 | 652,61 | 2 | 1305,21 |
| 11 | 139,31 | 0,13 | 0,06 | -0,03 | -182,39 | 89,05 | 693,03 | 599,69 | 4 | 2398,76 |
| 11 | 139,53 | 0,14 | 0,04 | -0,06 | -339,31 | 66,72 | 742,62 | 470,03 | 2 | 940,05 |
| 12 | 139,75 | 0,15 | 0,04 | -0,03 | -143,67 | 57,27 | 785,17 | 698,77 | 4 | 2795,07 |
| 12 | 139,98 | 0,16 | 0,03 | -0,04 | -213,98 | 43,18 | 817,27 | 646,47 | 2 | 1292,94 |

| z (cm) | t | z (m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F_A (kN) | F_B (kN) | F_C (kN) | F_3 (reaksi)(kN) | FS | $F_3 \times FS$ |
|----------|--------|---------|------------|---------------------------|------------|------------|------------|--------------------|----|-----------------|
| 0.13 | 140.20 | 0.16 | 0.02 | 0.01 | -60.12 | 39.23 | 846.42 | 825.53 | 4 | 3302.12 |
| 0.13 | 140.43 | 0.17 | 0.02 | 0.00 | -2.04 | 39.09 | 875.47 | 912.53 | 2 | 1825.06 |
| 0.14 | 140.65 | 0.17 | 0.03 | 0.01 | 68.27 | 43.59 | 907.86 | 1019.72 | 4 | 4078.88 |
| 0.14 | 140.87 | 0.18 | 0.02 | -0.02 | -108.01 | 36.48 | 934.97 | 863.44 | 2 | 1726.89 |
| 0.15 | 141.10 | 0.18 | 0.02 | -0.01 | -65.21 | 32.19 | 958.89 | 925.87 | 4 | 3703.47 |
| 0.15 | 141.32 | 0.18 | 0.01 | -0.05 | -257.79 | 15.22 | 970.21 | 727.63 | 2 | 1455.27 |
| 0.15 | 141.54 | 0.18 | 0.00 | -0.05 | -245.57 | -0.94 | 969.51 | 723.00 | 4 | 2892.01 |
| 0.15 | 141.77 | 0.18 | -0.01 | -0.03 | -173.22 | -12.34 | 960.34 | 774.78 | 2 | 1549.56 |
| 0.14 | 141.99 | 0.18 | -0.01 | -0.02 | -131.44 | -20.99 | 944.74 | 792.31 | 4 | 3169.23 |
| 0.14 | 142.21 | 0.18 | -0.02 | -0.02 | -108.01 | -28.10 | 923.86 | 787.76 | 2 | 1575.51 |
| 0.14 | 142.44 | 0.17 | -0.02 | 0.00 | -11.21 | -28.83 | 902.43 | 862.39 | 4 | 3449.56 |
| 0.13 | 142.66 | 0.17 | -0.02 | 0.00 | -25.47 | -30.51 | 879.76 | 823.77 | 2 | 1647.55 |
| 0.13 | 142.88 | 0.16 | -0.02 | 0.00 | -20.38 | -31.83 | 856.09 | 803.86 | 4 | 3215.43 |
| 0.13 | 143.11 | 0.16 | -0.02 | 0.00 | -10.19 | -32.52 | 831.92 | 789.21 | 2 | 1578.41 |
| 0.12 | 143.33 | 0.15 | -0.02 | -0.02 | -94.76 | -38.76 | 803.11 | 669.59 | 4 | 2678.38 |
| 0.12 | 143.56 | 0.15 | -0.03 | -0.01 | -34.64 | -41.04 | 772.62 | 696.93 | 2 | 1393.87 |
| 0.11 | 143.78 | 0.14 | -0.03 | -0.02 | -101.89 | -47.74 | 737.14 | 587.50 | 4 | 2349.98 |
| 0.11 | 144.00 | 0.13 | -0.04 | -0.03 | -176.28 | -59.34 | 693.03 | 457.41 | 2 | 914.82 |
| 0.10 | 144.23 | 0.12 | -0.05 | -0.04 | -220.09 | -73.83 | 638.17 | 344.24 | 4 | 1376.98 |
| 0.09 | 144.45 | 0.11 | -0.05 | -0.01 | -36.68 | -76.24 | 581.51 | 468.58 | 2 | 937.16 |
| 0.08 | 144.67 | 0.10 | -0.05 | -0.02 | -86.61 | -81.94 | 520.61 | 352.06 | 4 | 1408.22 |
| 0.07 | 144.90 | 0.09 | -0.05 | 0.00 | 25.37 | -80.27 | 460.95 | 406.05 | 2 | 812.11 |
| 0.06 | 145.12 | 0.08 | -0.05 | 0.01 | 36.48 | -77.87 | 403.08 | 361.69 | 4 | 1446.75 |
| 0.05 | 145.34 | 0.07 | -0.04 | 0.03 | 139.49 | -68.69 | 352.03 | 422.83 | 2 | 845.67 |
| 0.05 | 145.57 | 0.06 | -0.05 | -0.01 | -48.81 | -71.90 | 298.60 | 177.88 | 4 | 711.54 |
| 0.04 | 145.79 | 0.05 | -0.05 | -0.01 | -70.31 | -76.53 | 241.72 | 94.88 | 2 | 189.77 |
| 0.03 | 146.02 | 0.03 | -0.05 | -0.01 | -77.64 | -81.64 | 181.05 | 21.76 | 4 | 87.06 |
| 0.02 | 146.24 | 0.02 | -0.06 | -0.02 | -133.48 | -90.42 | 113.85 | -110.06 | 2 | 220.12 |
| 0.01 | 146.46 | 0.01 | -0.06 | -0.03 | -152.89 | -100.49 | 39.17 | -214.21 | 4 | 856.83 |
| -0.01 | 146.69 | -0.01 | -0.07 | -0.02 | -93.08 | -106.61 | -40.06 | -239.75 | 2 | -479.50 |
| -0.02 | 146.91 | -0.02 | -0.07 | -0.01 | -29.40 | -108.55 | -120.73 | -258.67 | 4 | -1034.68 |
| -0.03 | 147.13 | -0.04 | -0.07 | -0.03 | -147.29 | -118.24 | -208.60 | -474.13 | 2 | -948.25 |
| -0.04 | 147.35 | -0.06 | -0.07 | 0.02 | 109.33 | -111.04 | -291.12 | -292.83 | 4 | -1171.33 |
| -0.05 | 147.58 | -0.07 | -0.07 | 0.01 | 59.71 | -107.12 | -370.73 | -418.13 | 2 | -836.26 |
| -0.07 | 147.80 | -0.08 | -0.06 | 0.02 | 93.23 | -100.98 | -445.77 | -453.52 | 4 | -1814.06 |
| -0.08 | 148.03 | -0.10 | -0.06 | 0.02 | 132.57 | -92.26 | -514.33 | -474.02 | 2 | -948.04 |
| -0.09 | 148.25 | -0.11 | -0.04 | 0.06 | 319.75 | -71.21 | -567.25 | -318.72 | 4 | -1274.88 |
| -0.09 | 148.47 | -0.12 | -0.04 | 0.04 | 219.07 | -56.80 | -609.46 | -447.18 | 2 | -894.37 |
| -0.10 | 148.70 | -0.12 | -0.02 | 0.05 | 281.23 | -38.29 | -637.92 | -394.98 | 4 | -1579.90 |
| -0.10 | 148.92 | -0.12 | -0.01 | 0.06 | 312.82 | -17.79 | -651.07 | -355.96 | 2 | -711.92 |
| -0.10 | 149.15 | -0.13 | -0.01 | 0.02 | 116.16 | -10.06 | -658.55 | -552.45 | 4 | -2209.78 |
| -0.10 | 149.37 | -0.13 | -0.01 | 0.00 | 19.36 | -8.78 | -665.88 | -654.50 | 2 | -1309.00 |
| -0.10 | 149.59 | -0.13 | -0.01 | -0.02 | -100.88 | -15.42 | -676.54 | -797.84 | 4 | -3171.35 |
| -0.11 | 149.82 | -0.13 | -0.02 | -0.02 | -128.39 | -23.87 | -694.28 | -846.54 | 2 | -693.08 |
| -0.11 | 150.04 | -0.14 | -0.02 | -0.03 | -185.45 | -36.08 | -721.09 | -942.61 | 4 | -3770.45 |

| z (m) | t | z (m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F_A (kN) | F_B (kN) | F_C (kN) | F_3 (reaksi)(kN) | FS | $F_3 \times FS$ |
|---------|--------|---------|------------|---------------------------|------------|------------|------------|--------------------|----|-----------------|
| -0.11 | 150.26 | -0.14 | -0.02 | 0.00 | 7.13 | -35.61 | -747.55 | -776.02 | 2 | 1552.05 |
| -0.12 | 150.49 | -0.15 | -0.02 | 0.02 | 91.71 | -29.57 | -769.53 | -707.39 | 4 | 2829.57 |
| -0.12 | 150.71 | -0.15 | -0.01 | 0.04 | 189.52 | -17.10 | -782.23 | -609.81 | 2 | 1219.62 |
| -0.12 | 150.93 | -0.15 | 0.00 | 0.05 | 293.46 | 2.21 | -780.59 | -484.92 | 4 | 1939.68 |
| -0.12 | 151.16 | -0.14 | 0.02 | 0.07 | 360.71 | 25.95 | -761.30 | -374.65 | 2 | 749.29 |
| -0.11 | 151.38 | -0.14 | 0.03 | 0.06 | 339.33 | 48.28 | -725.42 | -337.83 | 4 | 1351.33 |
| -0.10 | 151.61 | -0.13 | 0.04 | 0.05 | 246.59 | 64.51 | -677.48 | -366.39 | 2 | 732.78 |
| -0.09 | 151.83 | -0.12 | 0.05 | 0.05 | 267.98 | 82.14 | -616.44 | -266.31 | 4 | 1065.25 |
| -0.08 | 152.05 | -0.10 | 0.06 | 0.02 | 95.78 | 88.45 | -550.71 | -366.48 | 2 | 732.96 |
| -0.07 | 152.28 | -0.09 | 0.06 | 0.01 | 50.85 | 91.79 | -482.49 | -339.85 | 4 | 1359.41 |
| -0.06 | 152.50 | -0.08 | 0.06 | -0.01 | -35.35 | 89.47 | -416.00 | -361.90 | 2 | 723.79 |
| -0.05 | 152.72 | -0.07 | 0.05 | -0.01 | -39.54 | 86.86 | -351.45 | -504.12 | 4 | 1216.48 |
| -0.04 | 152.95 | -0.06 | 0.05 | -0.03 | -135.93 | 77.92 | -293.54 | -351.55 | 2 | 703.10 |
| -0.04 | 153.17 | -0.05 | 0.04 | -0.02 | -112.29 | 70.53 | -241.13 | -282.89 | 4 | 1131.55 |
| -0.03 | 153.39 | -0.04 | 0.04 | -0.02 | -120.54 | 62.60 | -194.61 | -252.55 | 2 | 505.11 |
| -0.02 | 153.62 | -0.03 | 0.04 | 0.00 | -18.95 | 61.35 | -149.02 | -106.62 | 4 | 426.48 |
| -0.02 | 153.84 | -0.02 | 0.05 | -0.02 | -117.08 | 53.64 | -109.15 | -172.58 | 2 | 345.17 |
| -0.01 | 154.07 | -0.01 | 0.03 | -0.01 | -41.37 | 50.92 | -71.31 | -61.75 | 4 | 247.01 |
| -0.01 | 154.29 | -0.01 | 0.03 | 0.00 | 7.51 | 51.42 | -33.10 | 25.83 | 2 | 51.66 |
| 0.00 | 154.51 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 3.28 | 51.63 | 5.28 | 60.19 | 4 | 240.76 |
| 0.01 | 154.74 | 0.01 | 0.05 | -0.02 | -85.89 | 45.98 | 39.45 | -0.46 | 2 | 0.92 |
| 0.01 | 154.96 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 131.18 | 54.61 | 80.03 | 265.83 | 4 | 1063.30 |
| 0.02 | 155.18 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 55.29 | 58.25 | 123.52 | 236.86 | 2 | 473.72 |
| 0.03 | 155.41 | 0.03 | 0.04 | 0.00 | 14.88 | 59.23 | 167.34 | 241.45 | 4 | 965.79 |
| 0.03 | 155.63 | 0.04 | 0.04 | 0.00 | 22.72 | 60.73 | 212.47 | 295.92 | 2 | 591.84 |
| 0.04 | 155.85 | 0.05 | 0.04 | 0.00 | 16.71 | 61.83 | 258.42 | 336.95 | 4 | 1347.81 |
| 0.05 | 156.08 | 0.06 | 0.03 | -0.02 | -107.80 | 54.73 | 299.09 | 246.02 | 2 | 492.02 |
| 0.05 | 156.30 | 0.06 | 0.03 | -0.01 | -66.03 | 50.39 | 336.53 | 320.89 | 4 | 1283.57 |
| 0.06 | 156.52 | 0.07 | 0.03 | -0.01 | -50.95 | 47.03 | 371.49 | 367.57 | 2 | 735.15 |
| 0.06 | 156.75 | 0.08 | 0.03 | -0.01 | -74.18 | 42.15 | 402.81 | 370.78 | 4 | 1483.14 |
| 0.07 | 156.97 | 0.08 | 0.03 | -0.01 | -51.38 | 40.09 | 432.60 | 441.31 | 2 | 882.61 |
| 0.07 | 157.20 | 0.09 | 0.02 | -0.01 | -79.89 | 34.83 | 458.49 | 413.43 | 4 | 1653.72 |
| 0.07 | 157.42 | 0.09 | 0.02 | -0.01 | -57.05 | 30.52 | 481.09 | 444.46 | 2 | 888.92 |
| 0.08 | 157.64 | 0.09 | 0.01 | -0.02 | -111.88 | 23.05 | 498.22 | 409.40 | 4 | 1637.59 |
| 0.08 | 157.87 | 0.10 | 0.01 | -0.02 | -115.75 | 15.44 | 509.70 | 409.38 | 2 | 818.76 |
| 0.08 | 158.09 | 0.10 | 0.00 | -0.03 | -161.20 | 4.83 | 513.28 | 356.91 | 4 | 1427.66 |
| 0.08 | 158.31 | 0.10 | 0.00 | 0.02 | 90.69 | -1.14 | 512.44 | 420.61 | 2 | 841.22 |
| 0.08 | 158.54 | 0.10 | -0.01 | -0.03 | -139.60 | -10.33 | 504.76 | 354.84 | 4 | 1419.36 |
| 0.07 | 158.76 | 0.09 | -0.01 | -0.02 | -82.33 | -15.74 | 493.06 | 394.99 | 2 | 789.97 |
| 0.07 | 158.98 | 0.09 | -0.01 | -0.02 | -86.31 | -21.42 | 477.14 | 369.41 | 4 | 1477.64 |
| 0.07 | 159.21 | 0.09 | -0.02 | -0.01 | -51.86 | -24.84 | 458.68 | 381.98 | 2 | 763.96 |
| 0.07 | 159.43 | 0.08 | -0.02 | -0.01 | -39.43 | -27.43 | 438.29 | 371.43 | 4 | 1485.71 |
| 0.06 | 159.65 | 0.08 | -0.02 | 0.01 | -60.93 | -31.44 | 414.93 | 322.55 | 2 | 645.10 |
| 0.06 | 159.88 | 0.07 | -0.02 | -0.01 | -55.02 | -35.06 | 388.87 | 298.78 | 4 | 1195.13 |
| 0.05 | 160.10 | 0.07 | -0.02 | -0.01 | -58.18 | -38.89 | 359.97 | 262.89 | 2 | 525.78 |

