

TUGAS AKHIR (MO 184804)

STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISIS NUMERIS TEGANGAN SISTEM TAMBAT *FLOATING CRANE CATAMARAN* PADA KONDISI *INTACT* DAN *DAMAGE* BERBASIS RANAH WAKTU (*TIME-DOMAIN*)

Mochamad Hanif Rafi'i NRP. 04311640000031

Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. Ir Murdjito, MSc., Eng. Erdina Arianti, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA 2020

i



FINAL PROJECT (MO 184804)

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS OF FLOATING CRANE CATAMARAN MOORING TENSION IN INTACT AND DAMAGE CONDITIONS USING TIME-DOMAIN APPROACH

Mochamad Hanif Rafi'i NRP. 04311640000031

Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. Ir Murdjito, MSc., Eng. Erdina Arianti, ST., MT.

OCEAN ENGINEERING DEPARTEMENT FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY SURABAYA 2020

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISIS NUMERIS TEGANGAN SISTEM TAMBAT *FLOATING CRANE CATAMARAN* PADA KONDISI *INTACT* DAN *DAMAGE* BERBASIS RANAH WAKTU (*TIME-DOMAIN*)

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

MOCHAMAD HANIF RAFI'I

NRP. 04311640000031

Disetujui oleh:

1.	Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.	(Pembimbing 1)
	All -	<u> </u>
2.	Ir. Murdjito, MSc., Eng.	(Pembimbing 2)
3.	Erdina Arianti, ST., MT. Net NoLOGI SEPULATION	(Pembimbing 3)
4.	Ir. Wisnu Wardhana, M.Sc., Ph.D.	(Penguji 1)
5.	Rudi Waluyo Prastianto, S.T., M.T., Dr.Eng.	(Penguji 2)
6. 	Wimala L. Dhanista, ST., MT	(Penguji 3)
	Surabaya, Agustus 2020)

Studi Eksperimen dan Analisis Numeris Tegangan Sistem Tambat Floating Crane Catamaran pada Kondisi *Intact* Dan *Damage* Berbasis Ranah Waktu (*Time-Domain*)

Nama	: Mochamad Hanif Rafi'i
NRP	: 04311640000031
Departemen	: Teknik Kelautan, FTK - ITS
Dosen Pembimbing	: Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
	Ir. Murdjito, MSc., Eng.
	Erdina Arianti, ST., MT.

ABSTRAK

Tugas akhir ini membahas tegangan sistem tambat *floating crane catamaran* pada kondisi intact dan damaged dengan menggunakan metode eksperimen dan pemodelan numeris. Studi eksperimen dilakukan di Kolam MOB (Maneuvering Ocean Basin) Balai Teknologi Hidrodinamika BTH-BPPT. Tegangan tali tambat studi eksperimen diolah menggunakan pendekatan frequency domain dengan menghitung stokastik low frequency tension dan wave frequency tension. Tegangan tali tambat maksimum studi eksperimen dan numeris pada skenario pembebanan arah 90° (*beamseas*), *intact*, Hs = 2.5 m sebesar 373,7 kN dan 441.6 kN. Pada skenario intact Hs 6.37 m sebesar 565,6 kN dan 1741.5 kN. Pada skenario damaged Hs 6.37 m sebesar 863,9 kN dan 2113.3 kN. Perbedaan tegangan diakibatkan oleh perbedaan kekakuan sistem tambat eksperimen (taut horizontal) dan numeris (catenary). Pada kondisi tali tambat intact dengan beban gelombang signifikan 6.37m, heading 0, 45, 90, 135, 180, semua kondisi memenuhi kriteria mooring safety factor API RP 2SK (>1.67) dengan rincian nilai mooring safety factor heading 0 sebesar 20.7; heading 45 sebesar 9.51; heading 90 sebesar 5.87; heading 135 sebesar 7.71; heading 180 sebesar 22.2. Pada kondisi tali tambat *damaged* juga masih memenuhi kriteria mooring safety factor API RP 2SK (>1.25) dengan nilai 4.83.

Keywords : Floating crane catamaran, Tegangan tali tambat, Intact, Damaged

Experimental Study and Numerical Analysis of Floating Crane Catamaran Mooring Tension in Intact and Damage Conditions using Time-Domain Approach

Name	: Mochamad Hanif Rafi'i
NRP	: 04311640000031
Department	: Ocean Engineering, FTK - ITS
Supervisors	: Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
	Ir. Murdjito, MSc., Eng.
	Erdina Arianti, ST., MT.

ABSTRACT

This final project discusses about mooring tension of catamaran floating crane in intact and damaged conditions using experimental and numerical methods. The experimental study was carried out in the MOB (Maneuvering Ocean Basin) BTH-BPPT (Hydrodynamics Technology Center). Experimental mooring tension are processed using the frequency domain approach with low frequency tension and wave frequency tension breakdown. Maximum mooring tension of experimental and numerical studies in wave heading 90° (beamseas) for intact condition with Hs = 2.5 m is 373.7 kN and 441.6 kN. In intact with Hs = 6.37m is 565.6 kN and 1741.5 kN. In the damaged condition with Hs = 6.37 m is 863.9 kN and 2113.3 kN. The difference of the experimental and numerical mooring tension is due to the difference in mooring system stiffness. In the intact mooring conditions with 6.37 m significant wave load, for headings 0, 45, 90, 135, 180, all conditions meet the API mooring safety factor criteria API RP 2SK (> 1.67) with detailed heading 0 of 20.7; heading 45 of 9.51; heading 90 of 5.87; heading 135 of 7.71; heading 180 of 22.2. The damaged mooring condition also meets the API RP 2SK mooring safety factor criteria (> 1.25) with a value of 4.83.

Keywords : Floating crane catamaran, Mooring tension, Intact, Damaged

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadirat Allah SWT karena dengan rahmat dan hidayahnya, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul "*Studi Eksperimen dan Analisis Numeris Tegangan Sistem Tambat Floating Crane Catamaran pada Kondisi Intact Dan Damage Berbasis Ranah Waktu (Time-Domain)*". Tugas akhir berikut merupakan syarat dalam menyelesaikan studi sarjana di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Adanya Tugas Akhir ini diharapkan dapat menambah wawasan pembaca mengenai tegangan tali tambat floating *crane catamaran* yang akan dibahas secara khusus

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan Tugas Akhir ini tidak luput dari kesalahan dan kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi guna meningkatkan kemampuan Menyusun laporan yang lebih baik di kemudian hari

Surabaya, 2020

Moch. Hanif Rafi'i

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam menyelesaikan seluruh rangkaian pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan banyak bimbingan dan dukungan dari pihak-pihak yang terlibat didalamnya. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

- Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan doa dan segala macam dukungan.
- Prof. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D dan Bapak Ir. Murdjito, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis selama pengerjaan tugas akhir ini dan memberi banyak ilmu pengetahuan lainnya selama penulis menjalani perkuliahan di Departemen Teknik Kelautan
- Ibu Erdina Arianti, ST., MT. selaku pembimbing dari Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT yang selalu sabar membimbing dan mengajarkan berbagai aspek eksperimen serta memberi banyak solusi dari berbagai masalah yang penulis hadapi.
- 4. Pada dosen pembimbing yang telah memberi evaluasi dan masukan selama sidang hingga selesainya rangkaian tugas akhir.
- 5. R. Haryo Dwito Armono ST., M.Eng., Ph.D, selaku dosen wali penulis yang telah membimbing penulis dalam kehidupan perkuliahan.
- 6. *Partner* topik penelitian eksperimen dan pemodelan numeris *floating crane catamaran*, Aziz, Rico, Yunan yang selalu saling memberi semangat, dan bekerja sama dengan baik selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
- Teman-teman kontrakan bhaskara, gerbong, dan adhiwamastya yang selalu memberi dukungan moral dan selalu membantu penulis bangkit dari kesulitan selama pengerjaan tugas akhir ini.
- 8. Dan pihak lain yang tidak mampu penulis sebutkan satu persatu

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	•••••• iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	V
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Manfaat Penelitian	4
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka	7
2.2. Dasar Teori	8
2.2.1. Kapal Berlambung Catamaran dan Monohull	8
2.2.2. Teori Gerak Bangunan Apung	
2.2.3. Gaya Eksitasi	11
2.2.4. Gaya Reaksi	
2.2.5. Persamaan Gerak Terambat	14
2.2.6. Fast Fourier Transform	15
2.2.7. Spektrum Energi Gelombang	16
2.2.8. Spektrum Gelombang Pierson-Motzkowitz	17
2.2.9. Respon Bangunan Apung di Gelombang Acak	

2.2.10). Teori Analisis Dinamis Berbasis Ranah Waktu	20
2.2.11	.Sistem Tambat	21
	2.2.11.1. Taut - Spread Mooring System	21
	2.2.11.2. Kekakuan Tali Tambat	22
	2.2.11.3. Penentuan Panjang Tali Tambat Catenary	23
	2.2.11.4. Kriteria Safety Factor Tali Tambat	24
2.2.12	2. Teori Permodelan	24
BAB III MET	ODOLOGI PENELITIAN	28
3.1. Diagran	n Alir Penelitian	29
3.2. Prosedu	ır Penelitian	31
3.2.1.	Studi Literatur dan Pengumpulan Data	31
3.2.2.	Pemodelan	32
	3.2.2.1. Pemodelan Eksperimen	32
	3.2.2.2. Pemodelan Numeris Kondisi free-floating	32
3.2.3.	Persiapan Instrumen	33
	3.2.3.1. Komponen Tali Tambat	33
	3.2.3.2. Kalibrasi Kekakuan Tali Tambat	33
	3.2.3.3. Kalibrasi Loadcell	33
	3.2.3.4. Set-up Konfigurasi Sistem Tambat	33
	3.2.3.5. Kalibrasi Kolam Uji	34
3.2.4.	Percobaan	34
3.2.5.	Pengolahan Data Eksperimen	35
3.2.6.	Analisis Data Eksperimen	35
3.2.7.	Pemodelan Numeris Kondisi Tertambat	35
3.2.8.	Analisis Dinamis Kondisi Tertambat	36
3.2.9.	Perbandingan Hasil Studi Eksperimen Dan Numeris	36
3.2.10	. Variasi Pembebanan Pada Model Numerik	36
3.2.11	. Evaluasi dan Kesimpulan	36
BAB IV ANA	LISIS DAN PEMBAHASAN	37
4.1. Pemode	lan Eksperimen	37
4.1.1.	Pemodelan Stuktur	37
4.1.2.	Pemodelan Sistem Tambat	40

4.1.3. Pe	rsiapan Instrumen Pengukuran	44
4.2	1.3.1. Kalibrasi Loadcell	44
4.1	1.3.2. Kalibrasi Wave Generator	45
4.2. Analisis Te	gangan Tali Tambat Eksperimen	. 48
4.2.1. Ha	asil Tegangan Tali Tambat Eksperimen	48
4.2.2. Ar	nalisis Tegangan Maksimum Eksperimen	51
4.3. Pemodelan	Numeris	. 59
4.3.1. Pe	modelan Struktur	59
4.3.2. Pe	modelan Sistem Tambat	61
4.4. Analisis Te	gangan Tali Tambat Numeris	. 71
4.4.1. Ha	asil Tegangan Tali Tambat Numeris	. 71
4.4.2. Ar	nalisis Tegangan Maksimum Numeris	. 73
4.5. Perbanding	an Tegangan Tali Tambat Metode Eksperimen dan Numeris	. 88
4.6. Analisis Kr	iteria Mooring Safety Factor	. 91
BAB V PENUTU	Р	97
5.1 Kesimpular	n	. 97
5.2 Saran		. 97
Daftar Pustaka		98
LAMPIRAN		.103
LAMPIRAN A. C	Coding Matlab FFT Spektra Gelombang Uji	103
LAMPIRAN B. C	oding Matlab Lowpass & Bandpass Filtering dan FFT	
Te	gangan Tali Tambat Eksperimen	105
LAMPIRAN C. T	ime History Tegangan Tali Tambat Eksperimen	109
LAMPIRAN D. L	ow-Band-pass Filtering Tegangan Tali Tambat Eksperimen	115
LAMPIRAN E. C	Coding Moses Tertambat	122
LAMPIRAN F. T	ime History Tegangan Tali Tambat Numeris	133
LAMPIRAN G. S	pektra Tegangan Frekuensi Rendah & Gelombang,	
Νι	ımeris	139
LAMPIRAN H. S	tokastik Tegangan Maksimum Metode Numeris	145

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Accomodation Working Catamaran Gurban Abasov	2
Gambar 2.1. <i>Monohull</i> (Adi, 2013)	9
Gambar 2.2. Catamaran (Adi, 2013)	9
Gambar 2. 3. Perbandingan intact stability monohull dengan katamaran 10	0
Gambar 2.4. Six Degree of Freedom (Mahanani, 2017) 10	0
Gambar 2.5. Skema FFT (fast fourier transform)	5
Gambar 2.6. Superposisi gelombang menghasilkan Gelombang acak 16	б
Gambar 2.7. Definisi spektrum energi gelombang	7
Gambar 2.8. Transformasi Spektra Gelombang Menjadi Spektra Respons 19	9
Gambar 2.9. Panjang Minimum Mooring Line	3
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	9
Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian (lanjutan)	0
Gambar 4.1. Tampak depan model eksperimen	8
Gambar 4.2. Tampak samping model eksperimen	8
Gambar 4.3. Hasil akhir model eksperimen	8
Gambar 4.4. Menimbang model eksperimen	9
Gambar 4.5. Besi ballast	9
Gambar 4.6. Kalibrasi LCG, meletakkan model pada meja osilator 40	0
Gambar 4.7. Tampak 2 dimensi bidang X-Y konfigurasi sistem tambat	0
Gambar 4.8. Tampak 2 dimensi bidang X-Z konfigurasi sistem tambat 41	1
Gambar 4.9. Sling stainless-steel	2
Gambar 4.10. 8 buah Pegas 43	3
Gambar 4.11. Proses Kalibrasi Pegas	3
Gambar 4.12. Grafik pembebanan - pertambahan panjang pegas 1 44	4
Gambar 4.13. Wave Probe	5
Gambar 4.14. Wave Generator	5
Gambar 4.15. Spektrum gelombang uji dan teoritis dengan Hs = 2.5 m	б
Gambar 4.16. Spektrum gelombang uji dan teoritis dengan Hs = 6.37 m	7
Gambar 4.17. Konfigurasi Mooring Kondisi Intact	8
Gambar 4.18. Konfigurasi Mooring Kondisi Damaged	8

Gambar 4.42. Plot hasil iterasi tegangan tali tambat tiap ekskursi	66
Gambar 4. 43. Hasil iterasi tegangan tali tambat tiap ekskursi	67
Gambar 4.44. Hasil iterasi kekakuan tali tambat tiap ekskursi	68
Gambar 4. 45. Tampak Samping Konfigurasi Sistem Tambat Numeris (Static)	69
Gambar 4.46. Tampak Atas Konfigurasi Sistem Tambat Numeris	
Kondisi Intact	70
Gambar 4.47. Tampak Atas Konfigurasi Sistem Tambat Numeris	
Kondisi Damaged	70
Gambar 4.48. Tegangan Tali Tambat <i>intact</i> , Hs = 2.5m, Heading 0	71
Gambar 4.49. Tegangan Tali Tambat <i>intact</i> , Hs = 2.5m, Heading 45	71
Gambar 4.50. Tegangan Tali Tambat <i>intact</i> , Hs = 2.5m, Heading 90	72
Gambar 4.51. Tegangan Tali Tambat <i>intact</i> , Hs = 2.5m, Heading 135	72
Gambar 4.52. Tegangan Tali Tambat <i>intact</i> , Hs = 2.5m, Heading 180	72
Gambar 4.53. Tegangan Tali Tambat <i>intact</i> , Hs = 2.5m, Heading 180	73
Gambar 4.54. Spektra Gelombang Pierson-Motzkowith Variasi Hs	74
Gambar 4.55. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact,	
Hs = 2.5m, Heading 0	75
Gambar 4.56. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact,	
Hs = 2.5m, Heading 45	75
Gambar 4.57. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact,	
Hs = 2.5m, Heading 90	76
Gambar 4.58. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact,	
Hs = 2.5m, Heading 135	76
Gambar 4.59. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact,	
Hs = 2.5m, Heading 180	77
Gambar 4. 60. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Damaged,	
Hs = 2.5m, Heading 90	77
Gambar 4.61. Low frequency tension spectrum, intact, $Hs = 2.5 m$,	
Heading 0	78
Gambar 4.62. <i>Low frequency tension spectrum, intact,</i> Hs = 2.5 m,	
Heading 45	78

Gambar 4.63. Low frequency tension spectrum, intact, $Hs = 2.5 m$,	
Heading 90	79
Gambar 4.64. Low frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m,	
Heading 135	79
Gambar 4.65. <i>Low frequency tension spectrum, intact,</i> Hs = 2.5 m,	
Heading 180	79
Gambar 4.66. Low frequency tension spectrum, damaged, Hs=2.5 m,	
Heading 90	80
Gambar 4.67. <i>Wave frequency tension spectrum, intact,</i> Hs = 2.5 m,	
Heading 0	80
Gambar 4.68. <i>Wave frequency tension spectrum, intact,</i> Hs = 2.5 m,	
Heading 45	80
Gambar 4.69 . <i>Wave frequency tension spectrum, intact,</i> Hs = 2.5 m,	
Heading 90	81
Gambar 4.70. <i>Wave frequency tension spectrum, intact,</i> Hs = 2.5 m,	
Heading 135	81
Gambar 4.71. <i>Wave frequency tension spectrum, intact,</i> $Hs = 2.5 m$,	
Heading 180	81
Gambar 4.72. <i>Wave freq. tension spectrum, damaged,</i> $Hs = 2.5 m$,	
Heading 90	82
Gambar 4.73. Tegangan tali tambat maksimum kondisi <i>intact</i>	86
Gambar 4.74. Tegangan tali tambat maksimum kondisi <i>damaged</i>	87
Gambar 4.75. Perbandingan Max tension eksperimen & numeris, Intact,	
Hs = 2.5m	89
Gambar 4.76. Perbandingan Max tension eksperimen & numeris, intact,	
Hs = 6.37m	89
Gambar 4.77. Perbandingan Max tension eksperimen & numeris, damaged,	
Hs = 6.37m	89
Gambar 4.78. Perbandingan mean tension eksperimen & numeris, Intact,	
Hs = 2.5m	90
Gambar 4.79. Perbandingan mean tension eksperimen & numeris, Intact,	
Hs = 6.37m	91

Gambar 4.80. Perbandingan mean tension eksperimen & numeris, Damaged,	
Hs = 6.37m	91
Gambar 4. 81. Mooring safety factor kondisi intact	94
Gambar 4.82. Mooring safety factor kondisi damaged	96

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in	
Mechanics Under Froude Scaling	26
Tabel 2.2. Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used in	
Mechanics Under Froude Scaling (Lanjutan) 2	267
Tabel 3.1. Data Geometri Floating Crane Catamaran (Full Scale)	31
Tabel 3.2. Data Pembebanan Eksperimen	32
Tabel 4.1. Hasil penyekalaan model menggunakan aturan <i>froude</i>	37
Tabel 4.2. Koordinat Fairlead	37
Tabel 4.3. Perhitungan massa total model eksperimen	39
Tabel 4.4. Sudut sebar (X-Y) sistem tambat	41
Tabel 4.5. Spesifikasi sling stainless-steel model eksperimen	42
Tabel 4.6. Kalkulasi Kekakuan Pegas 1	43
Tabel 4.7. Kekakuan Pegas	44
Tabel 4.8. Karakteristik gelombang pengujian	46
Tabel 4.9. Hasil Validasi Kalibrasi Gelombang Uji 1	47
Tabel 4.10. Hasil Validasi Kalibrasi Gelombang Uji 1	47
Tabel 4.11. Skenario eksperimen dan urutan	49
Tabel 4.12. Durasi Pengujian	49
Tabel 4.14. Tegangan signifikan pada frekuensi rendah	56
Tabel 4.15. Tegangan maksimum pada frekuensi gelombang	57
Tabel 4.16. Tegangan rata-rata	57
Tabel 4. 17. Tegangan Tali Tambat Maksimum Metode Eksperimen	58
Tabel 4.18. Data utama dan validasi model numeris	59
Tabel 4.19. Jari-jari girasi floating crane catamaran	59
Tabel 4.20. Centre of Gravity floating crane catamaran	59
Tabel 4. 21. Kekakuan tali tambat eksperimen	63
Tabel 4.22. Hasil iterasi tegangan tali tambat tiap ekskursi	66
Tabel 4. 23. Hasil iterasi selisih tegangan tali tambat tiap ekskursi	67
Tabel 4.24. Hasil iterasi kekakuan tali tambat tiap ekskursi	68
Tabel 4.25. Properties Tali Tambat	69
Tabel 4.26. Wave encounter periode	74

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Coding Matlab FFT Spektra Gelombang Uji 103
LAMPIRAN B. Coding Matlab Lowpass & Bandpass Filtering dan FFT
Tegangan Tali Tambat Eksperimen 105
LAMPIRAN C. Time History Tegangan Tali Tambat Eksperimen 109
LAMPIRAN D. Low-Band-pass Filtering Tegangan Tali Tambat Eksperimen 115
LAMPIRAN E. Coding Moses Tertambat 122
LAMPIRAN F. Time History Tegangan Tali Tambat Numeris
LAMPIRAN G. Spektra Tegangan Frekuensi Rendah & Gelombang,
Numeris
LAMPIRAN H. Stokastik Tegangan Maksimum Metode Numeris 145

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan akan energi saat ini semakin meningkat terutama kebutuhan akan minyak bumi dan gas alam, hal ini berdampak pada banyaknya permintaan untuk melakukan proses eksplorasi dan eksploitasi di ladang-ladang minyak bumi dan gas alam. Perkembangan eksplorasi dan eksploitasi kini mengarah ke perairan dalam. Dalam menunjang kegiatan eksplorasi dan eksploitasi tersebut, diperlukan sarana transportasi, instalasi, maupun *decommisioning* komponen anjungan lepas pantai. Salah satu jenis sarana tersebut dapat dipenuhi dengan menggunakan *Accomodation Working Barge* atau *Crane Barge* (Gorat 2013)

Dalam mengatasi permasalahan yang lebih kompleks untuk menghadapi kondisi lingkungan letak anjungan lepas pantai yang lebih ganas. Dewasa ini, banyak dilakukan penelitian mengenai struktur lambung kapal guna mendapatkan stabilitas yang lebih baik. Doloksaribu, dkk (2018), dalam penelitiannya mengenai modifikasi pada lambung kapal pariwisata di danau toba yang mulanya memiliki lambung tipe *monohull* kemudian dimodifikasi menjadi tipe *catamaran* mengatakan kapal berjenis lambung *catamaran* memiliki stabilitas lebih baik dari pada *monohull*. Dibuktikan dengan lengan GZ yang lebih besar dan periode *rolling* yang lebih kecil dibanding *monohull*. (Doloksaribu, M.O., Manik, P., Kiryanto, K., 2018).

