



TUGAS AKHIR - MO184804

STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISIS NUMERIS OPERABILITAS CRANE PADA FLOATING CRANE CATAMARAN

RIZKY ARRICO FARHAN

NRP. 04311640000057

Dosen Pembimbing:

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

Ir. Murdjito, M. Sc., Eng.

Ir. Abd. Ghofur, M. Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2020



FINAL PROJECT - MO184804

**EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS OF CRANE OPERABILITY IN
FLOATING CRANE CATAMARAN**

RIZKY ARRICO FARHAN

NRP. 04311640000057

Supervisors:

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

Ir. Murdjito, M. Sc., Eng.

Ir. Abd. Ghofur, M. Sc.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2020

LEMBAR PENGESAHAN
STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISIS NUMERIS OPERABILITAS
CRANE PADA FLOATING CRANE CATAMARAN

TUGAS AKHIR

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

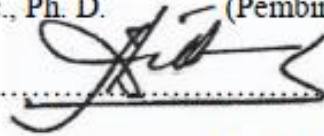
Oleh:

RIZKY ARRICO FARHAN

NRP. 04311640000057

Disetujui oleh:

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

.....


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

.....

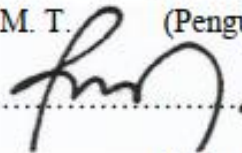

3. Ir. Abd. Ghofur, M. Sc. (Pembimbing 3)

.....

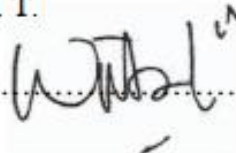

4. Ir. Wisnu Wardhana, M. Sc., Ph. D. (Penguji 1)

.....


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

.....


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

.....


Surabaya, Agustus 2020

Studi Eksperimen dan Analisis Numeris Operabilitas *Crane* pada *Floating Crane Catamaran*

Nama : Rizky Arrico Farhan
NRP : 04311640000057
Departemen : Teknik Kelautan FTK ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M. Sc., Ph. D.
Ir. Murdjito, M. Sc., Eng.
Ir. Abd. Ghofur, M. Sc.

ABSTRAK

Crane vessel adalah sebuah bangunan apung yang dilengkapi dengan fasilitas akomodasi dan satu atau lebih *crane* untuk melakukan pekerjaan dilapangan. *Crane vessel* terus dikembangkan agar dapat mengangkat struktur yang besar dan juga dapat beroperasi dengan aman pada kondisi lingkungan tertentu. Pekerjaan yang biasa dilakukan oleh *crane vessel* adalah mengangkat beban berat maupun ringan dari darat ke kapal, dari kapal ke darat, dari kapal ke laut, dari laut ke kapal, ataupun dari kapal ke kapal. Proses pemindahan muatan yang dilakukan oleh *crane vessel* biasa disebut proses *lifting*. *Crane vessel* dalam melakukan pekerjaannya dibatasi oleh kriteria-kriteria tertentu dengan alasan keselamatan. Salah satunya adalah kriteria yang membatasi gerak *heave* pada ujung *crane boom* dan gerak *roll* dan *pitch* pada *crane vessel*. Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan studi eksperimen dan analisis numeris operabilitas *crane* pada *crane vessel* berlambung *catamaran*. Eksperimen dilakukan di Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT dan analisis numeris menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES. Sesuai kriteria yang digunakan yaitu Operational Limitations of Offshore Crane Vessels, *crane* pada *floating crane catamaran* memiliki operabilitas paling tinggi saat *vessel heading* 0° terhadap arah datang gelombang yaitu hingga H_s 1.45 m.

Kata kunci: *crane vessels*, *catamaran*, operabilitas

***Experiment Study and Numerical Analysis of Crane Operability in
Floating Crane Catamaran***

Name : Rizky Arrico Farhan
NRP : 04311640000057
Departement : Ocean Engineering FTK ITS
Supervisor : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M. Sc., Ph. D.
Ir. Murdjito, M. Sc., Eng.
Ir. Abd. Ghofur, M. Sc.

ABSTRACT

Crane vessel is a floating structure equipped with accommodation facilities and one or more cranes to do work in the field. Crane vessel continue to be developed so that they can lift large structures and can also operate safely in certain environmental conditions. The work that is usually done by crane vessel is to lift heavy or light loads from land to ship, from ship to land, from ship to sea, from sea to ship, or from ship to ship. The process of moving loads carried out by a crane vessel is usually called the lifting process. In carrying out its work, a crane vessel is limited by certain criteria for safety reasons. One of them is the criterion that limits the heave motion at the end of the crane boom and roll and pitch motion of the crane vessel. In this final project, an experimental study and numerical analysis of crane operability were carried out on catamaran hulled crane vessel. Experiments were carried out at the Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT and numerical analysis using the MOSES software. According to the criteria used, namely Operational Limitations of Offshore Crane Vessels, cranes on floating crane catamaran have the highest operability when the vessel heading is 0° to the direction of the incoming waves, which is up to H_s 1.45 m.

Keywords: crane vessels, catamaran, operability

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penayang, dengan ini penulis panjatkan puji dan syukur atas kehadiran-Nya yang telah melimpahkan rahmat-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul “Studi Eksperimen dan Analisis Numeris Operabilitas *Crane* pada *Floating Crane Catanaran*”.

Adapun laporan tugas akhir tentang membandingkan antara respon gerak *floating crane catamaran* model eksperimen dan numeris, dan menganalisis operabilitas *crane* pada *floating crane catamaran* telah penulis usahakan semaksimal mungkin dan tentunya dengan bantuan dari banyak pihak sehingga dapat memperlancar proses pembuatan laporan tugas akhir ini. Oleh sebab itu, penulis juga ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

Akhirnya penulis mengharapkan semoga laporan tugas akhir ini dapat memberi manfaat terhadap pembaca dan memberi inspirasi bagi peneliti-peneliti selanjutnya.

Surabaya, Agustus 2020

Rizky Arrico Farhan

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Mama dan Papa, yang selalu mendukung dan mendo'akan.
2. Prof. Eko dan Pak Murdjito selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, ilmu, dan waktunya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Pak Ghofur, Pak Ali, dan Mbak Erdina selaku pembimbing dari BTH BPPT yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk mengetahui lebih jauh tentang eksperimen.
4. Pak Wisnu, Pak Rudi, dan Bu Dhanis selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik serta masukannya untuk memperbaiki segala kekurangan dari tugas akhir ini.
5. Pak Yeyes selaku dosen wali yang telah mendukung dan membimbing penulis selama kuliah dan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
6. Pak Fahmi yang telah meluangkan waktunya untuk berbagi ilmu serta berdiskusi sangat membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Anggota Tim Eksperimen, Aziz, Hanif, dan Yunan, yang telah membantu penulis dan bekerja sama dari nol dalam menyelesaikan penelitian tugas akhir ini.
8. Adhiwamastya yang telah berjuang bersama dan berbagi rasa dalam menjalani perkuliahan.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang berlipat ganda kepada semuanya atas segala bentuk bantuannya kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	ix
UCAPAN TERIMAKASIH.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat	3
1.5. Batasan Masalah.....	4
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1. Tinjauan Pustaka	7
2.2. Dasar Teori.....	8
2.2.1. Teori Permodelan	8
2.2.2. Gerak Bagunan Apung	11
2.2.3. Gaya Hidrodinamika.....	12
2.2.4. Gaya Eksitasi.....	13
2.2.5. Gaya Reaksi	14

2.2.6.	Persamaan Gerak	16
2.2.7.	<i>Response Amplitude Operator</i> (RAO)	18
2.2.8.	Sistem Tambat	19
1.2.9.	Spektrum Gelombang	19
1.2.10.	<i>Frequency Domain</i> dan <i>Time Domain</i>	20
1.2.11.	Kriterian Operabilitas <i>Crane</i>	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		23
3.1	Diagram Alir.....	23
3.2	Penjelasan Diagram Alir	24
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		29
4.1.	Pemodelan Struktur.....	29
4.1.1.	Pemodelan Numeris	29
4.1.2.	Pemodelan Eksperimen.....	33
4.2.	Pemodelan Sistem Tambat	35
4.2.1.	Perhitungan Kekakuan Pegas	36
4.2.2.	Kekakuan Tali Pancing	38
4.2.3.	Pemodelan Sistem Tambat Numeris.....	38
4.3.	Validasi Model Eksperimen dan Numeris	40
4.4.	Kalibrasi Instrumen Pengukuran	42
4.4.1.	Kalibrasi Perangkat <i>Motion Capture System</i>	42
4.4.2.	Kalibrasi Gelombang	42
4.5.	Persiapan Pengolahan Data Eksperimen.....	46
4.6.	Analisis Respon Gerak Hasil Eksperimen	47
4.6.1.	Mode Gerak <i>Surge</i>	47
4.6.2.	Mode Gerak <i>Sway</i>	48
4.6.3.	Mode Gerak <i>Heave</i>	50

4.6.4.	Mode Gerak <i>Roll</i>	51
4.6.5.	Mode Gerak <i>Pitch</i>	52
4.6.6.	Mode Gerak <i>Yaw</i>	54
4.7.	Analisis RAO Hasil Eksperimen	56
4.7.1.	Mode Gerak <i>Surge</i>	56
4.7.2.	Mode Gerak <i>Sway</i>	57
4.7.3.	Mode Gerak <i>Heave</i>	58
4.7.4.	Mode Gerak <i>Roll</i>	59
4.7.5.	Mode Gerak <i>Pitch</i>	60
4.7.6.	Mode Gerak <i>Yaw</i>	61
4.8.	Perbandingan antara RAO Eksperimen dan Numeris	62
4.8.1.	Mode Gerak <i>Surge</i>	62
4.8.2.	Mode Gerak <i>Sway</i>	63
4.8.3.	Mode Gerak <i>Heave</i>	64
4.8.4.	Mode Gerak <i>Roll</i>	65
4.8.5.	Mode Gerak <i>Pitch</i>	66
4.8.6.	Mode Gerak <i>Yaw</i>	67
4.9.	Perbandingan antara Spektra Respon Eksperimen dan Numeris	67
4.9.1.	Spektrum Gelombang Analisis Numeris	67
4.9.2.	Mode Gerak <i>Surge</i>	70
4.9.3.	Mode Gerak <i>Sway</i>	71
4.9.4.	Mode Gerak <i>Heave</i>	73
4.9.5.	Mode Gerak <i>Roll</i>	75
4.9.6.	Mode Gerak <i>Pitch</i>	76
4.9.7.	Mode Gerak <i>Yaw</i>	77
4.10.	Persiapan Analisis Operabilitas	79

4.10.1.	RAO	79
4.10.2.	Spektrum Gelombang	81
4.10.3.	Penentuan Koordinat <i>Crane Pedestal</i> dan <i>Boom End</i> pada <i>Crane</i> 83	
4.11.	Analisis Operabilitas <i>Crane</i>	85
4.11.1.	Operabilitas <i>Crane Heading 0°</i>	85
4.11.2.	Operabilitas <i>Crane Heading 45°</i>	87
4.11.3.	Operabilitas <i>Crane Heading 90°</i>	88
4.11.4.	Operabilitas <i>Crane Heading 135°</i>	89
4.11.5.	Operabilitas <i>Crane Heading 180°</i>	90
BAB V PENUTUP		91
1.1.	Kesimpulan.....	91
1.2.	Saran	92
DAFTAR PUSTAKA		93
LAMPIRAN A - <i>TIME HISTORY</i> EKESPERIMEN		
LAMPIRAN B – STATISTIK SPEKTRA RESPON		
LAMPIRAN C - POSISI <i>CRANE</i>		
LAMPIRAN D - GRAFIK OPERABILITAS <i>CRANE</i>		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Floating crane catamaran</i> (Marine Traffic.com)	1
Gambar 2.1 <i>Semi-submersible crane vessel</i> . (Journee & Massie, 2001)	7
Gambar 2. 2 Enam mode gerakan bangunan apung (Djatkiko, 2012)	12
Gambar 2. 3 Beban hidrodinamika struktur terapung (Faltinsen, 1990).....	12
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	23
Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian (lanjutan)	24
Gambar 4. 1 Tampak depan model MAXSURF.....	29
Gambar 4. 2 Tampak belakang model MAXSURF	30
Gambar 4. 3 Tampak isometrik hasil <i>meshing</i> MOSES.....	30
Gambar 4. 4 Tampak samping hasil <i>meshing</i> MOSES	31
Gambar 4. 5 Tampak atas hasil <i>meshing</i> MOSES	31
Gambar 4. 6 Tampak depan hasil <i>meshing</i> MOSES	32
Gambar 4.7 Model eksperimen.	34
Gambar 4.8 Distribusi beban pada model eksperimen.....	35
Gambar 4.9 Tali pancing.	36
Gambar 4. 10 Konfigurasi sistem tambat model eksperimen.....	36
Gambar 4. 11 Proses kalibrasi pegas eksperimen	37
Gambar 4. 12 Model tertambat numeris tampak samping	39
Gambar 4. 13 Model tertambat numeris tampak atas	40
Gambar 4. 14 Model tertambat numeris tampak depan	40
Gambar 4.15 Kalibrasi <i>motion capture system</i>	42
Gambar 4. 16 Spektrum gelombang kode 201	44
Gambar 4. 17 Spektrum gelombang kode 202	45
Gambar 4. 18 Spektrum respon mode gerak <i>surge</i> kode 201.....	48
Gambar 4. 19 Spektrum respon mode gerak <i>surge</i> kode 202.....	48
Gambar 4. 20 Spektrum respon mode gerak <i>sway</i> kode 201.....	49
Gambar 4. 21 Spektrum respon mode gerak <i>sway</i> kode 202.....	49
Gambar 4. 22 Spektrum respon mode gerak <i>heave</i> kode 201	50
Gambar 4. 23 Spektrum respon mode gerak <i>heave</i> kode 202	51
Gambar 4. 24 Spektrum respon mode gerak <i>roll</i> kode 201.....	52

Gambar 4. 25	Spektrum respon mode gerak <i>roll</i> kode 202.....	52
Gambar 4. 26	Spektrum respon mode gerak <i>pitch</i> kode 201.....	53
Gambar 4. 27	Spektrum respon mode gerak <i>pitch</i> kode 202.....	53
Gambar 4. 28	Spektrum respon mode gerak <i>yaw</i> kode 201	54
Gambar 4. 29	Spektrum respon mode gerak <i>yaw</i> kode 202	55
Gambar 4. 30	Grafik RAO mode gerak <i>surge</i>	56
Gambar 4. 31	Grafik RAO mode gerak <i>sway</i>	57
Gambar 4. 32	Grafik RAO mode gerak <i>heave</i>	58
Gambar 4. 33	Grafik RAO mode gerak <i>roll</i>	59
Gambar 4. 34	Grafik RAO mode gerak <i>pitch</i>	60
Gambar 4. 35	Grafik RAO mode gerak <i>yaw</i>	61
Gambar 4. 36	Grafik perbandingan RAO mode gerak <i>surge</i>	62
Gambar 4. 37	Grafik perbandingan RAO mode gerak <i>sway</i>	63
Gambar 4. 38	Grafik perbandingan RAO mode gerak <i>heave</i>	64
Gambar 4. 39	Grafik perbandingan RAO mode gerak <i>roll</i>	65
Gambar 4. 40	Grafik perbandingan RAO mode gerak <i>pitch</i>	66
Gambar 4. 41	Grafik perbandingan RAO mode gerak <i>yaw</i>	67
Gambar 4. 42	Grafik validasi spektrum gelombang kode 201	68
Gambar 4. 43	Grafik validasi spektrum gelombang kode 202	69
Gambar 4. 44	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>surge</i> kode 201	71
Gambar 4. 45	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>surge</i> kode 202	71
Gambar 4. 46	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>sway</i> kode 201.	72
Gambar 4. 47	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>sway</i> kode 202.	73
Gambar 4. 48	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>heave</i> kode 201	74
Gambar 4. 49	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>heave</i> kode 202	74
Gambar 4. 50	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>roll</i> kode 201 ...	75
Gambar 4. 51	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>roll</i> kode 202...	76
Gambar 4. 52	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>pitch</i> kode 201.	77
Gambar 4. 53	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>pitch</i> kode 202.	77
Gambar 4. 54	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>yaw</i> kode 201 ..	78
Gambar 4. 55	Grafik perbandingan spektra respon mode gerak <i>yaw</i> kode 202 ..	78
Gambar 4. 56	Grafik RAO <i>heading</i> 0°	79

Gambar 4. 57 Grafik RAO <i>heading</i> 45°	80
Gambar 4. 58 Grafik RAO <i>heading</i> 90°	80
Gambar 4. 59 Grafik RAO <i>heading</i> 135°	81
Gambar 4. 60 Grafik RAO <i>heading</i> 180°	81
Gambar 4. 61 Grafik variasi spektrum gelombang ISSC	82
Gambar 4. 62 Crane yang digunakan oleh <i>floating crane catamaran</i>	83
Gambar 4. 63 Grafik hubungan antara <i>significant heave double amplitude</i> dengan batas operasi crane saat <i>heading</i> 0° kode PSC4MA	86
Gambar 4. 64 Grafik hubungan antara <i>significant heave double amplitude</i> dengan batas operasi crane saat <i>heading</i> 45° kode SBC2MA	87
Gambar 4. 65 Grafik hubungan antara <i>significant heave double amplitude</i> dengan batas operasi crane saat <i>heading</i> 90° kode PSC2MA	88
Gambar 4. 66 Grafik hubungan antara <i>significant heave double amplitude</i> dengan batas operasi crane saat <i>heading</i> 135° kode PSC2MA	89
Gambar 4. 67 Grafik hubungan antara <i>significant heave double amplitude</i> dengan batas operasi crane saat <i>heading</i> 180° kode PSC4MA	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Faktor skala dalam model Froude (Chakrabarti, 1994)	10
Tabel 2. 2 Faktor skala dalam model Froude (Chakrabarti, 1994) (lanjutan)	11
Tabel 4. 1 Parameter hidrostatis model MAXSURF	32
Tabel 4. 2 Parameter hidrostatis hasil <i>meshing</i> MOSES.....	33
Tabel 4. 3 Ukuran prototipe dan model yang diskala.	34
Tabel 4. 4 Hasil perhitungan kekakuan pegas eksperimen	38
Tabel 4. 5 Konfigurasi sistem tambat model numeris	39
Tabel 4. 6 Properti tali tambat model numeris	39
Tabel 4. 7 Validasi antara prototipe dengan model eksperimen.....	41
Tabel 4. 8 Validasi antara prototipe dengan model MAXSURF.....	41
Tabel 4. 9 Validasi antara prototipe dengan hasil <i>meshing</i> MOSES	41
Tabel 4. 10 Data spektrum gelombang	43
Tabel 4. 11 Kalibrasi spektrum gelombang 201	46
Tabel 4. 12 Kalibrasi spektrum gelombang 202.....	46
Tabel 4. 13 Validasi spektrum gelombang kode 201.....	69
Tabel 4. 14 Validasi spektrum gelombang kode 202.....	70
Tabel 4. 15 Variasi H_s dan T_p pada spektrum gelombang ISSC.....	82
Tabel 4. 16 Penjelasan kode-kode posisi <i>crane</i>	84
Tabel 4. 17 Koordinat <i>starboard crane</i>	84
Tabel 4. 18 Koordinat <i>port side crane</i>	84
Tabel 4. 19 Penjelasan dari grafik kode PSC4MA saat <i>heading</i> 0°.....	86
Tabel 4. 20 Penjelasan dari grafik kode SBC2MA saat <i>heading</i> 45°	87
Tabel 4. 21 Penjelasan dari grafik kode PSC2MA saat <i>heading</i> 90°	88
Tabel 4. 22 Penjelasan dari grafik kode PSC2MA saat <i>heading</i> 135°.....	89
Tabel 4. 23 Penjelasan dari grafik kode PSC4MA saat <i>heading</i> 180°	90

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Perkembangan dunia minyak dan gas bumi sekarang ini membuat perkembangan eksplorasi dan eksploitasi mengarah ke perairan dalam. Tidak hanya minyak dan gas bumi, energi terbarukan seperti turbin angin lepas pantai sudah mulai terealisasi. Struktur anjungan yang berbeda pun dibutuhkan karena kondisi lingkungan yang juga berbeda. Dengan kondisi lingkungan perairan yang berbeda, konfigurasi dari struktur anjungan serta fungsional dari struktur tersebut juga disesuaikan.



Gambar 1.1 *Floating crane catamaran* (Marine Traffic.com)

Konstruksi lepas pantai, seperti membangun anjungan lepas pantai, membutuhkan *crane* besar untuk memindahkan elemen konstruksi yang biasa disebut *module* dari tongkang (*barge*) atau kapal pemasok (*supply vessel*) ke atas anjungan (Journee & Massie, 2001).

Pada tahun 1960-an, *heavy lift vessel* untuk industri lepas pantai adalah kapal *tanker* yang dikonversi dilengkapi dengan *revolving crane* pada haluannya atau tongkang konvensional dengan *crane* tipe *fixed gantry*. Kapasitas angkat mereka mencapai beberapa ratus ton. Pada tahun 1970-an, jenis baru dari *heavy lift vessel* diperkenalkan, yaitu *Semi Submersible Crane Vessels (SSCV)* dengan *displacement* yang besar. SSCV dilengkapi dengan dua *revolving crane* yang dapat bekerja secara sendiri-sendiri atau bersama-sama tergantung pada pekerjaan yang diperlukan (Journee & Massie, 2001).

Pada saat ini, *crane vessel* sudah dapat melakukan pekerjaan pengangkatan lebih dari 10 ribu ton dengan menggunakan dua *crane* secara bersamaan. Karena perilaku gerak yang baik dari *semisubmersible* dalam gelombang, kemampuan kerja yang berhubungan dengan operasi *crane* meningkat (Journee & Massie, 2001).

Subjek yang sangat penting dari operasi *crane* di lepas pantai adalah beban benturan (*impact*) yang dapat terjadi saat muatan diangkat atau diturunkan dari tongkang transportasi, karena adanya perbedaan kecepatan vertikal kedua bangunan apung. Ketika muatan diangkat dari tongkang, ia akan melakukan gerakan vertikal yang ditentukan oleh karakteristik gerak *crane vessel*. Tongkang, di sisi lain, juga melakukan gerakan frekuensi gelombang yang secara umum tidak akan sefase dengan gerakan *crane* pada *crane vessel*. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada muatan, atau tongkang, atau *crane vessel*, atau bahkan ketiganya (Journee & Massie, 2001).