| z (m) | 1 | z (m) | z' (m/s) | z'' (m/s ²) | F_A (kN) | F_B (kN) | F_C (kN) | F_3 (reaksi) (kN) | FS | $F_3 \times FS$ |
|---------|--------|---------|---------------|------------------------------|------------|---------------|------------|---------------------------|----|-----------------|
| 0.00 | 171.51 | -0.01 | 0.05 | 0.03 | 134.86 | 78.65 | -32.80 | 180.70 | 4 | 722.81 |
| 0.05 | 171.75 | 0.01 | 0.05 | 0.02 | 86.72 | 84.35 | 29.89 | 200.96 | 2 | 401.92 |
| 0.01 | 171.95 | 0.02 | 0.05 | -0.01 | -55.40 | 80.71 | 89.86 | 115.17 | 4 | 460.69 |
| 0.02 | 172.18 | 0.03 | 0.05 | -0.02 | -90.47 | 74.75 | 145.42 | 129.70 | 2 | 259.40 |
| 0.03 | 172.40 | 0.04 | 0.04 | -0.02 | -102.10 | 68.04 | 195.98 | 161.92 | 4 | 647.66 |
| 0.04 | 172.62 | 0.05 | 0.04 | -0.03 | -179.34 | 56.23 | 237.77 | 114.67 | 2 | 229.34 |
| 0.04 | 172.85 | 0.05 | 0.03 | -0.04 | -206.14 | 42.65 | 269.47 | 105.79 | 4 | 423.14 |
| 0.04 | 173.07 | 0.06 | 0.02 | -0.04 | -216.02 | 28.44 | 290.60 | 103.02 | 2 | 206.05 |
| 0.05 | 173.30 | 0.06 | 0.02 | 0.00 | 21.19 | 29.83 | 312.77 | 363.80 | 4 | 1455.21 |
| 0.05 | 173.52 | 0.06 | 0.02 | 0.00 | -12.33 | 29.02 | 334.34 | 351.03 | 2 | 702.07 |
| 0.05 | 173.74 | 0.07 | 0.02 | 0.01 | 33.83 | 31.25 | 357.56 | 422.64 | 4 | 1690.57 |
| 0.06 | 173.97 | 0.07 | 0.02 | 0.00 | 12.13 | 32.05 | 381.38 | 425.55 | 2 | 851.10 |
| 0.06 | 174.19 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | 13.96 | 32.96 | 405.88 | 452.80 | 4 | 1811.21 |
| 0.06 | 174.41 | 0.08 | 0.01 | -0.05 | -259.93 | 15.86 | 417.66 | 173.59 | 2 | 347.18 |
| 0.06 | 174.64 | 0.08 | 0.00 | -0.04 | -241.29 | -0.02 | 417.65 | 176.34 | 4 | 705.36 |
| 0.06 | 174.86 | 0.08 | -0.01 | -0.04 | -190.95 | -12.59 | 408.29 | 204.76 | 2 | 409.51 |
| 0.06 | 175.08 | 0.07 | -0.01 | -0.02 | -108.72 | -19.74 | 393.62 | 265.16 | 4 | 1060.64 |
| 0.06 | 175.31 | 0.07 | -0.02 | -0.02 | -110.35 | -27.00 | 373.56 | 236.20 | 2 | 472.40 |
| 0.05 | 175.53 | 0.07 | -0.02 | 0.00 | 12.53 | -26.18 | 354.10 | 340.46 | 4 | 1361.82 |
| 0.05 | 175.75 | 0.06 | -0.02 | 0.00 | -0.92 | -26.24 | 334.60 | 307.45 | 2 | 614.89 |
| 0.05 | 175.98 | 0.06 | -0.02 | -0.01 | -47.99 | -29.40 | 312.75 | 235.36 | 4 | 941.46 |
| 0.04 | 176.20 | 0.05 | -0.02 | -0.01 | -64.40 | -33.64 | 287.76 | 189.72 | 2 | 379.45 |
| 0.04 | 176.43 | 0.05 | -0.02 | -0.01 | -33.63 | -55.85 | 261.12 | 191.64 | 4 | 766.57 |
| 0.04 | 176.65 | 0.04 | -0.02 | 0.00 | 14.06 | -34.92 | 235.16 | 214.30 | 2 | 428.60 |
| 0.03 | 176.87 | 0.04 | -0.02 | 0.01 | 47.79 | -31.78 | 211.55 | 227.56 | 4 | 910.23 |
| 0.03 | 177.10 | 0.04 | -0.02 | 0.01 | 79.99 | -26.51 | 191.84 | 245.32 | 2 | 490.63 |
| 0.03 | 177.32 | 0.03 | -0.02 | 0.01 | 35.77 | -24.16 | 173.89 | 185.49 | 4 | 741.97 |
| 0.02 | 177.54 | 0.03 | -0.02 | 0.00 | -1.02 | -24.23 | 155.88 | 130.64 | 2 | 261.27 |
| 0.02 | 177.77 | 0.03 | -0.02 | -0.02 | -85.00 | -29.88 | 133.68 | 17.90 | 4 | 71.60 |
| 0.02 | 177.99 | 0.02 | -0.03 | -0.03 | -152.33 | -39.91 | 104.02 | -88.22 | 2 | 176.43 |
| 0.01 | 178.21 | 0.01 | -0.03 | -0.03 | -178.42 | -51.65 | 65.64 | -164.42 | 4 | 657.70 |
| 0.00 | 178.44 | 0.00 | -0.04 | -0.03 | -157.32 | -62.00 | 39.57 | -199.75 | 2 | 399.50 |
| 0.00 | 178.66 | -0.01 | -0.04 | -0.02 | -94.42 | -68.21 | -31.13 | -193.76 | 4 | 773.03 |
| 0.01 | 178.89 | -0.02 | -0.05 | -0.03 | -142.36 | -77.58 | -88.78 | -308.72 | 2 | 617.44 |
| 0.02 | 179.11 | -0.03 | -0.05 | 0.00 | 16.77 | -76.48 | -145.62 | -205.32 | 4 | 821.29 |
| 0.03 | 179.33 | -0.04 | -0.05 | 0.00 | 14.67 | -75.51 | -201.74 | -262.57 | 2 | 525.15 |
| 0.04 | 179.56 | -0.05 | -0.05 | 0.00 | 16.61 | -74.42 | -257.04 | -314.85 | 4 | 1259.40 |
| 0.05 | 179.78 | -0.06 | -0.05 | 0.01 | 29.04 | -72.51 | -310.93 | -354.39 | 2 | 708.79 |
| 0.05 | 180.00 | -0.07 | -0.04 | 0.02 | 126.66 | -64.17 | -358.62 | -296.13 | 4 | 1184.53 |
| | | | | | | | | SUM | | 4108596,58 |

$$m_0 = \frac{1}{3} \times \Delta T \times \{ \text{SUM}(F_3 \times FS) \}$$

$$= \frac{1}{3} \times (180,23-180) \times 4108596,58 = 306236,71$$

| Cycle (s) | Time (s) | Amplitude (mm) | Interval time per cycle (s) | Logarithmic Transmittance | Change Rate (%) | Phase Frequency (rad/s) | Phase Frequency (rad/s) |
|-----------|----------|----------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| - | 0.52 | 1.26 | - | - | - | - | - |
| 1 | 2.08 | 0.96 | 1.56 | 0.605 | 0.096 | 4.126 | 4.115 |
| 2 | 3.62 | 0.68 | 1.54 | 0.476 | 0.075 | 4.126 | 4.138 |
| 3 | 5.16 | 0.42 | 1.54 | 0.476 | 0.075 | 4.126 | 4.138 |
| 4 | 6.66 | 0.31 | 1.50 | 0.433 | 0.069 | 4.126 | 4.136 |
| 5 | 8.18 | 0.22 | 1.52 | 0.415 | 0.066 | 4.126 | 4.135 |
| 6 | 9.70 | 0.19 | 1.52 | 0.372 | 0.059 | 4.126 | 4.135 |
| 7 | 11.18 | 0.15 | 1.48 | 0.350 | 0.056 | 4.126 | 4.137 |
| 8 | 12.64 | 0.13 | 1.42 | 0.310 | 0.048 | 4.126 | 4.131 |
| 9 | 14.14 | 0.08 | 1.50 | 0.246 | 0.055 | 4.126 | 4.132 |
| 10 | 15.60 | 0.06 | 1.66 | 0.332 | 0.053 | 4.126 | 4.132 |

| Natural Heave Period (undamped) (%) | Heave Added Coeff. (kg) | Heave Added Mass | Heave Spring (N/m) | Phase Change (Degrees) | Coeff. Damping | Nagayasu (2012) | |
|-------------------------------------|-------------------------|------------------|--------------------|------------------------|----------------|-----------------|-------|
| | | | | | | 2.183 | 0.133 |
| - | - | - | - | - | - | Nagayasu (2012) | |
| - | 2.414 | 0.149 | 328,505 | 8.78 | 0.231 | 2.183 | 0.133 |
| - | - | - | - | - | - | 2.183 | 0.133 |
| - | - | - | - | - | - | 8.72 | 0.233 |
| - | - | - | - | - | - | 328,505 | 0.133 |
| - | - | - | - | - | - | 0.133 | 0.133 |

| Cycle (n) | Time (s) | Amplitude (cm) | Interval time per cycle (s) | Damping Ratio | Wave Frequency (damped) (rad/s) | Wave Frequency (undamped) (rad/s) |
|-----------|----------|----------------|-----------------------------|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| - | 1.32 | -1.22 | - | - | - | - |
| 1 | 2.86 | -0.83 | 1.54 | 0.390 | 4.134 | 4.112 |
| 2 | 4.40 | -0.62 | 1.54 | 0.337 | 4.134 | 4.140 |
| 3 | 5.90 | -0.48 | 1.50 | 0.312 | 4.134 | 4.139 |
| 4 | 7.42 | -0.40 | 1.52 | 0.279 | 4.134 | 4.138 |
| 5 | 8.90 | -0.31 | 1.48 | 0.275 | 4.134 | 4.138 |
| 6 | 10.38 | -0.22 | 1.48 | 0.283 | 4.134 | 4.139 |
| 7 | 11.92 | -0.17 | 1.54 | 0.282 | 4.134 | 4.138 |
| 8 | 13.48 | -0.12 | 1.56 | 0.291 | 4.134 | 4.138 |
| 9 | 14.90 | -0.12 | 1.42 | 0.262 | 4.134 | 4.137 |
| 10 | 16.46 | -0.13 | 1.56 | 0.226 | 4.134 | 4.136 |

| Natural Heave Period (undamped) (s) | Nimmay et al (2013) | | | | Nallayarasu (2012) | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|--------------------|-------------------------|-------|
| | Heave Added Mass (kg) | Coef. Added Mass | Heave Spring (N/m) | Heave Damping (N/(m/s)) | Coef. Damping | Heave Added Mass (kg) | Coef. Added Mass | Heave Spring (N/m) | Heave Damping (N/(m/s)) | |
| 1.518 | 2.414 | 0.149 | 328,505 | 7.31 | 0.194 | 2.183 | 0.133 | 328,505 | 7.26 | 0.196 |

(Diameter Ratio 1.3)

| ω/ω_n | Damping Ratio | ζ_0/ζ_s | ϵ_z |
|-------------------|---------------|-------------------|--------------|
| 0 | 0,043 | 1,000 | 0,0 |
| 0,25 | | 1,067 | 1,3 |
| 0,5 | | 1,333 | 3,3 |
| 0,75 | | 2,272 | 8,4 |
| 1 | | 11,581 | 90,0 |
| 1,25 | | 1,729 | 169,1 |
| 1,5 | | 0,791 | 174,1 |
| 1,75 | | 0,481 | 175,8 |
| 2 | | 0,331 | 176,7 |
| 2,25 | | 0,245 | 177,3 |
| 2,5 | | 0,189 | 177,6 |
| 2,75 | | 0,152 | 177,9 |
| 3 | | 0,124 | 178,1 |

(Diameter Ratio 1.4)

| ω/ω_n | Damping Ratio | ζ_0/ζ_s | ϵ_z |
|-------------------|---------------|-------------------|--------------|
| 0 | 0,050 | 1,000 | 0,0 |
| 0,25 | | 1,067 | 1,5 |
| 0,5 | | 1,333 | 3,8 |
| 0,75 | | 2,267 | 9,8 |
| 1 | | 9,957 | 90,0 |
| 1,25 | | 1,713 | 167,4 |
| 1,5 | | 0,787 | 173,1 |
| 1,75 | | 0,480 | 175,1 |
| 2 | | 0,350 | 176,2 |
| 2,25 | | 0,244 | 176,8 |
| 2,5 | | 0,189 | 177,3 |
| 2,75 | | 0,151 | 177,6 |
| 3 | | 0,124 | 177,8 |

(Diameter Ratio 1.5)

| ω/ω_n | Damping Ratio | ζ_0/ζ_s | ϵ_z |
|-------------------|---------------|-------------------|--------------|
| 0 | 0,056 | 1,000 | 0,0 |
| 0,25 | | 1,067 | 1,7 |
| 0,5 | | 1,332 | 4,2 |
| 0,75 | | 2,263 | 10,8 |
| 1 | | 8,992 | 90,0 |
| 1,25 | | 1,699 | 166,1 |
| 1,5 | | 0,784 | 172,4 |
| 1,75 | | 0,478 | 174,6 |
| 2 | | 0,329 | 175,8 |
| 2,25 | | 0,244 | 176,5 |
| 2,5 | | 0,189 | 177,0 |
| 2,75 | | 0,151 | 177,3 |
| 3 | | 0,124 | 177,6 |

LAMPIRAN G

**MODEL NUMERIS DIAMETER RATIO 1.3
KONDISI TERTAMBAT TACT**

| mode | z (cm) |
|------|---------|
| 0 | -1 |
| 0.02 | -0.8825 |
| 0.04 | -0.7596 |
| 0.06 | -0.6315 |
| 0.08 | -0.4998 |
| 0.1 | -0.3654 |
| 0.12 | -0.2292 |
| 0.14 | -0.0924 |
| 0.16 | 0.0416 |
| 0.18 | 0.17935 |
| 0.2 | 0.31222 |
| 0.22 | 0.4473 |
| 0.24 | 0.56709 |
| 0.26 | 0.68726 |
| 0.28 | 0.80145 |
| 0.3 | 0.90878 |
| 0.32 | 1.00858 |
| 0.34 | 1.10073 |
| 0.36 | 1.18281 |
| 0.38 | 1.25608 |
| 0.4 | 1.31945 |
| 0.42 | 1.37255 |
| 0.44 | 1.415 |
| 0.46 | 1.44662 |
| 0.48 | 1.46725 |
| 0.5 | 1.47677 |
| 0.52 | 1.47524 |
| 0.54 | 1.46273 |
| 0.56 | 1.43943 |
| 0.58 | 1.40558 |
| 0.6 | 1.36151 |
| 0.62 | 1.30763 |
| 0.64 | 1.24441 |
| 0.66 | 1.17238 |
| 0.68 | 1.09216 |
| 0.7 | 1.0044 |
| 0.72 | 0.90981 |
| 0.74 | 0.80913 |
| 0.76 | 0.70318 |
| 0.78 | 0.59277 |
| 0.8 | 0.47876 |
| 0.82 | 0.36205 |

| mode | z (cm) |
|------|---------|
| 0.84 | 0.24346 |
| 0.86 | 0.12395 |
| 0.88 | 0.0044 |
| 0.9 | -0.1143 |
| 0.92 | -0.2313 |
| 0.94 | -0.3457 |
| 0.96 | -0.4566 |
| 0.98 | -0.5634 |
| 1 | -0.6652 |
| 1.02 | -0.7612 |
| 1.04 | -0.8509 |
| 1.06 | -0.9336 |
| 1.08 | -1.0088 |
| 1.1 | -1.0758 |
| 1.12 | -1.1364 |
| 1.14 | -1.1841 |
| 1.16 | -1.2246 |
| 1.18 | -1.2556 |
| 1.2 | -1.2772 |
| 1.22 | -1.289 |
| 1.24 | -1.2911 |
| 1.26 | -1.2837 |
| 1.28 | -1.2667 |
| 1.3 | -1.2404 |
| 1.32 | -1.205 |
| 1.34 | -1.161 |
| 1.36 | -1.1086 |
| 1.38 | -1.0484 |
| 1.4 | -0.9808 |
| 1.42 | -0.9064 |
| 1.44 | -0.8258 |
| 1.46 | -0.7396 |
| 1.48 | -0.6486 |
| 1.5 | -0.5534 |
| 1.52 | -0.4548 |
| 1.54 | -0.3535 |
| 1.56 | -0.2504 |
| 1.58 | -0.1461 |
| 1.6 | -0.0415 |
| 1.62 | 0.06239 |
| 1.64 | 0.16347 |
| 1.66 | 0.26656 |
| 1.68 | 0.36453 |
| 1.7 | 0.45925 |
| 1.72 | 0.54986 |