Floating Crane Catamaran yang selanjutnya akan disebut FCC adalah sebuah inovasi kapal berlambung *catamaran* yang dilengkapi dengan fasilitas seperti *Accomodation Working Barge*. (BTH-BPPT, 2020). FCC memiliki fungsi sebagai sarana untuk transportasi, instalasi, maupun *decommisioning* komponen anjungan lepas pantai seperti halnya telah disebutkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Gorat (2013). Selain itu, dengan menerapkan lambung tipe *catamaran*, menjadikan *Accomodation Working Barge* ini memiliki stabilitas yang lebih baik. (Doloksaribu, M.O., Manik, P., Kiryanto, K., 2018.). Jenis kapal *accomodation working barge* dengan lambung *catamaran* dapat dilihat pada gambar 1.1.



Gambar 1.1. Accomodation Working Catamaran Gurban Abasov (sumber: www.marinetraffic.com)

Selama beroperasi di lepas pantai, maka dilakukan penambatan pada *Floating Crane Catamaran*. Penambatan bertujuan untuk membatasi gerakan struktur dari posisi yang dikehendai agar struktur dapat beroperasi dengan aman (Al-fath 2011, Mahanani 2017, Diaz 2017, Muttaqin 2018). FCC ditambat menggunakan sistem tambat berjenis *spread mooring*, Konfigurasi *spread mooring* yang digunakan pada FCC saat beroperasi adalah konfigurasi 8-*mooring line* dengan 4-*mooring line* ada di *bow* dan 4-*mooring line* di *stern*.

Pada penelitian ini dilakukan analisis tegangan tali tambat FFC pada kondisi *intact* dan *damaged*. Kondisi *intact* merupakan kondisi saat struktur beroperasi dengan tali tambat berfungsi sepenuhnya atau tidak ada tali tambat yang putus. Sedangkan kondisi *damaged* adalah kondisi saat struktur beroperasi dengan adannya tali tambat yang putus (tidak berfungsi). (Diaz 2017, Elhanafi, A., Macfarlane, G., Fleming, A., Leong, Z., 2017, Muttaqin 2018, Negoro 2019.) Tegangan maksimum tali tambat yang dihasilkan pada tiap kondisi kemudian dibandingkan dengan kriteria API RP 2 SK guna mengetahui tegangan tali tambat kondisi *intact* dan *damaged* berada dalam batas aman atau tidak. (Diaz 2017, Muttaqin 2018). Pada kondisi intact, tegangan tali tambat maksimum harus memenuhi kriteria safety factor ≥ 1.67 (API RP 2SK, 2005). Pada kondisi

damaged, tegangan tali tambat maksimum harus memenuhi kriteria safety factor \geq 1.25 (API RP 2SK, 2005).

Penelitian dilakukan dengan studi eksperimen menggunakan model fisik dan metode numeris. Studi eksperimen dilakukan di Kolam MOB (*Maneuvering Ocean Basin*) Balai Teknologi Hidrodinamika BTH-BPPT. Sedangkan analisis numeris dilakukan dengan pemodelan pada *software*. Untuk mendapatkan tegangan tali tambat dilakukan analisis berbasis ranah waktu (*time-domain*), dimana dilakukan pendekatan menggunakan prosedur integrasi waktu dan kemudian dihasilkan respon tegangan tiap waktunya (Mahanani 2017).

Hasil studi eksperimen kemudian dibandingkan dengan metode numeris. Jika didapati hasil yang relatif sama, maka dapat dilakukan variasi pembebanan pada model numeris. Variasi pembebanan yang dimaksud adalah dengan memvariasikan gelombang signifikan yang mengenai struktur. Variasi pembebanan metode numeris dilakukan guna mendapatkan *trendline* hubungan antara nilai *safety factor* tali tambat yang dihasilkan dari tiap variasi pembebanan. Sehingga dari *trendline* tersebut dapat dicari tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria API RP 2 SK mengenai *safety factor* sistem tambat untuk tiap kondisi (*intact* dan *damaged*)

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan diteliti pada tugas akhir ini yaitu :

- a) Bagaimana perbandingan tegangan tali tambat *floating crane catamaran* hasil eksperimen dan numeris pada kondisi tali tambat *intact*?
- b) Bagaimana perbandingan tegangan tali tambat *floating crane catamaran* hasil eksperimen dan numeris pada kondisi tali tambat *damaged*?
- c) Berapa tinggi gelombang signifikan terbesar yang menjadi batasan kriteria *safety factor* tegangan tali tambat pada kondisi *intact* dan *damaged*?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai pada tugas akhir ini yaitu :

- a) Mengetahui perbandingan tegangan tali tambat *floating crane catamaran* hasil eksperimen dan numeris pada kondisi *intact* dan *damaged*.
- b) Mengetahui tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria *safety factor* tegangan tali tambat pada kondisi *intact* dan *damaged*

1.4. Manfaat Penelitian

Pada penelitian ini akan diketahui bagaimana tegangan tali tambat FCC hasil studi eksperimen dan numeris pada kondisi *intact* dan *damaged*. Dengan dilakukan variasi pembebanan gelombang signifikan, didapati trendline yang menggambarkan hubungan antara nilai *safety factor* tali tambat terhadap tinggi gelombang signifikan. Sehingga dari trendline tersebut dapat diketahui beban gelombang signifikasn terbesar yang menjadi batasan kriteria *safety factor* tali tambat yang diijinkan API RP 2 SK untuk tiap kondisi (*intact* dan *damaged*). Hal ini bertujuan untuk memastikan apakah tali tambat berada dalam batas aman atau tidak pada tiap kondisi dan pembebanan.

1.5. Batasan Masalah

- a) Studi eksperimen dilaksanakan di Laboratorium Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT
- b) Studi eksperimen menggunakan model dan skenario dari pihak Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT
- c) Model yang digunakan pada studi eksperimen dan analisis numeris adalah model *Floating Crane Catamaran*
- d) Konfigurasi mooring system yang digunakan pada studi eksperimen dan metode numeris adalah spread mooring dengan mooring lines sebanyak 8 (delapan)
- e) Studi eksperimen hanya menggunakan satu arah pembebanan yaitu pada arah 90° atau *beam seas*.
- f) Beban yang diperhitungkan hanya beban gelombang.
- g) Pada skenario eksperimen kondisi *intact*, kondisi gelombang yang digunakan adalah 2 gelombang *irregular* dengan parameter Hs = 2.5 m dan 6.37 m (*full scale*) atau Hs = 0.069 m dan 0.177 m (*model* scale)

- h) Pada skenario eksperimen kondisi *damaged*, kondisi gelombang yang digunakan hanya 1 gelombang *irregular* dengan parameter Hs = 6.37 m (*full scale*) atau Hs = 0.177 m (*model* scale)
- i) Spektra gelombang yang digunakan dalam studi eksperimen dan numeris adalah Spektra *Pierson-Moskowitz* (1964)
- j) Analisis numeris dilakukan dengan pemodelan menggunakan *software* MOSES dengan menyesuaikan parameter studi eksperimen.
- k) Analisis numeris dilakukan dengan simulasi berbasis ranah waktu guna mencari nilai tegangan tali tambat.
- Kriteria untuk mengetahui batas aman (*safety factor*) desain sistem tambat menggunakan rules API RP 2 SK. 2005 "Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures"
- m) Respon gerakan kapal pada kondisi tertambat tidak diperhitungkan

1.6. Sistematika Penulisan

Sistemarika penulisan penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisikan penjelasan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian, perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai, manfaat yang diperoleh dari penelitian, serta batasan masalah atau lingkup penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSATAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisikan tentang referensi serta teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman penelitian. Referensi yang digunakan sebagai pedoman penelitian didapatkan dari literatur terkait seperti buku yang berkaitan dengan topik penelitian, jurnal internasional ataupun lokal, *rules/code*, bahkan tugas akhir terdahulu.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang langkah pengerjaan tugas akhir secara terstruktur dalam bentuk diagram alir atau *flow chart*. Selain itu, dilengkapi juga dengan penjelasan tiap langkah pengerjaan tugas akhir secara detail

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang pengolaan data dari awal dilakukannya penelitian hingga didapati hasil penelitian. Pengolahan data dibagi menjadi dua, pengolahan data studi eksperimen dan pengolahan data analisis numeris. dari pengolahan data tersebut, didapati hasil eksperimen dan numeris berupa tegangan maksimum tali tambat pada kondisi *intact* dan *damage*. Kemudian dilakukan pula variasi pembebanan gelombang pada metode numeris. Tujuan dari dilakukannya variasi pembebanan tersebut adalah untuk mengetahui besar tegangan maksimum tali tambat di tiap pembebanan gelombang. Variasi pembebanan juga dilakukan pada kondisi *intact* dan *damage*. Hasil tegangan maksimum tali tambat tiap pembebanan tersebut dapat diplot menjadi trendline hubungan nilai *safety factor* sistem tambat tiap pembebanan gelombang. Sehingga dari persamaan yang dibentuk oleh trendline, didapati nilai tinggi gelombang signifikan terbesar dengan cara memasukkan nilai terkecil dari *safety factor* sistem tambat pada *rules* API RP 2 SK.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisikan tentang uraian singkat hasil analisis yang menjawab rumusan masalah. Selain itu, berisikan saran yang berguna untuk penelitian kedepannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Crane barge merupakan sarana transportasi, instalasi, maupun decommissioning komponen anjungan lepas pantai. Crane barge mampu mengakomodasi komponen dengan dimensi yang cukup besar dan berat dari darat ke laut, maupun dari laut ke darat (Gorat 2013). Dalam kemampuannya saat menghadapi kondisi lingkungan letak anjungan lepas pantai yang variatif, menuntut adanya inovasi supaya crane barge memiliki stabilitas lebih baik. Dewasa ini, banyak dilakukan penelitian mengenai struktur lambung kapal guna mendapatkan stabilitas yang lebih baik. Bunari (2013) melakukan penelitian studi perbandingan perencanaan kapal katamaran dan monohull sebagai kapal riset di perairan Bengkalis Riau, kemudian Doloksaribu, M.O., Manik, P., Kiryanto, K., 2018 juga melakukan penelitian mengenai modifikasi kapal tipe monohull menjadi tipe katamaran untuk menunjang kegiatan pariwisata di kawasan perairan danau toba membuktikan bahwa kapal dengan lambung model catamaran memiliki stabilitas lebih baik dari pada monohull. Dibuktikan dengan lengan GZ yang lebih besar dan periode *rolling* yang lebih kecil dibanding monohull.

Floating crane catamaran adalah sebuah inovasi kapal berlambung *catamaran* yang dilengkapi dengan sarana seperti *accomodation working barge* lengkap dengan *crane* dan *helideck*. Selama beroperasi, *Floating crane catamaran* ditambat menggunakan *spread mooring*. Penambatan bertujuan untuk membatasi gerakan horisontal struktur terapung dari posisi yang dikehendai agar struktur dapat beroperasi dengan aman.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis tegangan tali tambat *floating crane catamaran* pada kondisi *intact* dan *damaged*. Kondisi *intact* adalah analisa pada kondisi struktur beroperasi dengan tali tambat berfungsi sepenuhnya atau dalam artian tidak ada *mooring line* yang putus. Sedangkan kondisi *damaged* adalah analisa kondisi struktur beroperasi namun terdapat tali tambat yang putus. Muttaqin (2018) dan Diaz (2017) juga pernah menganalisa tegangan sistem

tambat taut pada kondisi kegagalan, yang membedakan adalah analisis yang mereka gunakan adalah berbasis ranah frekuensi. Sedangkan pada penelitian ini dilakukan analisis berbasis ranah waktu (*time-domain*).

Analisis berbasis ranah waktu (*time-domain*), merupakan analisis yang mana dilakukan pendekatan menggunakan prosedur integrasi waktu. Kemudian dihasilkan respon tegangan tiap waktunya. Metode ini pernah digunakan oleh Mahanani (2017) dalam penelitiannya berjudul analisa *time-domain* pengaruh spread mooring dengan variasi jumlah line terhadap tension pada flexible riser.

Pada tugas akhir ini dilakukan dengan studi eksperimen dan metode numeris. Elhanafi, A., Macfarlane, G., Fleming, A., Leong, Z., pada tahun 2017 melakukan studi eksperimen dan numerikal pada kondisi *intact* dan *damaged* untuk *survivability* dari Struktur *Floating-Moored Oscillating Water Column*. Pada studi tersebut, dilakukan peninjauan respon surge serta tegangan tali tambat akibat variasi beban gelombang regular. Variasi pembebanan metode numeris dilakukan guna mendapatkan persamaan regresi hubungan antara nilai *safety factor* tali tambat terhadap variasi pembebanan gelombang signifikan. Sehingga didapati batas tinggi gelombang maksimum agar tegangan tali tambat tidak melebihi kriteria API RP 2 SK. Pada kondisi *intact*, tegangan tali tambat maksimum harus memenuhi kriteria *safety factor* \geq 1.67 (API RP 2SK, 2005). Pada kondisi *damaged*, tegangan tali tambat maksimum harus memenuhi kriteria safety factor \geq 1.25 (API RP 2SK, 2005).

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Kapal Berlambung Catamaran dan Monohull

Lambung kapal menyediakan daya apung untuk kapal. Dalam perancangan lambung kapal berpengaruh terhadap stabilitas kapal. Pada bidang perkapalan, beberapa jenis kapal mempunyai lambung tunggal (*monohull*), gambar 2.1 dan lambung ganda (*multihull*) gambar 2.2.



Gambar 2.1. Monohull (Adi, 2013)



Gambar 2.2. Catamaran (Adi, 2013)

Kapal *Monohull* merupakan kapal yang memiliki lambung tunggal atau *single hull*. Sedangkan kapal *multihull* memiliki lambung lebih dari satu. Beberapa jenis kapal multihull antara lain *catamaran*, SWATH (Small Water plane Area Twin Hull), Trimaran, dan Pentamaran. (Adi, 2013)

Catamaran merupakan salah satu jenis kapal *multihull* yang memiliki lambung ganda. *Catamaran* memiliki dua lambung yang dihubungkan dengan struktur *bridging*. Oleh karena itu luasan geladak pada *catamaran* tiga kali lebih besar dibanding *monohull* sehingga memberikan keuntungan pada desain rencana umum dimana didapatkan penataan peralatan dan *outfitting* yang lebih baik (Adi 2013, Bunari 2013). *Catamaran* juga mempunyai stabilitas yang lebih baik dengan lengan GZ yang lebih besar dan periode *rolling* yang lebih kecil dibanding *monohull* (Adi 2013, Bunari 2013, Doloksaribu, M.O., Manik, P., Kiryanto, K., 2018). Seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. dibawah ini.



Gambar 2. 3. Perbandingan intact stability monohull dengan katamaran (Bunari, 2013)

2.2.2. Teori Gerak Bangunan Apung

Bangunan apung (dalam hal ini *floating crane catamaran*) memiliki enam mode gerakan bebas (*Six Degree of Freedom*) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan *translasional* dan 3 mode gerakan *rotasional* dalam 3 arah sumbu (Bhattacharyya, 1972). Keenam mode gerakan ditunjukkan pada gambar 2.4 dengan penjelasan sebagai berikut :

- 1. Mode Gerak Translasional
 - Surge, gerakan transversal arah sumbu x
 - Sway, gerakan transversal arah sumbu y
 - Heave, gerakan transversal arah sumbu z
- 2. Mode Gerak Rotasional
 - Roll, gerakan rotasional arah sumbu x
 - Pitch, gerakan rotasional arah sumbu y
 - Yaw, gerakan rotasional arah sumbu z



Gambar 2.4. Six Degree of Freedom (Mahanani, 2017)

2.2.3. Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi pada struktur terjadi akibat adanya distribusi tekanan dari gelombang yang tidak bekerja secara merata pada. Dampak dari tekanan inilah yang disebut sebagai gaya Froude-Krillof (Faltinsen, 1990). Selain itu, pada struktur dengan ukuran yang cukup besar, keberadaan strukur juga akan menyebabkan perubahan distribusi tekanan (Journee, et al., 2001). Efek dari perubahan distribusi tekanan akibat adanya struktur yang besar ini disebut dengan gaya difraksi. Gaya Froude-Krylof dapat dicari menggunakan persamaan berikut

$$F_{FKi} = \int p \, ni \, dA \tag{2.1}$$

Dengan,

p = Distribusi tekanan

n = Variabel unit vektor

dA = Luasan kecil benda

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

$$p = \rho g \zeta o e kz \sin(\omega t - kx)$$
(2.2)

Dengan,

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

g = percepatan gravitasi (m/s²)

 $\zeta o =$ amplitudo gelombang (m)

k = angka gelombang (rad/m)

z = elevasi dari muka gelombang (m)

 ω = frekuensi gelombang (rad/s)

t =waktu (s)

x = arah gelombang posisi horizontal (m)

2.2.4. Gaya Reaksi

Negoro (2019) dalam penelitianya menjelaskan bahwa ketika dikenai gaya dari luar, struktur akan mengalami gaya reaksi. Gaya reaksi pada struktur dipengaruhi massa tambah (*added mass*), redaman (*damping*) dan kekakuan (*stiffness*).

a) Massa tambah (added mass)

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

$$Fa = ai \xi^{"}i \tag{2.3}$$

dengan,

a = Massa tambah (kg)

- i = Mode gerak struktur dengan 1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4
 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
- ξ " = Respon percepatan gerak struktur (m/s²)

b) Redaman (damping)

Redaman merupakan dampak yang didapat akibat adanya disipasi energi dari struktur (Newman, 1977). Jika struktur digetarkan di air yang tenang, maka energi kinetik struktur (gerakan) semakin lama akan semakin mengecil. Redaman akan membuat struktur kehilangan energi kinetiknya, Hal inilah yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung dari bentuk benda dan mode gerak benda. Sebagai gaya reaksi, gaya ini mempunyai persamaan (2.4). Persamaan ini merupakan perkalian antara redaman benda dengan kecepatan gerak benda. Nilai koefisien redaman dapat dicari dengan menggunakan analisa numeris (Chakrabarti, 1994).

$$Fb = bi \xi^{\cdot} i \tag{2.4}$$

dengan,

- *i* = Mode gerak struktur dengan1 (surge), 2 (sway), 3 (heave), 4 (roll), 5 (pitch) dan 6 (yaw)
- b = Redaman sistem (N s/m)
- ξ = Respon kecepatan gerak struktur (m/s)

c) Kekakuan (stiffness).

Ketika struktur terapung bergerak di permukaan air tenang, tanpa gelombang, struktur tersebut mempunyai kekauan untuk kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini hanya terjadi pada 3 mode gerak struktur. Mode gerak tersebut adalah gerak heave (ξ 3), pitch (ξ 4) dan roll (ξ 5) (Djatmiko, 2012). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatik struktur. Gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda disebut gaya pengembali (*restoring force*) yang mempunyai persamaan (2.5). Persamaan ini merupakan perkalian antara kekakuan dengan displacement gerak.

$$Fc = ci\,\xi i \tag{2.5}$$

dengan,

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

- c = Kekakuan struktur (N/m)
- ξ = Respon gerak struktur (m)

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

$$c3 = \rho \ g \ Awp \tag{2.6}$$

$$c4 = \rho \ g \ V \ (\text{GMT})^{-} \tag{2.7}$$

$$c5 = \rho \ g \ V \ (\text{GML})^{-} \tag{2.8}$$

dengan,

ρ	= Massa jenis air sekitar struktur (kg/m)
g	= Percepatan gravitasi struktur (m/s2)
Awp	= Luas permukaan di garis air (m2)
V	= Volume displacement struktur (m3)
(GMT)	= Panjang metacentre melintang (m)
(GML)	= Panjang metacentre memanjang (m)

2.2.5. Persamaan Gerak Terambat

Analisis tegangan tali tambat pada bangunan apung dilakukan terkait dengan formulasi dinamis *body motion* berikut ini :

$$\sum_{j=1}^{6} \left[-\omega^2 (M_{jk} + A_{jk}) - i\omega B_{jk} + C_{jk} + C_{jk}^m \right] \zeta_j = Fj$$
 (2.9)

Dengan,

J,k = 1,2,3 gerak translasi pada sumbu x-, y-, z- (surge, sway, heave) sedangkan 4,5,6 gerak rotasional pada sumbu x- ,y- ,z- (roll, pitch, yaw)

 ω = frekuensi gelombang

- M_{jk} = matrix of floating structure mass and mass moment of inertia about the reference axes
- A_{jk} = matrix of added mass and added mass moment of inertia in accordance with the floating structure mode of motions
- B_{jk} = matrix of hydrodynamics damping in accordance with the floating structure mode of motions

 C_{jk} = matrix of floating structure hydrostatic stiffness

 ζ_j = amplitude of the j^(th) floating structure mode of motion

 $Fj = matrix of the j^{(th)} excitation force and moment$

2.2.6. Fast Fourier Transform

Fast Fourier Transform merupakan metode yang digunakan untuk mentransformasikan rekaman respon gelombang atau tegangan yang didapatkan dari analisis berbasis ranah waktu (*time-domain*) menjadi kurva spektrum energi respon gelombang atau tegangan dalam domain frekuensi (*frequency domain*). (Djatmiko, 2012). Proses transformasi ini menggunakan algoritma matematika deret fourier. Algoritma tersebut dikembangkan sedemikian rupa sehingga proses transformasi secara numerik bisa dilakukan dengan cepat.