Selain terjadinya beban impak yang dipengaruhi oleh respons gerak vertikal terhadap gelombang, gerakan horisontal *crane vessel* juga penting sehubungan dengan kelayakan penentuan posisi yang akurat terhadap anjungan yang sedang dibangun. Gerakan ini dipengaruhi oleh beban lingkungan akibat angin, gelombang, dan arus yang bekerja pada *crane vessel* (Journee & Massie, 2001).

Merunut Journee dan Massie (2001), ada beberapa aspek penting yang harus ditinjau pada *crane vessel*, yaitu:

- Gerakan *crane* secara vertikal dalam gelombang.
- Akurasi posisi horisontal *crane*.

- Impak pada pengangkatan dan penurunan muatan.
- Kapasitas dek.
- Kecepatan transit.
- Kekuatan tambat.

Menurut Jiang et al (2018), waktu dan biaya terkait erat dengan metode instalasi yang dipilih. Untuk mengurangi biaya dan menghindari penundaan yang tidak terduga, salah satu tantangan utamanya adalah meningkatkan kemampuan dari bangunan apung terhadap kondisi cuaca (*increase the weather window*). Pada Gambar 1.1 diberikan contoh *crane vessel* berlambung *catamaran*.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah yang dibahas dalam tugas akhir tentang Studi Eksperimen dan Analisis Numeris Operabilitas *Crane* pada *Floating Crane Catamaran* adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana respon gerakan *floating crane catamaran* hasil eksperimen maupun numeris?
2. Berapa batasan tinggi gelombang untuk operasi *crane* pada *floating crane catamaran* dengan mengacu pada kriteria yang berlaku?

1.3. Tujuan Penelitian

Dari perumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain:

1. Mengetahui respon gerakan *floating crane catamaran* hasil eksperimen maupun numeris.
2. Mendapatkan batasan tinggi gelombang untuk operasi *crane* pada *floating crane catamaran* sesuai dengan kriteria yang berlaku.

1.4. Manfaat

Memberikan evaluasi respon gerakan *floating crane catamaran* dan evaluasi operabilitas *crane* pada *floating crane catamaran*.

1.5. Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan perhitungan dalam tugas akhir ini, maka masalah akan dibatasi dengan beberapa hal sebagai berikut:

1. Tidak dilakukan analisis terhadap stabilitas dan *ballasting* dari bangunan apung.
2. Bangunan apung dianalisis hanya dalam satu kondisi sarat (*draft*) yaitu pada sarat 4.7 m.
3. Eksperimen hanya dilakukan dengan satu konfigurasi sistem tambat dan dalam kondisi tali tertambat seluruhnya (*intact*).
4. Eksperimen hanya memakai beban gelombang sebagai beban lingkungan.
5. Eksperimen hanya dilakukan dengan satu spektrum gelombang yaitu spektrum Pierson-Moskowitz.
6. Tidak dilakukan analisis terhadap kekuatan tali tambat.
7. Arah datang gelombang yang dipakai dalam analisis numeris adalah arah 0° , 45° , 90° , 135° , dan 180° .
8. Pemodelan numeris dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Octave, MAXSURF dan MOSES.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan penelitian, manfaat yang diperoleh, ruang lingkup penelitian guna membatasi analisis yang akan dilakukan dalam penelitian, dan sistematika penulisan penelitian.

2. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini berisi penelitian-penelitian terdahulu dan penjelasan dasar-dasar teori, persamaan-persamaan, serta kode yang digunakan dan menjadi acuan dalam penelitian.

3. Metodologi Penelitian

Bab ini berisi diagram alir metodologi penelitian atau langkah-langkah yang harus dilakukan dalam penelitian beserta penjelasan-penjelasan tiap langkahnya.

4. Analisis dan Pembahasan

Bab ini menjelaskan tentang proses eksperimen mulai dari kalibrasi instrumen eksperimen hingga hasil dari eksperimen yang dilakukan. Bab ini juga berisi analisis numeris mulai dari pemodelan model menggunakan perangkat lunak pendukung hingga validasi hasil numeris dengan hasil eksperimen. Diakhiri dengan evaluasi operabilitas dari hasil eksperimen dan analisis numeris.

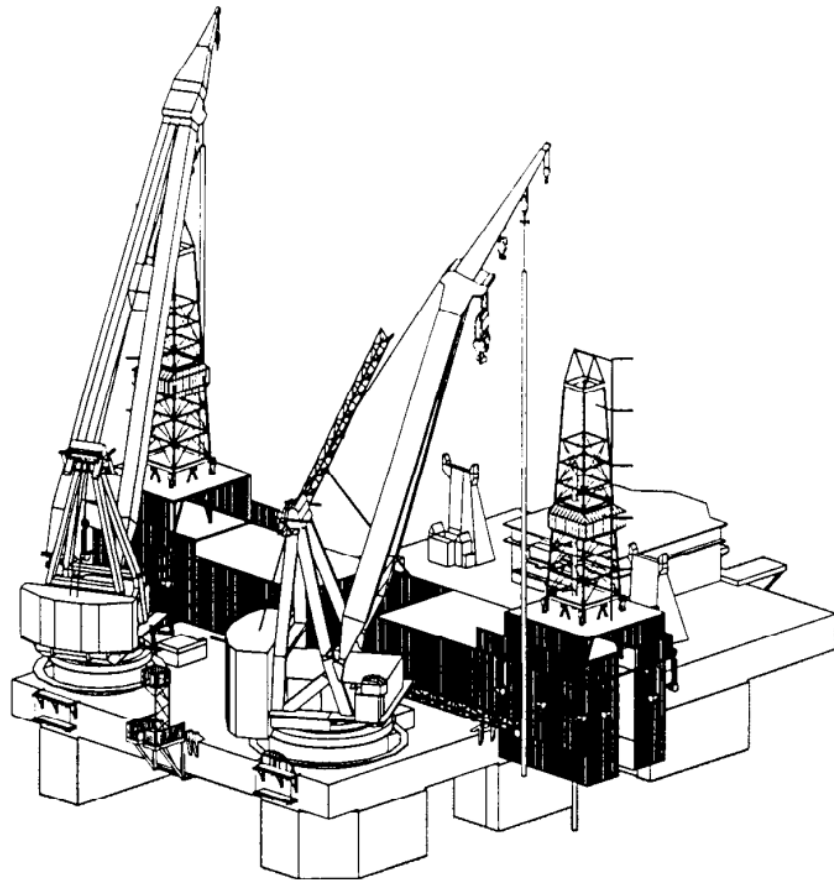
5. Kesimpulan dan Saran

Bab ini menjelaskan tentang kesimpulan yang didapatkan dari hasil eksperimen dan analisis numeris sesuai perumusan dan batasan masalah. Dalam bab ini juga disampaikan saran-saran sebagai pertimbangan untuk keperluan penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka



Gambar 2.1 *Semi-submersible crane vessel.* (Journee & Massie, 2001)

Clauss dan Riekert (1990) pernah meneliti berbagai macam *offshore crane vessel*. Mereka memberikikan batasan operasi beberapa *crane vessel*, diantaranya adalah *crane barge*, *crane ship*, dan *semisubmersible crane vessels* (SSCV). Ilustrasi SSCV dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Pengujian model *crane barge* pernah dilakukan oleh Ha et al (2018). Ha et al (2018) melakukan pengujian gerakan sebuah *crane barge* saat pemasangan *module* pada FLNG. Mereka melakukan pengujian pada kondisi gelombang reguler dan ireguler untuk mengetahui *motion RAO* dan *motion response* dari kedua bangunan apung

tersebut. Analisis numeris *time domain* dilakukan untuk memvalidasi hasil eksperimen.

Rosenkranz dan Maurino (2012) mengembangkan konsep yang inovatif, yaitu kapal kargo berlambung *catamaran (catamaran cargo-vessel)* dengan *on-board crane* yang mampu melayani pelabuhan-pelabuhan kecil di pesisir. Tujuan dari inovasi ini adalah untuk mempercepat pergerakan peti kemas dan muatan umum dan menjadikan transportasi laut lebih kompetitif (Rosenkranz dan Maurino, 2012).

Jiang et al (2018) pernah menyelidiki kinerja dari konsep operasi instalasi turbin angin (SPAR *floater*) menggunakan kapal berlambung *catamaran*. Fokus penelitian adalah menganalisis respon sistem *multibody* (turbin angin – *catamaran*) di bawah beban angin dan gelombang. Simulasi *time domain* dilakukan untuk sistem kopel SPAR – *catamaran*, SPAR menggunakan sistem tambat pasif, dan *catamaran* menggunakan sistem *dynamic positioning*. Di bawah beban lingkungan yang diselidiki, metode instalasi yang dilakukan menunjukkan kinerja yang layak (Jiang et al, 2018).

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Teori Permodelan

Dalam melakukan pemodelan perlu diperhatikan agar model dapat merepresentasikan perilaku geometri struktur, aliran fluida, dan interaksi antara keduanya. Oleh karena itu, perlu dicari kesamaan dalam geometri, kinematika fluida, dan dinamika dari struktur yang dikenai oleh fluida di sekitarnya (Munson, 2009).

1. Kesamaan Geometri

Model yang dibuat harus memiliki kesamaan bentuk, tetapi bisa berbeda dimensi. Model yang dibuat disesuaikan dengan suatu faktor skala, sehingga sebanding dengan prototipe yang dijadikan acuan. Rasio skala tersebut dapat diasumsikan dengan rasio skala konstan di antara dimensi model dan prototipe. Jika seluruh bentuk dan dimensi model sebanding dengan prototipe, maka dapat dikatakan keduanya sama secara geometri. Rasio ini selanjutnya akan digunakan sebagai faktor skala untuk model yang didefinisikan sebagai λ .

$$\frac{l_p}{l_m} = a \quad (2.1)$$

dengan,

l_p = dimensi prototipe (diameter, panjang, dll)

l_m = dimensi model (diameter, panjang, dll)

a = rasio skala

2. Kesamaan Kinematik

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

3. Kesamaan Hidrodinamik

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

4. Hukum Model Froude

Bilangan Froude didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya gravitasi yang dihasilkan oleh benda pada suatu medium. Bilangan Froude didefinisikan dengan persamaan,

$$Fr = \frac{u^2}{(gD)} \quad (2.2)$$

$$\frac{u_p^2}{(gD_p)} = \frac{u_m^2}{(gD_m)} \quad (2.3)$$

Dengan mengasumsikan faktor skala kesamaan geometri adalah λ , hubungan antara model dan prototipe untuk bermacam parameter dapat diperoleh. Tabel 2.1 merupakan faktor skala dari variabel-variabel yang umum digunakan dan memenuhi persyaratan model Froude.

Tabel 2. 1 Faktor skala dalam model Froude (Chakrabarti, 1994)

Variabel	Dimensi	Faktor Skala	Keterangan
Geometri			
Panjang	L	λ	Setiap dimensi karakteristik objek
Luas	L^2	λ^2	Luas permukaan atau luas yang diproyeksikan pada bidang
Volume	L^3	λ^3	Untuk setiap bagian dari objek
Sudut	\sim	1	Misalnya antara garis
Jari-Jari Girasi	L	λ	Diukur dari titik yang tetap
Momen Area Inersia	L^4	λ^4	
Momen Massa Inersia	ML^2	λ^5	Diambil terhadap titik yang tetap
<i>Center of Gravity</i>	L	λ	Diukur dari titik referensi
Kinematik dan Dinamik			
Waktu	T	$\lambda^{1/2}$	Titik referensi yang sama (misalnya, waktu mulai) dianggap sebagai waktu nol
Perpindahan	L	λ	Posisi awal dianggap nol

Tabel 2. 2 Faktor skala dalam model Froude (Chakrabarti, 1994) (lanjutan)

Kecepatan	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$	Tingkat perubahan perpindahan
Percepatan	LT^{-2}	1	Tingkat perubahan kecepatan
Konstanta Pegas (Linier)	MT^{-2}	λ^2	Gaya per satuan panjang ekstensi
Koefisien Redaman	MT^{-1}	$\lambda^{5/2}$	Resistensi terhadap osilasi
Faktor Redaman	~	1	Rasio redaman dan koefisien redaman kritis
Periode Natural	T	$\lambda^{1/2}$	Periode dimana gaya inersia sama dengan gaya pengembali

2.2.2. Gerak Bangunan Apung

Floating crane catamaran adalah salah satu jenis bangunan apung. Bangunan apung pada umumnya bergerak dalam enam derajat kebebasan (Journee & Massie, 2001). Gerak bangunan apung dapat dibagi menjadi dua yaitu gerakan translasional dan gerakan rotasional. Ilustrasi enam derajat kebebasan tertera pada Gambar 2.2.

1. Gerakan translasional

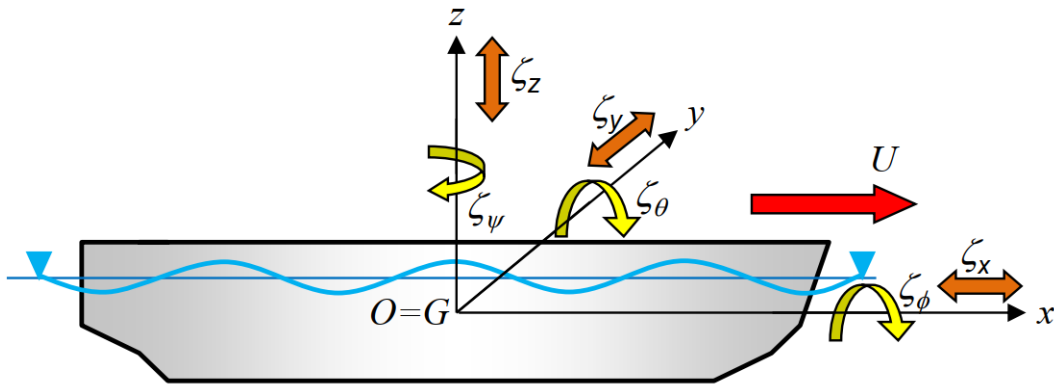
Gerakan translasional adalah gerakan yang searah dengan arah sumbu. Gerakan translasional terdiri dari:

- *Surge* : gerakan translasi pada arah sumbu x
- *Sway* : gerakan translasi pada arah sumbu y
- *Heave* : gerakan translasi pada arah sumbu z

2. Gerakan rotasional

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

- *Roll* : gerakan rotasional terhadap sumbu x
- *Pitch* : gerakan rotasional terhadap sumbu y
- *Yaw* : gerakan rotasional terhadap sumbu z



Gambar 2. 2 Enam mode gerakan bangunan apung (Djatkiko, 2012)

2.2.3. Gaya Hidrodinamika

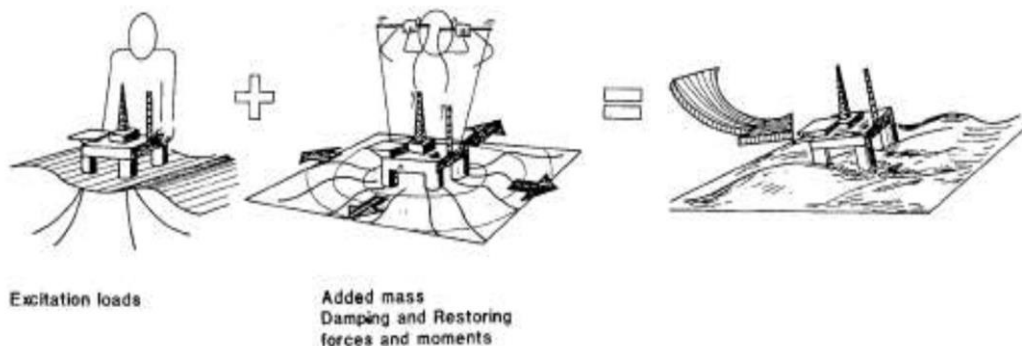
Semua struktur yang berada di air akan menerima gaya hidrodinamika. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 2.3. Gaya hidrodinamika yang diterima oleh struktur dapat dibagi menjadi dua (Faltinsen, 1990), yaitu:

1. Gaya eksitasi

Gaya dan momen yang diterima struktur terapung saat benda ditahan untuk beresilasi sewaktu gelombang mengenai struktur. Gaya eksitasi terdiri dari gaya tekanan (Froude-Kyrlov) dan gaya difraksi.

2. Gaya reaksi

Gaya dan momen yang diterima struktur terapung saat struktur digetarkan sesuai dengan frekuensi gelombang yang direncanakan. Gaya reaksi terdiri dari gaya massa tambah, gaya redaman, dan gaya kekakuan.



Gambar 2. 3 Beban hidrodinamika struktur terapung (Faltinsen, 1990)

Gaya eksitasi dan gaya reaksi dapat dihubungkan secara linier sehingga gaya hidrodinamika pada struktur terapung merupakan penjumlahan dari gaya eksitasi dan gaya reaksi.

2.2.4. Gaya Eksitasi

Gaya eksitasi yang diterima oleh bangunan apung terjadi akibat adanya distribusi tekanan yang tidak merata dari gelombang. Dampak dari tekanan yang tidak merata ini disebut gaya Froude-Kyrlof (Faltinsen, 1990). Selain ini, pada bangunan apung dengan ukuran besar keberadaannya juga akan mempengaruhi perubahan distribusi tekanan yang disebut gaya difraksi (Journee & Massie, 2001). Persamaan gaya Froude-Kyrlof adalah sebagai berikut:

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

Distribusi tekanan gelombang di laut dalam untuk bangunan apung didapat dengan menggabungkan persamaan potensial gelombang dengan persamaan Bernoulli. Sedangkan gaya difraksi pada bangunan apung perlu dilakukan peninjauan syarat batas dari setiap kasus dan memerlukan pendekatan matematis yang kompleks (Faltinsen, 1990).

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

dengan,

ρ = massa jenis air sekitar bangunan apung (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

ζ_0 = amplitudo gelombang (m)

k = angka gelombang

z = posisi pada sumbu vertical (0 pada permukaan air) (m)

ω = percepatan sudut gelombang (rad/s)

t = waktu (s)

x = posisi pada sumbu horizontal (“+” arah gelombang) (m)

2.2.5. Gaya Reaksi

Gaya reaksi terdiri dari gaya massa tambah, gaya redaman, dan gaya kekakuan.

1. Massa tambah (m_a)

Efek penambahan massa diakibatkan ikut Bergeraknya fluida di sekitar benda (Newman, 1977). Ikut Bergeraknya fluida tersebut memperbesar energi kinetik, sehingga diperlukan gaya eksternal. Gaya tersebut jika dibagi dengan percepatan benda, akan menghasilkan komponen massa. Massa ini lah yang dianggap sebagai massa tambah (Sarpkaya, 2010). Massa tambah bergantung terhadap bentuk dan mode gerak benda.

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

dengan,

a = koefisien massa tambah (ton)

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

i = mode gerak bangunan apung

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

2. Redaman (c)

Redaman merupakan dampak yang diakibatkan adanya disipasi energi dari bangunan apung (Newman, 1977). Redaman akan membuat bangunan apung kehilangan energi kinetiknya. Jika bangunan apung digetarkan di air yang tenang, energi kinetik bangunan apung semakin lama akan semakin mengecil, hal ini yang disebut sebagai redaman. Sama seperti massa tambah, nilai redaman bergantung pada bentuk benda dan mode gerak benda. Nilai koefisien redaman dapat dicari dengan analisis numeris (Chakrabarti, 1994).

$$F_c = c_i \dot{\xi}_i \quad (2.7)$$

dengan,

c = koefisien redaman (ton/s)

ξ = respon kecepatan gerak bangunan apung (m/s)

i = mode gerak bangunan apung

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

3. Kekakuan (k)

Ketika bangunan apung bergerak di permukaan air tenang, bangunan tersebut mempunyai kekakuan untuk kembali ke posisi semula. Kekakuan tersebut didapat dari gaya reaksi yang berfungsi untuk mengembalikan posisi benda yang disebut gaya pengembali. Fenomena ini hanya terjadi pada tiga mode gerak bangunan apung. Mode gerak tersebut adalah gerak *heave*, *roll*, dan *pitch* (Djarmiko, 2012). Gaya ini dipengaruhi oleh karakter hidrostatis struktur.

$$F_k = k_i \xi_i \quad (2.8)$$

dengan,

k = koefisien kekakuan (ton/s²)

ξ = respon posisi gerak bangunan apung (m)

i = mode gerak bangunan apung

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

Nilai k dari *heave* (k_3), *roll* (k_4), dan *pitch* (k_5) adalah sebagai berikut:

$$k_3 = \rho g A_{wp} \quad (2.9)$$

$$k_4 = \rho g V \overline{GM}_T \quad (2.10)$$

$$k_5 = \rho g V \overline{GM}_L \quad (2.11)$$

dengan,

ρ = massa jenis air sekitar bangunan apung (ton/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

A_{wp} = luas permukaan pada garis air bangunan apung (m²)

V = volume *displacement* bangunan apung (m³)

\overline{GM}_T = jarak titik gravitasi *metacenter* melintang (m)

\overline{GM}_L = jarak titik gravitasi *metacenter* memanjang (m)

2.2.6. Persamaan Gerak

Analisis gerak bangunan apung dapat menggunakan Hukum Newton II yaitu:

$$\sum F = m_i \ddot{\xi}_i \quad (2.12)$$

dengan,

ΣF = resultan gaya (kN)

m = massa bangunan apung (ton)

ξ'' = percepatan bangunan apung (m/s²)

i = mode gerak bangunan apung

1 (*surge*), 2 (*sway*), 3 (*heave*), 4 (*roll*), 5 (*pitch*), dan 6 (*yaw*)

Resultan gaya untuk bangunan apung merupakan pengurangan gaya aksi oleh gaya reaksi. Gaya aksi dalam penelitian ini disebut juga sebagai gaya eksitasi.