| mode | z (cm) |
|------|---------|
| 1.74 | 0.63371 |
| 1.76 | 0.71619 |
| 1.78 | 0.79074 |
| 1.8 | 0.85886 |
| 1.82 | 0.92007 |
| 1.84 | 0.97399 |
| 1.86 | 1.02025 |
| 1.88 | 1.05858 |
| 1.9 | 1.08874 |
| 1.92 | 1.11057 |
| 1.94 | 1.12397 |
| 1.96 | 1.12891 |
| 1.98 | 1.12539 |
| 2 | 1.11353 |
| 2.02 | 1.09346 |
| 2.04 | 1.0654 |
| 2.06 | 1.02961 |
| 2.08 | 0.98642 |
| 2.1 | 0.9362 |
| 2.12 | 0.87938 |
| 2.14 | 0.81643 |
| 2.16 | 0.74786 |
| 2.18 | 0.67423 |
| 2.2 | 0.59613 |
| 2.22 | 0.51416 |
| 2.24 | 0.42896 |
| 2.26 | 0.3412 |
| 2.28 | 0.25155 |
| 2.3 | 0.16068 |
| 2.32 | 0.06929 |
| 2.34 | -0.0219 |
| 2.36 | -0.1123 |
| 2.38 | -0.2012 |
| 2.4 | -0.288 |
| 2.42 | -0.3719 |
| 2.44 | -0.4525 |
| 2.46 | -0.5291 |
| 2.48 | -0.6012 |
| 2.5 | -0.6683 |
| 2.52 | -0.7299 |
| 2.54 | -0.7857 |
| 2.56 | -0.8351 |
| 2.58 | -0.878 |
| 2.6 | -0.914 |
| 2.62 | -0.943 |
| 2.64 | -0.9647 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 1.6 | -0.9791 |
| 1.6 | -0.9861 |
| 1.6 | -0.9857 |
| 1.7 | -0.9779 |
| 1.7 | -0.9863 |
| 1.7 | -0.9409 |
| 1.8 | -0.9121 |
| 1.8 | -0.8766 |
| 1.8 | -0.8349 |
| 1.8 | -0.7873 |
| 1.8 | -0.7341 |
| 1.8 | -0.6759 |
| 1.8 | -0.6131 |
| 1.9 | -0.5462 |
| 1.9 | -0.4757 |
| 1.9 | -0.4021 |
| 1.9 | -0.3262 |
| 1.9 | -0.2483 |
| 1.9 | -0.1692 |
| 1.9 | -0.0894 |
| 1.9 | -0.0096 |
| 1.9 | 0.06979 |
| 1.9 | 0.14804 |
| 1.9 | 0.22461 |
| 1.9 | 0.29894 |
| 1.9 | 0.37049 |
| 1.9 | 0.43876 |
| 1.9 | 0.50326 |
| 1.9 | 0.56354 |
| 1.9 | 0.61917 |
| 1.9 | 0.66979 |
| 1.9 | 0.71504 |
| 1.9 | 0.75464 |
| 1.9 | 0.78832 |
| 1.9 | 0.81589 |
| 1.9 | 0.83717 |
| 1.9 | 0.85207 |
| 1.9 | 0.86051 |
| 1.9 | 0.86248 |
| 1.9 | 0.85802 |
| 1.9 | 0.8472 |
| 1.9 | 0.83015 |
| 1.9 | 0.80704 |
| 1.9 | 0.7781 |
| 1.9 | 0.74357 |
| 1.9 | 0.70376 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 3.58 | 0.65901 |
| 3.6 | 0.60967 |
| 3.62 | 0.55616 |
| 3.64 | 0.49891 |
| 3.66 | 0.43836 |
| 3.68 | 0.37499 |
| 3.7 | 0.3093 |
| 3.72 | 0.24179 |
| 3.74 | 0.17298 |
| 3.76 | 0.10339 |
| 3.78 | 0.03353 |
| 3.8 | -0.0361 |
| 3.82 | -0.1049 |
| 3.84 | -0.1724 |
| 3.86 | -0.2381 |
| 3.88 | -0.3016 |
| 3.9 | -0.3623 |
| 3.92 | -0.42 |
| 3.94 | -0.474 |
| 3.96 | -0.5242 |
| 3.98 | -0.57 |
| 4 | -0.6113 |
| 4.02 | -0.6477 |
| 4.04 | -0.6791 |
| 4.06 | -0.7051 |
| 4.08 | -0.7257 |
| 4.1 | -0.7408 |
| 4.12 | -0.7502 |
| 4.14 | -0.7539 |
| 4.16 | -0.7521 |
| 4.18 | -0.7446 |
| 4.2 | -0.7316 |
| 4.22 | -0.7133 |
| 4.24 | -0.6899 |
| 4.26 | -0.6614 |
| 4.28 | -0.6283 |
| 4.3 | -0.5907 |
| 4.32 | -0.5489 |
| 4.34 | -0.5034 |
| 4.36 | -0.4545 |
| 4.38 | -0.4026 |
| 4.4 | -0.348 |
| 4.42 | -0.2913 |
| 4.44 | -0.2328 |
| 4.46 | -0.173 |
| 4.48 | -0.1124 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 4.5 | -0.0514 |
| 4.52 | 0.00961 |
| 4.54 | 0.07005 |
| 4.56 | 0.12952 |
| 4.58 | 0.18759 |
| 4.6 | 0.24384 |
| 4.62 | 0.29786 |
| 4.64 | 0.34925 |
| 4.66 | 0.39767 |
| 4.68 | 0.44278 |
| 4.7 | 0.48425 |
| 4.72 | 0.52181 |
| 4.74 | 0.55521 |
| 4.76 | 0.58422 |
| 4.78 | 0.60868 |
| 4.8 | 0.62842 |
| 4.82 | 0.64333 |
| 4.84 | 0.65335 |
| 4.86 | 0.65842 |
| 4.88 | 0.65856 |
| 4.9 | 0.65379 |
| 4.92 | 0.64418 |
| 4.94 | 0.62986 |
| 4.96 | 0.61094 |
| 4.98 | 0.58762 |
| 5 | 0.56009 |
| 5.02 | 0.5286 |
| 5.04 | 0.4934 |
| 5.06 | 0.45479 |
| 5.08 | 0.41307 |
| 5.1 | 0.36859 |
| 5.12 | 0.32169 |
| 5.14 | 0.27274 |
| 5.16 | 0.22212 |
| 5.18 | 0.17022 |
| 5.2 | 0.11743 |
| 5.22 | 0.06416 |
| 5.24 | 0.01081 |
| 5.26 | -0.0422 |
| 5.28 | -0.0946 |
| 5.3 | -0.1458 |
| 5.32 | -0.1956 |
| 5.34 | -0.2436 |
| 5.36 | -0.2894 |
| 5.38 | -0.3327 |
| 5.4 | -0.3732 |

| 1 model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 1.0 | -0.4106 |
| 1.1 | -0.4147 |
| 1.2 | -0.4188 |
| 1.3 | -0.4229 |
| 1.4 | -0.4270 |
| 1.5 | -0.4311 |
| 1.6 | -0.4352 |
| 1.7 | -0.4393 |
| 1.8 | -0.4434 |
| 1.9 | -0.4475 |
| 2.0 | -0.4516 |
| 2.1 | -0.4557 |
| 2.2 | -0.4598 |
| 2.3 | -0.4639 |
| 2.4 | -0.4680 |
| 2.5 | -0.4721 |
| 2.6 | -0.4762 |
| 2.7 | -0.4803 |
| 2.8 | -0.4844 |
| 2.9 | -0.4885 |
| 3.0 | -0.4926 |
| 3.1 | -0.4967 |
| 3.2 | -0.5008 |
| 3.3 | -0.5049 |
| 3.4 | -0.5090 |
| 3.5 | -0.5131 |
| 3.6 | -0.5172 |
| 3.7 | -0.5213 |
| 3.8 | -0.5254 |
| 3.9 | -0.5295 |
| 4.0 | -0.5336 |
| 4.1 | -0.5377 |
| 4.2 | -0.5418 |
| 4.3 | -0.5459 |
| 4.4 | -0.5500 |
| 4.5 | -0.5541 |
| 4.6 | -0.5582 |
| 4.7 | -0.5623 |
| 4.8 | -0.5664 |
| 4.9 | -0.5705 |
| 5.0 | -0.5746 |
| 5.1 | -0.5787 |
| 5.2 | -0.5828 |
| 5.3 | -0.5869 |
| 5.4 | -0.5910 |
| 5.5 | -0.5951 |
| 5.6 | -0.5992 |
| 5.7 | -0.6033 |
| 5.8 | -0.6074 |
| 5.9 | -0.6115 |
| 6.0 | -0.6156 |
| 6.1 | -0.6197 |
| 6.2 | -0.6238 |
| 6.3 | -0.6279 |
| 6.4 | -0.6320 |
| 6.5 | -0.6361 |
| 6.6 | -0.6402 |
| 6.7 | -0.6443 |
| 6.8 | -0.6484 |
| 6.9 | -0.6525 |
| 7.0 | -0.6566 |
| 7.1 | -0.6607 |
| 7.2 | -0.6648 |
| 7.3 | -0.6689 |
| 7.4 | -0.6730 |
| 7.5 | -0.6771 |
| 7.6 | -0.6812 |
| 7.7 | -0.6853 |
| 7.8 | -0.6894 |
| 7.9 | -0.6935 |
| 8.0 | -0.6976 |
| 8.1 | -0.7017 |
| 8.2 | -0.7058 |
| 8.3 | -0.7099 |
| 8.4 | -0.7140 |
| 8.5 | -0.7181 |
| 8.6 | -0.7222 |
| 8.7 | -0.7263 |
| 8.8 | -0.7304 |
| 8.9 | -0.7345 |
| 9.0 | -0.7386 |
| 9.1 | -0.7427 |
| 9.2 | -0.7468 |
| 9.3 | -0.7509 |
| 9.4 | -0.7550 |
| 9.5 | -0.7591 |
| 9.6 | -0.7632 |
| 9.7 | -0.7673 |
| 9.8 | -0.7714 |
| 9.9 | -0.7755 |
| 10.0 | -0.7796 |

| 1 model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 6.24 | 0.50256 |
| 6.36 | 0.49788 |
| 6.38 | 0.48953 |
| 6.4 | 0.4776 |
| 6.42 | 0.46219 |
| 6.44 | 0.44346 |
| 6.46 | 0.42157 |
| 6.48 | 0.3967 |
| 6.5 | 0.36905 |
| 6.52 | 0.33887 |
| 6.54 | 0.30538 |
| 6.55 | 0.27185 |
| 6.58 | 0.23555 |
| 6.5 | 0.19776 |
| 6.62 | 0.15878 |
| 6.64 | 0.1191 |
| 6.66 | 0.07844 |
| 6.68 | 0.03769 |
| 6.7 | -0.003 |
| 6.72 | -0.0435 |
| 6.74 | -0.0832 |
| 6.75 | -0.1221 |
| 6.78 | -0.1598 |
| 6.8 | -0.196 |
| 6.82 | -0.2305 |
| 6.84 | -0.263 |
| 6.86 | -0.2933 |
| 6.88 | -0.3212 |
| 6.9 | -0.3465 |
| 6.92 | -0.3697 |
| 6.94 | -0.3887 |
| 6.96 | -0.4053 |
| 6.98 | -0.4187 |
| 7 | -0.429 |
| 7.02 | -0.4359 |
| 7.04 | -0.4396 |
| 7.06 | -0.44 |
| 7.08 | -0.4371 |
| 7.1 | -0.4309 |
| 7.12 | -0.4216 |
| 7.14 | -0.4092 |
| 7.16 | -0.3939 |
| 7.18 | -0.3757 |
| 7.2 | -0.3549 |
| 7.22 | -0.3316 |
| 7.24 | -0.306 |

| 1 model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 7.26 | -0.2783 |
| 7.28 | -0.2487 |
| 7.3 | -0.2175 |
| 7.32 | -0.1849 |
| 7.34 | -0.1512 |
| 7.36 | -0.1166 |
| 7.38 | -0.0814 |
| 7.4 | -0.0458 |
| 7.42 | -0.0102 |
| 7.44 | 0.02528 |
| 7.46 | 0.06029 |
| 7.48 | 0.09458 |
| 7.5 | 0.12792 |
| 7.52 | 0.16007 |
| 7.54 | 0.19078 |
| 7.56 | 0.21985 |
| 7.58 | 0.24705 |
| 7.6 | 0.27224 |
| 7.62 | 0.2952 |
| 7.64 | 0.3158 |
| 7.66 | 0.33389 |
| 7.68 | 0.34936 |
| 7.7 | 0.36211 |
| 7.72 | 0.37208 |
| 7.74 | 0.3792 |
| 7.76 | 0.38345 |
| 7.78 | 0.38481 |
| 7.8 | 0.38329 |
| 7.82 | 0.37893 |
| 7.84 | 0.37178 |
| 7.86 | 0.36192 |
| 7.88 | 0.34943 |
| 7.9 | 0.33443 |
| 7.92 | 0.31705 |
| 7.94 | 0.29745 |
| 7.96 | 0.27577 |
| 7.98 | 0.25219 |
| 8 | 0.22691 |
| 8.02 | 0.20013 |
| 8.04 | 0.1726 |
| 8.06 | 0.14291 |
| 8.08 | 0.11291 |
| 8.1 | 0.0822 |
| 8.12 | 0.05129 |
| 8.14 | 0.02014 |
| 8.16 | -0.0109 |

| | |
|-----|----------|
| 10 | 0.23012 |
| 11 | 0.21307 |
| 12 | 0.19629 |
| 13 | 0.17991 |
| 14 | 0.16208 |
| 15 | 0.14295 |
| 16 | 0.12298 |
| 17 | 0.10208 |
| 18 | 0.08002 |
| 19 | 0.05646 |
| 20 | 0.03174 |
| 21 | 0.00622 |
| 22 | -0.02079 |
| 23 | -0.04341 |
| 24 | -0.07943 |
| 25 | -0.10667 |
| 26 | -0.12895 |
| 27 | -0.14520 |
| 28 | -0.15208 |
| 29 | -0.15208 |
| 30 | -0.14629 |
| 31 | -0.13791 |
| 32 | -0.12508 |
| 33 | -0.10795 |
| 34 | -0.08298 |
| 35 | -0.05998 |
| 36 | -0.03724 |
| 37 | -0.01502 |
| 38 | 0.00664 |
| 39 | 0.02481 |
| 40 | 0.04096 |
| 41 | 0.05375 |
| 42 | 0.06299 |
| 43 | 0.06854 |
| 44 | 0.07064 |
| 45 | 0.06911 |
| 46 | 0.06412 |
| 47 | 0.05558 |
| 48 | 0.04329 |
| 49 | 0.02775 |
| 50 | 0.00917 |
| 51 | -0.01296 |
| 52 | -0.02971 |
| 53 | -0.04835 |
| 54 | -0.06854 |
| 55 | -0.08984 |
| 56 | -0.11181 |
| 57 | -0.13395 |
| 58 | -0.15584 |
| 59 | -0.17708 |
| 60 | -0.19728 |
| 61 | -0.21605 |
| 62 | -0.23298 |
| 63 | -0.24764 |
| 64 | -0.25967 |
| 65 | -0.26867 |
| 66 | -0.27421 |
| 67 | -0.27598 |
| 68 | -0.27367 |
| 69 | -0.26695 |
| 70 | -0.25567 |
| 71 | -0.23967 |
| 72 | -0.21967 |
| 73 | -0.19567 |
| 74 | -0.16867 |
| 75 | -0.13867 |
| 76 | -0.10567 |
| 77 | -0.06967 |
| 78 | -0.03067 |
| 79 | 0.01067 |
| 80 | 0.04067 |
| 81 | 0.06067 |
| 82 | 0.07067 |
| 83 | 0.07067 |
| 84 | 0.06067 |
| 85 | 0.04067 |
| 86 | 0.01067 |
| 87 | -0.02067 |
| 88 | -0.04067 |
| 89 | -0.06067 |
| 90 | -0.08067 |
| 91 | -0.10067 |
| 92 | -0.12067 |
| 93 | -0.14067 |
| 94 | -0.16067 |
| 95 | -0.18067 |
| 96 | -0.20067 |
| 97 | -0.22067 |
| 98 | -0.24067 |
| 99 | -0.26067 |
| 100 | -0.28067 |