Berikut gambar 2.5 merupakan contoh proses transformasi respon berbasis ranah waktu menjadi kurva energi spektrum respon.



Gambar 2.5. Skema FFT (*fast fourier transform*) (Djatmiko, 2012)

Dalam melakukan FFT, pertama harus disiapkan data *time history* respon dengan membagi satu rekaman respon menjadi segmen-segmen. Selanjutnya pada segmen tersebut ditetapkan sejumlah titik data dengan jumlah yang sama dengan interval pengukuran. Titik-titik tersebut adalah elevasi. Kemudian ditentukan juga frekuensi inkremental dan rentang frekuensi yang dikenal dengan *nyquist frequency* yang digunakan sebagai kenaikan frekuensi dalam kurva rekaman berdomain frekuensi. FFT kemudian bisa dilakukan setelah rangkaian persiapan data awal sudah dilakukan dengan baik.

Hasil awal FFT pada umumnya berbentuk kurva yang belum halus oleh karena itu harus dilakukan penghalusan dengan cara

- 1) Smoothening, menghilangkan noise
- Filtering, mengeliminasi komponen efek komplementer terhadap spektra

Hasil akhir selanjutnya diplot dalam grafik dengan absis berupa frekuensi gelombang dan ordinat berupa spektra kepadatan energi gelombang atau respon.

2.2.7. Spektrum Energi Gelombang

Djatmiko (2012) dalam bukunya berjudul "Perilaku dan operabilitas bangunan apung diatas gelombang acak" menjelaskan bahwa setiap gelombang regular memuat energi yang diidentifikasikan pada setiap unit atau satuan luas permukaannya ekuivalent dengan harga kuadrat amplitudonya. Adapun persamaan energi yang dikontribusikan oleh gelombang regular ke-n adalah :

$$\mathbf{E}_n = \frac{1}{2} \rho g \, \zeta_{n0}^2 \tag{2.10}$$

Dengan,

 E_n = Energi gelombang ke-n (kN/m) ρ = Massa jenis air laut, 1.025 (ton/m3)g= percepatan grafitasi, 9,81 (ton/m3) ζ_{n0}^2 = Ampliduto gelombang regular ke-n (m)

Gelombang acak terdiri dari superposisi gelombang regular yang berjumlah tak hingga. Secara visual seperti gambar 2.6



Gambar 2.6. Superposisi gelombang menghasilkan Gelombang acak (Djatmiko, 2012)

Gelombang acak dapat direpresentasikan pada kepadatan spektrum gelombang. Dimana energi tiap komponen gelombang merupakan besar ordinat dan frekuensinya. Dijelaskan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Definisi spektrum energi gelombang (Djatmiko, 2012)

Maka persamaan 2.9 dapat dicari energi yang diakibatkan gelombang ke n yang memiliki frekuensi tertentu.

$$\rho g S_{\zeta}(\omega) \ d\omega = \frac{1}{2} \rho g \ \zeta_{n0}^2 \tag{2.11}$$

Didapati besar ordinat kurva spektrum energi gelombang sebagai berikut :

$$S_{\zeta}(\omega) \ d\omega = \zeta_{n0}^2 / \delta \omega$$
 (2.12)

Dimana,

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

 ζ_{n0}^2 = Amplitudo gelombang (m)

 $\delta \omega$ = Rentang kenaikan frekuensi (rad/s)

2.2.8. Spektrum Gelombang Pierson-Motzkowitz

Pierson & Moskowitz (1964) mengajukan suatu formulasi spektra gelombang yang didasarkan pada teori similaritas dari Kataigorodskii. Formulasi secara luas dikenal sebagai spektra P-M. Formulasi tersebut dituliskan
dalam *Recommended Practice* DNV-RP-C205 mengenai *environmental conditions and environmental loads* sebagai berikut :

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_S^2 \cdot \omega_P^4 \cdot \omega^{-5} exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_P}\right)^{-4}\right)$$
(2.13)

dengan,

 $\omega_P = 2\pi/T_P$ = Angular spectral peak frequency T_P = Peak period H_S = Significant wave height ω = Wave angular frequency

2.2.9. Respon Bangunan Apung di Gelombang Acak

Gerakan bangunan apung dalam kondisi ideal dapat dihitung sebagai reaksi adanya eksitasi gelombang sinusoidal, dengan karakteristik tinggi atau amplitudo dan frekuensi tertentu. Perhitungan kemudian dilakukan dengan mengambil amplitudo gelombang yang konstan, namun harga frekuensinya divariasikan dengan interval kenaikan tertentu.

Gelombang acak merupakan superposisi dari komponen - komponen pembentuknya yang berupa gelombang sinusoidal dalam jumlah tidak terhingga. Tiap-tiap komponen gelombang mempunyai tingkat energi tertentu yang dikontribusikan, yang kemudian secara keseluruhan diakumulasikan dalam bentuk spektrum energi gelombang (Djatmiko, 2012).

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, potential damping dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. Respon pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga pangkat kuadrat dari *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan spektrum gelombang.

Persamaan spektrum respon pada *case* ini berlaku satuan untuk respon tegangan tali tambat secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$S_{\rm r} = {\rm RAO}^2 \, S_{\zeta}(\omega) \tag{2.14}$$

Dengan keterangan :

S _r	= Spektrum respon tegangan (ton)
$S_{\zeta}(\omega)$	= Spektrum gelombang (m)
RAO	= <i>Transfer function</i> (ton/m)



Gambar 2. 8. Transformasi Spektra Gelombang Menjadi Spektra Respons

(Djatmiko, 2012)

Setelah spektrum respon diperoleh maka depresi relatif terhadap ratarata atau varian dapat dihitung sebagai fungsi luasan di bawah kurva spektrum respon. Luasan dibawah spektrum respon merupakan nilai varians (m₀). Nilai tersebut didefinisikan sebagai berikut :

$$\mathbf{m}_0 = \int_0^\infty \mathbf{S}_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{\omega}) d\boldsymbol{\omega} \tag{2.15}$$

Varian kecepatan (m₂) dan percepatan (m₄) juga dapat diperoleh dari penurunan. Sehingga didapati :

$$\mathbf{m}_2 = \int_0^\infty \omega^2 \mathbf{S}_{\mathrm{r}}(\omega) d\omega \qquad (2.16)$$

$$\mathbf{m}_4 = \int_0^\infty \omega^4 \mathbf{S}_{\mathrm{r}}(\omega) d\omega \qquad (2.17)$$

Berdasarkan persamaan diatas jika diturunkan akan didapatkan hargaharga stokastik besar respon sebagai fungsi varian elevasi gerakan m₀. Persamaan parameter tersebut diberikan sebagaimana berikut :

$$S_{\text{Sig}} = 4\sqrt{m_0} x \sqrt{1 - \varepsilon^2/2}$$
 (2.18)

Dengan,

$$S_{\text{Sig}} = \text{Besar respon signifikan (m)}$$

$$\varepsilon = \text{Sudut phase}$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{(m_2)^2}{m_0 m_4}}$$
(2.20)

2.2.10. Teori Analisis Dinamis Berbasis Ranah Waktu

Merupakan analisis yang digunakan untuk memprediksi respon dinamis berbasis ranah waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini akan menggunakan prosedur integrasi waktu dan menghasilkan *time history* response berdasarkan fungsi waktu x(t). Metode analisis time domain umumnya seperti program komputer dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tali tambat dibawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Periode awal harus dimaksimalkan untuk meminimalkan efek transient.

Output dari simulasi time-domain adalah :

- Spektrum respon dapat dihitung dari time series, informasi yang diberikan sama dengan analisa domain frekuensi.
- Respon ekstrim dapat disimulasi langsung dari puncak respon selama simulasi.

Keuntungan metode ini dibandingkan *frequency domain* adalah semua tipe non-linear (matrik sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Sedangkan kerugiaannya adalah membutuhkan waktu perhitungan yang lebih lama. Menurut DNV OS E301 (2010), durasi minimal simulasi time domain untuk mendapatkan puncak nilai statistik respon yang stabil dan dapat merepresentasikan lingkungan adalah selama 3 jam (10800 detik) Berdasarkan DNV OS E301 (2010) Jika suatu sistem linier dan beban gelombang yang bekerja hanya terdiri dari orde-1 maka beban yang diterima maupun respon yang dihasilkan juga dalam bentuk linier sehingga dapat diselesaikan dengan analisis dinamis berbasis ranah frekuensi (frequency domain analysis). Sedangkan jika terkandung di dalamnya faktor-faktor non linier, seperti beban gelombang second order, non-linier viscous damping, gaya dan momen akibat angin dan arus maka perhitungan frequency domain analysis menjadi kurang relevan. Oleh karena itu untuk mengakomodasi faktor-faktor non linier tersebut maka persamaan gerak dari hukum-2 Newton diselesaikan dalam fungsi waktu atau yang lebih dikenal dengan istilah analisis dinamis berbasis ranah waktu (*time-domain analysis*).

2.2.11. Sistem Tambat

2.2.11.1. Taut - Spread Mooring System

Sistem tambat (*mooring system*) pada anjungan terapung berfungsi untuk menjaga posisi bangunan apung supaya tetap berada pada tempatnya. *Spread mooring* merupakan konfigurasi sistem tambat dimana masingmasing dari tali tambat disebar. *Spread mooring* ini memiliki kelemahan yakni tidak bersifat *wheatervanning*.

Fairlead akan mengikat tali tambat di bagian atas, sedangkan anchor akan mengikat tali tambat kebawah secara taut. Penambatan secara taut sendiri memiliki artian dimana tali tambat dibuat tegang seakan menarik struktur kebawah. Gaya pengembali (*restoring force*) pada konfigurasi ini adalah *axial stiffness* dan berat tali itu sendiri. Tali tambat akan mengalami gaya tegangan tergantung pada besar kecilnya bangunan apung yang ditambatkan serta properties dari tali tambat itu sendiri seperti kekakuan *axial stiffness*, bahan, dll.

Wichers (1986; 1987; 1988a; 1988b) memodelkan persamaan gerak dan gaya eksitasi akibat gelombang, arus, dan angin terhadap bangunan apung yang terikat. Persamaan tersebut sehubungan dengan masalah aspek gaya reaksi tali tambat. Berikut adalah persamaan gerak akibat gaya gelombang, arus, dan angin terhadap bangunan apung yang terikat.

$$\mathbf{M}\left(\ddot{x} + \mathbf{D}\dot{x}\right) = \mathbf{X}^{\mathbf{H}} + \mathbf{X}^{\mathbf{W}} + \mathbf{X}^{\mathbf{M}} + \mathbf{X}^{(2)}$$
(2.21)

Dengan,

 $X = (X_{I}, X_{2}, X_{6})^{\tau}$ $X_{I}, X_{2}, X_{6} = \text{Gaya dan momen eksitasi gerak surge, sway, dan yaw}$ $M = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ M = Massa Kapal $D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\dot{x}_{2} \\ 0 & 0 & \dot{x}_{6} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $\dot{x}_{6} = \text{Kecepatan gerak yaw}$ $\dot{x}_{2} = \text{Kecepatan gerak sway}$ $X^{H} = \text{Vektor gaya reaksi hidrodinamis dan gaya arus}$ $X^{W} = \text{Vektor gaya angin}$ $X^{M} = \text{Vektor gaya seret gelombang atau gaya gelombang orde-2}$

2.2.11.2. Kekakuan Tali Tambat.

Kekakuan tali tambat dapat dihitung berdasarkan hukum *hooke*. Gaya yang terjadi menyebabkan pertambahan panjang tali. Pertambahan panjang tali bergantung pada kekakuan tali. Semakin besar kekakuan tali maka semakin kecil pertambahan panjang tali. Berikut adalah persamaan hukum *hooke*.

$$F = K \cdot dx \tag{2.22}$$

$$K = \frac{F}{dx}$$
(2.23)

$$F = \frac{EA}{l} \cdot dx \tag{2.24}$$

$$K = \frac{EA}{l} \tag{2.25}$$

Dimana,

F	= Gaya yang bekerja (N)
Κ	= Kekakuan (N/m)
dx	= Penambahan Panjang Tali (m)
Ε	= Modulus Young (Kg/m ²)
A	= Luas penampang tali (m)
L	= Panjang tali (m)

2.2.11.3. Penentuan Panjang Tali Tambat Catenary

Penentuan panjang mooring line berfungsi agar *floating crane catamaran* memiliki posisi penambatan yang tepat. Selain itu, bertujuan supaya tali tambat memiliki *pretension* yang sesuai.



Gambar 2.9. Panjang Minimum Mooring Line (Faltinsen, 1990)

Berikut adalah penentuan panjang minimum dari mooring line :

$$\frac{l}{h} = \sqrt{\left(\frac{2F_H}{wh} + 1\right)} = \sqrt{\left(\frac{2T}{wh} - 1\right)}$$
(2.26)

Dengan,

l = Panjang minimum tali tambat (m)

h = Jarak vertikal dari *fairlead* ke *seabed* (m)

```
h = hm + hc
hm = kedalaman air (m)
```

hc = tinggi fairlead di atas permukaan air (m)

- w = Berat tali tambat yang tercelup tiap satuan panjang (ton/m)
- F_H = gaya horizontal pada fairlead (ton)
- T = tension line pada fairlead

2.2.11.4. Kriteria Safety Factor Tali Tambat

Kriteria mooring safety factor merupakan batas aman (batas ijin) beroperasinya suatu sistem bangunan terapung lepas pantai tertambat dengan meninjau nilai tegangan yang terjadi pada sistem tambat. Nilai tension pada tali tambat harus memenuhi kriteria/batasan safety factor. Kriteria mooring safety factor pada penelitian ini berdasar pada rule API RP 2 SK yang dijelaskan pada tabel 2.1 dibawah.

Tabel 2.1 Kriteria Safety Factor Tali Tambat

Condition	Analysis Method	Safety Factor
Intact	Dynamic	≥ 1.67
Damaged	Dynamic	≥ 1.25

Dengan persamaan untuk menghitung nilai *safety factor* menurut API RP 2SK adalah:

Safety Factor =
$$\frac{Minimum Breaking Load}{Maximum Tension}$$
 (2.27)

2.2.12. Teori Permodelan

Munson, et al. yang dikutip dalam penelitian Negoro (2019) menjelaskan bahwa dalam melakukan pemodelan sebuah struktur rill untuk eksperimen, harus diperhatikan aspek berikut yaiu kesamaan geometri, kesamaan kinematika fluida, kesamaan hidrodinamik, dan hukum pemodelan froud. Aspek tersebut harus diperhatikan supaya model eksperimen dapat merepresentasikan kondisi rill. Berikut adalah detail aspek pemodelan

1. Kesamaan geometri

Kesamaan geometri struktur yang dimodelkan harus sama secara geometri meskipun secara dimensi berbeda. Rasio skala geometris dapat digunakan persamaan berikut.

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda \tag{2.28}$$

Rasio skala tersebut dapat dengan mudah diasumsikan dengan rasio skala konstan diantara dimensi model dan prototipe. Lp merupakan besaran geometri prototype dan lm merupakan besaran geometri model. Dan λ merupakan notasi untuk faktor skala.

2. Kesamaan kinematik

Aspek kinematik model harus mewakili kondisi rill. Aspek tersebut dapat berupa kecepatan fluida, percepatan, dan sebagainya. Aspek tersebut harus selalu memiliki rasio skala yang konstan sehingga pemodelan sesuai dengan kondisi rill. Rasio kesamaan kinematik harus sama dengan rasio kesamaan geometris.

3. Kesamaan hidrodinamik

Kesamaan hidrodinamik ditentukan oleh gaya yang bekerja pada struktur. Olah gerak dan respon struktur dipengaruhi oleh interaksi fluida dengan struktur. Dalam kebanyakan kasus, hanya satu dari beberapa hukum skala tersebut yang dapat memenuhi model struktur. Oleh karena itu, hal penting yang perlu dipahami adalah proses fisik yang dialami oleh struktur. Kemudian memilih hukum skala yang paling penting yang mengatur proses tersebut.

4. Hukum model Froude

Bilangan Froude adalah perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium. Berikut adalah persamaan yang mendefinisikan bilangan froude.

$$Fr = \frac{u^2}{g.D} \tag{2.29}$$

Agar model dapat mewakili kondisi rillnya maka pemodelan froude harus memenuhi hubungan berikut.

$$\frac{u_p^2}{g.D_p} = \frac{u_m^2}{g.D_m}$$
(2.30)

Dengan mengacu pada rasio skala kesamaan geometri (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. Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used inMechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994)

Variable	Unit	Scale Factor	Remarks
		Geome	try
Length	L	λ	Any Characterictic dimension of the object
Volume	L^3	λ^3	For any portion of the object
Angle	None	1	e.g., between members or solid angle
Radius of Gyration	L	Λ	Measured from a fixed point
Moment Inertia of mass	ML^2	λ^5	Taken about fixed point
Centre of Gravity	L	λ^3	Measured from a reference point
Natural Period	Т	$\lambda^{1/2}$	Period at which inertia force = restoring force

Variabla	Unit	Scale	Remarks	
v al lable	Umt	Factor	Ktillal KS	
		Wave Mecl	nanics	
Wave Height	L	λ	Consecutive crest to trough distance	
Waye Periode	Т	$\sqrt{\frac{1}{2}}$	Time between two successive crests	
wave I erioue	1	VЛ	passing a point	
Wave Length	I	a	Distance between two successive	
wuve Lengin		λ	crests at a given time	
Wave Elevation	L	λ	Form of wave (distance from still	
Have Dievenon			waterline)	
	Kin	emarics &	Dynamics	
Time	Т	$\lambda^{1/2}$	Same reference point (e.g., starting	
Time	1		time) is considered as zero time	
Displacement	L	λ	Position at rest is considered as zero	
Spring Constant	MT^2	λ^2	Force per unit length of extension	
(Linear)	1011	70	r orec per unit rength of extension	
Damning Factor	None	1	Ratio of damping and critical	
Dumping Lucion	TONE	1	damping coefficient	

Tabel 2.2. Model to Prototype Multiplier for The Variables Commonly Used inMechanics Under Froude Scaling (Chakrabarti, 1994) (Lanjutan)

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian (lanjutan)

3.2. Prosedur Penelitian

3.2.1. Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan kegiatan studi literatur. Studi literatur merupakan kegiatan mempelajari literatur-literatur yang berhubungan dengan penelitian pada tugas akhir ini. Adapun literatur yang dipelajari yakni tentang analisis tegangan tali tambat pada struktur berlambung *catamaran* maupun struktur *crane vessel* lainnya menggunakan metode eksperimen maupun numeris. Selain itu, literatur yang dipelajari meliputi analisis tegangan tali berbasis ranah waktu, properti tali tambat, gelombang, *rules* dan *codes* mengenai sistem tambat bangunan apung.

Pada penelitian ini, model eksperimen yang digunakan adalah struktur berlambung catamaran dengan fungsi sebagai *working accomodation* dilengkapi *crane* dan kemudian akan disebut *floating crane catamaran* (FCC). Model eksperimen tersebut merupakan model riset milik Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT. Skala yang digunakan pada model eksperimen adalah 1:36. Pemodelan dan studi eksperimen dilaksanakan di Kolam *Maneuvering Ocean Basin* (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT. Selain itu, dilakukan analisis secara numeris pada struktur *floating crane catamaran*. Adapun data yang digunakan dalam penelitian yakni data *full scale* model *floating crane catamaran* terlampirkan pada (Tabel 3.1), data pembebanan lingkungan (Tabel 3.2), dan data Kolam MOB BTH BPPT (Tabel 3.3)

Principal Dimension	Besaran	Satuan
Length Overall (LOA)	111.00	m
Length Perpendicular (Lpp)	108.00	m
Breadth Moulded (B)	37.80	m
Depth Moulded (H)	10.50	m
Draft (T)	4.70	m

Tabel 3.1. Data Geometri Floating Crane Catamaran (Full Scale)

Kondisi	Full Scale		Model Scale (1:36)		Keterangan	Arah
Pembebanan	H (m)	T (s)	H (m)	T (s)	Reterangan	Gelombang
Sea State 1	2.50	8.5	0.069	1.417	Intact	90°
Sea State 2i	6.37	12.3	0.177	2.050	Intact	90°
Sea State 2d	6.37	12.3	0.177	2.050	Damaged	90°

Tabel 3.2. Data Pembebanan Eksperimen

Spektra gelombang yang digunakan adalah spektra Pierson – Moskowitz (1964)

3.2.2. Pemodelan

Pada tahap ini dilakukan pembuatan model dari data yang telah dikumpulkan. Pemodelan dilakukan secara numerik dan eksperimen.

3.2.2.1. Pemodelan Eksperimen

Model eksperimen yang digunakan pada penelitian ini adalah model fisik *floating crane catamaran* milik Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT. Model dalam eksperimen ini menggunakan skala 1 : 36. Dalam penelitian ini, tidak dilakukan pemodelan ulang karena model masih memerlukan revitalisasi. Setelah model selesai dibangun, dilakukan kalibrasi terhadap parameter dimensi utama dan karakteristik hidrostatik *floating crane catamaran* meliputi LoA, Lpp, Lebar (B), Tinggi sarat air (T), *Displacement*, dan lain-lain serta parameter distribusi massa seperti Longitudinal Centre of Bouyancy (LCG), Jari-jari Girasi, dan lain-lain dalam skala model. Parameter desain tersebut merupakan acuan dari rencana desain milik pihak Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT.