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (2.13)$$

Dengan memasukan pengertian gaya eksitasi dan reaksi pada bangunan apung yang terkena gelombang, persamaan 2.13 dapat dikembangkan menjadi:

$$\sum F = F_{eksitasi} - (F_a + F_c + F_k) \quad (2.14)$$

dengan,

ΣF = resultan gaya (kN)

F_a = gaya massa tambah (kN)

F_c = gaya redaman (kN)

F_k = gaya kekakuan (gaya pengembali) (kN)

Dengan memasukan persamaan 2.6, 2.7, 2.8, dan 2.12 ke dalam persamaan 2.14 maka didapat:

$$m_i \ddot{\xi}_i = F_{eksitasi} - (a_i \ddot{\xi}_i + c_i \dot{\xi}_i + k_i \xi_i) \quad (2.15)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{\xi}_i + c_i \dot{\xi}_i + k_i \xi_i = F_{eksitasi} \quad (2.16)$$

dengan,

$F_{eksitasi}$ = gaya eksitasi gelombang (kN)

m = massa bangunan apung (ton)

a = koefisien massa tambah (ton)

c = koefisien redaman (ton/s)

k = koefisien kekakuan (ton/s²)

$\ddot{\xi}_i$ = respon percepatan gerak bangunan apung (m/s²)

$\dot{\xi}_i$ = respon kecepatan gerak bangunan apung (m/s)

ξ_i = respon posisi gerak bangunan apung (m)

Persamaan 2.16 merupakan persamaan yang tidak memperhatikan gerak kopel bangunan apung. Dalam pengertian itu, setiap mode gerak tidak mempengaruhi gerak benda yang lain. Di sisi lain, gerak kopel adalah persamaan gerak yang setiap mode geraknya bisa saling mempengaruhi mode gerak yang lainnya. Pada kasus bangunan apung tertambat menggunakan persamaan gerak (Chen et al, 2001)

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \left[-\omega^2 (\delta_{nm} m_{jk}^{nm} + m_{a_{jk}}^{nm}) - i\omega c_{jk}^{nm} + \delta_{nm} k_{jk} + k_{jk}^{*nm} \right] = F_j^n \quad (2.17)$$

dengan,

$n = 1, 2, 3, \dots, M$ menunjukkan jumlah n^{th} bangunan

\square_{nm} = simbol Kronecker delta, nilai 0 jika $n \neq m$

$m_{a_{jk}}^{nm}$ = matriks massa tambah untuk bangunan m^{th} akibat bangunan itu sendiri ($n = m$), dan matriks massa tambah untuk bangunan m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$)

c_{jk}^{nm} = matriks redaman hidrodinamika untuk bangunan m^{th} akibat bangunan itu sendiri ($n = m$), dan matriks redaman hidrodinamika m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$)

k_{jk}^{*nm} = matriks kekakuan untuk bangunan m^{th} akibat bangunan itu sendiri ($n = m$), dan matriks kekakuan m^{th} akibat bangunan n^{th} saat ($n \neq m$)

F_j^n = matriks gaya eksitasi pada bangunan n^{th}

2.2.7. Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan hubungan antara amplitudo respon dengan amplitudo gelombang ($\square_{respon} / \square_{gelombang}$). Amplitudo respon bisa berupa gerakan, tegangan, maupun getaran. RAO untuk gerakan translasional (*surge*, *sway*, dan *heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan bangunan apung dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan elevasi panjang). RAO dapat dicari dengan persamaan 2.18 (Journee & Massie, 2001).

$$RAO(\omega) = \left(\frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} \right) \quad (2.18)$$

dengan,

\square_{k0} = amplitudo bangunan apung (m)

\square_0 = amplitudo gelombang (m)

Sedangkan untuk RAO gerakan rotasional (*roll*, *pitch*, dan *yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni merupakan perkalian antara angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden (Journee & Massie, 2001).

$$RAO(\omega) = \left(\frac{\zeta_{k0}}{k_w \zeta_0} \right) = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g) \zeta_0} \quad (2.19)$$

dengan,

\square_{ko} = amplitudo bangunan apung (m)

\square_o = amplitudo gelombang (m)

k_w = angka gelombang (rad/m)

\square = frekuensi gelombang (rad/m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

2.2.8. Sistem Tambat

Sistem tambat pada bangunan apung lepas pantai seperti SPAR, TLP, FPSO, dan sebagainya, berfungsi untuk menjaga posisi bangunan apung tetap berada pada posisi yang direncanakan ketika beroperasi (Stendal, 2015). Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat biasanya menggunakan jenis sistem tambat menyebar (*spread mooring*) yang terdiri dari beberapa tali tambat berupa *chain*, *wire*, atau *synthetic rope* (Stendal, 2015). Bagian atas tali dipasang pada badan bangunan apung di titik-titik yang berbeda, sedangkan bagian bawah tali tambat ditambatkan ke dasar laut. Gaya tarik yang terjadi pada tali tambat tergantung dari berat dan elastisitasnya.

1.2.9. Spektrum Gelombang

Pemilihan spektrum gelombang berdasarkan pada kondisi *real* dari perairan yang ditinjau. Bila tidak ada, dapat menggunakan model spektrum gelombang yang telah dikeluarkan oleh peneliti-peneliti terdahulu dengan mempertimbangkan kesamaan fisik dari lingkungan yang ditinjau (Pratiwi, 2017).

Spektrum gelombang yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah spektrum Pierson-Moskowitz (P-M). Pada tahun 1964, Pierson dan Moskowitz mengusulkan formulasi baru untuk distribusi spektrum energi yang didasari pada teori similaritas dari Kataigorodskii. Model spektrum P-M menggambarkan laut yang mengembang sepenuhnya (*fully-developed sea*) yang ditentukan oleh satu parameter yaitu kecepatan angin (Chakrabarti, 1987). Menurut Djatmiko (2012) spektrum P-M yang sesuai untuk kondisi gelombang *fully develop* adalah:

$$S_{\zeta}(\omega) = 0.0081 \frac{g^2}{\omega^2} \exp \left\{ -0.74 \left(\frac{g}{U_w \omega} \right)^4 \right\} \quad (2.20)$$

1.2.10. *Frequency Domain dan Time Domain*

Proses stokastik dapat dianalisis dalam *frequency domain* atau *time domain*. Kedua metode ini masing-masing memiliki kelebihan maupun kekurangan (Stendal, 2015). Metodanya berbeda pada bagaimana persamaan gerak diselesaikan.

1. *Time Domain*

Dalam *time domain*, proses stokastik dijelaskan melalui realisasi respon. Realisasi untuk periode waktu yang berbeda memberikan rangkaian waktu proses yang berbeda. Parameter respons yang diperoleh dari deret waktu diproses secara statistik untuk menghasilkan nilai ekstrem. Simulasi *time domain* harus cukup lama untuk menghasilkan statistik yang stabil (Stendal, 2015).

2. *Frequency Domain*

Dalam *frequency domain*, proses stokastik dijelaskan melalui spektrum energi. Spektrum energi adalah cara untuk mewakili energi dari proses stokastik sebagai fungsi frekuensi. Momen spektra dapat dihitung secara akurat, semua parameter statistik dapat dihitung tanpa ketidakpastian statistik (Stendal, 2015). Perhitungan didasarkan pada prinsip superposisi linier, yaitu respons total adalah jumlah respons untuk setiap komponen frekuensi.

1.2.11. *Kriteria Operabilitas Crane*

Pada penelitian tugas akhir ini, kriteria yang digunakan sebagai analisis dari operabilitas *crane* pada *floating crane catamaran* adalah Operational Limitations of Offshore Crane Vessels dari Offshore Technology Conference. Nilai *significant heave double amplitude* pada ujung *boom* harus kurang dari 1 m, nilai *significant roll double amplitude* harus kurang dari 6°, dan nilai *significant pitch double amplitude* harus kurang dari 2° (Zheng, 1988).

$$2S_3 \leq 1$$

$$2S_4 \leq 6$$

$$2S_5 \leq 2$$

Dimana:

S_3 = amplitudo gerakan *heave* (m)

S_4 = amplitudo gerakan *roll* (°)

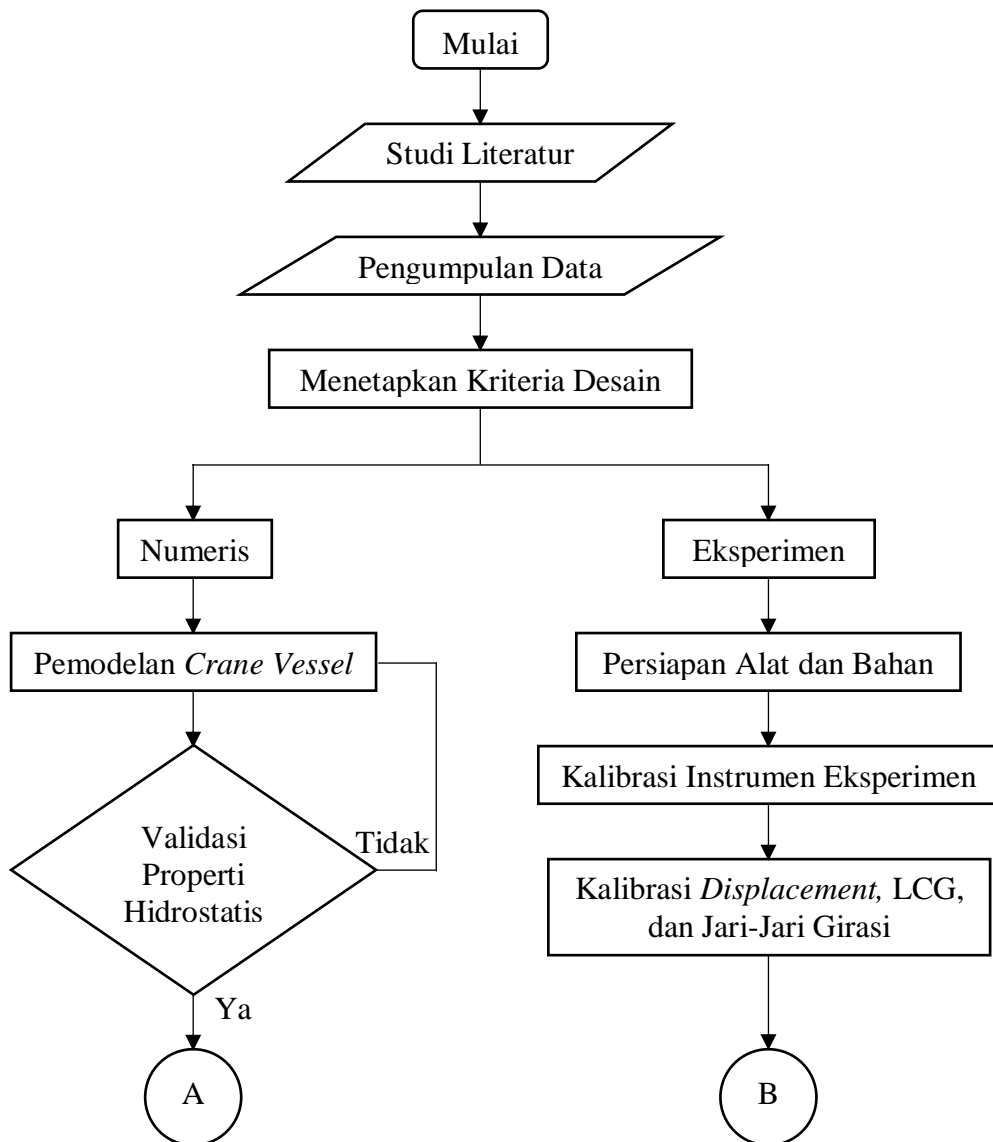
S_5 = amplitudo gerakan *pitch* (°)

BAB III

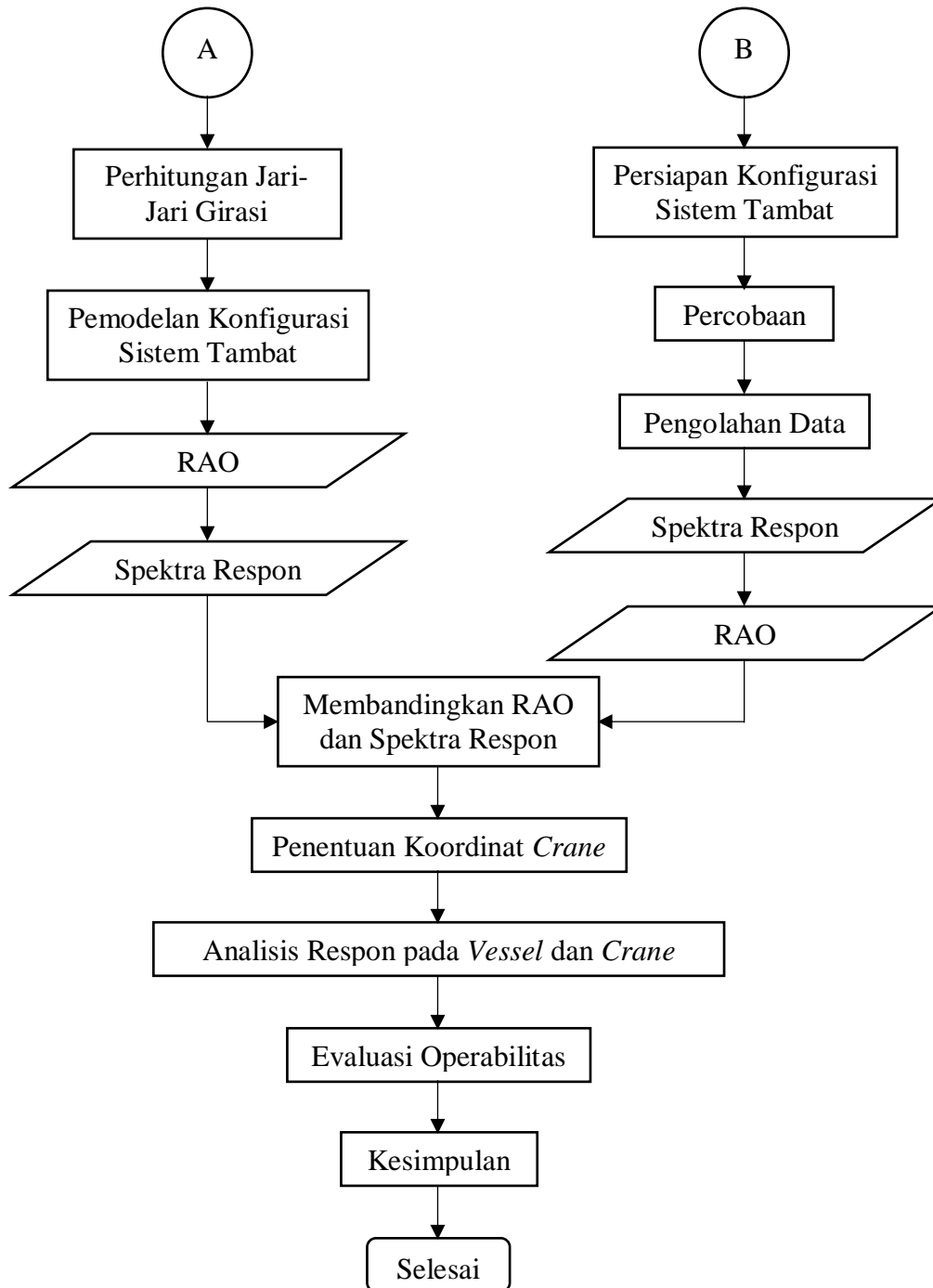
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini dapat direpresentasikan melalui diagram alir pada Gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian



Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian (lanjutan)

3.2 Penjelasan Diagram Alir

Diagram alir digunakan untuk menunjukkan tahapan-tahapan dalam proses analisis.

Berikut adalah penjelasan dari diagram alir:

1. Studi Literatur

Pada tahapan ini akan dilakukan studi literatur, yaitu pengumpulan publikasi ilmiah dari literatur terbuka yang relevan yang dapat dijadikan acuan dalam penelitian tugas akhir ini. Literatur yang dikumpulkan mengacu pada penelitian-penelitian, jurnal terdahulu maupun buku-buku yang membahas hal serupa.

2. Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data-data yang akan digunakan dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan pada tahap ini. Data-data yang digunakan antara lain:

- Data *Floating Crane Catamaran* (data bangunan apung yang digunakan dalam penelitian ini adalah model prototipe dan eksperimen milik Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT).
- Data alat dan bahan (data alat dan bahan akan menyesuaikan kebutuhan eksperimen).
- Data laboratorium (laboratorium yang digunakan dalam penelitian ini adalah laboratorium milik Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT).
- Data lingkungan (data lingkungan dalam penelitian tugas akhir ini hanya dibatasi pada data gelombang saja).

3. Menetapkan Kriteria Desain

Pada tahapan ini akan ditentukan batasan-batasan masalah yang akan dibahas dalam penelitian tugas akhir ini. Tahapan ini penting agar cakupan permasalahan menjadi jelas dan tidak melebar.

4. Persiapan Alat dan Bahan (Eksperimen)

Alat dan bahan yang digunakan untuk eksperimen akan menggunakan alat dan bahan yang telah tersedia jika tidak tersedia barulah membelinya di toko. Alat dan bahan yang digunakan memakai alat dan bahan yang sederhana namun masih dapat mewakili alat dan bahan yang sebenarnya.

5. Kalibrasi Instrumen Eksperimen (Eksperimen)

Instrumen-instrumen eksperimen yang akan digunakan harus dikalibrasi terlebih dahulu agar menyerupai bentuk yang sebenarnya setelah dilakukan penyekalaan.

6. Kalibrasi *Displacement*, LCG, dan Jari-Jari Girasi (Eksperimen)

Model bangunan apung, dalam penelitian ini adalah *floating crane catamaran*, *displacement*, LCG, dan jari-jari girasinya belum menyerupai bentuk asli yang direncanakan. Oleh sebab itu dilakukan kalibrasi *displacement*, LCG, dan jari-jari girasi dengan menambahkan massa dengan beban tambahan.

7. Persiapan Konfigurasi Sistem Tambat (Eksperimen)

Setelah instrument eksperimen dan model bangunan apung dikalibrasi, langkah selanjutnya adalah menyiapkan konfigurasi sistem tambat pada kolam laboratorium. Seluruh instrumen, model bangunan apung, dan konfigurasi sistem tambat yang direncanakan diaplikasikan.

8. Percobaan (Eksperimen)

Eksperimen dilakukan sesuai skema yang telah direncanakan. Hasil dalam eksperimen akan disimpan untuk diolah pada langkah selanjutnya.

9. Pengolahan Data (Eksperimen)

Eksperimen akan menghasilkan data *time domain* atau *time history*. Untuk mendapatkan data berupa *frequency domain*, data berupa *time domain* harus diolah terlebih dahulu menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT).

10. Pemodelan *Floating Crane Catamaran* (Numeris)

Pemodelan *floating crane catamaran* dalam penelitian ini akan menggunakan perangkat lunak MAXSURF. Dalam MAXSURF akan dimodelkan lambung beserta bangunan atas dari *floating crane catamaran*.

11. Perhitungan Jari-Jari Girasi (Numeris)

Menentukan jari-jari girasi dari suatu bangunan apung adalah salah satu langkah penting yang harus dilakukan sebelum menganalisis *motion* dari bangunan apung yang sedang dianalisis. Penentuan jari-jari girasi berdasarkan dari jurnal terkait.

12. Running Motion (Numeris)

Setelah mendapatkan bentuk lambung, COG, dan jari-jari girasi dari bangunan apung, *motion* dari bangunan apung dapat dianalisis. *Motion* dari *floating crane catamaran* dapat dianalisis menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES. Bentuk lambung dari MAXSURF dan hasil perhitungan COG serta jari-jari girasi dimasukkan ke dalam MOSES lalu MOSES akan mengeluarkan data berupa tabel dan grafik *motion* dari *floating crane catamaran*.

Data *motion* ini adalah *motion* saat bangunan apung *free floating* atau tidak sedang tertambat dan saat bangunan apung diam atau kecepatannya 0 m/s. Data *motion* ini disimpan dan kedepannya dapat digunakan sebagai variasi analisis yang lain.

13. Pemodelan Konfigurasi Sistem Tambat (Numeris)

Pemodelan konfigurasi sistem tambat dari *floating crane catamaran* dalam penelitian ini menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES.

14. Analisis Spektra Respon (Numeris)

Data spektra respon berupa *frequency domain* yang dikeluarkan oleh MOSES diplot dan dicari nilai stokastiknya.

15. Spektra Respon

Data spektra respon yang didapatkan dari eksperimen dan numeris akan digunakan sebagai validasi akhir dari model *floating crane catamaran*.

16. Validasi

Proses validasi pada penelitian tugas akhir ini dilakukan dalam tiga tahap. Pertama, validasi properti hidrostatis yaitu setelah pemodelan numeris *floating crane catamaran* telah dilakukan. Kedua, validasi spektra respon yaitu setelah data spektra respon dari model numeris dan eksperimen telah didapatkan. Validasi ini

dilakukan guna mendapatkan hasil model numeris dan eksperimen mendekati sama atau menghindari *error* yang terlalu besar.

17. Penentuan Koordinat Crane

Penentuan koordinat *crane* sesuai dengan *General Arrangement* yang telah direncanakan. Koordinat ini lah yang nantinya akan digunakan untuk mencari respon gerak dan operabilitas pada *crane*.

18. Analisis Respon Gerak dan Operabilitas Crane

Analisis respon dan operabilitas *crane* dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak MOSES dan dapat dianalisis juga menggunakan perhitungan *relative motion*.

19. Evaluasi Operabilitas

Hasil analisis respon gerakan dan operabilitas *crane* dikomparasikan dengan kriteria yang berlaku.

20. Kesimpulan

Penyusunan kesimpulan hasil penelitian yang akan menjawab rumusan masalah dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB IV

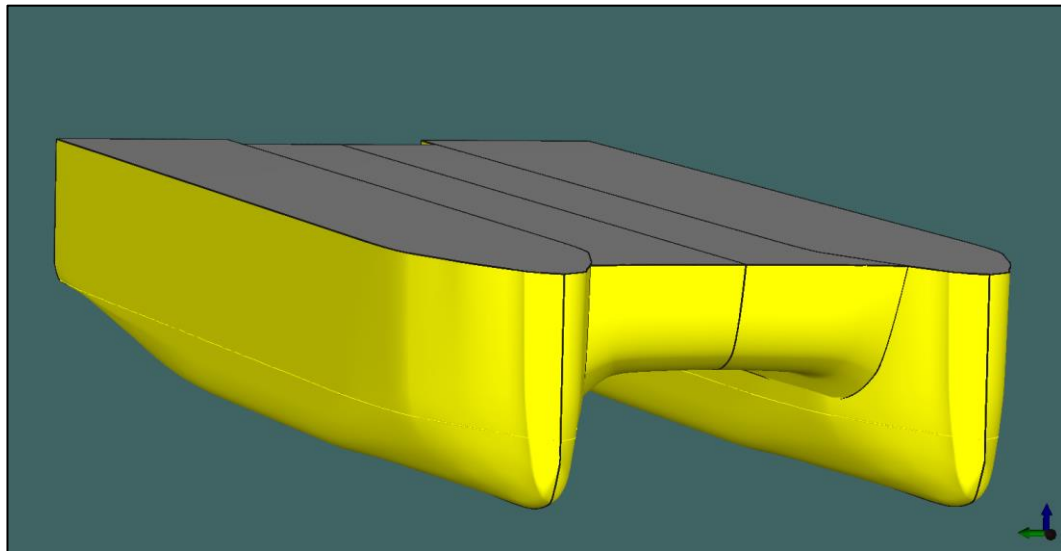
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemodelan Struktur

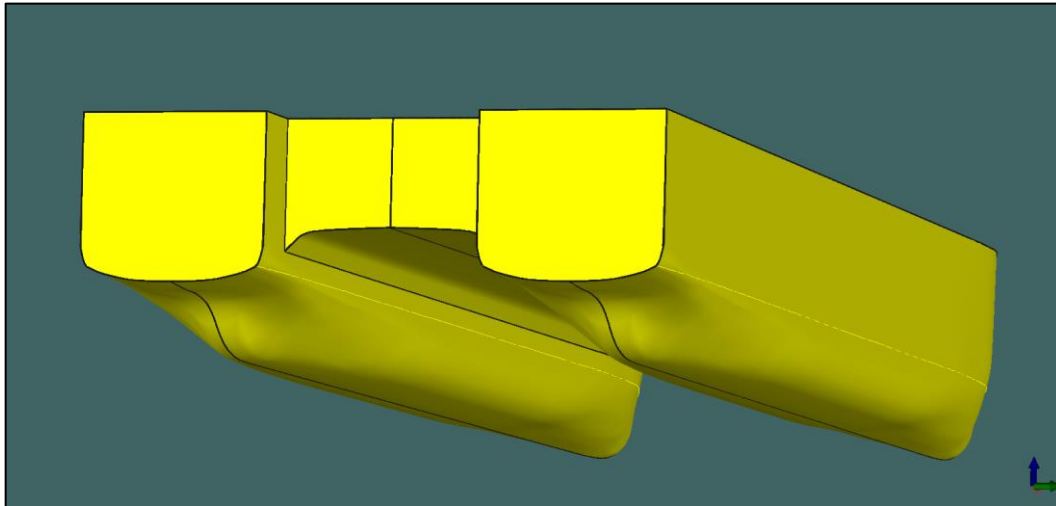
4.1.1. Pemodelan Numeris

Pemodelan numeris dilakukan menggunakan perangkat lunak MAXSURF dan MOSES. Pertama, lambung *catamaran* dimodelkan menggunakan MAXSURF. Selanjutnya model yang telah selesai, dimasukkan ke dalam MOSES untuk di-*meshing*. Model yang telah di-*meshing*, lalu dianalisis hidrodinamikanya dengan *3D diffraction theory*.