| | |
|-----|----------|
| 91 | 0.24513 |
| 92 | 0.25961 |
| 93 | 0.26986 |
| 94 | 0.27902 |
| 95 | 0.28603 |
| 96 | 0.29087 |
| 97 | 0.29315 |
| 98 | 0.29392 |
| 99 | 0.29216 |
| 100 | 0.28823 |
| 101 | 0.28218 |
| 102 | 0.27408 |
| 103 | 0.264 |
| 104 | 0.25302 |
| 105 | 0.23826 |
| 106 | 0.22282 |
| 107 | 0.20584 |
| 108 | 0.18745 |
| 109 | 0.1678 |
| 110 | 0.14705 |
| 111 | 0.12515 |
| 112 | 0.10238 |
| 113 | 0.07981 |
| 114 | 0.05632 |
| 115 | 0.03218 |
| 116 | 0.00877 |
| 117 | -0.0149 |
| 118 | -0.0383 |
| 119 | -0.0611 |
| 120 | -0.0836 |
| 121 | -0.1052 |
| 122 | -0.1258 |
| 123 | -0.1453 |
| 124 | -0.1636 |
| 125 | -0.1803 |
| 126 | -0.196 |
| 127 | -0.2098 |
| 128 | -0.2221 |
| 129 | -0.2323 |
| 130 | -0.2412 |
| 131 | -0.2468 |
| 132 | -0.2488 |
| 133 | -0.24529 |
| 134 | -0.2359 |
| 135 | -0.2207 |
| 136 | -0.20062 |
| 137 | -0.17534 |
| 138 | -0.14462 |
| 139 | -0.10862 |
| 140 | -0.06762 |

| | |
|-------|---------|
| 10.02 | -0.2488 |
| 10.04 | -0.2423 |
| 10.06 | -0.2341 |
| 10.08 | -0.2243 |
| 10.1 | -0.2128 |
| 10.12 | -0.1998 |
| 10.14 | -0.1854 |
| 10.16 | -0.1698 |
| 10.18 | -0.153 |
| 10.2 | -0.1352 |
| 10.22 | -0.1164 |
| 10.24 | -0.0971 |
| 10.26 | -0.0771 |
| 10.28 | -0.0567 |
| 10.3 | -0.036 |
| 10.32 | -0.0152 |
| 10.34 | 0.00539 |
| 10.36 | 0.02616 |
| 10.38 | 0.04639 |
| 10.4 | 0.06612 |
| 10.42 | 0.08521 |
| 10.44 | 0.10353 |
| 10.46 | 0.12094 |
| 10.48 | 0.13733 |
| 10.5 | 0.15257 |
| 10.52 | 0.16656 |
| 10.54 | 0.17921 |
| 10.56 | 0.19043 |
| 10.58 | 0.20015 |
| 10.6 | 0.20831 |
| 10.62 | 0.21483 |
| 10.64 | 0.21979 |
| 10.66 | 0.22298 |
| 10.68 | 0.22482 |
| 10.7 | 0.22438 |
| 10.72 | 0.22156 |
| 10.74 | 0.21611 |
| 10.76 | 0.20805 |
| 10.78 | 0.19743 |
| 10.8 | 0.18432 |
| 10.82 | 0.16878 |
| 10.84 | 0.15089 |
| 10.86 | 0.13076 |
| 10.88 | 0.10848 |
| 10.9 | 0.08315 |
| 10.92 | 0.05589 |

| Model | λ (cm) |
|-------|----------------|
| 11.84 | 0.03968 |
| 11.83 | -0.00797 |
| 11.82 | 0.00866 |
| 11.81 | -0.02231 |
| 11.80 | -0.00849 |
| 11.79 | -0.07 |
| 11.78 | -0.0546 |
| 11.77 | -0.0089 |
| 11.76 | -0.0231 |
| 11.75 | 0.00866 |
| 11.74 | 0.02432 |
| 11.73 | 0.03968 |

| Model | λ (cm) | μ (cm) |
|-------|----------------|------------|
| 11.86 | 0.05461 | |
| 11.88 | 0.06906 | |
| 11.9 | 0.08288 | |
| 11.92 | 0.09597 | |
| 11.94 | 0.10826 | |
| 11.96 | 0.11965 | |
| 11.98 | 0.13006 | |
| 12 | 0.13963 | |
| 12.02 | 0.14759 | |
| 12.04 | 0.15478 | |
| 12.06 | 0.16058 | |
| 12.08 | 0.16533 | |
| 12.1 | 0.16872 | |
| 12.12 | 0.17083 | |
| 12.14 | 0.17165 | |
| 12.16 | 0.17119 | |
| 12.18 | 0.16945 | |
| 12.2 | 0.16647 | |
| 12.22 | 0.16226 | |
| 12.24 | 0.15688 | |
| 12.26 | 0.15038 | |
| 12.28 | 0.1428 | |
| 12.3 | 0.13421 | |
| 12.32 | 0.12469 | |
| 12.34 | 0.1143 | |
| 12.36 | 0.10315 | |
| 12.38 | 0.09131 | |
| 12.4 | 0.07887 | |
| 12.42 | 0.06594 | |
| 12.44 | 0.05262 | |
| 12.46 | 0.039 | |
| 12.48 | 0.02519 | |
| 12.5 | 0.01129 | |
| 12.52 | -0.0026 | |
| 12.54 | -0.0163 | |
| 12.56 | -0.0299 | |
| 12.58 | -0.0431 | |
| 12.6 | -0.0559 | |
| 12.62 | -0.0682 | |
| 12.64 | -0.0798 | |
| 12.66 | -0.0908 | |
| 12.68 | -0.1011 | |
| 12.7 | -0.1105 | |
| 12.72 | -0.115 | |
| 12.74 | -0.1266 | |
| 12.76 | -0.1332 | |

| Model | λ (cm) | μ (cm) |
|-------|----------------|------------|
| 12.78 | -0.1387 | |
| 12.8 | -0.1432 | |
| 12.82 | -0.1465 | |
| 12.84 | -0.1488 | |
| 12.86 | -0.1499 | |
| 12.88 | -0.1499 | |
| 12.9 | -0.1488 | |
| 12.92 | -0.1466 | |
| 12.94 | -0.1433 | |
| 12.96 | -0.1389 | |
| 12.98 | -0.1336 | |
| 13 | -0.1273 | |
| 13.02 | -0.1201 | |
| 13.04 | -0.1121 | |
| 13.06 | -0.1033 | |
| 13.08 | -0.0938 | |
| 13.1 | -0.0836 | |
| 13.12 | -0.0729 | |
| 13.14 | -0.0618 | |
| 13.16 | -0.0502 | |
| 13.18 | -0.0384 | |
| 13.2 | -0.0264 | |
| 13.22 | -0.0143 | |
| 13.24 | -0.0021 | |
| 13.26 | 0.00996 | |
| 13.28 | 0.02187 | |
| 13.3 | 0.03355 | |
| 13.32 | 0.04485 | |
| 13.34 | 0.05576 | |
| 13.36 | 0.06617 | |
| 13.38 | 0.07601 | |
| 13.4 | 0.08521 | |
| 13.42 | 0.09371 | |
| 13.44 | 0.10145 | |
| 13.46 | 0.10837 | |
| 13.48 | 0.11444 | |
| 13.5 | 0.11961 | |
| 13.52 | 0.12386 | |
| 13.54 | 0.12715 | |
| 13.56 | 0.12947 | |
| 13.58 | 0.1308 | |
| 13.6 | 0.13116 | |
| 13.62 | 0.13053 | |
| 13.64 | 0.12894 | |
| 13.66 | 0.12639 | |
| 13.68 | 0.12293 | |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 15,34 | 0,0342 |
| 15,36 | 0,02632 |
| 15,38 | 0,0183 |
| 15,4 | 0,0102 |
| 15,42 | 0,00208 |
| 15,44 | -0,006 |
| 15,46 | -0,014 |
| 15,48 | -0,0218 |
| 15,5 | -0,0293 |
| 15,52 | -0,0366 |
| 15,54 | -0,0436 |
| 15,56 | -0,0502 |
| 15,58 | -0,0564 |
| 15,6 | -0,0621 |
| 15,62 | -0,0673 |
| 15,64 | -0,072 |
| 15,66 | -0,0761 |
| 15,68 | -0,0796 |
| 15,7 | -0,0825 |
| 15,72 | -0,0848 |
| 15,74 | -0,0864 |
| 15,76 | -0,0873 |
| 15,78 | -0,0875 |
| 15,8 | -0,0872 |
| 15,82 | -0,0862 |
| 15,84 | -0,0846 |
| 15,86 | -0,0823 |
| 15,88 | -0,0795 |
| 15,9 | -0,076 |
| 15,92 | -0,0721 |
| 15,94 | -0,0676 |
| 15,96 | -0,0626 |
| 15,98 | -0,0573 |
| 16 | -0,0515 |
| 15,02 | -0,0454 |
| 16,04 | -0,039 |
| 16,06 | -0,0323 |
| 16,08 | -0,0255 |
| 16,1 | -0,0185 |
| 16,12 | -0,0115 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 14,52 | -0,0769 |
| 14,54 | -0,0695 |
| 14,56 | -0,0617 |
| 14,58 | -0,0534 |
| 14,6 | -0,0448 |
| 14,62 | 0,0359 |
| 14,64 | -0,0268 |
| 14,66 | -0,0176 |
| 14,68 | 0,0083 |
| 14,7 | 0,0096 |
| 14,72 | 0,01015 |
| 14,74 | 0,01921 |
| 14,76 | 0,02805 |
| 14,78 | 0,03662 |
| 14,8 | 0,04485 |
| 14,82 | 0,05269 |
| 14,84 | 0,06008 |
| 14,86 | 0,06697 |
| 14,88 | 0,07331 |
| 14,9 | 0,07905 |
| 14,92 | 0,08416 |
| 14,94 | 0,08861 |
| 14,96 | 0,09237 |
| 14,98 | 0,09541 |
| 15 | 0,09772 |
| 15,02 | 0,09928 |
| 15,04 | 0,10009 |
| 15,06 | 0,10016 |
| 15,08 | 0,09947 |
| 15,1 | 0,09805 |
| 15,12 | 0,09591 |
| 15,14 | 0,09307 |
| 15,16 | 0,08956 |
| 15,18 | 0,08541 |
| 15,2 | 0,08065 |
| 15,22 | 0,07533 |
| 15,24 | 0,06949 |
| 15,26 | 0,06317 |
| 15,28 | 0,05642 |
| 15,3 | 0,04931 |
| 15,32 | 0,04188 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|----------|
| 14,1 | -0,1188 |
| 14,2 | -0,1133 |
| 14,3 | -0,10736 |
| 14,4 | -0,1009 |
| 14,5 | -0,09411 |
| 14,6 | -0,08503 |
| 14,7 | -0,07635 |
| 14,8 | -0,06717 |
| 14,9 | -0,05755 |
| 15,0 | -0,04758 |
| 15,1 | -0,03733 |
| 15,2 | -0,02688 |
| 15,3 | -0,0163 |
| 15,4 | -0,00568 |
| 15,5 | -0,0049 |
| 15,6 | -0,0154 |
| 15,7 | -0,0257 |
| 15,8 | -0,0357 |
| 15,9 | -0,0453 |
| 16,0 | -0,0546 |
| 16,1 | -0,0634 |
| 16,2 | -0,0716 |
| 16,3 | -0,0793 |
| 16,4 | -0,0863 |
| 16,5 | -0,0926 |
| 16,6 | -0,0982 |
| 16,7 | -0,103 |
| 16,8 | -0,107 |
| 16,9 | -0,1102 |
| 17,0 | -0,1125 |
| 17,1 | -0,114 |
| 17,2 | -0,1146 |
| 17,3 | -0,1144 |
| 17,4 | -0,1133 |
| 17,5 | -0,1114 |
| 17,6 | -0,1086 |
| 17,7 | -0,1051 |
| 17,8 | -0,1008 |
| 17,9 | -0,0958 |
| 18,0 | -0,0901 |
| 18,1 | -0,0838 |

| Natural Heave Period (undrained) (s) | Heave Admittance Mass (kg) | Cyclic Admittance Mass | Nativity (2012) | | |
|--------------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------|---------------|--------------|
| | | | Frequency (N/m) | Force (N/m/s) | Cost (N/m/s) |
| 1.455 | 1.328 | 0.085 | 130.40 | 6.98 | 0.188 |
| | 1.267 | 0.072 | 111.53 | 6.62 | 0.188 |

| Order | Time (s) | Retain Interval (T _u) | |
|-------|----------|-----------------------------------|-----------|
| | | Time (s) | Force (N) |
| 1 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| 2 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 3 | 1.50 | 1.50 | 1.50 |
| 4 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 5 | 2.50 | 2.50 | 2.50 |
| 6 | 3.00 | 3.00 | 3.00 |
| 7 | 3.50 | 3.50 | 3.50 |
| 8 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| 9 | 4.50 | 4.50 | 4.50 |
| 10 | 5.00 | 5.00 | 5.00 |

