



TUGAS AKHIR - MO141326

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMENT OLAH
GERAK CLASSIC SPAR DILENGKAPI HELICAL
STRAKES DENGAN VARIASI HEADING
GELOMBANG**

SEPTIAN AGUNG PRIAMBODO

NRP. 043114 40000 021

Dosen Pembimbing :

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

Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 60111

2018



TUGAS AKHIR - MO141326

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF CLASSIC SPAR MOTION WITH *HELICAL* *STRAKES* ON HEADING VARIATION

SEPTIAN AGUNG PRIAMBODO

NRP. 043114 40000 021

Supervisors :

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

Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA 60111

2018

**STUDY NUMERIS DAN EKSPERIMENT OLAH GERAK
CLASSIC SPAR DILENGKAP HELICAL STRAKES DENGAN
VARIASI HEADING GELOMBANG**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

SEPTIAN AGUNG PRIAMBODO

NRP. 04311440000021

Disetujui oleh :

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

2. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Pembimbing 2)

3. Ir. Murdjipto, M.Sc. Eng (Penguji 1)

4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D (Penguji 2)

SURABAYA, JULI 2018

**STUDI NUMERIK DAN EKSPERIMENT OLAH GERAK GERAK CLASSIC
SPAR DILENGKAPI *HELICAL STRAKES* DENGAN VARIASI *HEADING*
GELOMBANG**

Nama : Septian Agung Priambodo
NRP : 043114 40000 021
Departemen : Teknik Kelautan FTK – ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

ABSTRAK

SPAR merupakan bangunan apung dengan struktur utama berbentuk silinder. Dalam perkembangannya SPAR telah mengalami perubahan konsep terutama konsep bentuk lambungnya. *Helical strakes* pada SPAR memiliki pengaruh dalam mengurangi VIV (*vortex induced vibration*). Dalam Tugas Akhir ini, dilakukan study numeris dan eksperimen olah gerak SPAR dilengkapi *helical strakes* dengan variasi *heading* gelombang dengan arah gelombang datang yang berbeda ($0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$) dan 3 mode gerakan yaitu *surge, pitch, heave*. Tali tambat berjumlah 4 buah dengan spesifikasi yang sama. Metode numeris dianalisis dengan *software* ANSYS AQWA. Eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Karakteristik gerak SPAR menghasilkan nilai yang bervariasi pada kondisi tertambat dengan variasi *heading* $0^\circ, 22.5^\circ$ dan 45° . Pada *surge* dan *pitch* nilai terbesar terjadi pada arah 0 derajat sebesar 1.367 m/m dan 4.276 deg/m. Pada gerakan *heave* arah datang tidak mempengaruhi tinggi RAO. Tali yang *inline* dengan arah datang gelombang mengalami nilai RAO *tension* yang paling besar yaitu 287.907 ton/m. *Helical strakes* meredam gerakan secara signifikan pada *heave* dan *pitch* namun membesar pada *surge*.

Kata kunci : RAO, SPAR, *Heading* gelombang, *helical strakes*, tegangan tali.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF CLASSIC SPAR MOTION WITH HELICAL STRAKES ON HEADING VARIATION.

Name : Septian Agung Priambodo
NRP : 043114 40000 021
Departement : Teknik Kelautan FTK – ITS
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T.

ABSTRACT

SPAR is floating structure with shaped of main structure is cylinder. In development SPAR has undergone changes of concept in shape of hull. Helical strakes on SPAR has influence in reduce VIV (vortex Induced Vibration). In this final project, is done numerical and experimental study of SPAR motion with helical strakes with variation of heading ($0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$) in 3 modes of motion (*surge, pitch, heave*). 4 mooring line with same specification. Experimental and numerical study analized by ANSYS AQWA. Experimental study is done in hydrodynamic laboratory FTK ITS. Characteristics of spar motion produced witch variety value in tethered condition with variation of heading ($0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ$). In surge and pitch bigest value of RAO occured in heading 0° amount 1.367 m/m of surge and 4.276 deg/m of pitch. In the heave heading not influence RAO. Mooring lines that inline with heading have bigest RAO tension with value 287.907 ton/m. Helical strakes reduced motion in heave and pitch but increase in surge.

Keywords : RAO, SPAR, heading, helical strakes, tension

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah puji syukur kepada Allah SWT berkat limpahan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Sholawat serta salam juga penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW yang dinanti-nantikan syafaatnya kelak.

Tugas akhir ini berjudul "*Study Numeris Dan Eksperimen Olah Gerak Classic Spar Dilengkapi Helical Strakes Dengan Variasi Heading Gelombang*". Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi kesarjanaan (S-1) di Teknik Kelautan FTK-ITS Surabaya.

Tugas akhir ini membahas tentang olah gerak dan tegangan tali *classic SPAR* yang pada *hull* ditambahkan helical strakes. Pada studi eksperimen *helical strakes* dimodelkan dengan bentuk silinder yang berdiameter 1 inch. Pada studi eksperimen dan numeris SPAR berada dalam 3 derajat kebebasan (*Surge, Heave, Pitch*). Hasil dari metode numeris divalidasikan dengan hasil metode eksperimen.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan pada penulisan laporan tugas akhir ini ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun serta menambah informasi dan pengetahuan pada penulisan laporan ini.

Surabaya, 2018

Septian Agung Priambodo

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung pelaksanaan Tugas Akhir dan juga dalam penulisan laporan ini hingga selesai dengan baik, meliputi :

1. Allah SWT karena berkat rahmat-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan.
2. Bapak dan Ibu dirumah yang selalu memberikan doa dan motivasi hingga tugas akhir ini selesai.
3. Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D dan Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan banyak bimbingan dan ilmu.
4. Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen wali yang telah membimbing selama kuliah.
5. Bapak Condro, Pak Rudi, dan Pak Dwi Hendra selaku teknisi Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS yang telah memberikan bantuan selama pengerjaan tugas akhir.
6. Bapak Bahrudin Ali yang telah membantu dalam pembuatan program matlab.
7. Teman – teman tim TA SPARTA yang bahu-membahu memberikan bantuan hingga tugas akhir ini selesai.
8. Teman-teman Maelstrom P54-L32 yang selalu memberikan motivasi satu sama lain selama 4 tahun kuliah di Departemen Teknik Kelautan
9. Teman-teman pengurus Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS yang selalu memberikan motivasi satu sama lain selama pengerjaan tugas akhir ini.
10. Yudo dan teman – teman PPNS yang telah membantu dalam pembuatan instrumen eksperimen.

Surabaya, 2018

Septian Agung Priambodo

DAFTAR ISI

COVER

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR.....	iv
UCAPAN TERIMAKASIH	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN	4
1.4 MANFAAT	4
1.5 BATASAN MASALAH.....	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	9

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.2 DASAR TEORI.....	10
2.2.1 Gerak Bangunan Apung	10
2.2.2 Teori Gelombang Airy.....	11
2.2.3 Beban Hidrodinamika.....	11
2.2.4 Gaya Reaksi.....	12
2.2.5 Respon Amplitude Operator (RAO).....	16

2.2.6 Sistem Tambat.....	18
2.2.7 Teori Pemodelan	20
2.2.8 Hukum Model Froude	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 DIAGRAM ALIR	25
3.2 PENJELASAN DIAGRAM ALIR	28
3.2.1 Studi Literatur Dan Pengumpulan Data	28
3.2.2 Pemodelan Eksperimen Dan Numerik.....	29
3.2.3 Validasi Model	32
3.2.4 Kalibrasi Model.....	33
3.2.5 Rancang Sistem Tambat.....	33
3.2.6 Parameter Sistem Tambat	35
3.2.7 Instrumen Laboratorium.....	36
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
4.1 PEMODELAN STRUKTUR	39
4.1.1 Pemodelan Numerik.....	39
4.1.2 Pemodelan Eksperimen.....	41
4.1.3 Pemodelan Tali Tambat	48
4.2 VALIDASI MODEL.....	51
4.2.1 Validasi Model Numerik.....	51
4.2.2 Validasi Model Eksperimen.....	52
4.3 INSTRUMEN PENGKURAN.....	56
4.3.1 Kalibrasi Gyroscope.....	56
4.3.2 Kalibrasi Image Processing.....	60
4.3.3 Kalibrasi Load Cell	63
4.4 RAO TERAPUNG BEBAS	69

4.4.1 RAO Terapung Bebas Metode Numeris.....	69
4.4.2 RAO Terapung Bebas Metode Ekperimen.....	70
4.4.3 Perbandingan RAO Metode Numeris Dan Ekperimen Kondisi Terapung Bebas.....	75
4.5. RAO TERTAMBAT	78
4.5.1 RAO Tertambat Metode Numeris	78
4.5.2 RAO Tertambat Metode Ekperimen.....	80
4.5.3 Perbandingan RAO Metode Numeris Dan Ekperimen Kondisi Tertambat	85
4.6. TEGANGAN TALI.....	87
4.6.1 Metode Numeris	87
4.6.2 Metode Ekperimen	90
4.6.3 Perbandingan RAO Tension Metode Numeris Dan Ekperimen	95
4.7. STUDI PARAMETRIS	99
4.7.1 RAO numeris tertambat.....	99
4.7.2 RAO eksperimen kondisi tertambat	102
4.7.3 RAO <i>tension</i> numeris tertambat	104
4.7.4 RAO <i>tension</i> eksperimen tertambat.....	107
4.7.5 RAO spar dengan helical strakes dan tanpa helical strakes.....	110
4.7.6 RAO tension tali tambat spar dengan helical strakes dan tanpa helical strakes.....	112
BAB IV PENUTUP	
5.1 KESIMPULAN	117
5.2 SARAN.....	118
DAFTAR PUSTAKA.....	119
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Neptune Spar (Rigzone, 1999)	1
Gambar 1.2. Perkembangan Spar Platform.....	2
Gambar 2.1. Desain Anjungan Spar.....	7
Gambar 2.2. Perbandingan RAO Spar Tanpa Dan Dengan Helical Strakes.....	9
Gambar 2.3. Enam Mode Gerakan Bangunan Apung.....	10
Gambar 2.4. Beban Hidrodinamika Pada Spar	12
Gambar 2.5. Persamaan Added Mass	13
Gambar 2.6. Bentuk Umum Grafik Respon Gerakan Bangunan Apung	17
Gambar 2.7. Sistem Tambat Catenery	19
Gambar 2.8. Sistem Tambat Taut	19
Gambar 3.1. Diagram Alir Pengerjaan.....	25
Gambar 3.2. Set Up Model Terapung Bebas	30
Gambar 3.3. Set Up Model Tertambat	31
Gambar 3.4.Pemodelan Helical Strakes Tampak Atas	31
Gambar 3.5.Pemodelan Helical Strakes Tampak Samping	32
Gambar 3.6.Rencana Sistem Tambat Eksperimen.....	34
Gambar 3.7.Rencana Sistem Tambat Ekperimen Dengan Variasi	34
Gambar 3.8.Rencana Sistem Tambat Tampak Samping.....	35
Gambar 3.9.Rencana Jangkar Tampak Atas	35
Gambar 3.10.Diagram Mekanisme Kerja Accelerogyro.....	37
Gambar 3.11.Diagram Metodologi Umum Ekperimen Bangunan Terapung	37
Gambar 3.12.Instrumen Image Processing	38
Gambar 4.1. Meshing Model Pada Ansys Aqwa	40
Gambar 4.2. Meshing Model Tampak Atas	40
Gambar 4.3. Meshing Model Tampak Samping	41

Gambar 4.4. Tampak Model Dengan Helical Strakes	42
Gambar 4.5. Desain Pemberat Dan Ulir	44
Gambar 4.6. Katalog Property Wire Rope	49
Gambar 4.7. Skenario Tes Pendulum Kondisi 1	53
Gambar 4.8. Skenario Tes Pendulum Kondisi 2	53
Gambar 4.9. Instrumen Gyroscope.....	57
Gambar 4.10. Geladak Dan Busur.....	57
Gambar 4.11. Gyroscope Pada Geladak	57
Gambar 4.12. Gyroscope Pada Geladak Pada Proses Kalibrasi	58
Gambar 4.13. Keluaran Arduino Pada Sudut 0 Derajat Searah Jarum Jam	58
Gambar 4.14. Keluaran Arduino Dengan Sudut Yang Dibentuk	60
Gambar 4.15. Sketsa Model Fisik Dalam Image Processing	61
Gambar 4.16. Kamera Dan Bola	61
Gambar 4.17. Konfigurasi Geladak Dengan Objek Yang Ditinjau.....	62
Gambar 4.18. Webcam Logtech.....	62
Gambar 4.19. Proses Kalibrasi <i>Image Processing</i>	63
Gambar 4.20. Keluaran Kalibrasi Image Procesing	63
Gambar 4.21. Konfigurasi Loadcell	64
Gambar 4.23. Beban Kalibrasi	64
Gambar 4.24. Grafik Kalibrasi Load Cell 1.	65
Gambar 4.25. Grafik Kalibrasi Load Cell 2.	66
Gambar 4.26. Grafik Kalibrasi Load Cell 3.	67
Gambar 4.27. Grafik Kalibrasi Load Cell 4.	68
Gambar 4.28. Grafik RAO Terapung Bebas Heave.....	69
Gambar 4.29. Grafik RAO Terapung Bebas Surge.....	69
Gambar 4.30. Grafik RAO Terapung Bebas Pitch.	70

Gambar 4.31. Time History Surge Free Floating Ekperimen	71
Gambar 4.32. FFT Gerakan Surge Free Floating Eksperimen.	71
Gambar 4.33. Grafik RAO Free Floating Surge Eksperimen	72
Gambar 4.34. Time History Heave Free Floating Ekperimen	73
Gambar 4.35. FFT Gerakan Heave Free Floating Eksperimen.....	73
Gambar 4.36. Grafik RAO Free Floating Heave Eksperimen	74
Gambar 4.37. Time History Pitch Free Floating Ekperimen	74
Gambar 4.38. FFT Gerakan Pitch Free Floating Eksperimen.....	74
Gambar 4.39. Grafik RAO Free Floating Pitch Eksperimen	75
Gambar 4.40. Perbandingan RAO Surge Secara Numeris Dan Eksperimen	76
Gambar 4.41. Perbandingan RAO Heave Secara Numeris Dan Eksperimen	77
Gambar 4.42. Perbandingan RAO Pitch Secara Numeris Dan Eksperimen	77
Gambar 4.43. Kondisi Tertambat Dalam Ansys Aqwa.....	78
Gambar 4.44. RAO Surge Tertambat Numeris	78
Gambar 4.45. RAO Heave Tertambat Numeris	79
Gambar 4.46. RAO Pitch Tertambat Numeris	79
Gambar 4.47.Konfigurasi Eksperimen Tertambat	80
Gambar 4.48. RAO Surge Tertambat Eksperimen.....	82
Gambar 4.49. RAO Heave Tertambat Eksperimen.....	83
Gambar 4.50. RAO Pitch Tertambat Eksperimen.....	84
Gambar 4.51. Perbandingan RAO Tertambat Surge Secara Numeris Dan Eksperimen	85
Gambar 4.52. Perbandingan RAO Tertambat Heave Secara Numeris Dan Eksperimen	86
Gambar 4.53. Perbandingan RAO Tertambat Pitch Secara Numeris Dan Eksperimen	87
Gambar 4.54. Posisi Line A, B, C, Dan D	88

Gambar 4.55. Pemodelan Tali Tambat Dengan Ansys Aqwa.....	88
Gambar 4.56. RAO Tension Line A Dan B	89
Gambar 4.57. RAO Tension Line C Dan D	89
Gambar 4.58. Time History Instrumen Load Cell Line A.....	90
Gambar 4.59. Time History Instrumen Load Cell Line B.....	90
Gambar 4.60. Time History Instrumen Load Cell Line C.....	90
Gambar 4.61. Time History Instrumen Load Cell Line D.....	90
Gambar 4.62. Grafik Rao Tension Line A Eksperimen	92
Gambar 4.63. Grafik RAO Tension Line B Eksperimen	93
Gambar 4.64. Grafik RAO Tension Line C Eksperimen	94
Gambar 4.65. Grafik RAO Tension Line D Eksperimen	95
Gambar 4.66. Perbandingan RAO Tension Line A Eksperimen Dan Numeris	96
Gambar 4.67. Perbandingan RAO Tension Line B Eksperimen Dan Numeris	97
Gambar 4.68. Perbandingan RAO Tension Line C Eksperimen Dan Numeris	98
Gambar 4.69. Perbandingan RAO Tension Line D Eksperimen Dan Numeris	99
Gambar 4.70. Variasi Heading SPAR tertambat	99
Gambar 4.71 RAO Surge Variasi Heading Metode Numeris	100
Gambar 4.72. RAO Heave Variasi Heading Metode Numeris.....	101
Gambar 4.73. RAO PitchVariasi Heading Metode Numeris.....	101
Gambar 4.74 RAO Surge Variasi Heading Metode Ekperimen.....	102
Gambar 4.75. RAO Heave Variasi Heading Metode Eksperimen	103
Gambar 4.76. RAO PitchVariasi Heading Metode Eksperimen	104
Gambar 4.77. RAO Tension Line A Variasi Heading Metode Numeris.....	105
Gambar 4.78. RAO Tension Line B Variasi Heading Metode Numeris	105
Gambar 4.79. RAO Tension Line C Variasi Heading Metode Numeris	106
Gambar 4.80. RAO Tension Line D Variasi Heading Metode Numeris.....	107

Gambar 4.81. RAO Tension Line A Variasi Heading Metode Eksperimen.....	108
Gambar 4.82. RAO Tension Line C Variasi Heading Metode Eksperimen	109
Gambar 4.83. RAO Tension Line D Variasi Heading Metode Eksperimen.....	109
Gambar 4.84 RAO Surge SPAR Dengan Helical dan Tanpa Helical.....	110
Gambar 4.85 RAO Heave SPAR Dengan Helical dan Tanpa Helical	111
Gambar 4.86 RAO Pitch SPAR Dengan Helical dan Tanpa Helical.....	112
Gambar 4.87. RAO Tension Line A Dengan Helical dan Tanpa Helical	113
Gambar 4.88. RAO Tension Line B Dengan Helical dan Tanpa Helical	113
Gambar 4.89. RAO Tension Line C Dengan Helical dan Tanpa Helical	114
Gambar 4.90. RAO Tension Line D Dengan Helical dan Tanpa Helical	115

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.a. Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling.....	21
Tabel 3.1.a. Data Small SPAR (Deep Oil Technology Inc., 1995).....	28
Tabel 3.1.b. Data Small SPAR lanjutan	28
Tabel 3.1.c Data <i>Towing Tank</i> Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.....	29
Tabel 3.1.d Data Lingkungan	29
Tabel 4.1 Data Dimensi Mini SPAR (<i>Joint Industry Project</i> , 1995)	39
Tabel 4.2 Data Distribusi Massa Mini SPAR (<i>Joint Industry Project</i> , 1995).....	39
Tabel 4.3 Hasil Penskalaan Model SPAR	41
Tabel 4.4 Hasil Penimbangan Berat Material.....	43
Tabel 4.5 Perhitungan Momen Inersia massa PVC	44
Tabel 4.6 Perhitungan momen inersia massa Blok A.....	45
Tabel 4.7 Perhitungan momen inersia massa Blok B	45
Tabel 4.8 Perhitungan momen inersia massa <i>topside</i>	46
Tabel 4.9 Perhitungan momen inersia massa ulir.....	46
Tabel 4.10 Perhitungan momen inersia helical	46
Tabel 4.11 Posisi COG setiap material.....	46
Tabel 4.12 Posisi COG model	47
Tabel 4.13 Perhitungan momen inersia terhadap pusat massa	48
Tabel 4.14 Perhitungan jari-jari girasi	48
Tabel 4.15. Properti mooring line wire rope	48
Tabel 4.16. Spesifikasi tali tambat eksperimen	50
Tabel 4.17 Spesifikasi tali tambat model fisik skala penuh	50
Tabel 4.18. Perbandingan kekakuan <i>prototype</i> dengan data kekakuan <i>wire rope</i> acuan	50

Tabel 4.19 Data property tali tambat yang digunakan pada model fisik	51
Tabel 4.20. Perbandingan dan validasi model numerik dengan data	51
Tabel 4.21. Sarat dan displacement model.....	52
Tabel 4.22. Ukuran – ukuran yang digunakan pada pendulum test	54
Tabel 4.23. Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2	54
Tabel 4.24. Validasi model fisik	56
Tabel 4.25. Kalibrasi searah jarum jam	59
Tabel 4.26. Kalibrasi berlawanan jarum jam	59
Tabel 4.27. Persamaan <i>trendline</i> Arduino	60
Tabel 4.28. Data kalibrasi <i>load cell</i> 1 percobaan 1	65
Tabel 4.29. Data kalibrasi <i>load cell</i>	66
Tabel 4.30. Data kalibrasi <i>load cell</i> 3	67
Tabel 4.31. Data kalibrasi <i>load cell</i> 4	68
Tabel 4.32. Persamaan Kalibrasi Keluaran <i>Load cell</i> dengan Beban	68
Tabel 4.33. Periode lingkungan dan periode eksperimen	70
Tabel 4.34. Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen	71
Tabel 4.35. Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen.....	73
Tabel 4.36. Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen.....	75
Tabel 4.37. Perbandingan RAO <i>surge</i> terapung bebas	76
Tabel 4.38. Perbandingan RAO <i>heave</i> terapung bebas.....	76
Tabel 4.39. Perbandingan RAO <i>pitch</i> terapung bebas	77
Tabel 4.40. Periode lingkungan dan periode eksperimen model fisik tertambat yang digunakan.....	81
Tabel 4.41. Respon gerak dan RAO gerakan <i>surge</i> hasil eksperimen kondisi tertambat	81

Tabel 4.42. Respon gerak dan RAO gerakan <i>heave</i> hasil eksperimen kondisi tertambat.....	82
Tabel 4.43. Respon gerak dan RAO gerakan <i>pitch</i> hasil eksperimen	83
Tabel 4.44. Perbandingan RAO <i>surge</i> tertambat.....	85
Tabel 4.45. Perbandingan RAO <i>heave</i> tertambat	86
Tabel 4.46. Perbandingan RAO <i>pitch</i> tertambat	87
Tabel 4.47. RAO <i>Tension</i> maksimum tiap tali tambat pada Ansys Aqwa	89
Tabel 4.48. RAO <i>Tension line</i> A eksperimen.....	91
Tabel 4.49. RAO <i>Tension line</i> B eksperimen.....	92
Tabel 4.50. RAO <i>Tension line</i> B eksperimen.....	93
Tabel 4.51. RAO <i>Tension line</i> D eksperimen.....	94
Tabel 4.52. Perbandingan <i>Tension Line</i> A	96
Tabel 4.53. Perbandingan <i>Tension Line</i> B.....	97
Tabel 4.54. Perbandingan <i>Tension Line</i> C.....	98
Tabel 4.55. Perbandingan <i>Tension Line</i> D	99
Tabel 4.56. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>surge</i> tertambat	100
Tabel 4.57. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>heave</i> tertambat.....	100
Tabel 4.58. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>pitch</i> tertambat	101
Tabel 4.59. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>surge</i> tertambat metode eksperimen	102
Tabel 4.60. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>heave</i> tertambat metode eksperimen.....	103
Tabel 4.61. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>pitch</i> tertambat metode eksperimen	103
Tabel 4.62. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>Tension Line</i> A	104
Tabel 4.63. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>Tension Line</i> B	105
Tabel 4.64. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>Tension Line</i> C.....	106
Tabel 4.65. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>Tension Line</i> D.....	107
Tabel 4.66. Variasi <i>Heading</i> RAO <i>Tension Line</i> A metode eksperimen	108

Tabel 4.67. Variasi <i>Heading RAO Tension Line C</i> metode eksperimen	109
Tabel 4.68. Variasi <i>Heading Tension Line D</i> metode eksperimen	110
Tabel 4.69 Perbandingan RAO surge <i>free floating SPAR helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	110
Tabel 4.70 Perbandingan RAO <i>heave free floating SPAR helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	111
Tabel 4.71 Perbandingan RAO <i>pitch free floating SPAR helical strakes</i> dan tanpa <i>helical strakes</i>	112

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A (TABULASI DISTRIBUSI MASSA)

LAMPIRAN B (DESAIN TALI TAMBAT)

LAMPIRAN C (PENGUKURAN GERAK PENDULUM SPAR)

LAMPIRAN D (INPUT DAN OUTPUT ANSYS AQWA)

LAMPIRAN E (SCRIPT MATLAB)

LAMPIRAN F (TERTAMBAT 0 DEGREE, TERTAMBAT 22,5 DEGREE,
TERTAMBAT 45 DEGREE)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Permintaan minyak dan gas dunia yang tinggi pada saat ini telah mendorong teknologi untuk industri minyak dan gas dunia berkembang dengan cepat. Ada beberapa teknologi untuk menunjang eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi di lepas pantai. Salah satu teknologi adalah *offshore platform* yang memiliki struktur besar yang digunakan untuk keperluan pengeboran dan memproses minyak dan gas bumi dari sumur yang berada di bawah laut. *Offshore platform* dibuat dan di desain untuk laut dengan lingkungan yang keras. Salah satunya adalah SPAR (Philip, 2015).

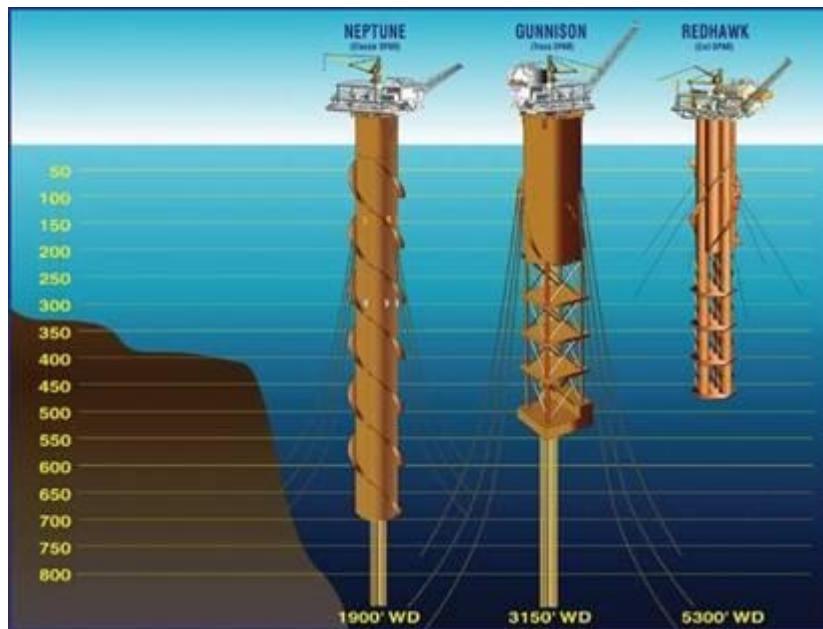
SPAR merupakan bangunan apung dengan struktur utama berbentuk silinder yang daya apung silinder digunakan untuk menahan beban dari bangunan atas (Deep Oil Technology Inc (1995) dalam Herdayandita, 2017). Bentuk dari SPAR Platform biasanya berupa silinder panjang yang berongga dengan diameter yang besar. Normalnya ditambat dengan *conventional spread chains*. Karena dalam *draftnya*, silinder dari SPAR secara umum diberikan *helical strakes* untuk mengurangi VIV (*vortex induced vibration*) akibat arus dan untuk menunjukkan karakteristik gerakan yang bagus pada kondisi laut yang ekstrim. SPAR platform dianggap sebagai alternatif teknologi struktur lepas pantai terapung untuk laut dalam (Rho, et al 2003).



Gambar 1.1 Neptune SPAR (Rigzone, 1999)

Teknologi spar telah dimanfaatkan untuk strukture *offshore* seperti kapal riset, stasiun komunikasi dan *storage offloading platforms* (Lee, dkk 2002). Lambung SPAR pada umumnya berfungsi sebagai tempat penyimpanan produk minyak dan gas (Mansouri, et al., 2009)

Dalam perkembangannya SPAR telah mengalami perubahan konsep terutama konsep bentuk lambungnya. SPAR generasi pertama adalah *clasic SPAR*. *Clasic SPAR* memiliki gerakan *heave* sangat kecil dan gaya gelombang *vertical* yang bekerja juga kecil karena *draftnya* yang besar (Liu et all, 2003). Pada generasi kedua bagian lambung SPAR digantikan dengan struktur truss yang ditambahkan dengan plat horizontal untuk mengurangi beban struktur, biaya dan mengurangi gaya drag akibat arus serta untuk mengurangi gerak heave yang terjadi (Mansouri et all, 2009). Generasi ketiga dari SPAR adalah *cell SPAR* yang konstruksinya berbeda. Hull terdiri dari banyak *ring-stiffened tubes* atau *cells* yang disambung oleh plat horisontal dan vertikal. Kontruksi ini lebih murah dan lebih mudah prosesnya (Lim et all, 2005).



Gambar 1.2. Perkembangan SPAR Platform (Kumar, 2015)

Pada tahun 2017, Herdayandita, dkk telah melakukan eksperiment *clasic SPAR* dengan dan dinamika tegangan tali tambat. Namun SPAR yang dieksperimen merupakan *Classic SPAR* tanpa dilengkapi dengan *helical strakes*.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan studi numerical, dan eksperimental olah gerak Cassic SPAR dilengkapi *helical strakes*. Data model dari Mini SPAR dari deep oil tecknology Inc. (1995) kemudian akan ditambahkan *helical strakes*. Saat kondisi tertambat mempunyai 4 tali taambat dengan spesifikasi yang identik dengan sudut masing-masing 30° terhadap fairlead.

1.2. RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana hasil numerik dan eksperimental respon gerakan surge, pitch, dan heave SPAR dengan helical strakes pada kondisi terapung bebas?
2. Bagaimana hasil numerik dan eksperimen respon gerakan surge, pitch, dan heave SPAR dengan *helical strakes* pada kondisi tertambat dengan variasi arah datang gelombang 0° , 22.5° , dan 45° ?
3. Bagaimana tegangan *mooring line* SPAR *Helical Strakes* yang dihasilkan dari keadaan tertambat dengan tiga variasi arah datang gelombang dan arah datang gelombang yang menyebabkan tegangan tali paling tinggi ?

1.3. TUJUAN PENELITIAN

1. Menghitung secara numerik dan eksperimental respon gerakan surge, pitch, dan heave SPAR dengan *helical strakes* pada kondisi terapung bebas.
2. Menghitung secara numerik dan melakukan eksperimental respon gerakan surge, pitch, dan heave SPAR dengan *helical strakes* pada kondisi tertambat dengan variasi arah datang gelombang (0° , 22.5° , dan 45°).
3. Mengetahui Bagaimana tegangan *mooring line* SPAR *Helical Strakes* yang dihasilkan dari keadaan tertambat dengan tiga variasi arah datang gelombang dan arah datang gelombang yang menyebabkan tegangan tali paling tinggi.

1.4. MANFAAT

Manfaat dari tugas akhir ini adalah memberikan informasi hasil analisis kepada semua peneliti tentang karakteristik gerakan dan tegangan tali tambat SPAR *Helical Strakes* akibat beban gelombang dengan variasi arah datang gelombang.

1.5. BATASAN MASALAH

Dalam tugas akhir ini, perlu adanya batasan-batasan masalah sebagai asumsi sebagai berikut :

1. Gelombang reguler.
2. Studi numeris dan eksperimen dilakukan pada model SPAR dari JIP.
3. Studi eksperimen dilakukan dengan menyesuaikan keadaan Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS.
4. Tiga variasi arah datang gelombang (0° ; $22,5^\circ$; 45°)
5. Pada studi eksperimen dan numeris SPAR berada dalam 3 derajat kebebasan (*Surge, Heave, Pitch*).
6. Pada studi eksperimen dan numeris menggunakan sistem tambat taut berjumlah 4 *lines*
7. Pada studi eksperimen dan numeris beban yang diperhitungkan hanya beban gelombang.
8. Pada studi eksperimen efek hidrodinamika dari sub-struktur tidak diperhitungkan.
9. Pada studi eksperimen dan numeris interaksi sistem tambat dengan tanah diabaikan.
10. Pada studi eksperimen dan numeris tidak meninjau biaya pada struktur.
11. Pada studi eksperimen dan numeris arus diabaikan.
12. Helical strakes dimodelkan dengan bentuk silinder pejal.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang permasalahan yang diambil oleh penulis, perumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori yang berhubungan dengan penilitian yang dilakukan oleh penulis. Tinjauan pustaka diambil dari literatur yang berasal dari jurnal,buku teks, laporan tugas akhir dan referensi lain yang digunakan sebagai dasar dalam melakukan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi Penelitian menjelaskan tentang bagaimana penelitian ini dilakukan mulai dari *start* penelitian, pengumpulan data, analisis, hingga penarikan kesimpulan dan saran.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang pemodelan struktur dan tali tambat beserta validasinya, penggunaan instrument dalam eksperimen, studi numeris dan studi eksperiment.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merupakan bab terakhir. Berisi kesimpulan yang ditarik dari analisis dalam penelitian sesuai dengan perumusan masalah yang telah dirumuskan. Kemudian dimasukan saran-saran yang berisi kekurangan dalam penelitian untuk disarankan kepada peneliti selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi tentang referensi-referensi yang dipakai selama penelitian.

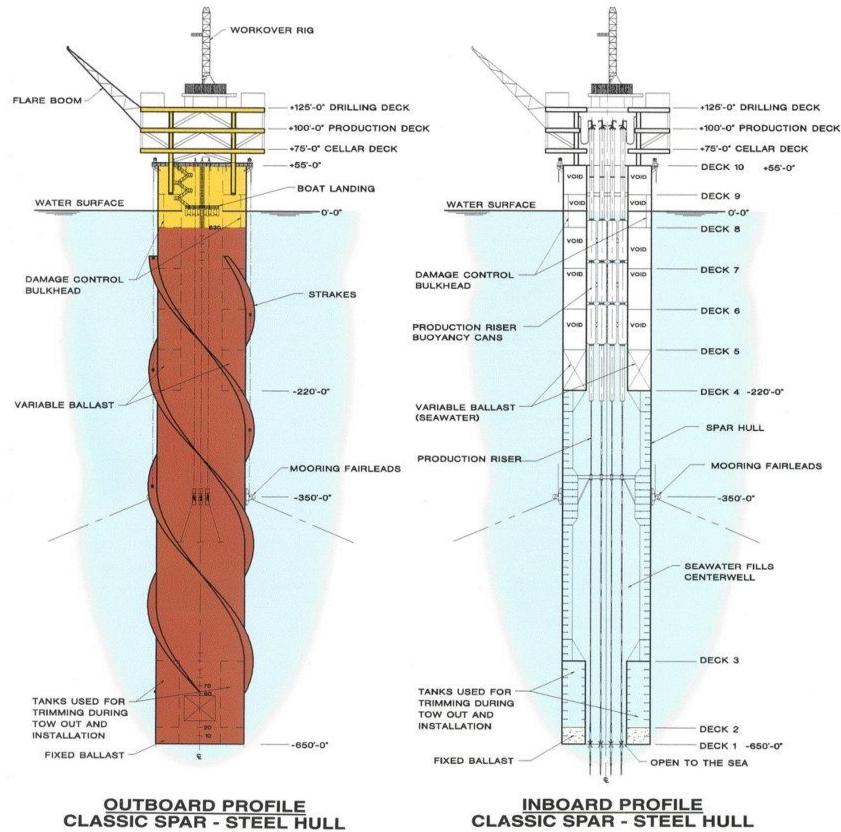
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1.Tinjauan Pustaka

SPAR merupakan bangunan apung dengan struktur utama berbentuk silinder yang daya apung silinder digunakan untuk menahan beban dari bangunan atas (Deep Oil Technology Inc(1995) dalam Herdayandita, 2017).



Gambar 2.1. Desain Anjungan SPAR (Global Security, 2000).

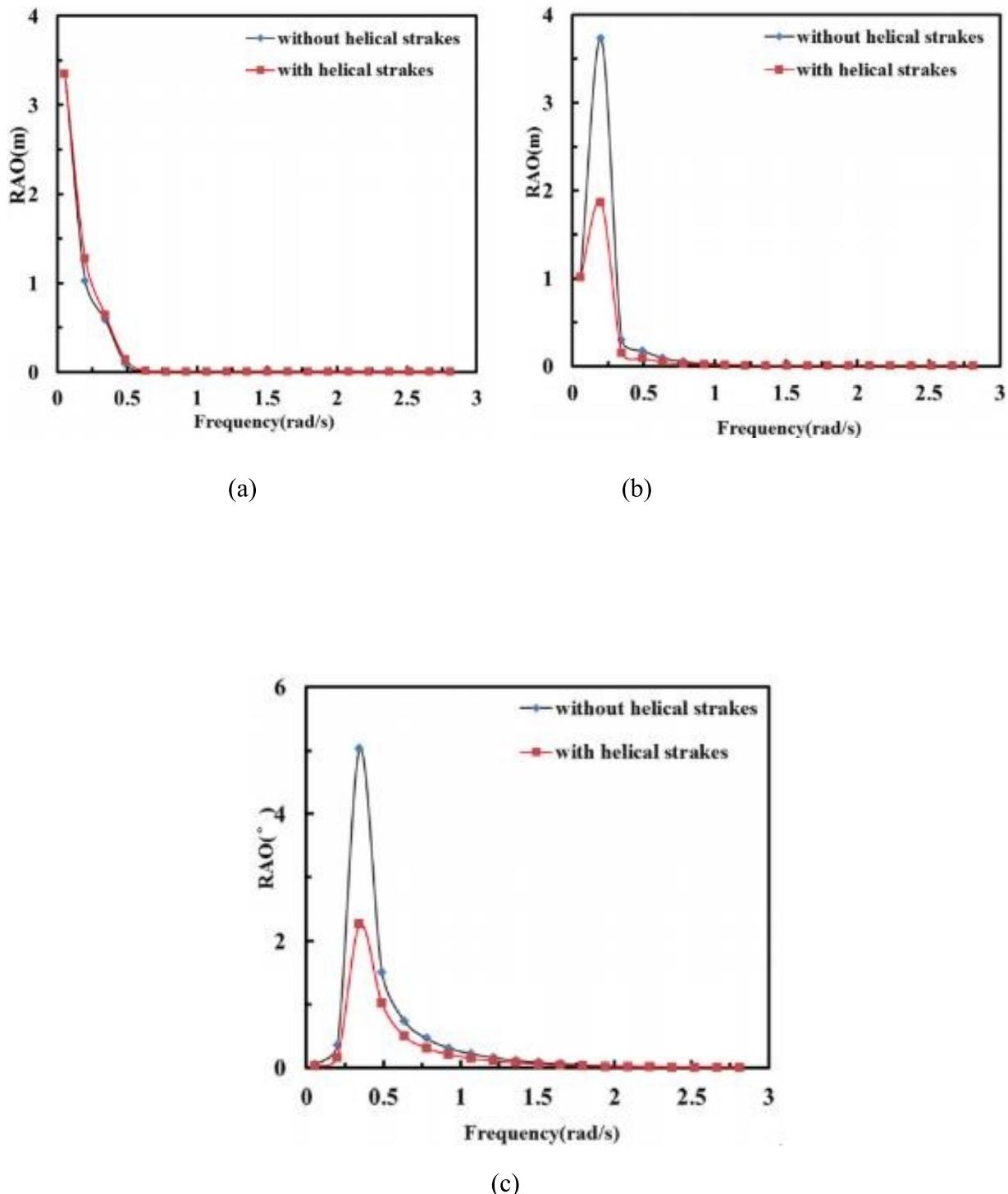
Untuk mengoptimalkan fungsinya maka terus dilakukan penelitian-penelitian dengan maksud mengetahui parameter-parameter yang mempengaruhi olah gerak

SPAR. Helical strakes merupakan struktur yang ditambahkan pada silinder SPAR yang digunakan untuk meredam VIV.

Liqin Liu pada taun 2014 menganalisis perilaku dinamis dari SPAR. SPAR yang di analisis menggunakan *helical strakes*. Studi yang dilakukan adalah dengan simulasi numerik dan eksperimen. Variable yang digunakan untuk analisis adalah varael gelombang dengan perbedaan frekuensi.

Pada penelitian Montasir dkk (2015), suatu *truss* SPAR dimodelkan sebagai *rigid body* dengan tiga derajat kebebasan lalu dilakukan analisis respon dinamis dari platform dengan analisis *time-domain* dengan menghitung kinematik gelombang dan gaya gelombang menggunakan teori gelombang *Airy* dan persamaan morison. Perbedaan respon gerakan yang terjadi ternyata tidak signifikan dengan penggantian konfigurasi tali tambat dengan kondisi sudut azimuth. Namun *offset* awal dari platform terpengaruh secara signifikan dengan konfigurasi tali tambat (Montasir, et al., 2015).

Ding, dkk pada tahun 2017 telah melakukan penelitian SPAR. Dalam penelitiannya menggunakan floating SPAR wind turbin dengan penambahan helical strakes. Penelitian dilakukan dengan tujuan mengetahui dampak dari penambahan helical strakes ditinjau dari respon dinamis. Analisis ini di fokuskan pada perbandingan RAO dan gaya eksitasi gelombang pada frekuensi domain pada SPAR normal dan dengan penambahan *helical strakes*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa helical strakes secara efektif dapat menekan respon dinamik dari platform namun memperbesar kekuatan gelombang dan Helical strakes secara signifikan dapat mengurangi respon gerakan platform dalam heave and pitch.. Interaksi antara tinggi dan rasio pitch, dan jumlah heliks straff pasti berpengaruh pada pitch RAO. Kombinasi parameter terbaik adalah dua helai heliks dengan tinggi 15% D dan rasio pitch 5. Tinggi dan rasio pitch heliks memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon pitch, sedangkan jumlah dan interaksi rasio tinggi dan pitch memiliki sedikit efek.



Gambar 2.2 Perbandingan RAO SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* : (a) Heave, (b) Surge, (c) pitch

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Gerak Bangunan Apung

SPAR dapat bergerak dalam 6 derajat kebebasan. Gerak bangunan tersebut dibagi menjadi 2 kelompok yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Gerak-gerak tersebut dijelaskan pada uraian berikut (Journee & Massie, 2001):

1. Gerakan translasi

Gerakan translasi adalah gerakan yang searah dengan arah sumbu.