Pemodelan dalam MAXSURF dilakukan dengan menjadikan rencana garis *floating crane catamaran* sebagai latar belakang dari perspektif MAXSURF yaitu *plan*, *profile*, dan *body plan*. *Control point* pada MAXSURF digunakan sebagai alat pembentuk lambung *catamaran*. Model dari *floating crane catamaran* pada MAXSURF dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2.



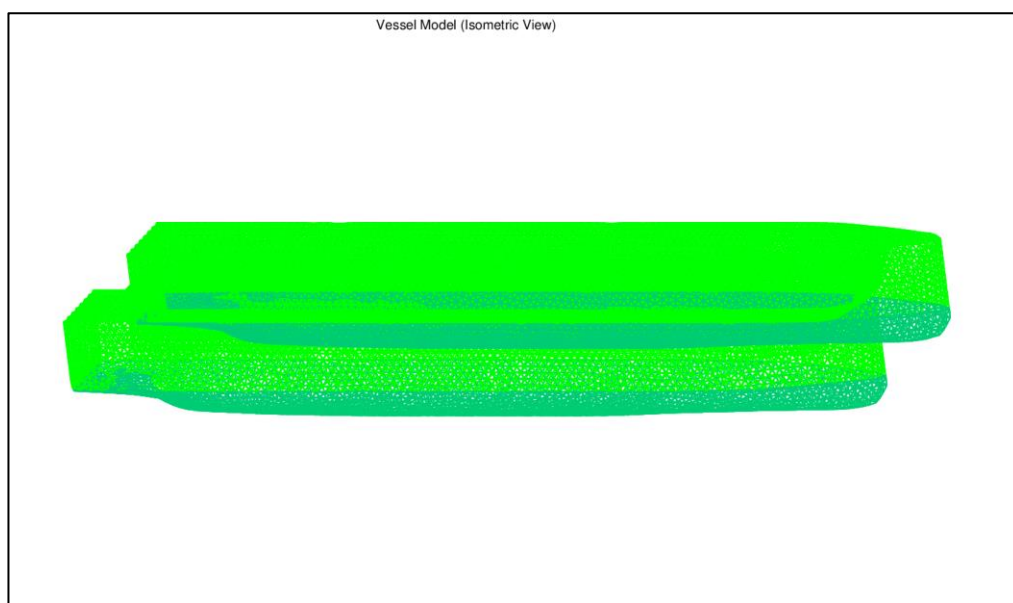
Gambar 4. 1 Tampak depan model MAXSURF



Gambar 4. 2 Tampak belakang model MAXSURF

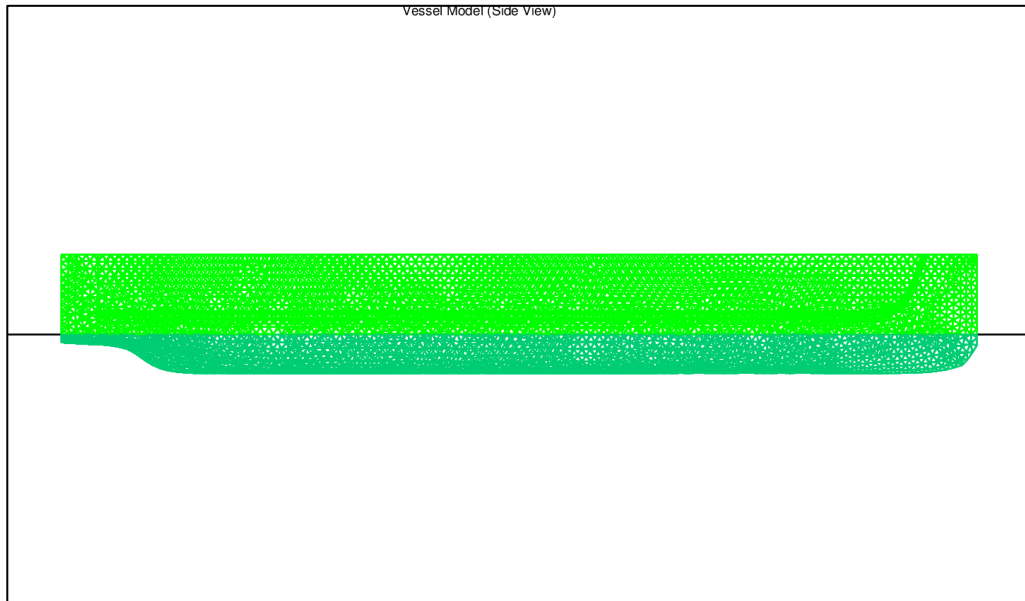
Model dari MAXSURF dapat dikalkulasikan parameter hidrostatisnya yang nantinya berguna sebagai pemvalidasi antara model numeris dengan prototipe.

Setelah model selesai dibuat di MAXSURF, model dimasukkan pada perangkat lunak MOSES untuk di-*meshing*. Pada tugas akhir ini model di-*meshing* dengan jarak 1.1 m karena bentuk lambung *catamaran* sedikit lebih rumit dibandingkan kapal berlambung tunggal pada umumnya. Hasil *meshing* dari model dapat dilihat pada Gambar 4.3 sampai 4.6.

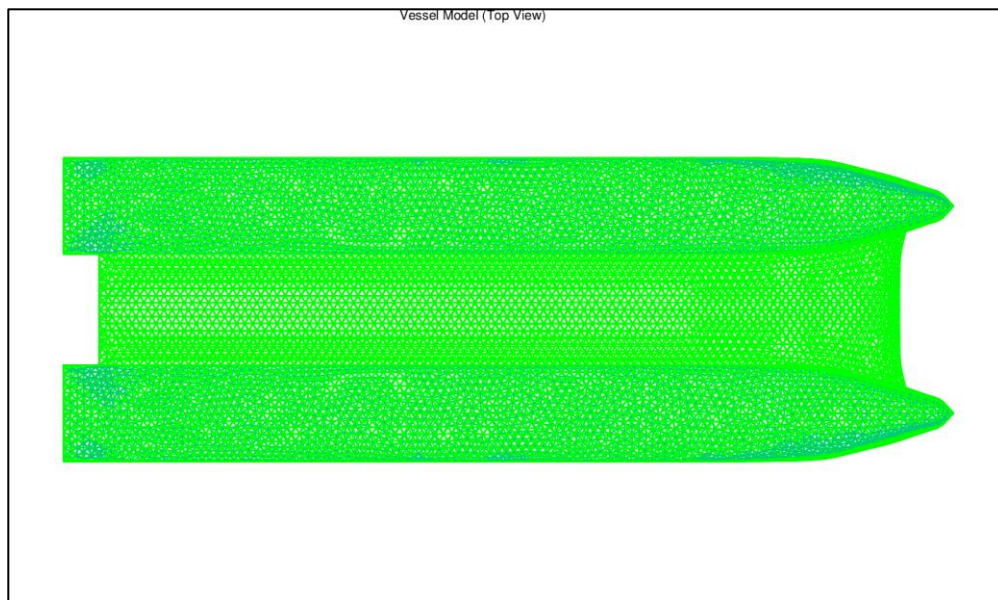


Gambar 4. 3 Tampak isometrik hasil *meshing* MOSES

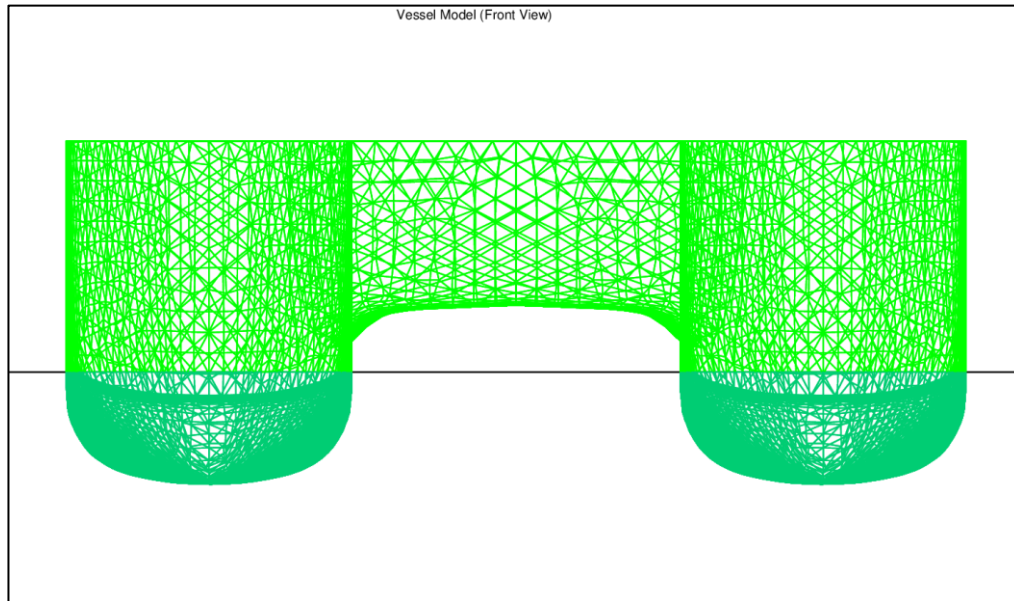
Hasil *meshing* dari MOSES dapat dianalisis parameter-parameter hidrodinamiknya menggunakan *3D diffraction theory*. Parameter-parameter hidrodinamik ini antara lain berupa *displacement RAO*, *load RAO*, QTF, matriks massa tambah, dan matriks redaman.



Gambar 4. 4 Tampak samping hasil *meshing* MOSES



Gambar 4. 5 Tampak atas hasil *meshing* MOSES



Gambar 4. 6 Tampak depan hasil *meshing* MOSES

Parameter hidrostatis dari model MAXSURF dan hasil *meshing* MOSES tertera pada Tabel 4.1 dan 4.2.

Tabel 4. 1 Parameter hidrostatis model MAXSURF

MAXSURF Hydrostatics Parameter			
Parameter		Value	Unit
Displacement	Disp.	8640.00	ton
Length Overall	L _{OA}	111.00	m
Length Between Waterline	L _{WL}	111.00	m
Length Between Perpendicular	L _{PP}	108.00	m
Breadth	B	37.80	m
Height	H	14.40	m
Draft	T	4.70	m
Vertical Centre of Gravity (from keel +)	VCG	14.90	m
Gravity to Metacentre	GM	39.47	m

Tabel 4. 2 Parameter hidrostatis hasil *meshing* MOSES

MOSES Mesh Hydrostatics Parameter			
Parameter		Value	Unit
Displacement	Disp.	8567.00	ton
Length Overall	L _{OA}	111.00	m
Length Between Waterline	L _{WL}	111.00	m
Length Between Perpendicular	L _{PP}	108.00	m
Breadth	B	37.79	m
Height	H	14.40	m
Draft	T	4.70	m
Vertical Centre of Gravity (from keel +)	VCG	14.90	m
Gravity to Metacentre	GM	39.69	m

4.1.2. Pemodelan Eksperimen

Untuk melakukan studi eksperimen, *floating crane catamaran* harus dimodelkan secara fisik. Model diskala menggunakan hukum Froude dengan skala 1:36. Ukuran model tercantum dalam Tabel 4.3.

Model yang digunakan adalah model milik Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT, seperti pada Gambar 4.7. Model dibuat menggunakan kayu balsa yang dibentuk menyerupai rencana garis dan ukuran yang telah diskala. Lambung model diisi *ballast* berupa lempengan besi berbentuk balok yang didistribusikan massanya agar letak COG dan jari-jari girasi model sesuai dengan nilai yang telah diskalakan. Bagian geladak menggunakan triplek dan ditempeli *passive markers* sebagai acuan yang ditangkap oleh *motion capture camera*. Proses kalibrasi massa dan letak jari-jari girasi longitudinal dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Tabel 4. 3 Ukuran prototipe dan model yang diskala.

Prototype & Model, Scale 1:36					
Parameter		Prototype	Scale Factor	Model	Unit
Displacement	Disp.	8646000.00	λ^3	185.31	kg
Length Overall	L_{OA}	111.00	λ	3.08	m
Length Between Waterline	L_{WL}	111.00	λ	3.08	m
Length Between Perpendicular	L_{PP}	108.00	λ	3.00	m
Breadth	B	37.80	λ	1.05	m
Height	H	14.40	λ	0.40	m
Depth (Lines Plan)	H	10.50	λ	0.29	m
Draft	T	4.70	λ	0.13	m
Longitudinal Centre of Gravity (from AP +)	LCG	50.94	λ	1.42	m
Vertical Centre of Gravity (from keel +)	VCG	14.90	λ	0.41	m
Gravity to Metacentre	GM	38.95	λ	1.08	m
Radius of Gyration YY	K_{YY}	27.65	λ	0.77	m
Service Speed	v_s	12.00	$\lambda^{1/2}$	2.00	knots
Complement		62			Persons
Main Engine		2x3500			HP
		Medium Speed			
		Medium Duty			
Class		A100 IP		Work Ship	
		SM		Crane, Heli	
Model		LHI-242			



Gambar 4.7 Model eksperimen.



Gambar 4.8 Distribusi beban pada model eksperimen.

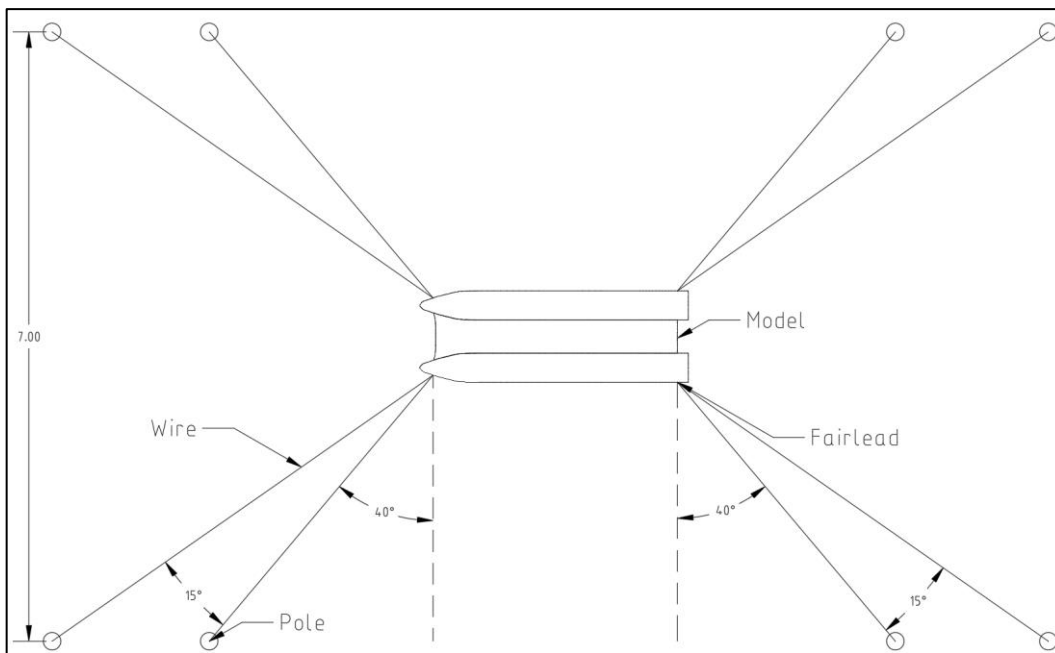
4.2. Pemodelan Sistem Tambat

Pada uji eksperimen, model ditambat pada tiang yang telah disusun sedemikian rupa pada kolam. Tali tambat yang digunakan harus mampu menahan beban saat struktur diuji agar struktur tidak bergerak terlalu jauh dari posisi semula. Tali tambat yang dipilih dalam eksperimen adalah *steel wire sling* dengan kapasitas 30 lbs seperti pada Gambar 4.9.

Sistem tambat dimodelkan dengan merangkai beberapa komponen seperti tiang, *load cell*, pegas, dan *steel wire sling*. Konfigurasi rangkaian tali tambat dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.9 Tali pancing.



Gambar 4. 10 Konfigurasi sistem tambat model eksperimen.

4.2.1. Perhitungan Kekakuan Pegas

Nilai kekakuan pegas dikalibrasi dengan cara menggantung pegas pada neraca gantung, kemudian pegas diberi beban yang bertambah secara linear. Untuk memastikan akurasi dari pengukuran, kalibrasi dilakukan dua kali. Pertama, pegas

diberi penambahan beban secara berkala, kemudian beban dikurangi secara berkala. Proses kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Proses kalibrasi pegas eksperimen

Pada proses kalibrasi, nilai kekakuan pegas dapat dihitung dengan menggunakan hukum Hooke seperti persamaan berikut:

$$F = \left(E \times \frac{A}{L} \right) dx = K \times dx$$

$$K = \frac{F}{dx}$$

Dimana F dalam N dan K dalam N/m. Hasil perhitungan kekakuan pegas dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil perhitungan kekakuan pegas eksperimen

Spring Stiffness		
Spring	Model Scale (N/m)	Full Scale (kN/m)
1	44.35	57.48
2	44.03	57.06
3	43.59	56.49
4	43.47	56.33
5	43.94	56.95
6	44.02	57.05
7	44.22	57.31
8	43.27	56.08
Average	43.86	56.84

Dari Tabel 4.4 dapat dipat disimpulkan bahwa nilai kekakuan rata-rata dari pegas adalah 43.85 N/m atau 56.82 kN/m dalam keadaan *full scale*.

4.2.2. Kekakuan Tali Pancing

Sebagaimana yang telah dicantumkan pada Gambar 4.9, tali pancing yang digunakan pada eksperimen memiliki kapasitas 30 lbs. Pada penelitian tugas akhir ini, tali pancing memiliki kekakuan yang cukup besar sehingga dapat diasumsikan tali pancing tidak memberikan pertambahan panjang apabila terkena gaya tarik oleh model eksperimen yang melakukan ekskursi. Tali pancing pada kondisi ini hanya berperan sebagai transfer gaya dari ekskursi model eksperimen ke pegas.

4.2.3. Pemodelan Sistem Tambat Numeris

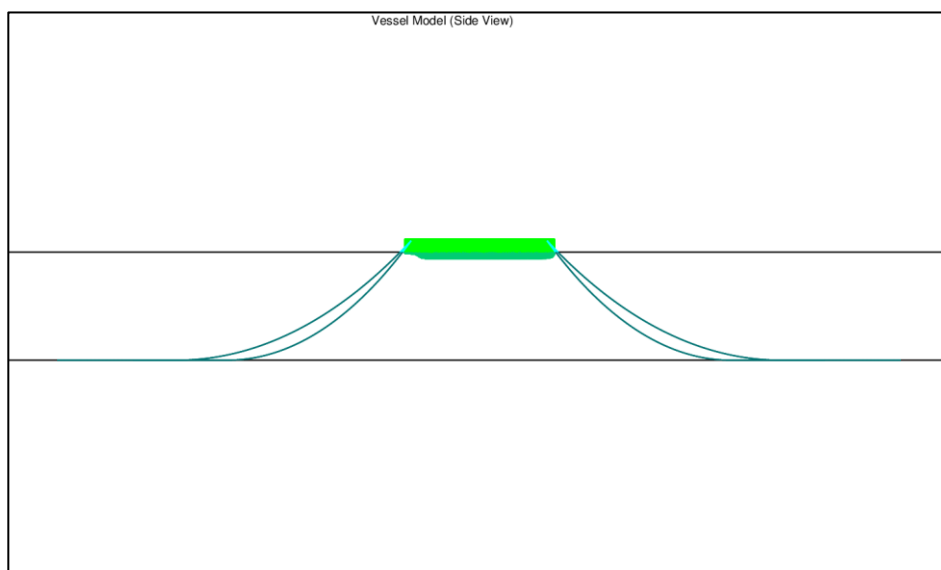
Sistem tambat pada pemodelan numeris dimodelkan dalam MOSES. Koordinat dari konfigurasi sistem tambat dapat dilihat pada Tabel 4.5. Koordinat mengacu pada titik *zero point* MOSES yaitu pada *bow keel*. Namun untuk kedalaman *anchor* mengacu pada permukaan air. Properti tali tambat yang digunakan dalam analisis numeris dapat dilihat pada Tabel 4.6. Dapat dilihat visualisasi model yang tertambat pada Gambar 4.12 sampai 4.14.