LAMPIRAN H

**MODEL NUMERIS DIAMETER RATIO 1.4
KONDISI TERTAMBAT TAUT**

| l (cm) | r (cm) |
|--------|---------|
| 0 | -1 |
| 1 | -0.9055 |
| 2 | -0.8053 |
| 3 | -0.7003 |
| 4 | -0.5908 |
| 5 | -0.4782 |
| 6 | -0.3631 |
| 7 | -0.2464 |
| 8 | -0.129 |
| 9 | 0.0116 |
| 10 | 0.16491 |
| 11 | 0.31963 |
| 12 | 0.47179 |
| 13 | 0.62061 |
| 14 | 0.76532 |
| 15 | 0.90522 |
| 16 | 1.04082 |
| 17 | 1.17289 |
| 18 | 1.30104 |
| 19 | 1.42559 |
| 20 | 1.54694 |
| 21 | 1.66456 |
| 22 | 1.77882 |
| 23 | 1.88911 |
| 24 | 1.99582 |
| 25 | 2.10018 |
| 26 | 2.20245 |
| 27 | 2.30299 |
| 28 | 2.40196 |
| 29 | 2.49962 |
| 30 | 2.5962 |
| 31 | 2.69115 |
| 32 | 2.78482 |
| 33 | 2.87754 |
| 34 | 2.96961 |
| 35 | 3.06124 |
| 36 | 3.15272 |
| 37 | 3.24333 |
| 38 | 3.33326 |
| 39 | 3.42276 |
| 40 | 3.51194 |

| l (model) (s) | z (cm) |
|---------------|---------|
| 0.84 | 0.40838 |
| 0.86 | 0.31024 |
| 0.88 | 0.21071 |
| 0.9 | 0.11052 |
| 0.92 | 0.0104 |
| 0.94 | -0.0889 |
| 0.96 | -0.1868 |
| 0.98 | -0.2825 |
| 1 | -0.3753 |
| 1.02 | -0.4646 |
| 1.04 | -0.5499 |
| 1.06 | -0.6304 |
| 1.08 | -0.7057 |
| 1.1 | -0.7753 |
| 1.12 | -0.8387 |
| 1.14 | -0.8956 |
| 1.16 | -0.9455 |
| 1.18 | -0.9882 |
| 1.2 | -1.0235 |
| 1.22 | -1.051 |
| 1.24 | -1.0708 |
| 1.26 | -1.0827 |
| 1.28 | -1.0867 |
| 1.3 | -1.0829 |
| 1.32 | -1.0713 |
| 1.34 | -1.0521 |
| 1.36 | -1.0255 |
| 1.38 | -0.9918 |
| 1.4 | -0.9512 |
| 1.42 | -0.9042 |
| 1.44 | -0.851 |
| 1.46 | -0.7922 |
| 1.48 | -0.7281 |
| 1.5 | -0.6594 |
| 1.52 | -0.5866 |
| 1.54 | -0.5101 |
| 1.56 | -0.4306 |
| 1.58 | -0.3487 |
| 1.6 | -0.2651 |
| 1.62 | -0.1802 |
| 1.64 | -0.0947 |
| 1.66 | -0.0093 |
| 1.68 | 0.07541 |
| 1.7 | 0.15888 |
| 1.72 | 0.24049 |

| l (model) (g) | z (cm) |
|---------------|---------|
| 1.74 | 0.31967 |
| 1.76 | 0.39588 |
| 1.78 | 0.46859 |
| 1.8 | 0.5373 |
| 1.82 | 0.60157 |
| 1.84 | 0.66095 |
| 1.86 | 0.71508 |
| 1.88 | 0.7636 |
| 1.9 | 0.80621 |
| 1.92 | 0.84267 |
| 1.94 | 0.87275 |
| 1.96 | 0.8963 |
| 1.98 | 0.9132 |
| 2 | 0.92339 |
| 2.02 | 0.92685 |
| 2.04 | 0.92363 |
| 2.06 | 0.91378 |
| 2.08 | 0.89745 |
| 2.1 | 0.87481 |
| 2.12 | 0.84607 |
| 2.14 | 0.81149 |
| 2.16 | 0.77138 |
| 2.18 | 0.72606 |
| 2.2 | 0.67591 |
| 2.22 | 0.62132 |
| 2.24 | 0.56274 |
| 2.26 | 0.50062 |
| 2.28 | 0.43542 |
| 2.3 | 0.36765 |
| 2.32 | 0.29782 |
| 2.34 | 0.22645 |
| 2.36 | 0.15406 |
| 2.38 | 0.08118 |
| 2.4 | 0.00834 |
| 2.42 | -0.0639 |
| 2.44 | -0.1351 |
| 2.46 | -0.2047 |
| 2.48 | -0.2723 |
| 2.5 | -0.3373 |
| 2.52 | -0.3993 |
| 2.54 | -0.458 |
| 2.56 | -0.5128 |
| 2.58 | -0.5635 |
| 2.6 | -0.6096 |
| 2.62 | -0.6511 |
| 2.64 | -0.6874 |

| l model | z (cm) |
|---------|---------|
| 300 | -0.7186 |
| 301 | -0.7442 |
| 302 | -0.7644 |
| 303 | -0.7788 |
| 304 | -0.7775 |
| 305 | -0.7905 |
| 306 | -0.7878 |
| 307 | -0.7794 |
| 308 | -0.7655 |
| 309 | -0.7462 |
| 310 | -0.7218 |
| 311 | -0.6925 |
| 312 | -0.6581 |
| 313 | -0.6195 |
| 314 | -0.5767 |
| 315 | -0.5302 |
| 316 | -0.4802 |
| 317 | -0.4273 |
| 318 | -0.3717 |
| 319 | -0.3155 |
| 320 | -0.2583 |
| 321 | -0.1955 |
| 322 | -0.1317 |
| 323 | -0.0696 |
| 324 | 0.0074 |
| 325 | 0.0562 |
| 326 | 0.11693 |
| 327 | 0.17431 |
| 328 | 0.23195 |
| 329 | 0.28739 |
| 330 | 0.34031 |
| 331 | 0.39053 |
| 332 | 0.43711 |
| 333 | 0.48035 |
| 334 | 0.51976 |
| 335 | 0.5555 |
| 336 | 0.58665 |
| 337 | 0.61272 |
| 338 | 0.63465 |
| 339 | 0.65183 |
| 340 | 0.66418 |
| 341 | 0.67164 |
| 342 | 0.67422 |
| 343 | 0.67192 |
| 344 | 0.6648 |
| 345 | 0.65298 |

| l model | z (cm) |
|---------|---------|
| 358 | 0.63656 |
| 359 | 0.6157 |
| 360 | 0.59059 |
| 361 | 0.56145 |
| 362 | 0.52852 |
| 363 | 0.49208 |
| 364 | 0.45241 |
| 365 | 0.40982 |
| 366 | 0.36466 |
| 367 | 0.31725 |
| 368 | 0.26798 |
| 369 | 0.21719 |
| 370 | 0.16529 |
| 371 | 0.11263 |
| 372 | 0.05962 |
| 373 | 0.00663 |
| 374 | -0.0459 |
| 375 | -0.0977 |
| 376 | -0.1484 |
| 377 | -0.1976 |
| 378 | -0.2449 |
| 379 | -0.29 |
| 380 | -0.3327 |
| 381 | -0.3726 |
| 382 | -0.4095 |
| 383 | -0.4431 |
| 384 | -0.4733 |
| 385 | -0.4998 |
| 386 | -0.5225 |
| 387 | -0.5412 |
| 388 | -0.5559 |
| 389 | -0.5664 |
| 390 | -0.5728 |
| 391 | -0.575 |
| 392 | -0.5731 |
| 393 | -0.5671 |
| 394 | -0.557 |
| 395 | -0.543 |
| 396 | -0.5252 |
| 397 | -0.5038 |
| 398 | -0.479 |
| 399 | -0.4509 |
| 400 | -0.4199 |
| 401 | -0.386 |
| 402 | -0.3497 |
| 403 | -0.3112 |

| l model | z (cm) |
|---------|---------|
| 45 | -0.2708 |
| 46 | -0.2288 |
| 47 | -0.1855 |
| 48 | -0.1412 |
| 49 | -0.0963 |
| 50 | -0.0511 |
| 51 | -0.0059 |
| 52 | 0.03895 |
| 53 | 0.08313 |
| 54 | 0.12634 |
| 55 | 0.16827 |
| 56 | 0.20863 |
| 57 | 0.24715 |
| 58 | 0.28356 |
| 59 | 0.31761 |
| 60 | 0.34909 |
| 61 | 0.3778 |
| 62 | 0.40354 |
| 63 | 0.42616 |
| 64 | 0.44552 |
| 65 | 0.46151 |
| 66 | 0.47404 |
| 67 | 0.48306 |
| 68 | 0.48853 |
| 69 | 0.49044 |
| 70 | 0.48881 |
| 71 | 0.48367 |
| 72 | 0.4751 |
| 73 | 0.46319 |
| 74 | 0.44805 |
| 75 | 0.42982 |
| 76 | 0.40866 |
| 77 | 0.38473 |
| 78 | 0.35825 |
| 79 | 0.32941 |
| 80 | 0.29846 |
| 81 | 0.26562 |
| 82 | 0.23116 |
| 83 | 0.19532 |
| 84 | 0.15839 |
| 85 | 0.12064 |
| 86 | 0.08234 |
| 87 | 0.04378 |
| 88 | 0.00524 |
| 89 | -0.033 |
| 90 | -0.0707 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 7,26 | -0,2949 |
| 7,28 | -0,2875 |
| 7,3 | -0,2781 |
| 7,32 | -0,2669 |
| 7,34 | -0,2538 |
| 7,36 | -0,2389 |
| 7,38 | -0,2225 |
| 7,4 | -0,2047 |
| 7,42 | -0,1855 |
| 7,44 | -0,1651 |
| 7,46 | -0,1438 |
| 7,48 | -0,1215 |
| 7,5 | -0,0986 |
| 7,52 | -0,0752 |
| 7,54 | -0,0515 |
| 7,56 | -0,0275 |
| 7,58 | -0,0036 |
| 7,6 | 0,0201 |
| 7,62 | 0,04349 |
| 7,64 | 0,06637 |
| 7,66 | 0,08857 |
| 7,68 | 0,10995 |
| 7,7 | 0,13035 |
| 7,72 | 0,14964 |
| 7,74 | 0,16789 |
| 7,76 | 0,18438 |
| 7,78 | 0,19996 |
| 7,8 | 0,21325 |
| 7,82 | 0,22526 |
| 7,84 | 0,23554 |
| 7,86 | 0,24404 |
| 7,88 | 0,25071 |
| 7,9 | 0,25553 |
| 7,92 | 0,25846 |
| 7,94 | 0,25951 |
| 7,96 | 0,25869 |
| 7,98 | 0,25601 |
| 8 | 0,25151 |
| 8,02 | 0,24525 |
| 8,04 | 0,23727 |
| 8,06 | 0,22766 |
| 8,08 | 0,21649 |
| 8,1 | 0,20387 |
| 8,12 | 0,18988 |
| 8,14 | 0,17465 |
| 8,16 | 0,15829 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 6,34 | 0,36983 |
| 6,36 | 0,32594 |
| 6,38 | 0,3356 |
| 6,4 | 0,34474 |
| 6,42 | 0,35135 |
| 6,44 | 0,35534 |
| 6,46 | 0,35676 |
| 6,48 | 0,3556 |
| 6,5 | 0,35189 |
| 6,52 | 0,34568 |
| 6,54 | 0,33704 |
| 6,56 | 0,32605 |
| 6,58 | 0,31282 |
| 6,6 | 0,29744 |
| 6,62 | 0,28006 |
| 6,64 | 0,26081 |
| 6,66 | 0,23985 |
| 6,68 | 0,21735 |
| 6,7 | 0,19348 |
| 6,72 | 0,16842 |
| 6,74 | 0,14237 |
| 6,76 | 0,11551 |
| 6,78 | 0,08805 |
| 6,8 | 0,0602 |
| 6,82 | 0,03215 |
| 6,84 | 0,00411 |
| 6,86 | -0,0237 |
| 6,88 | -0,0511 |
| 6,9 | -0,078 |
| 6,92 | -0,104 |
| 6,94 | -0,129 |
| 6,96 | -0,153 |
| 6,98 | -0,1756 |
| 7 | -0,1967 |
| 7,02 | -0,2163 |
| 7,04 | -0,2341 |
| 7,06 | -0,2501 |
| 7,08 | -0,2642 |
| 7,1 | -0,2762 |
| 7,12 | -0,2862 |
| 7,14 | -0,294 |
| 7,16 | -0,2996 |
| 7,18 | -0,3031 |
| 7,2 | -0,3045 |
| 7,22 | -0,3033 |
| 7,24 | -0,3001 |

| model | z (cm) |
|-------|---------|
| 01 | -0,1076 |
| 02 | -0,1032 |
| 04 | -0,1078 |
| 06 | -0,2106 |
| 08 | -1,2417 |
| 10 | -0,2707 |
| 12 | -0,2976 |
| 14 | -0,3221 |
| 16 | -0,3441 |
| 18 | -0,3634 |
| 20 | -0,3799 |
| 22 | -0,3935 |
| 24 | -0,4043 |
| 26 | -0,412 |
| 28 | -0,4166 |
| 30 | -0,4183 |
| 32 | -0,4169 |
| 34 | -0,4126 |
| 36 | -0,4055 |
| 38 | -0,3951 |
| 40 | -0,3822 |
| 42 | -0,3667 |
| 44 | -0,3486 |
| 46 | -0,3283 |
| 48 | -0,3057 |
| 50 | -0,2811 |
| 52 | -0,2547 |
| 54 | -0,2267 |
| 56 | -0,1973 |
| 58 | -0,1668 |
| 60 | -0,1353 |
| 62 | -0,1031 |
| 64 | -0,0704 |
| 66 | -0,0375 |
| 68 | -0,0046 |
| 70 | 0,02798 |
| 72 | 0,06013 |
| 74 | 0,09157 |
| 76 | 0,12208 |
| 78 | 0,15146 |
| 80 | 0,17949 |
| 82 | 0,20599 |
| 84 | 0,23078 |
| 86 | 0,2537 |
| 88 | 0,27461 |
| 90 | 0,29335 |

| z (cm) | t model (s) | z (cm) | |
|--------|-------------|--------|---------|
| 8,1 | 0,03146 | 10,02 | -0,1322 |
| 8,12 | 0,0481 | 10,04 | -0,1396 |
| 8,14 | 0,06426 | 10,06 | -0,146 |
| 8,16 | 0,07982 | 10,08 | -0,1511 |
| 8,18 | 0,09467 | 10,1 | -0,1555 |
| 8,2 | 0,10871 | 10,12 | -0,1585 |
| 8,22 | 0,12185 | 10,14 | -0,1603 |
| 8,24 | 0,134 | 10,16 | -0,161 |
| 8,26 | 0,14508 | 10,18 | -0,1605 |
| 8,28 | 0,15503 | 10,2 | -0,1589 |
| 8,3 | 0,16377 | 10,22 | -0,1561 |
| 8,32 | 0,17126 | 10,24 | -0,1522 |
| 8,34 | 0,17746 | 10,26 | -0,1473 |
| 8,36 | 0,18233 | 10,28 | -0,1411 |
| 8,38 | 0,18585 | 10,3 | -0,1344 |
| 8,4 | 0,188 | 10,32 | -0,1266 |
| 8,42 | 0,18877 | 10,34 | -0,1179 |
| 8,44 | 0,18819 | 10,36 | -0,1085 |
| 8,46 | 0,18626 | 10,38 | -0,0984 |
| 8,48 | 0,183 | 10,4 | -0,0876 |
| 8,5 | 0,17846 | 10,42 | -0,0763 |
| 8,52 | 0,17267 | 10,44 | -0,0646 |
| 8,54 | 0,16569 | 10,46 | -0,0525 |
| 8,56 | 0,15758 | 10,48 | -0,0401 |
| 8,58 | 0,1484 | 10,5 | -0,0275 |
| 8,6 | 0,13824 | 10,52 | -0,0148 |
| 8,62 | 0,12717 | 10,54 | -0,0022 |
| 8,64 | 0,11528 | 10,56 | 0,01037 |
| 8,66 | 0,10266 | 10,58 | 0,02275 |
| 8,68 | 0,08941 | 10,6 | 0,03486 |
| 8,7 | 0,07563 | 10,62 | 0,04662 |
| 8,72 | 0,06143 | 10,64 | 0,05794 |
| 8,74 | 0,04691 | 10,66 | 0,06875 |
| 8,76 | 0,03217 | 10,68 | 0,07897 |
| 8,78 | 0,01733 | 10,7 | 0,08854 |
| 8,8 | 0,00249 | 10,72 | 0,09738 |
| 8,82 | -0,0122 | 10,74 | 0,10545 |
| 8,84 | -0,0268 | 10,76 | 0,1127 |
| 8,86 | -0,041 | 10,78 | 0,11907 |
| 8,88 | -0,0547 | 10,8 | 0,12453 |
| 8,9 | -0,068 | 10,82 | 0,12905 |
| 8,92 | -0,0807 | 10,84 | 0,1326 |
| 8,94 | -0,0927 | 10,86 | 0,13517 |
| 8,96 | -0,1039 | 10,88 | 0,13674 |
| 8,98 | -0,1142 | 10,9 | 0,13732 |
| 10 | -0,1237 | 10,92 | 0,1369 |