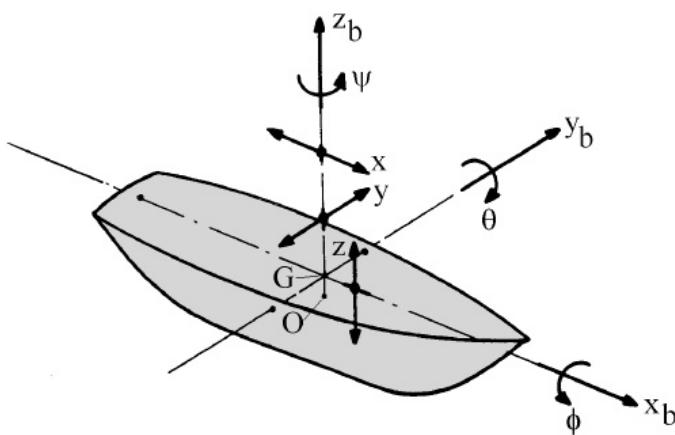
Gerakan translasi terdiri dari :

- *Surging* : gerakan translasi pada arah sumbu x
- *Swaying* : gerakan translasi pada arah sumbu y
- *Heaving* : gerakan translasi pada arah sumbu z

2. Gerakan rotasional

Gerakan rotasional adalah gerakan yang membentuk sudut terhadap sumbu, gerakan rotasional ini terdiri dari :

- *Rolling* : gerakan rotasional terhadap sumbu x
- *Pitching* : gerakan rotasional terhadap sumbu y
- *Yawing* : gerakan rotasional terhadap sumbu z



Gambar 2.3. Enam Mode Gerakan Bangunan Apung (Journee & Massie, 2001).

2.2.2 Teori Gelombang Airy

Dengan mengasumsikan kondisi dasar laut adalah rata dan batasan horisontal pada permukaan bernilai tak hingga maka teori gelombang linear atau yang lebih dikenal dengan teori gelombang Airy dapat diterapkan. Teori gelombang Airy merupakan teori gelombang yang paling sering digunakan dalam menghitung beban gelombang (*wave load*) yang terjadi pada struktur. Teori gelombang Airy juga bisa disebut dengan teori gelombang amplitudo kecil, yang menjelaskan bahwa asumsi tinggi gelombang adalah sangat kecil jika dibandingkan terhadap panjang gelombang atau kedalaman laut. Periode gelombang diasumsikan sebagai variable konstan yang tidak berubah terhadap waktu. Jadi jika dilaut diukur periode gelombang adalah 10 detik, maka periodenya akan tetap 10 detik selama gelombang tersebut menjalar. Nama Teori Gelombang Airy merupakan penghargaan kepada Sir.George Biddell Airy (1845) yang telah menemukan teori ini.

Adapun persamaan-persamaan dari teori gelombang Airy adalah sebagai berikut :

- Kecepatan potensial (ϕ)

$$(\phi)(x,z,d,t) = \frac{g\zeta_o}{\omega} e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

- Kecepatan fluida (v_z)

$$\dot{u} = - \frac{g\zeta_o}{\omega} k e^{kz} \cos(\omega t - kx) \quad (2.2)$$

- Percepatan fluida (a_z)

$$\ddot{u} = g\zeta_o k e^{kz} \sin(\omega t - kx) \quad (2.3)$$

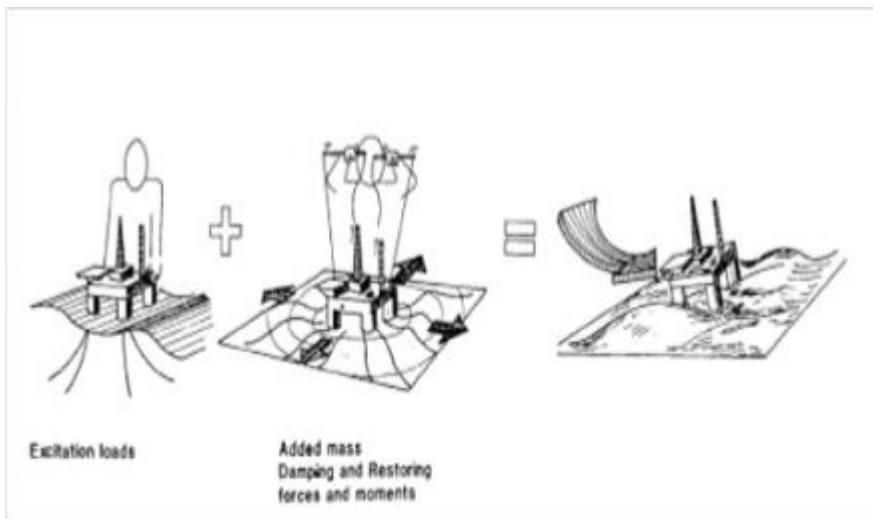
dengan,

ζ_o	= amplitudo gelombang
ω	= frekuensi alami gelombang
k	= angka gelombang
d	= kedalaman laut

2.2.3 Beban Hidrodinamika

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

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



Gambar 2.4. Beban hidrodinamika pada struktur (Faltinsen, 1990)

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

2.2.4 Gaya Reaksi

Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi added mass, redaman dan kekakuan. Berikut penjelasan masing-masing komponen tersebut.

a. *Added Mass*

Bessel (1828) melakukan eksperimen osilasi dalam bentuk pendulum di air dan di udara. Ia menemukan bahwa walaupun dengan massa pendulum

yang sama, pendulum yang di dalam air mempunyai massa yang lebih besar daripada pendulum yang di udara. Bessel kemudian menginterpretasikan hal ini sebagai masa tambah (*added mass*) (Sarpkaya, 2010).

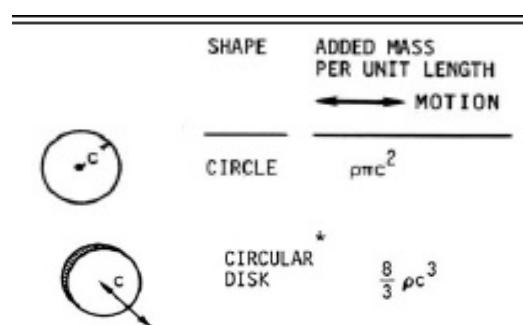
Sebenarnya tidak ada massa yang ditambahkan ke dalam sistem, efek penambahan massa ini diakibatkan oleh ikut bergeraknya fluida di sekitar benda terapung (Newman, 1977). Ikut bergeraknya fluida tersebut menambah energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda maka akan menghasilkan komponen massa. Massa inilah yang dianggap sebagai massa tambah (Sarpkaya, 2010). Massa tambah bergantung terhadap bentuk benda serta mode gerak.

Persamaan (2.3) merupakan formula dari gaya masa tambah, dimana merupakan perkalian antara massa tambah dengan percepatan gerak benda terapung. Sarpkaya (2010) menemukan beberapa nilai masa tambah untuk beberapa bentuk sederhana. Untuk gerak silinder, dengan beberapa orientasi dapat dilihat pada Gambar 2.5.

$$F_a = a_i \ddot{\xi}_i \quad (2.6)$$

dengan,

- i = Mode gerak struktur dengan
1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6
(yaw)
- a = Koefisien massa tambah
- $\ddot{\xi}$ = Respon percepatan gerak struktur



Gambar 2.5. Persamaan *added mass* untuk beberapa bentuk benda (Sarpkaya, 2010).

b. Redaman

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur (Newman, 1977). Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya. Jika struktur digerakkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil, hal inilah yang disebut sebagai redaman. Nilai redaman dapat dicari dengan menggunakan analisis numeris (Chakrabarti, 2005).

$$F_b = b_i \dot{\xi}_i \quad (2.7)$$

dengan,

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

b = Nilai redaman sistem

$\dot{\xi}$ = Respon kecepatan gerak struktur

c. Kekakuan

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi awalnya. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.8). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$F_c = c_i \xi_i \quad (2.8)$$

dengan

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

c = Kekakuan struktur

ξ = Respon posisi gerak struktur

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

$$c_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.9)$$

$$c_4 = \rho g V \overline{GM}_T \quad (2.10)$$

$$c_5 = \rho g V \overline{GM}_L \quad (2.11)$$

dengan,

ρ	= Massa jenis air sekitar struktur
g	= Percepatan gravitasi struktur
A_{wp}	= Luas permukaan di garis air
V	= Volume displacement struktur
\overline{GM}_T	= Panjang metacentre melintang
\overline{GM}_L	= Panjang metacentre memanjang

d. Massa / Displacement SPAR

Massa dari sebuah struktur yang beroperasi di laut dapat dihitung dengan menerapkan konsep hukum Archimedes. Pada penelitian ini, struktur yang dianalisis berupa SPAR dimana massa dari SPAR ini dapat dihitung dengan meninjau bagian struktur SPAR yang terendam di air atau disebut juga *volume displacement* dikalikan dengan massa jenis perairan tersebut. Secara matematis, perhitungan massa/displacement dari struktur SPAR dapat menggunakan persamaan 2.12 berikut ini.

$$(\Delta) = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times T \times \rho \quad (2.12)$$

dengan,

Δ	= massa dari struktur yang tercelup (displacement)
D	= diameter struktur
T	= Sarat air
ρ	= Massa jenis air

2.2.5 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu, ζ_{k0} , dengan amplitudo gelombang, ζ_0 . Secara matematis RAO dapat dituliskan sesuai dengan persamaan 2.21:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (\text{m/m}) \quad (2.21)$$

dengan:

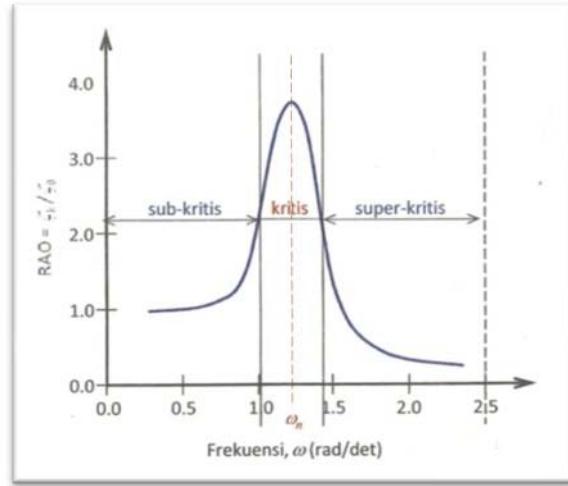
$\zeta_{k0}(\omega)$ = amplitudo struktur (m)

$\zeta_0(\omega)$ = amplitudo gelombang (m)

Respons gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djatmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan 2.21 di atas.

Sedangkan untuk respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang ($k_w = \omega^2/g$) dengan amplitudo gelombang insiden (Djatmiko, 2012):

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{kw\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)\zeta_0} \quad (\text{rad/rad}) \quad (2.22)$$



Gambar 2.6. Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung
(Djatmiko, 2012)

Berdasarkan Gambar 2.5, kurva respons gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian:

- Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau $\omega^2 < k/(m+a)$, gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan (Djatmiko, 2012).
- Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor redaman (Djatmiko, 2012).
- Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons

gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi tinggi ini, dimana $\omega^2 < k/a$, gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djatmiko, 2012).

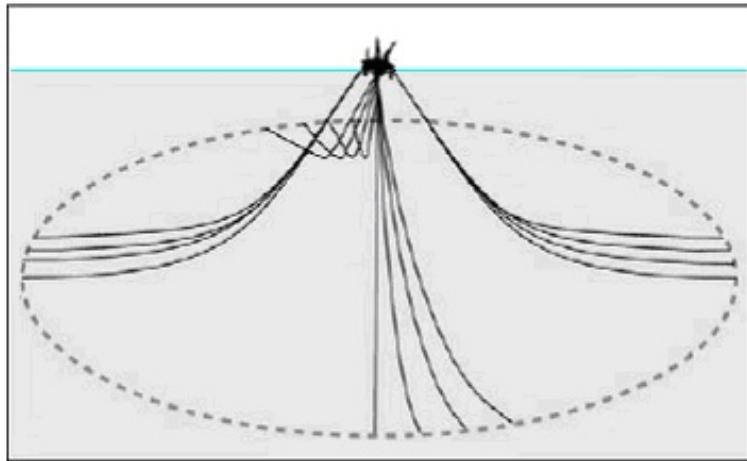
2.2.6 Sistem Tambat (*Mooring System*)

Sistem tambat (*mooring system*) pada struktur terapung lepas pantai seperti SPAR, TLP, Kapal dan lain-lain berfungsi untuk menjaga posisi struktur supaya tetap berada pada posisinya terhadap gaya-gaya yang bekerja seperti angin, arus dan gelombang ketika beroperasi. Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat pada SPAR berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) yang terdiri dari *catenary mooring* atau *taut mooring*. Sistem tambat pada umumnya terangkai dari sejumlah *lines* yang terbuat dari *chain*, kabel (*wire*), atau tali sintetik (*synthetic rope*). Bagian atas dari *mooring line* ini dipasang pada badan struktur terapung di titik-titik yang berbeda sedangkan bagian bawah *mooring line* nya ditambatkan ke dasar laut. Kabel-kabel *mooring* terangkai dari rantai baja (*steel chain*), tali ataupun kombinasi dari keduanya. Gaya tension yang terjadi pada kabel tergantung dari berat kabel, *property* elastisitasnya sendiri dan sistem tambatnya.

Tipe-tipe dari sistem tambat pada struktur bangunan apung lepas pantai utamanya SPAR adalah sebagai berikut :

- *Catenary Line Mooring*

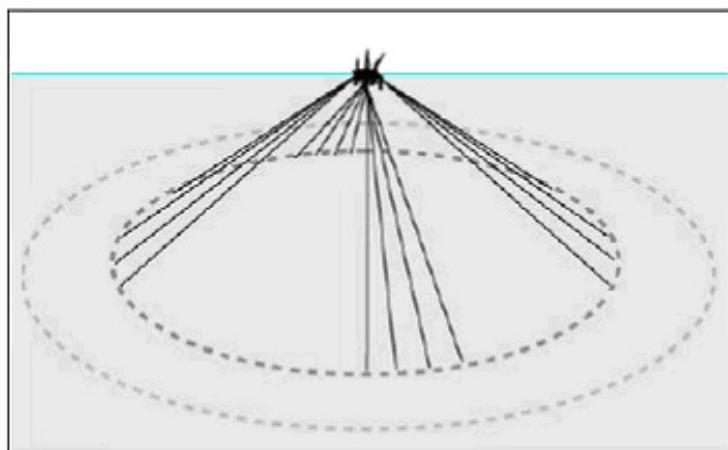
Merupakan sistem tambat pertama yang paling umum. Ketika berada di dasar laut posisi *mooring* horizontal sehingga pada *catenary mooring* ini jangkar hanya dikenakan beban horizontal. Pada catenary mooring, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri.



Gambar 2.7. Sistem tambat tipe *catenary* (Hammoutene, 2006)

- *Taut Mooring System*

Sistem tambat ini memiliki konfigurasi mooring lines dengan tali yang tegang. Perbedaan utamanya dengan *catenary mooring* adalah posisi *anchorleg*. *Taut mooring* ketika berada di dasar laut posisi *mooring* nya bersudut sehingga jangkar harus mampu menahan beban yang terjadi baik beban horizontal maupun vertikal. Pada *taut mooring*, gaya pengembali dihasilkan oleh berat *mooring lines* sendiri. Keuntungan dari *taut mooring* jika dibandingkan dengan *catenary mooring* adalah radius tambatannya lebih kecil.



Gambar 2.8. sistem tambat tipe *taut* (Hammoutene, 2006).

2.2.7 Teori Pemodelan

Dalam melakukan pemodelan suatu prototipe dengan skala kecil, terdapat tiga hal penting yang harus diperhatikan sehingga model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida dan interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, harus dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya (Munson, et al., 2009).

- Kesamaan geometri

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

$$\frac{l_p}{l_m} = \alpha \quad (2.24)$$

Dimana l_p dan l_m dua dimensi yang bersesuaian dari dua struktur yang dinamakan prototipe dan model, dan α merupakan rasio skala diantara keduanya. Jika seluruh bentuk dan dimensi (diameter, panjang, dll) dari suatu model sudah sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai λ .

- Kesamaan Kinematik

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

- Kesamaan Hidrodinamik

Hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh rasio dari gaya. Ada beberapa hukum skala dalam kesamaan hidrodinamik berdasarkan masalah interaksi struktur dengan fluida. Kesamaan dinamik antara model dan prototipe didapatkan dengan memenuhi hukum kesamaan tersebut. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut (Chakrabarti, 1994).

2.2.8 Hukum Model Froude

Bilangan froude didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium (Chakrabarti, 1994). Bilangan froude didefinisikan dengan persamaan,

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.25)$$

Model froude harus memenuhi hubungan,

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.26)$$

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

Tabel 2.1.a. *Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling*

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
<u>GEOMETRY</u>			
Length	L	λ	Any Characteristic dimension of the object
Area	L^2	λ^2	Surface area or projected area on a plane
Volume	L^3	λ^3	For any portion of the object
Angle	None	1	e.g., between members or solid angle

Tabel 2.1.a. Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (lanjutan)

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
Radius of Gyration	L	λ	Measured from a fixed point
Moment of Inertia Area	L^4	λ^4	
Moment of Inertia Mass	ML^2	λ^5	Taken about fixed point
Center of Gravity	L	λ	Measured from a reference point
KINEMATICS & DYNAMICS			
Time	T	$\lambda^{1/2}$	Same reference point (e.g., starting time) is considered as zero time
Acceleration	LT^2	1	Rate of change of velocity
Velocity	LT^1	$\lambda^{1/2}$	Rate of change of displacement
Displacement	L	λ	Position at rest is considered as zero
Spring Constant (Linear)	MT^2	λ^2	Force per unit length of extension
Damping Coefficient	MT^1	$\lambda^{5/2}$	Resistance (viscous) against oscillation
Damping Factor	None	1	Ration of damping and critical damping coefficient
Natural Period	T	$\lambda^{1/2}$	Period at which inertia force = restoring force
WAVE MECHANICS			
Wave Height	L	λ	Consecutive crest to trough distance
Wave Period	T	$\sqrt{\lambda}$	Time between two successive crests passing a point
Wave Length	L	λ	Distance between two successive crests at a given time
Particle Velocity	LT^1	$\sqrt{\lambda}$	Rate of change of movement of a water particle
Wave Elevation	L	λ	Form of wave (distance from still waterline)
Particle Acceleration	LT^2	1	Rate of change of velocity of a water particle
STABILITY			
Displacement (Volume)	L^3	λ^3	Volume of water moved by a submerged object (or part thereof)
Natural Period	T	$\sqrt{\lambda}$	Period of free oscillation in still water due to an initial disturbance

Tabel 2.1.a. Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in Mechanics Under Froude Scaling (lanjutan)

VARIABLE	UNIT	SCALE FACTOR	REMARKS
Metacenter	L	λ	Instantaneous center of rotation
Center of Buoyancy	L	λ	Distance of C.G. of displaced volume from a fixed point

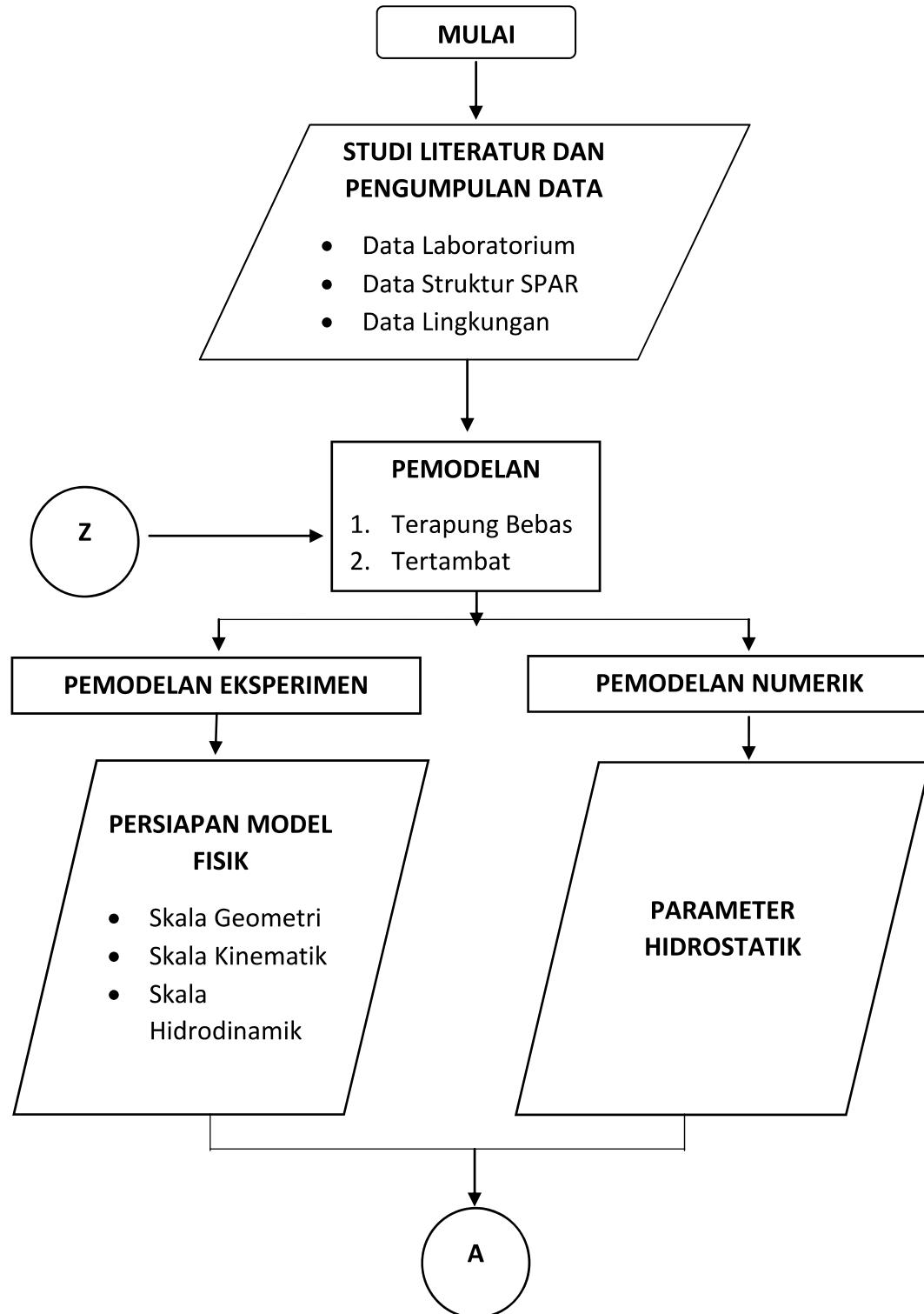
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

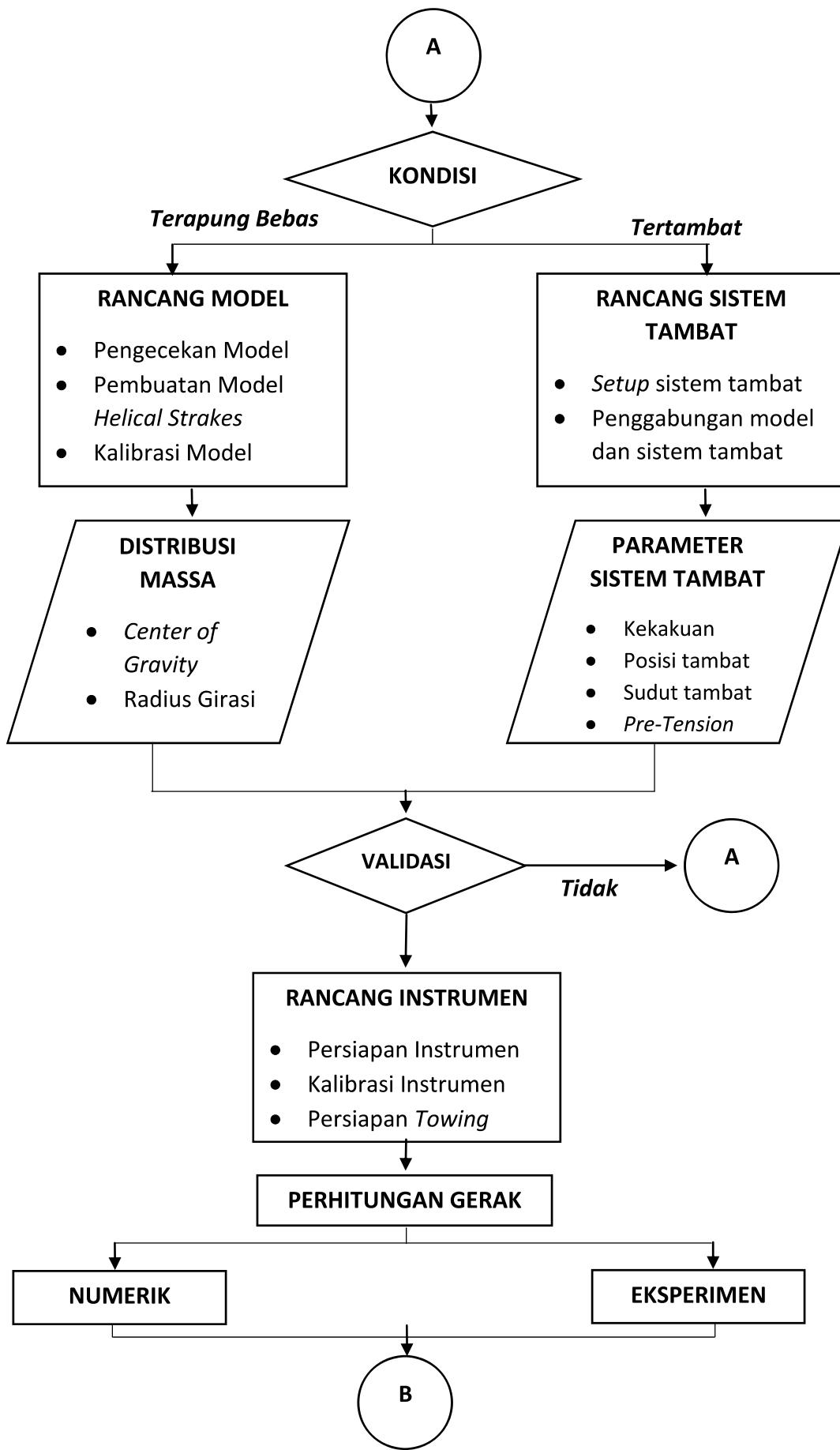
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR

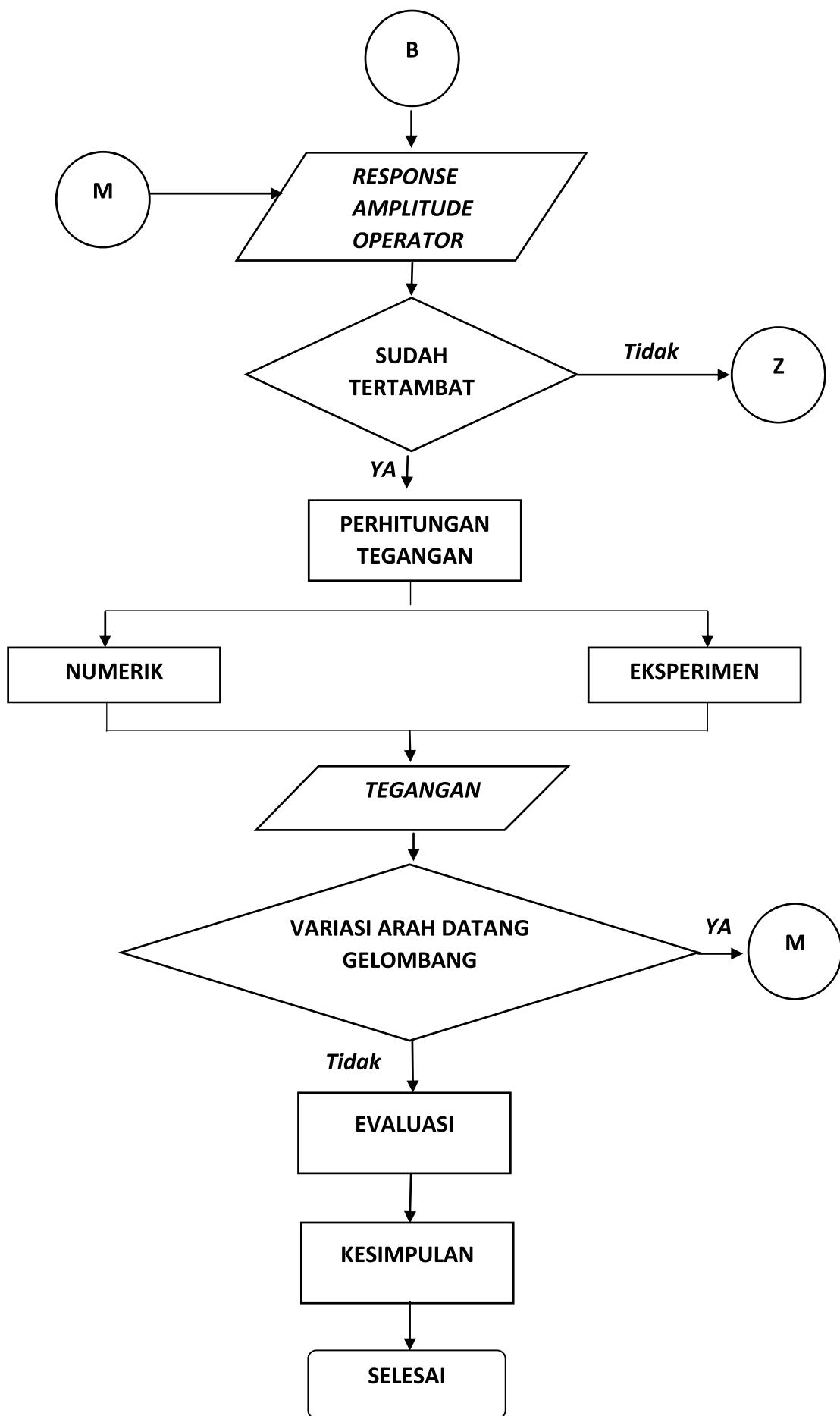
Diagram alir penggerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1. Diagram Alir Penggerjaan



Gambar 3.1. Diagram Alir Penggerjaan (lanjutan)



Gambar 3.1. Diagram Alir Penggerjaan (lanjutan)

3.2. PENJELASAN DIAGRAM ALIR

3.2.1 Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Data Small SPAR diambil dari Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995). Tabel 3.1.a. merupakan *principle dimension* dari Small SPAR, Tabel 3.1.b. merupakan distribusi massa Small SPAR, Tabel 3.1.c. merupakan data *Towink Tank* Laboratorium Hidrodinamika-FTK ITS, dan Tabel 3.1.d merupakan data Lingkungan.

Tabel 3.1.a. Data Small SPAR (Deep Oil Technology Inc., 1995).

<i>Description</i>	<i>Prototype</i>	<i>Unit</i>
<i>Hull</i>		
<i>Diameter</i>	16.00	m
<i>Draft</i>	135.03	m
<i>Length</i>	154.23	m
<i>Fairlead Depth</i>	12.74	m
<i>Deck</i>		
<i>Length</i>	50.29	m
<i>Width</i>	50.29	m
<i>Height</i>	19.57	m

Tabel 3.1.b. Data distribusi massa Small SPAR (Deep Oil Technology Inc., 1995).

<i>Description</i>	<i>Prototype</i>	<i>Unit</i>
<i>Mass Distribution</i>		
<i>Weight</i>	2653.16	Ton
<i>KG</i>	62.02	m
<i>Pitch Gyradius</i>	61.47	m
<i>Roll Gyradius</i>	61.47	m

Tabel 3.1.c Data *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS.

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Panjang	50	m
Lebar	3	m
Kedalaman (penuh)	2	m
Kedalaman (operasi)	1.8	m
Temperatur	27	°C
Jendela Observasi (<i>Toughned Glass</i>)	4	bahan

Tabel 3.1.d Data Lingkungan

Deskripsi	Kuantitas	Satuan
Kedalaman	750	m

3.2.2 Pemodelan Eksperimen dan Numerik.

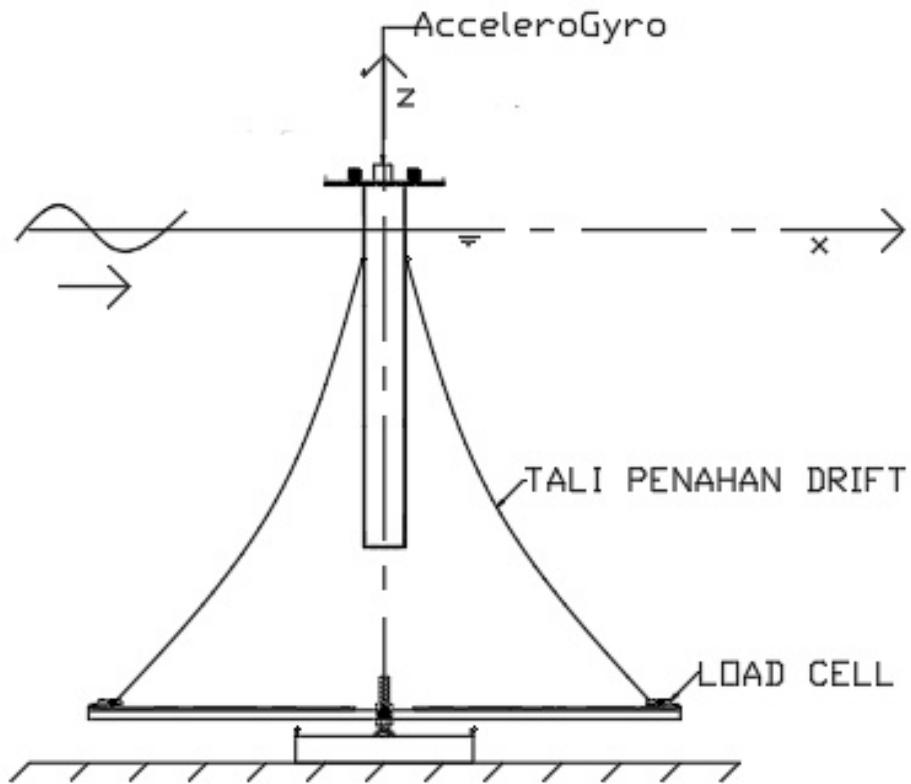
Langkah selanjutnya adalah pemodelan Small SPAR. Langkah ini terdiri dari dua kondisi pemodelan yaitu kondisi terapung bebas dan kondisi tertambat. Kedua kondisi tersebut nantinya akan dianalisis melalui pemodelan eksperimen dan numerik.

- Pemodelan Eksperimen

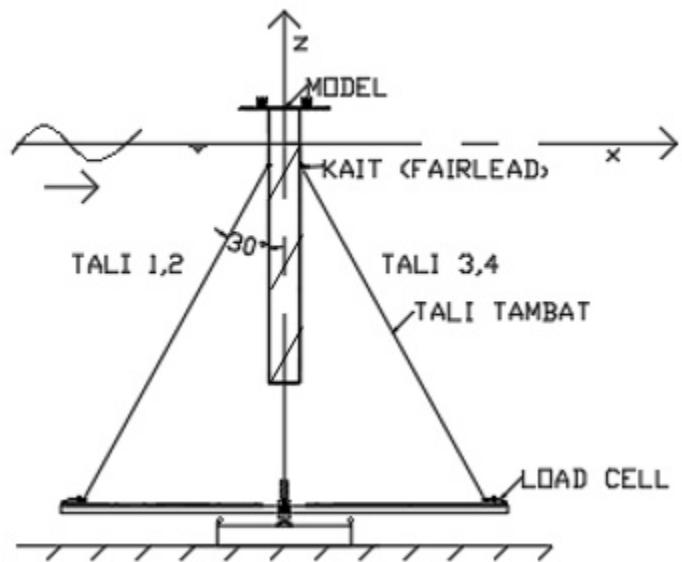
Pada pemodelan eksperimen terlebih dahulu dilakukan persiapan model fisik dari Small SPAR. Tahap ini meliputi penskalaan model dari segi geometri prototipe, kinematik, dan hidrodinamik sistem. Penskalaan Geometri dilakukan dengan menyesuaikan kondisi Laboratorium Hidrodinamika serta material model yang tersedia di pasaran. Selain itu pada tahap penskalaan hidrodinamik, digunakan Hukum Model Froude karena hanya terbatas memperhatikan gaya inersia dan gravitasi. Pada eksperimen ini model yang kami gunakan adalah model eksperimen dari Ivandito dkk (2017). Kemudian

setelah dilakukan pengecekan ulang maka dilanjutkan dengan penambahan *helical stakes* pada model tersebut.

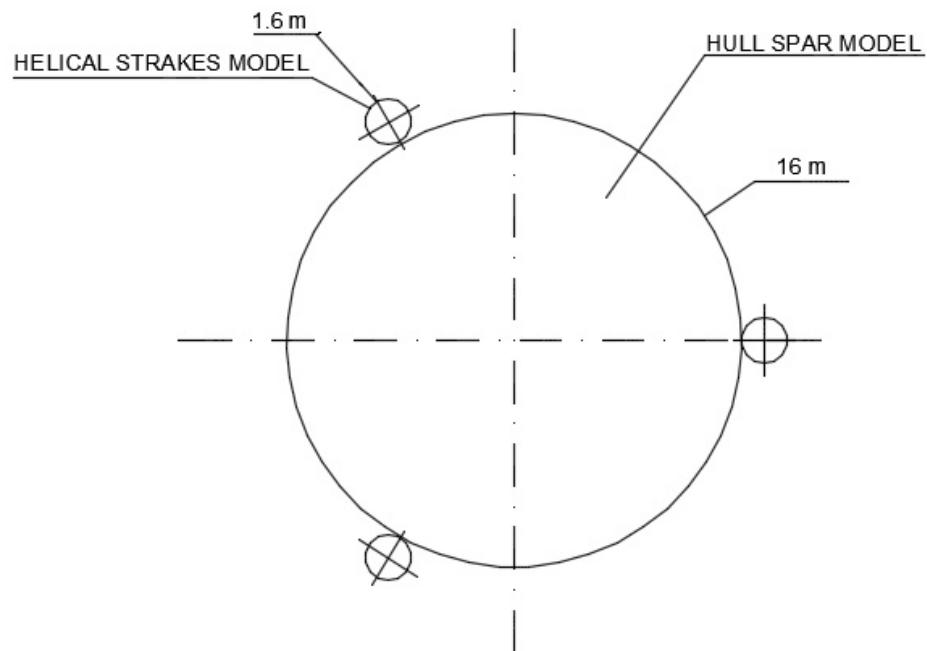
Helical Stakes dimodelkan dengan berbentuk silinder dengan diameter 0.1 dari diameter *hull SPAR*. Gambar set up model tanpa tali tambat dan dengan tali tambat dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3. Gambar tampak samping model dapat dilihat pada Gambar 3.5. Gambar model *helical stakes* dapat di lihat pada Gambar 3.4. Besar sudut antara *helical* dengan aksis silinder sebesar 60° , 3 *helic*, dan 1 *pitch helical*. Model ini bedasarkan rekomendasi dari Wilson dan Tinsley (1989) mengenai dimensi dari *helical stakes* tersebut.



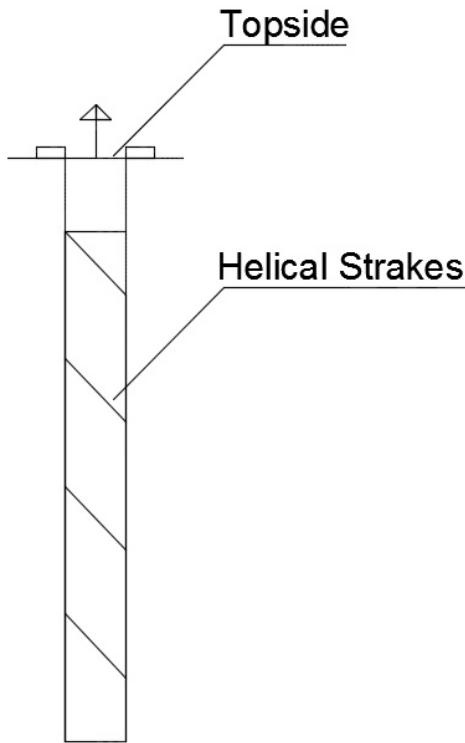
Gambar 3.2. Setup model tanpa tali tambat (*free floating*).



Gambar 3.3. Setup model dengan tali tambat (*mooring*).



Gambar 3.4. Permodelan model dengan *helical strakes* tampak atas



Gambar 3.5. Permodelan model dengan *helical strakes* tampak samping

Pada perhitungan eksperimen ini model ditinjau dalam 3 gerakan yaitu heave, pitch dan surge. Perhitungan 3 gerakan tersebut menggunakan *accelero+gyro*. Kemudian hasil perhitungan disajikan dalam bentuk grafik RAO gerakan

- Pemodelan Numerik

Model SPAR menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS dan kemudian di analisis menggunakan perangkat lunak ANSYS AQUA untuk mendapatkan output RAO.

3.2.3 Validasi Model

Pada tahap ini, model dikatakan valid jika *error* yang didapatkan pada pemodelan numerik dan eksperimen adalah tidak lebih dari 5% terhadap data acuan. Parameter-parameter yang perlu dilakukan validasi diantaranya:

- *Displacement*

- Titik pusat masa (*Centre of Gravity*) sumbu x (LCG), sumbu y (TCG) dan sumbu z (VCG)
- Jari-jari girasi sumbu x (R_x), sumbu y (R_y) dan sumbu z (R_z)
- Jari-jari metacenter melintang (BM_T)
- Jari-jari metacenter memanjang (BM_L)
- Tinggi metacenter melintang (GM_T)
- Tinggi metacenter memanjang (GM_L)

Pada uji eksperimen ini, data yang diperoleh adalah *displacement*, KG, Rx, dan Ry. Sehingga validasi hanya lakukan pada parameter-parameter tersebut.

3.2.4 Kalibrasi Model

Kalibrasi dilakukan untuk memenuhi parameter dimensi yang sudah disesuaikan dengan hasil pemodelan geometri. Jadi dari dalam pembuatan dan penggambaran model dilakukan kalibrasi terus menerus agar mendekati dengan model aslinya. Pada awalnya dimensi harus disesuaikan seperti panjang, lebar dan draft. Setelah itu baru distribusi massa dari model SPAR seperti COG dan radius girasi. Dan pada penelitian ini model dinyatakan valid / sesuai jika error yang terjadi kurang dari 5% dari model aslinya.

3.2.5 Rancang Sistem Tambat

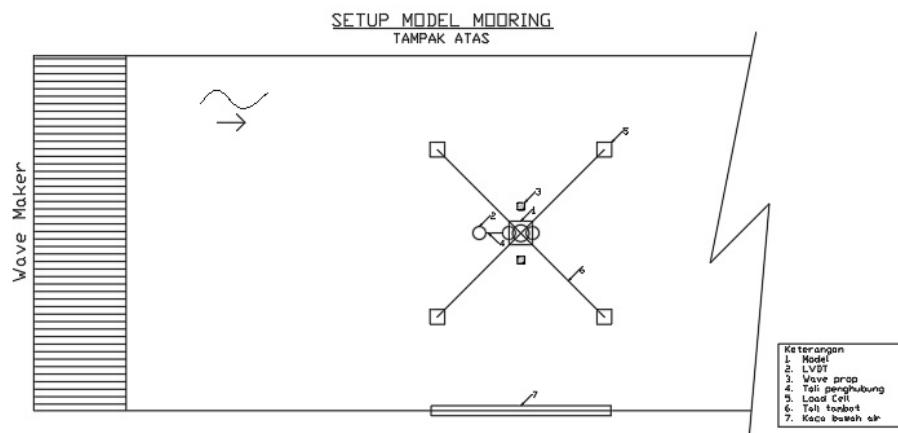
Pada tahap ini, dilakukan perancangan sistem tambat yang akan digunakan pada model SPAR sebelum dilakukan eksperimen di laboratorium hidrodinamika ITS. Gambar 3.6 dan Gambar 3.7 menunjukkan layout dari sistem tambat. Gambar 3.8 merupakan Tampak Samping, dan Gambar 3.9 merupakan Rencana Jangkar. Secara garis besar, tahap ini terdiri atas dua point utama yaitu setup sistem tambat dan penggabungan model dengan sistem tambat. Berikut ini merupakan penjelasan untuk tiap point utama yang dibahas.