3.2.2.2. Pemodelan Numeris Kondisi free-floating

Pemodelan numeris dilakukan menggunakan *software* MOSES. Dalam pemodelan struktur *Floating Crane Catamaran*, perlu diperhatikan parameter dimensi utama dan karakteristik hidrostatik *floating crane catamaran* meliputi LoA, Lpp, Lebar (B), Tinggi sarat air (T), *Displacement*, dan lain-lain serta parameter distribusi massa seperti Longitudinal Centre of Bouyancy (LCG), Jari-jari Girasi, dan lain-lain. Prosedur selanjutnya adalah melakukan validasi dimensi utama struktur dan parameter distribusi massa supaya model numeris dapat merepresentasikan model sesungguhnya.

3.2.3. Persiapan Instrumen

3.2.3.1. Komponen Tali Tambat

Pada penelitian ini, digunakan tali tambat serta pegas dengan parameter yang disesuaikan dengan kondisi kolam MOB BTH-BPPT. Parameter ini antara lain kekakuan sistem tambat (*mooring stiffness*), posisi *fairlead*, sudut *fairlead* dan *pre-tension*.

Penggunaan pegas bertujuan untuk mendapatkan ekstrapolasi respon tegangan. Serta, mencegah terjadinya slack atau deformasi sling akibat pembebanan yang melebihi batas elastisitas sling.

3.2.3.2. Kalibrasi Kekakuan Tali Tambat

Kalibrasi dilakukan pada pegas dengan cara dilakukan variasi pembebanan sehingga didapati perubahan panjang pegas tiap gaya yang bekerja. Kekakuan pegas dihitung menggunakan persamaan hukum *hooke* dengan perbandingan gaya yang bekerja terhadap perubahan panjang pegas.

3.2.3.3. Kalibrasi Loadcell

Loadcell merupakan suatu instrumen untuk mencatat data tegangan yang terjadi pada saat eksperimen. Kalibrasi dilakukan dengan pembebanan dengan beban yang valid. Pembebanan dilakukan beberapa kali hingga didapati sebaran data. Sebaran data tersebut merupakan besar nilai pembebanan terhadap besar nilai *output loadcell*. Dari sebaran data tersebut didapati *trendline* sehingga dapat ditarik persamaan regresi. Dari persamaan tersebut, *output loadcell* dapat terkoreksi.

3.2.3.4. Set-up Konfigurasi Sistem Tambat

Digunakan konfigurasi spread mooring dengan 8 mooring line.

Pada studi eksperimen, tali ditambatkan dari fairlead menuju pulley (roda katrol) dengan kondisi taut horizontal. Dari pulley, tali tambat diteruskan kearah vertikal menuju *loadcell* yang digantungkan pada pegas.

Pre-tension dari tiap tali tambat bisa dicek melalui *loadcell* saat konfigurasi sistem tambat telah disusun. Pengukuran *pre-tension* tidak memerlukan pembebanan gelombang atau sistem tambat berada dalam kondisi statis.

3.2.3.5. Kalibrasi Kolam Uji

Kalibrasi kolam uji dilakukan untuk memastikan bahwa tinggi gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker* sesuai dengan kondisi gelombang yang direncanakan. Alat kalibrasi gelombang ini adalah *waveprobe*. *Waveprobe* berfungsi untuk membaca elevasi gelombang acak yang dibangkitkan oleh *wave maker*. Elevasi gelombang yang dibangkitkan berbasis ranah waktu. Kemudian output dari *waveprobe* diubah menjadi spektrum gelombang berbasis ranah frekuensi. Proses pengubahan ini menggunakan *fast fourier transform* (FFT). Setelah didapati spektrum gelombang uji berbasis ranah frekuensi, kemudian dilakukan validasi antara spektrum energi gelombang yang dihasilkan oleh *wave maker* dengan spektrum energi gelombang teoritis. *Waveprobe* juga terus dipasang ketika pengujian dilakukan untuk merekam elevasi gelombang yang dibangkitkan

3.2.4. Percobaan

Pada tahap ini dilakukan percobaan pada model eksperimen. Percobaan dilakukan menggunakan skenario pembebanan sebanyak tiga kali *run*. Tiga variasi pembebanan terlampir seperti pada Tabel 3.1. Skenario pertama pada kondisi *intact*, dengan pembebanan gelombang Hs = 0.069 m dari arah 90° atau *beam seas*. Skenario kedua pada kondisi *intact*, dengan pembebanan gelombang Hs = 0.177 m dari arah 90° atau *beam seas*. Skenario kedua pada kondisi *intact*, dengan pembebanan gelombang Hs = 0.177 m dari arah 90° atau *beam seas*. Skenario ketiga pada kondisi *damaged*, dengan pembebanan gelombang Hs = 0.177 m dari arah 90° atau beam seas. Percobaan dilaksanakan di kolam MOB Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH) – BPPT. Didapati hasil tegangan tali tambat berbasis ranah waktu.

3.2.5. Pengolahan Data Eksperimen

Data tegangan tali tambat berbasis ranah waktu yang diperoleh dari hasil eksperimen diolah menjadi spektra tegangan tali tambat berbasis ranah frekuensi. Pengolahan data dilakukan menggunakan *software* MATLAB karena *software* tersebut memiliki fitur FFT dan *Signal Filtering*. Sebelumnya, dilakukan *coding* untuk menentukan algoritma FFT dan *Signal Filtering*. Bentuk dari spektrum tegangan adalah kurva spektrum yang menunjukkan besar energi dari tegangan tali tambat yang ditimbulkan dari gelombang yang mengenainya.

3.2.6. Analisis Data Eksperimen

Spektra tegangan berbasis ranah frekuensi yang telah didapat dari hasil FFT kemudian dilakukan perhitungan parameter stokastik. Parameter stokastik dapat menunjukkan karakteristik dari respon tegangan tali tambat. Salah satu parameter yang akan ditinjau adalah perhitungan tegangan tali tambat maksimum.

3.2.7. Pemodelan Numeris Kondisi Tertambat

- a) Menentukan *mooring properties* yang sesuai dengan kekakuan sistem tambat eksperimen. Dilakukan pengecekan pada pertambahan tension tiap ekskursi dan nilai *stiffness* tiap ekskursi.
- **b**) Pemodelan sistem tambat sistem tambat

Konfigurasi sistem tambat menggunakan *spread mooring* berjenis *catenary* dengan 8 *mooring line* (4 *mooring line* di *bow* dan 4 *mooring line* di *stern*). Sudut sebar horizontal dimodelkan sama seperti sudut sebar eksperimen.

- c) Input Kondisi Pembebanan Sesuai Skenario Eksperimen
 - Pada tahap ini dilakukan percobaan pada model eksperimen. Percobaan dilakukan menggunakan skenario pembebanan sebanyak tiga kali *run.* Tiga variasi pembebanan terlampir seperti pada Tabel 3.1. Skenario pertama pada kondisi *intact*, dengan pembebanan gelombang Hs = 0.069 m dari arah 90° atau *beam seas*. Skenario kedua pada kondisi *intact*, dengan pembebanan gelombang Hs = 0.177 m dari arah 90° atau *beam seas*. Skenario

ketiga pada kondisi *damaged*, dengan pembebanan gelombang Hs = 0.177 m dari arah 90°

3.2.8. Analisis Dinamis Kondisi Tertambat

Analisis dinamis kondisi tertambat dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai tegangan maksimum pada sistem tambat *floating crane catamaran*. Analisis ini dilakukan dalam simulasi berbasis ranah waktu (*time domain*). Menurut DNV OS E301 (2004), simulasi *time domain* dilakukan minimal selama 3 jam.

3.2.9. Perbandingan Hasil Studi Eksperimen Dan Numeris

Tegangan maksimum yang didapatkan dari hasil studi eksperimen dan numeris dibandingkan. Tujuan dari pembandingan ini adalah untuk melakukan validasi hasil numeris terhadap eksperimen.

3.2.10. Variasi Pembebanan Pada Model Numerik

Setelah hasil studi eksperimen dan numeris menunjukkan kesamaan, maka *basic* model numeris bisa dikembangkan untuk analisis numeris yang lebih luas. Pada tahap ini, dilakukan variasi pembebanan pada model numeris. Beban yang divariasikan adalah beban gelombang (Hs) Beban gelombang. Hasil dari variasi pembebanan ini adalah tegangan tali tambat maksimum tiap kondisi pembebanan. Kemudian dari nilai tersebut nantinya akan digunakan untuk pengecekan apakah tegangan yang dihasilkan dari variasi beban gelombang ke-n telah memenuhi kriteria *safety factor* API RP 2SK.

Dari tiap variasi, akan di-plot hubungan antara beban gelombang (Hs) terhadap nilai *safety factor* (SF) tali tambat. Variasi dilakukan berulang kali sehingga akan didapati *trendline* dari sebaran titik hubungan antara beban gelombang (Hs) terhadap nilai *safety factor* (SF).

3.2.11. Evaluasi dan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan evaluasi penelitian dan penarikan kesimpulan.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemodelan Eksperimen

4.1.1. Pemodelan Stuktur

Pada eksperimen, digunakan penyekalaan model sebesar 1 : 36 terhadap ukuran asli (*full-scale*). *Floating crane catamaran* dimodelkan menggunakan kayu balsa untuk struktur lambung, geladak, serta properti lainnya. Kemudian, untuk menambatkan struktur, maka ditambahkan *fairlead* berupa besi pengait. Ukuran utama *floating crane catamaran* skala model eksperimen yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 4.1

Floating Crane Catamaran Properties (Skala 1 : 36)					
Parameter	Dimensi (model scale)	Faktor Skala	Dimensi (full scale)	Satuan	
Length Overall (LOA)	3.08	λ	111.00	m	
Length Waterline (LWL)	3.08	λ	111.00	m	
Length Perpendicular (LPP)	3.00	λ	108.00	m	
Breadth (B)	1.05	λ	37.80	m	
Main Deck Height (H)	0.4	λ	14.4	m	
Draft (T)	0.131	λ	4.70	m	

 Tabel 4.1. Hasil penyekalaan model menggunakan aturan froude

Koordinat *fairlead* sumbu z-dihitung dari *vessel keel*, sumbu-x dihitung dari *bow*, dan sumbu-y dihitung dari *vessel metacentre*.

Tabel 4.2. Koordinat Fairlead

Maarina	Fairlead Axis (m)						
Lino	Ĵ	full scale		model scale			
Line	Х	Y	Z	Х	Y	Z	
1	5.642	-15.9	13.14	0.16	-0.44	0.365	
2	5.642	-15.9	13.14	0.16	-0.44	0.365	
3	106.5	-18.9	13.14	2.96	-0.53	0.365	
4	106.5	-18.9	13.14	2.96	-0.53	0.365	
5	106.5	18.9	13.14	2.96	0.53	0.365	
6	106.5	18.9	13.14	2.96	0.53	0.365	
7	5.642	15.9	13.14	0.16	0.44	0.365	
8	5.642	15.9	13.14	0.16	0.44	0.365	



Gambar 4.1. Tampak depan model eksperimen



Gambar 4.2. Tampak samping model eksperimen



Gambar 4.3. Hasil akhir model eksperimen

1. Menghitung Massa Struktur

Selain dari penyesuaian dimensi, dilakukan pula penyesuaian distribusi massa struktur. Mulanya sebelum dilakukan kalibrasi distribusi massa, dilakukan penimbangan berat struktur. Setelah didapati berat struktur, maka diperlukan penyesuaian dengan mengatur penambahan ballast berupa besi baja yang telah terkalibrasi dengan ukuran 10kg dan

5kg seperti pada gambar 4.5. Penambahan *ballast* bertujuan untuk mencapai target massa total struktur kondisi *full load*. Gambar 4.4 menunjukkan proses menimbang model eksperimen.



Gambar 4.4. Menimbang model eksperimen



Gambar 4.5. Besi ballast

Tabel 4.3.	Perhitungan	massa	total	model	eksp	erimen
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					

Komponen	Massa (kg)
Struktur Model Eksperimen	111
Total Besi Ballast	70
Total	181

2. Kalibrasi LCG

Setelah model dirancang bersama dengan ballastnya, model diletakkan pada meja osilator guna mendapatkan nilai besar Longitudinal keel to gravity (LCG). Meja osilator memiliki titik tengah berupa poros osilasi. Proses kalibrasi dimulai dengan meletakkan model eksperimen diatas meja osilator. Peletakan model disesuaikan dengan memposisikan titik LCG desain tepat diatas poros meja. Sebelum proses kalibrasi dimulai, model eksperimen harus dinyatakan seimbang. Menyeimbangkan model dilakukan dengan cara memindahkan posisi ballast. Keseimbangan

model eksperimen dapat dilihat melalui *waterpass* yang terdapat pada meja osilator. Dari kalibrasi didapatkan nilai LCG sebesar 1.415 m dari AP. Proses kalibrasi LCG seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4.6. Kalibrasi LCG, meletakkan model pada meja osilator

4.1.2. Pemodelan Sistem Tambat

4.1.2.1. Konfigurasi Sistem Tambat Eksperimen

Rangkaian tali tambat pada eksperimen tersusun dimulai dari fairlead, sling stainless-steel -(pulley)- sling *stainless-steel*, *loadcell*, dan pegas yang dihubungkan pada tongkat besi dengan fungsi sebagai anchor horizontal mooring. Gambar 4.7 adalah tampak atas atau tampak 2 dimensi bidang X-Y konfigurasi sistem tambat metode eksperimen.



Gambar 4.7. Tampak 2 dimensi bidang X-Y konfigurasi sistem tambat

Dengan sudut sebar (*azimuth*) mooring line pada tampak atas ditunjukkan pada tabel 4.4.

Sudut sebar (degree)				
Mooring line 1	35			
Mooring line 2	50			
Mooring line 3	130			
Mooring line 4	145			
Mooring line 5	215			
Mooring line 6	230			
Mooring line 7	310			
Mooring line 8	325			

Tabel 4.4. Sudut sebar (X-Y) sistem tambat



Gambar 4.8. Tampak 2 dimensi bidang X-Z konfigurasi sistem tambat

Konfigurasi tali tambat yang digunakan saat eksperimen adalah berjenis **horizontal taut**. Gambar 4.8 menunjukkan ketinggian fairlead dan pulley (anchor) terhadap permukaan air sama. Tinggi *pulley* menyesuaikan desain ketinggian *fairlead* terhadap permukaan air. Ketinggian fairlead terhadap permukaan air dihitung dengan persamaan berikut.

Tinggi Fairlead terhadap permukaan air = Tinggi fairlead terhadap keel -

4.1.2.2. Properti Tali Tambat Eksperimen

Tali tambat pada studi eksperimen dimodelkan menggunakan sling *stainless-steel* dan pegas. Gambar 4.9. adalah sling *stainless-steel* dan pegas yang digunakan.



Gambar 4.9. Sling stainless-steel

Spesifikasi sling *stainless-steel* yang digunakan dalam model eksperimen adalah sebagai berikut :

Keterangan	Simbol	Model Scale	Satuan
Diameter	D	0.36	mm
Luas Penampang	А	0.1018	mm^2
Minimum Breaking Load	MBL	30	Lbs

Tabel 4.5. Spesifikasi sling stainless-steel model eksperimen

Maksud dari penggunaan tali jenis ini (sling) yakni untuk menghindari *slack* atau pertambahan panjang tali akibat tegangan. Oleh sebab itu dipilihlah sling dengan kapasitas menahan beban hingga 30 lbs atau 13,6 kg. Artinya tidak ada perubahan panjang jika beban yang mengenai saat eksperimen masih dibawah 30 lbs atau 13,6 kg.

Pegas digunakan sebagai kekakuan utama dari sistem tambat. Selain itu pegas juga berfungsi untuk ekstrapolasi hasil pengujian. Kekakuan pegas didapati dengan kalibrasi pegas menggunakan neraca gantung. Pegas diberikan beban konstan kemudian dicatat perubahan panjang pegas. Proses kalibrasi pegas dapat dilihat pada gambar 4.11 serta gambar 8 buah pegas yang digunakan sewaktu eksperimen dapat dilihat pada gambar 4.10.





Gambar 4.10. 8 buah Pegas

Gambar 4.11. Proses Kalibrasi Pegas

Kalkulasi kekakuan pegas dilakukan dengan menghitung selisih pertambahan pegas akibat pembebanan. Pembebanan dilakukan dengan penambahan beban 250gr (0.25kg), hingga 2000gr (2kg), kemudian dilakukan hal sebaliknya dengan mengurangi beban. Selisih pertambahan panjang pegas akibat pembebanan kemudian dicatat dan dilakukan perhitungan kekakuan pegas dengan membandingkan selisih pembeban terhadap perubahan panjang pegas seperti persamaan 2.23. Proses perhitungan kekakuan pegas dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6. Kalkulasi Kekakuan Pegas 1						
n (kg)	F (N)	x (m)	dx (m)	K (N		

Beban (kg)	F (N)	x (m)	dx (m)	K (N/m)
0.000	0.000	0.315	0.000	
0.250	2.452	0.371	0.056	43.780
0.500	4.903	0.426	0.111	44.174
0.750	7.355	0.480	0.165	44.576
1.000	9.807	0.535	0.220	44.576
1.250	12.258	0.592	0.277	44.254
1.500	14.710	0.647	0.332	44.307
1.750	17.162	0.704	0.389	44.117
2.000	19.613	0.760	0.445	44.075
1.750	17.162	0.701	0.386	44.460
1.500	14.710	0.646	0.331	44.441
1.250	12.258	0.591	0.276	44.414
1.000	9.807	0.536	0.221	44.374
0.750	7.355	0.481	0.166	44.307
0.500	4.903	0.425	0.110	44.576
0.250	2.452	0.370	0.055	44.576
0.000	0.000	0.315	0.000	
Rata-Rata Kekakuan Pegas 1			44.334	

Pada pegas 1, diperoleh trendline *linear* untuk pembebanan hingga beban 2 kg dengan nilai R² sama dengan 0.99995 yang ditunjukkan pada gambar 4.12. Hal ini menyatakan bahwa pegas memiliki kekakuan konsisten hingga beban 2kg (model scale)



Gambar 4.12. Grafik pembebanan - pertambahan panjang pegas 1

Untuk memperoleh kekakuan pegas lainnya, dilakukan cara kalibrasi yang sama seperti pegas 1. Sehingga, didapati kekakuan masing-masing pegas seperti pada tabel 4.7.

Vatarangan	Model Scale	Full Scale	
Keterangan	Kekakuan (N/m)	Kekakuan (kN/m)	
Pegas 1	44.334	58.89	
Pegas 2	44.015	58.47	
Pegas 3	43.576	57.88	
Pegas 4	43.450	57.72	
Pegas 5	43.925	58.35	
Pegas 6	44.007	58.45	
Pegas 7	44.204	58.72	
Pegas 8	43.258	57.46	
Rata-Rata	43.846	58.25	

Tabel 4.7. Kekakuan Pegas

4.1.3. Persiapan Instrumen Pengukuran

4.1.3.1. Kalibrasi Loadcell

Pengukuran tegangan tali tambat *floating crane catamaran* dilakukan menggunakan *loadcell*. Instrumen ini memanfaatkan strain-gauge yang berarti jika ada tarikan maka akan ditangkap respon tegangan. Tegangan

tersebut akan dibaca sebagai data sinyal. Kalibrasi diperlukan sebagai penyelarasan tegangan yang dihasilkan oleh suatu beban terukur terhadap keluaran *loadcell*. Pada eksperimen ini, kami menggunakan *loadcell* milik penyedia kolam uji yang telah terkalibrasi.

4.1.3.2. Kalibrasi Wave Generator

Kalibrasi wave generator dilakukan guna memastikan bahwa tinggi gelombang pengujian bisa merepresentasikan input gelombang yang diinginkan. Input gelombang mulanya dibangkitkan oleh *wave generator* seperti pada gambar 4.14. Gelombang yang dihasilkan kemudian akan melewati alat pencatan elevasi gelombang yang bernama *wave probe* seperti pada gambar 4.13.



Gambar 4.13. Wave Probe



Gambar 4.14. Wave Generator

Karakteristik gelombang uji yang digunakan pada eksperimen dapat dilihat pada tabel 4.8.

Uji 1	Uji 2 & 3	Satuan				
Full Scale						
Pierson-N	-					
2.5	6.37	m				
8.5	12.3	S				
90 90		Degree				
Model Scale (1 : 36)						
Pierson-N	-					
0.06944	0.1769	m				
1.4166	2.05	S				
90	90	Degree				
	Uji 1 <i>Full Scale</i> Pierson-M 2.5 8.5 90 <i>Model Scale</i> (1 Pierson-M 0.06944 1.4166 90	Uji 1 Uji 2 & 3 Full Scale Pierson-Moskowitz 2.5 6.37 8.5 12.3 90 90 Model Scale (1 : 36) 90 Pierson-Moskowitz 0.06944 0.1769 1.4166 90 90				

Tabel 4.8. Karakteristik gelombang pengujian

Setelah dimulai pembangkitan gelombang, wave probe kemudian merekam tinggi gelombang yang dibangkitkan oleh wave maker sehingga didapati hasil nilai perekaman gelombang berbasis *time history*. Data perekaman gelombang kemudian dikonversi menjadi spektrum gelombang menggunakan metode FFT (*Fast Fourier Transform*). Kurva pada spektrum gelombang merupakan resultan dari energi gelombang regular yang saling superposisi Energi diidentifikasikan pada setiap unit adalah ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya (Djatmiko, 2012). Gambar 4.15 dan 4.16 adalah hasil FFT spektrum gelombang uji dibanding teoritis.