| z (cm) | t model (s) | z (cm) | |
|--------|-------------|--------|---------|
| 8,1 | 0,03146 | 10,02 | -0,1322 |
| 8,12 | 0,0481 | 10,04 | -0,1396 |
| 8,14 | 0,06426 | 10,06 | -0,146 |
| 8,16 | 0,07982 | 10,08 | -0,1511 |
| 8,18 | 0,09467 | 10,1 | -0,1555 |
| 8,2 | 0,10871 | 10,12 | -0,1585 |
| 8,22 | 0,12185 | 10,14 | -0,1603 |
| 8,24 | 0,134 | 10,16 | -0,161 |
| 8,26 | 0,14508 | 10,18 | -0,1605 |
| 8,28 | 0,15503 | 10,2 | -0,1589 |
| 8,3 | 0,16377 | 10,22 | -0,1561 |
| 8,32 | 0,17126 | 10,24 | -0,1522 |
| 8,34 | 0,17746 | 10,26 | -0,1473 |
| 8,36 | 0,18233 | 10,28 | -0,1411 |
| 8,38 | 0,18585 | 10,3 | -0,1344 |
| 8,4 | 0,188 | 10,32 | -0,1266 |
| 8,42 | 0,18877 | 10,34 | -0,1179 |
| 8,44 | 0,18819 | 10,36 | -0,1085 |
| 8,46 | 0,18626 | 10,38 | -0,0984 |
| 8,48 | 0,183 | 10,4 | -0,0876 |
| 8,5 | 0,17846 | 10,42 | -0,0763 |
| 8,52 | 0,17267 | 10,44 | -0,0646 |
| 8,54 | 0,16569 | 10,46 | -0,0525 |
| 8,56 | 0,15758 | 10,48 | -0,0401 |
| 8,58 | 0,1484 | 10,5 | -0,0275 |
| 8,6 | 0,13824 | 10,52 | -0,0148 |
| 8,62 | 0,12717 | 10,54 | -0,0022 |
| 8,64 | 0,11528 | 10,56 | 0,01037 |
| 8,66 | 0,10266 | 10,58 | 0,02275 |
| 8,68 | 0,08941 | 10,6 | 0,03486 |
| 8,7 | 0,07563 | 10,62 | 0,04662 |
| 8,72 | 0,06143 | 10,64 | 0,05794 |
| 8,74 | 0,04691 | 10,66 | 0,06875 |
| 8,76 | 0,03217 | 10,68 | 0,07897 |
| 8,78 | 0,01733 | 10,7 | 0,08854 |
| 8,8 | 0,00249 | 10,72 | 0,09738 |
| 8,82 | -0,0122 | 10,74 | 0,10545 |
| 8,84 | -0,0268 | 10,76 | 0,1127 |
| 8,86 | -0,041 | 10,78 | 0,11907 |
| 8,88 | -0,0547 | 10,8 | 0,12453 |
| 8,9 | -0,068 | 10,82 | 0,12905 |
| 8,92 | -0,0807 | 10,84 | 0,1326 |
| 8,94 | -0,0927 | 10,86 | 0,13517 |
| 8,96 | -0,1039 | 10,88 | 0,13674 |
| 8,98 | -0,1142 | 10,9 | 0,13732 |
| 10 | -0,1237 | 10,92 | 0,1369 |

| model | z (cm) |
|-------|---------|
| 0.00 | 0.12551 |
| 0.01 | 0.12551 |
| 0.02 | 0.12551 |
| 0.03 | 0.12585 |
| 0.04 | 0.12565 |
| 0.05 | 0.12565 |
| 0.06 | 0.12058 |
| 0.07 | 0.11469 |
| 0.08 | 0.10803 |
| 0.09 | 0.10064 |
| 0.10 | 0.09259 |
| 0.11 | 0.08395 |
| 0.12 | 0.07478 |
| 0.13 | 0.06514 |
| 0.14 | 0.05513 |
| 0.15 | 0.0448 |
| 0.16 | 0.03424 |
| 0.17 | 0.02352 |
| 0.18 | 0.01272 |
| 0.19 | 0.00195 |
| 0.20 | -0.0088 |
| 0.21 | -0.0193 |
| 0.22 | -0.0297 |
| 0.23 | -0.0397 |
| 0.24 | -0.0494 |
| 0.25 | -0.0586 |
| 0.26 | -0.0673 |
| 0.27 | -0.0755 |
| 0.28 | -0.083 |
| 0.29 | -0.0899 |
| 0.30 | -0.0961 |
| 0.31 | -0.1015 |
| 0.32 | -0.1062 |
| 0.33 | -0.11 |
| 0.34 | -0.1131 |
| 0.35 | -0.1153 |
| 0.36 | -0.1166 |
| 0.37 | -0.1171 |
| 0.38 | -0.1168 |
| 0.39 | -0.1156 |
| 0.40 | -0.1136 |
| 0.41 | -0.1108 |
| 0.42 | -0.1072 |
| 0.43 | -0.1029 |
| 0.44 | -0.0978 |
| 0.45 | -0.0922 |
| 0.46 | -0.0859 |
| 0.47 | -0.079 |

| 1 model | z (cm) |
|---------|---------|
| 11.86 | -0.0716 |
| 11.88 | -0.0638 |
| 11.9 | -0.0556 |
| 11.92 | -0.0471 |
| 11.94 | -0.0383 |
| 11.96 | -0.0292 |
| 11.98 | -0.0201 |
| 12 | -0.0109 |
| 12.02 | -0.0017 |
| 12.04 | 0.00745 |
| 12.06 | 0.01645 |
| 12.08 | 0.02527 |
| 12.1 | 0.03382 |
| 12.12 | 0.04206 |
| 12.14 | 0.04993 |
| 12.16 | 0.05757 |
| 12.18 | 0.06433 |
| 12.2 | 0.07077 |
| 12.22 | 0.07665 |
| 12.24 | 0.08193 |
| 12.26 | 0.08657 |
| 12.28 | 0.09055 |
| 12.3 | 0.09384 |
| 12.32 | 0.09643 |
| 12.34 | 0.09831 |
| 12.36 | 0.09946 |
| 12.38 | 0.09989 |
| 12.4 | 0.09959 |
| 12.42 | 0.09859 |
| 12.44 | 0.09688 |
| 12.46 | 0.09449 |
| 12.48 | 0.09144 |
| 12.5 | 0.08776 |
| 12.52 | 0.08348 |
| 12.54 | 0.07866 |
| 12.56 | 0.07327 |
| 12.58 | 0.06742 |
| 12.6 | 0.06114 |
| 12.62 | 0.05447 |
| 12.64 | 0.04746 |
| 12.66 | 0.04018 |
| 12.68 | 0.03267 |
| 12.7 | 0.02495 |
| 12.72 | 0.01719 |
| 12.74 | 0.00934 |
| 12.76 | 0.00149 |

| t model | z (cm) |
|---------|---------|
| 12.78 | -0.0063 |
| 12.8 | -0.014 |
| 12.82 | -0.0215 |
| 12.84 | -0.0288 |
| 12.86 | -0.0358 |
| 12.88 | -0.0425 |
| 12.9 | -0.0489 |
| 12.92 | -0.0548 |
| 12.94 | -0.0603 |
| 12.96 | -0.0653 |
| 12.98 | -0.0699 |
| 13 | -0.0738 |
| 13.02 | -0.0772 |
| 13.04 | -0.08 |
| 13.06 | -0.0822 |
| 13.08 | -0.0838 |
| 13.1 | -0.0848 |
| 13.12 | -0.0852 |
| 13.14 | -0.0849 |
| 13.16 | -0.0841 |
| 13.18 | -0.0826 |
| 13.2 | -0.0806 |
| 13.22 | -0.078 |
| 13.24 | -0.0749 |
| 13.26 | -0.0712 |
| 13.28 | -0.0671 |
| 13.3 | -0.0625 |
| 13.32 | -0.0575 |
| 13.34 | -0.0522 |
| 13.36 | -0.0465 |
| 13.38 | -0.0405 |
| 13.4 | -0.0343 |
| 13.42 | -0.0279 |
| 13.44 | -0.0213 |
| 13.46 | -0.0147 |
| 13.48 | -0.008 |
| 13.5 | -0.0013 |
| 13.52 | 0.00535 |
| 13.54 | 0.0119 |
| 13.56 | 0.01831 |
| 13.58 | 0.02454 |
| 13.6 | 0.03053 |
| 13.62 | 0.03626 |
| 13.64 | 0.04167 |
| 13.66 | 0.04674 |
| 13.68 | 0.05143 |

| U model | Δz (cm) |
|---------|-----------------|
| 1 | 0.055571 |
| 2 | 0.059956 |
| 3 | 0.062904 |
| 4 | 0.065884 |
| 5 | 0.068824 |
| 6 | 0.070715 |
| 7 | 0.0715 |
| 8 | 0.07234 |
| 9 | 0.07266 |
| 10 | 0.07245 |
| 11 | 0.07172 |
| 12 | 0.07049 |
| 13 | 0.06875 |
| 14 | 0.06654 |
| 15 | 0.06387 |
| 16 | 0.06076 |
| 17 | 0.05724 |
| 18 | 0.05334 |
| 19 | 0.04909 |
| 20 | 0.04452 |
| 21 | 0.03957 |
| 22 | 0.03458 |
| 23 | 0.02929 |
| 24 | 0.02382 |
| 25 | 0.01824 |
| 26 | 0.01257 |
| 27 | 0.00685 |
| 28 | 0.00114 |
| 29 | -0.00445 |
| 30 | -0.0107 |
| 31 | -0.0156 |
| 32 | -0.0209 |
| 33 | -0.026 |
| 34 | -0.0309 |
| 35 | -0.0355 |
| 36 | -0.0398 |
| 37 | -0.0438 |
| 38 | -0.0475 |
| 39 | -0.0508 |
| 40 | -0.0537 |
| 41 | -0.0561 |

| U model | Δz (cm) |
|---------|-----------------|
| 14.52 | -0.0582 |
| 14.54 | -0.0598 |
| 14.56 | -0.061 |
| 14.58 | -0.0617 |
| 14.6 | -0.062 |
| 14.62 | -0.0618 |
| 14.64 | -0.0612 |
| 14.66 | -0.0603 |
| 14.68 | -0.0586 |
| 14.7 | -0.0568 |
| 14.72 | -0.0545 |
| 14.74 | -0.0518 |
| 14.76 | -0.0488 |
| 14.78 | -0.0455 |
| 14.8 | -0.0419 |
| 14.82 | -0.038 |
| 14.84 | -0.0339 |
| 14.86 | -0.0295 |
| 14.88 | -0.025 |
| 14.9 | -0.0203 |
| 14.92 | -0.0156 |
| 14.94 | -0.0107 |
| 14.96 | -0.0059 |
| 14.98 | -0.001 |
| 15 | 0.00384 |
| 15.02 | 0.00861 |
| 15.04 | 0.01327 |
| 15.06 | 0.0178 |
| 15.08 | 0.02217 |
| 15.1 | 0.02633 |
| 15.12 | 0.03027 |
| 15.14 | 0.03396 |
| 15.16 | 0.03738 |
| 15.18 | 0.0405 |
| 15.2 | 0.04329 |
| 15.22 | 0.04576 |
| 15.24 | 0.04787 |
| 15.26 | 0.04962 |
| 15.28 | 0.051 |
| 15.3 | 0.052 |
| 15.32 | 0.05262 |

| U model | Δz (cm) |
|---------|-----------------|
| 15.34 | 0.05285 |
| 15.36 | 0.05271 |
| 15.38 | 0.05218 |
| 15.4 | 0.05129 |
| 15.42 | 0.05003 |
| 15.44 | 0.04842 |
| 15.46 | 0.04648 |
| 15.48 | 0.04422 |
| 15.5 | 0.04167 |
| 15.52 | 0.03883 |
| 15.54 | 0.03574 |
| 15.56 | 0.03242 |
| 15.58 | 0.0289 |
| 15.6 | 0.0252 |
| 15.62 | 0.02134 |
| 15.64 | 0.01737 |
| 15.66 | 0.01331 |
| 15.68 | 0.00919 |
| 15.7 | 0.00503 |
| 15.72 | 0.00088 |
| 15.74 | -0.0033 |
| 15.76 | -0.0073 |
| 15.78 | -0.0113 |
| 15.8 | -0.0152 |
| 15.82 | -0.0189 |
| 15.84 | -0.0224 |
| 15.86 | -0.0258 |
| 15.88 | -0.029 |
| 15.9 | -0.0319 |
| 15.92 | -0.0345 |
| 15.94 | -0.0369 |
| 15.96 | -0.039 |
| 15.98 | -0.0408 |
| 16 | -0.0423 |
| 16.02 | -0.0435 |
| 16.04 | -0.0443 |
| 16.06 | -0.0449 |
| 16.08 | -0.0451 |
| 16.1 | -0.045 |
| 16.12 | -0.0445 |

| | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------|
| 1,478 | Nallayarasu (2012) | | | |
| | 1,685 | 0,093 | 329,07 | 7,89 |
| - | Nimny et al (2013) | | | |
| | 1,946 | 0,106 | 333,78 | 7,94 |
| - | - | - | - | - |
| Natural Heave Period (undamped) (s) | Heave Added Mass (kg) | Coeff. Added Mass | Heave Spring (N/m) | Heave Damping (N(m/s)) |
| Coeff. Damping | | | | |

| Cycle (n) | Time (s) | Amplitude (cm) | Kerata Interval (T _g) | | | Interval time per cycle (s) | Logarithmic Decrement | Damping Ratio (ζ) | Heave Frequency (damped) (rad/s) | Heave Frequency (undamped) (rad/s) |
|-----------|----------|----------------|-----------------------------------|-------|-------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | | | 15,34 | 13,86 | 12,38 | | | | | |
| 10 | 15,34 | 0,05 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 9 | 13,86 | 0,07 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 8 | 12,38 | 0,10 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 7 | 10,90 | 0,14 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 6 | 9,42 | 0,19 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 5 | 7,94 | 0,26 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 4 | 6,46 | 0,36 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 3 | 4,98 | 0,49 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 2 | 3,50 | 0,67 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| 1 | 2,02 | 0,93 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,318 | 0,051 | 4,245 | 4,251 | |
| - | 0,54 | 1,27 | - | - | - | - | - | - | - | |