- Setup sistem tambat

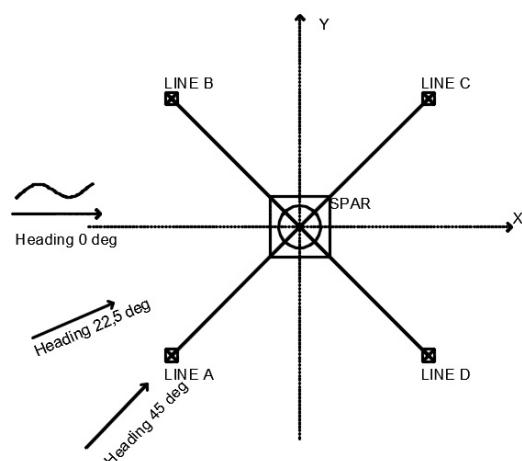
Sistem tambat yang digunakan pada model terdiri dari empat buah mooring line yang dihubungkan dengan menggunakan fairlead. Alat-alat yang diperlukan dalam setup sistem tambat ini antara lain :

1. *Mooring line* sebanyak 4 buah
2. Load Cell sebanyak 4 buah untuk pengukuran tegangan tali
3. Jangkar di dasar untuk peletakan load cell serta pengaturan sudut tali
4. *Fairlead* berupa kait untuk memasang mooring line di model SPAR yang akan diuji sebanyak 4 buah

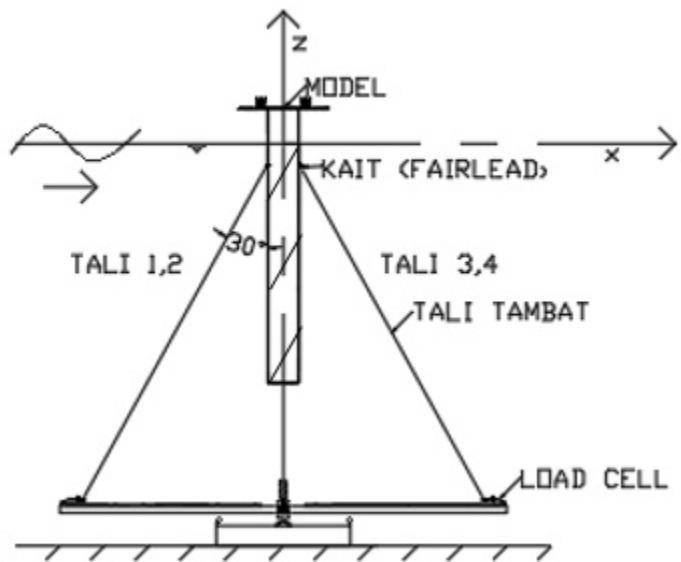
Berikut merupakan Gambar tampak atas dari setup model mooring yang akan diatur di laboratorium hidrodinamika ITS.



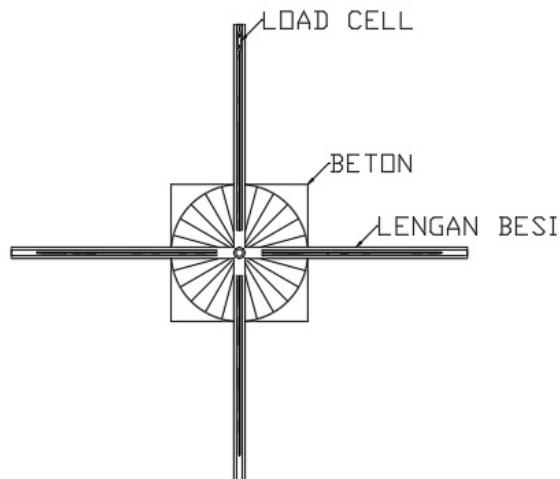
Gambar 3.6. Tampak Atas Rencana Sistem Tambat pada Eksperimen.



Gambar 3.7. Tampak Atas Rencana Sistem Tambat pada Eksperimen dengan variasi arah datang gelombang.



Gambar 3.8. Tampak Samping Rencana Sistem Tambar dan Model SPAR.



Gambar 3.9. Tampak Atas Rencana Jangkar.

3.2.6 Parameter Sistem Tambat

Pada tahap ini, parameter – parameter untuk sistem tambat yang digunakan pada model SPAR akan dijelaskan secara detail. Parameter sistem tambat yang digunakan antara lain kekakuan tali tambat, posisi tambat, sudut tambat dan pre-

tension tali tambat. Berikut ini adalah penjelasan dari tiap parameter sistem tambat yang digunakan.

- Kekakuan tali tambat

Kekakuan tali tambat tergantung dari karakteristik material tali tambat. Modulus elastisitas material mempengaruhi kekakuan tali tambat dan juga mempengaruhi periode natural struktur. Material yang memiliki kekakuan akan menyebabkan periode natural struktur menjadi semakin besar.

- Letak *Fairlead*

Fairlead menyambungkan *mooring line* dengan struktur terapung (model spar). Posisi *fairlead* pada model SPAR yang dibuat mengacu pada laporan *Joint Integrated Project* (1995), 12.74 m yaitu di bawah garis air.

- Sudut *Fairlead*

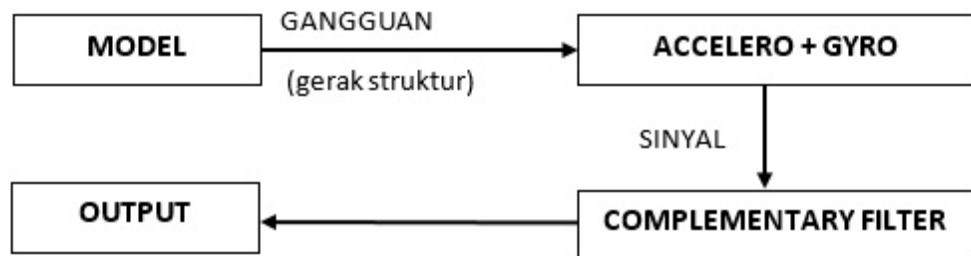
Sudut *fairlead* dari *mooring line* yang digunakan pada analisis model SPAR ini sebesar 30 derajat. Sudut ini merupakan sudut ketika tali tambat berada dalam keadaan *tension* (tegang).

- Jenis Sistem Tambat

Pada tugas akhir ini, jenis sistem tambat yang diteliti pada eksperimen yang dilakukan adalah sistem tambat *taut*.

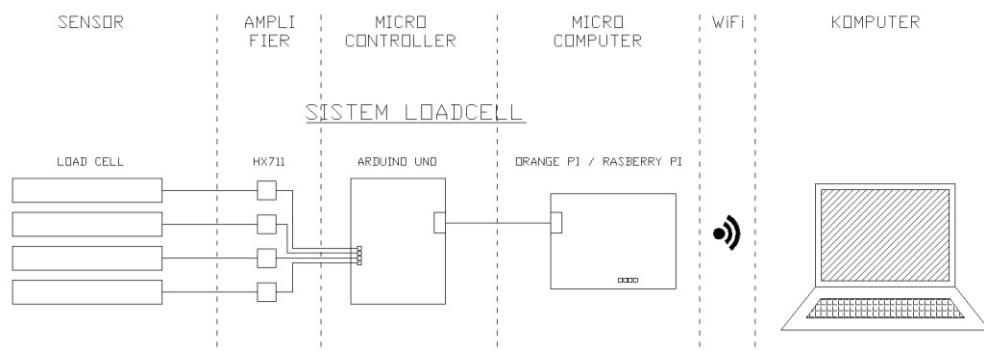
3.2.7 Instrumen Laboratorium

Pada tugas akhir ini, akan dilakukan eksperimen model Small SPAR yang akan diuji pada dua kondisi yaitu kondisi terapung bebas dan tertambat. Pada kondisi terapung bebas, akan dilakukan analisis respon berupa gerakan. Sedangkan pada kondisi tertambat, akan dilakukan analisis respon berupa gerakan dan tegangan tali. Untuk mengukur perubahan gerak yang terjadi pada model Small SPAR, terdapat dua opsi instrumen yang dapat digunakan yaitu sensor *accelero + gyro*. Sensor *accelero + gyro* akan mengeluarkan *output* berupa percepatan gerak linier benda pada sumbu x, y, dan z dan perubahan sudut. Mekanisme kerja *accelero gyro* dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Diagram Mekanisme Kerja Sensor *accelero + gyro*.

Selanjutnya pengukuran tegangan tali dilakukan dengan menggunakan load cell dengan diagram pengukuran seperti Gambar 3.11. Load Cell mengukur tegangan yang diberikan oleh tali. Perubahan tegangan tali ini akan memberi sinyal tegangan listrik. Tegangan listrik yang dihasilkan loadcell akan diperbesar menggunakan amplifier yang kemudian akan didigitalisasi menggunakan microcontroller yang kemudian akan berubah menjadi data digital di laptop.



Gambar 3.11. Diagram Metodologi Umum Eksperimen Bangunan Terapung

Image Processing digunakan untuk menangkap respon gerakan dari model. Image Processing mengukur displacement dari titik yang ditempelkan oleh tanda warna. Gambar 3.12 merupakan instrumen Image Processing.



Gambar 3.12. Instrumen Image Processing

Laboratorium yang digunakan untuk melakukan uji adalah Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Laboratorium Hidrodinamika tersebut mempunyai instrumen yang masih berfungsi dengan baik.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 PEMODELAN STRUKTUR

4.1.1 Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Solidwork dan ANSYS AQWA. Mula-mula model numeris dimodelkan di solid work. Setelah itu model dari solid work diimport ke ANSYS AQWA untuk mendapatkan RAO dan tegangan tali tambat. Pemodelan numeris dapat dilihat pada Gambar. 4.1, Gambar 4.2, dan Gambar 4.3.

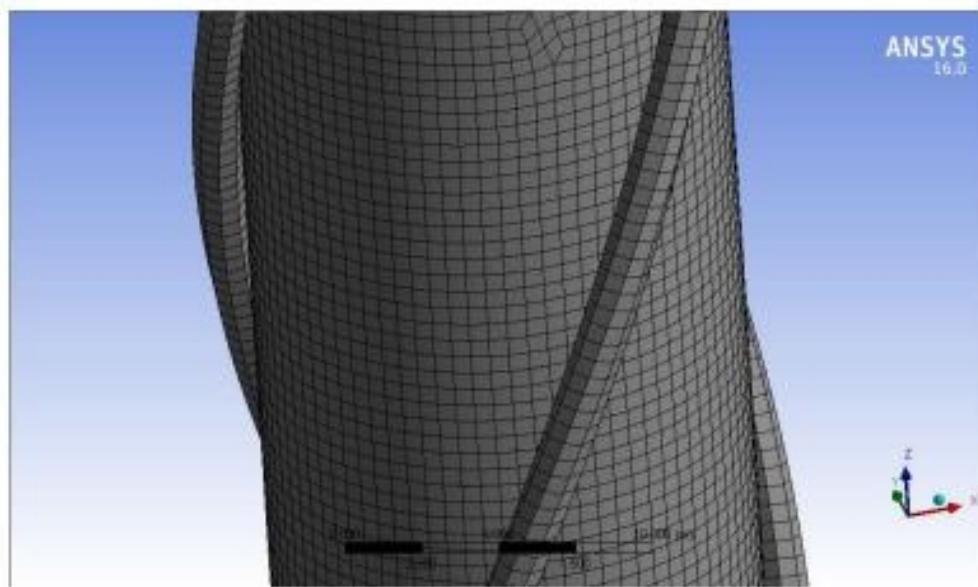
Pemodelan numerik disesuaikan dengan dimensi dari SPAR yang diambil dari data Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995) dengan tambahan piranti berupa *helical strakes*. Pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 merupakan dimensi Mini SPAR *Joint Industry Project* dan distribusi massa yang digunakan dalam pemodelan numerik.

Tabel 4.1 Data Dimensi Mini SPAR

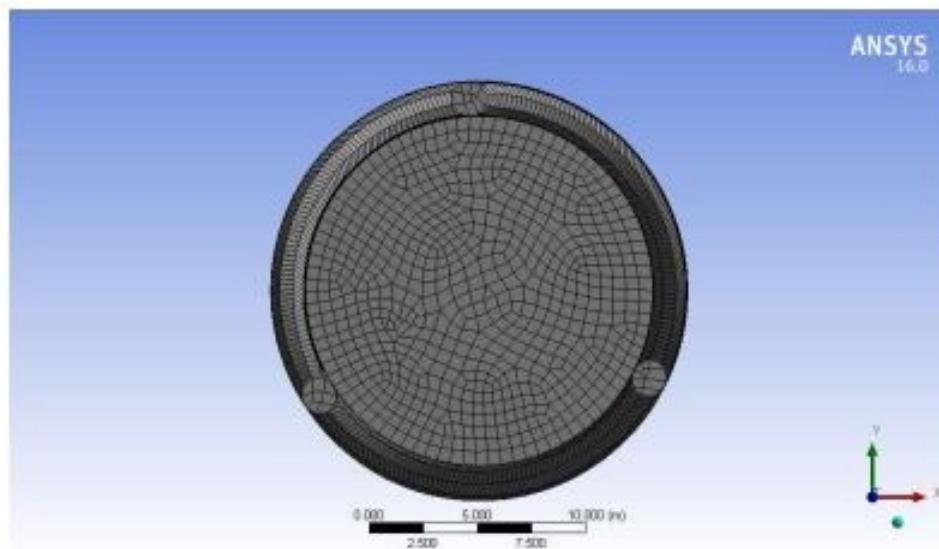
Deskripsi	Prototype
Diameter (m)	16.00
Sarat (m)	135.03
Tinggi (m)	154.23
Posisi <i>Fairlead</i> (m)	12.74
Panjang Geladak (m)	50.29
Lebar Geladak (m)	50.29

Tabel 4.2 Data Distribusi Massa Mini SPAR

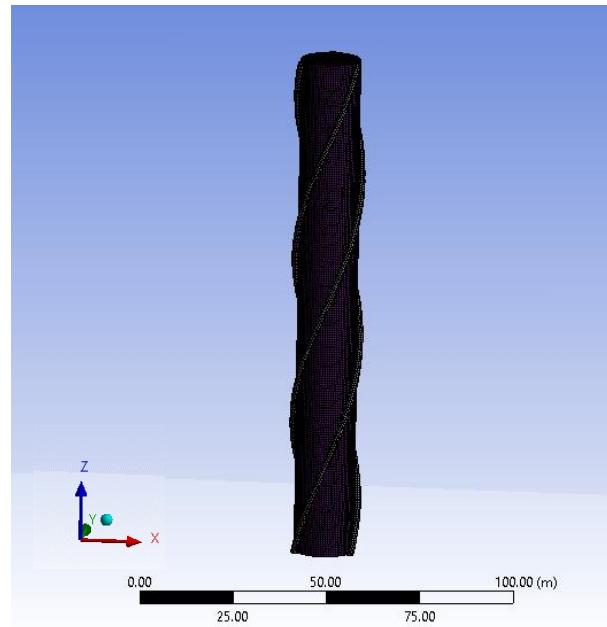
Deskripsi	Prototype
Massa Total (ton)	265315.2
Keel to Gravity (m)	62.02
Radius Girasi YY (m)	61.47
Radius Girasi XX (m)	61.47



Gambar 4.1 Meshing Model Pada Ansys Aqwa



Gambar 4.2 Meshing Model Tampak Atas



Gambar 4.3 Meshing Model Tampak Depan

4.1.2 Pemodelan Eksperimen

Dalam melakukan studi eksperimen, SPAR dimodelkan menggunakan skala 1:125. Proses penskalaan yang dilakukan mengikuti aturan Froude sesuai Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Penskalaan Model SPAR.

Deskripsi	Prototype	Faktor skala	Model
Massa (kg)	26531524.910 kg	λ^3	13.584 kg
Diameter (m)	16.000 m	λ	0.128 m
Sarat (m)	135.010 m	λ	1.080 m
Panjang (m)	154.210 m	λ	1.234 m
Keel to Gravity (m)	62.022 m	λ	0.496 m
Radius Girasi YY (m)	61.470 m	λ	0.492 m

Tabel 4.3 Hasil Penskalaan Model SPAR. (lanjutan)

Deskripsi	Prototype	Faktor skala	Model
Radius Girasi XX (m)	61.470 m	λ	0.492 m
Periode gelombang (s)	40, 35, 30, 25, 20, 10, 5.5 (s)	$\lambda^{1/2}$	3.6, 3.1, 2.7, 2.2, 1.8, 0.9, 0.5 (s)

Pipa yang digunakan sebagai lambung yaitu pipa PVC 5". Helical dimodelkan dengan pipa selang ukuran $\frac{1}{2}"$. Kemudian dipasang pada hull dengan lem. Setelah dimensi utama dari model fisik terpenuhi, distribusi massa dari model fisik juga dimodelkan. Distribusi massa dari SPAR terdapat pada Tabel 4.2.



Gambar 4.4 Tampak Model dengan *helical*

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan distribusi massa yang diinginkan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung massa total

Setiap material model yang digunakan ditimbang untuk mendapatkan massa total struktur. Proses menimbang material dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Kelautan, hasil penimbangan yang didapat ditampilkan pada Tabel 4.4

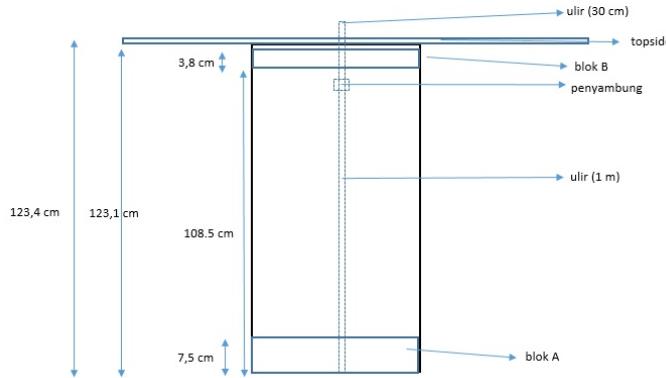
Tabel 4.4 Hasil Penimbangan Berat Material

Bagian		Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1	1628.49
	Ballast 2	2	1623.09	1	1623.09
	Ballast 3	2.5	2094.09	1	2094.09
	Ballast 4	1	663.59	1	663.59
	Cap	0.3	47.46	1	47.46
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1	2096.69
	Ballast 2	0.8	465.99	1	465.99
	Ballast 3	0.5	179.49	1	179.49
Topside		0.3	599.50	1	599.50
Tambahan	Ultrasonic (130 cm)		352.09	1	352.09
	Pipa	-	4087.53	1	4087.53
	Penyambung	-		1	0.00
	Helical Strakes		96.64	3	289.91
	Mur	-		2	0.00
Total					14127.93

2. Distribusi beban untuk pemenuhan jari-jari girasi

Material yang digunakan dihitung momen inersia massanya. Kemudian di gabungkan secara keseluruhan untuk mencari inersia massa total. Dari

momen inersia masa total yang didapat kemudian digunakan untuk menghitung jari-jari girasi model fisik. Gambar 4.5 merupakan sistem yang ada pada SPAR yang digunakan untuk mengatur distribusi massa SPAR.



Gambar 4.5 Desain Pemberat dan Ulir

Perhitungan dari setiap blok sebagai berikut:

a. Pipa PVC (Silinder Berongga)

Persamaan 4.1 merupakan persamaan momen inersia massa dari silinder berongga relatif terhadap pusat massanya.

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (6r^2 + l^2) \quad (4.1)$$

Tabel 4.5 Perhitungan Momen Inersia massa PVC

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
PVC	4087.53	5287070.00	5287070.00

b. Blok A (Lingkaran Pejal)

Blok A terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal. Persamaan 4.2 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari silinder pejal relatif terhadap pusat. Masing momen inersia silinder pejal pada blok A dihitung. Hasil perhitungan terlampir pada Tabel 4.6

$$I_{ox} = I_{oy} = \frac{1}{12} m (3r^2 + l^2) \quad (4.2)$$

Tabel 4.6 Perhitungan momen inersia massa Blok A

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 1</i>	1628.49	16446.05	16446.05
<i>Ballast 2</i>	1623.09	16391.52	16391.52
<i>Ballast 3</i>	2094.09	20624.60	20624.60
<i>Ballast 4</i>	663.59	6825.99	6825.99
<i>Cap</i>	47.46	471.32	471.32

c. Blok B (Lingkaran Pejal)

Blok B terdiri dari material-material yang berbentuk silinder pejal, sehingga persamaan yang digunakan sama dengan perhitungan blok A (Persamaan 4.2). Blok B hanya terdiri dari pemberat berbahan besi. Ukuran dan hasil perhitungan material-material di blok B terlampir di Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Perhitungan momen inersia massa Blok B.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
<i>Ballast 5</i>	2096.7	20748.49	20748.49
<i>Ballast 6</i>	465.99	4556.90	4556.90
<i>Ballast 7</i>	179.49	1756.57	1756.57

d. Topside

Topside terdiri dari geladak berbahan akrilik. Bentuk dari geladak merupakan balok dengan panjang 40 cm, lebar 40 cm dan tebal 0.3 cm. Persamaan 4.3 digunakan untuk menghitung momen inersia massa dari topside relatif terhadap pusat massanya. Perhitungan Momen inersia topside dapat dilihat pada Tabel 4.8.

$$I_{ox} = \frac{1}{12} m (l^2 + t^2) \quad (4.3a)$$

$$I_{oy} = \frac{1}{12} m (p^2 + t^2) \quad (4.3b)$$

Tabel 4.8 Perhitungan momen inersia massa *topside*.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Geladak	599.5	79937.8	79937.8

e. Ulir

Pemberat blok A dan blok B dimasukkan ke dalam ulir. Ulir merupakan baut yang berbentuk silinder pejal sehingga untuk menghitung momen inersia massanya dapat menggunakan persamaan 4.2. Hasil perhitungan momen inersia dari ulir ditampilkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Perhitungan momen inersia massa ulir.

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Ufir	352.09	495873.99	495873.99

f. *Helical Strakes*

Helical strakes terbuat dari selang plastik dengan panjang 117 cm. Hasil perhitungan momen inersia helical ditampilkan pada Tabel 4.10

Tabel 4.10 Perhitungan momen inersia helical

Komponen	Berat (g)	I_{ox} (g.cm ²)	I_{oy} (g.cm ²)
Helical 1	352.09	101469.2	101469.2
Helical 2	96.64	101469.2	101469.2
Helical 2	96.64	101469.2	101469.2

g. Momen inersia terhadap pusat masa

Setelah mencari momen inersia pada tiap-tiap komponen kemudian mencari momen inersia masa terhadap pusat masa. Langkah pertama adalah mencari COG dari model. Perhitungan COG model dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan pusat masa model pada Tabel 4.12

Tabel 4.11 Posisi COG setiap material

		Berat (g)	LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
Blok A	Cap	47.46	0.00	0.00	0.15
	Ballast 1	1628.5	0.00	0.00	6.50
	Ballast 2	1623.1	0.00	0.00	4.50
	Ballast 3	2094.1	0.00	0.00	3.0
	Ballast 4	663.59	0.00	0.00	1.25
Blok B	Ballast 5	2096.7	0.00	0.00	109.75
	Ballast 6	465.99	0.00	0.00	111.40
	Ballast 7	179.49	0.00	0.00	112.05
Tambahan	Topside	599.50	0.00	0.00	123.55
	Helical 1	96.64	0.00	0.00	54
	Helical 2	96.64	0.00	0.00	54
	Helical 3	96.64	0.00	0.00	54
	Ultr (130 cm)	352.09	0.00	0.00	65.30
PVC	PVC	4087.5	0.00	0.00	61.70
	Total	14127.93			

Tabel 4.12 Posisi COG model

LCG (cm)	TCG (cm)	VCG (cm)
0.00	0.00	49.11

Setelah didapatkan COG model langkah selanjutnya adalah mentabulasi momen inersia masa terhadap pusat masa. Setelah di dapatkan momen inersia terhadap pusat masa kemudian jari-jari girasi dihitung dengan persamaan 4.4. Hasil perhitungan momen inersia terhadap pusat masa dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan 4.14

$$Jari-jari girasi = \sqrt{\frac{Inersia massa total gerak yang ditinjau}{massa total model}} \quad (4.4)$$

Tabel 4.13 Perhitungan momen inersia terhadap pusat massa

Komponen	Berat (g)	I_x (g.cm ²)	I_y (g.cm ²)
TOTAL	14127.93	32835461.92	32835461.92

Tabel 4.14 Perhitungan jari-jari girasi

R _{xx} (cm)	R _{yy} (cm)
48.209	48.209

4.1.3 Pemodelan Tali Tambat

Tali tambat yang digunakan pada eksperimen mengacu pada tali tambat pada katalog dari Balmoral Marine (2010). Data tali tambat yang dijadikan acuan adalah data kekakuan *wire rope*. Tali kemudian akan dimodelkan dengan tali nilon seperti Gambar 4.6. Properties dari *wire rope* yang digunakan dijelaskan pada Tabel 4.15.

Tabel 4.15. Properti mooring line wire rope

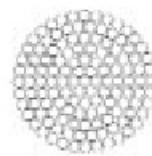
Diameter	115	Mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBF	11760	kN
Kekakuan	1175	MN

WIRE ROPE

ROPE SPECIFICATIONS

SPIRAL STRAND

4.34



- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations Wear design calculation - Corrosion design calculation

Wire rope dia Uncoated mm	Sheathed mm	Mass (unsheathed) Air kg/m	Mass (sheathed) Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m	Metallic Area mm ²	MBF kN	Stiffness MN	Torque 25% MBF Nm	Turns 25% MBF Nm
77	91	29	25	32	25	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	48	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	68	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1820	5100	0.3

All dimensions are approximate

Gambar 4.6 Katalog property wire rope

Kemudian tali tambat dimodelkan ke dimensi skala eksperimen. Properti tali nylon dapat dilihat pada Tabel 4.16.



Gambar 4.6. Bahan tali tambat

Tabel 4.16. Spesifikasi tali tambat eksperimen

Keterangan	Simbol	Model (Tali Nilon)	Satuan
Modulus elastisitas	E	2000000000	N/m ²
Diameter tali	D	0,62	Mm
Luas Tali	A	0,3019	mm ²
Panjang Tali	L	1,8	M

Kemudian, penskalaan dilakukan kembali pada senar pancing sesuai dengan skala model untuk mendapatkan spesifikasi tali tambat yang digunakan pada model fisik. Skala model yang digunakan adalah 1:125, maka dari hasil skala didapatkan properties tali tambat model numeris dijelaskan pada Tabel 4.17.

Tabel 4.27 Spesifikasi tali tambat model fisik skala penuh

Keterangan	Simbol	Model	Satuan
Modulus elastisitas	E	250000000000	N/m ²
Diameter tali	D	77,50	Mm
Luas Tali	A	4717,30	mm ²
Panjang Tali	L	225	M

Dari Tabel 4.17 di atas, kekakuan tali dapat dihitung dengan Persamaan 4.5.

$$K = E \times A$$

$$K = 250.000 \text{ MN/m}^2 \times 0,00472 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

$$K = 1179,32 \text{ MN}$$

Tabel 4.18. Perbandingan kekakuan *prototype* dengan data kekakuan *wire rope* acuan

Stiffness model asli (MN)	Stiffness wire rope acuan (MN)	Error (%)
1179,32	1175	0,37

Dari perbandingan kekakuan pada Tabel 4.18, didapatkan persentase error yang terjadi sebesar 0,37 % memenuhi syarat dari validasi (<5%). Sehingga untuk analisis eksperimen, dan numerik data properties tali tambat ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Data property tali tambat yang digunakan pada model fisik

	Model fisik	Prototype	Satuan
Length	1.8	225	m
Diameter	0,62	115	mm
Axial Stiffness (EA)	603,814	1,175,000,000	N
MBF	222,41	11,760,000	N

4.2 Validasi Model

4.2.1 Validasi Model Numerik

Model yang dibuat di Ansys AQWA dapat dilihat parameter hidrostatisnya dan distribusi massanya. Parameter ini yang akan digunakan untuk memvalidasi model fisik, sehingga bisa dilakukan analisis. Pada penelitian ini batas maksimum error yang diijinkan adalah 5 %. Tabel 4.20 menampilkan perbandingan antara model numerik dan data. Berdasar Tabel 4.20 maka model numerik yang dibuat di Ansys AQWA bisa dilanjutkan untuk analisis gerak dan tali tambat.

Tabel 4.20. Perbandingan dan validasi model numerik dengan data

	Prototype		Model Numerik		Error (%)
Diameter	16.00	m	16.00	M	0.00
Draft	135.03	m	131.78	M	2.40
Length	154.23	m	154.23	M	0.00
Fairlead depth	12.74	m	12.74	m	0.00
Weight	26531524.91	kg	26837614.91	kg	1.154
KG	62.03	m	62.03	m	0.00
Roll Gyrasi	61.48	m	59.26	m	3.61
Pitch Gyrasi	61.48	m	59.26	m	3.61

4.2.2 Validasi Model Eksperimen

Setalah melakukan proses perencanaan, model fisik yang sudah dibuat dilakukan validasi. Validasi diperlukan karena pada pembuatan, selain material utama yang dipakai, pada model juga terdapat material pendukung seperti lem, dempul, resin dan sebagainya. Proses ini dilakukan sebagai berikut:

1. Displacemen

Perhitungan displacemen dilakukan dengan melihat sarat yang dimiliki struktur ketika keadaan terapung. Berdasar pengamatan yang didapat sarat model fisik sesuai dengan Tabel 4.21. Dengan sarat dan diameter lambung yang diketahui, maka displacemen dapat dihitung sebagai perkalian antara volume tercelup dan massa jenis air, sehingga didapat displacement model sesuai Tabel 4.21.

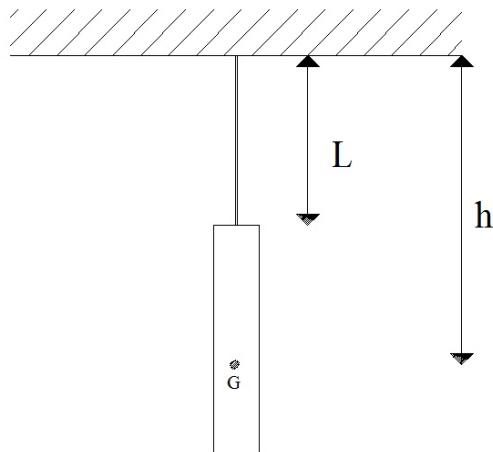
Tabel 4.21. Sarat dan displacement model fisik

Sarat Model fisik	105.4	Cm
Displacement Model	13.56	Kg

2. Jarak KG dan Jari-jari Girasi

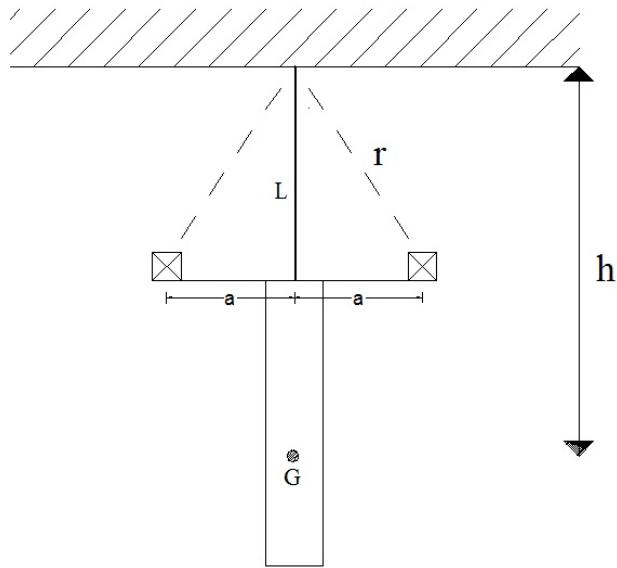
Jarak KG dan jari-jari girasi dihitung dengan menggunakan metode tes pendulum dengan mengayunkan model eksperimen. Tes pendulum dilakukan dengan 2 kondisi. Yaitu kondisi dengan massa tambahan dan tanpa massa tambahan.

- a. Kondisi ketika tidak ada massa tambah



Gambar 4.7 Skenario tes pendulum kondisi 1

- b. Kondisi ketika beban dikenai massa tambah



Gambar 4.8 Skenario tes pendulum kondisi 2

Pada Gambar 4.7 dan 4.8 diatas, model digantung menggunakan tali pada suatu tumpuan untuk mengetahui radius girasi gerak *pitch* dan *roll* dari model yang dinamakan dengan *pendulum test*. Dari uji validasi ini didapatkan periode/frekuensi gerak pendulum dari model yang digunakan dalam

perhitungan momen inersia massa dan radius girasi gerak *pitch* dan *roll* model. Simbol-simbol yang ada pada Gambar 4.7 dan 4.8 diatas adalah sebagai berikut :

- L merupakan panjang tali yang digunakan untuk mengikat model.
- h merupakan jarak titik berat model dari titik tumpuan.
- G merupakan titik berat dari model.

Tabel 4.22. Ukuran – ukuran yang digunakan pada pendulum test

NO.	BESARAN	BESAR	SATUAN
1.	Berat Model (m)	14.127	Kg
2.	Percepatan gravitasi (g)	9.81	m/s ²
3.	Jarak massa tambah (a)	0,1525	m (dari titik pusat model)
4.	Berat massa tambah (m)	1,552	Kg
5.	Panjang tali (L)	2.178	M
6.	Panjang tali terhadap jarak massa tambah (r)	2.115	M

Tes pendulum dilakukan sebanyak 50 kali.. Rata-rata periode yang didapat ditampilkan dalam Tabel 4.23.

Tabel 4.23. Periode dan frekuensi gerak pendulum model fisik kondisi 1 dan 2

1.	Periode gerak tanpa massa tambah (To)	3,4752	Detik
2.	Periode gerak dengan masa tambah (T ₁)	3,434	Detik
3.	Frekuensi tanpa massa tambah (ω_0)	1,812979	rad/s
4.	Frekuensi dengan massa tambah (ω_1)	1,829912	rad/s

Dari data-data pada Tabel 4.23 dapat ditentukan jarak dari titik tumpuan tali ke titik berat model (h) dengan menggunakan persamaan 4.6.

$$h = \frac{2m(r^2\omega_1^2 - Lg)}{\left[1 - \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_o^2}\right)^2\right]Mg} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{h = 2.900231 m}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat diketahui titik berat model adalah sebagai berikut :

$$KG = \text{panjang total (dari ujung tali sampai keel)} - h$$

$$KG = 341.2 \text{ cm} - 290,0231$$

$$KG = 51.17 \text{ cm dari keel}$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model fisik terhadap titik gantung dengan persamaan 4.7.

$$I_{44} = I_{55} = \frac{mgh}{\omega_o^2} \quad (4.7)$$

$$I_{44} = I_{55} = \mathbf{142.1579 kg \cdot m^2}$$

Kemudian dapat ditentukan momen inersia massa gerak *pitch* dan *roll* model relatif terhadap titik berat dengan Persamaan 4.8.

$$I_m = I - mh^2 \quad (4.8)$$

$$I_m = \mathbf{4.0127 kgm^2}$$

Nilai momen inersia yang diketahui dapat digunakan untuk mencari jari-jari girasi sesuai dengan Persamaan 4.9. Karena massa terdistribusi merata relatif terhadap sumbu z, maka radius girasi *pitch* dan *roll* adalah identik dengan nilai 49.461 cm.

$$\text{Radius girasi} = \sqrt{\frac{I_m}{m}} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{Radius girasi = 0,49461 m}$$

Tabel 4.24 menunjukkan perbandingan parameter model antara prototype, target dan model fisik. Model fisik valid apabila error yang terukur kurang dari 5%.

Tabel 4.24. Validasi model fisik

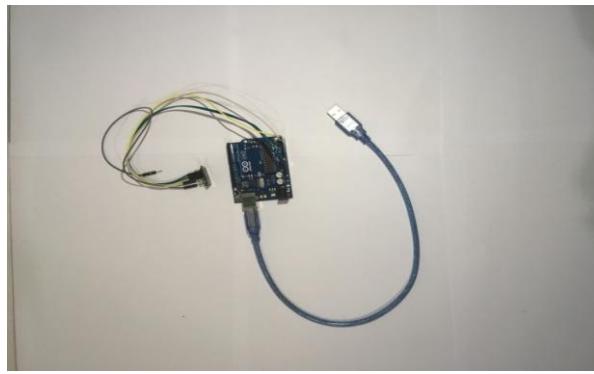
	Data		Konversi	Target		Achieved		Error
Diameter	16.00	m	125	12.80	cm	12.80	cm	0.0%
Draft	135.03	m	125	108.00	cm	105.4	cm	2.41 %
Length	154.23	m	125	123.4	cm	123.40	cm	0.0%
Fairlead Depth	12.74	m	125	10.2	cm	10.20	cm	0.0%
Weight	26531524.91	kg	1953125	13.58	kg	14.127	kg	4.027%
KG	62.03	m	125	49.6	cm	51.176	cm	3.17%
<i>Roll</i> Gyrasi	61.48	m	125	49.2	cm	49.46	cm	0.52%
<i>Pitch</i> Girasi	61.48	m	125	49.2	cm	49.46	cm	0.52%

4.3 INSTRUMEN PENGUKURAN

Pengukuran gerak model fisik menggunakan *gyroscope* dan *image processing*, sedangkan pengukuran tegangan tali menggunakan instrumen *loadcell*. Sebelum dilakukan pengukuran pada percobaan/ eksperimen, ketiga instrumen ini harus dilakukan kalibrasi.

4.3.1 Kalibrasi Gyroscope

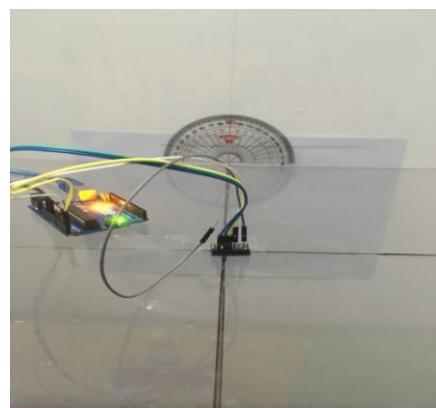
Kalibrasi *gyroscope* dilakukan untuk menyesuaikan nilai keluaran dari sensor dengan nilai sudut yang terjadi (Gambar 4.9, Gambar 4.10, dan Gambar 4.11). Angka yang perlu dilihat dari keluaran *gyroscope* adalah angka pada <FR> (*Filtered Roll*). Kalibrasi dilakukan dengan mengukur sudut 0°, 10°, 30°, 40°, 50°, dan 60° di atas meja dengan bantuan busur (Gambar 4.12). Proses ini dilakukan dengan dua arah pengukuran yaitu searah dan berlawanan jarum jam relatif terhadap *gyroscope*.



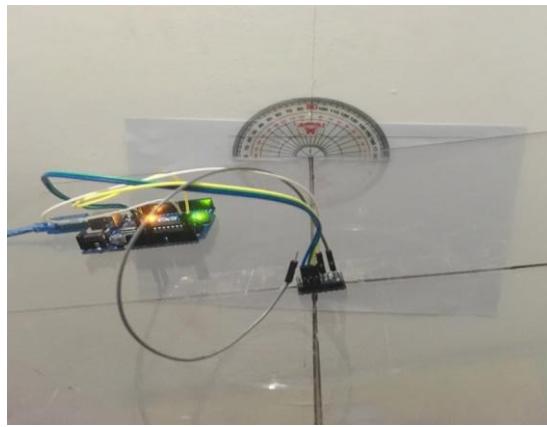
Gambar 4.9. Instrumen gyroscope



Gambar 4.10. Geladak dan busur



Gambar 4.11. Gyroscope pada geladak model fisik



Gambar 4.12. Gyroscope dan geladak saat proses kalibrasi

```
Angle of inclination in X axis = 358.74°  
Angle of inclination in X axis = 359.36°  
Angle of inclination in X axis = 359.82°  
Angle of inclination in X axis = 359.34°  
Angle of inclination in X axis = 359.27°  
Angle of inclination in X axis = 359.18°  
Angle of inclination in X axis = 0.29°  
Angle of inclination in X axis = 359.59°  
Angle of inclination in X axis = 0.17°  
Angle of inclination in X axis = 359.58°  
Angle of inclination in X axis = 359.87°  
Angle of inclination in X axis = 0.20°  
Angle of inclination in X axis = 0.18°  
Angle of inclination in X axis = 0.33°  
Angle of inclination in X axis = 359.77°  
Angle of inclination in X axis = 359.86°  
Angle of inclination in X axis = 359.62°  
Angle of inclination in X axis = 359.12°
```

Gambar 4.13. Keluaran Arduino pada sudut 0° searah jarum jam

Gambar 4.13 merupakan tampilan output di komputer. Tabel 4.25 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran gyroscope saat gyroscope diputar searah jarum jam. Tabel 4.26 menunjukkan sudut yang dibuat dengan hasil keluaran gyroscope diputar berlawanan arah jarum jam.