Gambar 4.15. Spektrum gelombang uji dan teoritis dengan Hs = 2.5 m





Adapun parameter yang menjadi validasi gelombang uji yakni tinggi gelombang signifikan (Hs) dihitung menggunaan persamaan 4.1.

$$\mathbf{H}_{\mathbf{S}} = 4\sqrt{m_0} \tag{4.1}$$

Dengan,

m₀ = Varian elevasi permukaan gelombang (m²)
 Hs = Tinggi gelombang signifikan (m)

Tabel 4.9 dan 4.10 adalah validasi gelombang uji dan gelombang teoritis dengan masing-masing parameter Hs.

Tabel 4.9. Hasil Validasi Kalibrasi Gelombang Uji 1

Parameter	Gelombang teoritis	Gelombang Uji	Error
m0 (m2)	0.39	0.37	3.88%
Hs (m)	2.49	2.44	1.96%

Tabel 4.10. Hasil Validasi Kalibrasi Gelombang Uji 1

Parameter	Gelombang teoritis	Gelombang Uji	Error
m0 (m2)	2.55	2.55	0.25%
Hs (m)	6.39	6.39	0.12%

4.2. Analisis Tegangan Tali Tambat Eksperimen

4.2.1. Hasil Tegangan Tali Tambat Eksperimen

Percobaan eksperimen dilakukan di kolam *Maneuvering and Ocean Engineering* Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH-BPPT). *Floating crane catamaran* ditambatkan dengan konfigurasi *taut horizontal mooring*. Gambar 4.17 merupakan konfigurasi eksperimen kondisi tali tambat *intact* dan gambar 4.18 merupakan konfigurasi eksperimen kondisi tali tambat *damaged*. Setelah konfigurasi di*setup* sedemikian rupa, maka kemudian dilakukan analisis sesuai skenario. Tampak *floating crane catamaran* tertambat di kolam uji ditunjukkan pada gambar 4.19.



Gambar 4.17. Konfigurasi Mooring Kondisi Intact



Gambar 4.18. Konfigurasi Mooring Kondisi Damaged





Pengujian eksperimen dilaksanakan pada 3 kondisi pengujian seperti terlampir pada tabel 4.11 berikut

Skenario	Wave Dir.	Full Scale		Mo Ekspe	odel erimen	Keterangan
	(deg)	Hs (m)	Tp (s)	Hs (m)	Tp (s)	
Skenario 1	90	2.5	8.5	0.0694	1.4167	Intact
Skenario 2	90	6.37	12.3	0.1769	2.0500	Intact
Skenario 3	90	6.37	12.3	0.1769	2.0500	Damaged

Tabel 4.11. Skenario eksperimen dan urutan

Pada eksperimen digunakan sampling 50hz, yang berarti, setiap detik waktu dalam model scale didapati sample sebanyak 50 data record. Durasi pengujian masing-masing skenario dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4.12. Durasi Pengujian

Skenario	Model scale	Full Scale	satuan
	1789.6	10737.84	detik
Skenario 1	29.8	178.96	menit
	0.497	2.98	jam
Skenario 2	1792.5	10755.12	detik
	29.9	179.25	menit
	0.498	2.99	jam
Skenario 3	1774.2	10645.20	detik
	29.6	177.42	menit
	0.493	2.96	jam

Respon tegangan tali tambat akibat beban gelombang kemudian direkam oleh *loadcell*. Output didapatkan tegangan tali tambat berdomain waktu (*time-history*). Gambar 4.20, 4.21, 4.22, adalah hasil tegangan tali tambat ke-6 pada ketiga skenario pengujian. Untuk hasil tegangan tali tambat lain dapat dilihat pada Lampiran C.



A. Tegangan Tali Tambat ke-6 *Time-History* Kondisi Intact, Hs = 2.5m



B. Tegangan Tali Tambat ke-6 *Time-History* Kondisi Intact, Hs = 6.37m



Gambar 4.21. Time-History Tegangan Tali Tambat ke 6

Kondisi Intact, Hs = 6.37 m

C. Tegangan Tali Tambat ke-6 *Time-History* Kondisi Damaged, Hs = 6.37m



Gambar 4.22. *Time-History* Tegangan Tali Tambat ke 6 Kondisi *Damaged*, Hs = 2.5m

4.2.2. Analisis Tegangan Maksimum Eksperimen

Mooring tension yang telah didapatkan dianalisis menggunakan pendekatan frekuensi domain. Pendekatan yang digunakan mengacu pada *rules* API RP 2 SK. Dimana tegangan maksimum merupakan penjumlahan dari tegangan rata-rata dengan tegangan signifikan pada frekuensi rendah dan tegangan maksimum pada frekuensi gelombang atau dapat ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig}$$
(4.2)

dimana,

 T_{max} = Tegangan Maksimum T_{mean} = Tegangan Rata-Rata T_{wfmax} = Tegangan Maksimum pada Frekuensi Gelombang T_{lfsig} = Tegangan Signifikan pada Frekuensi Rendah

Untuk memperoleh nilai tegangan frekuensi rendah dan tegangan frekuensi tinggi dilakukan *signal filtering*. Nilai hasil filter tersebut masih berupa tegangan dalam *time-domain*. Perhitungan stokastik tegangan bisa dilakukan jika data sudah diolah menjadi frekuensi domain. Untuk mengolah data tegangan *time domain* menjadi *frequency domain* maka dilakukan FFT (*fast fourier transform*). Proses *signal band filtering* dan FFT dilakukan menggunakan *software* MATLAB.

a. Low-pass & Band-pass Filtering Tegangan Tali Tambat Eksperimen

Low-pass filter (LPF) adalah metode filter yang melewatkan sinyal dengan frekuensi lebih rendah dari frekuensi cutoff yang dipilih dan melemahkan sinyal dengan frekuensi lebih tinggi dari frekuensi cutoff. Signal filter dilakukan untuk memisahkan frekuensi rendah dan frekuensi gelombang. Pada pengambilan tegangan frekuensi rendah, data yang diambil berada pada rentangan frekuensi 0 hingga 0.3 rad/s. Batas *cuttoff* tepat pada encounter periode spektra gelombang, yakni 0.3 rad/s. kemudian pada frekuensi gelombang, data yang diambil berada pada rentangan frekuensi 0.3 – 3 rad/s. Gambar 4.23, 4.24, 4.25 adalah hasil

low-pass filtering untuk mendapatkan respon tegangan frekuensi rendah dan frekuensi tinggi pada tali tambat ke 6, Untuk semua jenis tali dapat dilihat pada Lampiran D.



i. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6 Kondisi Intact, Hs = 2.5m

Gambar 4.23. Filtering Tegangan Tali ke-6 Kondisi Intact, Hs = 2.5m

ii. Filtering Tegangan Tali ke-6 Kondisi Intact, Hs = 6.37m



Gambar 4.24. Filtering Tegangan Tali ke-6 Kondisi Intact, Hs = 6.37 m

iii. Filtering Tegangan Tali ke-6 Kondisi Damaged, Hs= 6.37 m



Gambar 4.25. Filtering Tegangan Tali ke-6 Kondisi Damaged, Hs = 6.37 m

b. FFT (Fast Fourier Transform) Tegangan Tali Tambat Eksperimen

Data tegangan *time domain* yang telah dilakukan low-pass *filter* kemudian diolah menjadi tegangan *frequency domain* menggunakan FFT. Gambar 4.26, 4.27, dan 4.28 adalah hasil FFT *low frequency tension* untuk ketiga skenario eksperimen.



Gambar 4. 26. Spektra tegangan frekuensi rendah kondisi *intact*, Hs = 2.5 m


Gambar 4. 27. Spektra tegangan frekuensi rendah kondisi *intact*, Hs = 6.37 m



Gambar 4. 28. Spektra tegangan frekuensi rendah kondisi *damaged*, Hs = 6.37 m

Data tegangan *time domain* yang telah dilakukan *band-pass filter* kemudian diolah menjadi tegangan *frequency domain* menggunakan FFT. Gambar 4.29, 4.30, dan 4.31 adalah hasil FFT *low frequency tension* untuk ketiga skenario eksperimen.



Gambar 4. 29. Spektra tegangan frekuensi gelombang kondisi *intact*, Hs = 2.5 m



Gambar 4. 30. Spektra tegangan frekuensi gelombang kondisi *intact*, Hs = 6.37 m



Gambar 4. 31. Spektra tegangan pada frekuensi gelombang kondisi damaged, Hs = 6.37 m

c. Stokastik Tegangan Tali Tambat Eksperimen

Tegangan pada frekuensi gelombang dan frekuensi rendah dapat direpresentasikan dengan *narrow band gaussian process*.Nilai stokastik dapat dihitung dari luasan dibawah spektrum respon dimana merupakan nilai varians (m₀) maupun dari nilai standard deviasi. Nilai respon tegangan signifikan pada frekuensi rendah dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$T_{lfsig} = 2\sqrt{m_{0lf}} \tag{4.3}$$

dimana,

 T_{lfsig} = Tegangan Signifikan pada Frekuensi Rendah M_{0lf} = Varian Tegangan Pada Frekuensi Rendah Dengan menggunakan persamaan 4.3, didapati nilai tegangan signifikan pada frekuensi rendah untuk tiap tali tambat dan skenario analisis seperti pada tabel 4.14.

Mooring	Significant Low Frequency Tension (kN)				
Line	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3		
1	72.15	103.79	148.75		
2	102.07	174.74	288.73		
3	128.37	196.86	319.01		
4	69.17	94.73	95.18		
5	74.97	123.70	199.55		
6	107.04	170.26	260.31		
7	103.45	180.31	0		
8	72.95	123.48	476.87		

Tabel 4.13. Tegangan signifikan pada frekuensi rendah

Untuk mendapatkan nilai maksimum, diperlukan durasi pengujian minimal 3 jam dikarenakan dalam kurun waktu mencangkup kondisi badai. (API RP 2 SK). Nilai respon maksimum didapatkan dengan probabilitas terjadinya 1 respon kondisi badai setiap 1000 data. Sebagai *rule of thumb*, maka respon tengangan maksimum pada frekuensi gelombang dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$exp\left\{-2\left(\frac{Twfmax}{Twfsig}\right)^2\right\} = \frac{1}{1000}$$
(4.4)

$$T_{wfmax} = 1.86 x T_{wfsig} \tag{4.5}$$

$$T_{wfmax} = 1.86 \ x \ 2 \ x \ \sqrt{m_{0wf}} \tag{4.6}$$

dimana,

 T_{wfmax} = Tegangan Maksimum pada Frekuensi Gelombang T_{wfmax} = Tegangan Signifikan pada Frekuensi Gelombang M_{0wf} = Varian Tegangan pada Frekuensi Gelombang

Dengan menggunakan persamaan tersebut, diadapati nilai tegangan maksimum pada frekuensi gelombang untuk tiap tali tambat dan skenario analisis seperti pada tabel 4.15

Mooring	Maximum W	/ave Frequency	Frequency Tension (kN)		
Line	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3		
1	28.21	94.25	86.77		
2	35.84	147.52	133.57		
3	37.70	146.70	111.22		
4	22.36	74.73	39.17		
5	24.11	105.50	109.84		
6	32.77	142.01	146.34		
7	30.62	134.23	0		
8	21.18	88.08	92.38		

Tabel 4.14. Tegangan maksimum pada frekuensi gelombang

Data tegangan rata-rata diperoleh dari nilai statistik tegangan rata-rata dalam *time domain*. Alasan penggunaan metode ini karena mempertimbangkan non linearitas kekakuan tali tambat dan *quadratic vessel force* dimana saat dalam analisis analisis *time domain* semua hal tersebut dipertimbangkan. Kemudian dari data eksperimen juga telah memenuhi durasi minimal pengujian. Pengambilan sampling pada metode ekperimen sebesar 50hz atau terekam data sebanyak 50 sampling setiap detiknya. Uji pada eksperimen dilakukan selama 30 menit (dalam skala model) atau 3 jam (dalam skala full scale 1:36). Sehingga alasan tersebut dapat memperkuat saat pengambilan nilai statistik dari hasil tegangan pada *time domain* eksperimen. Tegangan rata-rata untuk ketiga skenario eksperimen ditunjukkan pada tabel 4.16.

Mooring	Mean Tension (Kn)					
Line	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3			
1	170.07	174.67	182.19			
2	161.77	152.89	145.76			
3	164.91	140.18	119.41			
4	183.12	183.66	204.12			
5	224.92	236.75	235.02			
6	233.86	253.34	266.50			
7	233.18	250.16	0.00			
8	220.87	238.57	299.34			

Tabel 4.15. Tegangan rata-rata

Setelah dilakukan perhitungan tegangan maksimum pada frekuensi gelombang, tegangan signifikan pada frekuensi rendah, dan tegangan rata-rata. Maka berdasarkan persamaan API RP 2 SK tentang perhitungan tegangan tali tambat maksimum menggunakan pendekatan frekuensi domain dimana tegangan maksimum merupakan penjumlahan dari tegangan rata-rata dengan tegangan signifikan pada frekuensi rendah dan tegangan maksimum pada frekuensi gelombang (persamaan 4.2). Didapati tegangan tali tambat maksimum pada metode eksperimen seperti pada tabel 4.17

Mooring	Max Tension (kN)				
Line	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3		
1	270.43	372.71	417.71		
2	299.67	475.14	568.07		
3	330.98	483.74	549.64		
4	274.65	353.12	338.48		
5	323.99	465.96	544.40		
6	373.67	565.61	673.15		
7	367.24	564.70	0.00		
8	315.00	450.13	868.59		

Tabel 4. 16. Tegangan Tali Tambat Maksimum Metode Eksperimen

4.3. Pemodelan Numeris

4.3.1. Pemodelan Struktur

Pemodelan numeris struktur *floating crane catamaran* pada tugas akhir ini menggunakan bantuan software MOSES. Data utama kapal mengacu pada data yang telah dipaparkan pada pemodelan eksperimen. *Floating crane catamaran* dimodelkan dalam kondisi *full load* dengan draft sebesar 4.7 m. Analisis yang dilakukan pada model numeris *floating crane catamaran* menggunakan *panel theory* atau 3D *diffraction method*. Didapati model numeris beserta validasi terhadap model eksperimen seperti pada tabel 4.18. Tampak model numeris ditunjukkan pada Gambar 4.32, 4.33, 4.34 dan 4.35.

Data Prototype Full Scale							
Keterangan	Eksperimen	Numeris	Satuan	Error (%)	Note		
LOA	111.00	111.00	m	0.00%	OK		
LWL	111.00	111.00	m	0.00%	OK		
LPP	108.00	108.00	m	0.00%	OK		
В	37.80	37.80	m	0.00%	OK		
Η	14.4	14.4	m	0.00%	OK		
Т	4.70	4.70	m	0.00%	OK		
Displ	8646.00	8571.38	ton	0.86%	OK		

Tabel 4.17. Data utama dan validasi model numeris

Tabel 4.19. dan 4.20 merupakan data distribusi massa dan CoG model eksperimen BTH-BPPT yang digunakan sebagai input model numeris.

Tabel 4.18. Jari-jari girasi floating crane catamaran

Jari-Jari Girasi					
$\mathbf{K}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} =$	14.12	m			
Kyy = Kzz =	27.648	m			

Tabel 4.19. Centre of Gravity floating crane catamaran

Centre of Gravity					
LCG =	50.94	m (Dari AP)			
LCG =	57.06	m (Dari FP)			
TCG =	0	m (Dari CL)			
VCG =	14.904	m (Dari Baseline)			



Gambar 4. 32. Tampak depan model numeris floating crane catamaran



Gambar 4. 33. Tampak samping model numeris *floating crane catamaran*



Gambar 4. 34. Tampak atas model numeris *floating crane catamaran*



Gambar 4. 35. Tampak isometric model numeris floating crane catamaran

4.3.2. Pemodelan Sistem Tambat Numeris

i. Identifikasi Kekakuan Sistem Tambat Eksperimen

Tegangan maksimum saat eksperimen terjadi pada *run* kondisi damaged, Hs = 6.37m, dengan nilai tegangan sebesar 863.87 kN (*full* scale) atau sebesar 1.841 kg (*Model Scale*). Sling yang digunakan untuk menghubungkan *fairlead* menuju pegas memiliki *material strenght* sebesar 30 lbs atau 13.6 kg. Sehingga tidak terjadi *slack* atau perubahan panjang *sling* akibat tegangan saat *eksperimen* karena tegangan maksimum kurang dari *sling material strenght*.



Gambar 4. 36. Tampak Atas Konfigurasi Sistem Tambat Metode eksperimen



Gambar 4. 37. Tampak 2 dimensi bidang sejajar antara fairlead-6 dan pulley-6

Akibat dari tidaknya perubahan panjang sling maka, **kekakuan tali tambat hanya dipengaruhi oleh kekakuan pegas**

Kekakuan tali tambat eksperimen = kekakuan pegas

Begitu pula berlaku untuk tali tambat ke 1-8. Untuk memperoleh kekakuan sistem tambat yang sama dengan metode eksperimen, maka tinggal menyamakan desain sudut sebar horizontal (Bidang X-Y).

Nilai kekakuan tali tambat didapatkan dari hasil kalibrasi pegas sebelumnya. Pada analisis ini digunakan nilai rata-rata kekakuan dari 8 pegas yakni sebesar 58,25 kN (*full scale*). Nilai K bersifat **linear**. Hal ini dibuktikan dengan tegangan maksimum saat eksperimen adalah 1.841 kg (*Model Scale*) atau 863.87 kN (*full scale*) tidak melebihi kalibrasi pegas dengan pembebanan hingga 2 kg (*model scale*) atau 938.28 kN (*full-scale*). Sehingga pada pengujian metode eksperimen, tegangan maksimum masih dalam cakupan kekakuan sistem (pegas) yang linear.

Dengan menggunakan persamaan hukum *hooke* yang sebelumnya digunakan untuk mencari nilai kekakuan pegas maka bisa didapatkan selisih tegangan tiap ekskursi dengan persamaan 4.7. Selisih tegangan mulanya ditambahkan dengan nilai pretension 198.25 kN (*fullscale*).

$$K = \frac{dF}{dx} \tag{4.7}$$

Dimana, dF = Tension (kN)

K = Mooring Stiffness (kN/m)

dx = Pertambahan Panjang Pegas tiap Ekskursi *Vessel* (m)

Hasil perhitungan kekakuan tali tambat, tegangan dan selisih tegangan tiap ekskursi metode eksperimen dalam *fullscale* ditunjukkan pada tabel 4.21 dan dengan plot seperti pada gambar 4.38.

Kekakuan Sistem Tambat Eksperimen						
Δx (m)	K (kN/m)	ΔF (kN)	F (kN)			
0.00	58.25	0.00	198.96			
1.00	58.25	58.25	257.21			
2.00	58.25	116.49	315.45			
3.00	58.25	174.74	373.70			
4.00	58.25	232.98	431.94			
5.00	58.25	291.23	490.19			
6.00	58.25	349.47	548.43			
7.00	58.25	407.72	606.68			
8.00	58.25	465.96	664.92			
9.00	58.25	524.21	723.17			
10.00	58.25	582.45	781.41			
11.00	58.25	640.70	839.66			
12.00	58.25	698.94	897.90			
13.00	58.25	757.19	956.15			
14.00	58.25	815.43	1014.39			
15.00	58.25	873.68	1072.64			

Tabel 4. 20. Kekakuan tali tambat eksperimen



Gambar 4. 38. Kekakuan tali tambat eksperimen

Pola tegangan pada fairlead tiap ekskursi menunjukkan hasil trendline dengan gradien linear. Hal ini dikarenakan nilai kekakuan pegas tiap ekskursi selalu konstan. Gambar 4.39. menunjukkan pola tegangan tali tambat eksperimen tiap ekskursi yang terhitung dengan nilai pretension. Sedangkan gambar 4.40. tanpa pretension.



Gambar 4. 39. Tegangan (+pretension) tiap ekskursi metode eksperimen



Gambar 4. 40. Tegangan tiap ekskursi metode eksperimen

ii. Penentuan Sistem Tambat Numeris

Dalam penentuan sistem tambat numeris perlu diperhatikan adalah kesamaan model sudut sebar horizontal, pretension, dan kekakuan tali tambat. Dilakukan iterasi perhitungan dengan tujuan mendapati properties tali yang memiliki kesamaan kekakuan dengan tali tambat eksperimen.



Gambar 4. 41. Catenary Static Mooring Analysis

Proses iterasi dilakukan dengan mengambil salah satu tali tambat pada tampak sejajar bidang 2 dimensi (X-Z) seperti pada gambar 4.41. Sehingga ekskursi bekerja pada sistem 2 dimensi (X-Z) seperti halnya saat menghitung kekakuan tali tambat metode eksperimen. Kemudian asumsi lain yang digunakan adalah sebagai berikut :

- No back mooring line considered
- Dynamic effect in the mooring lines are ignored
- Flat Seabed
- Friction on the seabed is ignored

Iterasi *catenary static mooring analisys* dilakukan dengan bantuan *software* Orcaflex, katalog tali tambat menggunakan *marlow ropes ltd*. (katalog OrcaFlex). Iterasi dilakukan variasi diameter tali tambat. Variasi diameter tali yang digunakan adalah 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5; 5 inch. Untuk jenis tali, panjang tali dan jarak horizontal fairlead ke anchor dibuat sama seperti data berikut :

- Jenis tali = 6x19 wire with wire core.
- Pajang Tali = 342.87 m

- Jarak Horizontal Fairlead ke Anchor = 320 m

Iterasi dilakukan dengan menggeser titik fairlead menjauhi anchor dengan selisih kelipatan 1 m. Didapati hasil iterasi tegangan tali tambat tiap ekskursi seperti pada tabel 4.22 dan dapat diketaui plot tegangan tiap ekskursi seperti pada gambar 4.42.