LAMPIRAN I

**MODEL NUMERIS DIAMETER RATIO 1.5
KONDISI TERTAMBAT TAUT**

| time | z (cm) |
|------|-----------|
| 0 | 0 |
| 1 | -0.8587 |
| 2 | -2.7178 |
| 3 | -4.5631 |
| 4 | -6.416 |
| 5 | -8.2581 |
| 6 | -10.096 |
| 7 | -11.9343 |
| 8 | -13.7675 |
| 9 | -15.5961 |
| 10 | -17.4209 |
| 11 | -19.2414 |
| 12 | -21.0583 |
| 13 | -22.8714 |
| 14 | -24.6814 |
| 15 | -26.4883 |
| 16 | -28.2921 |
| 17 | -30.0929 |
| 18 | -31.8906 |
| 19 | -33.6853 |
| 20 | -35.4771 |
| 21 | -37.2659 |
| 22 | -39.0517 |
| 23 | -40.8355 |
| 24 | -42.6173 |
| 25 | -44.2059 |
| 26 | -45.7775 |
| 27 | -47.3421 |
| 28 | -48.9087 |
| 29 | -50.4773 |
| 30 | -52.0489 |
| 31 | -53.6225 |
| 32 | -55.1981 |
| 33 | -56.7643 |
| 34 | -58.3325 |
| 35 | -59.9027 |
| 36 | -61.4751 |
| 37 | -63.1195 |
| 38 | -64.7679 |
| 39 | -66.4103 |
| 40 | -68.0577 |
| 41 | -69.7001 |
| 42 | -71.3475 |
| 43 | -72.9899 |
| 44 | -74.6273 |
| 45 | -76.2717 |
| 46 | -77.9121 |
| 47 | -79.5485 |
| 48 | -81.1809 |
| 49 | -82.8093 |
| 50 | -84.4337 |
| 51 | -86.0541 |
| 52 | -87.6705 |
| 53 | -89.2829 |
| 54 | -90.8913 |
| 55 | -92.4957 |
| 56 | -94.0961 |
| 57 | -95.6925 |
| 58 | -97.2849 |
| 59 | -98.8733 |
| 60 | -100.4577 |
| 61 | -102.0281 |
| 62 | -103.5945 |
| 63 | -105.1569 |
| 64 | -106.7153 |
| 65 | -108.2697 |
| 66 | -109.8201 |
| 67 | -111.3665 |
| 68 | -112.9089 |
| 69 | -114.4473 |
| 70 | -115.9817 |
| 71 | -117.5121 |
| 72 | -119.0385 |
| 73 | -120.5609 |
| 74 | -122.0793 |
| 75 | -123.5937 |
| 76 | -125.1131 |
| 77 | -126.6385 |
| 78 | -128.1599 |
| 79 | -129.6873 |
| 80 | -131.2107 |
| 81 | -132.7291 |
| 82 | -134.2435 |
| 83 | -135.7539 |
| 84 | -137.2603 |
| 85 | -138.7627 |
| 86 | -140.2711 |
| 87 | -141.7765 |
| 88 | -143.2779 |
| 89 | -144.7853 |
| 90 | -146.2897 |
| 91 | -147.7901 |
| 92 | -149.2865 |
| 93 | -150.7789 |
| 94 | -152.2683 |
| 95 | -153.7547 |
| 96 | -155.2371 |
| 97 | -156.7065 |
| 98 | -158.1729 |
| 99 | -159.6363 |
| 100 | -161.0967 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 0.86 | 0.22189 |
| 0.88 | 0.09258 |
| 0.9 | -0.0362 |
| 0.92 | -0.1636 |
| 0.94 | -0.2887 |
| 0.96 | -0.4167 |
| 0.98 | -0.5288 |
| 1 | -0.6422 |
| 1.02 | -0.7503 |
| 1.04 | -0.8522 |
| 1.06 | -0.9474 |
| 1.08 | -1.0354 |
| 1.1 | -1.1154 |
| 1.12 | -1.1872 |
| 1.14 | -1.2502 |
| 1.16 | -1.3042 |
| 1.18 | -1.3488 |
| 1.2 | -1.3838 |
| 1.22 | -1.409 |
| 1.24 | -1.4245 |
| 1.26 | -1.4301 |
| 1.28 | -1.4259 |
| 1.3 | -1.412 |
| 1.32 | -1.3887 |
| 1.34 | -1.3561 |
| 1.36 | -1.3146 |
| 1.38 | -1.2645 |
| 1.4 | -1.2062 |
| 1.42 | -1.1403 |
| 1.44 | -1.0672 |
| 1.46 | -0.9875 |
| 1.48 | -0.9018 |
| 1.5 | -0.8107 |
| 1.52 | -0.7149 |
| 1.54 | -0.6152 |
| 1.56 | -0.5121 |
| 1.58 | -0.4065 |
| 1.6 | -0.2991 |
| 1.62 | -0.1906 |
| 1.64 | -0.0818 |
| 1.66 | 0.0263 |
| 1.68 | 0.1385 |
| 1.7 | 0.23919 |
| 1.72 | 0.34194 |
| 1.74 | 0.44145 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 1.76 | 0.53704 |
| 1.78 | 0.62812 |
| 1.8 | 0.7141 |
| 1.82 | 0.79444 |
| 1.84 | 0.86864 |
| 1.86 | 0.93627 |
| 1.88 | 0.9969 |
| 1.9 | 1.0502 |
| 1.92 | 1.09587 |
| 1.94 | 1.13367 |
| 1.96 | 1.1634 |
| 1.98 | 1.18495 |
| 2 | 1.19823 |
| 2.02 | 1.20324 |
| 2.04 | 1.20901 |
| 2.06 | 1.18864 |
| 2.08 | 1.16928 |
| 2.1 | 1.14214 |
| 2.12 | 1.10746 |
| 2.14 | 1.06556 |
| 2.16 | 1.01679 |
| 2.18 | 0.96153 |
| 2.2 | 0.90023 |
| 2.22 | 0.83335 |
| 2.24 | 0.7614 |
| 2.26 | 0.68492 |
| 2.28 | 0.60447 |
| 2.3 | 0.52063 |
| 2.32 | 0.434 |
| 2.34 | 0.3452 |
| 2.36 | 0.25486 |
| 2.38 | 0.16359 |
| 2.4 | 0.07204 |
| 2.42 | -0.0192 |
| 2.44 | -0.1094 |
| 2.46 | -0.1981 |
| 2.48 | -0.2847 |
| 2.5 | -0.3685 |
| 2.52 | -0.4491 |
| 2.54 | -0.5259 |
| 2.56 | -0.5984 |
| 2.58 | -0.6661 |
| 2.6 | -0.7288 |
| 2.62 | -0.7859 |
| 2.64 | -0.8371 |
| 2.66 | -0.8822 |

| f model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 3.6 | 0.82897 |
| 3.62 | 0.81014 |
| 3.64 | 0.78596 |
| 3.66 | 0.75665 |
| 3.68 | 0.72246 |
| 3.7 | 0.68305 |
| 3.72 | 0.64054 |
| 3.74 | 0.59347 |
| 3.76 | 0.54277 |
| 3.78 | 0.48884 |
| 3.8 | 0.43207 |
| 3.82 | 0.37287 |
| 3.84 | 0.31167 |
| 3.86 | 0.2489 |
| 3.88 | 0.185 |
| 3.9 | 0.12042 |
| 3.92 | 0.0556 |
| 3.94 | -0.009 |
| 3.96 | -0.073 |
| 3.98 | -0.1359 |
| 4 | -0.1973 |
| 4.02 | -0.2568 |
| 4.04 | -0.314 |
| 4.06 | -0.3685 |
| 4.08 | -0.4201 |
| 4.1 | -0.4683 |
| 4.12 | -0.5129 |
| 4.14 | -0.5536 |
| 4.16 | -0.5902 |
| 4.18 | -0.6224 |
| 4.2 | -0.6501 |
| 4.22 | -0.6731 |
| 4.24 | -0.6914 |
| 4.26 | -0.7047 |
| 4.28 | -0.7132 |
| 4.3 | -0.7167 |
| 4.32 | -0.7153 |
| 4.34 | -0.709 |
| 4.36 | -0.698 |
| 4.38 | -0.6823 |
| 4.4 | -0.6621 |
| 4.42 | -0.6376 |
| 4.44 | -0.609 |
| 4.46 | -0.5765 |
| 4.48 | -0.5403 |
| 4.5 | -0.5008 |

| f model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 4.52 | -0.4581 |
| 4.54 | -0.413 |
| 4.56 | -0.3653 |
| 4.58 | -0.3155 |
| 4.6 | -0.2641 |
| 4.62 | -0.2113 |
| 4.64 | -0.1576 |
| 4.66 | -0.1033 |
| 4.68 | -0.0487 |
| 4.7 | 0.00565 |
| 4.72 | 0.0595 |
| 4.74 | 0.11245 |
| 4.76 | 0.16416 |
| 4.78 | 0.21429 |
| 4.8 | 0.2625 |
| 4.82 | 0.30849 |
| 4.84 | 0.35196 |
| 4.86 | 0.39264 |
| 4.88 | 0.43029 |
| 4.9 | 0.46466 |
| 4.92 | 0.49556 |
| 4.94 | 0.52281 |
| 4.96 | 0.54625 |
| 4.98 | 0.56576 |
| 5 | 0.58124 |
| 5.02 | 0.59253 |
| 5.04 | 0.59988 |
| 5.06 | 0.60298 |
| 5.08 | 0.60194 |
| 5.1 | 0.59682 |
| 5.12 | 0.58768 |
| 5.14 | 0.57462 |
| 5.16 | 0.55777 |
| 5.18 | 0.53727 |
| 5.2 | 0.5133 |
| 5.22 | 0.48606 |
| 5.24 | 0.45575 |
| 5.26 | 0.42261 |
| 5.28 | 0.38689 |
| 5.3 | 0.34886 |
| 5.32 | 0.30881 |
| 5.34 | 0.26701 |
| 5.36 | 0.22377 |
| 5.38 | 0.1794 |
| 5.4 | 0.13421 |
| 5.42 | 0.08851 |

| f model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 3.6 | 0.82897 |
| 3.62 | 0.81014 |
| 3.64 | 0.78596 |
| 3.66 | 0.75665 |
| 3.68 | 0.72246 |
| 3.7 | 0.68305 |
| 3.72 | 0.64054 |
| 3.74 | 0.59347 |
| 3.76 | 0.54277 |
| 3.78 | 0.48884 |
| 3.8 | 0.43207 |
| 3.82 | 0.37287 |
| 3.84 | 0.31167 |
| 3.86 | 0.2489 |
| 3.88 | 0.185 |
| 3.9 | 0.12042 |
| 3.92 | 0.0556 |
| 3.94 | -0.009 |
| 3.96 | -0.073 |
| 3.98 | -0.1359 |
| 4 | -0.1973 |
| 4.02 | -0.2568 |
| 4.04 | -0.314 |
| 4.06 | -0.3685 |
| 4.08 | -0.4201 |
| 4.1 | -0.4683 |
| 4.12 | -0.5129 |
| 4.14 | -0.5536 |
| 4.16 | -0.5902 |
| 4.18 | -0.6224 |
| 4.2 | -0.6501 |
| 4.22 | -0.6731 |
| 4.24 | -0.6914 |
| 4.26 | -0.7047 |
| 4.28 | -0.7132 |
| 4.3 | -0.7167 |
| 4.32 | -0.7153 |
| 4.34 | -0.709 |
| 4.36 | -0.698 |
| 4.38 | -0.6823 |
| 4.4 | -0.6621 |
| 4.42 | -0.6376 |
| 4.44 | -0.609 |
| 4.46 | -0.5765 |
| 4.48 | -0.5403 |
| 4.5 | -0.5008 |

| t medio (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 6.36 | 0.24705 |
| 6.38 | 0.276 |
| 6.4 | 0.30281 |
| 6.42 | 0.32731 |
| 6.44 | 0.34937 |
| 6.46 | 0.36885 |
| 6.48 | 0.38564 |
| 6.5 | 0.39965 |
| 6.52 | 0.41082 |
| 6.54 | 0.41908 |
| 6.56 | 0.42442 |
| 6.58 | 0.42683 |
| 6.6 | 0.4263 |
| 6.62 | 0.42288 |
| 6.64 | 0.41661 |
| 6.66 | 0.40756 |
| 6.68 | 0.39581 |
| 6.7 | 0.38143 |
| 6.72 | 0.36468 |
| 6.74 | 0.34555 |
| 6.76 | 0.32424 |
| 6.78 | 0.30092 |
| 6.8 | 0.27576 |
| 6.82 | 0.24895 |
| 6.84 | 0.22068 |
| 6.86 | 0.19117 |
| 6.88 | 0.16062 |
| 6.9 | 0.12926 |
| 6.92 | 0.0973 |
| 6.94 | 0.06497 |
| 6.96 | 0.03248 |
| 6.98 | 0.00005 |
| 7 | -0.032 |
| 7.02 | -0.0637 |
| 7.04 | -0.0945 |
| 7.06 | -0.1245 |
| 7.08 | -0.1534 |
| 7.1 | -0.1809 |
| 7.12 | -0.207 |
| 7.14 | -0.2314 |
| 7.16 | -0.254 |
| 7.18 | -0.2747 |
| 7.2 | -0.2933 |
| 7.22 | -0.3098 |
| 7.24 | -0.324 |
| 7.26 | -0.3359 |

| t medio (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 6.36 | 0.24705 |
| 6.38 | 0.276 |
| 6.4 | 0.30281 |
| 6.42 | 0.32731 |
| 6.44 | 0.34937 |
| 6.46 | 0.36885 |
| 6.48 | 0.38564 |
| 6.5 | 0.39965 |
| 6.52 | 0.41082 |
| 6.54 | 0.41908 |
| 6.56 | 0.42442 |
| 6.58 | 0.42683 |
| 6.6 | 0.4263 |
| 6.62 | 0.42288 |
| 6.64 | 0.41661 |
| 6.66 | 0.40756 |
| 6.68 | 0.39581 |
| 6.7 | 0.38143 |
| 6.72 | 0.36468 |
| 6.74 | 0.34555 |
| 6.76 | 0.32424 |
| 6.78 | 0.30092 |
| 6.8 | 0.27576 |
| 6.82 | 0.24895 |
| 6.84 | 0.22068 |
| 6.86 | 0.19117 |
| 6.88 | 0.16062 |
| 6.9 | 0.12926 |
| 6.92 | 0.0973 |
| 6.94 | 0.06497 |
| 6.96 | 0.03248 |
| 6.98 | 0.00005 |
| 7 | -0.032 |
| 7.02 | -0.0637 |
| 7.04 | -0.0945 |
| 7.06 | -0.1245 |
| 7.08 | -0.1534 |
| 7.1 | -0.1809 |
| 7.12 | -0.207 |
| 7.14 | -0.2314 |
| 7.16 | -0.254 |
| 7.18 | -0.2747 |
| 7.2 | -0.2933 |
| 7.22 | -0.3098 |
| 7.24 | -0.324 |
| 7.26 | -0.3359 |

| t medio (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 6.36 | 0.24705 |
| 6.38 | 0.276 |
| 6.4 | 0.30281 |
| 6.42 | 0.32731 |
| 6.44 | 0.34937 |
| 6.46 | 0.36885 |
| 6.48 | 0.38564 |
| 6.5 | 0.39965 |
| 6.52 | 0.41082 |
| 6.54 | 0.41908 |
| 6.56 | 0.42442 |
| 6.58 | 0.42683 |
| 6.6 | 0.4263 |
| 6.62 | 0.42288 |
| 6.64 | 0.41661 |
| 6.66 | 0.40756 |
| 6.68 | 0.39581 |
| 6.7 | 0.38143 |
| 6.72 | 0.36468 |
| 6.74 | 0.34555 |
| 6.76 | 0.32424 |
| 6.78 | 0.30092 |
| 6.8 | 0.27576 |
| 6.82 | 0.24895 |
| 6.84 | 0.22068 |
| 6.86 | 0.19117 |
| 6.88 | 0.16062 |
| 6.9 | 0.12926 |
| 6.92 | 0.0973 |
| 6.94 | 0.06497 |
| 6.96 | 0.03248 |
| 6.98 | 0.00005 |
| 7 | -0.032 |
| 7.02 | -0.0637 |
| 7.04 | -0.0945 |
| 7.06 | -0.1245 |
| 7.08 | -0.1534 |
| 7.1 | -0.1809 |
| 7.12 | -0.207 |
| 7.14 | -0.2314 |
| 7.16 | -0.254 |
| 7.18 | -0.2747 |
| 7.2 | -0.2933 |
| 7.22 | -0.3098 |
| 7.24 | -0.324 |
| 7.26 | -0.3359 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 0.6 | 0.28087 |
| 1 | 0.27085 |
| 2 | 0.25978 |
| 3 | 0.24565 |
| 4 | 0.23067 |
| 5 | 0.21426 |
| 6 | 0.19653 |
| 7 | 0.17763 |
| 8 | 0.15769 |
| 9 | 0.13685 |
| 10 | 0.11527 |
| 11 | 0.0931 |
| 12 | 0.0705 |
| 13 | 0.04763 |
| 14 | 0.02463 |
| 15 | 0.00158 |
| 16 | -0.0211 |
| 17 | -0.0435 |
| 18 | -0.0654 |
| 19 | -0.0867 |
| 20 | -0.1072 |
| 21 | -0.1267 |
| 22 | -0.1453 |
| 23 | -0.1626 |
| 24 | -0.1787 |
| 25 | -0.1935 |
| 26 | -0.2068 |
| 27 | -0.2186 |
| 28 | -0.2287 |
| 29 | -0.2373 |
| 30 | -0.2441 |
| 31 | -0.2492 |
| 32 | -0.2526 |
| 33 | -0.2542 |
| 34 | -0.2541 |
| 35 | -0.2522 |
| 36 | -0.2486 |
| 37 | -0.2434 |
| 38 | -0.2366 |
| 39 | -0.2282 |
| 40 | -0.2184 |
| 41 | -0.2071 |
| 42 | -0.1946 |
| 43 | -0.1808 |
| 44 | -0.1659 |
| 45 | -0.15 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 0.6 | -0.1333 |
| 1 | -0.1158 |
| 2 | -0.0976 |
| 3 | -0.079 |
| 4 | -0.06 |
| 5 | -0.0408 |
| 6 | -0.0214 |
| 7 | -0.0021 |
| 8 | 0.01706 |
| 9 | 0.03593 |
| 10 | 0.05438 |
| 11 | 0.0723 |
| 12 | 0.08956 |
| 13 | 0.10606 |
| 14 | 0.12168 |
| 15 | 0.13634 |
| 16 | 0.14993 |
| 17 | 0.16238 |
| 18 | 0.17362 |
| 19 | 0.18356 |
| 20 | 0.19217 |
| 21 | 0.1994 |
| 22 | 0.2052 |
| 23 | 0.20955 |
| 24 | 0.21264 |
| 25 | 0.21385 |
| 26 | 0.21379 |
| 27 | 0.21228 |
| 28 | 0.20934 |
| 29 | 0.205 |
| 30 | 0.1995 |
| 31 | 0.1923 |
| 32 | 0.18405 |
| 33 | 0.17463 |
| 34 | 0.1641 |
| 35 | 0.15254 |
| 36 | 0.14006 |
| 37 | 0.12673 |
| 38 | 0.11265 |
| 39 | 0.09795 |
| 40 | 0.08271 |
| 41 | 0.06704 |
| 42 | 0.05106 |
| 43 | 0.03487 |
| 44 | 0.01859 |
| 45 | 0.00234 |