Tabel 4.25. Kalibrasi searah jarum jam

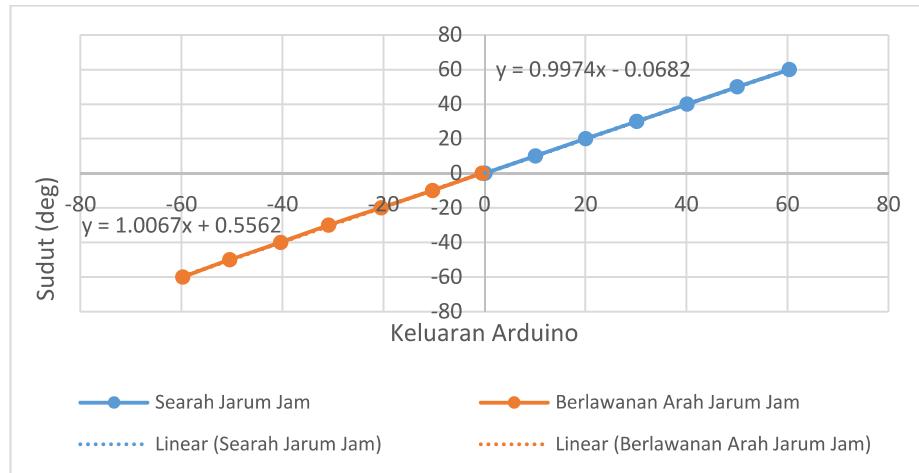
Sudut (deg)	Keluaran Gyroscope (satuan)
0°	0.13
10°	10.11
20°	20.05
30°	30.17
40°	40.13
50°	50.06
60°	60.38

Tabel 4.26. Kalibrasi berlawanan jarum jam

Sudut (deg)	Output Giro (satuan)
-0°	-0.45
-10°	-10.26
-20°	-20.42
-30°	-30.85
-40°	-40.33
-50°	-50.42
-60°	-59.73

Tabel 4.25 dan Tabel 4.26 dapat dibuat grafik seperti Gambar 4.14. Berdasarkan hasil kalibrasi *gyroscope* yang dilakukan, keluaran yang dihasilkan oleh Arduino mempunyai persamaan sesuai Tabel 4.27. Kalibrasi dilakukan antara sudut 0° hingga 60° searah dan berlawanan arah jarum jam karena gerakan SPAR diasumsikan tidak akan bergerak *pitch* lebih dari 60°. Keluaran yang dihasilkan memiliki hubungan secara linier yang dapat

disimpulkan bahwa sensor terkalibrasi untuk digunakan pada studi eksperimen kali ini.



Gambar 4.14. Keluaran Arduino dengan sudut yang dibentuk

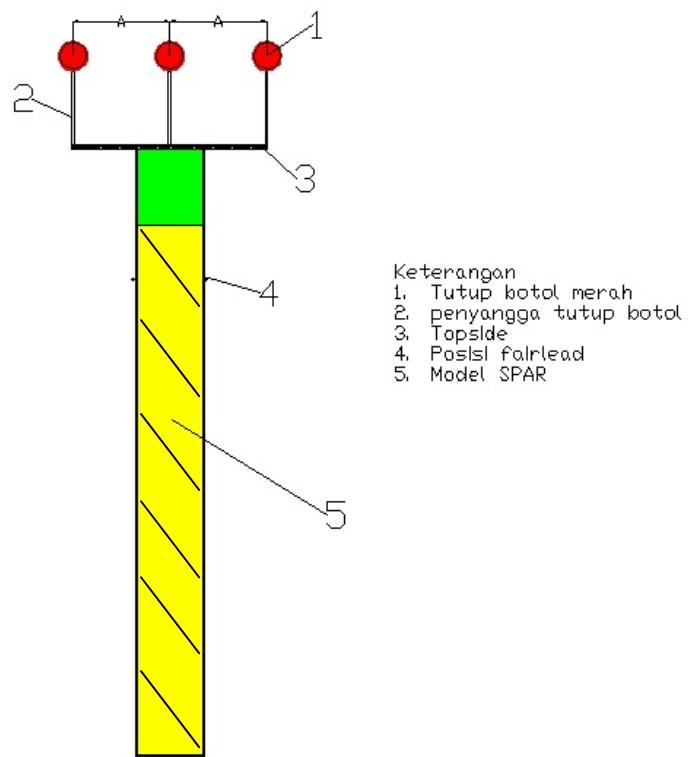
Tabel 4.27. Persamaan *trendline* Arduino

Searah Jarum Jam	$y=0.997x-0.068$
Berlawanan Arah Jarum Jam	$y=1.006x+0.556$

4.3.2 Kalibrasi Image Processing

Digital image processing merupakan proses pengambilan atribut-atribut pada Gambar yang telah di ambil dengan suatu kamera. Pada penelitian ini, dipasang tiga buah bola berwarna merah pada model fisik yang terapung di air yang digunakan untuk merekam gerak pada objek (Gambar 4.15 dan Gambar 4.17). Warna merah dipilih untuk mendapatkan kontras warna pada Gambar yang direkam (Gambar 4.16). Selain itu bentuk lingkaran juga lebih mudah dibedakan oleh program. Objek yang ditinjau adalah bola berwarna merah yang berada di titik pusat model sedangkan bola yang diletakkan di ujung model digunakan untuk perhitungan skala *pixel* dan validasi data yang dihasilkan. Proses *image processing* ini dilakukan dengan menggunakan satu buah kamera webcam logitech c270 yang merekam gambar kemudian diolah

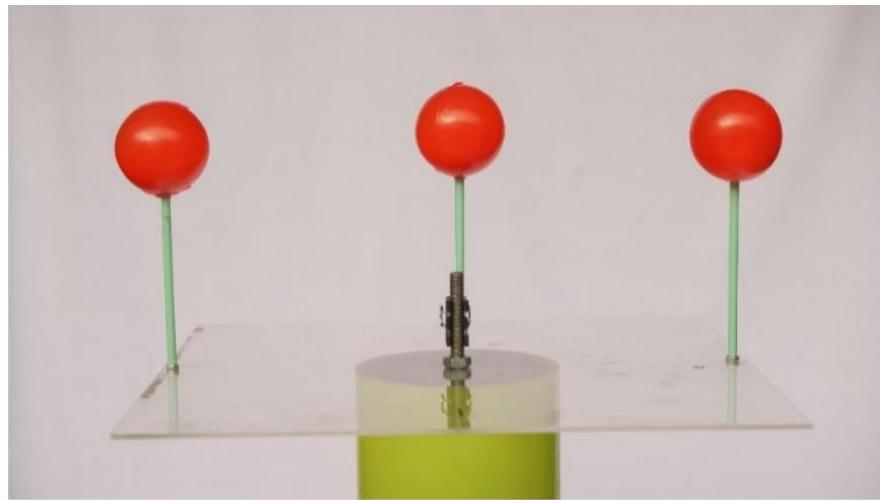
menggunakan bantuan perangkat lunak visual basic C++ (Gambar 4.16 dan Gambar 18)



Gambar 4.15. Sketsa model fisik dalam *Image Processing*.



Gambar 4.16. Kamera dan bola yang ditinjau.

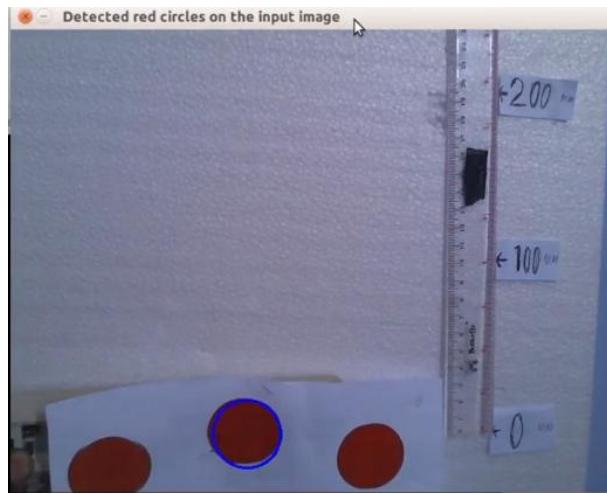


Gambar 4.17. Konfigurasi geladak dengan objek yang ditinjau.



Gambar 4.18. Webcam Logitech c270 dengan lensa *fixed focus*.

Proses kalibrasi *image processing* dilakukan dengan cara merekam kertas yang diberi Gambar lingkaran berwarna merah. Pada proses kalibrasi kertas tersebut di gerakkan ke atas dan ke kanan sesuai dengan ukuran penggaris yang telah di siapkan dalam proses kalibrasi. Kemudian dilihat pada keluaran computer yang telah menangkap perpindahan dari objek lingkaran berwarna merah yang ditinjau. Proses kalibrasi dan hasil yang dikeluarkan dari instrumen *image processing* dapat dilihat pada Gambar 4.19 dan 4. 20.



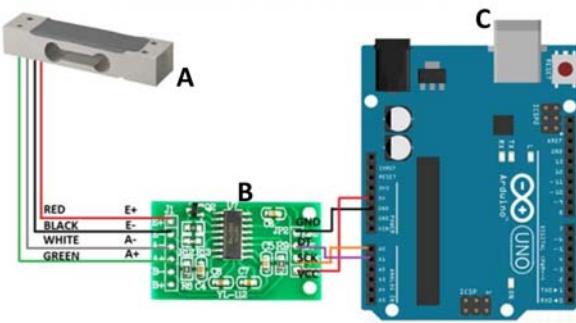
Gambar 4.19. Proses kalibrasi *image processing*

```
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 3 mm || y = 2 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 3 mm || y = 2 mm ||
= 1 mm || y = 2 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 2 mm || y = 1 mm ||
= 2 mm || y = 1 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 1 mm || y = 0 mm ||
= 1 mm || y = 1 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 1 mm || y = 1 mm ||
= 1 mm || y = 1 mm ||
= 3 mm || y = 2 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 2 mm || y = 2 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 1 mm || y = 1 mm ||
= 1 mm || y = 1 mm ||
= 3 mm || y = 3 mm ||
= 1 mm || y = 1 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
= 0 mm || y = 0 mm ||
```

Gambar 4.20. Keluaran dari proses kalibrasi *image processing*

4.3.3 Kalibrasi *Load cell*

Tegangan tali diukur menggunakan instrumen *Load cell*. Instrumen ini memanfaatkan *strain-gauge* yang terpasang pada *load cell*. Jika *load cell* mengalami tarikan maka *strain-gauge* akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini akan menghasilkan perubahan tegangan listrik. Tegangan yang sudah diamplifikasi akan diterima oleh *microcontroller* Arduino UNO untuk kemudian ditransfer ke laptop (Gambar 4.21).



Gambar 4.21. Konfigurasi *Load cell* (A), HX711 (B) dan Arduino UNO (C) (Lay ad Circuit, 2010)

Kalibrasi dilakukan dengan menimbang beberapa beban terukur sehingga dapat dicari regresi linear dari nilai-nilai yang keluar. Pada kalibrasi ini digunakan 5 buah beban, 1000 gram, 500 gram, 200 gram, 100 gram dan 50 gram (Gambar 4.22). Beban yang digunakan untuk pengukuran merupakan besi timbangan yang ada dipasaran.

Besi timbangan ditali dan digantungkan di sisi pengukuran *load cell*. Pada layar akan terlihat keluaran angka. Kemudian, setelah diberikan beban, angka yang muncul tersebut diolah untuk dicari regresi linear kalibrasi *load cell*. Setiap *load cell* akan diuji 2 kali untuk menemukan persamaan regresi linear dari setiap *load cell*.



Gambar 4.22. Beban Kalibrasi 1000 g (A), 500 g (B), 200 g (C), 100 g (D) dan 50 g (E)

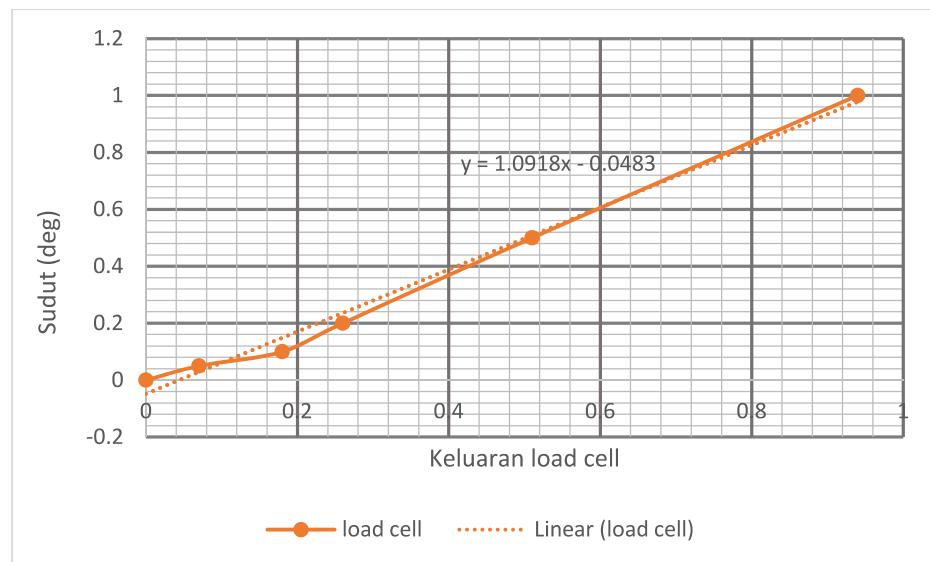
Data yang ditunjukkan dari proses kalibrasi dengan 5 timbangan pada setiap *load cell* dengan 2 percobaan yang berbeda.

- *Load cell 1*

Data pada Tabel 4.28 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.24. Gambar 4.24 menunjukkan *Load cell 1* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.28. Data kalibrasi *load cell 1* percobaan 1

Beban (kg)	Output Percobaan
1	0.94
0,5	0.51
0,2	0.26
0,1	0.18
0,05	0.07
0	0



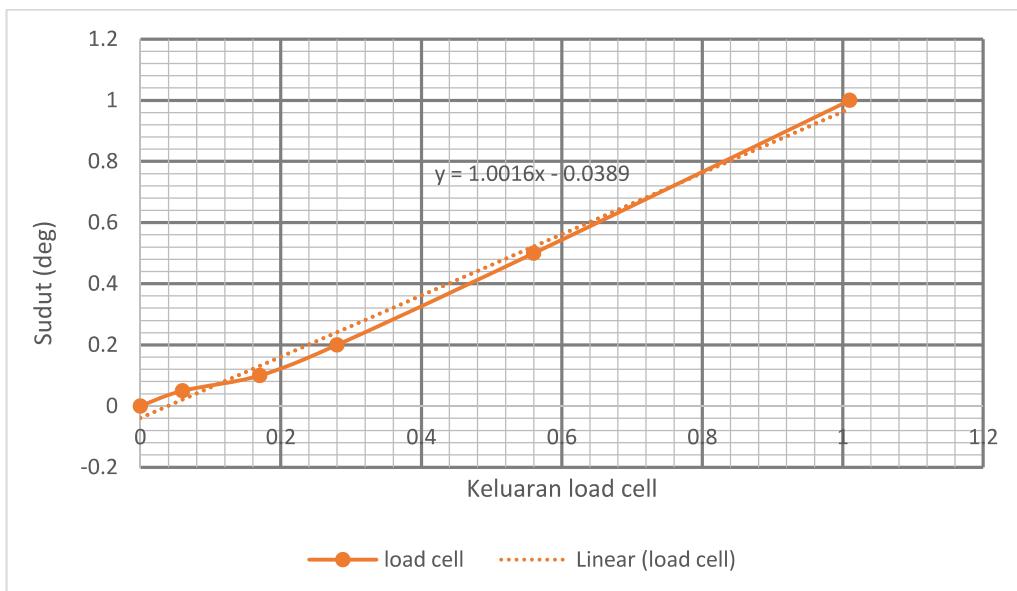
Gambar 4.24. Grafik kalibrasi Load cell 1

- *Load cell 2*

Data pada Tabel 4.29 kemudian di-*plot* menjadi Gambar 4.25. Gambar 4.25 menunjukkan *Load cell 2* mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.29. Data kalibrasi *load cell* 2

Beban (kg)	Output Percobaan
1	1.01
0.5	0.56
0.25	0.28
0.1	0.17
0.05	0.06
0	0



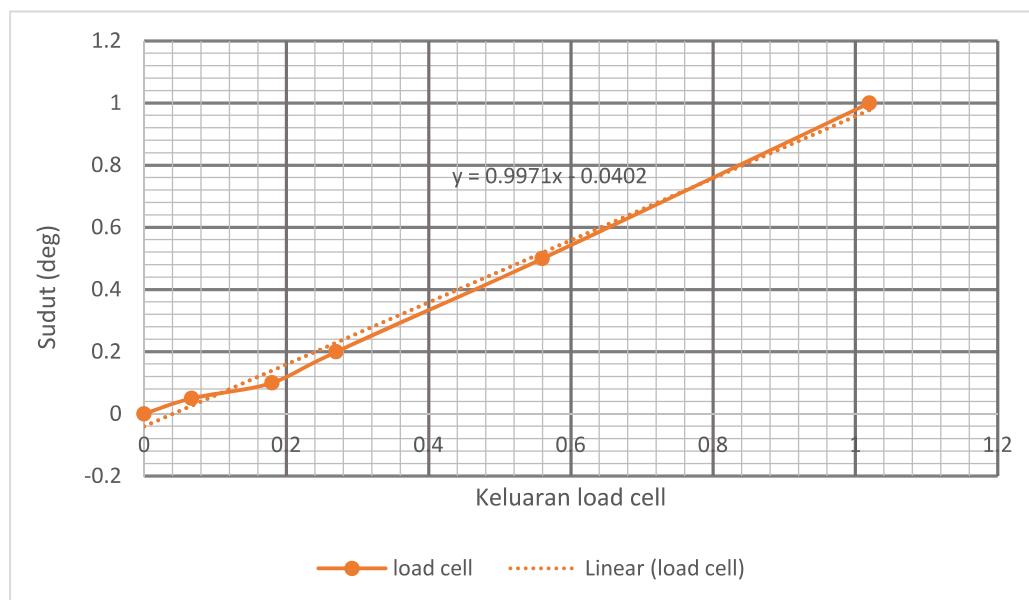
Gambar 4.25. Grafik kalibrasi *Load cell* 2

- *Load cell 3*

Data pada Tabel 4.30 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.26. Gambar 4.26 menunjukkan *Load cell* 3 mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearinya.

Tabel 4.30. Data kalibrasi *load cell* 3

Beban (kg)	Output Percobaan
1	1.02
0.5	0.56
0.25	0.27
0.1	0.18
0.05	0.067
0	0



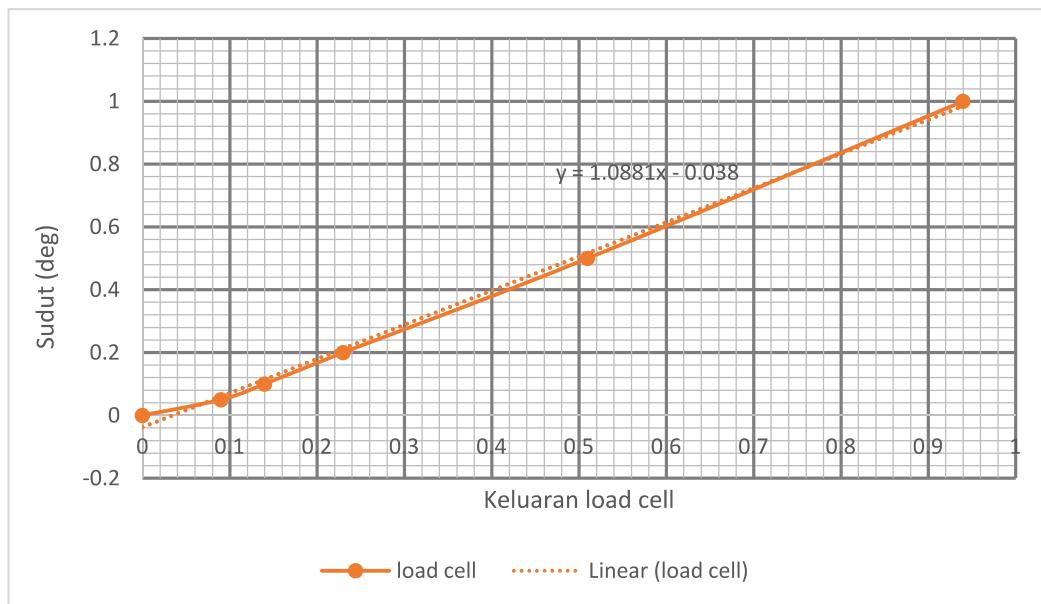
Gambar 4.26. Grafik kalibrasi *Load cell* 3

- *Load cell* 4

Data pada Tabel 4.31 kemudian di-plot menjadi Gambar 4.27. Gambar 4.27 menunjukkan *Load cell* 4 mempunyai persamaan linier sehingga bisa digunakan dengan koreksi berdasar persamaan regresi linearnya.

Tabel 4.31. Data kalibrasi *load cell* 4

Beban (kg)	Output Percobaan
1	0.97
0.5	0.51
0.25	0.23
0.1	0.14
0.05	0.09
0	0



Gambar 4.27. Grafik kalibrasi *Load cell* 4

Persamaan yang digunakan untuk mengkalibrasi keluaran *load cell* ditampilkan dalam Tabel 4.32.

Tabel 4.32. Persamaan Kalibrasi Keluaran *Load cell* dengan Beban

LOAD CELL 1	$y = 1.09x - 0.04$
LOAD CELL 2	$y = 1.00x - 0.04$
LOAD CELL 3	$y = 0.99x - 0.04$
LOAD CELL 4	$y = 1.09x - 0.04$

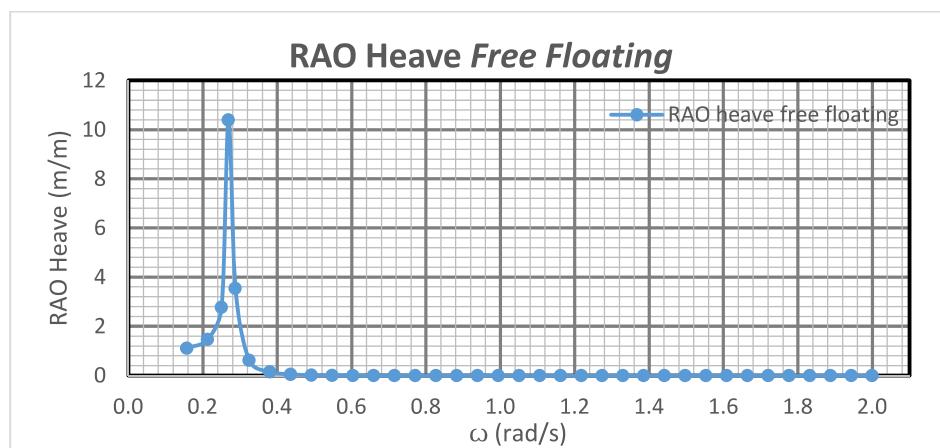
4.4 RAO TERAPUNG BEBAS

4.4.1 Metode Numeris Kondisi Terapung Bebas

Perhitungan numeris dari respon gerak bangunan apung pada kondisi terapung bebas (*free floating*) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA.

4.4.1.1 Mode Gerak *Heave*

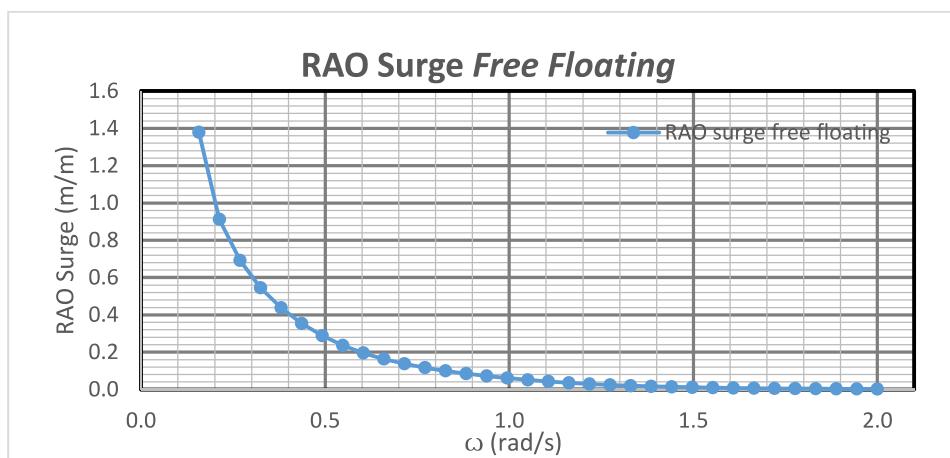
RAO pada mode gerak *heave* dari SPAR ditampilkan pada Gambar 4.28 .



Gambar 4.28 Grafik RAO *free floating* gerakan *heave*

4.4.1.2 Mode Gerak *Surge*

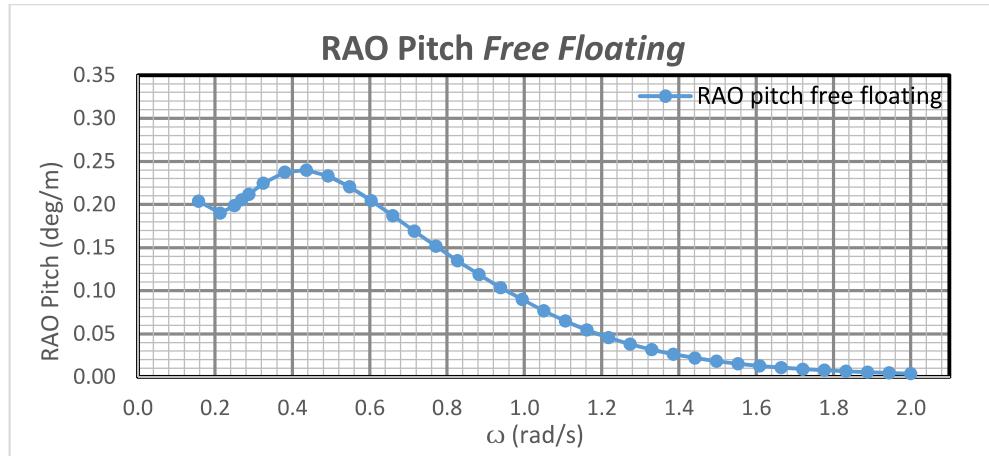
RAO pada mode gerak *surge* dari SPAR ditampilkan pada Gambar 4.29.



Gambar 4.29 Grafik RAO *free floating* gerakan *surge*

4.4.1.3 Mode Gerak *Pitch*

RAO pada mode gerak *pitch* dari SPAR ditampilkan pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Grafik RAO *free floating* gerakan *pitch*

4.4.2 Metode Eksperimen Kondisi Terapung Bebas

Analisis eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model eksperimen SPAR diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalaman 1.8 dan lebar 3 m.

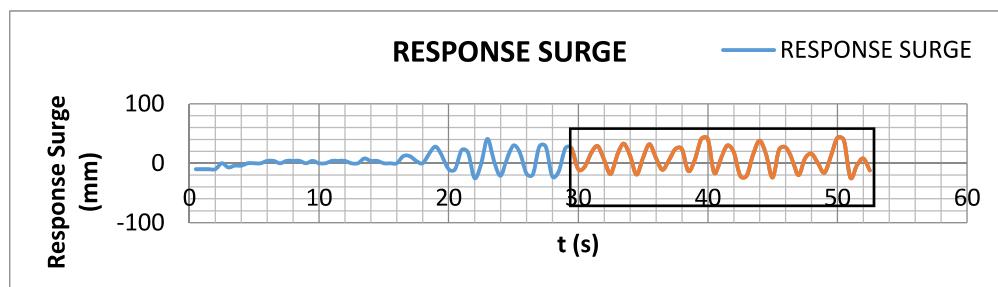
Model akan dikenai gelombang yang berasal dari wave maker. Model akan dikenai tujuh gelombang dengan karakteristik seperti pada Tabel 4.33. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, tinggi gelombang konstan yaitu 5 cm.

Tabel 4.33. Periode lingkungan dan periode eksperimen

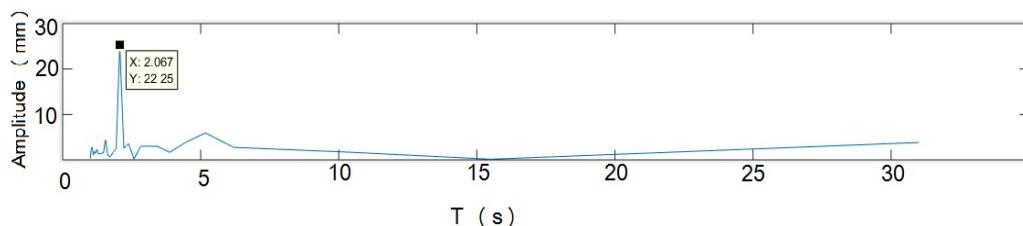
No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	FF1a	40	3.6	2.5
2	FF1b	29.5072	2.6	
3	FF1c	23.3754	2.1	
4	FF1d	19.3573	1.7	
5	FF1e	14.4009	1.3	
6	FF1f	12.7665	1.1	
7	FF1g	5.6789	0.5	

1. Mode Gerak Surge

Setiap time history pada gerak *surge* dianalisis tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisis dilakukan dengan cara FFT respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. FFT dilakukan dengan bantuan *software* Matlab. Dalam analisis FFT dicocokan pula periode respon yang terjadi dengan periode gelombang Nilai puncak harus berada pada periode yang dirunning. Contoh *time history* dan FFT pada gerakan *surge* dapat dilihat pada Gambar 4.31 dan 4.32. Gambar 4.31 dan Gambar 4.32 merupakan contoh *time history* dan FFT gerakan *surge* yang dirunning pada periode 2.1 detik. Hasil respon gerak dan RAO dapat dilihat pada Tabel 4. 34.



Gambar 4.31. *Time history* instrumen *image processing* untuk gerakan *surge*



Gambar 4.32. FFT gerakan *surge* free floating

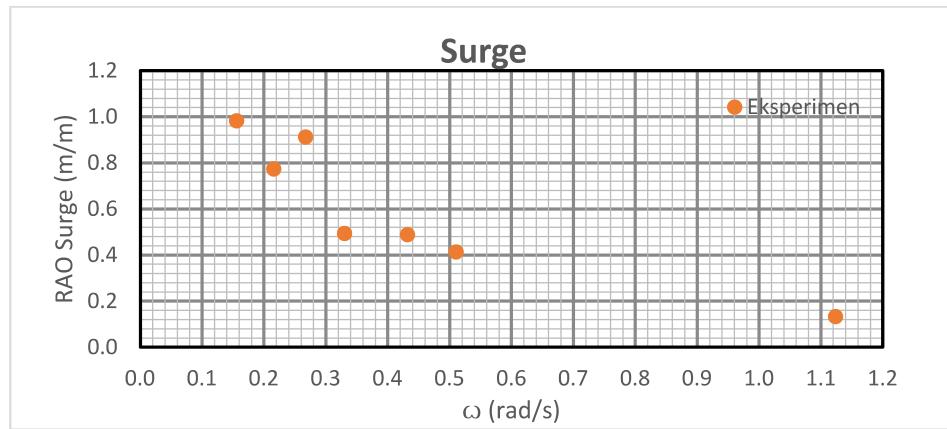
Tabel 4.34. Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (mm)	RAO (mm/mm)
1	FF1a	3.6	24.56	0.9823
2	FF1b	2.6	19.833	0.7734
3	FF1c	2.1	22.25	0.9120
4	FF1d	1.7	12.33	0.4934
5	FF1e	1.3	12.21	0.4884

Tabel 4.34. Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen (lanjutan)

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (mm)	
6	FF1f	1.1	10.03	0.4133
7	FF1g	0.5	3.32	0.1328

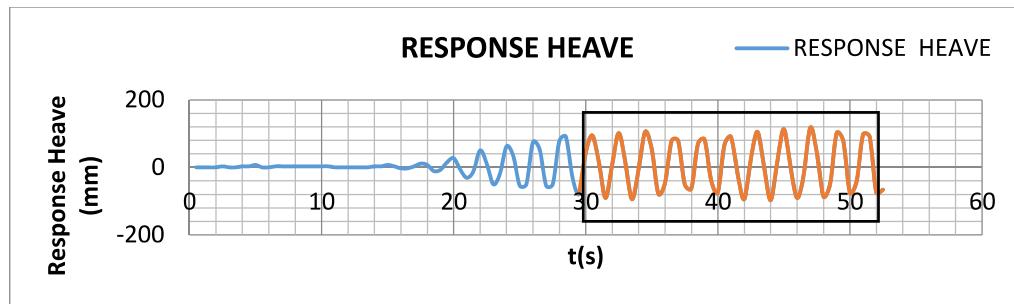
Kolom RAO pada Tabel 4.34 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* yang disajikan pada Gambar 4.33 berikut ini.



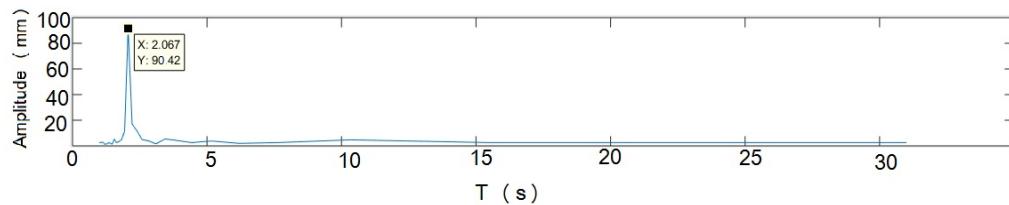
Gambar 4.33 Grafik RAO *free floating* gerakan *surge* eksperimen

2. Mode Gerak *Heave*

Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisis tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisis dilakukan dengan cara FFT. FFT dilakukan dengan bantuan *software* Matlab. Dalam analisis FFT dicocokan pula periode respon yang terjadi dengan periode gelombang. Puncak pada FFT adalah nilai respon. Nilai puncak harus berada pada periode yang *dirunning*. Contoh *time history* dan FFT pada gerakan *heave* dapat dilihat pada Gambar 4.34 dan 4.35. Gambar 4.34 dan Gambar 4.35 merupakan contoh *time history* dan FFT gerakan *heave* yang *dirunning* pada periode 2.1 detik. Hasil respon gerak dan RAO dapat dilihat pada Tabel 4. 35.



Gambar 4.34. Time history instrumen *image processing* untuk gerakan *heave*

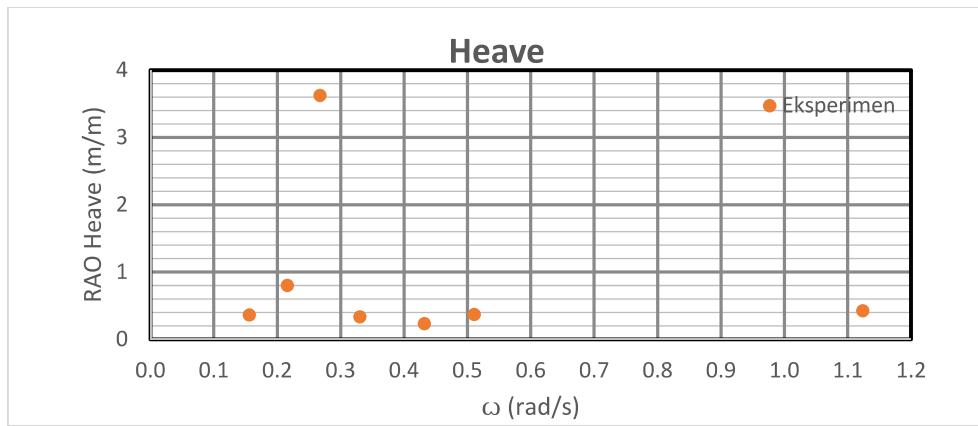


Gambar 4.35. FFT gerakan *heave free floating heave*

Tabel 4.35. Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (mm)	RAO (mm/mm)
1	FF1a	3.6	9.03	0.3613
2	FF1b	2.6	20.0	0.800
3	FF1c	2.1	90.42	0.36211
4	FF1d	1.7	08.34	0.3336
5	FF1e	1.3	5.80	0.2320
6	FF1f	1.1	9.22	0.3688
7	FF1g	0.5	10.60	0.4240

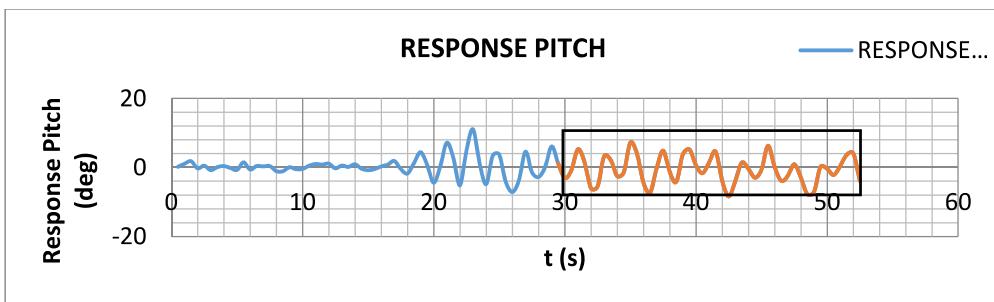
Kolom RAO pada Tabel 4.35 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* yang disajikan pada Gambar 4.36 berikut ini.



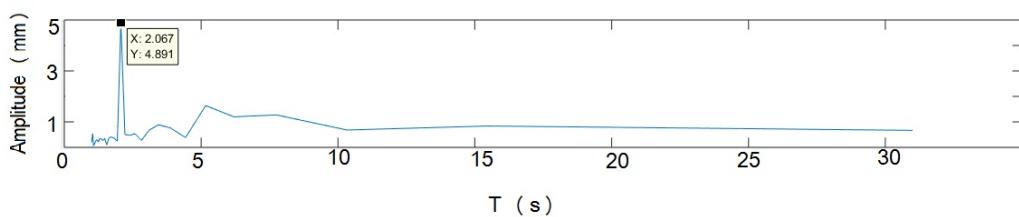
Gambar 4.36 Grafik RAO *free floating* gerakan *heave* eksperimen

3. Mode Gerak *Pitch*

Setiap *time history* pada gerak *pitch* dianalisis tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisis dilakukan dengan cara FFT pada setiap periode. FFT dilakukan dengan bantuan *software* Matlab. Dalam analisis FFT dicocokan pula periode respon yang terjadi dengan periode gelombang. Nilai puncak harus berada pada periode yang *dirunning*. Contoh *time history* dan FFT pada gerakan *pitch* dapat dilihat pada Gambar 4.37 dan 4.38. Gambar 4.37 dan Gambar 4.38 merupakan contoh *time history* dan FFT gerakan *heave* yang *dirunning* pada periode 2.1 detik. Hasil respon gerak dan RAO dapat dilihat pada Tabel 4. 36.



Gambar 4.37. *Time history* instrumen *image processing* untuk gerakan *pitch*

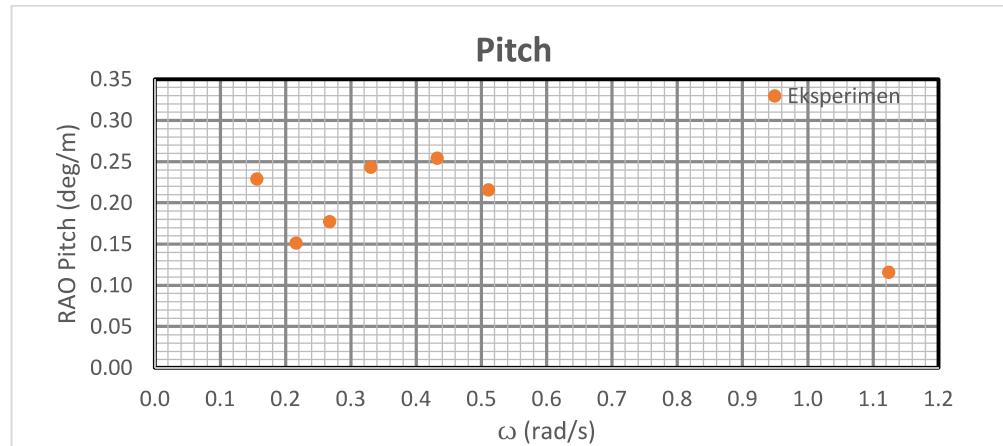


Gambar 4.38. FFT gerakan *pitch* *free floating*

Tabel 4.36. Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (cm)	RAO (cm/cm)
1	FF1a	3.6	5.726	0.2291
2	FF1b	2.6	3.784	0.1514
3	FF1c	2.1	4.491	0.1774
4	FF1d	1.7	6.082	0.2433
5	FF1e	1.3	3.58	0.2543
6	FF1f	1.1	5.398	0.2158
7	FF1g	0.5	2.897	0.1159

Kolom RAO pada Tabel 4.36 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* yang disajikan pada Gambar 4.39 berikut ini.



Gambar 4.39 Grafik RAO *free floating* gerakan *pitch* eksperimen

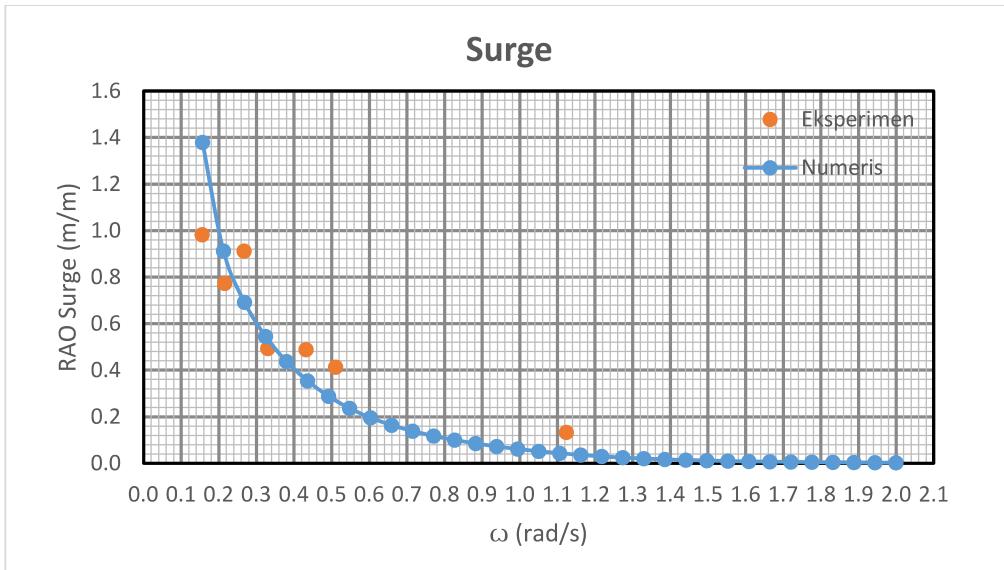
4.4.3. Perbandingan RAO Metode Numeris dan Eksperimen Kondisi Terapung Bebas

Gambar 4.40, 4.41 dan 4.42 menunjukkan perbandingan RAO terapung bebas pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi.

Metode perhitungan eksperimen dan numerik menunjukkan hasil pola yang konsisten untuk gerak *surge*. Tabel 4.37 menunjukkan perbandingan dari 2 metode analisis gerak *surge*.