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

Tabel 4.21. Hasil iterasi tegangan tali tambat tiap ekskursi



Gambar 4.42. Plot hasil iterasi tegangan tali tambat tiap ekskursi

Tegangan tali tambat eksperimen menunjukkan pola linear dengan pertambahan tegangan tiap meter sebesar 58.25kN. Berbeda dengan pertambahan tegangan tali tambat numeris yang menggunakan konfigurasi *catenary*, Pertambahan tegangan tiap *excursion* menunjukkan pola eksponensial dimana mulanya tegangan hanya berasal dari berat *suspended length* atau berkurangnya *grounded length*. Semakin habis *grounded length* maka trend tegangan tiap *excursion* mengalami kenaikan drastis akibat tegangan yang dihasilkan merupakan tegangan axial tali tambat yang mengalami pola (taut).

Selisih tegangan tiap *excursion* didapati seperti pada tabel 4.23 dan plotnya pada gambar 4.43.

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

Tabel 4. 22. Hasil iterasi selisih tegangan tali tambat tiap ekskursi



Gambar 4. 43. Hasil iterasi tegangan tali tambat tiap ekskursi

Dengan membagi tegangan terhadap *excursion* maka dapat diketahui kekakuan sistem tambat. Pada konfigurasi eksperimen *horizontal taut mooring*, kekakuan sistem hanya berpatokan pada satu jenis pegas dengan nilai kekakuan 58.25 kN/m. Sedangkan, kekakuan pada *catenary* memiliki pola eksponensial. Hasil kekakuan tali tambat dan pegas dengan

menghitung menggunakan persamaan 4.7 dapat dilihat pada tabel 4.24. Perbandingan kekakuan tali tambat ditunjukkan pada gambar 4.44.

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

Tabel 4.23. Hasil iterasi kekakuan tali tambat tiap ekskursi



Gambar 4.44. Hasil iterasi kekakuan tali tambat tiap ekskursi

Pola kekakuan sistem tambat eksperimen dan numeris berbeda, oleh sebab itu, digunakan jenis tali dengan pretension yang sama dengan eksperimen. Pada hasil eksperimen, nilai pretension adalah 198kN. Sedangkan hasil iterasi, spesifikasi tali tambat yang mendekati nilai pretension tersebut adalah tali dengan pretension 204 kN dengan spesifikasi sebagai berikut. Properties tali tambat numeris selengkapnya dicantumkan pada tabel 4.25.

- Panjang : 342.87 m
- Pretension : 204.7 m
- Diameter : 5 inch

6x16 Wire Rope with Wire Core					
Properties	Nilai	Satuan			
d	127.0	mm			
u	0.127	m			
OD	0.1016	m			
A	0.005764	m2			
	5763.8	9			
F	113000000	kN/m2			
E	113000	MPA			
٨٥	651309.1	kN			
AL	66392.4	te			
	0.631	kN/m			
W	0.064	te/m			
MBI	10215.43	kN			
IVIDL	1041.685	ton			

Tabel 4.24. Properties Tali Tambat

Dilakukan *setup* model numeris tertambat sesuai dengan spesifikasi pada *software* MOSES. Gambar 4.45 merupakan tampak samping konfigurasi sistem tambat numeris. Gambar 4.46 skenario intact dan gambar 4.47 skenario damaged.



Gambar 4. 45. Tampak Samping Konfigurasi Sistem Tambat Numeris (Static)



Gambar 4.46. Tampak Atas Konfigurasi Sistem Tambat Numeris Kondisi Intact



Gambar 4.47. Tampak Atas Konfigurasi Sistem Tambat Numeris Kondisi Damaged

4.4. Analisis Tegangan Tali Tambat Numeris

4.4.1. Hasil Tegangan Tali Tambat Numeris

Analisis tegangan tali tambat pada metode numeris dilakukan menggunakan software *MOSES*. Analisis tegangan berbasis *time domain*. *Run* pertama menggunakan 3 skenario seperti di eksperimen. Kemudian *run* selanjutnya dilakukan pada heading 0, 45, 90, 135, 180 dengan variasi tinggi gelombang signifikan sebesar 2.5 m; 3.5 m; 4.5 m; 6.37 m. Berikut adalah hasil tegangan tali tambat pada Hs = 2.5 m dengan variasi heading 0, 45, 90, 135, 180. Untuk hasil tegangan tali tambat lain dapat dilihat pada Lampiran F. Gambar 4.48 – 4.53 merupakan tegangan hasil run MOSES.





Gambar 4.48. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 0



B. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 45

Gambar 4.49. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 45



C. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 90

Gambar 4.50. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 90



D. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 135

Gambar 4.51. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 135



E. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 180

Gambar 4.52. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 180



F. Tegangan Tali Tambat *damaged*, Hs = 2.5m, Heading 90

Gambar 4.53. Tegangan Tali Tambat *intact*, Hs = 2.5m, Heading 180

4.4.2. Analisis Tegangan Maksimum Numeris

Mooring tension yang telah didapatkan dianalisis menggunakan pendekatan frekuensi domain. Pendekatan yang digunakan mengacu pada *rules* API RP 2 SK. Dimana tegangan maksimum merupakan penjumlahan dari tegangan rata-rata dengan tegangan signifikan pada frekuensi rendah dan tegangan maksimum pada frekuensi gelombang atau dapat ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig}$$
(4.8)

dimana,

 T_{max} = Tegangan Maksimum

 T_{mean} = Tegangan Rata-Rata

 T_{wfmax} = Tegangan Maksimum pada Frekuensi Gelombang

 T_{lfsig} = Tegangan Signifikan pada Frekuensi Rendah

Untuk memperoleh nilai tersebut, harus dilakukan *signal filtering* sehingga diperoleh tegangan frekuensi rendah dan tegangan frekuensi tinggi. Nilai hasil filter tersebut masih berupa tegangan dalam *time-domain*. Perhitungan stokastik tegangan bisa dilakukan jika data sudah diolah menjadi frekuensi domain. Untuk mengolah data tegangan *time domain* menjadi *frequency domain* maka dilakukan FFT (*fast fourier transform*). Proses *signal band filtering* dan FFT dilakukan menggunakan *software* MATLAB.

a. Low-pass & Band-pass Filtering Tegangan Tali Tambat Numeris

Low-pass filter (LPF) adalah metode filter yang melewatkan sinyal dengan frekuensi lebih rendah dari frekuensi cutoff yang dipilih dan melemahkan sinyal dengan frekuensi lebih tinggi dari frekuensi cutoff. Pada pengambilan tegangan frekuensi rendah, data yang diambil berada pada rentangan dibawah wave *encounter periode*. Kemudian pada *Bandpass Filter* (BPF), data yang diambil berada pada rentangan setelah *wave encounter periode*. Pada penelitian ini digunakan spektra gelombang PM dengan spektra seperti pada gambar 4.54



Gambar 4.54. Spektra Gelombang Pierson-Motzkowith Variasi Hs

Dari spektra gelombang tersebut, dapat diketahui nilai *wave encounter periode* untuk tinggi gelombang signifikan 2.5; 3.5; 4.5; dan 6.37m seperti pada tabel 4.26.

Tabel 4.25.	Wave	encounter	periode

Hs (m)	Encounter Periode
2.5	(rau/s) 0.38
3.5	0.34
4.5	0.30
6.37	0.26

Berikut adalah hasil *low-pass & band-pass filtering* tali tambat ke 6, pada Hs = 2.5m dan variasi Heading 0, 45, 90, 135, 180 tercantum pada gambar 4.55 - 4.60 (berurutan).



i. *Filtering* Tegangan Tali Tambat ke-6, *Intact*, Hs = 2.5m, *Heading* 0

Gambar 4.55. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact, Hs = 2.5m, Heading 0

ii. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact, Hs = 2.5m, Heading 45



Gambar 4.56. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact, Hs = 2.5m, Heading

45



Gambar 4.57. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact, Hs = 2.5m, Heading 90

iv. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact, Hs = 2.5m, Heading 135



Gambar 4.58. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact, Hs = 2.5m, Heading 135



v. *Filtering* Tegangan Tali Tambat ke-6, *Intact*, Hs = 2.5m, *Heading* 180

Gambar 4.59. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Intact, Hs = 2.5m, Heading 180

vi. *Filtering* Tegangan Tali Tambat ke-6, *Damaged*, Hs = 2.5m, *Heading* 90



Gambar 4. 60. Filtering Tegangan Tali Tambat ke-6, Damaged, Hs = 2.5m, Heading 90

b. FFT (Fast Fourier Transform) Tegangan Tali Tambat Numeris

Data tegangan *time domain* yang telah di-*filter* kemudian diolah menjadi *low frequency tension* dan *wave frequency tenion* menggunakan FFT. Gambar 4.61, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65, dan 4.66 merupakan hasil FFT *low frequency tension* pada tinggi gelombang signifikan 2.5m kondisi intact dengan variasi heading 0°, 45°, 90°, 135°, 180 dan° damaged heading 90°. Hasil FFT pada variasi gelombang lainnya dapat dilihat pada Lampiran G.



Gambar 4.61. Low frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 0



Gambar 4.62. Low frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 45



Gambar 4.63. Low frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 90



Gambar 4.64. *Low frequency tension spectrum, intact,* Hs = 2.5 m, Heading 135



Gambar 4.65. Low frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 180



Gambar 4.66. Low frequency tension spectrum, damaged, Hs=2.5 m, Heading 90

Gambar 4.67, 4.68, 4.69, 4.70, 4.71, dan 4.72 merupakan hasil FFT *wave frequency tension* pada tinggi gelombang signifikan 2.5m kondisi intact dengan variasi heading 0°, 45°, 90°, 135°, 180 dan° damaged heading 90°. Hasil FFT pada variasi gelombang lainnya dapat dilihat pada Lampiran G.



Gambar 4.67. *Wave frequency tension spectrum, intact,* Hs = 2.5 m, *Heading* 0



Gambar 4.68. Wave frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 45



Gambar 4.69. Wave frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 90



Gambar 4.70. Wave frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 135



Gambar 4.71. Wave frequency tension spectrum, intact, Hs = 2.5 m, Heading 180



Gambar 4.72. Wave freq. tension spectrum, damaged, Hs = 2.5 m, Heading 90

c. Stokastik Tegangan Maksimum Tali Tambat Numeris

Tegangan pada frekuensi gelombang dan frekuensi rendah dapat direpresentasikan dengan *narrow band gaussian*. Nilai stokastik dapat dihitung dari luasan dibawah spektrum respon atau *probability density* dimana merupakan nilai akar varians (m₀) maupun dari nilai standard deviasi.

Berdasarkan API RP 2 SK, nilai tegangan signifikan pada frekuensi rendah dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$T_{lfsig} = 2\sqrt{m_{0lf}} \tag{4.9}$$

dimana,

 T_{lfsig} = Tegangan signifikan pada frekuensi rendah

 M_{Olf} = Varian tegangan pada frekuensi rendah

Tegangan maksimum pada frekuensi gelombang didapatkan dari probabilitas terjadinya 1 respon maksimum tiap 1000 respon. Sebagai *rule of thumb*, maka respon tengangan maksimum pada frekuensi gelombang dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$exp\left\{-2\left(\frac{Twfmax}{Twfsig}\right)^2\right\} = \frac{1}{1000}$$
(4.10)

$$T_{wfmax} = 1.86 x T_{wfsig} \tag{4.11}$$

$$T_{wfmax} = 1.86 \ x \ 2 \ x \ \sqrt{m_{0wf}} \tag{4.12}$$

dimana,

 T_{wfmax} = Tegangan Maksimum pada Frekuensi Gelombang T_{wfsig} = Tegangan Signifikan pada Frekuensi Gelombang M_{0wf} = Varian Tegangan pada Frekuensi Gelombang Data tegangan rata-rata diperoleh dari nilai statistik tegangan rata-rata *time domain*. Nilai tegangan rata-rata, tegangan signifikan pada frekuensi rendah dan tegangan maksimum pada frekuensi gelombang dapat di lihat di LAMPIRAN H.

Setelah dilakukan perhitungan tegangan maksimum pada frekuensi gelombang, tegangan signifikan pada frekuensi rendah, dan tegangan rata-rata. Maka berdasarkan persamaan API RP 2 SK tentang perhitungan tegangan tali tambat maksimum menggunakan pendekatan frekuensi domain dimana **tegangan maksimum merupakan penjumlahan dari tegangan rata-rata dengan tegangan signifikan pada frekuensi rendah dan tegangan maksimum pada frekuensi gelombang**, didapati tegangan tali tambat maksimum metode untuk kondisi *intact* heading 0° seperti pada tabel 4.27, heading 45° seperti pada tabel 4.28, heading 90° seperti pada tabel 4.29, heading 135° seperti pada tabel 4.30, heading 180° seperti pada tabel 4.31, dan untuk kondisi *damaged* heading 90° seperti pada tabel 4.32.

Mooring	Max Tension (kN)						
Line	Hs 2.5 m	Hs 3.5 m	Hs 4.5 m	Hs 6.37 m			
1	229.4	255.5	300.9	435.4			
2	227.9	251.4	287.7	378.1			
3	238.3	271.1	329.7	403.5			
4	243.7	286.4	355.0	493.2			
5	243.8	286.7	354.9	491.6			
6	238.7	271.8	331.1	405.4			
7	228.8	252.9	290.3	383.5			
8	229.9	256.2	302.4	440.2			

Tabel 4.26. Tegangan Maksimum Tali Tambat Numeris, Intact Heading 0

Pada pembebanan gelombang arah 0 derajat, kondisi tali tambat *intact,* tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 2.5 m terjadi pada *mooring line* ke 5 sebesar 243.8 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 3.5 m terjadi pada *mooring line* ke 5 sebesar 286.7 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 4.5 m terjadi pada *mooring line* ke 4 sebesar 355 kN. Dan tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 6.37 m terjadi pada *mooring line* ke 4 sebesar 493.2 kN.

Mooring	Max Tension (kN)							
Line	Hs 2.5 m	Hs 3.5 m	Hs 4.5 m	Hs 6.37 m				
1	222.0	246.5	271.8	380.3				
2	213.7	228.7	249.8	368.8				
3	3 214.2 235.2		248.8	278.9				
4	221.8	247.4	262.1	329.5				
5	278.9	372.4	506.0	661.7				
6	295.9	422.0	657.8	1074.6				
7	280.0	433.4	572.0	822.0				
8	272.4	410.5	543.6	721.0				

Tabel 4.27. Tegangan Maksimum Tali Tambat Numeris, Intact, Heading 45

Pada pembebanan gelombang arah 45 derajat, kondisi tali tambat *intact*, tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 2.5 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 295.9 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 3.5 m terjadi pada *mooring line* ke 7 sebesar 433.4 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 4.5 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 657.8 kN. Dan tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 6.37 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 1074.6 kN.

Tabel 4.28.	Tegangan	Maksimum	Tali	Tambat	Numeris,	Intact,	Heading	90
					,		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	

Mooring	Max Tension (kN)							
Line	Hs 2.5 m	Hs 3.5 m	Hs 4.5 m	Hs 6.37 m				
1	221.9	254.9	290.7	363.7				
2	222.9	260.0	290.9	372.5				
3	185.1	180.7	202.1	282.5				
4	197.7	195.0	222.4	296.1				
5	348.9	451.2	520.5	607.2				
6	6 441.6	733.2	1005.6	1741.5				
7	365.4	574.8	671.7	928.1				
8	328.7	477.1	581.8	752.5				

Pada pembebanan gelombang arah 90 derajat, kondisi tali tambat *intact*, tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 2.5 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 441.6 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 3.5 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 733.2 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 4.5 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 1005.6 kN. Dan tegangan

maksimum pada tinggi gelombang signifikan 6.37 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 1741.5 kN.

Mooring	Max Tension (kN)							
Line	Hs 2.5 m	Hs 6.37 m						
1	202.4	207.3	230.7	301.3				
2	2 194.1 192.1 208.8		208.8	247.0				
3	205.4	223.2	253.1	341.8				
4	207.6	224.2	263.0	347.4				
5	253.1	310.8	453.8	596.6				
6	261.6	324.8	426.1	567.0				
7	324.8	506.5	828.1	1325.1				
8	283.8	392.1	530.2	683.5				

 Tabel 4.29. Tegangan Maksimum Tali Tambat Numeris, Intact, Heading 135

Pada pembebanan gelombang arah 90 derajat, kondisi tali tambat *intact,* tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 2.5 m terjadi pada *mooring line* ke 7 sebesar 324.8 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 3.5 m terjadi pada *mooring line* ke 7 sebesar 506.5 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 4.5 m terjadi pada *mooring line* ke 7 sebesar 828.1 kN. Dan tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 6.37 m terjadi pada *mooring line* ke 7 sebesar 1325.1 kN.

Mooring	Max Tension (kN)						
Line	Hs 2.5 m	Hs 3.5 m	Hs 4.5 m	Hs 6.37 m			
1	244.1	275.1	327.7	459.0			
2	235.8	267.0	306.1	400.4			
3	223.8	239.3	262.5	345.7			
4	230.4	242.1	267.7	385.9			
5	231.0	231.0 242.7		381.1			
6	224.6	240.2	264.0	348.2			
7	236.7	236.7 268.3		401.6			
8	245.3	276.0	329.2	460.8			

Tabel 4.30. Tegangan Maksimum Tali Tambat Numeris, Intact, Heading 180

Pada pembebanan gelombang arah 90 derajat, kondisi tali tambat *intact*, tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 2.5 m terjadi

pada *mooring line* ke 8 sebesar 245.3 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 3.5 m terjadi pada *mooring line* ke 8 sebesar 276 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 4.5 m terjadi pada *mooring line* ke 8 sebesar 329.2 kN. Dan tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 6.37 m terjadi pada *mooring line* ke 8 sebesar 460.8 kN.

Gambar 4.73. merupakan plot grafik tegangan tali tambat maksimum kondisi *intact* metode numeris terhadap variasi pembebanan gelombang signifikan pada tiap arah pembebanan 0, 45, 90, 135, 180.



Gambar 4.73. Tegangan tali tambat maksimum kondisi intact

Pada grafik diatas, didapati *trend* bahwa semakin besar nilai tinggi gelombang signifikan, maka semakin besar nilai tegangan maksimum yang terjadi. Tegangan terbesar pertama terjadi pada pembebanan arah 90°, tegangan terbesar kedua terjadi pada pembebanan arah 135°, tegangan terbesar ketiga terjadi pada pembebanan arah 45°, tegangan terbesar keempat terjadi pada pembebanan arah 0°, tegangan terbesar kelima terjadi pada pembebanan arah 180°,

Tegangan maksimum tali tambat numeris untuk kondisi *damaged* beban gelombang *heading* 90° seperti pada tabel 4.32.

Mooring	Max Tension (kN)							
Line	Hs 2.5 m	Hs 3.5 m	Hs 4.5 m	Hs 6.37 m				
1	201.9	232.4	252.7	322.7				
2	177.6	212.3	232.8	376.9				
3	161.6	167.7	174.8	265.2				
4	163.1	173.2	181.5	255.7				
5	330.0	464.3	515.8	587.2				
6	444.9	902.2	1429.0	1804.6				
7	0	0	0	0				
8	615.2	1183.1	1708.2	2113.3				

Tabel 4.31. Tegangan Maksimum Tali Tambat Numeris, Damaged, Heading 90

Pada pembebanan gelombang arah 90 derajat, kondisi tali tambat *damaged*, tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 2.5 m terjadi pada *mooring line* ke 8 sebesar 615.2 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 3.5 m terjadi pada *mooring line* ke 8 sebesar 1183.1 kN. Tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 4.5 m terjadi pada *mooring line* ke 8 sebesar 1708.2 kN. Dan tegangan maksimum pada tinggi gelombang signifikan 6.37 m terjadi pada *mooring line* ke 6 sebesar 2113.3 kN.

Gambar 4.74 merupakan plot grafik tegangan tali tambat maksimum metode numeris terhadap variasi pembebanan gelombang signifikan pada tiap arah pembebanan 90°





Pada grafik diatas, didapati *trend* bahwa semakin besar nilai tinggi gelombang signifikan, maka semakin besar nilai tegangan maksimum yang terjadi.

4.5. Perbandingan Tegangan Tali Tambat Metode Eksperimen dan Numeris

Dari analisis dinamis metode eksperimen dan numeris, didapati hasil tegangan tali tambat maksimum dan tegangan tali tambat rata-rata tiap skenario sebagai berikut. Skenario 1 merupakan kondisi *intact* dengan parameter Hs = 2.5 m (*full scale*) dan Skenario 2 merupakan kondisi *intact* dengan parameter Hs = 6.37 m (*full scale*). Skenario 3 merupakan kondisi *damaged* dengan parameter Hs = 6.37 m (*full scale*). Perbandingan tegangan maksimum metode eksperimen dan metode numeris dapat dilihat pada tabel 4.33.