Tabel 4. 5 Konfigurasi sistem tambat model numeris

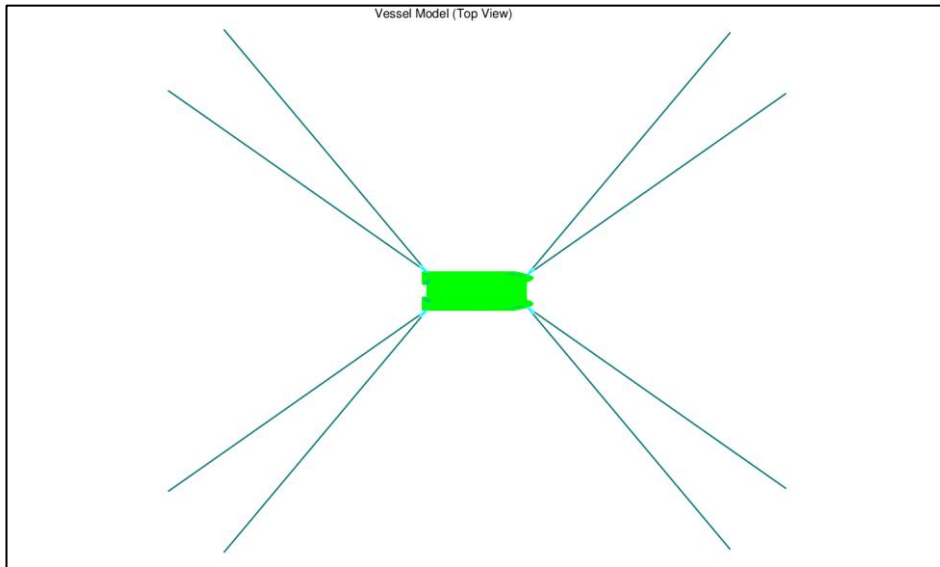
Mooring Configurion								
Properties	Fairlead (m)			Anchor (m)			Angle (°)	HD (m)
	X	Y	Z	X	Y	Depth		
ML1	5.64	-15.98	13.15	-200.05	-261.11	-80.00	-130.00	320.00
ML2	5.64	-15.98	13.15	-256.49	-199.53	-80.00	-145.00	320.00
ML3	5.64	15.98	13.15	-256.49	199.53	-80.00	145.00	320.00
ML4	5.64	15.98	13.15	-200.05	261.11	-80.00	130.00	320.00
ML5	106.50	18.90	13.15	312.19	264.03	-80.00	50.00	320.00
ML6	106.50	18.90	13.15	368.63	202.45	-80.00	35.00	320.00
ML7	106.50	-18.90	13.15	368.63	-202.45	-80.00	-35.00	320.00
ML8	106.50	-18.90	13.15	312.19	-264.03	-80.00	-50.00	320.00

Tabel 4. 6 Properti tali tambat model numeris

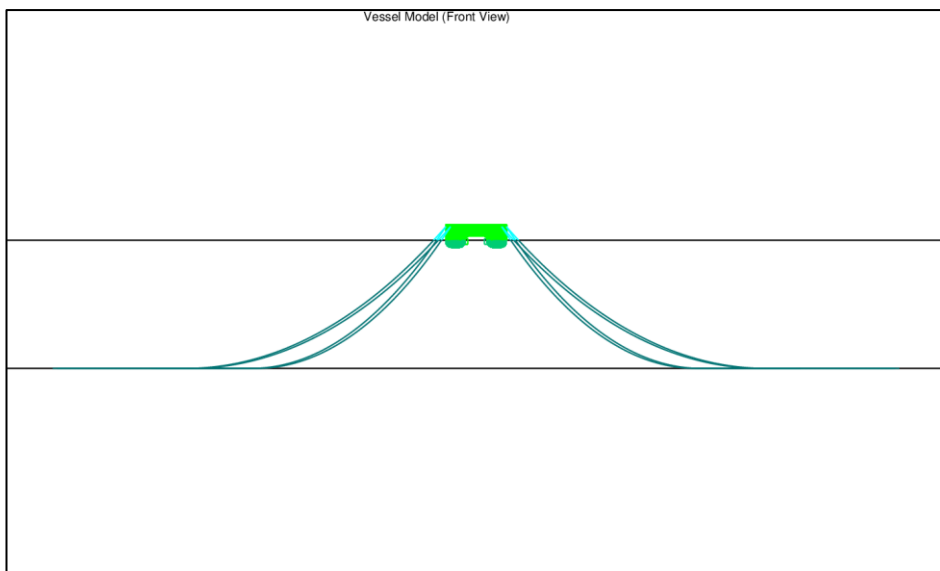
Mooring Line Properties		
Description	Value	Unit
Configuration	8 line	
Material	6x19 wire with wire core	
Length	342.87	m
Diameter	5.00	inch
	0.13	m
	127.00	mm
Mass	0.10	ton/m
MBL	16017.41	kN
	1632.76	ton
Pre-tension	198.96	kN
	20.28	ton



Gambar 4. 12 Model tertambat numeris tampak samping



Gambar 4. 13 Model tertambat numeris tampak atas



Gambar 4. 14 Model tertambat numeris tampak depan

4.3. Validasi Model Eksperimen dan Numeris

Untuk mendapatkan hasil yang merepresentasikan kondisi saat uji eksperimen dan simulasi numeris pada MAXSURF dan MOSES, validasi antara model eksperimen, model numeris, dan prototipe perlu dilakukan. Selengkapnya mengenai parameter yang divalidasi tertera pada Tabel 4.7 sampai 4.8. Terdapat error sebesar 2.33% antara prototipe dengan model eksperimen, ini disebabkan oleh massa jenis air yang digunakan berbeda dimana prototipe menggunakan air laut (1.025 ton/m^3) dan model eksperimen menggunakan air tawar (1.000 ton/m^3).

Tabel 4. 7 Validasi antara prototipe dengan model eksperimen

Prototype - Model Validation, Scale 1:36					
Parameter		Value	Prototype	Model	Error
Displacement	Disp.	kg	185.31	181.00	2.33%
Length Overall	L _{OA}	m	3.08	3.08	0.00%
Length Between Waterline	L _{WL}	m	3.08	3.08	0.00%
Length Between Perpendicular	L _{PP}	m	3.00	3.00	0.00%
Breadth	B	m	1.05	1.05	0.00%
Height	H	m	0.40	0.40	0.00%
Draft	T	m	0.13	0.13	0.00%
Longitudinal Centre of Gravity (from AP +)	LCG	m	1.42	1.42	0.00%
Vertical Centre of Gravity (from keel +)	VCG	m	0.41	0.41	0.00%
Gravity to Metacentre	GM	m	1.08	1.08	0.01%
Radius of Gyration YY	K _{YY}	m	0.77	0.77	0.00%

Tabel 4. 8 Validasi antara prototipe dengan model MAXSURF

Prototype - MAXSURF Validation					
Parameter		Unit	Prototype	MAXSURF	Error
Displacement	Disp.	ton	8646.00	8640.00	0.07%
Length Overall	L _{OA}	m	111.00	111.00	0.00%
Length Between Waterline	L _{WL}	m	111.00	111.00	0.00%
Length Between Perpendicular	L _{PP}	m	108.00	108.00	0.00%
Breadth	B	m	37.80	37.80	0.00%
Height	H	m	14.40	14.40	0.00%
Draft	T	m	4.70	4.70	0.00%
Vertical Centre of Gravity (from keel +)	VCG	m	14.90	14.90	0.00%
Gravity to Metacentre	GM	m	38.95	39.47	1.35%

Tabel 4. 9 Validasi antara prototipe dengan hasil *meshing* MOSES

Prototype - MOSES Mesh Validation					
Parameter		Unit	Prototype	MOSES	Error
Displacement	Disp.	ton	8646.00	8567.00	0.91%
Length Overall	L _{OA}	m	111.00	111.00	0.00%
Length Between Waterline	L _{WL}	m	111.00	111.00	0.00%
Length Between Perpendicular	L _{PP}	m	108.00	108.00	0.00%
Breadth	B	m	37.80	37.79	0.02%
Height	H	m	14.40	14.40	0.00%
Draft	T	m	4.70	4.70	0.00%
Vertical Centre of Gravity (from keel +)	VCG	m	14.90	14.90	0.00%
Gravity to Metacentre	GM	m	38.95	39.69	1.91%

Pada Tabel 4.8 dan 4.9 adalah validasi model numeris terhadap prototipe. Model *meshing* dari MOSES adalah model yang akan dipakai untuk analisis selanjutnya.

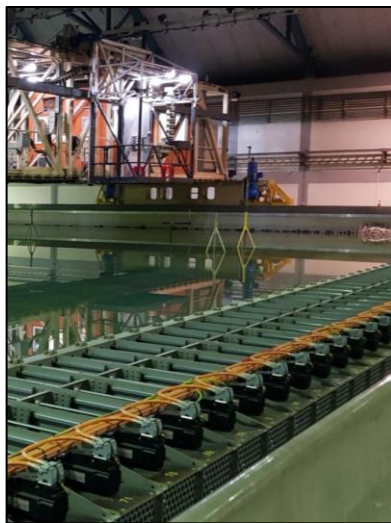
perlu divalidasi kembali dari model *meshing* MOSES dikarenakan kualitas *meshing* dari MOSES dapat mengubah sedikit bentuk kapal. Terdapat *error* sebesar 0.91% antara *displacement* model *meshing* MOSES dan prototipe.

4.4. Kalibrasi Instrumen Pengukuran

4.4.1. Kalibrasi Perangkat *Motion Capture System*

Pengukuran respon gerakan model saat eksperimen dilakukan menggunakan perangkat *motion capture system*. Perangkat *motion capture system* dapat merekam respon gerakan model pada sumbu x , y , dan z .

Perangkat *motion capture system* terdiri dari *motion capture camera*, *passive markers*, dan *calibration kit*. Untuk menangkap respon gerak *floating crane catamaran*, pertama-tama *passive markers* diletakan pada batang besi *calibration kit*, kemudian posisi *calibration kit* diatur sampai posisi x , y , dan z dari *marker* sudah pada posisi 0 yang diinginkan. Posisi *marker* ditangkap oleh *motion capture camera*. Proses kalibrasi dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Kalibrasi *motion capture system*.

4.4.2. Kalibrasi Gelombang

Instrumen yang digunakan selanjutnya adalah *wave probe*. *Wave probe* digunakan untuk mengukur tinggi gelombang yang dibangkitkan pada saat uji eksperimen. Ketika gelombang dibangkitkan, *wave probe* digunakan untuk mengukur tinggi gelombang dan mengkalibrasi agar profil gelombang yang dibangkitkan sesuai

dengan *input* pada ruang kontrol. Profil gelombang yang digunakan pada tugas akhir ini dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Data spektrum gelombang

Pierson-Moskowitz Wave Spectrum					
Scale = 1:36					
Parameter	Unit	Real	Scale Factor	Model	
201	H _s	m	2.50	λ	0.07
	T _p	s	8.50	λ ^{1/2}	1.42
	Heading	deg	90.00	-	90.00
202	H _s	m	6.37	λ	0.18
	T _p	s	12.30	λ ^{1/2}	2.05
	Heading	deg	90.00	-	90.00

Dari hasil perekaman tinggi gelombang oleh *wave probe*, didapatkan grafik *time history* gelombang. *Time history* kemudian dikonversi menjadi spektrum energi gelombang.

Spektrum gelombang dalam gelombang acak merupakan kurva yang merepresentasikan resultan dari energi gelombang-gelombang reguler yang bersuperposisi membentuk karakteristik dari gelombang acak, dimana energi-energi gelombang yang diidentifikasi pada setiap unit atau satuan luas permukaannya adalah ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya (Djarmiko, 2012).

Untuk membuat spektrum gelombang, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah mentransformasi data elevasi gelombang dalam domain waktu (*time history*) ke dalam domain frekuensi (*frequency domain*) menggunakan Fast Fourier Transform (FFT). Pada tugas akhir ini, transformasi FFT dilakukan menggunakan perangkat lunak Octave yang sudah memiliki fungsi FFT di dalamnya. Selanjutnya kurva spektrum gelombang dapat dibentuk dengan mengplot besar ordinat spektrum gelombang dengan frekuensi gelombang sebagai absis. Besaran ordinat spektrum gelombang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{\zeta_0^2}{2\delta_{\omega}}$$

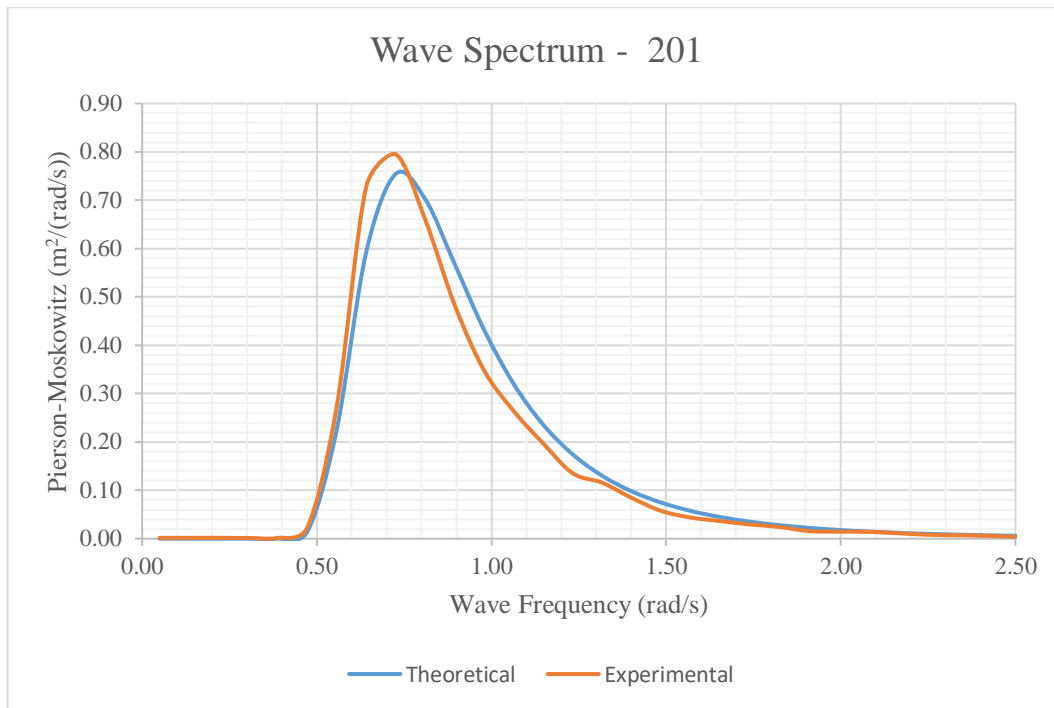
Dimana:

$S_{\zeta}(\omega)$ = Ordinat spektrum gelombang ($\text{m}^2/(\text{rad/s})$).

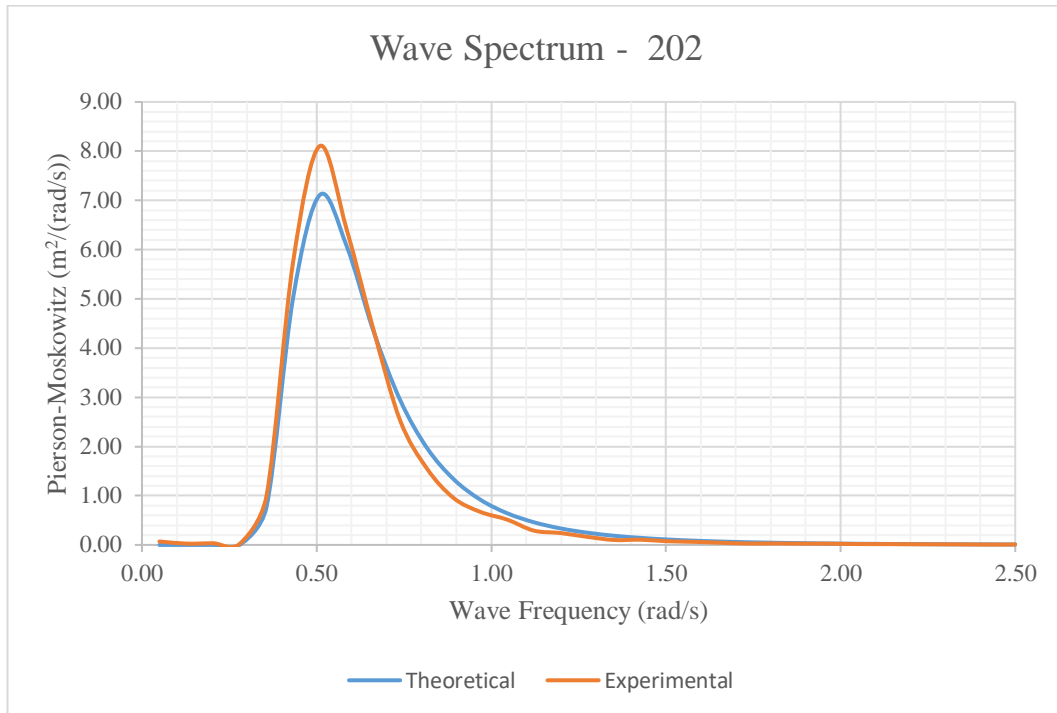
ζ_0 = Amplitudo gelombang (m).

δ_{ω} = Frekuensi *incremental* (rad/s).

Spektrum gelombang yang digunakan untuk eksperimen kemudian divalidasi dengan spektrum gelombang teoritis. Perbandingan keduanya dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan 4.17.



Gambar 4. 16 Spektrum gelombang kode 201



Gambar 4. 17 Spektrum gelombang kode 202

Dari Gambar 4.17 dan 4.16 dapat dilihat spektrum gelombang eksperimen berhimpit dengan spektrum gelombang hasil perhitungan teoritis. Hal ini menunjukkan gelombang uji yang dibangkitkan dalam kolam MOB dapat mewakili profil gelombang yang direncanakan. Selain itu, spektrum gelombang dapat dicari parameter stokastiknya dengan persamaan berikut:

$$H_s = 4.00\sqrt{m_0}$$

Dimana:

H_s = Tinggi gelombang signifikan (m).

m_0 = Luasan di bawah kurva spektrum atau disebut varians (m^2).

Kurva pada Gambar 4.16 dan 4.17 dihitung luasannya, kemudian didapatkan nilai H_s sebagaimana tertera pada Tabel 4.11 dan 4.12.

Tabel 4. 11 Kalibrasi spektrum gelombang 201

Calibration 201			
Parameter	Theoretical	Experimental	Unit
$\Delta\omega$	0.08		rad/s
Σ_0	13.73	13.20	m ² /(rad/s)
m_0	0.39	0.37	m ²
H_s	2.49	2.44	m
Error	1.95%		

Tabel 4. 12 Kalibrasi spektrum gelombang 202

Calibration 202			
Parameter	Theoretical	Experimental	Unit
$\Delta\omega$	0.08		rad/s
Σ_0	99.77	100.04	m ² /(rad/s)
m_0	2.55	2.55	m ²
H_s	6.38	6.39	m
Error	0.13%		

Dari Tabel 4.11 dan 4.12 dapat dilihat nilai H_s yang divalidasi antara perhitungan gelombang teoritis dengan gelombang uji eksperimen memiliki *error* 1.95% dan 0.13%.

4.5. Persiapan Pengolahan Data Eksperimen

Setelah melakukan uji eksperimen pada model *floating crane catamaran*, didapatkan data rekaman respon gerak berupa sinyal acak. Sinyal tersebut perlu ditransformasi menjadi kurva spektrum respon agar dapat dicari parameter stokastiknya. Untuk melakukan transformasi, perlu beberapa persiapan yang harus dilakukan.

Pertama, rekaman sinyal dibagi menjadi segmen-segmen, yang selanjutnya pada segmen-segmen tersebut ditetapkan sejumlah titik data dengan jumlah yang sama sesuai interval pengukuran. Titik-titik yang dibaca adalah elevasi. Selanjutnya ditentukan frekuensi *incremental* dan rentang frekuensi, atau dikenal dengan *nyquist frequency* (Djarmiko, 2012). Pada tugas akhir ini *nyquist frequency* yang digunakan adalah 50.

Setelah rekaman sinyal dibagi menjadi segmen-segmen, selanjutnya proses FFT dapat dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak Octave. Hasil yang diperoleh dari proses FFT masih perlu diolah karena bentuk kurva belum halus. Proses pengolahan pertama yaitu penghalusan (*smoothing*) atau biasa disebut *spectral window*. Proses ini dilakukan untuk menghilangkan *noise* yang terdapat pada kurva spektra. Selanjutnya, pengolahan kedua adalah penyaringan atau *filtering*, berguna untuk mengeliminasi komponen-komponen menjadi efek komplementer terhadap spektra.

4.6. Analisis Respon Gerak Hasil Eksperimen

Uji eksperimen model *floating crane catamaran* dilakukan pada laboratorium Maneuvering and Ocean Engineering Basin (MOB) Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT. Model ditambah dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4.10. Eksperimen dilakukan dalam dua skenario sebagai berikut:

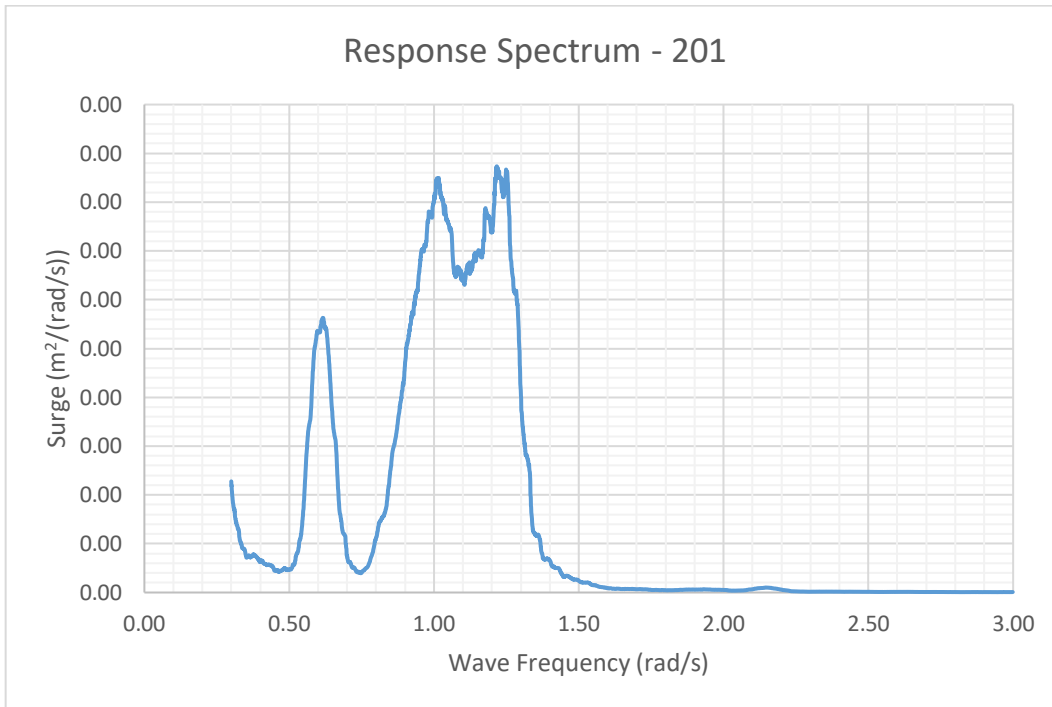
1. Kode 201: *heading* 90°; H_s 2.50 m; dan T_p 8.50 s.
2. Kode 202: *heading* 90°; H_s 6.37 m; dan T_p 12.30 s.