Tabel 4.37. Perbandingan RAO *surge* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numeris	0.157	1.378
Eksperimen	0.157	0.9823

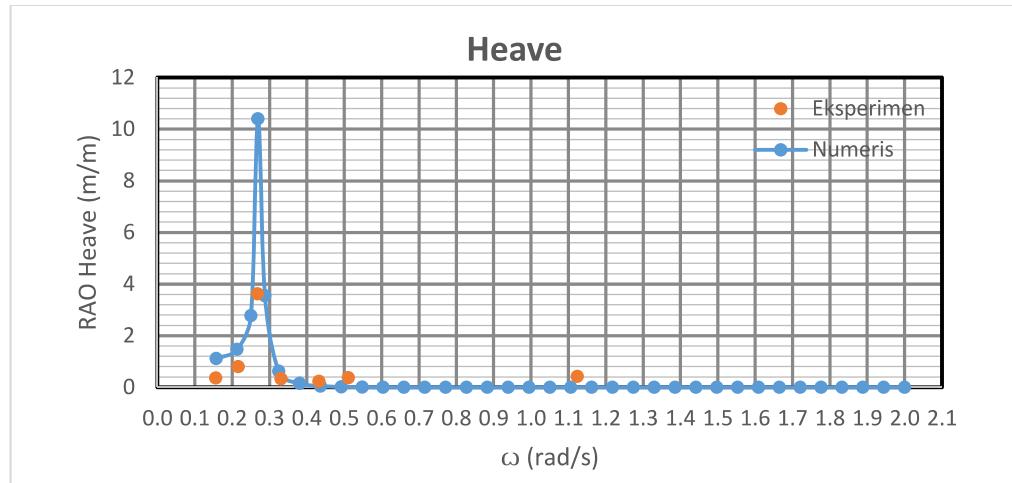


Gambar 4.40. Perbandingan RAO *surge* secara numeris dan eksperimen

Metode perhitungan eksperimen dan numerik menunjukkan hasil pola yang konsisten untuk gerak *heave*. Peristiwa resonansi juga tertangkap oleh metode eksperimen dan numeris di frekuensi yang sama. Namun terjadi perbedaan nilai yang signifikan. Hal ini dikarenakan tali drif penahan yang menahan gerakan pada periode natural. Tabel 4.38 menunjukkan perbandingan dari 2 metode analisis gerak *heave*.

Tabel 4.38. Perbandingan RAO *heave* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numeris	0.251	10.4024
Eksperimen	0.251	3.6231

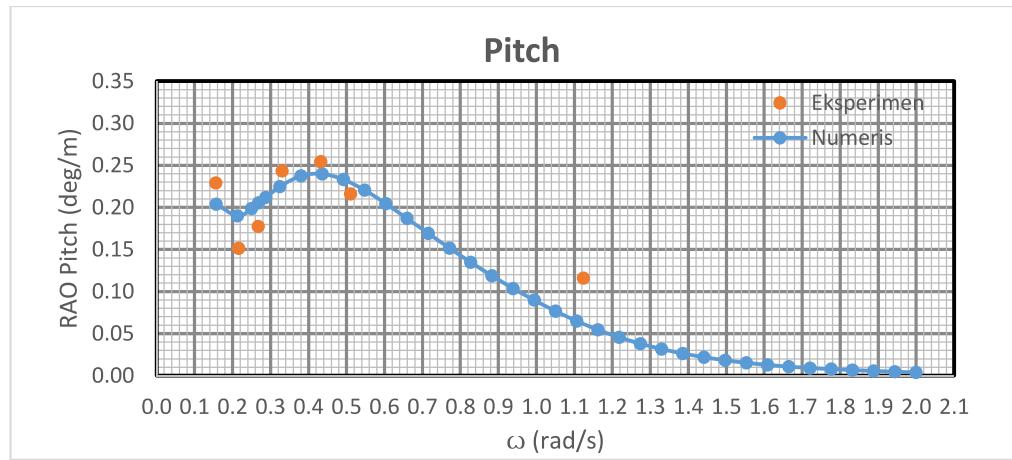


Gambar 4.41. Perbandingan RAO *heave* secara numeris dan eksperimen

Metode perhitungan eksperimen dan numerik menunjukkan hasil pola yang konsisten untuk gerak *pitch*. Tabel 4.39 menunjukkan perbandingan kedua metode gerak *pitch*.

Tabel 4.39. Perbandingan RAO *pitch* terapung bebas

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Numeris	0.4363	0.2398
Eksperimen	0.4363	0.2543

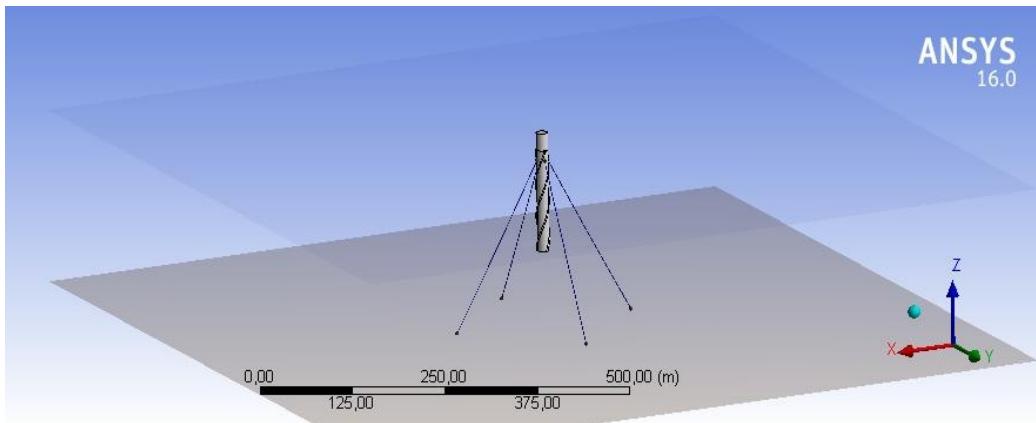


Gambar 4.42. Perbandingan RAO *pitch* secara numeris dan eksperimen

4.5. RAO TERTAMBAT

4.5.1 Metode Numeris Kondisi Tertambat

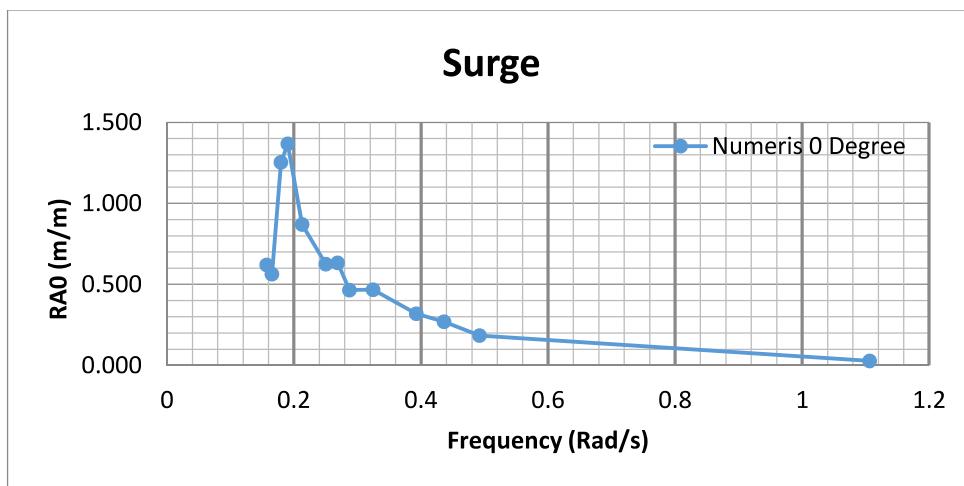
Perhitungan numeris dari gerak bangunan apung di kondisi tertambat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Aqwa.. Mooring line berjumlah 4 buah dengan spesifikasi yang sama. Dalam analisis numeris dilakukan perhitungan dari arah datang gelombang 0 derajat.



Gambar 4.43. Kondisi tertambat dalam Ansys Aqwa

1. Mode Gerak *Surge*

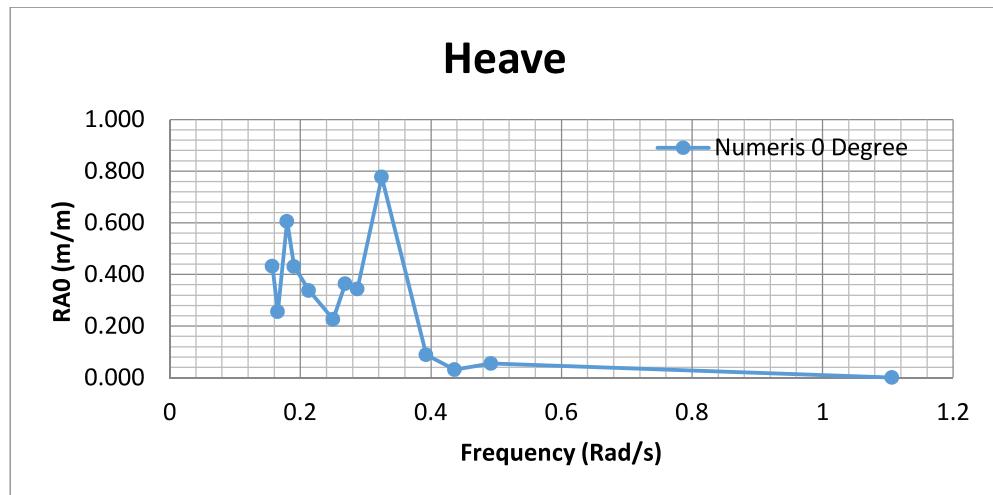
Gambar 4.44 menunjukkan RAO mode gerak *surge* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara numeris sebesar 1.367 m/m pada frekuensi 0.19014 rad/s.



Gambar 4.44. RAO *surge* tertambat metode numerik

2. Mode Gerak *Heave*

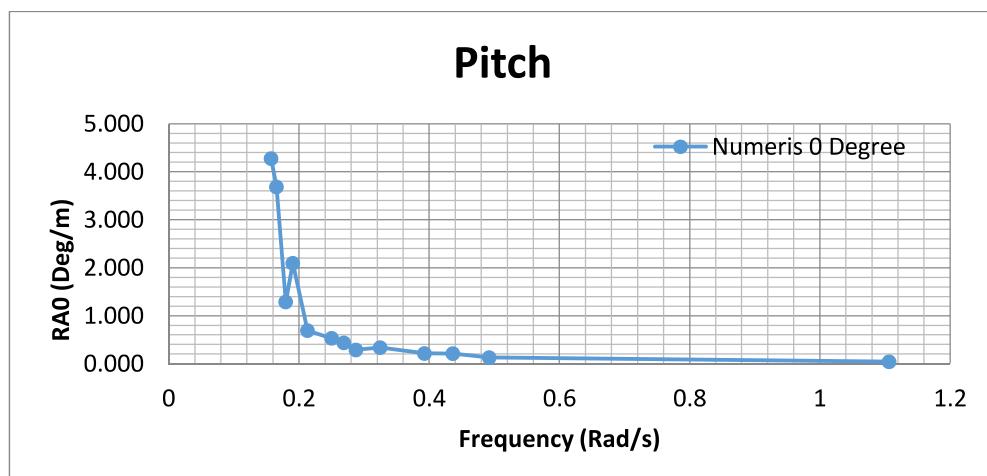
Gambar 4.45 menunjukkan RAO mode gerak *heave* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara numeris sebesar 0.778 m/m pada frekuensi 0.324589 rad/s.



Gambar 4.45. RAO *heave* tertambat metode numerik

3. Mode Gerak *Pitch*

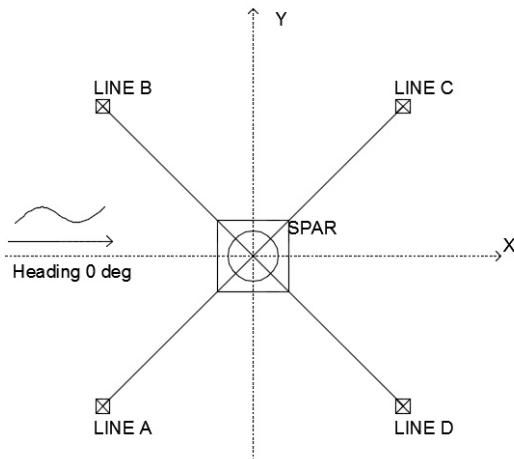
Gambar 4.46 menunjukkan RAO mode gerak *pitch* dari SPAR dengan arah datang gelombang 0 derajat. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara numeris sebesar 4.27684 deg/m pada frekuensi 0.15708 rad/s. Pada frekuensi 0.2129 terjadi pembesaran yaitu sebesar 2.095 deg/m.



Gambar 4.46. RAO *pitch* tertambat metode numerik

4.5.2 Metode Eksperimen Kondisi Tertambat

Analisis eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.47. SPAR dalam kondisi tertambat di laboratorium Hidrodinamika ITS ditunjukkan pada Gambar 4.66.



Gambar 4.47. Konfigurasi eksperimen model fisik tertambat

Tali tambat yang digunakan sebanyak empat buah yang diatur dengan panjang yang sama dan tali dipasang dalam kondisi *taut*. Tali tambat dihubungkan pada *load cell*.

Model akan dikenai gelombang yang berasal dari *wave maker*. Model akan dikenai 7 gelombang dengan periode yang berbeda yang ditunjukan pada Tabel 4.40. Variasi gelombang yang terjadi adalah variasi periode gelombang, sedangkan tinggi gelombang konstan.

Respon dari benda yang terkena gelombang akan dicatat dengan instrumen *image processing* dan *gyroscope*. *Image processing* akan mencatat mode gerak *surge* dan *heave* sedangkan *gyroscope* akan mencatat gerak *pitch* struktur. FFT dilakukan dengan bantuan *software Matlab* Dalam analisis FFT dicocokan pula periode respon yang terjadi dengan periode gelombang. Puncak pada FFT adalah nilai respon. Nilai puncak harus berada pada periode yang dirunning. Contoh FFT respon gerakan dapat dilihat pada sub-bab RAO *free floating*.

Tabel 4.40. Periode lingkungan dan periode eksperimen model fisik tertambat yang digunakan

No.	Kode	Periode Gelombang Lingkungan (s)	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Amplitudo Gelombang (cm)
1	TT1a	40	3.	2.5
2	TT1b	29.5072	2.6	
3	TT1c	23.3754	2.1	
4	TT1d	19.3573	1.7	
5	TT1e	14.4009	1.3	
6	TT1f	12.7665	1.1	
7	TT1g	5.6789	0.5	

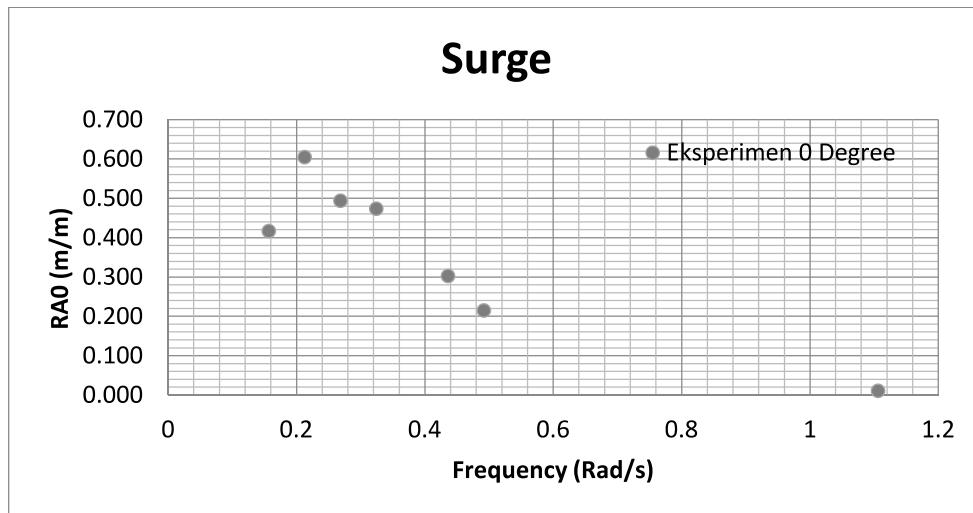
1. Mode Gerak *Surge*

Setiap time history pada gerak *surge* dianalisis tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisis dilakukan dengan cara FFT respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.41 menunjukkan hasil eksperimen yang dilakukan pada mode gerak *surge*.

Tabel 4.41. Respon gerak dan RAO gerakan *surge* hasil eksperimen kondisi tertambat

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (mm)	RAO (mm/mm)
1	TT1a	3.6	10.42	0.417
2	TT1b	2.6	15.12	0.605
3	TT1c	2.1	12.35	0.494
4	TT1d	1.7	11.84	0.474
5	TT1e	1.3	7.57	0.303
6	TT1f	1.1	5.38	0.215
7	TT1g	0.5	0.27	0.011

Kolom RAO pada Tabel 4.41 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *surge* model tertambat yang disajikan pada Gambar 4.48. RAO tertinggi dari *surge* tertambat secara eksperimen sebesar 0.605 m/m pada frekuensi 0.2129 rad/s.



Gambar 4.48. Grafik RAO *surge* tertambat eksperimen

2. Mode Gerak *Heave*

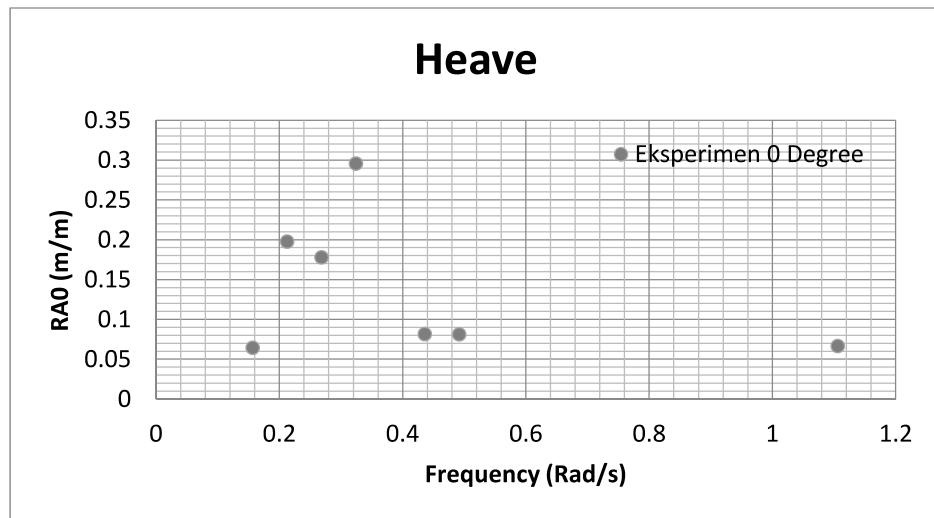
Setiap *time history* pada gerak *heave* dianalisis tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisis dilakukan dengan cara FFT respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.42 menunjukkan hasil eksperimen yang dilakukan pada mode gerak *heave*.

Tabel 4.42. Respon gerak dan RAO gerakan *heave* hasil eksperimen kondisi tertambat

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (mm)	RAO (mm/mm)
1	TT1a	3.6	1.613	0.0645
2	TT1b	2.6	4.945	0.1978
3	TT1c	2.1	4.450	0.1779
4	TT1d	1.7	7.392	0.2956

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (mm)	RAO (mm/mm)
5	TT1e	1.3	2.041	0.0826
6	TT1f	1.1	2.032	0.0812
7	TT1g	0.5	1.667	0.0666

Kolom RAO pada Tabel 4.42 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *heave* model tertambat yang disajikan pada Gambar 4.49. RAO tertinggi dari *heave* tertambat secara eksperimen sebesar 0.2956 m/m pada frekuensi 0.3245 rad/s.



Gambar 4.49. Grafik RAO *heave* tertambat eksperimen

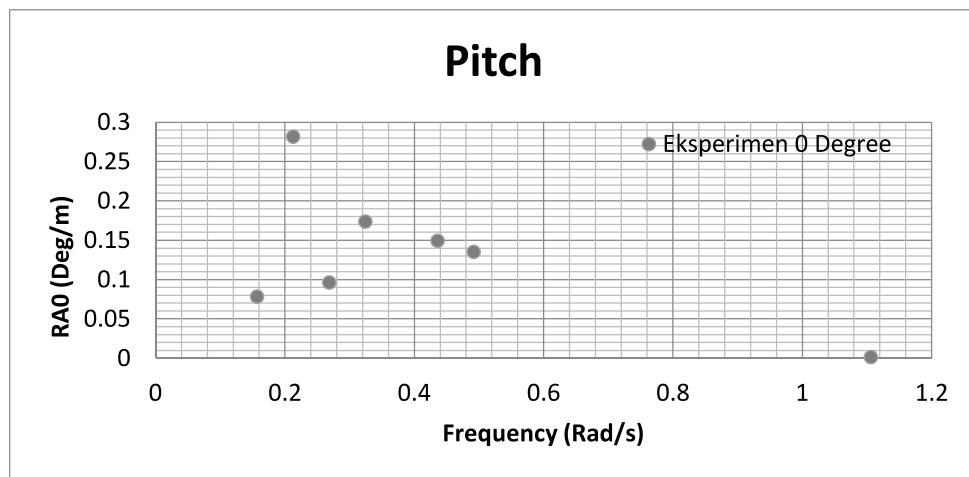
3. Mode Gerak *Pitch*

Setiap *time history* pada gerak *pitch* dianalisis tinggi respon dan periode respon dari gerak yang terjadi. Analisis dilakukan dengan cara FFT respon yang terjadi untuk melihat respon gerak setiap variasi periode. Tabel 4.43 menunjukkan hasil eksperimen yang dilakukan pada mode gerak *pitch*.

Tabel 4.43. Respon gerak dan RAO gerakan *pitch* hasil eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Respon Gerak (cm)	RAO (deg/mm)
1	TT1a	3.6	1.613	0.0645
2	TT1b	2.6	4.945	0.1978
3	TT1c	2.1	4.450	0.1779
4	TT1d	1.7	7.392	0.2956
5	TT1e	1.3	2.401	0.0816
6	TT1f	1.1	2.032	0.0812
7	TT1g	0.5	1.667	0.0066

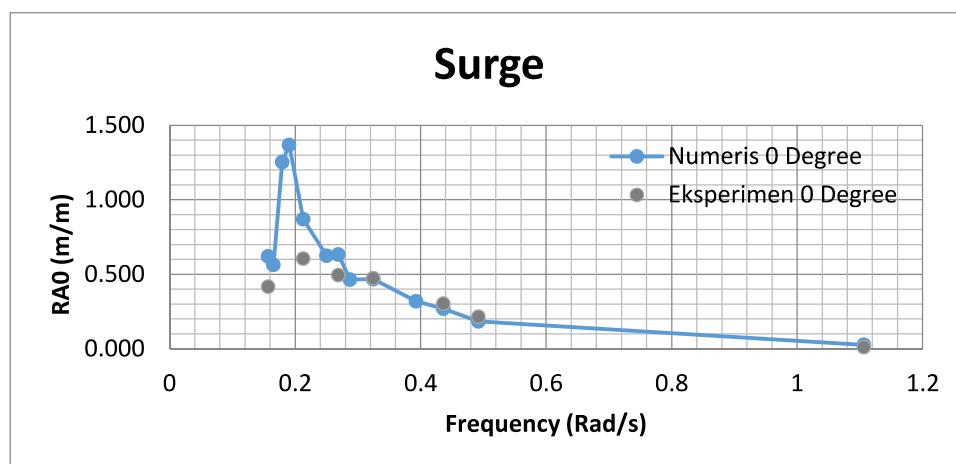
Kolom RAO pada Tabel 4.43 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari gerak *pitch* model tertambat yang disajikan pada Gambar 4.50. RAO tertinggi dari *pitch* tertambat secara eksperimen sebesar 0.1736 deg/m pada frekuensi 0.3245 rad/s, namun di frekuensi 0.35 rad/s juga terdapat RAO cukup tinggi sebesar 0.740.



Gambar 4.50. Grafik RAO *pitch* tertambat eksperimen

4.5.3 Perbandingan RAO Metode Eksperimen dan Numeris Pada Kondisi Tertambat

Gambar 4.51, 4.52, dan 4.53 menunjukkan perbandingan RAO tertambat pada arah datang gelombang 0 derajat dengan metode numeris dan eksperimen untuk tiap gerakan *surge*, *heave* dan *pitch* yang terjadi. Pada metode numeris dan eksperimen RAO surge memberikan pola yang sama. Nilai puncak gerakan surge terjadi pada frekuensi yang sama pada metode numeris dan eksperimen. Namun terjadi perbedaan nilai puncak antara eksperimen dan numeris.

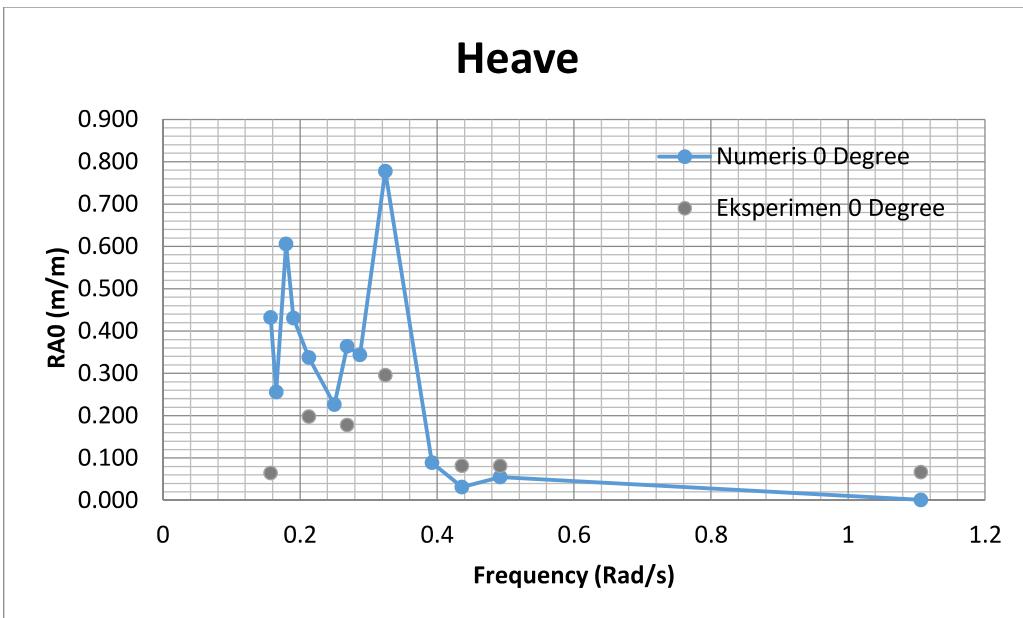


Gambar 4.51. Perbandingan RAO *surge* tertambat metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.44 menunjukkan perbandingan RAO *surge* dari setiap metode perhitungan yang dilakukan. Metode numeris RAO tertinggi terjadi pada frekuensi 0.1904 rad/s sebesar 1.367 m/m sedangkan pada metode eksperimen sebesar 0.605 pada frekuensi 0.2129.

Tabel 4.44. Perbandingan RAO *surge* tertambat

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numeris	0.1904	1.367
Eksperimen	0.2129	0.605

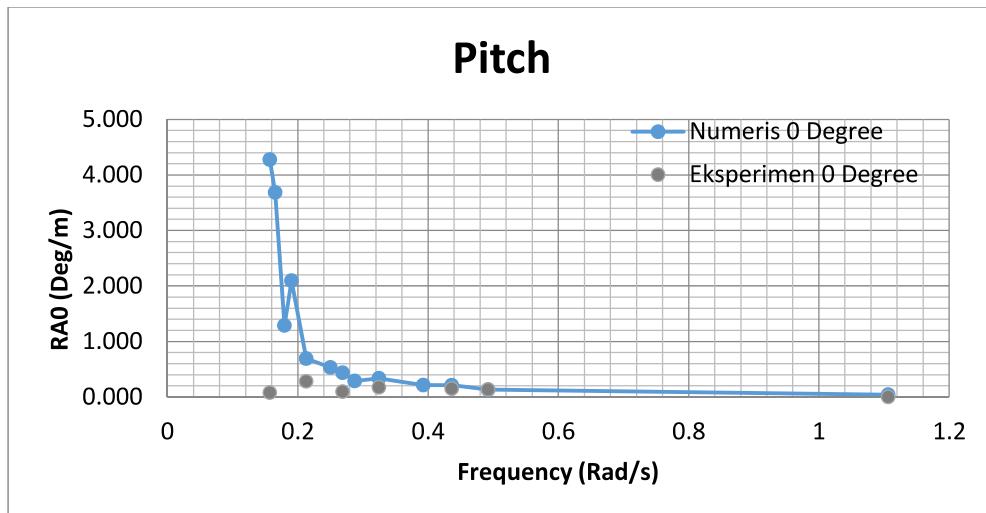


Gambar 4.52. Perbandingan RAO *heave* tertambat secara numeris dan eksperimen

Gerak *heave* tertambat terbesar dari setiap metode analisis ditampilkan dalam Tabel 4.45. Metode numeris RAO tertinggi terjadi pada frekuensi yang sama yaitu 0.324 rad/s sebesar 0.778 m/m sedangkan pada metode eksperimen sebesar 0.2956 pada frekuensi 0.324. terjadi perbedaan yang cukup signifikan pada frekuensi rendah antara metode numeris dan eksperimen. Hal ini dikarenakan pada metode eksperimen gelombang hanya dibangkitkan selama 10 detik sementara periode gelombang adalah 3.6 detik sehingga tidak cukup untuk membangkitkan gelombang secara konsisten.

Tabel 4.45. Perbandingan RAO *heave* tertambat

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
Numeris	0.324	0.778
Eksperimen	0.324	0.295



Gambar 4.53. Perbandingan RAO *pitch* tertambat secara analitis, numeris dan eksperimen

Gerak *pitch* terbesar dari setiap metode analisis ditampilkan dalam Tabel 4.46. Metode numeris menghasilkan nilai RAO paling tinggi sebesar 4.276 deg/m dengan frekuensi di 0.15708 rad/s. Metode eksperimen menghasilkan RAO terbesar pada frekuensi 0.212 rad/s sebesar 0.281 deg/m. Terjadi perbedaan letak RAO tertinggi antara metode numeris dan eksperimen. Seharusnya pada metode eksperimen terjadi RAO tertinggi pada frekuensi 0.15708. Hal ini dikarenakan pada metode eksperimen gelombang hanya dibangkitkan selama 10 detik sementara periode gelombang adalah 3.6 detik sehingga tidak cukup untuk membangkitkan gelombang secara konsisten.

Tabel 4.46. Perbandingan RAO *pitch* tertambat

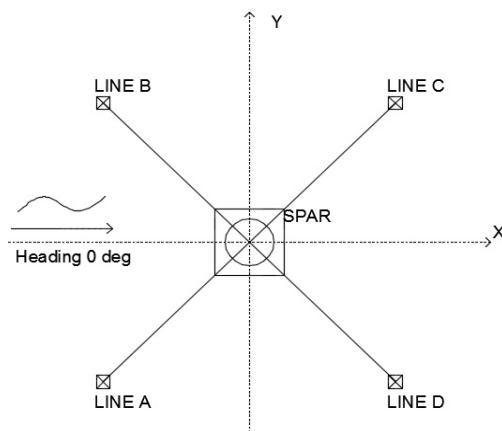
Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
Numeris	0.157	4.276
Eksperimen	0.212	0.281

4.6 TEGANGAN TALI

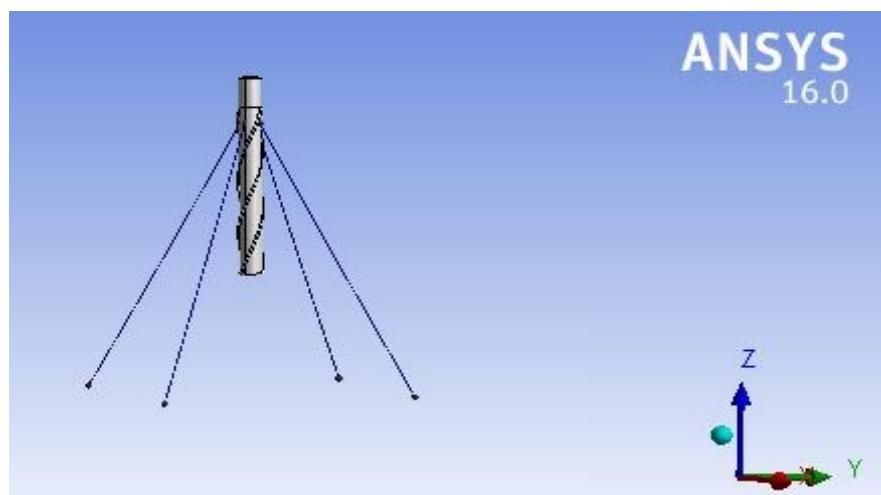
4.6.1 Metode Numeris

Tegangan tali yang terjadi dianalisis menggunakan bantuan perangkat lunak ANSYS AQWA. Properties tali tambat yang ada pada Gambar 4.6 dan Tabel 4.19 dimasukkan pada program ANSYS AQWA sehingga dihasilkan

tegangan tali yang terjadi per satuan waktu, selanjutnya perlu dicari amplitude tegangan pada periode tertentu yang diplot pada frekuensi domain sehingga dihasilkan respon tegangan tali yang terjadi dalam bentuk RAO tension. Gambar 4.54 dan 4.55 berikut ini merupakan permodelan dari tali tambat yang digunakan pada model dengan menggunakan ANSYS AQWA. Tabel 4.47 merupakan nilai maksimum RAO *tension* pada tiap-tiap tali tambat pada arah datang gelombang 0 derajat.



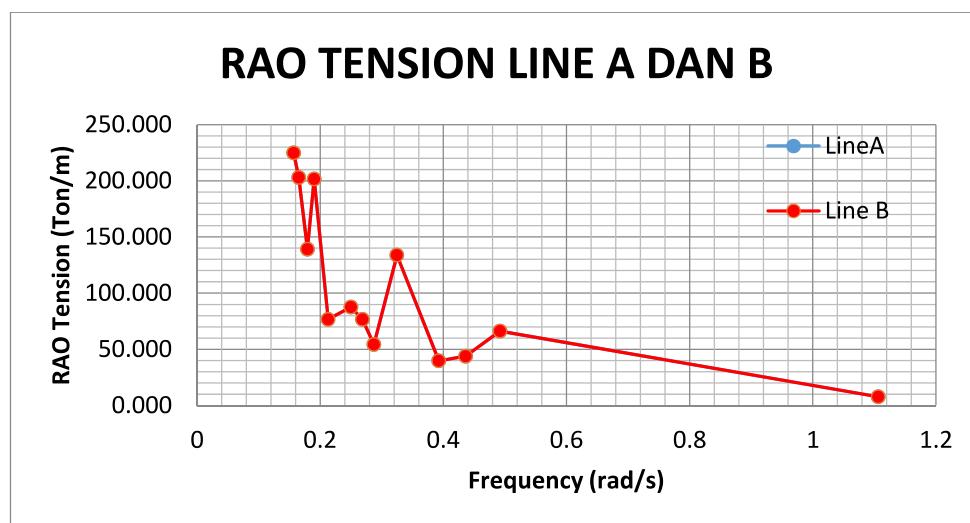
Gambar 4.54. Posisi Line A,B,C, dan D



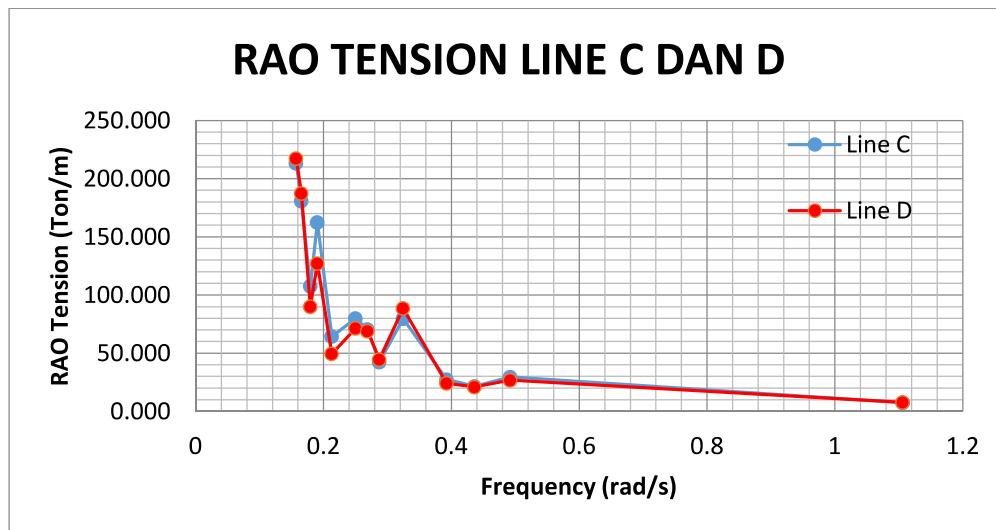
Gambar 4.55. Permodelan tali tambat dengan menggunakan Ansys Aqwa

Tabel 4.47. RAO *Tension* maksimum tiap tali tambat pada Ansys Aqwa

	Frekuensi (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (ton/m)
Mooring Line A	0.15707	224.881
Mooring Line B	0.15707	224.881
Mooring Line C	0.15707	213.299
Mooring Line D	0.15707	217.333



Gambar 4.56. RAO *Tension* tali tambat A dan B metode numerik

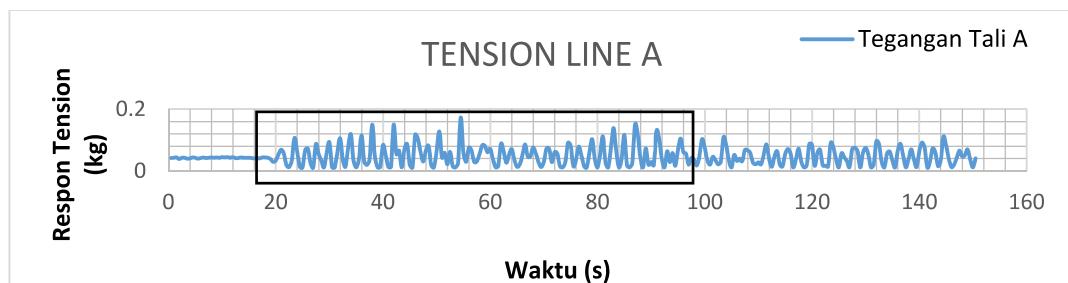


Gambar 4.57 RAO *Tension* tali tambat C dan D metode numeric

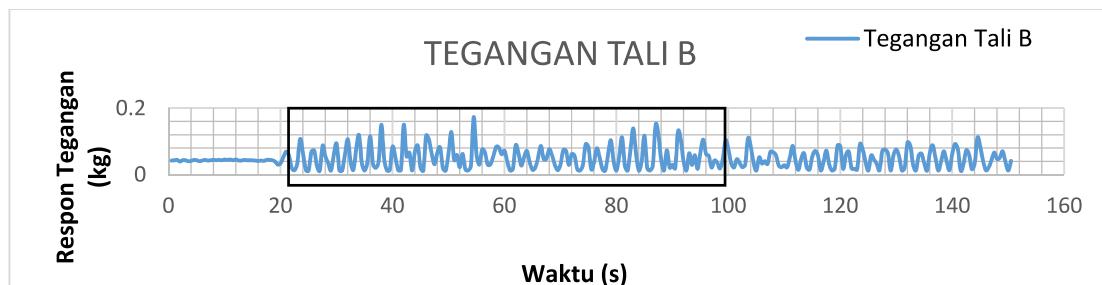
Dari Gambar grafik di atas dapat dilihat bahwa RAO *tension* yang terjadi pada tali tambat A dan tali tambat B memiliki pola yang sama, sedangkan tali tambat C memiliki pola dan besar yang sama dengan tali tambat D namun pada tali tambat C dan D memiliki nilai lebih kecil dari tali tambat A dan B.

4.6.2 Metode Eksperimen Kondisi Tertambat

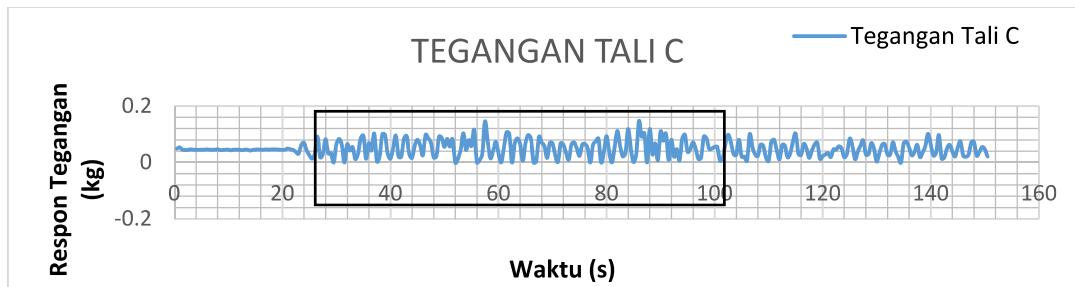
Analisis eksperimen dilakukan di Laboratorium Hidrodinamika FTK ITS. Model fisik diletakkan di kolam dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 m dan lebar 3 m. Pada kondisi tertambat model fisik diletakkan dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.60 dengan menggunakan empat buah tali tambat. *Load cell* dengan kapasitas 1 kg diletakan pada ujung jangkar dan dikaitkan dengan tali tambat eksperimen. Model dikenai gelombang dengan 7 periode yang berbeda. *Time history* dari tiap tiap *load cell* dapat dilihat pada Gambar 4.58, 4.59, 4.60, 4.61. *Time respon* kemudian dianalisis dengan menggunakan FFT untuk mendapatkan respon tegangan maksimal. Respon tegangan pada tiap-tiap periode kemudian disajikan dalam bentuk RAO *tension*.



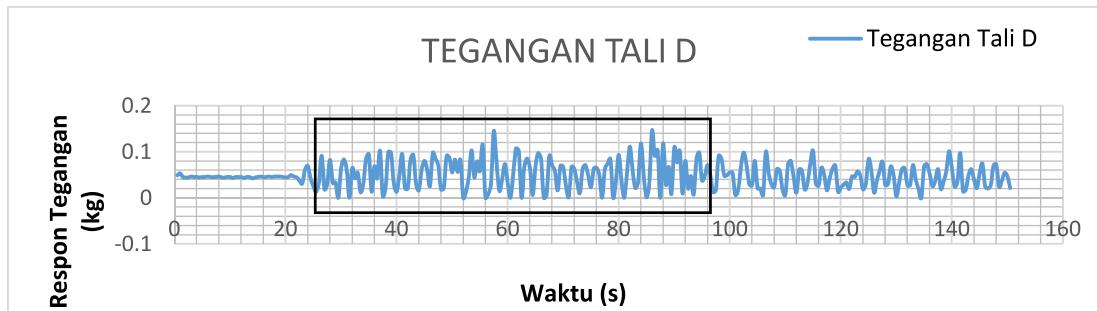
Gambar 4.58. *Time history* instrumen *load cell* tali tambat A



Gambar 4.59. *Time History* instrumen *load cell* tali tambat B



Gambar 4.60. *Time history instrumen load cell tali tambat C*



Gambar 4.61. *Time history instrumen load cell tali tambat D*

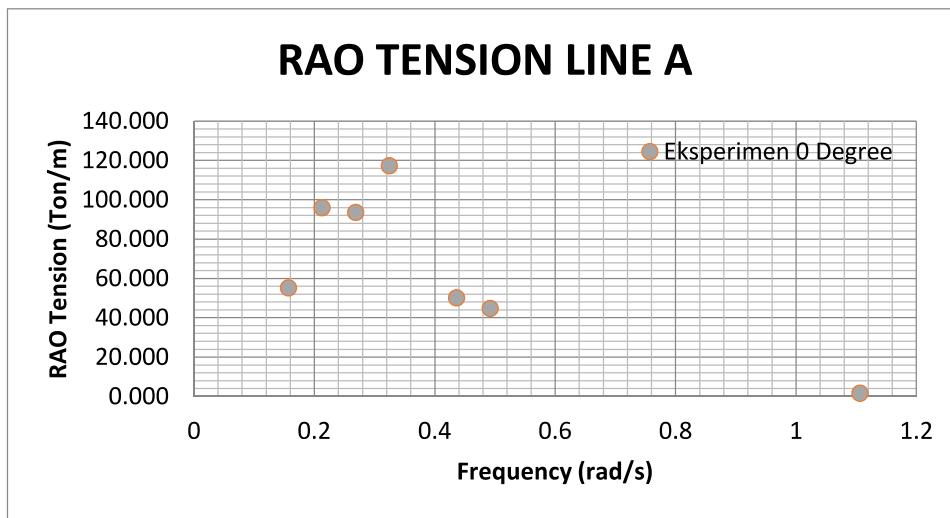
1. Load cell A

Setiap *time history* pada tali tambat A dianalisis besarnya tegangan dengan cara FFT. Tegangan yang terjadi pada tiap-tiap periode kemudian disajikan dalam bentuk RAO *tension*. Tabel 4.48 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan dari setiap gerakan beserta RAO *tension* tali tambat.