EKSPERIMEN								
Kondisi	Tegangan Maksimum (kN)							
KOHUISI	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Skenario 1	270.4	299.7	331.0	274.6	324.0	373.7	367.2	315.0
Skenario 2	372.7	475.1	483.7	353.1	466.0	565.6	564.7	450.1
Skenario 3	411.8	559.3	542.8	336.0	537.1	663.9	0.0	863.9
			N	JMERIS				
Kondici			Те	gangan N	1aksimun	n (kN)		
KOHUISI	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Skenario 1	221.9	222.9	185.1	197.7	348.9	441.6	365.4	328.7
Skenario 2	363.7	372.5	282.5	296.1	607.2	1741.5	928.1	752.5
Skenario 3	322.7	376.9	265.2	255.7	587.2	1804.6	0.0	2113.3

Tabel 4.32. Perbandingan Max Tension Metode Eksperimen dan Numeris

Pada skenario 1, hasil tegangan maksimum tali tambat metode eksperimen dan numeris terbesar terjadi di *mooring line* yang sama yakni ke-6 dengan nilai 373.7 kN dan 441.6 kN. Pada skenario 2, hasil tegangan maksimum tali tambat metode eksperimen dan numeris terbesar terjadi di *mooring line* yang sama yakni ke-6 dengan nilai 565.6 kN dan 1741.5 kN. Pada skenario 3, hasil tegangan maksimum tali tambat metode eksperimen dan numeris terbesar terjadi di *mooring line* yang sama yakni ke-6 dengan nilai 863.87 kN dan 2113.3 kN. Kejadian tegangan maksimum tiap tali pada metode eksperimen dan numeris memiliki pola yang sama. Namun pada metode numeris, nilai maksimum lebih besar daripada metode eksperimen. Hal ini dikarenakan perbedaan kekakuan sistem *horizontal taut mooring* dan *catenary mooring*. Gambar 4.75 – 4.77 adalah perbandingan pola tegangan maksimum tali tambat metode eksperimen dan metode numeris.



Gambar 4.75. Perbandingan Max tension eksperimen & numeris, Intact, Hs2.5m



Gambar 4.76. Perbandingan Max tension eksperimen & numeris, intact, Hs6.37m



Gambar 4.77. Perbandingan Max tension eksperimen & numeris, famaged,

Hs6.37m
Perbandingan tegangan rata-rata metode eksperimen dan metode numeris dapat dilihat pada tabel 4.34. dan gambar 4.78 - 4.80.

EKSPERIMEN								
Kondisi	Tegangan Rata-Rata (kN)							
KUTIUISI	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Skenario 1	169.7	161.4	164.5	182.8	224.6	233.5	232.8	220.5
Skenario 2	174.3	152.5	139.8	183.3	236.4	253.0	249.8	238.2
Skenario 3	181.8	145.4	119.0	203.8	234.7	266.1	0.0	299.0
			Ν	UMERIS				
Tegangan Rata-Rata (kN)								
KUTIUISI	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Skenario 1	177.0	171.1	148.6	159.1	253.2	291.5	252.3	241.8
Skenario 2	193.0	188.6	136.5	151.8	316.4	533.7	334.7	317.3
Skenario 3	179.2	164.6	123.2	132.1	314.2	558.9	0.0	600.2

Tabel 4.33. Perbandingan Mean Tension Metode Eksperimen dan Numeris

Pada skenario 1, hasil tegangan rata-rata tali tambat metode eksperimen dan numeris terbesar terjadi di *mooring line* yang sama yakni ke-6 dengan nilai 233.5 kN dan 291.5 kN. Pada skenario 2, hasil tegangan rata-rata tali tambat metode eksperimen dan numeris terbesar terjadi di *mooring line* yang sama yakni ke-6 dengan nilai 253 kN dan 533.7 kN. Pada skenario 3, hasil tegangan ratarata tali tambat metode eksperimen dan numeris terbesar terjadi di *mooring line* yang sama yakni ke-6 dengan nilai 299 kN dan 600.2 kN. Kejadian tegangan rata-rata tiap tali pada metode eksperimen dan numeris memiliki pola yang sama. Berikut adalah perbandingan pola tegangan rata-rata tali tambat metode eksperimen dan metode numeris.



Gambar 4.78. Perbandingan mean tension eksperimen & numeris, Intact, Hs2.5m



Gambar 4.79. Perbandingan mean tension eksperimen & numeris, Intact,



Hs6.37m

Gambar 4.80. Perbandingan *mean tension* eksperimen & numeris, *Damaged*, Hs6.37m

4.6. Analisis Kriteria Mooring Safety Factor

Kriteria *mooring safety factor* merupakan batas aman (batas ijin) beroperasinya suatu sistem bangunan terapung lepas pantai tertambat dengan meninjau tegangan yang terjadi pada sistem tambat. Sebagai hubungannya dengan analisis sebelumnya, analisis tinggi gelombang signifikan yang memenuhi kriteria *mooring safety factor* dilakukan dengan membandingkan tegangan maksimum tali tambat pada kondisi beban gelombang signifikan tersebut dengan nilai *minimum breaking load* tali tambat. *minimum breaking load* yang digunakan merupakan nilai MBL dari spesifikasi tali tambat 6x19 Wire with Wire Core berdiameter 5 inch sesuai dengan katalog *Marlow Ropes*

ltd. MBL tali jenis tersebut adalah 10215.3 kN. Rules terkait dengan kriteria tegangan yang digunakan mengacu pada *rule* API RP 2SK, yakni seperti tabel 4.35.

Condition	Analysis Method	Safety Factor
Intact	Dynamic	≥ 1.67
Damaged	Dynamic	≥ 1.25

Tabel 4.34. Kriteria Mooring Safety Factor API RP 2 SK

Persamaan untuk menghitung nilai *mooring safety factor* menurut API RP 2SK sebagai berikut.

Mooring Safety Factor
$$= \frac{Minimum Breaking Load}{Maximum Tension}$$
 (4.13)

Analisis sebelumnya didapati nilai tegangan maksimum tali tambat tiap variasi Hs (2.5; 3.5; 4.5; dan 6.37 m) dan variasi *heading* 0, 45, 90, 135, dan 180 untuk kondisi intact. Kemudian dibandingkan terhadap nilai *minimum breaking load*. Didapati nilai *mooring safety factor* seperti pada tabel 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, dan 4.40.

Tabel 4.35. *Mooring safety factor* kondisi *intact heading* 0°

		Maxim	um Tension	MDI (KNI)	Safety	
	At Line	Tension (kN)	IVIDL (KIN)	Factor	Check	
	2.5	5	243.8	10215.43	41.90	Pass
	3.5	5	286.7		35.63	Pass
ſ	4.5	4	355.0		28.78	Pass
	6.37	4	493.2		20.71	Pass

Pada kondisi tali tambat *intact* dengan arah pembebanan gelombang (*heading*) 0° didapati tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria *mooring safety factor* adalah pada Hs = 6.37 m dengan nilai *mooring safety factor* sebesar 20.71. Nilai tersebut diatas nilai kriteria *mooring safety factor* API RP 2SK (\geq 1.67) sehingga untuk kondisi *intact*, Hs = 6.37 m, *heading* 0° masih memenuhi kriteria.

Hs (m)	Maxim	um Tension	MPL (KNI) Safety		Criteria
	At Line	Tension (kN)	IVIDL (KIN)	Factor	Check
2.5	6	295.9	10215.43	34.52	Pass
3.5	7	433.4		23.57	Pass
4.5	6	657.8		15.53	Pass
6.37	6	1074.6		9.51	Pass

Tabel 4.36. Mooring safety factor kondisi intact heading 45°

Pada kondisi tali tambat *intact* dengan arah pembebanan gelombang (*heading*) 45° didapati tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria *mooring safety factor* adalah pada Hs = 6.37 m dengan nilai *mooring safety factor* sebesar 9.51. Nilai tersebut diatas nilai kriteria *mooring safety factor* API RP 2SK (\geq 1.67) sehingga untuk kondisi *intact*, Hs = 6.37 m, *heading* 0° masih memenuhi kriteria.

Tabel 4. 37. Mooring safety factor kondisi intact heading 90°

Hs (m)	Maxim	um Tension	Safety		Criteria
	At Line	Tension (kN)	IVIDL (KIN)	Factor	Check
2.5	6	441.6	10215.43	23.13	Pass
3.5	6	733.2		13.93	Pass
4.5	6	1005.6		10.16	Pass
6.37	6	1741.5		5.87	Pass

Pada kondisi tali tambat *intact* dengan arah pembebanan gelombang (*heading*) 90° didapati tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria *mooring safety factor* adalah pada Hs = 6.37 m dengan nilai *mooring safety factor* sebesar 5.87. Nilai tersebut diatas nilai kriteria *mooring safety factor* API RP 2SK (\geq 1.67) sehingga untuk kondisi *intact*, Hs = 6.37 m, *heading* 90° masih memenuhi kriteria

Tabel 4. 38. Mooring safety factor kondisi intact heading 135°

He (m)	Maxim	ium Tension	MRI (KNI)	Safety	
	At Line	Tension (kN)		Factor	Check
2.5	7	324.8	10215.43	31.45	Pass
3.5	7	506.5		20.17	Pass
4.5	7	828.1		12.34	Pass
6.37	7	1325.1		7.71	Pass

Pada kondisi tali tambat *intact* dengan arah pembebanan gelombang (*heading*) 135° didapati tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria *mooring safety factor* adalah pada Hs = 6.37 m dengan nilai *mooring safety factor* sebesar 7.71. Nilai tersebut diatas nilai kriteria *mooring safety factor* API RP 2SK (\geq 1.67) sehingga untuk kondisi *intact*, Hs = 6.37 m, *heading* 135° masih memenuhi kriteria.

Hs (m)	Maxim	um Tension	MDI (LNI)	Safety	Criteria
	At Line	Tension (kN)		Factor	Check
2.5	8	245.3	10215.43	41.65	Pass
3.5	8	276.0		37.01	Pass
4.5	8	329.2		31.03	Pass
6.4	8	460.8		22.17	Pass

Tabel 4. 39. Mooring safety factor kondisi intact heading 180°

Pada kondisi tali tambat *intact* dengan arah pembebanan gelombang (*heading*) 180° didapati tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria *mooring safety factor* adalah pada Hs = 6.37 m dengan nilai *mooring safety factor* sebesar 22.17. Nilai tersebut diatas nilai kriteria *mooring safety factor* API RP 2SK (\geq 1.67) sehingga untuk kondisi *intact*, Hs = 6.37 m, *heading* 180° masih memenuhi kriteria.



Gambar 4. 81. Mooring safety factor kondisi intact

Pada grafik gambar 4.81. diatas, didapati *trend* bahwa semakin besar nilai tinggi gelombang signifikan, maka semakin rendah nilai *mooring safety factor* yang terjadi. *Mooring safety factor* terendah pertama terjadi pada pembebanan arah 90°, *Mooring safety factor* terendah kedua terjadi pada pembebanan arah 135°, *Mooring safety factor* terendah ketiga terjadi pada pembebanan arah 45°, *Mooring safety factor* terendah keempat terjadi pada pembebanan arah 0°, *Mooring safety factor* terendah kelima terjadi pada pembebanan arah 180°,

Analisis dinamis kondisi *damaged* pada metode numeris dilakukan dengan memutus *mooring line* ke 7. Kondisi beban gelombang arah *beamseas* (90°). Tidak dilakukan analisis kondisi *trancient* pada simulasi ini sehingga analisis dinamis dimulai dengan kondisi tali sudah terputus sejak vessel kondisi *uquilibrium* baru (static dengan tali terputus). Tabel 4.41. adalah data statistik tegangan maksimum dan *mooring safety factor* pada analisis kondisi *damaged*. Kemudian diplot seperti pada gambar 4.82.

Hs (m)	Maxim	um Tension		Safety	Criteria
	At Line	Tension (kN)	IVIDL (KIN)	Factor	Check
2.5	8	615.2	10215.43	16.60	Pass
3.5	8	1183.1		8.63	Pass
4.5	8	1708.2		5.98	Pass
6.37	8	2113.3		4.83	Pass

Tabel 4. 40. Mooring safety factor kondisi damaged heading 90°



Gambar 4.82. Mooring safety factor kondisi damaged

Pada kondisi tali tambat *damaged* dengan arah pembebanan gelombang (*heading*) 90° didapati tinggi gelombang signifikan terbesar yang memenuhi kriteria *mooring safety factor* adalah pada Hs = 6.37 m dengan nilai *mooring safety factor* sebesar 4.83. Nilai tersebut diatas nilai kriteria *mooring safety factor* API RP 2SK (\geq 1.25) sehingga untuk kondisi *damaged*, Hs = 6.37 m, *heading* 90° masih memenuhi kriteria.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisis yang telah dilakukan pada BAB sebelumnya, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yang juga menjawab permasalahan pada tugas akhir. Berikut merupakan kesimpulan yang dapat dirangkum dari penelitian ini :

- 1 Pada kondisi *intact* Hs = 2,5 m dan Hs = 6,37 m arah *beamseas*, tegangan maksimum hasil eksperimen dan numeris terjadi di mooring line yang sama yakni mooring line ke-6 dengan nilai 373,6 kN dan 441.6 kN serta 565,61 kN dan 1741.5 kN
- 2 Pada kondisi damaged Hs = 6,37 m arah *beamseas* dengan memutus tali ke 7, tegangan maksimum hasil eksperimen dan numeris terjadi di mooring line yang sama yakni mooring line ke-8 dengan nilai 863,8 kN dan 2113.3 kN
- 3 Batas tinggi gelombang signifikan yang diijinkan pada kondisi intact heading 0 = 6.37 m dengan nilai *safety factor* sebesar 20.71 (≥ 1.67), heading 45 = 6.37 m dengan nilai *safety factor* sebesar 9.51 (≥ 1.67)., heading 90 = 6.37 m dengan nilai *safety factor* sebesar 5.87 (≥ 1.67)., heading 135 = 6.37 m dengan nilai *safety factor* sebesar 7.71 (≥ 1.67)., heading 180 = 6.37 m dengan nilai *safety factor* sebesar 22.17 (≥ 1.67). Sedangkan pada kondisi *damaged heading 90* adalah 6.37 m. dengan nilai safety factor sebesar 22.17 (≥ 1.67).

5.2 Saran

- 1 Diperlukan penyelidikan dan perhitungan lebih lanjut mengenai pengaruh kekakuan sistem tambat dalam pengubahan konfigurasi sistem tambat *horizontal taut mooring* menjadi *catenary mooring system*.
- 2 Dilakukan pemodelan sistem tambat eksperimen sesuai dengan sudut penurunan (*declanation*) dan kekakuan sistem *catenary* sesuai kondisi nyata atau menggunakan metode *truncated* dengan model *testing scale* yang lebih kecil.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

Daftar Pustaka

- Adi, A., 2013. Analisa Penerapan Bulbous bow pada Kapal Katamaran Untuk Meningkatkan Efisiensi Pemakaian Bahan Bakan. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Sistem Perkapalan.
- Al-fath, F., 2011. Analisa Stokastik Beban Beban Ultimate pada Sistem Tambat FPSO Sevan Stabilized Platform. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan.
- API-RP-2SK. 2005. Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping System for Floating Structures (3 ed.). Washington, DC: API Publishing Services.
- Arda, E.B. Djatmiko, Murdjito, A Study on the Effect of Semi-Submersible Drilling Rig Motions with Variation in Mooring Line Pre-Tension to the Safety of Drilling Riser, Proc. 8th Int. Conf. on Marine Technology, MARTEC 2012, Paper MTP-6, Kuala Terengganu, Malaysia, 20-22 Oct. 2012.
- Bhattacharyya, R., 1978. *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: JohnWiley & Sons,Inc.
- Bunari, M., 2013. Studi Perbandingan Perencanaan Kapal Katamaran dan Monohull Sebagai Kapal Riset di perairan Bengkalis Riau. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
- Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamic of Offshore Structure*. Boston, USA: Computational Mechanics Publication Shouthampton.
- Davis, M.R., Holloway, D.S., 2007. A Comparison of The Motions of Trimarans, Catamarans and Monohulls. Australian Journal of Mechanical Engineering, Vol 4 No 2. 2204-2253.
- Diaz, N., 2017. Studi Analitis, Numerik, dan Eksperimen Olah Gerak SPAR dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat Tipe Taut pada Kondisi Kegagalan Tali Tambat. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan.

- Djatmiko, E.B., 2012. Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak, Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan ITS.
- DNV-OS-E301. 2010. Position Mooring. Norway: Det Norske Veritas.
- DNV-RP-C205. 2010. Environmental Conditions And Environmental Loads. Norway : Det Norske Veritas.
- Doloksaribu, M.O., Manik, P., Kiryanto, K., 2018. Modifikasi Kapal Tipe Monohull Menjadi Tipe Katamaran Untuk Menunjang Kegiatan Pariwisata Di Kawasan Perairan Danau Toba (Studi Kasus KM. Horas Nainggolan). Jurnal Teknik Perkapalan, vol. 6, no. 4, Jul. 2018.
- Elhanafi, A., Macfarlane, G., Fleming, A., Leong, Z., 2017. Experimental And Numerical Investigations on The Intact and Damaged Survivability of A Floating-Moored Oscillating Water Column Device. National Centre for Maritime Engineering and Hydrodynamics, Australia Maritime College.
- Faltinsen, O.M., 1990. Sea Loads On Ships And Offshore Structures. United Kingdom : Cambridge University Press.
- Gorat, M.L.P., 2017. *Stability Analysis of Heave Lifting Operation for Crane Barge*. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan.
- Journee, J.M.J., Massie, W.W., 2001. *Offshore Hydromechanics (First Edition)*. Netherlands : Delft University of Technology.
- Kwan, C. T. dan Bruen, F. J., 1991. Mooring Line Dynamics: Comparison of Time Domain, Frequency Domain, and Quasi-Static Analyses. Offshore Technology Conference: 6-9 Mei 1991.
- Mahanani, D. F., 2017. Analisa Time-Domain Pengaruh Spread Mooring Dengan Variasi Jumlah Line Terhadap Tension Pada Flexible Riser. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan.
- Murdjito, Pravitasari, I.Y., Djatmiko, E.B., 2020. An Analysis on the Spread Mooring of the Belida FSO Induced by Squall Loads. KAPAL : Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan, Vol.17, No. 1, (2020)

- Muttaqin, A.S. 2018. Studi Numerik dan Eksperimen Olah Gerak SPAR Helical Strakes dan Dinamika Tegangan Sistem Tambat Tipe Taut pada Kondisi Kegagalan Tali Tambat. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan
- Negoro, G.A., 2019. Studi Eksperimen Pengaruh Gelombang Terhadap Respon Spar Dengan dan Tanpa Heave Plate Pada Kondisi Sistem Tambat Intact dan Damaged. Surabaya: Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan
- Pecher, A., Foglia, A., Kofoed, J.P., 2014. Comparison and Sensitivity Investigations of a CALM and SALM Type Mooring System for Wave Energy Converters. Journal of Marine Science and Engineering ISSN 2077-1312
- Prasodjo, B.S., Aristanto, W.D., Ashyar, D.F., 2011. Studi Optimasi Panjang Mooring Line Tipe Spread Mooring pada FPSO. Jurnal Wave, UPT. BPPH
 - BPPT vol. 5, no. 1, 2011.
- Sarpkaya. 2010. *Wave Forces on Offshore Structures*. New York : Cambridge University press.
- Shivaji, G.T., Sen, D., 2015. A 3D Numerical Wave Tank Study For Offshore Structures With Linear and Nonlinear Mooring. international conference on water resources, coastal and ocean engineering (icwrcoe 2015)
- Triputrastyo, T.M., 2015. Design Optimization of Truncated Mooring System for Deepwater Model Testing. UPT - Balai Pengkajian dan Penelitian Hidrodinamika, BPPT.
- Wright, C., Sullivan, K.O., Murphy, J., Pakrashi, V., 2015. Experimental Comparison of Dynamic Responses of a Tension Moored Floating Wind Turbine Platform with and without Spring Dampers. Journal of Physics: Conference Series 628 (2015) 012056. 11th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2015)

 Xu, S., Soares, C.G., Ji, C., 2018. Analysis of Catenary Mooring Systems Based on Truncated Mooring Experiments. Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2018 June 17-22, 2018, Madrid, Spain

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Coding Matlab FFT Spektra Gelombang Uji

```
clear;clc;close all;
skala = 36;
sfr = 50;
pilih = input('Pilih file (1) 201, (2) 202, (3) 203 = ');
if pilih ==1
  filename = 'TIME-242-201-1.txt'
elseif pilih ==2
  filename = 'TIME-242-202-1.txt'
else
  filename = 'TIME-242-203-1.txt'
end
fid = fopen(filename,'r');
title = fgetl(fid);
jumkol = length(str2num(title));
ttdat = fscanf(fid,'%f\n',[jumkol,inf]);
ttk1 = ttdat'; fclose(fid);
ttk
     = [str2num(title);ttk1];
t = ttk(:,1);
y = ttk(:, 2:end);
figure
for i=1:1
  subplot(1,1,i);
  plot(t,y(:,i));
  xlabel ("Time (s)"); ylabel ("Amplitudo (m)");
  title ("Gelombang Terukur Time-Domain");
end
ny = length(y);
ygelombang = y(:,1:1);
for i = 1:1
  fhz = (0:ny-1)*sfr/ny;
```

```
yg = fft(ygelombang(:,i));
  s1 = 2*abs(yg).^2/(ny*sfr);
  s2 = smooth(s1,850);
  w = 2*pi*fhz(1:ceil(ny/2))'/sqrt(skala);
  pw = find(w \ge 0 \& w \le 2.5);
  Ws = w(pw);
  s3 = s2(1:ceil(ny/2))/(2*pi)*sqrt(skala);
  Ss = s3(pw);
end
wsW = [Ws,Ss]; % data : omega, spektra gelombang
%------ Stokastik - Gelombang ------
m0 = trapz(Ws, Ss);
Hs = 4*sqrt(m0);
%------ Plot Spektra Gelombang ------
figure
for i=1:1
subplot(1,1,i);
plot(Ws,Ss);
  xlabel ("w (rad/s)");
  ylabel ("Sr (m²/rad/s)");
  title ("Spektra Gelombang Eksperimen");
end
```

```
LAMPIRAN B. Coding Matlab Lowpass & Bandpass Filtering dan FFT
Tegangan Tali Tambat Eksperimen
clear;clc;close all;
warning off
A = xlsread('MooringTension','Sheet1');
skala = 36;
sfr = 50;
t = A(:,1);
yforce = A(:,2:9);
figure
for i=1:8
  subplot(8,1,i);
  plot(t,yforce(:,i));
end
ny = length(A);
for i = 1:8
  fhz = (0:ny-1)*sfr/ny;
  yg = fft(yforce(:,i));
  s1 = 2*abs(yg).^{2/(ny*sfr)};
  s2 = smooth(s1, 150);
  w = 2*pi*fhz(1:ceil(ny/2))'/sqrt(skala);
  s3(:,i) = s2(1:ceil(ny/2))/(2*pi)*sqrt(skala);
  %---- Signal Filtering ----
```

```
%---- low freq ----

fs1 = 0.07/(2*pi)*sqrt(skala);

fs2 = 0.3/(2*pi)*sqrt(skala);

cutoff = [fs1 fs2]; % hz

fnyq = sfr/2;

[bt,at] = butter(4,cutoff/fnyq,'bandpass');

yforceL = filtfilt(bt,at,yforce(:,i));

%---- end-low freq ----
```