Skenario uji eksperimen di atas dilakukan dengan durasi selama 30 menit untuk masing-masing skenario.

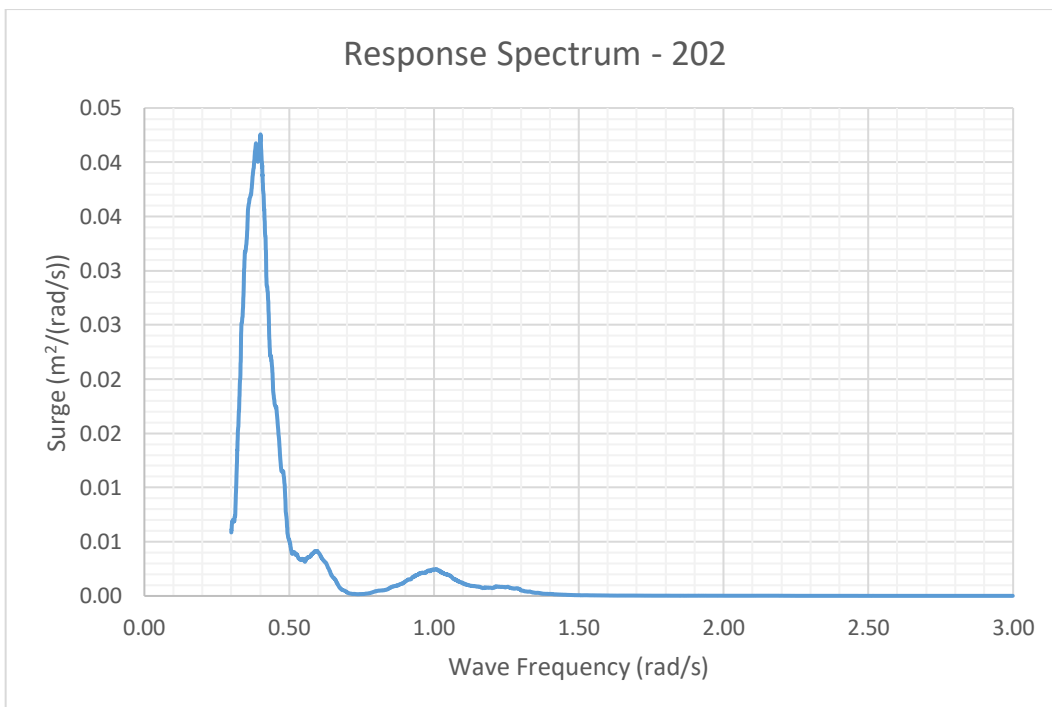
Dalam uji eksperimen, terdapat dua data yang perlu diamati. Pertama, data karakteristik gelombang yang dibangkitkan oleh *wave maker*. Kedua, data respon gerak model dalam enam derajat kebebasan. Hasil pengamatan dari kedua data tersebut berupa data *time history*. Grafik *time history* eksperimen dapat dilihat pada Lampiran A.

4.6.1. Mode Gerak Surge

Spektrum respon *floating crane catamaran* didapat dengan cara mentransformasikan *time history* gerak menjadi spektrum respon. Spektrum respon ini yang akan dipakai untuk membandingkan respon gerak eksperimen dengan numeris. Spektrum respon gerak *surge* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan 4.19.



Gambar 4. 18 Spektrum respon mode gerak *surge* kode 201

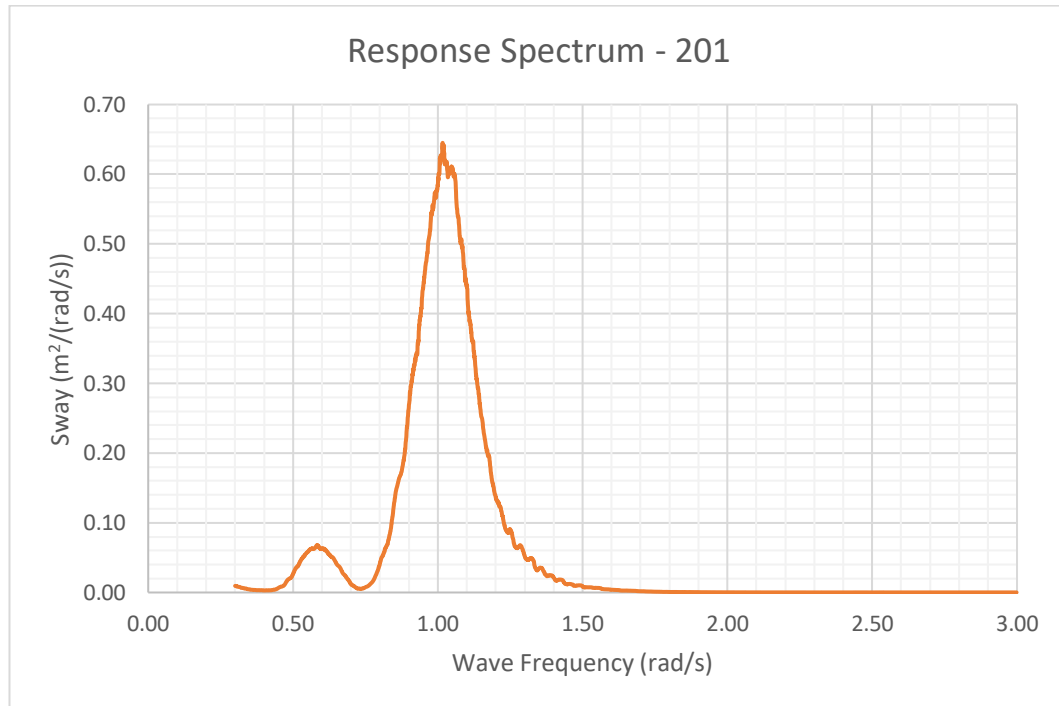


Gambar 4. 19 Spektrum respon mode gerak *surge* kode 202

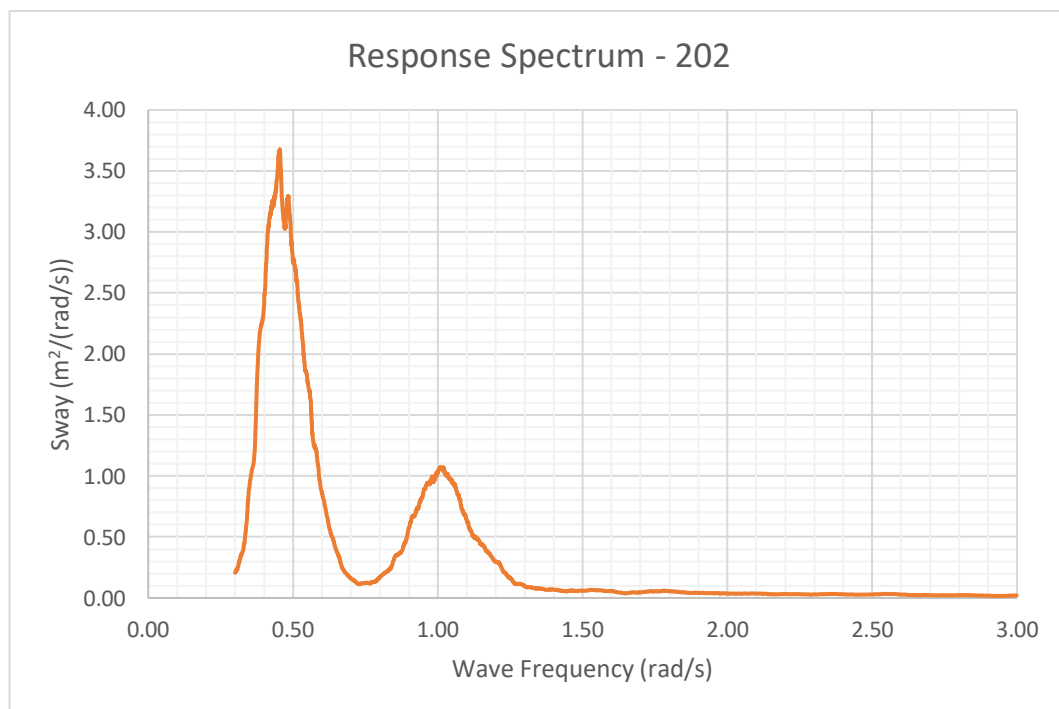
4.6.2. Mode Gerak Sway

Spektrum respon *floating crane catamaran* didapat dengan cara mentransformasikan *time history* gerak menjadi spektrum respon. Spektrum respon

ini yang akan dipakai untuk membandingkan respon gerak eksperimen dengan numeris. Spektrum respon gerak *sway* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan 4.21.



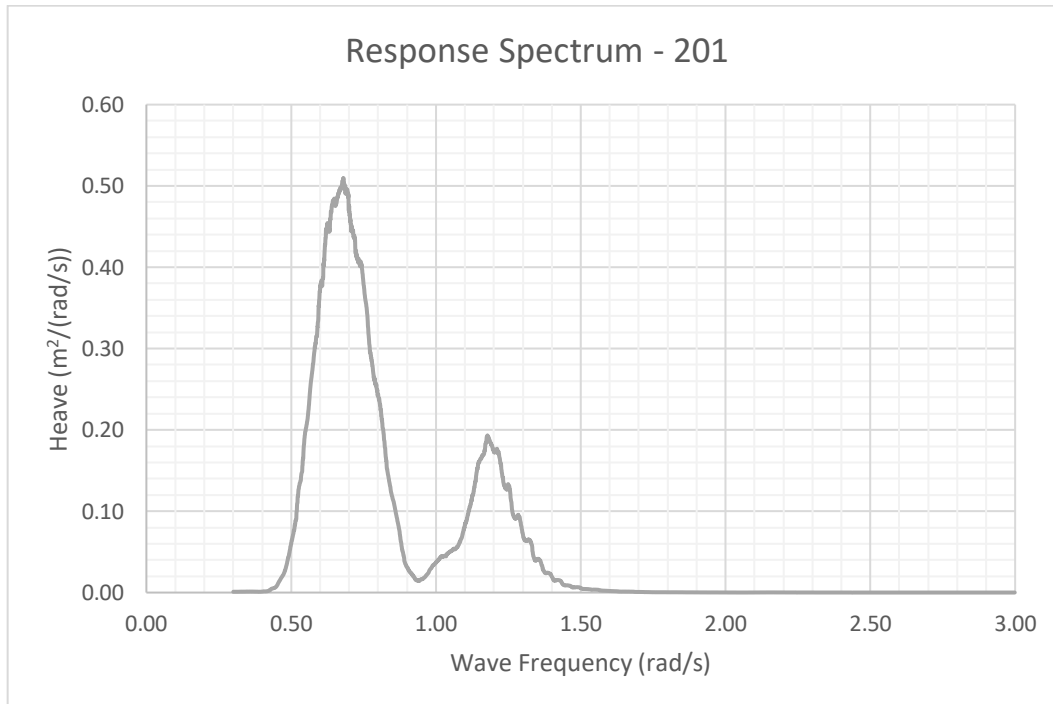
Gambar 4. 20 Spektrum respon mode gerak *sway* kode 201



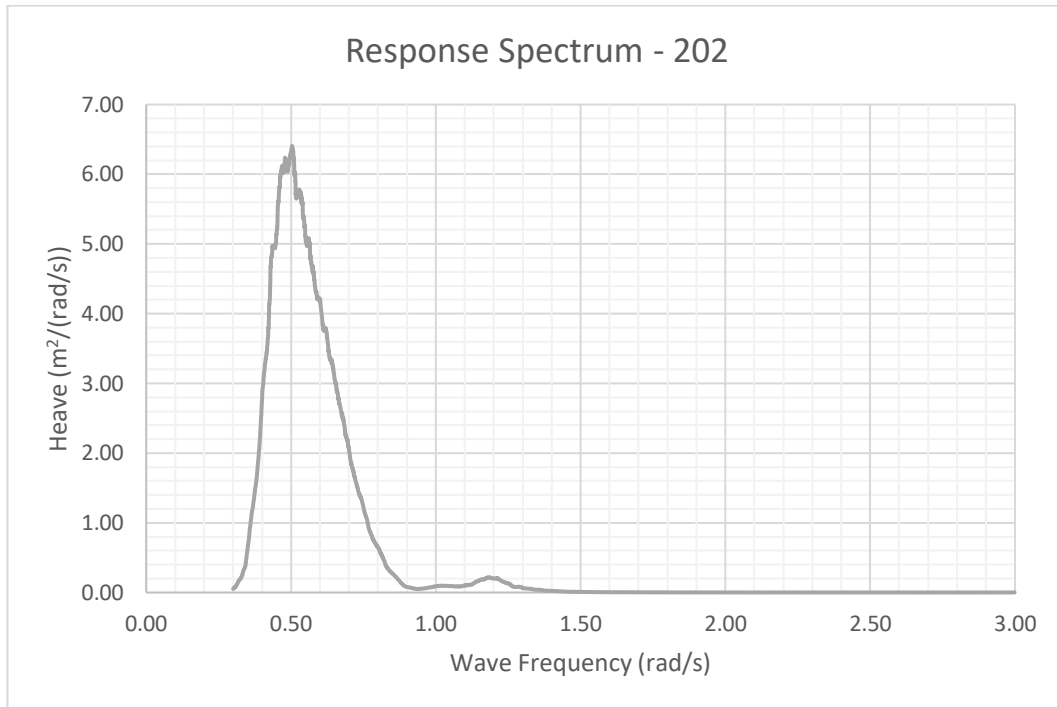
Gambar 4. 21 Spektrum respon mode gerak *sway* kode 202

4.6.3. Mode Gerak *Heave*

Spektrum respon *floating crane catamaran* didapat dengan cara mentransformasikan *time history* gerak menjadi spektrum respon. Spektrum respon ini yang akan dipakai untuk membandingkan respon gerak eksperimen dengan numeris. Spektrum respon gerak *heave* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.22 dan 4.23.



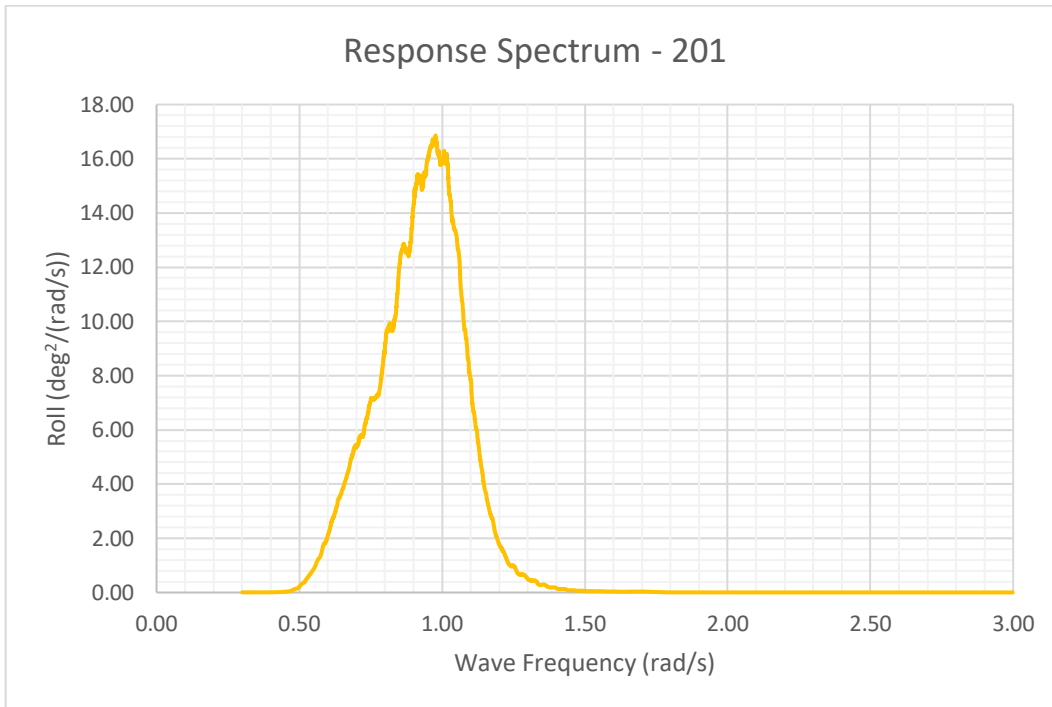
Gambar 4. 22 Spektrum respon mode gerak *heave* kode 201



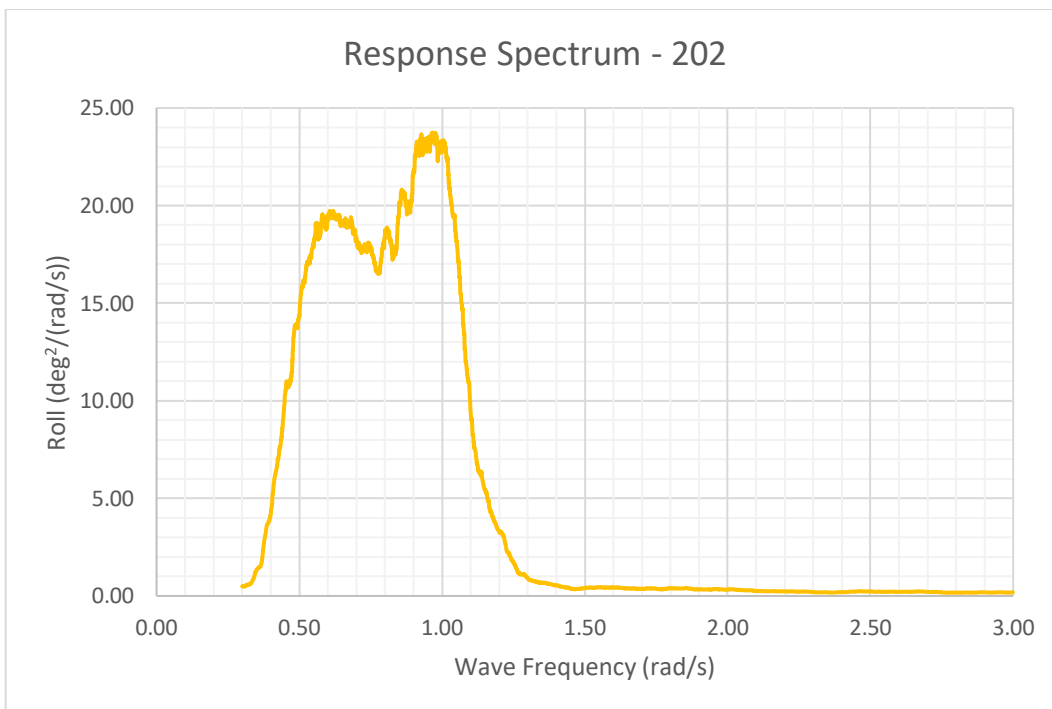
Gambar 4. 23 Spektrum respon mode gerak *heave* kode 202

4.6.4. Mode Gerak *Roll*

Spektrum respon *floating crane catamaran* didapat dengan cara mentransformasikan *time history* gerak menjadi spektrum respon. Spektrum respon ini yang akan dipakai untuk membandingkan respon gerak eksperimen dengan numeris. Spektrum respon gerak *roll* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.24 dan 4.25.



Gambar 4. 24 Spektrum respon mode gerak *roll* kode 201

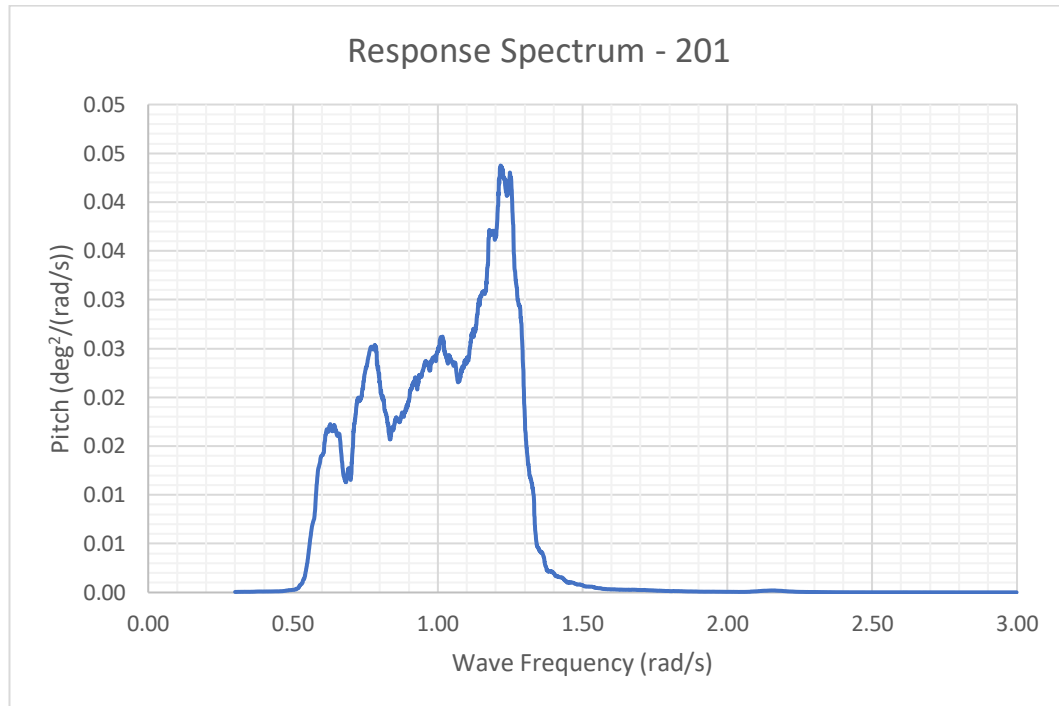


Gambar 4. 25 Spektrum respon mode gerak *roll* kode 202

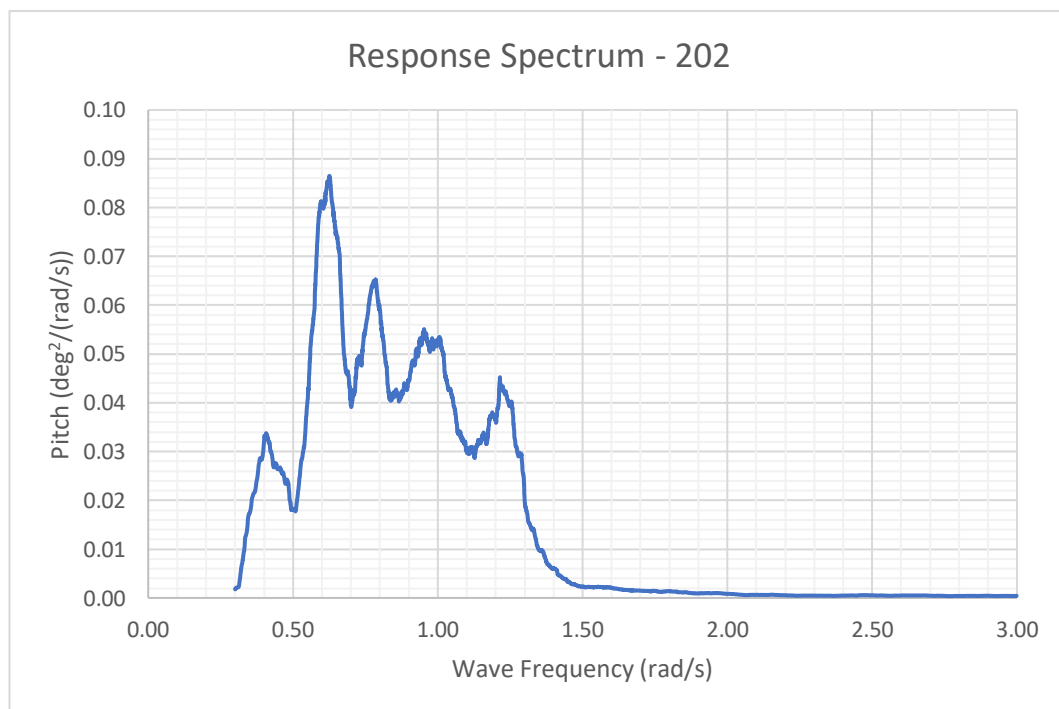
4.6.5. Mode Gerak *Pitch*

Spektrum respon *floating crane catamaran* didapat dengan cara mentransformasikan *time history* gerak menjadi spektrum respon. Spektrum respon

ini yang akan dipakai untuk membandingkan respon gerak eksperimen dengan numeris. Spektrum respon gerak *pitch* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan 4.27.