Tabel 4.48. RAO *Tension* line A eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Frekuensi Gelombang (rad/s)	RAO <i>Tension</i> (ton/m)
1	TT1	3.6	0.1570	55.224
2	TT2	2.6	0.21293	95.982
3	TT3	2.1	0.2687	93.571
4	TT4	1.7	0.3245	117.313
5	TT5	1.3	0.4363	50.149
6	TT6	1.1	0.4921	44.776
7	TT7	0.5	0.1064	1.658

Kolom RAO pada Tabel 4.48 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat *Line A* yang disajikan pada Gambar 4.62.



Gambar 4.62. Grafik RAO *tension* tali tambat *load cell* A hasil eksperimen

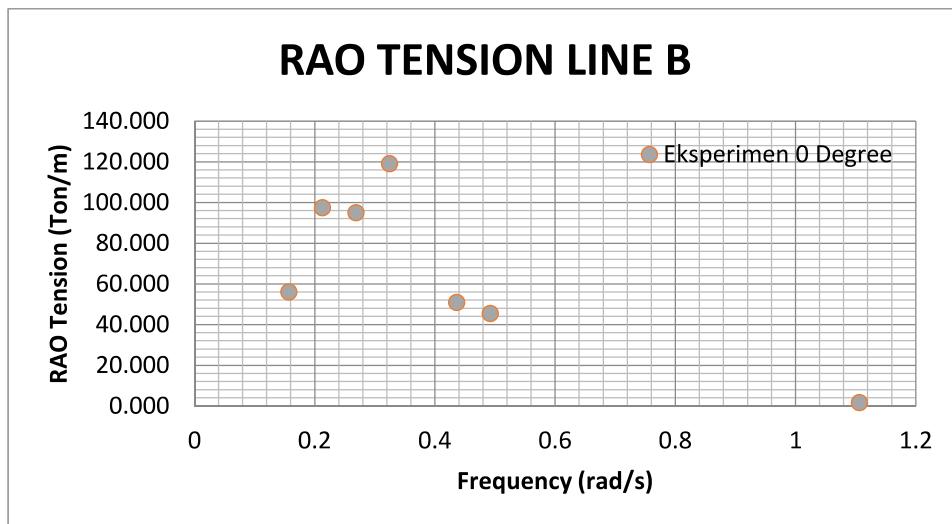
2. *Load cell* B

Setiap *time history* pada tali tambat B dianalisis besarnya tegangan dengan cara FFT. Tegangan yang terjadi pada tiap-tiap periode kemudian disajikan dalam bentuk RAO *tension* Tabel 4.49 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat.

Tabel 4.49. RAO *Tension line* B eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Frekuensi Gelombang (rad/s)	RAO Tension (ton/m)
1	TT1	3.6	0.1570	56.061
2	TT2	2.6	0.21293	97.346
3	TT3	2.1	0.2687	94.998
4	TT4	1.7	0.3245	119.091
5	TT5	1.3	0.4363	50.909
6	TT6	1.1	0.4921	45.455
7	TT7	0.5	0.1064	1.684

Kolom RAO pada Tabel 4.49 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat *Line B* yang disajikan pada Gambar 4.63.



Gambar 4.63. Grafik RAO *tension* tali tambat *load cell B* hasil eksperimen

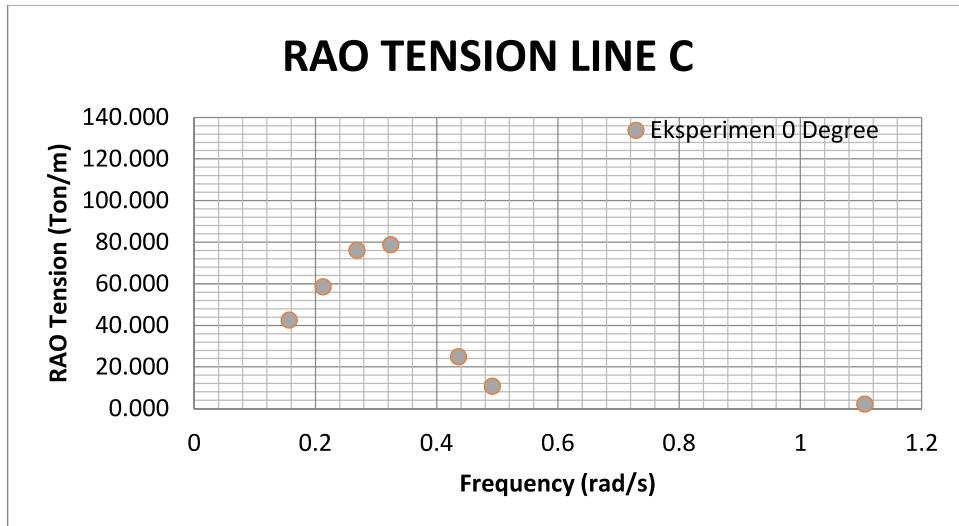
3. *Load cell C*

Setiap *time history* pada tali tambat C dianalisis besarnya tegangan dengan cara FFT. Tabel 4.50 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan dari setiap gerakan beserta RAO *tension* tali tambat.

Tabel 4.50. RAO *Tension line B* eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Frekuensi Gelombang (rad/s)	RAO Tension (ton/m)
1	TT1	3.6	0.1570	42.520
2	TT2	2.6	0.21293	58.493
3	TT3	2.1	0.2687	76.040
4	TT4	1.7	0.3245	78.740
5	TT5	1.3	0.4363	24.882
6	TT6	1.1	0.4921	10.709
7	TT7	0.5	0.1064	2.100

Kolom RAO pada Tabel 4.58 dapat di-*plot* untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat *Line C* yang disajikan pada Gambar 4.64.



Gambar 4.64. Grafik RAO *tension* tali tambat *load cell B* hasil eksperimen

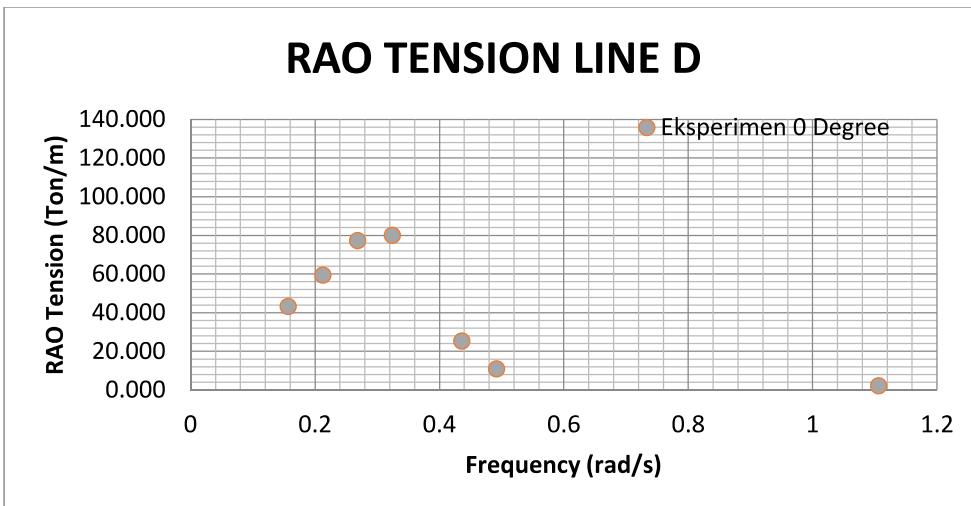
4. Load cell D

Setiap *time history* pada tali tambat D dianalisis besarnya tegangan dengan cara FFT. Tabel 4.51 menunjukkan respon tegangan tali tambat dan dari setiap gerakan beserta RAO *tension force* tali tambat.

Tabel 4.51. RAO *Tension line D* eksperimen

No.	Kode	Periode Gelombang Eksperimen (s)	Frekuensi Gelombang (rad/s)	RAO Tension (ton/m)
1	TT1	3.6	0.1570	43.200
2	TT2	2.6	0.21293	59.429
3	TT3	2.1	0.2687	77.257
4	TT4	1.7	0.3245	80.000
5	TT5	1.3	0.4363	25.280
6	TT6	1.1	0.4921	10.880
7	TT7	0.5	0.1064	2.133

Kolom RAO pada Tabel 4.51 dapat di-plot untuk membuat suatu grafik RAO dari tegangan tali tambat *Line D* yang disajikan pada Gambar 4.65.

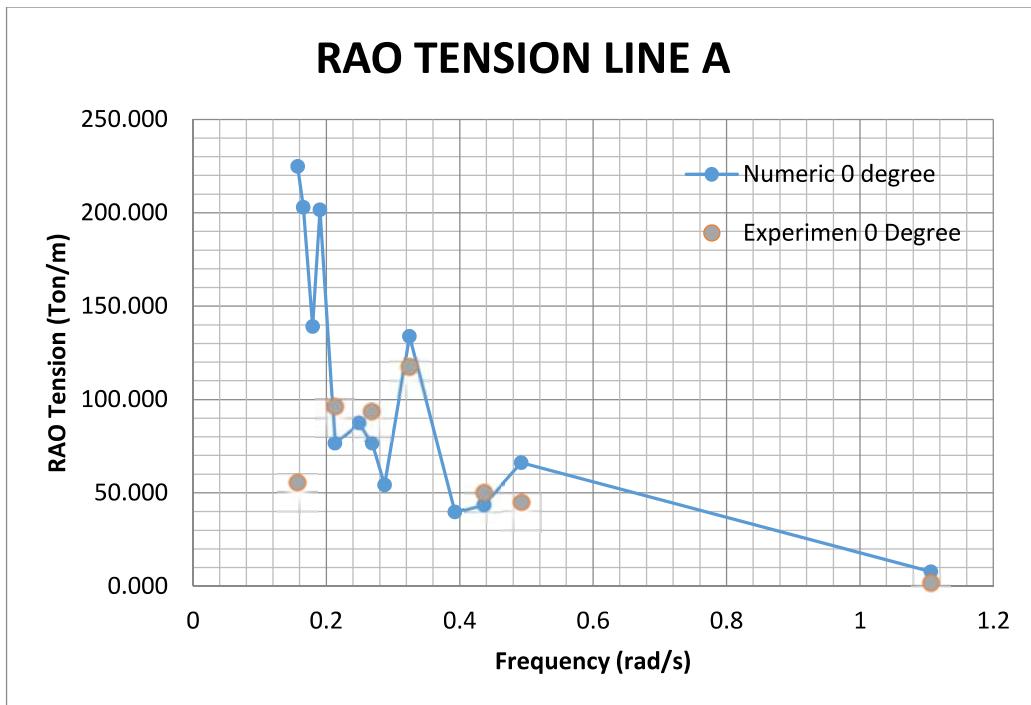


Gambar 4.65. Grafik RAO *tension* tali tambat *load cell* D hasil eksperimen

4.6.3 Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat Metode Eksperimen Dan Numeris Kondisi Tertambat

Gambar 4.66, 4.67, 4.68, 4.69 menunjukkan perbandingan RAO Tali Tambat dari metode numerik dan metode eksperimen dari setiap *line* dengan arah gelombang 0 derajat.

RAO *tension* pada *Line A* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.52. Pada metode numeris RAO *tension* terbesar terjadi pada frekuensi 0.1570 rad/s sebesar 209.585 sedangkan pada eksperimen terjadi pada frekuensi 0.3245 sebesar 117.313. Seharusnya RAO *tension* terjadi pada frekuensi yang sama antara metode numeris dan eksperimen yaitu pada frekuensi 0.1570. Hal ini terjadi karena pada metode eksperimen gelombang hanya dibangkitkan selama 10 detik sedangkan periode gelombang eksperimen 3,6 detik sehingga gelombang yang terjadi belum cukup merepresentasikan gelombang sebenarnya secara konsisten.

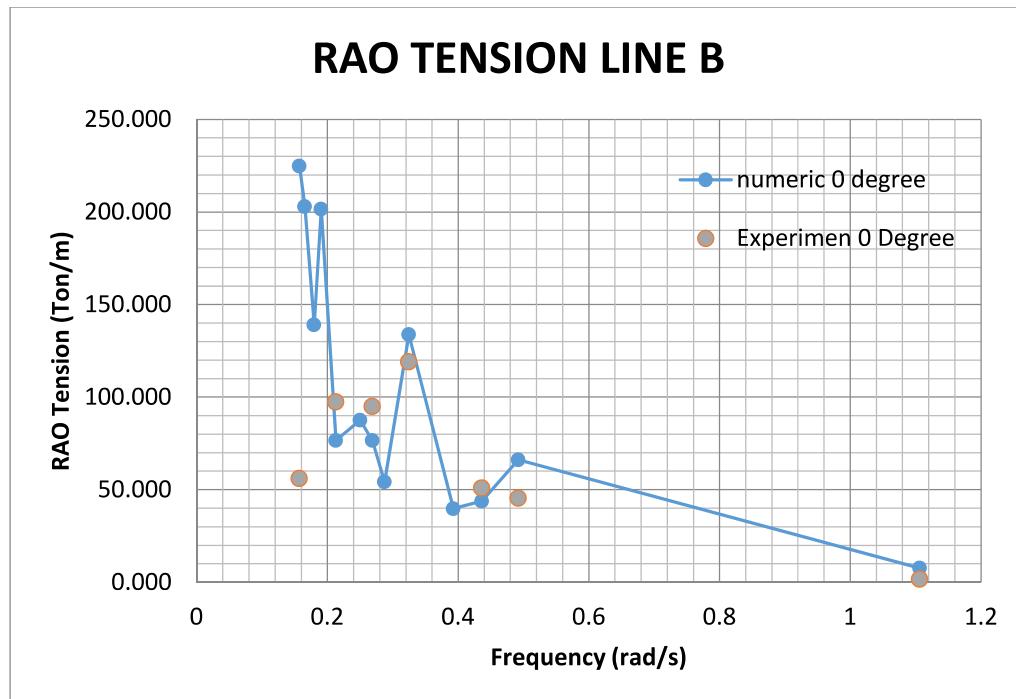


Gambar 4.66. Perbandingan RAO *Tension line A* tertambat metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.52. Perbandingan *Tension Line A*

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.1570	224.811
Eksperimen	0.3245	117.313

RAO *tension* pada *Line B* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.53. Pada metode numeris RAO *tension* terbesar terjadi pada frekuensi 0.1570 rad/s sebesar 224.811 sedangkan pada eksperimen terjadi pada frekuensi 0.3245 sebesar 119.091. Seharusnya RAO *tension* terjadi pada frekuensi yang sama antara metode numeris dan eksperimen yaitu pada frekuensi 0.1570. Hal ini terjadi karena pada metode eksperimen gelombang hanya dibangkitkan selama 10 detik sedangkan periode gelombang eksperimen 3,6 detik sehingga gelombang yang terjadi belum cukup merepresentasikan gelombang sebenarnya secara konsisten.

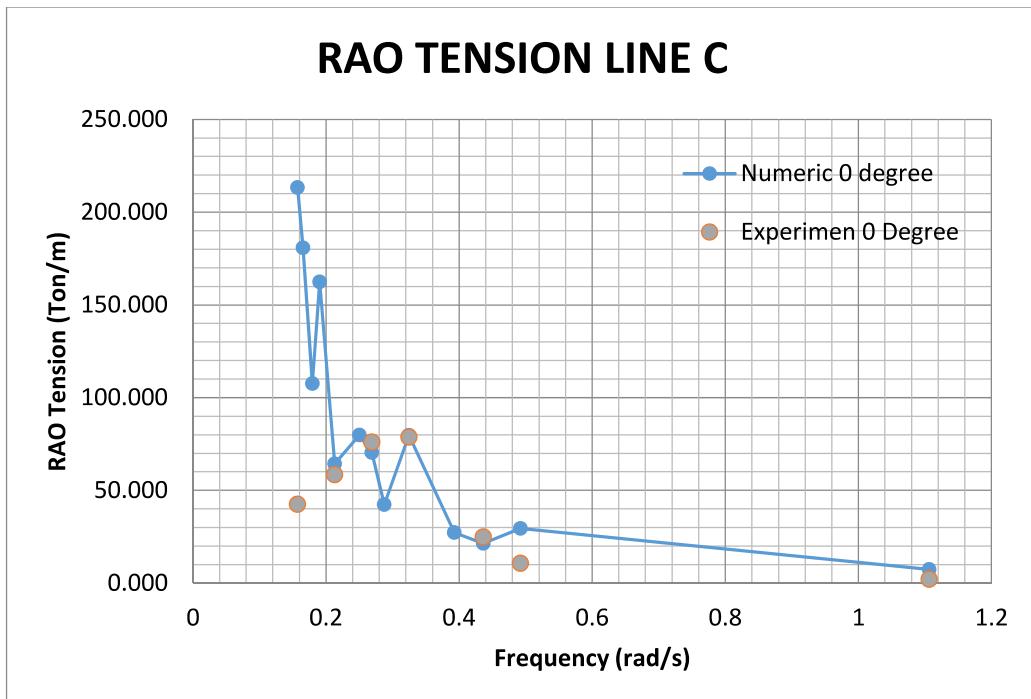


Gambar 4.67. Perbandingan RAO *Tension line B* tertambat metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.53. Perbandingan *Tension Line B*

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.1570	224.811
Eksperimen	0.3245	119.091

RAO *tension* pada *Line C* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.54. Pada metode numeris RAO *tension* terbesar terjadi pada frekuensi 0.1570 rad/s sebesar 224.811 sedangkan pada eksperimen terjadi pada frekuensi 0.3245 sebesar 78.740. Seharusnya RAO *tension* terjadi pada frekuensi yang sama antara metode numeris dan eksperimen yaitu pada frekuensi 0.1570. Hal ini terjadi karena pada metode eksperimen gelombang hanya dibangkitkan selama 10 detik sedangkan periode gelombang eksperimen 3,6 detik sehingga gelombang yang terjadi belum cukup merepresentasikan gelombang sebenarnya secara konsisten.

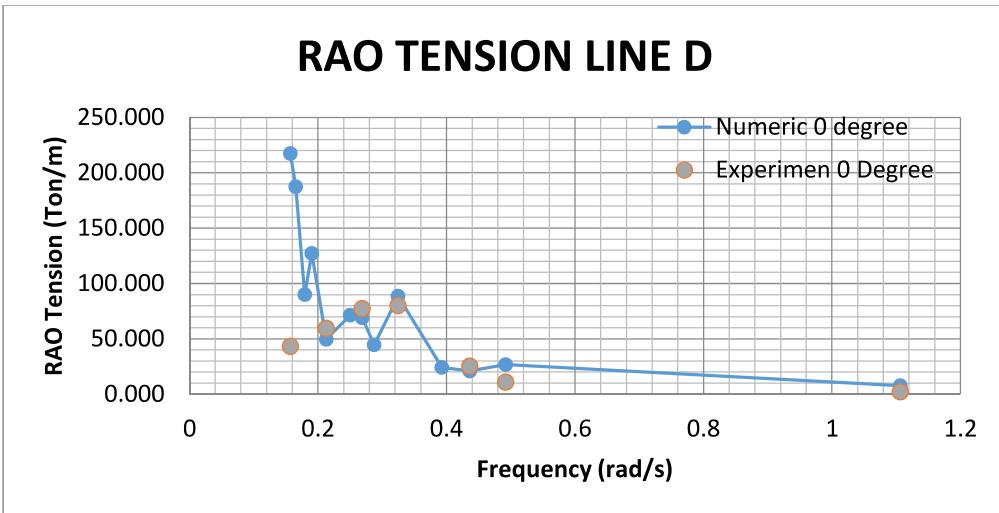


Gambar 4.68. Perbandingan RAO *Tension line C* tertambat metode numeris dan eksperimen

Tabel 4.54. Perbandingan *Tension Line C*

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.1570	213.299
Eksperimen	0.3245	78.740

. Tegangan tali pada *Line D* dengan metode numerik dan eksperimen ditampilkan pada Tabel 4.55. Pada metode numeris RAO *tension* terbesar terjadi pada frekuensi 0.1570 rad/s sebesar 213.299 sedangkan pada eksperimen terjadi pada frekuensi 0.3245 sebesar 78.741. Seharusnya RAO *tension* terjadi pada frekuensi yang sama antara metode numeris dan eksperimen yaitu pada frekuensi 0.1570. Hal ini terjadi karena pada metode eksperimen gelombang hanya di bangkitkan selama 10 detik sedangkan periode gelombang eksperimen 3,6 detik sehingga gelombang yang terjadi belum cukup merepresentasikan gelombang sebenarnya secara konsisten.



Gambar 4.69. Perbandingan RAO *Tension line D* tertambat metode numeris dan eksperimen

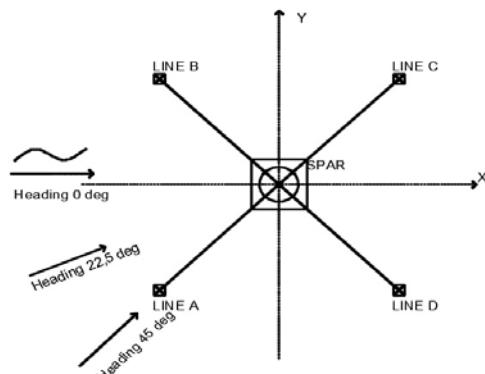
Tabel 4.55. Perbandingan *Tension Line D*

Metode	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (ton/m)
Numeris	0.157	208.639
Eksperimen	0.330	80.000

4.7 STUDI PARAMETRIS

4.7.1 Perbandingan RAO Metode Numeris Kondisi Tertambat

Pada Tugas Akhir kali ini, Ansys Aqwa digunakan untuk menghitung gerak kondisi gerak dalam kondisi tertambat dan tegangan tali dengan variasi berupa arah datang gelombang (0° , 22.5° dan 45°) seperti Gambar 4.89.

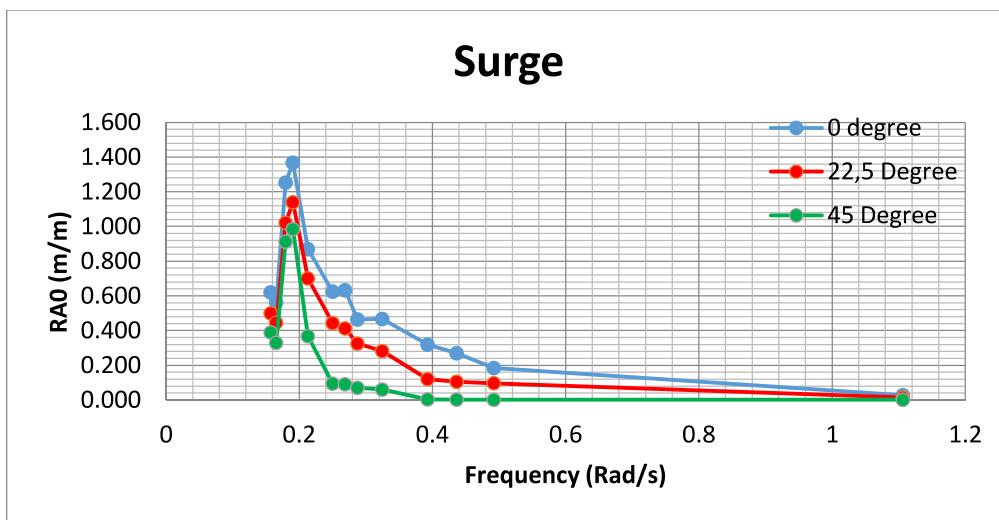


Gambar 4.70. Variasi *headingg* SPAR tertambat

Pada gerak *surge*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.56. Gerak *surge* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 1.367 m/m pada frekuensi 0.1904 rad/s.

Tabel 4.56. Variasi *Heading RAO surge* tertambat

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.1904	1.367
22.5 deg	0.1904	1.139
45 deg	0.1904	0.984

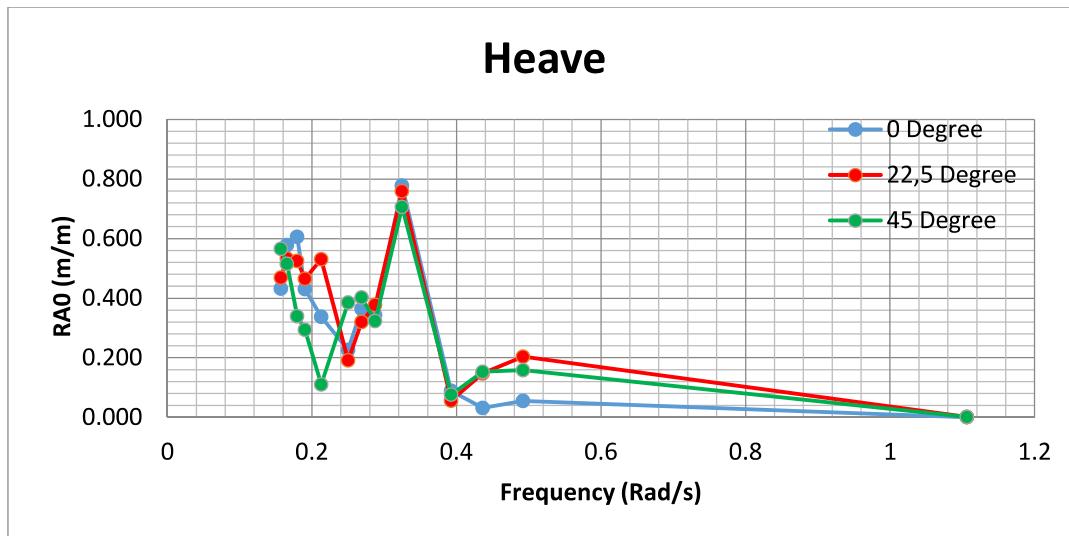


Gambar 4.71. Grafik RAO *surge* tertambat variasi *heading* metode numeris

Pada gerak *heave* nilai terbesar berada pada frekuensi yang sama, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.57. Gerak *heave* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 0.778 m/m pada frekuensi 0.3245 rad/s

Tabel 4.57. Variasi *Heading RAO heave* tertambat

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.3245	0.778
22.5 deg	0.3245	0.759
45 deg	0.3245	0.706

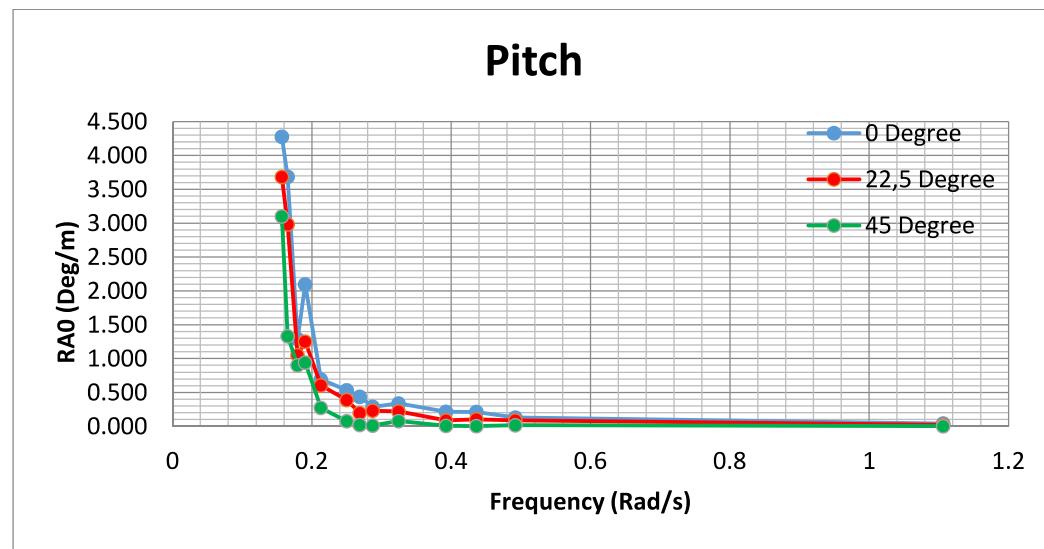


Gambar 4.72. Grafik RAO *heave* tertambat variasi *heading* metode numeris

Pada gerak *pitch*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.58. Gerak *pitch* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 4.276 deg/m pada frekuensi 0.157rad/s

Tabel 4.58. Variasi *Heading* RAO *pitch* tertambat

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
0 deg	0.157	4.276
22,5 deg	0.157	3.683
45 deg	0.157	3.100



Gambar 4.73. Grafik RAO *pitch* tertambat variasi *heading* metode numeris

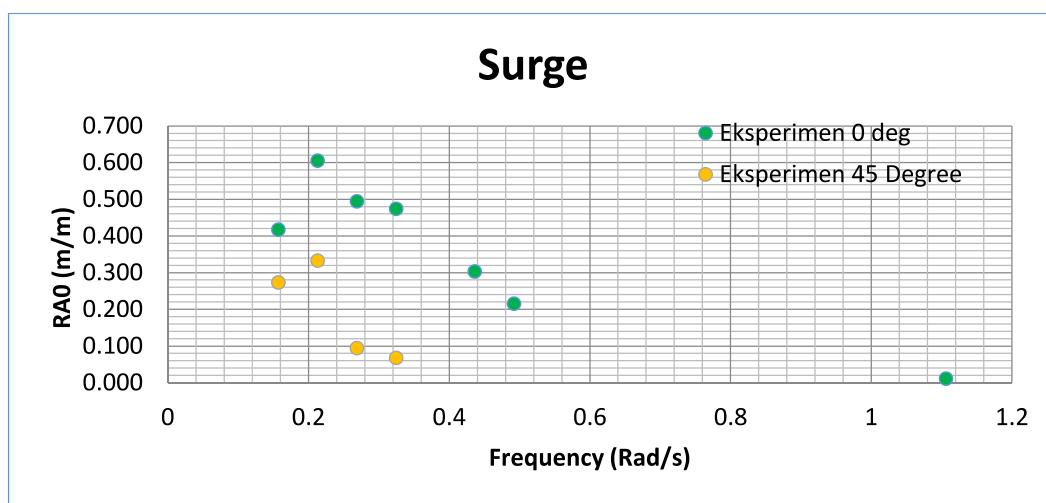
4.7.2 Perbandingan RAO Metode Eksperimen Kondisi Tertambat

Metode eksperimen dilakukan di laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 m dan lebar 3 m. Pada metode eksperimen hanya dilakukan 2 variasi arah datang gelombang karena batas waktu eksperimen tidak mencukupi untuk dilakukan semua variasi. Variasi yang dilakukan yaitu pada arah datang gelombang 0 derajat dan 45 derajat.

Pada gerak *surge*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.59. Gerak *surge* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 0.605 mm/mm pada frekuensi 0. 0.2129 rad/s. Tabel 4.61 dapat diplot menjadi sebuah grafik yang disajikan pada Gambar 4.76.

Tabel 4.59. Variasi *Heading* RAO *surge* tertambat metode eksperimen

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.2129	0.605
45 deg	0.2129	0.382



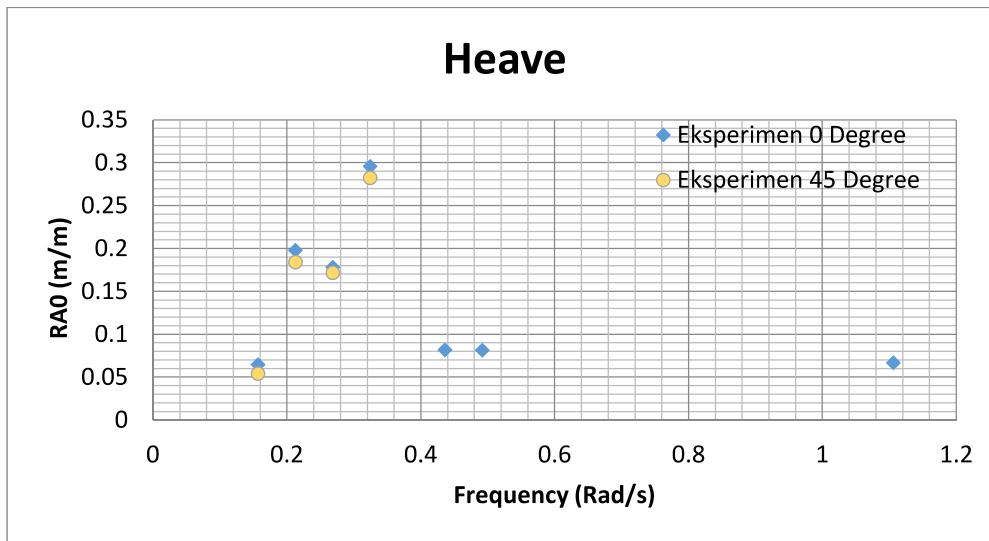
Gambar 4.74. Grafik RAO *surge* tertambat variasi *headingg* metode eksperimen

Pada Tabel 4.60. Gerak *heave* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 0.292 mm/mm pada frekuensi 0.325 rad/s. Pada metode eksperimen terjadi perbedaan gerakan *heave*. Hal ini dikarenakan *error*

pada saat *setting* di kolam. Error terjadi karena *setting* variasi dilakukan pada hari yang berbeda sehingga menyebabkan *setting* model eksperimen dikolam tidak sama dengan kondisi dasar. Tabel 4.60 dapat diplot menjadi sebuah grafik yang disajikan pada Gambar 4.76.

Tabel 4.60. Variasi *Heading RAO heave* tertambat metode eksperimen

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
0 deg	0.3245	0.295
45 deg	0.3245	0.282

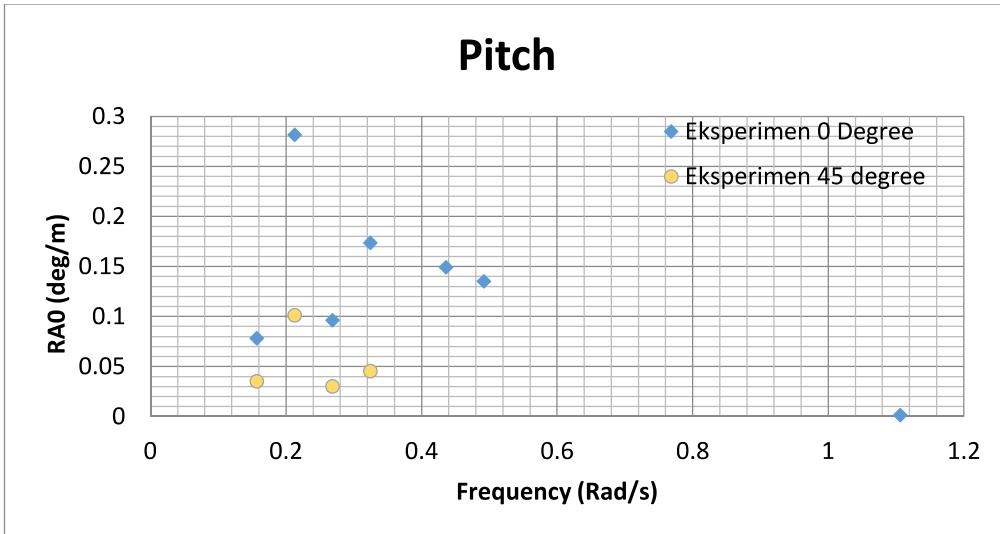


Gambar 4.75. Grafik RAO *heave* tertambat variasi *heading* metode eksperimen

Pada gerak *pitch*, arah datang gelombang mempengaruhi besar gerak, rangkuman hasil terdapat pada Tabel 4.61. Gerak *pitch* terbesar didapat pada arah datang gelombang 0 derajat sebesar 0.2815 deg/mm pada frekuensi 0.2129 rad/s. Tabel 4.61 dapat diplot menjadi sebuah grafik yang disajikan pada Gambar 4.76.

Tabel 4.61. Variasi *Heading RAO pitch* tertambat

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (deg/m)
0 deg	0.2129	0.2815
45 deg	0.2129	0.089



Gambar 4.76. Grafik RAO *pitch* tertambat variasi *heading* metode eksperimen

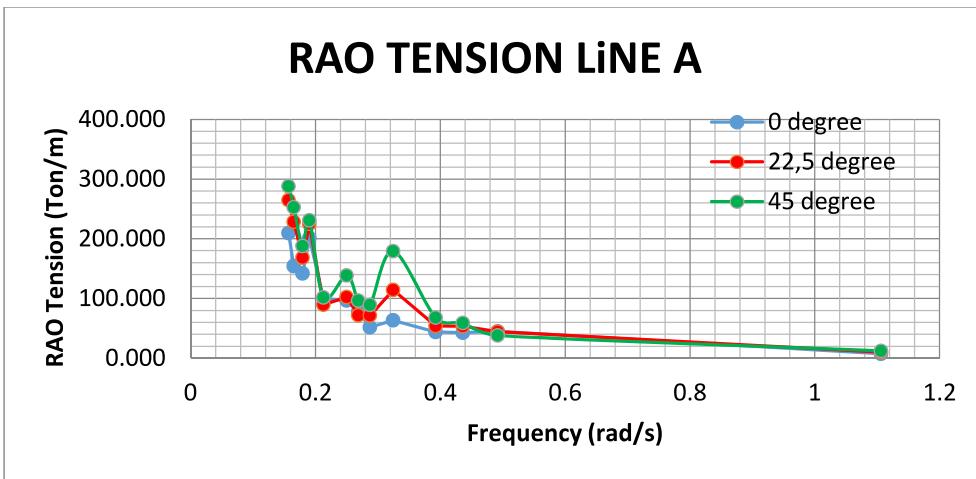
4.7.3 Perbandinan RAO *Tension* Tali Tambat Metode Numeris

Tegangan tali tambat dihitung dengan menggunakan Ansys Aqwa kemudian disajikan dalam bentuk RAO *tension*. Variasi dilakukan terhadap arah datang gelombang yaitu 0 derajat, 22,5 derajat, 45 derajat.

RAO *tension* pada tali *Line A* mengalami kenaikan signifikan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. RAO *tension* terbesar terjadi di arah 0 deg dengan besar 287.902 ton/m pada frekuensi 0.157 rad/s. Nilai maksimal RAO *tension* *Line A* pada tiap-tiap arah dapat dilihat pada Tabel 4.62. Gambar 4.72 merupakan grafik RAO *tension* pada *line A*.

Tabel 4.62. Variasi *Heading* RAO *Tension Line A*

<i>Heading</i>	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.157	224.811
22.5 deg	0.157	264.749
45 deg	0.157	287.902

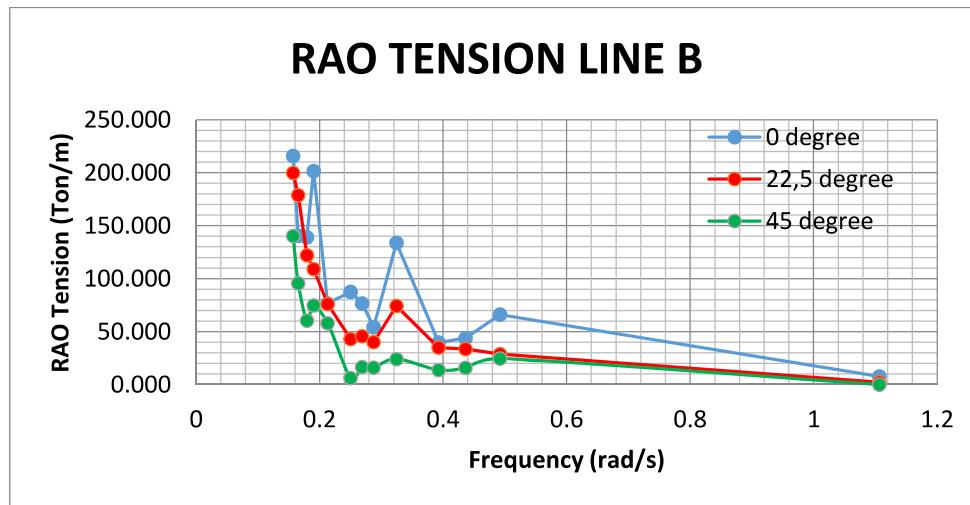


Gambar 4.77. Grafik RAO Tension line A variasi *heading* metode numeris

RAO *tension* pada *Line B* mengalami penurunan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. RAO *tension* terbesar terjadi di arah 0 deg dengan besar 224.881 ton/m. Nilai maksimal RAO *tension* *Line B* pada tiap-tiap arah dapat dilihat pada Tabel 4.63. Gambar 4.78 merupakan grafik RAO *tension* pada *line B*

Tabel 4.63. Variasi *Heading* RAO Tension *Line B*

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.157	224.881
22,5 deg	0.157	178.825
45 deg	0.157	140.275

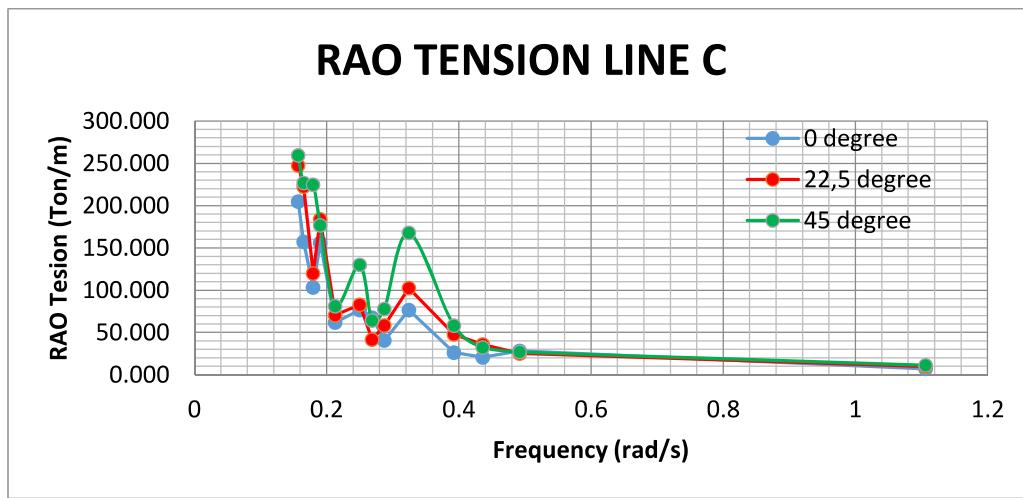


Gambar 4.78. Grafik RAO Tension line B variasi *heading* metode numeris

RAO *tension Line C* mengalami kenaikan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. RAO *tension* terbesar terjadi di arah 45 deg dengan besar 288.763 ton/m. Nilai maksimal RAO *tension Line C* pada tiap-tiap arah dapat dilihat pada Tabel 4.64. Gambar 4.79 merupakan grafik RAO *tension* pada *line C*.