| t model (s) | z (cm) |
|-------------|---------|
| 10.04 | -0.0138 |
| 10.06 | -0.0297 |
| 10.08 | -0.0452 |
| 10.1 | -0.0603 |
| 10.12 | -0.0749 |
| 10.14 | -0.0888 |
| 10.16 | -0.1019 |
| 10.18 | -0.1143 |
| 10.2 | -0.1258 |
| 10.22 | -0.1363 |
| 10.24 | -0.1458 |
| 10.26 | -0.1542 |
| 10.28 | -0.1615 |
| 10.3 | -0.1676 |
| 10.32 | -0.1725 |
| 10.34 | -0.1762 |
| 10.36 | -0.1787 |
| 10.38 | -0.1799 |
| 10.4 | -0.1799 |
| 10.42 | -0.1787 |
| 10.44 | -0.1762 |
| 10.46 | -0.1726 |
| 10.48 | -0.1679 |
| 10.5 | -0.162 |
| 10.52 | -0.1551 |
| 10.54 | -0.1472 |
| 10.56 | -0.1384 |
| 10.58 | -0.1287 |
| 10.6 | -0.1182 |
| 10.62 | -0.107 |
| 10.64 | -0.0952 |
| 10.66 | -0.0829 |
| 10.68 | -0.0701 |
| 10.7 | -0.0569 |
| 10.72 | -0.0434 |
| 10.74 | -0.0298 |
| 10.76 | -0.0161 |
| 10.78 | -0.0025 |
| 10.8 | 0.01112 |
| 10.82 | 0.0245 |
| 10.84 | 0.03759 |
| 10.86 | 0.0503 |
| 10.88 | 0.06256 |
| 10.9 | 0.07427 |
| 10.92 | 0.08538 |
| 10.94 | 0.09581 |

| model | $z(\text{cm})$ | model | $z(\text{cm})$ |
|-------|----------------|-------|----------------|
| 10 | 0.10349 | 11.88 | -0.1264 |
| 10.08 | 0.11436 | 11.9 | -0.1273 |
| 10.08 | 0.12238 | 11.92 | -0.1274 |
| 11 | 0.12949 | 11.94 | -0.1266 |
| 11.02 | 0.13568 | 11.96 | -0.1249 |
| 11.04 | 0.14084 | 11.98 | -0.1224 |
| 11.08 | 0.14502 | 12 | -0.1191 |
| 11.1 | 0.14817 | 12.02 | -0.115 |
| 11.2 | 0.15029 | 12.04 | -0.1102 |
| 11.4 | 0.15136 | 12.06 | -0.1047 |
| 11.6 | 0.15139 | 12.08 | -0.0984 |
| 11.8 | 0.1504 | 12.1 | -0.0916 |
| 11.9 | 0.14839 | 12.12 | -0.0842 |
| 12 | 0.14538 | 12.14 | -0.0764 |
| 12.04 | 0.14142 | 12.16 | -0.0668 |
| 12.08 | 0.13652 | 12.18 | -0.0593 |
| 12.1 | 0.13075 | 12.2 | -0.0502 |
| 12.12 | 0.12413 | 12.22 | -0.0409 |
| 12.14 | 0.11673 | 12.24 | -0.0314 |
| 12.16 | 0.1096 | 12.26 | -0.0218 |
| 12.18 | 0.09998 | 12.28 | -0.0121 |
| 12.2 | 0.09041 | 12.3 | -0.0024 |
| 12.4 | 0.08048 | 12.32 | 0.0072 |
| 12.6 | 0.0701 | 12.34 | 0.01668 |
| 12.8 | 0.05953 | 12.36 | 0.02596 |
| 13 | 0.04826 | 12.38 | 0.03498 |
| 13.04 | 0.03696 | 12.4 | 0.04368 |
| 13.08 | 0.0255 | 12.42 | 0.05201 |
| 13.1 | 0.01398 | 12.44 | 0.0599 |
| 13.12 | 0.00247 | 12.46 | 0.06732 |
| 13.14 | -0.009 | 12.48 | 0.07421 |
| 13.16 | -0.0202 | 12.5 | 0.08054 |
| 13.18 | -0.0312 | 12.52 | 0.08626 |
| 13.2 | -0.0419 | 12.54 | 0.09134 |
| 13.24 | -0.0523 | 12.56 | 0.09575 |
| 13.26 | -0.0622 | 12.58 | 0.09947 |
| 13.28 | -0.0715 | 12.6 | 0.10248 |
| 13.3 | -0.0803 | 12.62 | 0.10476 |
| 13.32 | -0.0885 | 12.64 | 0.10631 |
| 13.34 | -0.096 | 12.66 | 0.10713 |
| 13.36 | -0.1027 | 12.68 | 0.1072 |
| 13.38 | -0.1088 | 12.7 | 0.10655 |
| 13.4 | -0.114 | 12.72 | 0.10518 |
| 13.42 | -0.1184 | 12.74 | 0.1031 |
| 13.44 | -0.1219 | 12.76 | 0.10034 |
| 13.46 | -0.1246 | 12.78 | 0.09692 |

| model | $z(\text{cm})$ | model | $z(\text{cm})$ |
|-------|----------------|-------|----------------|
| 12.8 | 0.09287 | 13.12 | -0.0216 |
| 12.82 | 0.08823 | 13.14 | -0.0292 |
| 12.84 | 0.08303 | 13.16 | -0.0365 |
| 12.86 | 0.07731 | 13.18 | -0.0435 |
| 12.88 | 0.07111 | 13.2 | -0.0502 |
| 12.9 | 0.06449 | 13.22 | -0.0564 |
| 12.92 | 0.05749 | 13.24 | -0.0622 |
| 12.94 | 0.05016 | 13.26 | -0.0676 |
| 12.96 | 0.04255 | 13.28 | -0.0724 |
| 12.98 | 0.03473 | 13.3 | -0.0767 |
| 13 | 0.02674 | 13.32 | -0.0804 |
| 13.02 | 0.01863 | 13.34 | -0.0836 |
| 13.04 | 0.01048 | 13.36 | -0.0861 |
| 13.06 | 0.00233 | 13.38 | -0.0881 |
| 13.08 | -0.0058 | 13.4 | -0.0894 |
| 13.1 | -0.0138 | 13.42 | -0.0901 |
| 13.12 | -0.0216 | 13.44 | -0.0902 |
| 13.14 | -0.0292 | 13.46 | -0.0897 |
| 13.16 | -0.0365 | 13.48 | -0.0885 |
| 13.18 | -0.0435 | 13.5 | -0.0868 |
| 13.2 | -0.0502 | 13.52 | -0.0845 |
| 13.22 | -0.0564 | 13.54 | -0.0817 |
| 13.24 | -0.0622 | 13.56 | -0.0783 |
| 13.26 | -0.0676 | 13.58 | -0.0744 |
| 13.28 | -0.0724 | 13.6 | -0.07 |
| 13.3 | -0.0767 | 13.62 | -0.0652 |
| 13.32 | -0.0804 | 13.64 | -0.06 |
| 13.34 | -0.0836 | 13.66 | -0.0545 |
| 13.36 | -0.0861 | 13.68 | -0.0486 |
| 13.38 | -0.0881 | 13.7 | -0.0424 |
| 13.4 | -0.0894 | | |
| 13.42 | -0.0901 | | |
| 13.44 | -0.0902 | | |
| 13.46 | -0.0897 | | |
| 13.48 | -0.0885 | | |
| 13.5 | -0.0868 | | |
| 13.52 | -0.0845 | | |
| 13.54 | -0.0817 | | |
| 13.56 | -0.0783 | | |
| 13.58 | -0.0744 | | |
| 13.6 | -0.07 | | |
| 13.62 | -0.0652 | | |
| 13.64 | -0.06 | | |
| 13.66 | -0.0545 | | |
| 13.68 | -0.0486 | | |
| 13.7 | -0.0424 | | |

| l | z (cm) |
|-----|---------|
| 301 | -0,026 |
| 302 | -0,0295 |
| 303 | -0,0227 |
| 304 | -0,0159 |
| 305 | -0,0091 |
| 306 | -0,0022 |
| 307 | 0,00461 |
| 308 | 0,01133 |
| 309 | 0,01792 |
| 310 | 0,02432 |
| 311 | 0,0306 |
| 312 | 0,03641 |
| 313 | 0,04202 |
| 314 | 0,0473 |
| 315 | 0,05221 |
| 316 | 0,05671 |
| 317 | 0,06079 |
| 318 | 0,06442 |
| 319 | 0,06758 |
| 320 | 0,07025 |
| 321 | 0,07242 |
| 322 | 0,07407 |
| 323 | 0,07521 |
| 324 | 0,07582 |
| 325 | 0,0759 |
| 326 | 0,07548 |
| 327 | 0,07455 |
| 328 | 0,07311 |
| 329 | 0,07119 |
| 330 | 0,0688 |
| 331 | 0,06597 |
| 332 | 0,06271 |
| 333 | 0,05906 |
| 334 | 0,05503 |
| 335 | 0,05067 |
| 336 | 0,046 |
| 337 | 0,04106 |
| 338 | 0,03589 |
| 339 | 0,03052 |
| 340 | 0,02498 |
| 341 | 0,01933 |

| l | z (cm) |
|-------|---------|
| 14,54 | 0,0136 |
| 14,56 | 0,00783 |
| 14,58 | 0,00206 |
| 14,6 | -0,0037 |
| 14,62 | -0,0093 |
| 14,64 | -0,0149 |
| 14,66 | -0,0203 |
| 14,68 | -0,0255 |
| 14,7 | -0,0305 |
| 14,72 | -0,0352 |
| 14,74 | -0,0396 |
| 14,76 | -0,0438 |
| 14,78 | -0,0476 |
| 14,8 | -0,051 |
| 14,82 | -0,0541 |
| 14,84 | -0,0568 |
| 14,86 | -0,059 |
| 14,88 | -0,0609 |
| 14,9 | -0,0623 |
| 14,92 | -0,0633 |
| 14,94 | -0,0638 |
| 14,96 | -0,0639 |
| 14,98 | -0,0635 |
| 15 | -0,0628 |
| 15,02 | -0,0616 |
| 15,04 | -0,06 |
| 15,06 | -0,058 |
| 15,08 | -0,0556 |
| 15,1 | -0,0529 |
| 15,12 | -0,0498 |
| 15,14 | -0,0464 |
| 15,16 | -0,0428 |
| 15,18 | -0,0388 |
| 15,2 | -0,0347 |
| 15,22 | -0,0304 |
| 15,24 | -0,0258 |
| 15,26 | -0,0212 |
| 15,28 | -0,0164 |
| 15,3 | -0,0116 |
| 15,32 | -0,0068 |
| 15,34 | -0,0019 |

| l | z (cm) |
|-------|---------|
| 15,36 | 0,00293 |
| 15,38 | 0,00769 |
| 15,4 | 0,01236 |
| 15,42 | 0,0169 |
| 15,44 | 0,02129 |
| 15,46 | 0,02549 |
| 15,48 | 0,02948 |
| 15,5 | 0,03323 |
| 15,52 | 0,03672 |
| 15,54 | 0,03993 |
| 15,56 | 0,04284 |
| 15,58 | 0,04544 |
| 15,6 | 0,0477 |
| 15,62 | 0,04961 |
| 15,64 | 0,05117 |
| 15,66 | 0,05237 |
| 15,68 | 0,0532 |
| 15,7 | 0,05366 |
| 15,72 | 0,05375 |
| 15,74 | 0,05347 |
| 15,76 | 0,05284 |
| 15,78 | 0,05184 |
| 15,8 | 0,05051 |
| 15,82 | 0,04884 |
| 15,84 | 0,04686 |
| 15,86 | 0,04457 |
| 15,88 | 0,042 |
| 15,9 | 0,03917 |
| 15,92 | 0,0361 |
| 15,94 | 0,03281 |
| 15,96 | 0,02932 |
| 15,98 | 0,02567 |
| 16 | 0,02188 |
| 16,02 | 0,01797 |
| 16,04 | 0,01397 |
| 16,06 | 0,00992 |
| 16,08 | 0,00583 |
| 16,1 | 0,00175 |
| 16,12 | -0,0023 |

| Natural Heave Period (undamped) (s) | Heave Added Mass (kg) | Coeff. Added Mass | Heave Spring (N/m) | Heave Damping (N/m/s) | Coeff. Damping | Nallayarasu (2017) | | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|----------------|--------------------|--------------------|--------|--------|-------|-------|
| | | | | | | 2.183 | 0.118 | 319.87 | 8.56 | 0.231 | |
| | | | | | | | Nimmy et al (2013) | | | | |
| | | | | | | | 2.444 | 0.130 | 324.33 | 8.62 | 0.229 |

| Cycle (n) | Time (s) | Amplitude (mm) | Interpolated time per cycle (s) | Damping ratio (%) | Resonance frequency (undamped) (rad/s) | Resonance frequency (damped) (rad/s) | Retain Interval (%) | |
|-----------|----------|----------------|---------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|---------------------|------|
| | | | | | | | 1.52 | 1.52 |
| - | 0.50 | 1.70 | - | - | - | - | 15.72 | 0.05 |
| 1 | 2.02 | 1.20 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 11.16 | 0.15 |
| 2 | 3.54 | 0.85 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 9.62 | 0.21 |
| 3 | 5.06 | 0.60 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 8.10 | 0.30 |
| 4 | 6.58 | 0.43 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 6.58 | 0.43 |
| 5 | 8.10 | 0.30 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 5.06 | 0.60 |
| 6 | 9.62 | 0.21 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 4.132 | 0.71 |
| 7 | 11.16 | 0.15 | 1.54 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 3.54 | 0.85 |
| 8 | 12.68 | 0.11 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 3.00 | 1.00 |
| 9 | 14.20 | 0.08 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 2.50 | 1.20 |
| 10 | 15.72 | 0.05 | 1.52 | 0.345 | 4.126 | 4.132 | 2.02 | 1.52 |