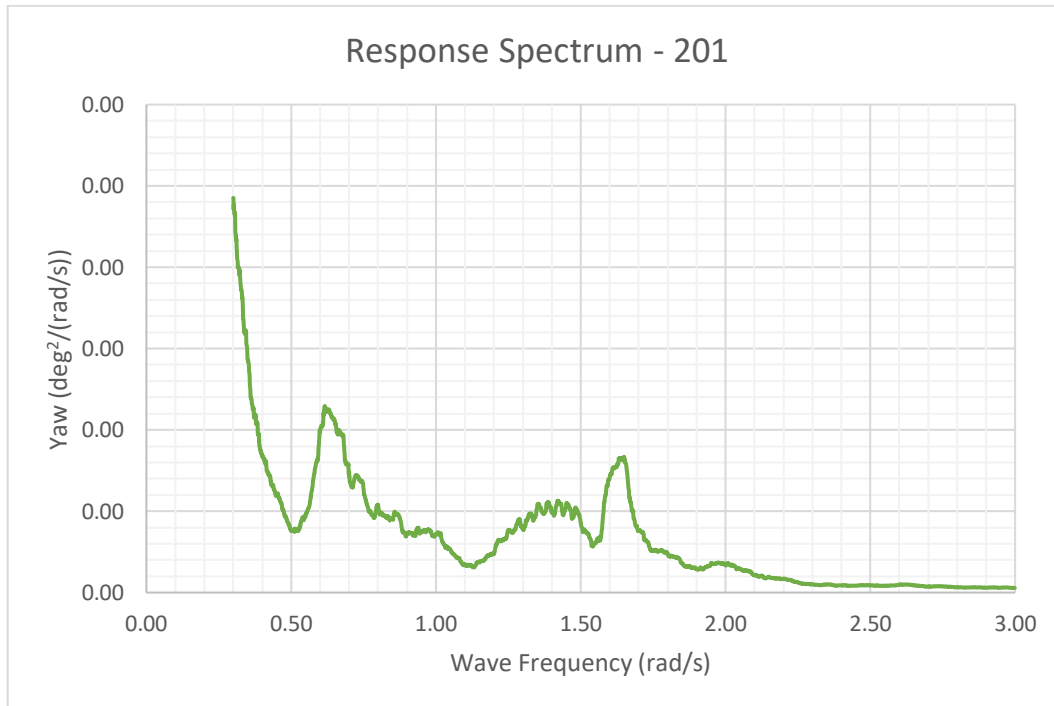
Gambar 4. 26 Spektrum respon mode gerak *pitch* kode 201



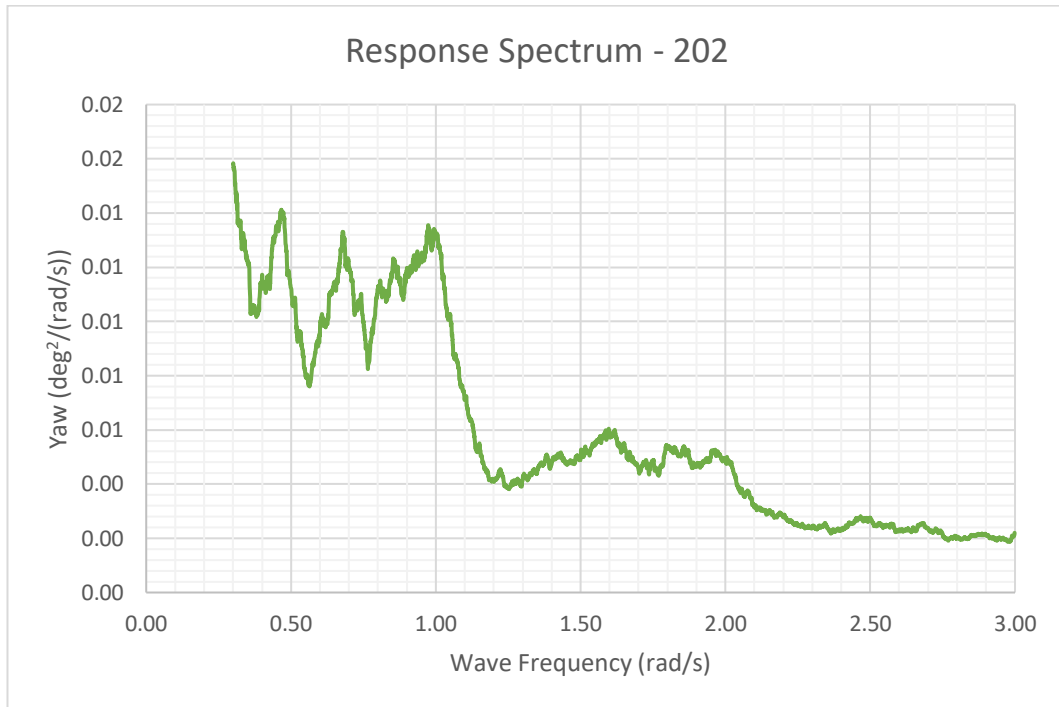
Gambar 4. 27 Spektrum respon mode gerak *pitch* kode 202

4.6.6. Mode Gerak *Yaw*

Spektrum respon *floating crane catamaran* didapat dengan cara mentransformasikan *time history* gerak menjadi spektrum respon. Spektrum respon ini yang akan dipakai untuk membandingkan respon gerak eksperimen dengan numeris. Spektrum respon gerak *yaw* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.28 dan 4.29.



Gambar 4. 28 Spektrum respon mode gerak *yaw* kode 201



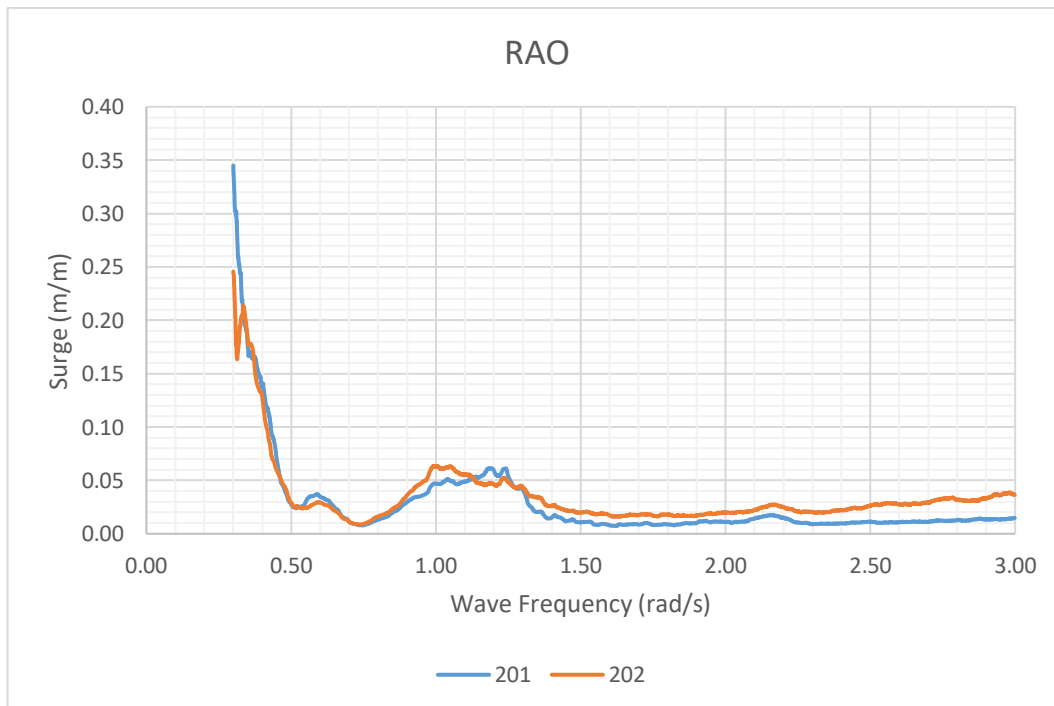
Gambar 4. 29 Spektrum respon mode gerak yaw kode 202

4.7. Analisis RAO Hasil Eksperimen

Uji eksperimen model *floating crane catamaran* dilakukan pada laboratorium MOB BTH BPPT. Umumnya untuk mengetahui RAO dari suatu bangunan apung, bangunan apung tersebut diuji pada laboratorium *towing tank*. Pada penelitian tugas akhir ini, perhitungan RAO dari model *floating crane catamaran* dilakukan menggunakan perangkat lunak Octave yang mana spektrum gelombang dan spektrum respon didapatkan dari kedua kondisi eksperimen yang telah tertera pada sub bab 4.4 dan 4.6.

4.7.1. Mode Gerak *Surge*

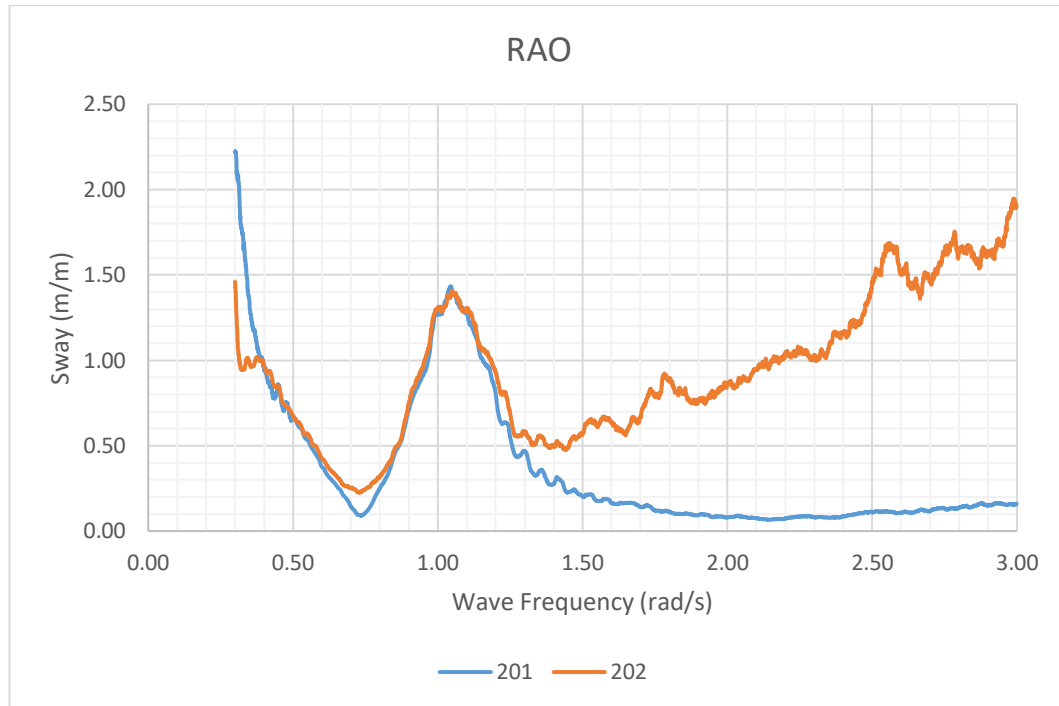
RAO *floating crane catamaran* didapat dengan menggunakan Octave. RAO ini yang akan dipakai untuk membandingkan RAO eksperimen dengan numeris. RAO mode gerak *surge* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.30.



Gambar 4. 30 Grafik RAO mode gerak *surge*

4.7.2. Mode Gerak Sway

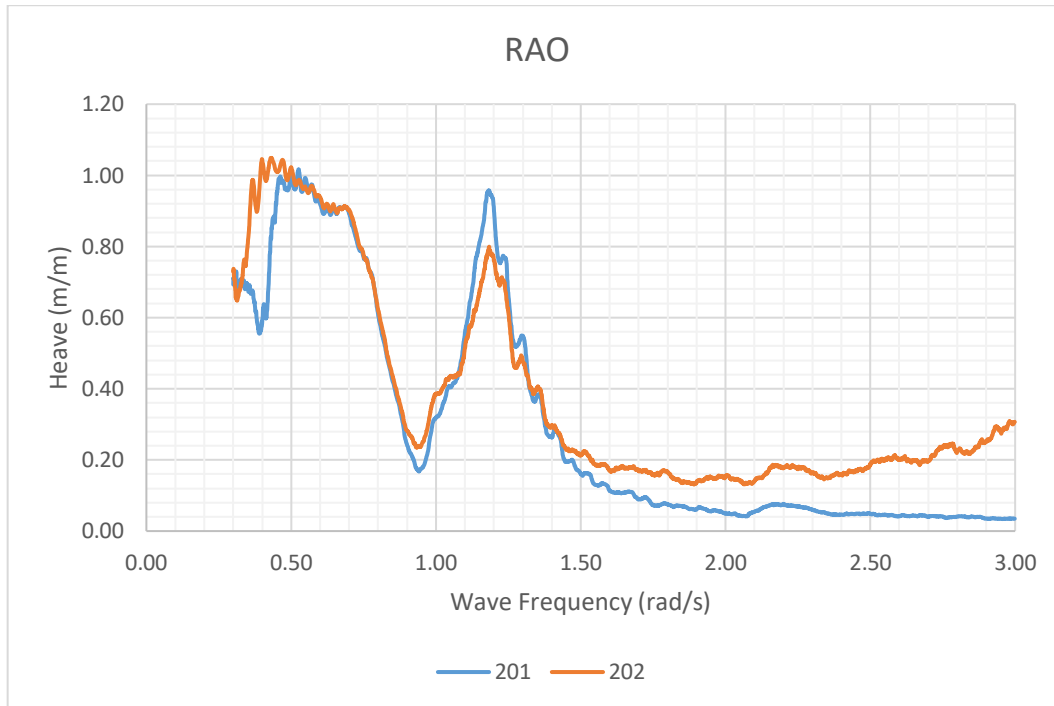
RAO *floating crane catamaran* didapat dengan menggunakan Octave. RAO ini yang akan dipakai untuk membandingkan RAO eksperimen dengan numeris. RAO mode gerak *sway* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.31.



Gambar 4. 31 Grafik RAO mode gerak *sway*

4.7.3. Mode Gerak *Heave*

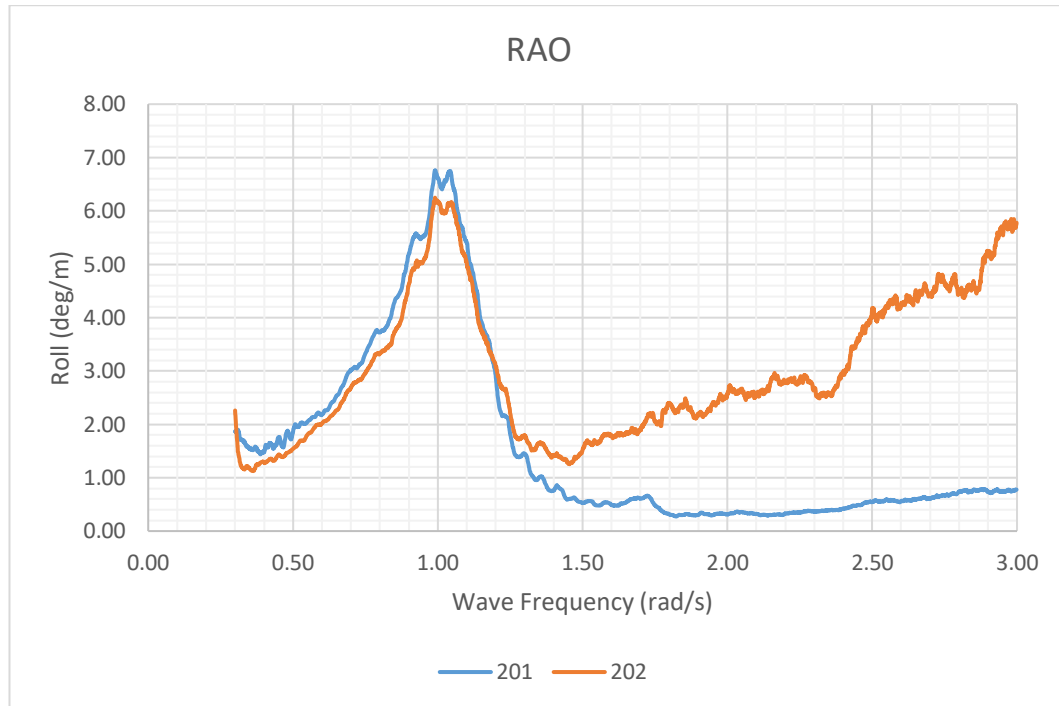
RAO *floating crane catamaran* didapat dengan menggunakan Octave. RAO ini yang akan dipakai untuk membandingkan RAO eksperimen dengan numeris. RAO mode gerak *heave* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.32.



Gambar 4. 32 Grafik RAO mode gerak *heave*

4.7.4. Mode Gerak *Roll*

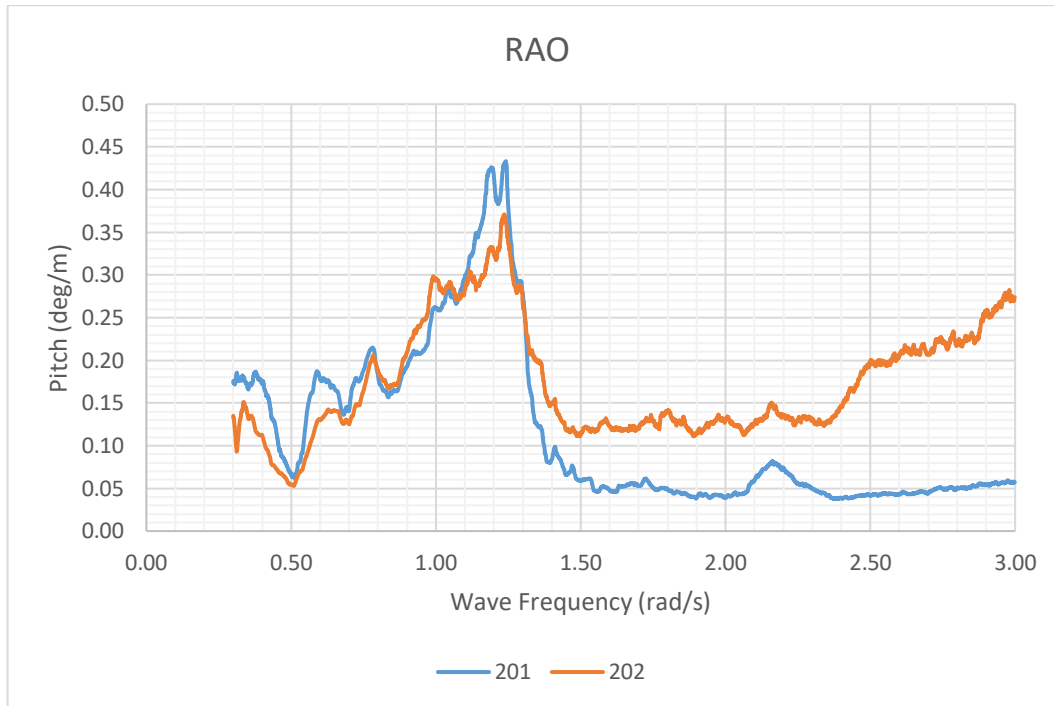
RAO *floating crane catamaran* didapat dengan menggunakan Octave. RAO ini yang akan dipakai untuk membandingkan RAO eksperimen dengan numeris. RAO mode gerak *roll* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.33.