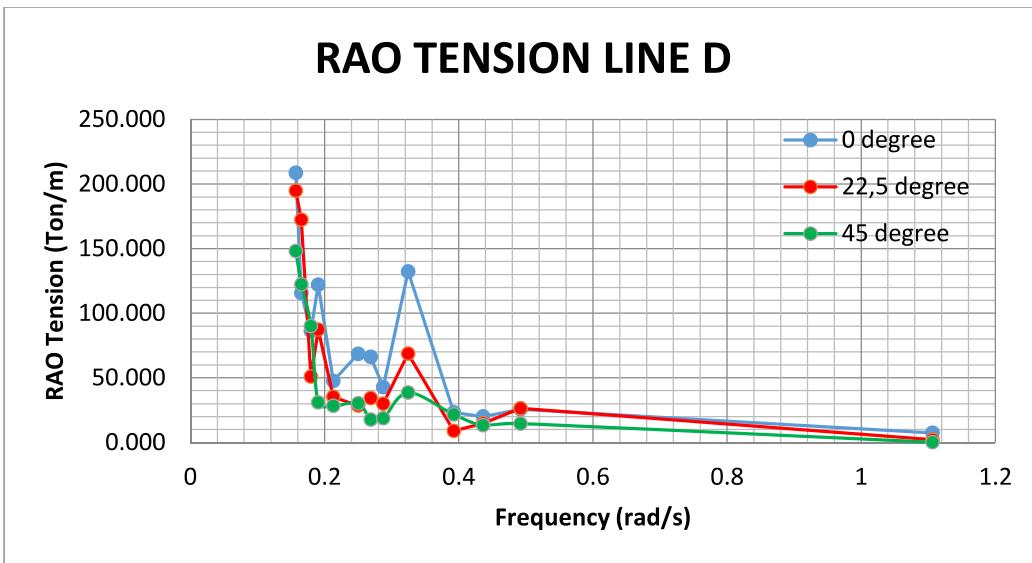
Tabel 4.64. Variasi *Heading* RAO *Tension Line C*

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.157	213.299
22.5 deg	0.157	247.516
45 deg	0.157	259.458



Gambar 4.79. Grafik RAO *Tension line C* variasi *heading* metode numeris

RAO *tension Line D* mengalami penurunan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. RAO *tension* terbesar terjadi di arah 0 deg dengan besar 208.639 ton/m. Nilai maksimal RAO *tension Line D* pada tiap-tiap arah dapat dilihat pada Tabel 4.64. Gambar 4.80 merupakan grafik RAO *tension* pada *line D*.



Gambar 4.80. Grafik RAO *Tension line D* variasi *heading* metode numeris

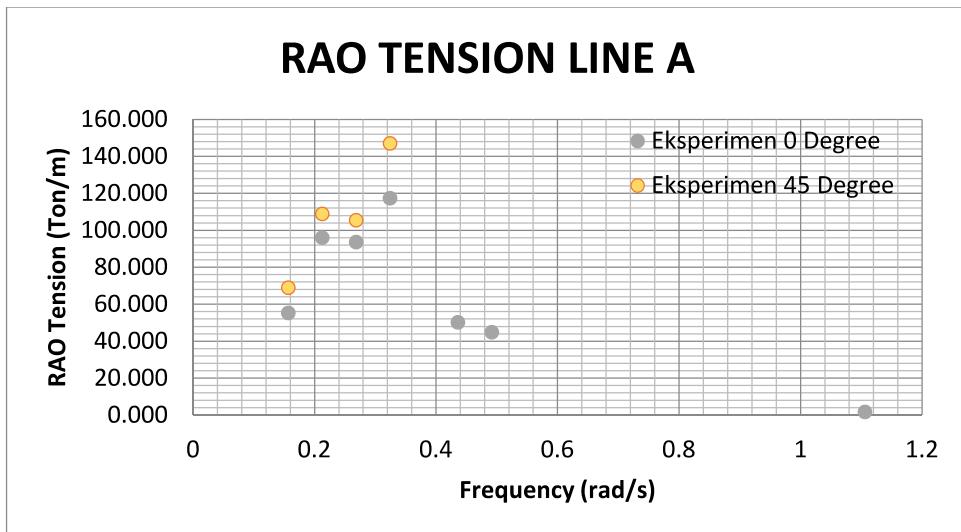
Tabel 4.65. Variasi *Heading* RAO *Tension Line D*

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Tegangan (ton/m)
0 deg	0.157	217.333
22.5 deg	0.157	198.818
45 deg	0.157	148.091

4.7.4 Perbandinan RAO *Tension* Tali Tambat Metode Eksperimen

Metode eksperimen dilakukan di laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS dengan dimensi panjang 100 m, kedalamann 1.8 m dan lebar 3 m. Pada metode eksperimen hanya dilakukan 2 variasi arah datang gelombang karena batas waktu eksperimen tidak mencukupi untuk dilakukan semua variasi. Variasi yang dilakukan yaitu pada arah datang gelombang 0 derajat dan 45 derajat.

RAO *tension* *Line A* mengalami kenaikan signifikan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. RAO *tension* terbesar terjadi di arah 45 deg dengan besar 146.983 ton/m pada frekuensi 0.324 rad/s (Gambar 4.81).



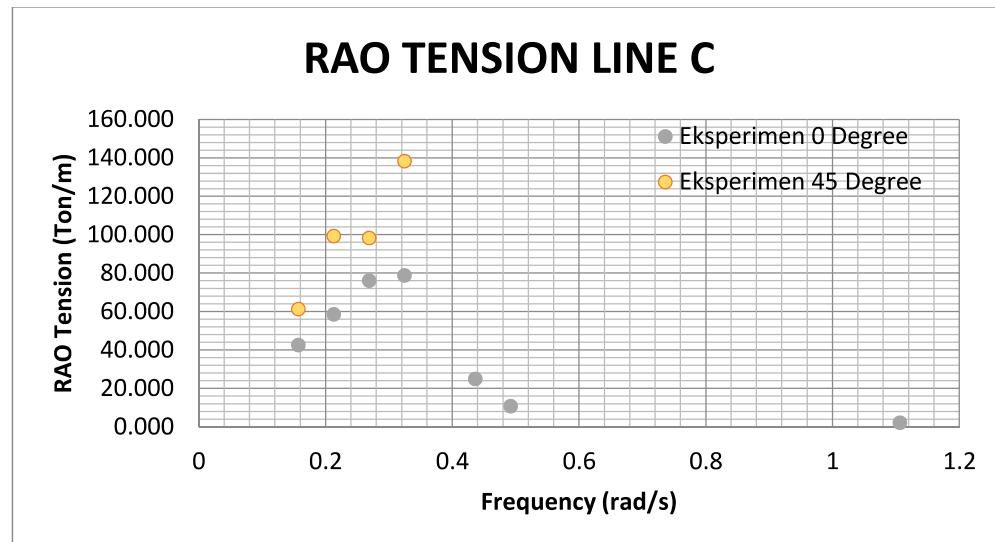
Gambar 4.81. Grafik RAO *Tension line A* variasi *heading* metode eksperimen

Tabel 4.66. Variasi *Heading* RAO *Tension Line A* metode eksperimen

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Tension (ton/m)
0 deg	0.324	117.313
45 deg	0.324	146.983

Pada eksperimen variasi arah datang gelombang 45 derajat load cell B mengalami kerusakan sehingga tidak memberikan respon tegangan yang valid. Namun tidak menjadi masalah karena letak *loadcell* B pada simetris dengan *loadcell* B sehingga nilainya mendekati *loadcell* D. Pada studi parametrik ini tegangan tali B tidak dibandingkan antara arah datang gelombang 0 derajat dengan 45 derajat.

RAO *tension Line C* mengalami kenaikan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. RAO *tension* terbesar terjadi di arah 45 deg dengan besar 138.232 ton/m.

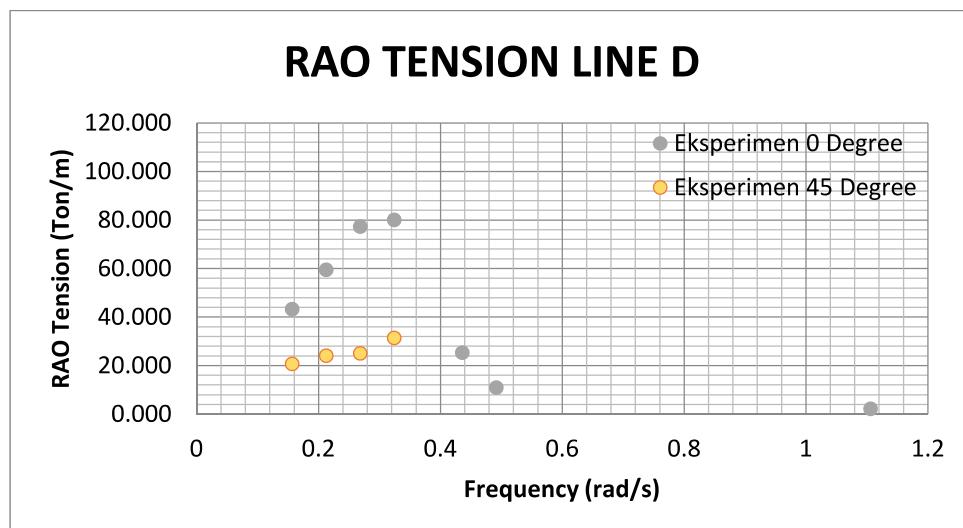


Gambar 4.82. Grafik RAO *Tension line C* variasi *heading* metode eksperimen

Tabel 4.67. Variasi *Heading* RAO *Tension Line C* metode eksperimen

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Tension (ton/m)
0 deg	0.324	78.740
45 deg	0.324	138.232

RAO *tension line D* mengalami penurunan seiring dengan berubahnya arah *heading* gelombang dari 0 deg menuju 45 deg. RAO *tension* terbesar terjadi di arah 0 deg dengan besar 80.00ton/m.



Gambar 4.83. Grafik RAO *Tension line D* variasi *heading* metode eksperimen

Tabel 4.68. Variasi *Heading* Tension Line D metode eksperimen

Heading	Frekuensi (rad/s)	RAO Tension (ton/m)
0 deg	0.324	80.00
45 deg	0.324	31.359

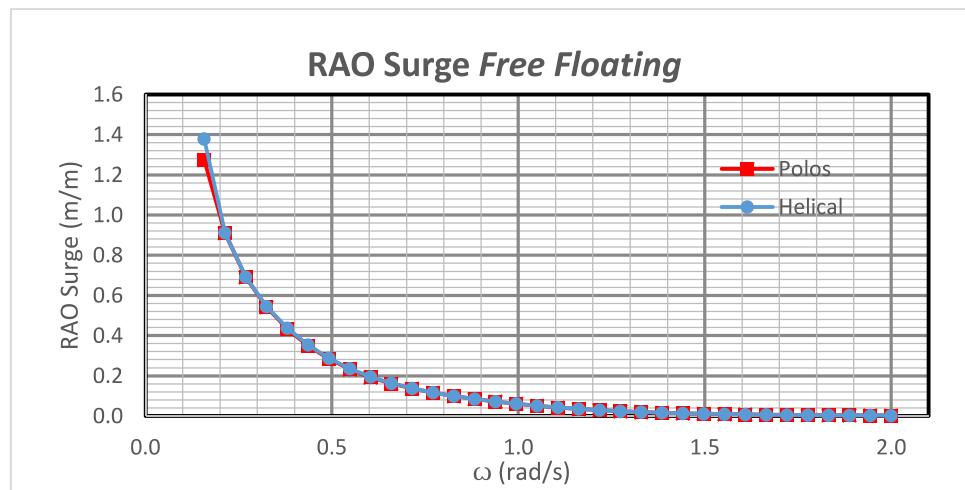
4.7.5 Perbandingan RAO SPAR Dengan *Helical Strakes* dan Tanpa *Helical Strakes*

Hasil RAO dari SPAR dengan helical strakes akan dibandingkan dengan SPAR tanpa helical strakes. Data kedua SPAR sama-sama diambil dari data Mini SPAR *Joint Industry Project* (1995). Kedua SPAR dibandingkan dengan kesamaan displacemen. Gerakan surge, heave, pitch kondisi free floating dapat dilihat pada Gambar 4.102, 4.103, 4.104.

Pada gerakan surge SPAR dengan *helical strakes* mengalami respon lebih besar dibandingkan dengan SPAR tanpa *helical strakes*. Perbandingan RAO surge *free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* dapat dilihat pada Tabel 4.78.

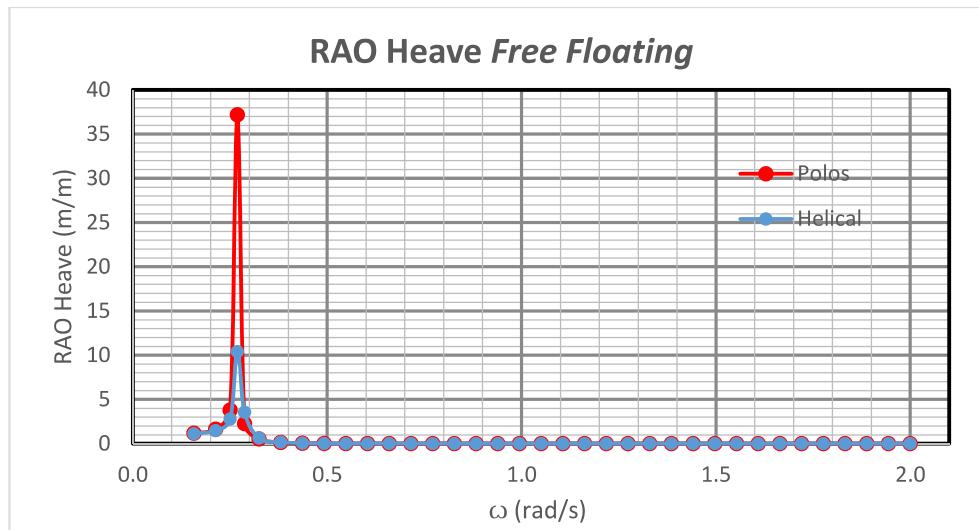
Tabel 4.69 Perbandingan RAO surge *free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.378
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.1571	1.274



Gambar 4.84. Grafik RAO mode gerak *surge* SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* kondisi *free floating*

Pada gerakan *heave* SPAR dengan *helical strakes* mengalami penurunan respon yang signifikan dibandingkan dengan SPAR tanpa *helical strakes*. Perbandingan RAO *heave free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* dapat dilihat pada Tabel 4.69.

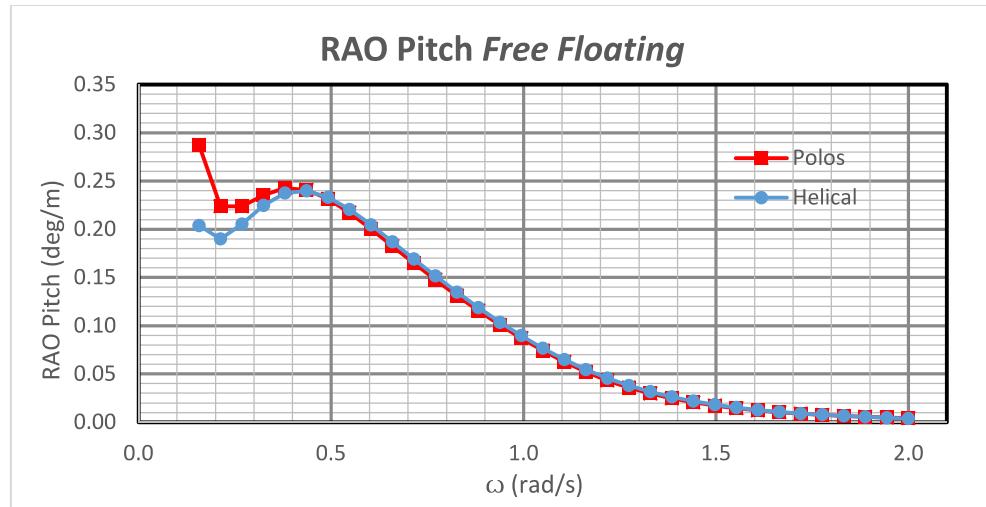


Gambar 4.85. Grafik RAO mode gerak *heave* SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* kondisi *free floating*

Tabel 4.70 Perbandingan RAO *heave free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Strakes</i>	0.2688	10.4024
Tanpa <i>Helical Strakes</i>	0.2688	37.18042

Pada gerakan *pitch* SPAR dengan *helical strakes* memiliki respon yang lebih tinggi pada frekuensi rendah kemudian pada frekuensi tinggi membesar terhadap SPAR tanpa *helical strakes*. Perbandingan RAO *pitch free floating* SPAR *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* dapat dilihat pada Tabel 4.80.



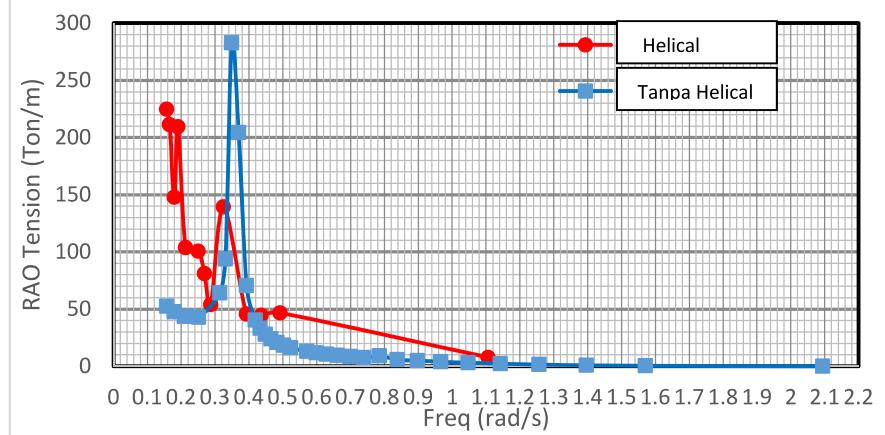
Gambar 4.86. Grafik RAO mode gerak *pitch* SPAR dengan *helical stakes* dan tanpa *helical stakes* kondisi *free floating*

Tabel 4.71 Perbandingan RAO *pitch free floating* SPAR *helical stakes* dan tanpa *helical stakes*

SPAR	Frekuensi (rad/s)	RAO Terbesar (m/m)
<i>Helical Stakes</i>	0.359	0.239
Tanpa <i>Helical Stakes</i>	0.1571	0.287

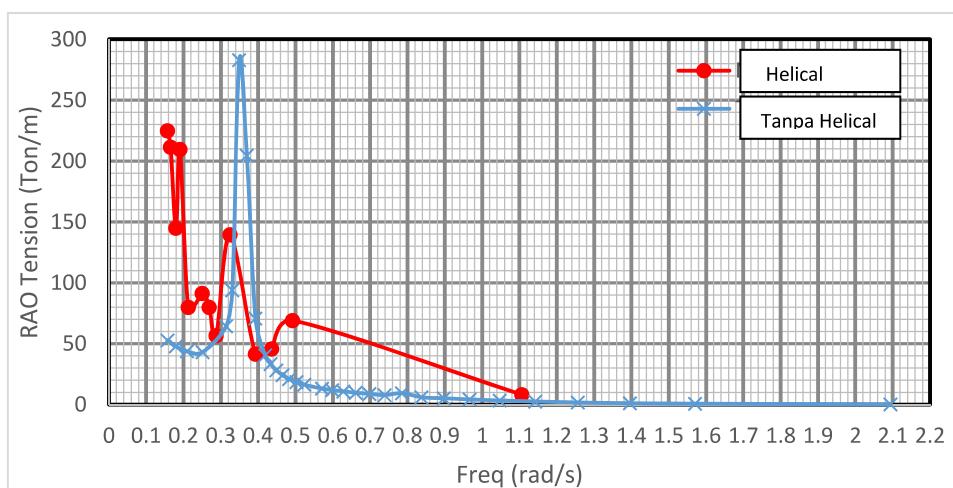
4.7.6 Perbandingan RAO *Tension* Tali Tambat SPAR Dengan *Helical Stakes* dan Tanpa *Helical Stakes*

Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical stakes* dan tanpa *helical stakes* Tali tambat 1 pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO *tension* terbesar SPAR dengan *helical stakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO *tension* tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical stakes* bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR dengan *helical stakes* adalah 224,81 Ton/m dan nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR tanpa *helical stakes* adalah 282,86 Ton/m. Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical stakes* dan tanpa *helical stakes* Tali tambat A dapat dilihat pada Gambar 4.87.



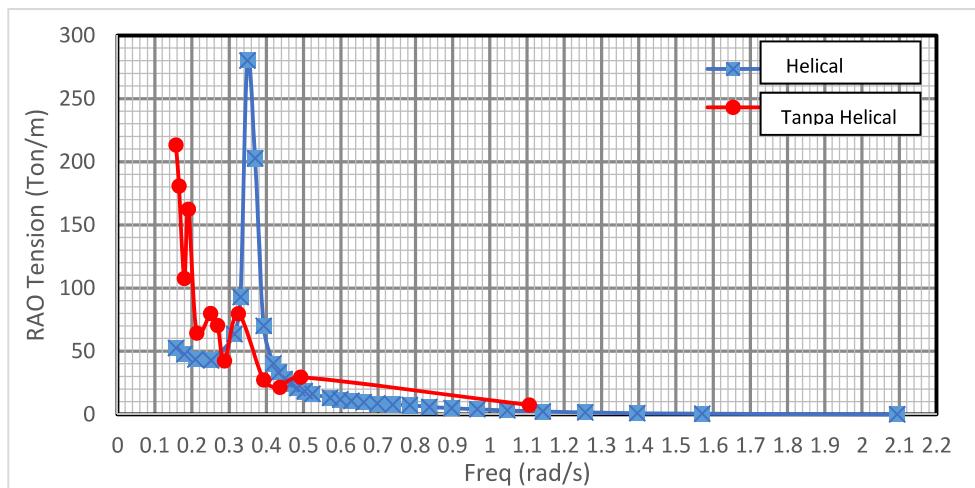
Gambar 4.87 RAO *tension* tali tambat A tertambat

Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical stakes* dan tanpa *helical stakes* Tali tambat B pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO *tension* terbesar SPAR dengan *helical stakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO *tension* tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical stakes* bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR dengan *helical stakes* adalah 224,81 Ton/m dan nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR tanpa *helical stakes* adalah 282,86 Ton/m. Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical stakes* dan tanpa *helical stakes* Tali tambat B dapat dilihat pada Gambar 4.88.



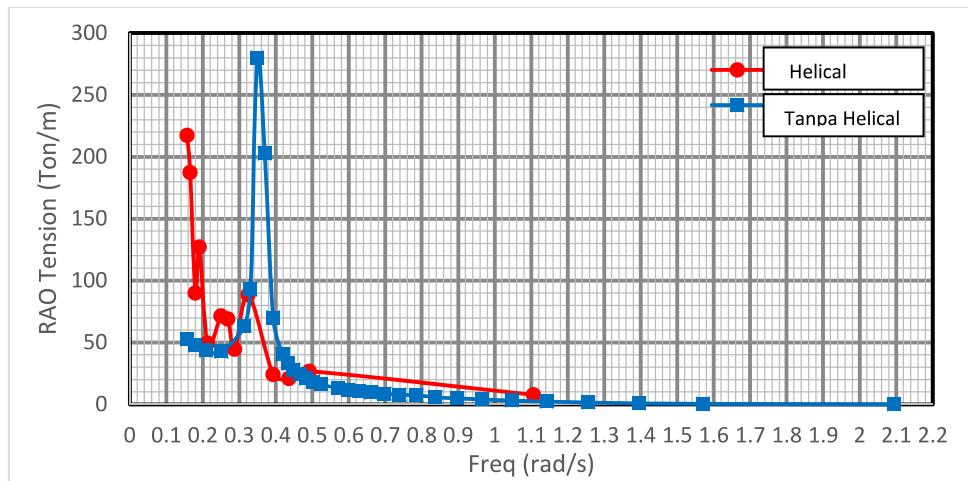
Gambar 4.88 RAO *tension* tali tambat B tertambat

Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat C pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO *tension* terbesar SPAR dengan *helical strakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO *tension* tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical strakes* bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR dengan *helical strakes* adalah 213,299 Ton/m dan nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR tanpa *helical strakes* adalah 280,17 Ton/m. Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat C dapat dilihat pada Gambar 4.89.



Gambar 4.89 RAO *tension* tali tambat C tertambat

Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat D pada penelitian ini memiliki pergeseran frekuensi alami. Dimana frekuensi dengan nilai RAO *tension* terbesar SPAR dengan *helical strakes* memiliki frekuensi dengan nilai RAO *tension* tertinggi, yaitu 0,1571 rad/s sedangkan pada SPAR tanpa *helical strakes* bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi, yaitu 0,3491 rad/s. Sedangkan untuk nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR dengan *helical strakes* adalah 217,33 Ton/m dan nilai RAO *tension* tertinggi pada SPAR tanpa *helical strakes* adalah 280,87 Ton/m. Perbandingan RAO *tension* SPAR dengan *helical strakes* dan tanpa *helical strakes* Tali tambat C dapat dilihat pada Gambar 4.90.



Gambar 4.90 RAO *tension* tali tambat D tertambat

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1. KESIMPULAN

Dari perhitungan dan pembahasan yang telah dilakukan pada BAB IV maka dapat ditarik kesimpulan. Berikut ini adalah kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini:

1. Studi Numeris dan Eksperimen gerak SPAR kondisi free floating menghasilkan RAO tertinggi pada frekuensi yang sama, ada perbedaan yang signifikan di eksperimen *surge* akibat adanya tali penahan *drifting*. Mode gerak *surge* pada eksperimen RAO tertinggi terjadi pada frekuensi 0.157 rad/s sebesar 0.9823 m/m sedangkan numeris pada frekuensi 0.157 sebesar 1.2742 m/m. Mode gerak *heave* pada eksperimen RAO tertinggi terjadi pada frekuensi 0.251 rad/s sebesar 3.6231 m/m sedangkan numeris pada frekuensi 0.251 sebesar 10.4024. Mode gerak *pitch* pada eksperimen RAO tertinggi terjadi pada frekuensi 0.436 rad/s sebesar 0.23983.6 deg/m sedangkan numeris pada frekuensi 0.436 sebesar 0.2543 deg/m.
2. Studi Numeris dan Eksperimen gerak SPAR kondisi tertambat menghasilkan nilai RAO yang sesuai pada frekuensi tinggi. Pada frekuensi rendah nilai eksperimen memiliki nilai yang jauh lebih rendah. Hal ini dikarenakan pembangkitan gelombang pada *wave maker* metode eksperimen terlalu singkat sehingga belum memberikan energi gelombang dengan cukup. Karakteristik gerak SPAR pada metode numeris menghasilkan nilai yang bervariasi pada kondisi tertambat dengan variasi *heading* 0° , 22.5° dan 45° . Nilai terbesar gerakan *surge* terjadi saat arah 0 dengan besar 1.367 m/m pada frekuensi 0.1904 rad/s. Gerakan *heave* mempunyai nilai terbesar berada di 0 derajat dengan besar 0.778 m/m terjadi di frekuensi 0.324 rad/s, semua beradapada frekuensi 0.324. Nilai terbesar gerakan *pitch* terjadi saat arah 0 dengan besar 4.276 deg/m terjadi pada frekuensi 0.157 rad/s
3. Studi Numeris dan Eksperimen gerak SPAR kondisi tertambat menghasilkan nilai RAO *tension* yang sesuai pada frekuensi tinggi. Pada

frekuensi rendah nilai eksperimen memiliki nilai yang jauh lebih rendah. Hal ini dikarenakan pembangkitan gelombang pada *wave maker* metode eksperimen terlalu singkat sehingga belum memberikan energi gelombang secara konsisten. Semua tali memiliki nilai terbesar pada frekuensi rendah hal ini dikarenakan pada frekuensi rendah struktur akan bergerak mengikuti pola gelombang dengan demikian akan mengakibatkan tegangan tali besar. Pada metode numeris tegangan tiap tali menunjukkan karakter yang berbeda pada arah datang 0° , 22.5° dan 45° . Tali Line A menunjukkan nilai RAO *tension* terbesar saat *heading* 45° dengan besar 287.902 ton/m pada frekuensi 0.157 rad/s. Tali Line B menunjukkan nilai RAO tension terbesar saat *heading* 0° dengan besar 224.881 ton/m pada frekuensi 0.157 rad/s. Tali Line C menunjukkan nilai terbesar saat *heading* 45° sebesar 259.458 ton/m pada frekuensi 0.157 rad/s. Tali Line D menunjukkan nilai terbesar saat *heading* 0° dengan besar 224.881 ton/m yang terjadi pada frekuensi 0.157 rad/s. Dengan, begitu tali yang *inline* dengan arah datang gelombang akan mengalami nilai RAO teganan yang paling besar dari tali lainnya.

4. Pada gerakan *surge* SPAR dengan *helical strakes* mengalami respon lebih besar dibandingkan dengan SPAR tanpa *helical strakes* kenaikan 8%. Pada gerakan *heave* SPAR dengan *helical strakes* mengalami penurunan respon yang signifikan dibandingkan dengan SPAR tanpa *helical strakes* yaitu 70 %. Pada gerakan *pitch* SPAR dengan *helical strakes* mengurangi RAO 17 %

5.2. SARAN

Saran yang dapat diberikan yang bersifat membangun untuk penelitian lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Analisis dalam 6 mode gerakan.
2. Bentuk *helical strakes* SPAR disempurnakan menjadi silinder pipih.
3. Pada saat eksperimen disebelah struktur dipasang *wave probe* untuk memvalidasi gelombang yang mengenai struktur.
4. Pembangkitan gelombang dilakukan dalam waktu yang cukup.
5. Dalam melakukan perijinan penggunaan laboratorium pada jauh-jauh hari.

6. Pada studi eksperimen menggunakan load cell yang tahan air dan menyediakan cadangan bila terjadi kerusakan.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Montasir, dkk. 2015. "Effect of mooring line configurations on the dynamic responses of truss spar platforms." *Ocean Engineering* 96 161-172
- Hong, dkk. 2015. "An experimental study of the effect of mooring systems on the dynamics of a SPAR buoy-type floating offshore wind turbine." *Ocean Engineering* 7 559 -579
- Lim SJ, Rho JB and Choi HS (2005) An experimental study on motion characteristics of cell spar platform. In *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, Korea, June 19–24 , pp.233–237.
- Le e et all. 2002. "Heave and pitch motions of a spar platform with damping plate." Japan : The International Offshore And Polar Engineering Conference. ISBN 1-880653-58-3 (set) ISSN 1098-6189
- Jose Geethu, Vivek Philip. 2015. "An Effectiveness of Mooring lines on Spar Platform ".ISSN 2278 – 0211. Vol 4 Issue 11
- Jun B. Rho, Hang S. Choi. 2002. "Heave and Pitch Motions of a Spar Platform with Damping Plate". *Naval Architecture and Ocean Engineering*. ISBN 1-880653-58-3 (Set); ISSN 1098-6189 (Set)
- Jose Geethu, Vivek Philip. 2003 "An Experimental Study for Mooring Effects on the Stability of Spar Platform". *Naval Architecture and Ocean Engineering*
- Ran.Z , M.H. Kim 2015. "Nonliner coupled responses of tethred spar platform in waves." *Civil Engineering Vol. 7, No.2, June 1997 (ISSN 1053-5381)*
- N.M. Khairuddina, Mohamad Pauzib, Jaswar Kotoa. 2014. "Experimental Analysis on the Mooring Lines Force Behaviour of Semi-submersible in Regular Waves". *Department of Aeronautics, Automotive and Ocean Engineering*
- Vegard Holland, Tahsin Tezdogan, and Elif Oguz. 2017. "Full-scale CFD investigations of helical strakes as a means of reducing the vortex induced forces on a semi-submersible". *Ocean Engineering* 137 338-351.

- Liqin Liu, Bin Zhou and Yougang Tang . 2014 . “Study on the nonlinear dynamical behavior of deepsea Spar platform by numerical simulation and model experiment”. *Journal of Vibration and Control* 2014, Vol. 20(10) 1528–1537
- D. H. Wood and D. Li Tang . 2002 . “Assessment of the Accuracy of Representing a Helical Vortex by Straight Segments”. *AIAA JOURNAL* Vol. 40, No. 4, April 2002
- D. H. Wood and D. Li Tang . 2002 . “Assessment of the Accuracy of Representing a Helical Vortex by Straight Segments”. *AIAA JOURNAL* Vol. 40, No. 4, April 2002
- Wilson, J. E., and J.C Tinsley. 1989. “Vortex Load Reduction ; Experiments in optimal helical strake geometry for rigid cylinder.” *Journal of Energy Resources Technology*, 3 ,72-76
- Blevins, Robert D. 2001. *Flow Induced Vibration*. Florida: Krieger Publishinh Company
- Rho, Jun B., and Hang S. Choi. 2003. “An Experimental Study For Mooring Effects on the Stability of SPAR Platform.” *Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers .
- Deep Oil Technology Inc. 1995. *Spar Model Test Joint Industry Project*. California: Deep Oil Technology Inc.
- Djatmiko, Eko Budi. 2012. *Perilaku Dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press
- Journee, J.M.J, and W.W. Massie. 2001. *Offshore Hydromechanics* . 1st. Delft : TU Delft.
- Rigzone. 1999. *How Do Spars Work?*http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=307
- Faltinsen, O. M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: University of Cambridge .
- Chakrabarti, Subrata K. . 1994. *Hydrodynamics of Offshore Structure* . Dorchester: Computational Mechanics Publications
- Chen, X. B. 2011. “Offshore hydrodynamics and applications.” *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering* Vol 4, No. 3 124-142

- Wichers, J.E.W. 1986. "Progress in Computer Simulations of SPM Moored Vessels." *Proc. of Offshore Technology Conference (OTC)*, Paper OTC-5157. Houston , Texas, USA,: OTC.
- Wichers, J.E.W, and R.M.H Huijsmans. 1984. "On The Low Frequency Hydrodynamic Damping Force Acting on Offshore Moored Vessels." *Proc. of Offshore Technology Conference(OTC)*, Paper No. OTC-4813. Houston: USA.
- Wichers, J.E.W. . 1988. "Wave-Current Interaction Effects on Moored Tankers in High Seas." *Proc. of Offshore Technology Conference (OTC)*, Paper OTC-5631,. Houston .
- Wichers, J.E.W. 1988. "“Simulation Model for Single Point Moored Tanker”,." *MARIN Publication*, No. 797,. Wageningen: MARIN.
- . 1987. "The Prediction of the Behaviour of Single Point Moored Tankers." *Proc. of Workshop on Floating Structures and Offshore Operations*,. Wageningen.
- Mansouri, Roozbeh and hassan Hadidi. 2009. "Comprehensive Study on The Linier Hydrodynamic Analysis of a Truss SPAR in Random Waves." *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer engineering*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN A
TABULASI DISTRIBUSI MASSA
(TITIK BERAT DAN GIRASI)

Data Spar		
ID	12.80000256	cm
OD	14.00000256	cm
Draft	108.0076406	cm
Length	123.3676437	cm
Fairlead Depth	10.19124013	cm
Length	40	cm
Width	40	cm
Height	15.65257456	cm
Depth A	731.4287177	cm
Depth B	182.8571794	cm
KG	49.61768611	cm
Pitch Radius	49.17639079	cm
Roll Radius	49.17639079	cm

Perhitungan Model

Bagian	Tebal (cm)	Berat (g)	Jumlah	Total (g)
Blok A	Ballast 1	2	1628.49	1
	Ballast 2	2	1623.09	1
	Ballast 3	2.5	2094.09	1
	Ballast 4	1	663.5899	1
	Cap	0.3	47.46	1
Blok B	Ballast 1	2.5	2096.69	1
	Ballast 2	0.8	465.9899	1
	Ballast 3	0.5	179.4899	1
Topside	0.3	599.5	1	599.5
Tambahan	Ulir	352.0899	1	352.0898755
	Pipa	-	4087.53	1
	Penyambung	-		1
	Helical Stakes		96.64	3
	Mur	-		2
Total				14127.93

Perhitungan VCG

1. Blok A

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel	Massa (g)	Momen (g.cm)
<i>Ballast 1</i>	2	6.8	1628.49	11073.73115
<i>Ballast 2</i>	2	4.8	1623.09	7790.831403
<i>Ballast 4</i>	1	3.3	2094.09	6910.496589
<i>Ballast 3</i>	2.5	1.6	663.5899	1028.564307
<i>Cap</i>	0.3	0.2	47.46424	7.119635947
Total			6056.724	26810.74309

$$\text{VCG Blok A} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 4.426608 \text{ cm dari keel}$$

3. Tambahan

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel	Massa	Momen
Ular (130 cm)	-	65.3	352.0899	22991.46887
Pipa	-	61.7	4087.53	252200.5919
Helical 1	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 2	-	54.0	96.64	5218.54397
Helical 3	-	54.0	96.64	5218.54397
<i>Topside</i>	0.3	123.55	599.5	74068.225
Total			5329.039	364915.9177

$$\text{VCG} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 68.47687 \text{ cm dari keel}$$

4. Total

Bagian	Tebal (cm)	VCG from keel	Massa	Momen
Blok A	-	4.4	6056.724	26810.74309
Blok B	-	110.2	2742.17	302134.8265
Tambahan	-	68.5	5329.039	364915.9177
Total			14127.93	693861.4873

$$\text{VCG total} = \frac{\text{Momen massa}}{\text{massa}} = 49.11274 \text{ cm dari keel}$$

$$= \frac{\text{Model-Teori}}{\text{Teori}} \times 100\% \\ = -1.0\% \text{ memenuhi}$$

Perhitungan Girasi

Bagian	LCG	TCG	VCG	Ditinjau	Massa	I_{ox}	I_{oy}	y²+z²	x²+z²	w*(y²+z²)	w*(x²+z²)	I_x (g.cm)	I_y (g.cm)
Blok A	<i>Ballast 1</i>	0.0	0.0	6.5	-42.6	1628.5	16446.1	1815.8	1815.8	2957086.4	2957086.4	2973532.5	2973532.5
	<i>Ballast 2</i>	0.0	0.0	4.5	-44.6	1623.1	16391.5	1990.3	1990.3	3230430.5	3230430.5	3246822.0	3246822.0
	<i>Ballast 3</i>	0.0	0.0	3.0	-46.1	2094.1	20624.6	2126.4	2126.4	4452841.2	4452841.2	4473465.8	4473465.8
	<i>Ballast 4</i>	0.0	0.0	1.3	-47.9	663.6	6826.0	2290.8	2290.8	1520179.6	1520179.6	1527005.6	1527005.6
	<i>Cap</i>	0.0	0.0	0.2	-49.0	47.5	471.3	2397.4	2397.4	113788.4	113788.4	114259.7	114259.7
Blok B	<i>Ballast 7</i>	0.0	0.0	112.1	62.9	179.5	1756.6	1756.6	1756.6	3961.1	3961.1	710977.1	710977.1
	<i>Ballast 6</i>	0.0	0.0	111.4	62.3	466.0	4556.9	4556.9	4556.9	3879.7	3879.7	1807902.1	1807902.1
	<i>Ballast 5</i>	0.0	0.0	109.8	60.6	2096.7	20748.5	20748.5	20748.5	3676.9	3676.9	7709270.9	7709270.9
	<i>Ulir</i>	0.0	0.0	65.3	16.2	352.1	495874.0	495874.0	495874.0	262.0	262.0	92257.2	92257.2
	<i>Pipa</i>	0.0	0.0	61.7	12.6	4087.5	5287070.0	5287070.0	5287070.0	158.4	158.4	647624.4	647624.4
Tambahan	<i>Helical 1</i>	7.8	0.0	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	101469.2	83.9	83.9	8112.7	8112.7
	<i>Helical 2</i>	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	101469.2	41.9	41.9	7308.3	7308.3
	<i>Helical 3</i>	4.3	6.8	54.0	4.9	96.6	101469.2	101469.2	101469.2	41.9	41.9	6790.0	6790.0
	<i>Topside</i>	0.0	0.0	123.6	74.4	599.5	79937.8	79937.8	79937.8	5540.9	5540.9	3321772.8	3321772.8
												Total	32835461.9

5. Jari Jari Girasi

$$R_{xx} = 48.2095 \text{ cm}$$

$$R_{yy} = 48.2092 \text{ cm}$$

6. Check error

Err $R_{xx} =$	-1.97%	memenuhi
Err $R_{yy} =$	-1.97%	memenuhi

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B

DESIAN TALI TAMBAT

- PEMILIHAN SPESIFIKASI WIRE ROPE

4

WIRE ROPE

ROPE SPECIFICATIONS

SPIRAL STRAND

4.34

- Designed to improve service life
- Surface finish: hot dip galvanised
- Sheathing: HDPE yellow colour with longitudinal dark stripe
- Tensile grades of wire optimised to improve wire ductility
- Rope, size, mass and MBF may be customised according to project design requirements
- Supply includes: Quality plan - Fatigue design calculations
Wear design calculation - Corrosion design calculation



Wire rope dia		Mass (unsheathed)		Mass (sheathed)		Metallic Area	MBF	Stiffness	Torque 25% MBF	Turns 25% MBF
Uncoated mm	Sheathed mm	Air kg/m	Sea water kg/m	Air kg/m	Sea water kg/m	mm ²	kN	MN	Nm	Nm
77	91	29	29	32	29	3440	5480	525	750	0.5
83	99	34	29	37	29	4000	6370	610	950	0.5
89	105	39	33	42	33	4600	7330	700	1200	0.4
96	114	46	38	49	38	5350	8530	820	1500	0.4
102	122	51	43	55	43	6040	9360	925	1750	0.4
108	128	58	49	61	48	6770	10490	1035	2100	0.4
115	137	65	55	69	54	7680	11760	1175	2500	0.3
121	145	72	61	76	60	8500	12720	1300	2850	0.3
127	151	80	67	84	66	9370	13930	1435	3300	0.3
134	160	89	75	93	73	10430	15510	1595	3850	0.3
140	168	97	82	101	79	11390	16930	1740	4400	0.3
147	175	107	90	112	88	12550	18660	1920	5100	0.3

All dimensions are approximate

Spesifikasi wire rope dipilih

Diameter	115	mm
Masa jenis (udara)	65	kg/m
Masa jenis (air)	55	kg/m
MBF	11760	kN
Kekakuan	1175	MN

MODULUS ELASTISITAS SENAR PANCING (NYLON 6) ENGINEERING TOOLBOX

Material	<u>Tensile Modulus (E)</u> (Young's Modulus, Modulus of Elasticity)		<u>Ultimate Tensile Strength</u> - σ_u - (MPa)	<u>Yield Strength</u> - σ_y - (MPa)
	(10^6 psi)	(GPa)		
ABS plastics		1.4 - 3.1	40	
A106 Seamless Carbon Steel Pipe - Grade A			400	248
Aluminum	10.0	69	110	95
Aluminum Alloys	10.2			
Nickel Silver	18.5			
Nickel Steel	29			
Niobium (Columbium)	15			
Nylon-6		2 - 4	45 - 90	45
Nylon-66			60 - 80	
Oak Wood (along grain)		11		
Osmium (Os)	80	550		
Phenol-formaldehyde molding compounds			45 - 52	

Sesuai bahan senar pancing yaitu dengan menggunakan nylon 6. Maka modulus elastisitasnya adalah 2 Gpa.