%--- wave freq ---fs1 = 0.3/(2*pi)*sqrt(skala); fs2 = 3/(2*pi)*sqrt(skala); cutoff = [fs1 fs2]; fnyq = sfr/2; [bt,at]= butter(4,cutoff/fnyq,'bandpass'); yforceW = filtfilt(bt,at,yforce(:,i)); %--- end-wave freq ----

%---- FFT low freq ---ygL = fft(yforceL); s1L = 2*abs(ygL).^2/(ny*sfr); s2L = smooth(s1L,150); s3L(:,i) = s2L(1:ceil(ny/2))/(2*pi)*sqrt(skala); %---- end-FFT low freq ----

```
%---- FFT wave freq ----

ygW = fft(yforceW);

s1W = 2*abs(ygW).^2/(ny*sfr);

s2W = smooth(s1W,150);

s3W(:,i) = s2W(1:ceil(ny/2))/(2*pi)*sqrt(skala);

%---- end-FFT wave freq ----
```

figure(3+i); subplot(311) plot(yforce(:,i));xlabel('Original Tension Band'); subplot(312) plot(yforceL);xlabel('Low Frequency Tension Band'); subplot(313) plot(yforceW);xlabel('Wave Frequency Tension Band');

```
Tmean(:,i) = mean(yforce(:,i));Twfmax(:,i) = 1.86*2*sqrt(trapz(w,s3W(:,i)));Tlfsig(:,i) = 2*sqrt(trapz(w,s3L(:,i)));
```

Tmax(i) = Tmean(:,i) + Twfmax(:,i) + Tlfsig(:,i);end Tmax(2:end)Ss = [w,s3];SW = [w,s3W];SL = [w,s3L]; (Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)





Time-History Tegangan Tali Tambat 1-4 Eksperimen Skenario 1



Time (s)





-100 0

Time (s)

Time-History Tegangan Tali Tambat 5-8 Eksperimen Skenario 1



Time (s)

Time-History Tegangan Tali Tambat 1-4 Eksperimen Skenario 2



Time-History Tegangan Tali Tambat 5-8 Eksperimen Skenario 2



Time-History Tegangan Tali Tambat 1-4 Eksperimen Skenario 3



Time-History Tegangan Tali Tambat 5-8 Eksperimen Skenario 3



Bandpass filtering tegangan tali tambat 1-8 skenario 1









Bandpass filtering tegangan tali tambat 1-8 skenario 2
















LAMPIRAN E Coding Moses Tertambat

&title Catamaran Crane Barge Mooring Analysis

&device -oecho no -auxin Catamaranunionnonspan.dat

&dimen -dimen meters m-tons

&default -depth 80

inmodel

&instate -CONDITION CATAMARAN 4.700

medit

*	MLS1 5.64	15.900 13.14				
*	MLS2 106.50	18.900 13.14				
*	MLP3 106.50	-18.900 13.14				
*	MLP4 5.64	-15.900 13.14				
~wire	b_cat	85.66618352652	\			
	-wtplen	0.0643498713	\			
	-displen	0.00830000000	\			
	-len	342.87093711865	\			
	-buoy	0	\			
	-emod	1.13.E+05				
	-depanchor	80	\			
	-clump	0	\			
	-b_tension	1041.68514210780	\			
	-tab_lim	1041.68514210780				
Conne	ector F1 -ancho	r 215 320 ~wire *MLI	P4			
Conne	ector F2 -ancho	r 230 320 ~wire *MLI	P4			
Conne	ector F3 -ancho	r 310 320 ~wire *MLI	23			
Conne	ector F4 -ancho	r 325 320 ~wire *MLI	P3			

Connector F5 -anchor 35 320 ~wire *MLS2

Connector F6 -anchor 50 320 ~wire *MLS2

Connector F7 -anchor 130 320 ~wire *MLS1

Connector F8 -anchor 145 320 ~wire *MLS1

End_medit &subtitle AFTER MEDIT &PICTURE starb -render wf

&connector @ -a_tension 20.8

&subtitle AFTER MOVING ANCHOR

&PICTURE starb -render wf

&subtitle

&subtitle Initial Condition

&pltmodel

picture iso

picture side

picture top

picture bow

end

&select :mline -sel F@

&pict top -name :mline -anot string -color selected

&pict iso -name :mline -anot string -color selected

conn_design

table F1

report

vlist

plot 1 2 -rax 3 -no_edit

end

move CATAMARAN 90

report

end

end_conn

hydrodynamics

¶meter -m_distance 7

g_pressure CATAMARAN -heading 90 -md_type farfield

end_hydrodynamics

&env test -sea ISSC 90 6.37 12.3 -time 1000 1

&equi

&status f_connector

&status force

&describe interest -associate *M@

freq_response

rao

equ_sum

&subtitle RESULTS WITH RAO COMMAND

fr_point *COG

REPORT

end

st_point test

REPORT

end

fr_cforce F1

REPORT

vlist

end

st_cforce @ test

REPORT

end

&subtitle RESULTS WITH SRESPONSE COMMAND

sresponse test

exforce

report

end

fr_point *COG

REPORT

end

st_point test

REPORT

end

fr_cforce F1

REPORT

end

st_cforce @ test

REPORT

end

end_freq_response

&subtitle

TDOM -newmark yes .25 .5

prepost

trajectory

vlist

range -x -25 25 -left -25 25

plot 5 6 -no

end

trajectory

&subtitle Stat. of Location

statistics 1 5 6 7 8 9 10 -hard

end

cf_magnitude @

vlist

&subtitle Stat. of Mooring Tension Floating Crane Catamaran statistics 1 2 4 6 8 10 12 14 16 -hard extreme 1 2 4 6 8 10 12 14 16 \$-hard &subtitle Connector Force History Floating Crane Catamaran

plot 1 2 4 6 8 10 12 14 16 -no -t_left 'Tension (ton)'

end

conforce @

vlist

&subtitle Stat. of Anchor Tension Floating Crane Catamaran statistics 1 11 22 33 44 55 66 77 88 -hard
&subtitle Stat. of Grounded Length Floating Crane Catamaran statistics 1 10 21 32 43 54 65 76 87 -hard
&subtitle Stat. of Anchor Uplift Floating Crane Catamaran

\$

&finish

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

LAMPIRAN F. Time History Tegangan Tali Tambat Numeris



Intact, Heading 0°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)



Time (s)

Intact, Heading 45°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)

Line 7

Line 8



Intact, Heading 90°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)





Intact, Heading 180°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)



Damaged, Heading 90°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)

LAMPIRAN G. Spektra Tegangan Frekuensi Rendah & Gelombang, Numeris







Intact, Heading 45°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)



Intact, Heading 90°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)



Intact, Heading 135°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)



Intact, Heading 180°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)



Frequency (Rad/s)

Damaged, Heading 180°, Variasi Hs = 2,5 m; 3,5 m; 4,5 m; 6,37 m (Berurutan)

Frequency (Rad/s)

LAMPIRAN H Stokastik Tegangan Maksimum Metode Numeris

Intact, Heading 0°

	OUTPUT MATLAB								
<u>Hs = 2.5 m</u>									
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8	
Tmean	195.0003	196.8754	207.0475	208.9324	208.9236	207.0524	196.8294	194.9425	
Tlfsig	19.33802	14.96182	16.00737	20.21135	20.25965	16.21931	15.52225	19.62394	
Twfmax	15.03069	16.04153	15.24702	14.59162	14.63485	15.45683	16.48334	15.28568	
Tmax	229.369	227.8787	238.3019	243.7353	243.8181	238.7285	228.8349	229.8521	

<u>Hs = 3.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	190.7259	193.4573	210.8829	214.4931	214.4696	210.9025	193.2251	190.6123
Tlfsig	42.13052	33.32318	36.36415	50.00328	50.02675	36.83364	34.50584	42.66741
Twfmax	22.62283	24.60589	23.81951	21.94548	22.19809	24.0899	25.19691	22.90995
Tmax	255.4793	251.3864	271.0666	286.4418	286.6944	271.8261	252.9278	256.1896

<u>Hs = 4.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	191.2895	192.5656	216.9079	224.2718	224.1083	216.8597	192.2869	191.1478
Tlfsig	77.47518	61.31492	80.54961	100.4671	100.448	81.55597	63.23144	78.62143
Twfmax	32.1097	33.78611	32.25393	30.21285	30.37544	32.72542	34.77324	32.6379
Tmax	300.8744	287.6666	329.7115	354.9517	354.9317	331.1411	290.2916	302.4071

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	199.7939	196.8185	229.4821	245.5333	244.9578	229.3229	196.4634	199.5879
Tlfsig	168.9108	122.2739	112.1784	157.3685	157.144	113.9582	125.8826	172.2506
Twfmax	66.73001	59.048	61.86458	90.30974	89.45574	62.13075	61.12124	68.31283
Tmax	435.4347	378.1404	403.525	493.2116	491.5576	405.4118	383.4672	440.1514

Hs (m)	Maximum Tension				
	At Line	Tension (kN)			
2.5	5	243.82			
3.5	5	286.69			
4.5	4	354.95			
6.37	4	493.21			

Intact, Heading 45°

OUTPUT MATLAB

Hs = 25 m

<u>Hs = 2.5 m</u>								
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	181.0319	175.8024	176.1903	183.9318	225.4881	233.6439	226.8792	219.7667
Tlfsig	24.07671	19.9187	24.38457	25.30687	32.09493	37.18481	26.78824	28.10074
Twfmax	16.87278	17.97375	13.66078	12.5285	21.33114	25.08358	26.34686	24.51371
Tmax	221.9814	213.6948	214.2357	221.7672	278.9141	295.9123	280.0143	272.3811

<u>Hs = 3.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	171.8797	162.9695	162.4904	171.4203	246.8138	268.5922	268.8871	251.5692
Tlfsig	48.44836	38.21728	54.33008	58.74305	85.3906	99.82869	113.8358	111.5361
Twfmax	26.19819	27.52214	18.38203	17.20244	40.18447	53.59829	50.72527	47.37998
Tmax	246.5263	228.7089	235.2026	247.3658	372.3889	422.0192	433.4482	410.4853

<u>Hs = 4.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	168.1482	158.1835	154.5412	165.7924	277.5881	321.353	305.5631	281.1009
Tlfsig	69.88306	57.17679	72.09015	74.28685	138.3038	199.1847	169.3321	168.8452
Twfmax	33.75357	34.45366	22.12454	22.0688	90.10927	137.2751	97.13186	93.65389
Tmax	271.7848	249.814	248.7559	262.148	506.0011	657.8129	572.0271	543.6

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	182.3155	174.4336	151.1983	167.0078	293.8963	366.8438	332.8669	299.306
Tlfsig	129.2626	128.5973	80.9705	104.8658	186.2561	281.8636	283.5649	262.0771
Twfmax	68.7306	65.76123	46.76	57.61094	181.5607	425.8814	205.5366	159.643
Tmax	380.3087	368.7921	278.9288	329.4845	661.7131	1074.589	821.9684	721.0261

Hs (m)	Maximum Tension					
пs (III)	At Line	Tension (kN)				
2.5	6	295.91				
3.5	7	433.45				
4.5	6	657.81				
6.37	6	1074.59				

Intact, Heading 90°

OUTPUT MATLAB

= 25 m

<u>Hs = 2.5 m</u>								
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	177.029	171.093	148.6348	159.1282	253.2161	291.5051	252.2903	241.8018
Tlfsig	25.22094	30.13453	20.78365	21.29547	48.14536	90.48546	48.61496	33.60488
Twfmax	19.60134	21.71278	15.63207	17.32438	47.50924	59.65445	64.47368	53.25266
Tmax	221.8512	222.9404	185.0505	197.748	348.8707	441.645	365.3789	328.6593

<u>Hs = 3.5 m</u>

...

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	175.8312	169.8497	131.6678	145.374	294.6309	386.411	302.9623	283.5607
Tlfsig	57.61216	66.70724	32.84816	30.61625	77.00022	186.8393	151.6616	104.2827
Twfmax	21.49717	23.40732	16.22027	19.03632	79.59363	159.9926	120.18	89.26301
Tmax	254.9405	259.9643	180.7362	195.0266	451.2247	733.2428	574.8039	477.1064

<u>Hs = 4.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	178.2354	172.2813	128.3143	144.2232	320.7744	460.8657	315.1359	298.4476
Tlfsig	85.8908	90.11866	53.89932	54.78144	88.58314	234.572	171.3034	150.1875
Twfmax	26.53736	28.52051	19.93137	23.35061	111.1924	310.1849	185.2262	133.15
Tmax	290.6636	290.9205	202.145	222.3553	520.55	1005.623	671.6655	581.7852

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	192.9956	188.607	136.547	151.7729	316.4094	533.7415	334.7201	317.2715
Tlfsig	130.3389	139.5731	107.4861	108.7062	144.5298	414.66	214.5746	210.6525
Twfmax	40.39142	44.28296	38.48622	35.63236	146.2553	793.1405	378.8444	224.5653
Tmax	363.7259	372.4631	282.5193	296.1114	607.1945	1741.542	928.1392	752.4893

Hs (m)	Maximum Tension				
	At Line	Tension (kN)			
2.5	6	441.64			
3.5	6	733.24			
4.5	6	1005.62			
6.37	6	1741.54			

Intact, Heading 135°

OUTPUT MATLAB											
<u>Hs = 2.5 m</u>											
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8			
Tmean	176.5528	165.9419	177.8793	181.801	219.5649	223.5924	248.2755	232.7309			
Tlfsig	13.41064	15.65436	14.88144	12.4475	11.98721	14.29248	33.76511	18.14914			
Twfmax	12.42614	12.54058	12.60379	13.37824	21.58876	23.72882	42.77423	32.90676			
Tmax	202.3896	194.1368	205.3645	207.6267	253.1409	261.6137	324.8149	283.7868			

Hs = 4.5 m

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	161.7498	149.6605	169.8802	173.9381	234.9841	240.8632	309.2364	267.0365
Tlfsig	27.61547	25.00491	31.42086	28.59051	39.02343	44.13673	95.97906	60.00776
Twfmax	17.9538	17.46565	21.91333	21.70048	36.7875	39.79504	101.2815	65.09406
Tmax	207.3191	192.1311	223.2144	224.229	310.7951	324.795	506.4969	392.1383

<u>Hs = 6.37 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	156.2396	140.9208	166.4748	171.4956	261.6337	266.1348	384.554	306.0502
Tlfsig	50.75807	45.93489	54.28139	58.62332	129.5859	98.04045	180.6747	110.6133
Twfmax	23.72125	21.97391	32.3714	32.83571	62.5967	61.89721	262.8567	113.538
Tmax	230.7189	208.8296	253.1276	262.9547	453.8163	426.0724	828.0854	530.2016

Hs = 7.5 m

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	156.1936	138.6559	172.3333	177.8044	285.5757	294.0997	466.9646	331.3083
Tlfsig	84.31595	67.21223	108.9977	108.3258	174.0572	153.9342	306.209	149.285
Twfmax	60.77767	41.11833	60.44952	61.27744	136.9321	118.9703	551.9413	202.9076
Tmax	301.2873	246.9865	341.7806	347.4077	596.565	567.0041	1325.115	683.5009

Hs (m)	Maxim	Maximum Tension				
	At Line	Tension (kN)				
2.5	7	324.81				
3.5	7	506.50				
4.5	7	828.09				
6.37	7	1325.11				

Intact, Heading 180°

	OUTPUT MAILAB											
<u>Hs = 2.5 m</u>												
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8				
Tmean	208.2045	207.216	196.8666	195.9388	195.9182	196.8607	207.1445	208.1565				
Tlfsig	17.961	14.297	13.444	17.24289	17.53194	13.85987	14.80178	18.54819				
Twfmax	17.961	14.297	13.444	17.24289	17.53194	13.85987	14.80178	18.54819				
Tmax	244.1265	235.81	223.7546	230.4246	230.9821	224.5804	236.748	245.2528				

<u>Hs = 3.5 m</u>

П

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	212.8109	210.8075	193.7032	191.88	191.8192	193.6944	210.4891	212.6101
Tlfsig	32.82938	25.13246	24.41475	31.13422	31.57478	24.91834	26.11811	33.64673
Twfmax	29.45031	31.05082	21.18201	19.06634	19.32077	21.55916	31.69947	29.78631
Tmax	275.0906	266.9908	239.2999	242.0805	242.7148	240.1719	268.3067	276.0431

<u>Hs = 4.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	220.2673	215.6364	190.7818	188.795	188.7019	190.7298	215.0231	219.8784
Tlfsig	67.33453	47.20248	41.53988	51.45296	51.71316	42.43633	49.34199	68.74967
Twfmax	40.11291	43.2247	30.19953	27.49257	27.66714	30.79717	44.13104	40.59479
Tmax	327.7148	306.0635	262.5212	267.7405	268.0822	263.9633	308.4961	329.2229

<u>Hs = 6.37 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	238.39	227.1653	197.6959	200.8922	200.479	198.0469	225.0866	236.9524
Tlfsig	146.4724	106.4411	101.1169	137.1086	136.6867	102.2267	109.092	147.6343
Twfmax	74.12509	66.82161	46.93044	47.92279	43.90213	47.8908	67.43587	76.19073
Tmax	458.9875	400.428	345.7432	385.9236	381.0678	348.1644	401.6144	460.7774

He (m)	Maximum Tension				
	At Line	Tension (kN			
2.5	8	245.25			
3.5	8	276.04			
4.5	8	329.22			
6.37	8	460.78			

Damaged, Heading 90°

OUTPUT MATLAB									
<u>Hs = 2.5 m</u>									
	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7		Line 8
Tmean	164.1618	145.7496	128.3974	134.6086	246.949	299.1525		0	408.6518
Tlfsig	21.06543	17.27912	20.46037	14.83626	36.49193	82.50292		0	74.08858
Twfmax	16.68456	14.61336	12.6934	13.60874	46.52174	63.22651		0	132.4656
Tmax	201.9118	177.6421	161.5512	163.0536	329.9627	444.8819		0	615.206

<u>Hs = 4.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	162.5507	143.8341	116.5465	126.7032	293.1684	413.4369	0	499.6606
Tlfsig	49.9265	48.75064	37.23848	30.57629	87.60399	247.0856	0	276.1028
Twfmax	19.97068	19.6907	13.88734	15.93745	83.47905	241.6324	0	407.3833
Tmax	232.4479	212.2755	167.6723	173.217	464.2514	902.1549	0	1183.147

<u>Hs = 4.5 m</u>

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	164.1365	145.4652	114.9183	125.6755	310.6522	484.6039	0	552.3504
Tlfsig	65.42089	65.56174	44.04705	37.21632	87.29991	362.9635	0	410.0727
Twfmax	23.14335	21.81453	15.87006	18.57949	117.8419	581.4707	0	745.7727
Tmax	252.7007	232.8414	174.8354	181.4713	515.794	1429.038	0	1708.196

	Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6	Line 7	Line 8
Tmean	179.2439	164.6016	123.2481	132.0644	314.1801	558.86	0	600.2123
Tlfsig	111.9494	159.1399	101.3304	84.49184	119.185	467.0742	0	467.6761
Twfmax	31.51177	53.13241	40.60916	39.11873	153.8675	778.6507	0	1045.407
Tmax	322.705	376.8739	265.1877	255.6749	587.2325	1804.585	0	2113.295

	Maximum Tension				
HS (M)	At Line	Tension (kN)			
2.5	8	615.21			
3.5	8	1183.15			
4.5	8	1708.20			
6.37	8	2113.29			

BIODATA PENULIS



Mochamad Hanif Rafi'i lahir di Lamongan pada 9 November 1997, merupakan putra kedua dari pasangan Ir. Fatchur Rifai (alm) dan Siti Sholikah dengan wali Abdul Malik. Penulis telah menempuh jenjang pendidikan dasar di MI Ma'arif NU Sunan Drajat (2004-2010). Kemudian jenjang pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 1 Lamongan (2010-2013), lalu jenjang pendidikan mengenah keatas di SMA Negeri 2 Lamongan

(2013-2016). Pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institute Teknologi Sepuluh November. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam berorganisasi di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (Himatekla ITS). Dalam himpunan mahasiswa teknik kelautan, penulis menjabat sebagai staff media kreatif departemen media informasi (2017-2018) dan sebagai ketua divisi broadcasting departemen media informasi (2019). Pada perkuliahan akhir tahun ketiga, penulis melaksanakan program kerja praktek di Badan Penelitian dan Pengembangan Daerah Kabupaten Lamongan dengan topik pekerjaan analisis peran technopark berbasis maritim terhadap keberlangsungan klaster industri galangan kapal rakyat berbasis potensi daerah. Penulis melakukan penelitian mengenai floating crane catamaran di Balai Teknologi Hidrodinamika - Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi (BTH – BPPT). Penulis menyusun penelitian tugas akhir dengan judul "Studi Eksperimen dan Analisis Numeris Tegangan Sistem Tambat Floating Crane Catamaran pada Kondisi Intact Dan Damage Berbasis Ranah Waktu (Time-Domain)".

Email : m.hanifrafi.i@gmail.com