LAMPIRAN C

PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali	Periode 1 kali	Periode 10 kali	Periode 1 kali
1	34	3.4	34.5	3.45
2	34.2	3.42	34.2	3.42
3	34.3	3.43	35.1	3.51
4	34.3	3.43	34.2	3.42
5	34.4	3.44	34.6	3.46
6	34.3	3.43	34.4	3.44
7	34.3	3.43	34.2	3.42
8	34.4	3.44	34.7	3.47
9	34.7	3.47	34.5	3.45
10	34.7	3.47	34.7	3.47
11	33.9	3.39	34.5	3.45
12	33.9	3.39	34.5	3.45
13	34.3	3.43	34.3	3.43
14	33.9	3.39	34.7	3.47
15	34	3.4	34.2	3.42
16	34.3	3.43	34.7	3.47
17	34.5	3.45	34.5	3.45
18	34.4	3.44	34.6	3.46
19	34.4	3.44	34.9	3.49
20	34.4	3.44	35	3.5
21	34.5	3.45	35	3.5
22	34.5	3.45	35	3.5
23	34.2	3.42	34.9	3.49
24	34.2	3.42	35	3.5
25	34.4	3.44	34.9	3.49
26	34.5	3.45	34.9	3.49
27	34.4	3.44	34.5	3.45
28	34.4	3.44	34.5	3.45
29	34.5	3.45	34.8	3.48
30	34.5	3.45	35	3.5
31	34.6	3.46	35	3.5
32	34.2	3.42	35.2	3.52
33	34	3.4	34.7	3.47
34	34.1	3.41	34.5	3.45
35	34.4	3.44	34.7	3.47

PENGUKURAN PERIODE GERAK PENDULUM SPAR
(LANJUTAN)

No	PERIODE			
	Dengan Massa Tambahan		Tanpa Massa Tambahan	
	Periode 10 kali	Periode 1 kali	Periode 10 kali	Periode 1 kali
36	34.3	3.43	34.2	3.42
37	34.5	3.45	35	3.5
38	34.5	3.45	35	3.5
39	34.1	3.41	35.2	3.52
40	34.6	3.46	35	3.5
41	34.5	3.45	34.5	3.45
42	34.7	3.47	34.7	3.47
43	34.7	3.47	34.7	3.47
44	34.6	3.46	34.7	3.47
45	34.4	3.44	34.7	3.47
46	34.2	3.42	34.6	3.46
47	34	3.4	34.6	3.46
48	34	3.4	34.5	3.45
49	34.3	3.43	35	3.5
50	34.4	3.44	35	3.5

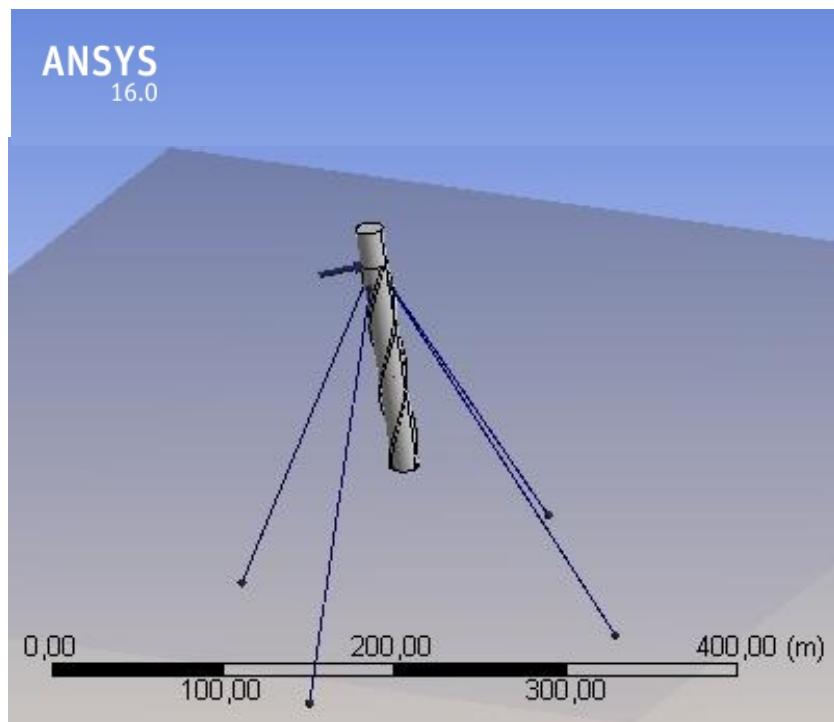
LAMPIRAN D

INPUT DAN OUTPUT ANSYS AQWA NUMERIS DAN TERTAMBAT



Project

Name	Project
Data Folder Root	Tugas Akhir
Date of Creation	19/04/2018 17:13:29
Last Modified	01/07/2018 13:18:01
Global Control	50
Geometric Features	50
Connections	50
Environment Features	50
Product Version	16.0 RELEASE



Units

TABLE 1

Length	Metre
Mass	Kilograms
Rotational Velocity	Degrees
Force	Newton
Frequency	Hertz
Time	Second

Model (A3, B3)

Geometry

TABLE 2
Model (A3, B3) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>	
State	Fully Defined	
Details of Geometry		
Attached Assembly	C:\Users\pc\AppData\Local\Temp\WB_OPRESPC_pc_10436_2\un	
Sea Geometry		
Water Depth		225 m
Water Density		1025 kg/m ³
Water Size X		1000 m
Water Size Y		1000 m
Import Preferences		
Import Solid Bodies		No
Import Surface Bodies		Yes
Import Line Bodies		Yes

Part 3

TABLE 3
Model (A3, B3) > Geometry > Part

Object Name	<i>Part 3</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3	
Part Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed

Total Structural Mass	26837614,91 kg
X Position of COG	-6,82280340697616E-04 m
Y Position of COG	6,81083125527948E-04 m
Z Position of COG	-69,76 m
Generate Internal Lid	No
Current Calculation Depth	0.0 m
Fixity Options	
Structure Fixity	Structure is Free to Move
Force Factors	
Drag Factor	1
Mass Factor	1
Slam Factor	0.0
Advanced Options	
Submerged Structure Detection	Program Controlled
Override Calculated GMX	No
Override Calculated GMY	No
Non-Linear Roll Damping	
Non-Linear Roll Damping	Excluded from Calculations

TABLE 4
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 5
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined

Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 6
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Axes

Object Name	<i>Part 3 Axes</i>
State	Fully Defined
Details of Part 3 Axes	
Visibility	Visible
Alignment Method	Global Axes
Rotation About Global Z	0.0°
Rotation About Local Y	0.0°
Rotation About Local X	0.0°
Unit Vector X	[1, 0.0, 0.0]
Unit Vector Y	[0.0, 1, 0.0]
Unit Vector Z	[0.0, 0.0, 1]

TABLE 7
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 8
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 9
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Body

Object Name	<i>Surface Body</i>
State	Fully Defined
Details of Surface Body	
Body Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Structure Type	Physical Geometry
Surface Type	Program Controlled

TABLE 10
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Point Mass

Object Name	<i>Point Mass</i>
State	Fully Defined
Details of Point Mass	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
X	-6,82280340697616E-04 m

	Y	6,81083125527948E-04 m
	Z	-69,76 m
Mass Definition		Manual
Mass		26837614,91 kg
Define Inertia Values by		via Radius of Gyration
	Kxx	59,26 m
	Kyy	59,26 m
	Kzz	59,26 m
	Ixx	94246929749,9167 kg.m ²
	Ixy	0.0 kg.m ²
	Ixz	0.0 kg.m ²
	Iyy	94246929749,9167 kg.m ²
	Iyz	0.0 kg.m ²
	Izz	94246929749,9167 kg.m ²

TABLE 11
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 5</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 5	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	8 m
Y	0.0 m

Z	-12,74 m
---	----------

TABLE 12
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 6</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 6	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-8 m
Y	0.0 m
Z	-12,74 m

TABLE 13
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 7</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 7	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	8 m

Z	-12,74 m
---	----------

TABLE 14
Model (A3, B3) > Geometry > Part 3 > Connection Point

Object Name	<i>Connection Point 8</i>
State	Fully Defined
Details of Connection Point 8	
Point Visibility	Visible
Type	Attached to Structure
Structure	Part 3
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-8 m
Z	-12,74 m

TABLE 15
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 1</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 1	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	130,55 m
Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 16
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 2</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 2	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	-130,55 m
Y	0.0 m
Z	-225 m

TABLE 17
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 3</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 3	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	130,55 m
Z	-225 m

TABLE 18
Model (A3, B3) > Geometry > Connection Point

Object Name	<i>Fixed Point 4</i>
State	Fully Defined
Details of Fixed Point 4	
Point Visibility	Visible
Type	Fixed
Definition of Position	Coordinates
Position Coordinates	
X	0.0 m
Y	-130,55 m
Z	-225 m

Connections

TABLE 19
Model (A3, B3) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Details of Connections	

TABLE 20
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data

Object Name	<i>Catenary Data</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Data	

TABLE 21
Model (A3, B3) > Connections > Catenary Data > Catenary Section

Object Name	<i>Catenary Section 1</i>
State	Fully Defined
Details of Catenary Section 1	
Section Properties	
Mass/Unit Length	65 kg/m
Equivalent Cross-Sectional Area	0,0104 m ²
Stiffness, EA	1175000000 N
Maximum Tension	11760000 N
Bending Stiffness, EI	0.0 N.m ²
Axial Stiffness Coefficient k1	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k2	0.0 N
Axial Stiffness Coefficient k3	0.0 N
Section Hydrodynamic Properties	
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter	0,115 m
Longitudinal Drag Coefficient	0,025

TABLE 22
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 6</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 6	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure

Start Fixed Point	Fixed Point 2 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 6 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 23
Model (A3, B3) > Connections > Cable 6

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000

Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 24
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 7</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 7	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 4 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 8 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled

Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	0.0 N
Initial Cable Tension at End	0.0 N

TABLE 25
Model (A3, B3) > Connections > Cable 7

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0

Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 26
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 8</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 8	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 1 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 5 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None

Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40
Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 27
Model (A3, B3) > Connections > Cable 8

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-

Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

TABLE 28
Model (A3, B3) > Connections > Cable

Object Name	<i>Cable 10</i>
State	Fully Defined
Details of Cable 10	
Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Connectivity	Fixed Point & Structure
Start Fixed Point	Fixed Point 3 (Fixed)
End Connection Point	Connection Point 7 (Part 3)
Type	Non-Linear Catenary
Cable Dynamics Properties	
Use Dynamics	Program Controlled
Number of Elements	100
Catenary Section Selection	
Section 1: Type	Catenary Section 1
Section 1: Length	245,5 m
Section 2: Type	None
Cable Properties	
Negative dZ Range	0.0 m
Positive dZ Range	1 m
Number of Vertical Partitions	15
Number of X Coordinates	40

Initial Cable Data	
Initial Cable Tension at Start	2571105,25 N
Initial Cable Tension at End	2684325,25 N

TABLE 29
Model (A3, B3) > Connections > Cable 10

	Section 1
Type	Catenary Section 1
Section Length (m)	245,5
Mass / Unit Length (kg/m)	65
Equivalent CSA (m ²)	0,0104
Stiffness, EA (N)	1175000000
Maximum Tension (N)	11760000
Bending Stiffness, EI (N.m ²)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k1 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k2 (N)	0.0
Axial Stiffness Coefficient k3 (N)	0.0
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	1
Equivalent Diameter (m)	0,115
Longitudinal Drag Coefficient	0,025
Structural Mass (kg)	-
Displaced Mass of Water (kg)	-
Added Mass (kg)	-
Coefficient of Drag * Area (m ²)	-

Mesh

TABLE 30
Model (A3, B3) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Meshed
Details of Mesh	
Defaults	
Global Control	Basic Controls
Mesh Parameters	
Defeaturing Tolerance	3 m
Max Element Size	6 m
Max Allowed Frequency	0,831 Hz
Meshing Type	Combined Meshing
Generated Mesh Information	
Number of Nodes	25261
Number of Elements	25281
Number of Diff Nodes	25152
Number of Diff Elements	25158

TABLE 31
Model (A3, B3) > Mesh > Mesh Sizing

Object Name	<i>Mesh Sizing</i>
State	Fully Defined
Details of Mesh Sizing	
Suppressed	Not Suppressed
Select Geometry	3 Bodies
Local Element Size	0,5 m

Hydrodynamic Diffraction (A4)

TABLE 32
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Diffraction (A4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Diffraction	
Analysis Type	Hydrodynamic Diffraction/Radiation

TABLE 33
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Parallel Processing	Program Controlled
Generate Wave Grid Pressures	Yes
Wave Grid Size Factor	2
Common Analysis Options	
Ignore Modelling Rule Violations	Yes
Calculate Extreme Low/High Frequencies	Yes
Calculate Drift Coefficients	Yes
Include Multi-Directional Wave Interaction	Yes
Near Field Solution	Program Controlled
Linearized Morison Drag	No
QTF Options	
Calculate Full QTF Matrix	Yes
Output File Options	
Full QTF Matrix	No

Field Point Wave Elevation	Yes
Source Strengths	No
Potentials	No
Centroid Pressures	No
Element Properties	No
ASCII Hydrodynamic Database	No
Example of Hydrodynamic Database	No

TABLE 34
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Gravity

Object Name	<i>Gravity</i>
State	Fully Defined
Details of Gravity	
Gravity	9,80665 m/s ²

TABLE 35
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Structure Selection

Object Name	<i>Structure Selection</i>
State	Fully Defined
Details of Structure Selection	
Structures to Exclude	None
Group of Structures	
Interacting Structure Groups	None
Structure Ordering	
Structure 1	Part 3

TABLE 36
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Direction

Object Name	<i>Wave Directions</i>
-------------	------------------------

State	Fully Defined
Details of Wave Directions	
Type	Range of Directions, No Forward Speed
Required Wave Input	
Wave Range	-180° to 180°
Interval	45°
Number of Intermediate Directions	7
Optional Wave Directions A	
Additional Range	None
Optional Wave Directions B	
Additional Range	None
Optional Wave Directions C	
Additional Range	None
Optional Wave Directions D	
Additional Range	None

TABLE 37
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Wave Frequency

Object Name	<i>Wave Frequencies</i>
State	Fully Defined
Details of Wave Frequencies	
Intervals Based Upon	Frequency
Frequency/Period Definition	
Range	Manual Definition
Definition Type	Range
Lowest Frequency Definition	Manual Definition
Lowest Frequency	0,025 Hz
Longest Period	40 s

Highest Frequency Definition	Manual Definition
Highest Frequency	0,3183 Hz
Shortest Period	3,14169 s
Number of Intermediate Values	32
Interval Frequency	0,00889 Hz
Additional Frequencies A	
Additional Range	None
Additional Frequencies B	
Additional Range	None
Additional Frequencies C	
Additional Range	None
Additional Frequencies D	
Additional Range	None

Solution (A5)

TABLE 38
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) >
Hydrostatic Results

Object Name	<i>Hydrostatic</i>
State	Solved
Details of Hydrostatic	
Structure	Part 3
Graphical Representation	
Show Centre of Gravity	Yes
Show Centre of Buoyancy	Yes
Show Centre of Floatation	Yes
Results	
Actual Displaced Volume	

Metacentric Height GMX	
Out of Balance Force/Weight, Fz	

TABLE 39
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) >
Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global X
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,025
Minimum Value	0,002
Maximum Value	1,274
Line B	
Structure	Undefined...

Hydrostatic Results

Structure

Part 3

Hydrostatic Stiffness

Centre of Gravity (CoG) Position:

X: -6.8228e-4 m

Y: 6.8108e-4 m

Z: -69.760002 m

Heave (Z):

Roll (RX):

Pitch (RY):

Z

2036122.1 N

3958.9004 N.

5375.6333 N.

RX

69.095848 N

18544390 N.

522.43787 N

18549784 N

RY

93.822502 N

522.43787 N

18549784 N

Hydrostatic Displacement Properties

Actual Volumetric Displacement:

Equivalent Volumetric Displacement:

26540.377 m³

26183.039 m³

Centre of Buoyancy (CoB) Position:

X: -6.8241e-4 m

Y: 6.8128e-4 m

Z: -65.901443 m

FX: -1.1322e-6

FY: 4.7292e-7

FZ: 1.3659e-2

MX: 4.1483e-5 m

MY: 3.1296e-5 m

MZ: 5.5172e-6 m

Cut Water Plane Properties

Cut Water Plane Area:	X:	202.56261 m ²
Centre of Floatation:	X:	-3.3224e-3 m
Principal 2nd Moment of Area:	X:	3295.877 m ⁴
Angle Principal Axis makes with X(FRA):		5.4801879°

Small Angle Stability Parameters

CG to CoB (BG):	X:	-3.8588603 m
Metacentric Heights (GMX/GMY):	X:	3.9827437 m
CoB to Metacentre (BMX/BMY):	X:	0.1241835 m
Restoring Moments about Principal Axes (MX/MY):	X:	18544340 N.

TABLE 40
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,27423965930939
0,03389 Hz	0,910169720649719
0,04278 Hz	0,6917804479599
0,05166 Hz	0,544902384281158
0,06055 Hz	0,437321126461029
0,06944 Hz	0,353785336017609
0,07833 Hz	0,28790870308876
0,08722 Hz	0,236033320426941
0,0961 Hz	0,195375457406044
0,10499 Hz	0,163382187485695
0,11388 Hz	0,137862652540207
0,12277 Hz	0,117065563797951
0,13165 Hz	9,96988192200661E-02
0,14054 Hz	8,48575085401535E-02
0,14943 Hz	7,19619914889336E-02
0,15832 Hz	6,11772909760475E-02
0,16721 Hz	5,12559674680233E-02
0,17609 Hz	4,27022874355316E-02
0,18498 Hz	3,53727526962757E-02
0,19387 Hz	2,92303208261728E-02
0,20276 Hz	2,41431556642056E-02
0,21165 Hz	1,99120230972767E-02
0,22053 Hz	1,64253227412701E-02
0,22942 Hz	1,35675938799977E-02
0,23831 Hz	1,12416157498956E-02
0,2472 Hz	9,34372097253799E-03
0,25608 Hz	7,79184373095632E-03
0,26497 Hz	6,49851001799107E-03
0,27386 Hz	5,38828410208225E-03
0,28275 Hz	4,73396899178624E-03
0,29164 Hz	3,9525399915874E-03
0,30052 Hz	3,31180822104216E-03
0,30941 Hz	2,76175234466791E-03
0,3183 Hz	2,26745335385203E-03

TABLE 41
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global Z
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,141
Position of Max in X	0,043
Minimum Value	2,2e-4
Maximum Value	10,402
Line B	
Structure	Undefined...

TABLE 42
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (m/m)
0,025 Hz	1,11430060863495
0,03389 Hz	1,47169673442841
0,04278 Hz	10,4024295806885
0,05166 Hz	0,625064373016357
0,06055 Hz	0,152812778949738
0,06944 Hz	4,89389486610889E-02
0,07833 Hz	1,72751415520906E-02
0,08722 Hz	6,51185400784016E-03
0,0961 Hz	2,66876234672964E-03
0,10499 Hz	1,23585166875273E-03
0,11388 Hz	6,55088340863585E-04
0,12277 Hz	3,92330170143396E-04
0,13165 Hz	2,67464958596975E-04

0,14054 Hz	2,21711728954688E-04
0,14943 Hz	2,25677198613994E-04
0,15832 Hz	2,51727818977088E-04
0,16721 Hz	2,89440184133127E-04
0,17609 Hz	3,2861961517483E-04
0,18498 Hz	3,74582916265354E-04
0,19387 Hz	4,19539079302922E-04
0,20276 Hz	4,64058568468317E-04
0,21165 Hz	5,06952812429518E-04
0,22053 Hz	5,47593168448657E-04
0,22942 Hz	5,8303406694904E-04
0,23831 Hz	6,11881900113076E-04
0,2472 Hz	6,30663824267685E-04
0,25608 Hz	6,34396739769727E-04
0,26497 Hz	6,08757545705885E-04
0,27386 Hz	5,31589903403074E-04
0,28275 Hz	5,99862542003393E-04
0,29164 Hz	5,24351955391467E-04
0,30052 Hz	4,56246139947325E-04
0,30941 Hz	3,93692083889619E-04
0,3183 Hz	3,37320700054988E-04

TABLE 43
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)</i>
State	Solved
Details of RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Distance/Rotation vs Frequency
Frequency or Period Scale	Frequency
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3

Type	RAOs (Response Amplitude Operators)
Component	Global RY
Direction	0.0°
Position of Min in X	0,318
Position of Max in X	0,069
Minimum Value	0,004
Maximum Value	0,24
Line B	
Structure	Undefined...

TABLE 44
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Diffraction (A4) > Solution (A5) > RAOs (Response Amplitude Operators) (Distance/Rotation vs Frequency)

	Line A (°/m)
0,025 Hz	0,203812978235313
0,03389 Hz	0,189928817818477
0,04278 Hz	0,205363444517119
0,05166 Hz	0,224658848984324
0,06055 Hz	0,237499204417551
0,06944 Hz	0,23976423922063
0,07833 Hz	0,23314231745945
0,08722 Hz	0,220483655730316
0,0961 Hz	0,204439287905904
0,10499 Hz	0,186911435010278
0,11388 Hz	0,169084761338464
0,12277 Hz	0,151599823908775
0,13165 Hz	0,134746051987291
0,14054 Hz	0,118656180695577
0,14943 Hz	0,103433896840907
0,15832 Hz	8,98426608260147E-02
0,16721 Hz	7,66768108602606E-02
0,17609 Hz	6,48748442840736E-02
0,18498 Hz	5,44641185397201E-02

0,19387 Hz	0,045527543052379
0,20276 Hz	3,79772891932456E-02
0,21165 Hz	3,15987996429529E-02
0,22053 Hz	2,62682938980608E-02
0,22942 Hz	2,18478341538469E-02
0,23831 Hz	1,82079336306652E-02
0,2472 Hz	1,52133192313844E-02
0,25608 Hz	1,27473007758925E-02
0,26497 Hz	1,06818455677847E-02
0,27386 Hz	8,86923158970297E-03
0,28275 Hz	7,81815702365125E-03
0,29164 Hz	6,55631876136774E-03
0,30052 Hz	5,51181425032819E-03
0,30941 Hz	4,60868306579766E-03
0,3183 Hz	3,7908567084829E-03

Hydrodynamic Response (B4)

TABLE 45
Model (A3, B3) > Analysis

Object Name	<i>Hydrodynamic Response (B4)</i>
State	Solved
Details of Hydrodynamic Response	
Analysis Type	Hydrodynamic Time Response

TABLE 46
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Details of Analysis Settings	
Computation Type	Time Response Analysis
Parallel Processing	Program Controlled
Use Cable Dynamics	Yes

Time Response Specific Options	
Analysis Type	Regular Wave Response
Start Time	0.0 s
Time Step	1 s
Duration	3600 s
Number of Steps	3601
Finish Time	3600 s
Starting Position	Program Controlled
Common Analysis Options	
Convolution	Yes
Call Routine "user_force"	No
Use Linear Starting Conditions	No
Use Linear Stiffness Matrix to Calculate Hydrostatic	No
Account for Current Phase Shift	Yes
Use Wheeler Stretching	No
Tube Drag Coefficients	Defined in Geometry
Output File Options	
Joint Axis System for Joint Reaction Force	Fixed Reference Axes
Data List	Yes
Element Properties	No

TABLE 47
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Regular Wave

Object Name	<i>Regular Wave 1</i>
State	Fully Defined
Details of Regular Wave 1	
Visibility	Visible

Suppressed	Not Suppressed
Wave Definition	
Wave Type	Airy Wave Theory
Direction	0°
Amplitude	1 m
Period	25,1818 s
Frequency	3,97112200081011E-02 Hz
Ramping Method	Program Controlled

Solution (B5)

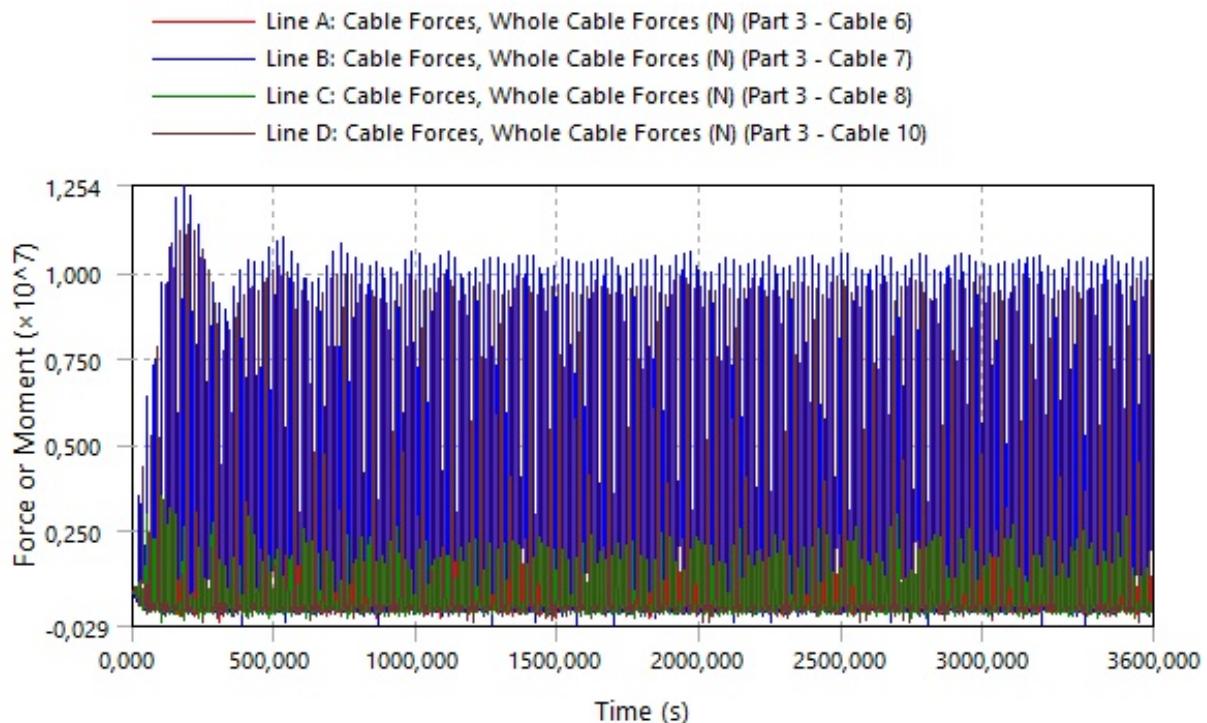
TABLE 48
Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>Cable Forces, Whole Cable Forces</i>
State	Solved
Details of Cable Forces, Whole Cable Forces	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Force/Moment vs Time
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 6
Position of Min in X	308
Position of Max in X	457
Minimum Value	-149667,406
Maximum Value	3758483,25

Line B	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 7
Position of Min in X	3357
Position of Max in X	180
Minimum Value	-288546,094
Maximum Value	12542441
Line C	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 8
Position of Min in X	104
Position of Max in X	102
Minimum Value	-168373,578
Maximum Value	3506300,25
Line D	
Structure	Part 3
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 10
Position of Min in X	2565
Position of Max in X	194

Minimum Value	-185135,031
Maximum Value	11373993

FIGURE 4
**Model (A3, B3) > Hydrodynamic Response (B4) > Solution (B5) > Cable Forces, Whole
Cable Forces**



(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN E

SCRIPT MATLAB FFT

```
clc;clear; close all;

warning off MATLAB:divideByZero

sheet = 'sheet3'

A = xlsread('DATA MENTAH TERTAMBAT TEGANGAN TALI',sheet);

t = A(:,1);

s = A(:,2);

h = A(:,3);

p = A(:,4);

f1= A(:,5);

f2= A(:,6);

f3= A(:,7);

f4= A(:,8);

sfr = 1;

t = (1:length(t))/sfr;

shpf = [s,h,p,f1,f2,f3,f4];

for i=1:7

    subplot(7,1,i)

    plot(t,shpf(:,i));

    if i==1

        ylabel('\zeta_x (mm)');
```

```

elseif i==2
    ylabel('zeta_z (mm)');
elseif i==3
    ylabel('zeta_p (deg)');
else
    ylabel('F (gr)');
end
end

xlabel('t (sec)');

[xb,yb]=ginput(2);

BatasBawah = max(round(xb(1)*sfr),1);
BatasAtas = min(round(xb(2)*sfr),size(s,1));
k = BatasBawah:BatasAtas;lenk = length(k);

tk =(BatasBawah:BatasAtas)/sfr;
sk = s(k);
hk = h(k);
pk = p(k);
f1k= f1(k);
f2k= f2(k);
f3k= f3(k);
f4k= f4(k);
shpfk = [sk,hk,pk,f1k,f2k,f3k,f4k];

```

```

figure;

for i=1:7

    subplot(7,1,i)

    plot(t,shpf(:,i),tk,shpfk(:,i),'r');

    if i==1

        ylabel('zeta_x (mm)');

    elseif i==2

        ylabel('zeta_z (mm)');

    elseif i==3

        ylabel('zeta_p (deg)');

    else

        ylabel('F (gr)');

    end

end

xlabel('t (sec)');

```

```

figure;

for i=1:7

    Yf = shpfk(:,i);

    lenk = length(Yf);

    sr=1/sfr;

    TT = (0:lenk-1)./sfr;

    tmax=TT(end)-TT(1);

    fdf=1/lenk/sr;

```

```

ff=(0:fdf:1/2/sr);

FF=sr*fft(Yf);

fampl=2/(tmax+sr)*abs(FF);

TT = (0:lenk-1)./sfr;

tmax=TT(end)-TT(1);

fdf=1/lenk/sr;

ff=(0:fdf:1/2/sr);

FF=sr*fft(Yf);

ampl=2/(tmax+sr)*abs(FF);

periode(:,i)=(1./(ff(1:length(ff))'))';

Ampl(:,i)=ampl(1:length(ff));

subplot(7,1,i)

plot(periode(:,i),Ampl(:,i));

if i==1

    ylabel('zeta_x (mm)');

elseif i==2

    ylabel('zeta_z (mm)');

elseif i==3

    ylabel('zeta_p (deg)');

else

    ylabel('F (gr)');

end

end

xlabel('t (sec)');

```

period= periode(2:end,1)

hasil = Ampl(2:end,:)

[Amplheave,n] = max(hasil(:,2));

Period = period(n)

Amplsurge = hasil(n,1)

Amplheave

Amplpitch = hasil(n,3)

Amplf1 = hasil(n,4)

Amplf2 = hasil(n,5)

Amplf3 = hasil(n,6)

Amplf4 = hasil(n,7)

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN F

TERTAMBAT 0 Degree

NUMERIS

Periode FFT (s)	Real (s)	Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A		RAO Tension B		RAO Tension C		RAO Tension D	
		Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
40,0111	40	0,0250	0,1571	1,937	0,620	1,350	0,432	13,363	4,276	224,811	224,811	213,299	213,299	217,333	217,333		
38,3211	38	0,0263	0,1653	1,759	0,563	0,800	0,256	11,515	3,685	211,380	211,380	180,788	180,788	187,350	187,350		
34,9128	35	0,0286	0,1795	3,915	1,253	1,893	0,606	4,028	1,289	147,856	147,856	144,869	144,869	89,946	89,946		
33,0367	33	0,0303	0,1904	4,272	1,367	1,346	0,431	6,547	2,095	209,501	209,501	162,416	162,416	127,153	127,153		
29,5164	29,5072	0,0339	0,2129	2,717	0,869	1,055	0,337	2,163	0,692	103,829	103,829	79,803	79,803	64,356	64,356	49,497	49,497
25,1818	25,1193	0,0398	0,2501	1,951	0,624	0,707	0,226	1,662	0,532	100,652	100,652	91,213	91,213	79,850	79,850	71,417	71,417
23,3831	23,3754	0,0428	0,2688	1,977	0,632	1,138	0,364	1,365	0,437	81,087	81,087	79,796	79,796	70,418	70,418	68,981	68,981
21,8242	21,8627	0,0457	0,2874	1,450	0,464	1,074	0,344	0,901	0,288	53,962	53,962	56,521	56,521	42,362	42,362	44,570	44,570
19,3602	19,3573	0,0517	0,3246	1,458	0,467	2,430	0,778	1,052	0,337	139,395	139,395	139,395	139,395	79,701	79,701	88,557	88,557
15,8738	16,0000	0,0625	0,3927	0,996	0,319	0,278	0,089	0,670	0,214	45,671	45,671	41,403	41,403	27,294	27,294	24,143	24,143
14,404	14,4009	0,0694	0,4363	0,842	0,269	0,098	0,031	0,664	0,212	44,458	44,458	45,627	45,627	21,442	21,442	20,910	20,910
12,7695	12,7665	0,0783	0,4922	0,575	0,184	0,172	0,055	0,405	0,129	46,646	46,646	68,919	68,919	29,499	29,499	26,724	26,724
5,6798	5,6789	0,1761	1,1064	0,085	0,027	0,003	0,001	0,130	0,041	7,696	7,696	8,036	8,036	7,385	7,385	7,743	7,743

EKSPERIMEN

Periode Eks(s)	Real (s)	Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension A		RAO Tension B		RAO Tension C		RAO Tension D	
		Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
3,6	40,2492	0,0248	0,1571	1,042	0,417	0,103	0,065	0,065	0,0783	55,224	55,224	56,061	56,061	42,520	42,520	43,200	43,200
2,6	29,0689	0,0344	0,2129	1,512	0,605	0,187	0,198	0,108	0,2816	95,982	95,982	97,436	97,436	58,493	58,493	59,429	59,429
2,1	23,4787	0,0426	0,2688	1,235	0,494	0,150	0,178	0,178	0,0962	93,571	93,571	94,988	94,988	76,040	76,040	77,257	77,257
1,7	19,0066	0,0526	0,3246	1,184	0,474	0,156	0,296	0,196	0,1736	117,313	117,313	119,091	119,091	78,740	78,740	80,000	80,000
1,3	14,5344	0,0688	0,4363	0,757	0,303	0,082	0,082	0,082	0,1492	50,149	50,149	50,909	50,909	24,882	24,882	25,280	25,280
1,1	12,2984	0,0813	0,4922	0,538	0,215	0,081	0,081	0,081	0,1351	44,776	44,776	45,455	45,455	10,709	10,709	10,880	10,880
0,5	5,5902	0,1789	1,1064	0,027	0,011	0,067	0,067	0,067	0,0015	1,658	1,658	1,684	1,684	2,100	2,100	2,133	2,133

LAMPIRAN G

TERTAMBAT 22,5 Degree

NUMERIS

Periode	Frequency	Surge	Heave	Pitch	RAO Tension	RAO Tension	RAO Tension				
FFT	Real (s)	Hz	Radius	m	m/m	m/m	Deg/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m	Ton/m
39.091	40	0.025	0.15708	1.5601	0.499232	1.4654	0.468928	11.5085	3.68272	264.7486239	199.8124363
38.129	38	0.026316	0.165347	1.392	0.44544	1.6666	0.533312	9.3195	2.98224	228.4395515	178.8248726
34.997	35	0.028571	0.17952	3.191	1.02112	1.64	0.5248	3.28	1.0496	168.3832824	122.0958206
33.015	33	0.030303	0.1904	3.56	1.1392	1.453	0.46496	3.91	1.2512	225.0438328	109.0479103
29.5164	29.50723	0.03389	0.212937	2.189	0.70048	1.658	0.53056	1.886	0.60352	89.59021407	76.0138634
25.1818	25.1193	0.03981	0.250134	1.3838	0.442816	0.5977	0.191264	1.2124	0.387968	102.4163099	43.01243629
23.3831	23.37541	0.04278	0.268795	1.2886	0.412352	1.0003	0.320096	0.6132	0.196224	71.83853211	45.69051988
21.8242	21.8627	0.04574	0.287393	1.016	0.32512	1.1788	0.377216	0.7221	0.231072	71.54169215	40.10927625
19.35	19.35734	0.05166	0.324589	0.8801	0.281632	2.3712	0.758784	0.684	0.21888	114.351478	74.26218145
15.982	16	0.0625	0.392699	0.3752	0.120064	0.1745	0.05584	0.2695	0.08624	53.85524975	34.96839959
14.404	14.40092	0.06944	0.436304	0.3283	0.105056	0.4604	0.147328	0.3237	0.103584	53.53883792	33.62120285
12.7695	12.7665	0.07833	0.492162	0.3023	0.096736	0.6361	0.203552	0.2722	0.087104	44.24220183	28.83783894
5.6767	5.678914	0.17609	1.106406	0.043	0.01376	0.0031	0.000992	0.0659	0.021088	10.05798165	2.331433231
										9.475392457	2.053545362

LAMPIRAN H

TERTAMBAT 45 Degree

NUMERIS

Periode FFT	Real (s)	Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension		RAO Tension	
		Hz	Rad/s	m	mm/m	m	mm/m	Deg/m	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton
39.998	40	0.025	0.15708	1.2161	0.389152	1.7671	0.565472	9.6886	3.100352	287.9021407	140.2748216	259.4576962	148.0905199
37.893	38	0.026316	0.165347	1.028	0.32896	1.61	0.5152	4.158	1.33056	252.7380224	95.64118247	226.7857288	122.324159
35.061	35	0.028571	0.17952	2.85	0.912	1.06	0.3392	2.816	0.90112	187.8899083	60.41182467	224.7502548	90.03058104
33.087	33	0.030303	0.1904	3.075	0.984	0.918	0.29376	2.942	0.94144	230.9577982	74.76452599	176.733945	30.9529052
29.5164	29.50723	0.03389	0.212937	1.1482	0.367424	0.3447	0.110304	0.85299	0.272957	101.7215087	57.94576962	81.08623853	28.32603466
25.1818	25.1193	0.03981	0.250134	0.2937	0.093984	1.2038	0.385216	0.2367	0.075744	138.5720693	6.239836901	130.0159021	30.24440367
23.3831	23.37541	0.04278	0.268795	0.282	0.09024	1.257	0.40224	0.0631	0.020192	96.48929664	16.57704383	64.23486239	17.65675841
21.8242	21.8627	0.04574	0.287393	0.2191	0.070112	1.0097	0.3233104	0.0339	0.010848	89.17268094	16.07600408	77.81447503	18.69830785
19.35	19.35734	0.05166	0.324589	0.1873	0.059936	2.2065	0.70608	0.239	0.07648	179.2587156	24.06165138	167.8841998	38.59571865
15.912	16	0.0625	0.392699	0.01	0.0032	0.238	0.07616	0.021	0.00672	68.01223242	13.77533129	58.16106014	21.60407747
14.404	14.40092	0.06944	0.436304	0.0056	0.001792	0.4771	0.152672	0.0084	0.002688	58.9961264	15.89724771	32.34087666	13.2945158
12.7695	12.7665	0.07833	0.492162	0.0029	0.000928	0.4946	0.158272	0.0489	0.015648	38.07054027	24.58878695	27.03467774	14.54678899
5.6767	5.678914	0.17609	1.106406	0.0023	0.000736	0.0036	0.001152	0.0033	0.001056	12.13390418	0.017957363	11.23457696	0.158225484

EKSPERIMEN

Eks	Real (s)	Frequency		Surge		Heave		Pitch		RAO Tension		RAO Tension	
		Hz	Rad/s	mm	mm/mm	mm	mm/mm	Deg	Deg/mm	Ton	Ton	Ton	Ton
3.6	40.2492	0.025	0.15708	6.819	0.273	1.31	0.052	2.6	0.104	68.89139093	45.54826891	61.2422	20.64017508
2.6	29.0689	0.03389	0.212937	8.310	0.332	4.6	0.184	3.4	0.136	108.8118893	30.52584976	99.2313	24.02845139
2.1	23.4787	0.04278	0.268795	2.349	0.094	4.404	0.176	0.9296	0.037	105.3691724	51.64282119	98.23232	24.99398464
1.7	19.0066	0.05166	0.324589	1.680	0.067	7.65723	0.306	1.7358	0.069	146.963	11.91309036	138.232	31.35396811
1.3	14.5344	0.06944	0.436304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.1	12.2984	0.07833	0.492162	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.5	5.5902	0.17609	1.106406	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Septian Agung Priambodo yang akrab dipanggil Agung adalah putra kedua dari pasangan Suharsono dan Murni Supriyati. Penulis lahir pada tanggal 21 September 1996 di Blora, Jawa Tengah. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 2 Bangkle Kabupaten Blora, SMP N 1 Blora, SMA N 1 Blora. Setelah lulus SMA kemudian penulis melanjutkan *studynya* di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menempuh pendidikan penulis aktif dalam kegiatan akademik dan organisasi. Dalam riwayat organisasinya penulis pernah menjabat di Himpunan Teknik Kelautan FTK-ITS sebagai staff Minat Bakat, Lembaga Dakwah Jurusan Teknik Kelautan FTK-ITS sebagai Kepala Departemen Mentoring, Unit Kegiatan Mahasiswa Bulutangkis ITS sebagai Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Anggota. Penulis juga aktif dalam kegiatan sosial melalui organisasi Pundi Amal Pemuda Indonesia sebagai Co-Founder. Pada awal tahun keempat penulis melaksanakan kerja praktek di Pertamina EP Asset 4 Field Poleng. Selama kerja praktek penulis mendapat pekerjaan melakukan *re-modeling BW Platform* milik Pertamina EP. Pada tahun terakhir penulis menjabat sebagai Ketua Asisten Laboratorium Hidrodinamika FTK-ITS sekaligus mengerjakan Tugas Akhir yang bertopik tentang olah gerak dan tegangan tali tambat pada SPAR dengan *helical stakes*.

Email : septianagung2196@gmail.com