Gambar 4. 33 Grafik RAO mode gerak *roll*

4.7.5. Mode Gerak *Pitch*

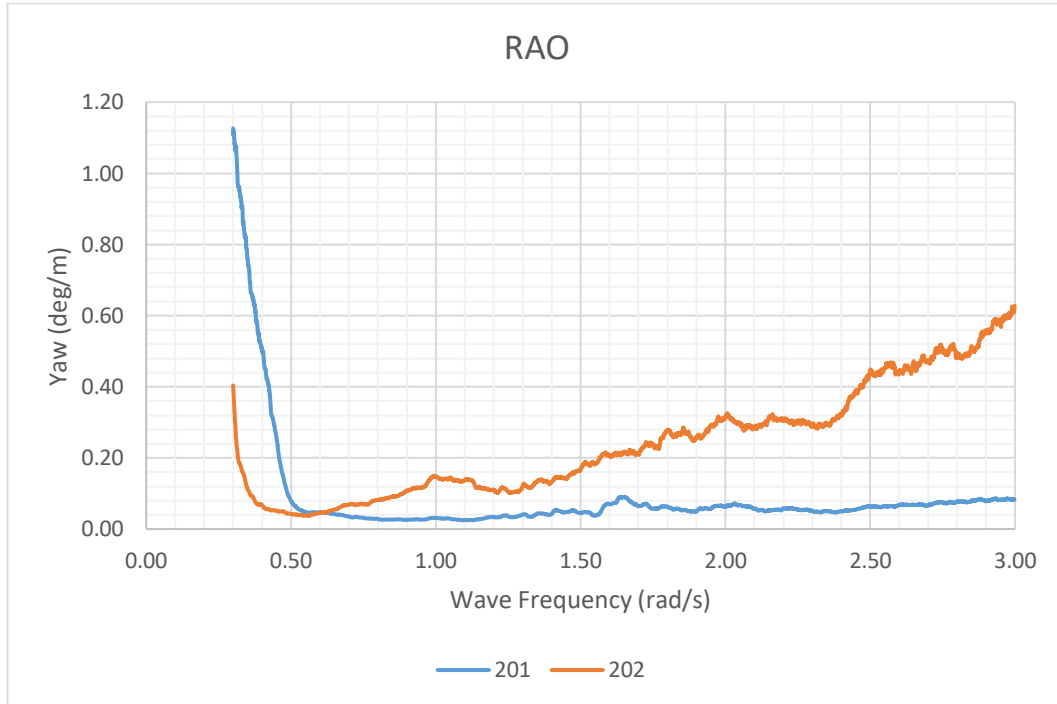
RAO *floating crane catamaran* didapat dengan menggunakan Octave. RAO ini yang akan dipakai untuk membandingkan RAO eksperimen dengan numeris. RAO mode gerak *pitch* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.34.



Gambar 4. 34 Grafik RAO mode gerak *pitch*

4.7.6. Mode Gerak *Yaw*

RAO *floating crane catamaran* didapat dengan menggunakan Octave. RAO ini yang akan dipakai untuk membandingkan RAO eksperimen dengan numeris. RAO mode gerak *yaw* pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.35.



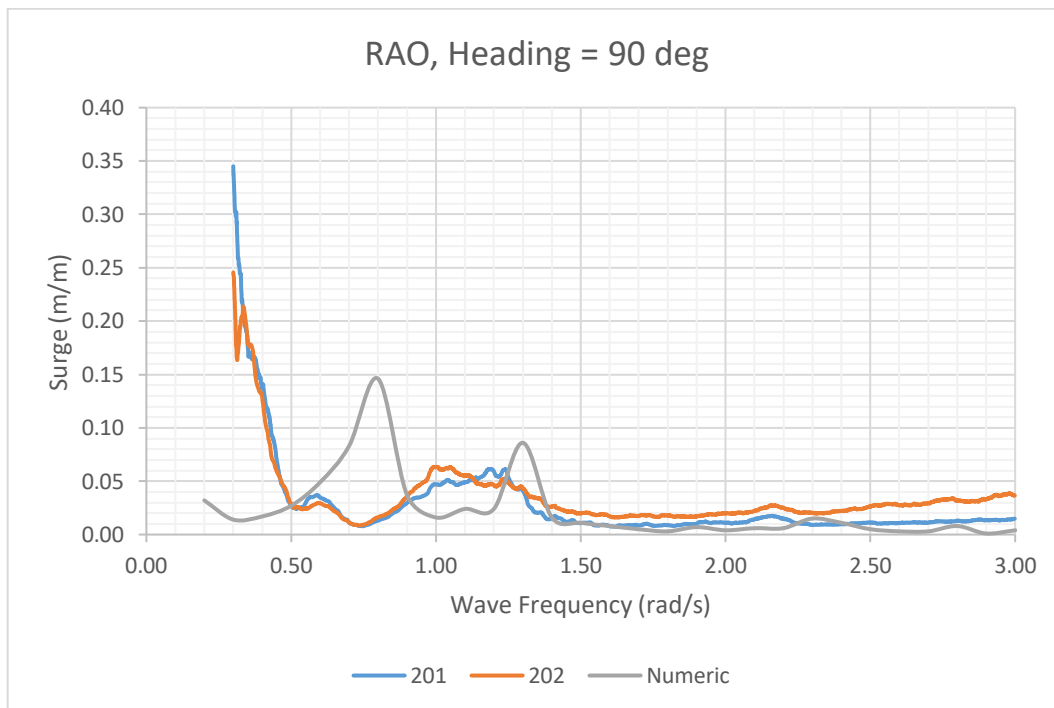
Gambar 4. 35 Grafik RAO mode gerak *yaw*

4.8. Perbandingan antara RAO Eksperimen dan Numeris

Analisis numeris RAO pada *floating crane catamaran* dilakukan menggunakan perangkat lunak MOSES. Model *meshing* dan parameter-parameter yang dibutuhkan dalam analisis RAO diambil dari perhitungan yang telah dilakukan pada sub bab 4.1 dan 4.2. Pada sub bab ini hanya akan dianalisis RAO *heading* 90°. RAO dari MOSES akan dibandingkan dengan RAO dari eksperimen pada satu grafik.

4.8.1. Mode Gerak *Surge*

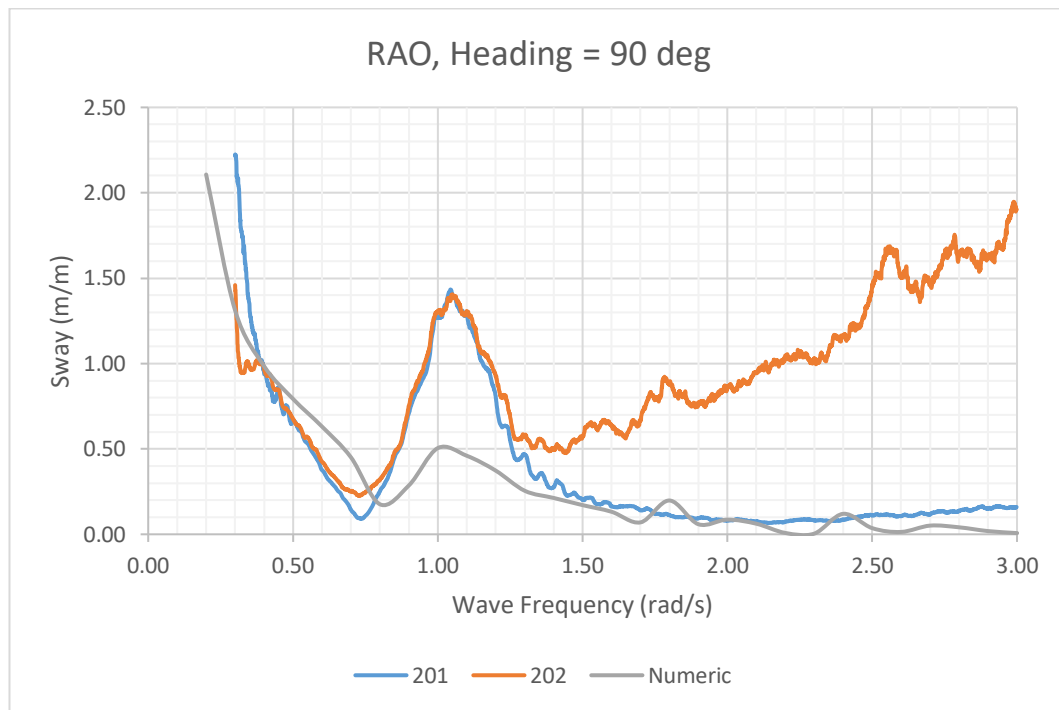
Perbandingan RAO mode gerak *surge* antara eksperimen dan numeris dapat dilihat pada Gambar 4.36. Terdapat sedikit perbedaan antara RAO eksperimen dan numeris. Pada RAO numeris terdapat puncak yang tidak terlalu signifikan pada frekuensi gelombang 0.78 rad/s.



Gambar 4. 36 Grafik perbandingan RAO mode gerak *surge*

4.8.2. Mode Gerak *Sway*

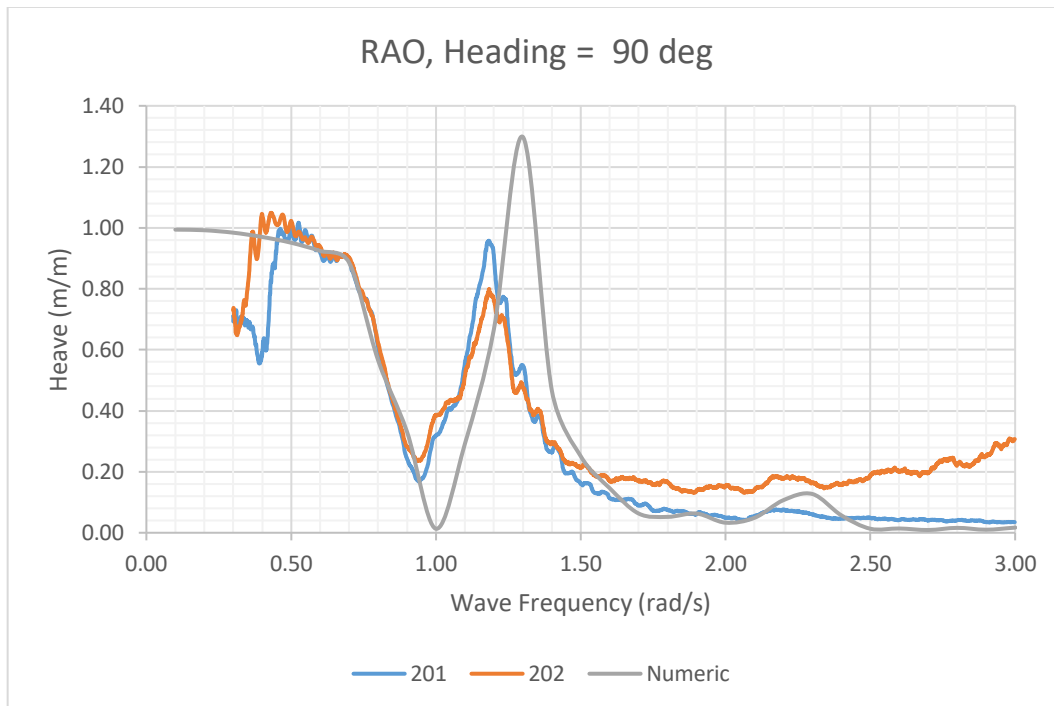
Perbandingan RAO mode gerak *sway* antara eksperimen dan numeris dapat dilihat pada Gambar 4.37. Terdapat sedikit perbedaan antara RAO eksperimen dan numeris. RAO eksperimen memiliki puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan RAO numeris, ini terjadi pada frekuensi gelombang 1.05 rad/s.



Gambar 4. 37 Grafik perbandingan RAO mode gerak *sway*

4.8.3. Mode Gerak *Heave*

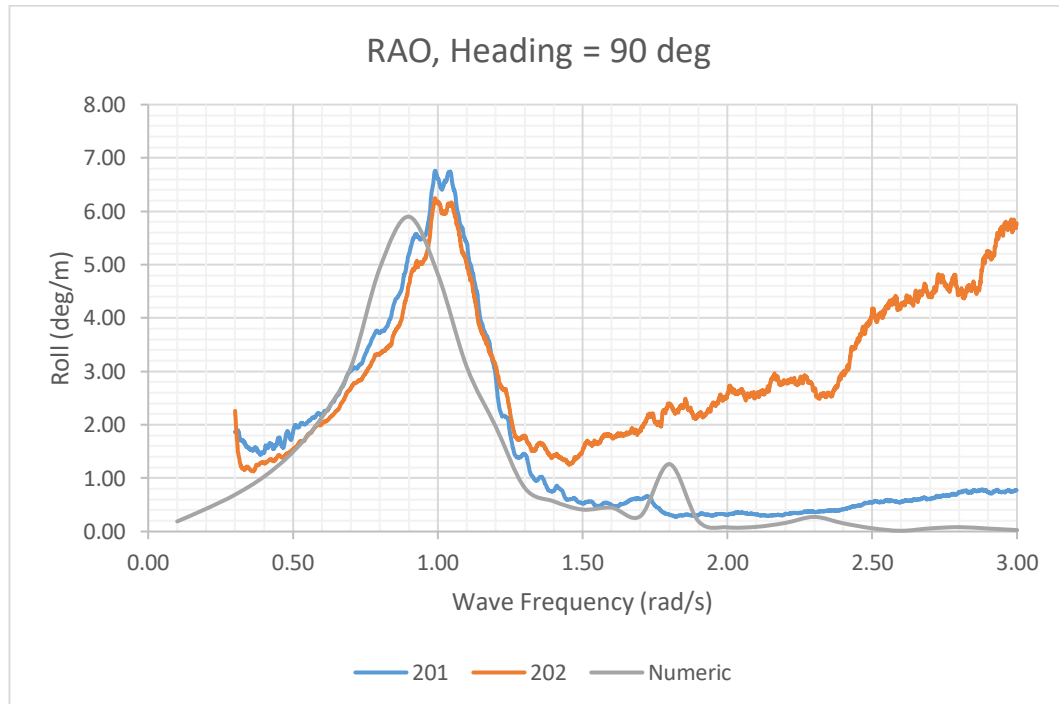
Perbandingan RAO mode gerak *heave* antara eksperimen dan numeris dapat dilihat pada Gambar 4.38. Terdapat sedikit perbedaan antara RAO eksperimen dan numeris. RAO numeris memiliki lembah yang lebih rendah yaitu pada frekuensi gelombang 1.00 rad/s dan puncak yang lebih tinggi yaitu pada frekuensi gelombang 1.30 rad/s. Terdapat selisih 0.10 rad/s antara puncak dan lembah pada RAO eksperimen dan numeris.



Gambar 4. 38 Grafik perbandingan RAO mode gerak *heave*

4.8.4. Mode Gerak *Roll*

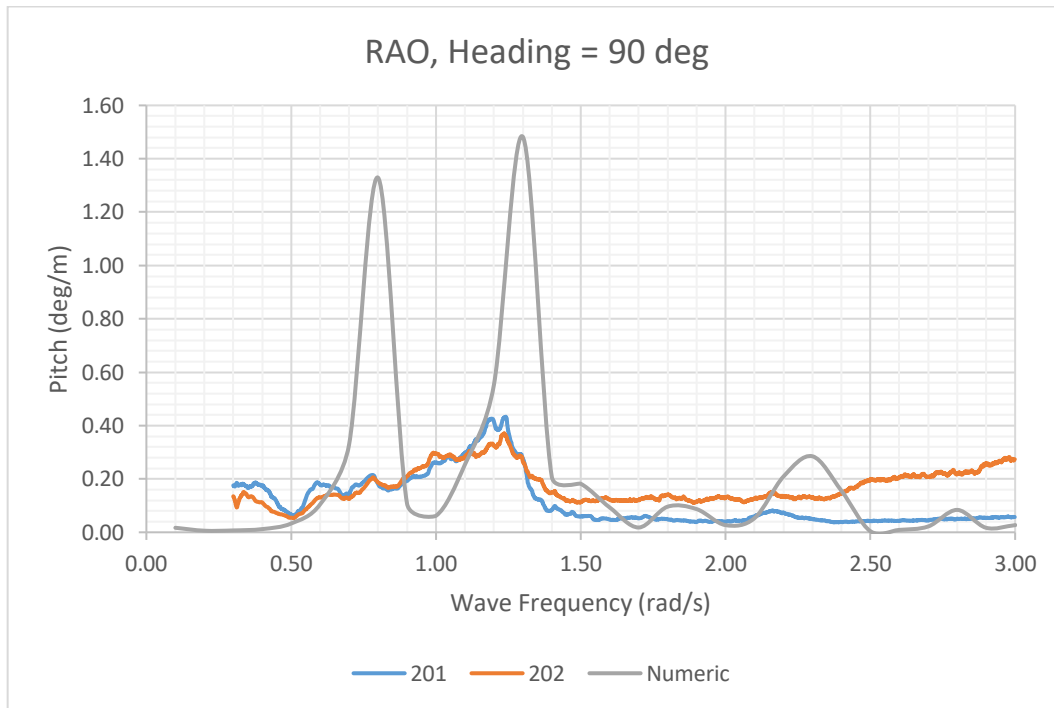
Perbandingan RAO mode gerak *roll* antara eksperimen dan numeris dapat dilihat pada Gambar 4.39. Terdapat sedikit perbedaan antara RAO eksperimen dan numeris. RAO eksperimen memiliki puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan RAO numeris ini terjadi pada frekuensi gelombang 1.00 rad/s. Terdapat selisih 0.10 rad/s antara puncak pada RAO eksperimen dan numeris.



Gambar 4. 39 Grafik perbandingan RAO mode gerak *roll*

4.8.5. Mode Gerak *Pitch*

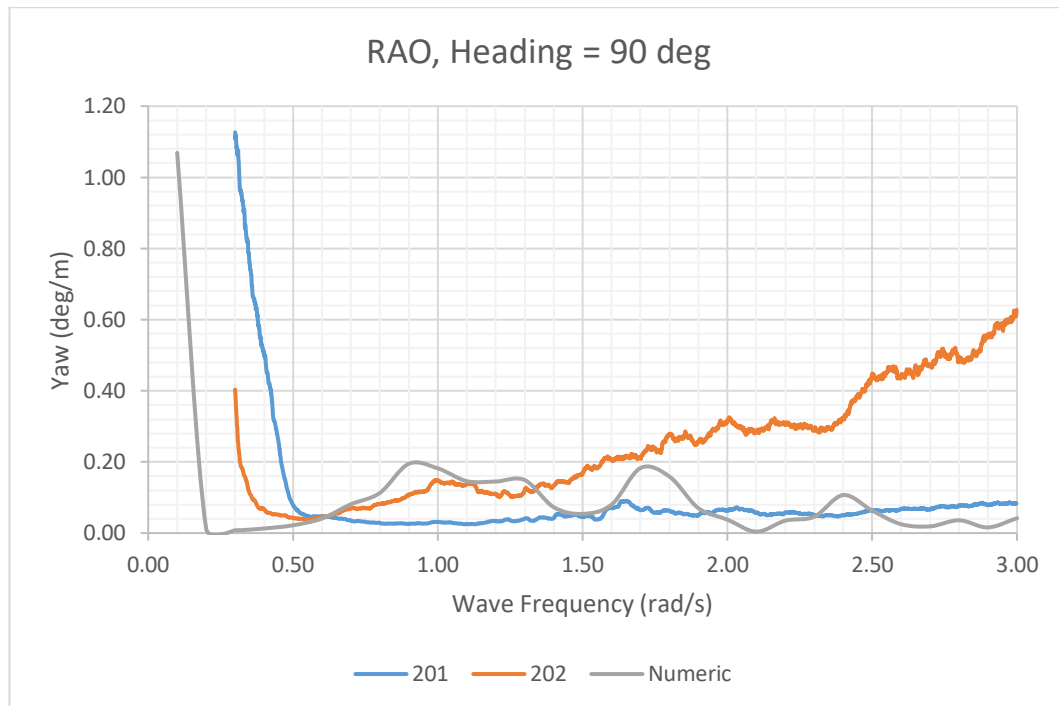
Perbandingan RAO mode gerak *pitch* antara eksperimen dan numeris dapat dilihat pada Gambar 4.40. Terdapat perbedaan yang signifikan antara RAO eksperimen dan numeris. RAO numeris memiliki dua puncak yang tingginya cukup signifikan, yaitu pada frekuensi gelombang 0.80 rad/s dan 1.30 rad/s.



Gambar 4. 40 Grafik perbandingan RAO mode gerak *pitch*

4.8.6. Mode Gerak *Yaw*

Perbandingan RAO mode gerak *yaw* antara eksperimen dan numeris dapat dilihat pada Gambar 4.41. Terdapat sedikit perbedaan antara RAO eksperimen dan numeris.



Gambar 4. 41 Grafik perbandingan RAO mode gerak *yaw*

4.9. Perbandingan antara Spektra Respon Eksperimen dan Numeris

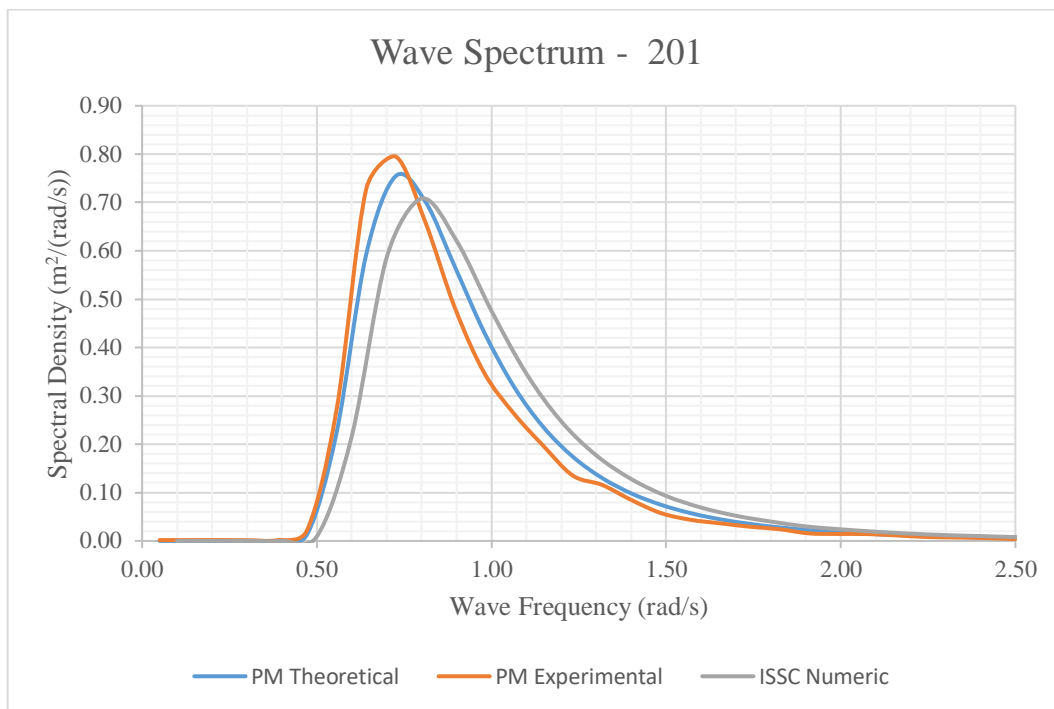
Analisis numeris spektra respon pada *floating crane catamaran* dilakukan menggunakan perangkat lunak MOSES. Analisis RAO yang telah dilakukan pada sub bab 4.8. dilanjutkan sampai analisis spektra respon dengan menambahkan spektrum gelombang yang diinginkan. Pada sub bab ini hanya akan dianalisis spektra respon *heading* 90°. Spektra respon dari MOSES akan dibandingkan dengan spektra respon dari eksperimen pada satu grafik.

4.9.1. Spektrum Gelombang Analisis Numeris

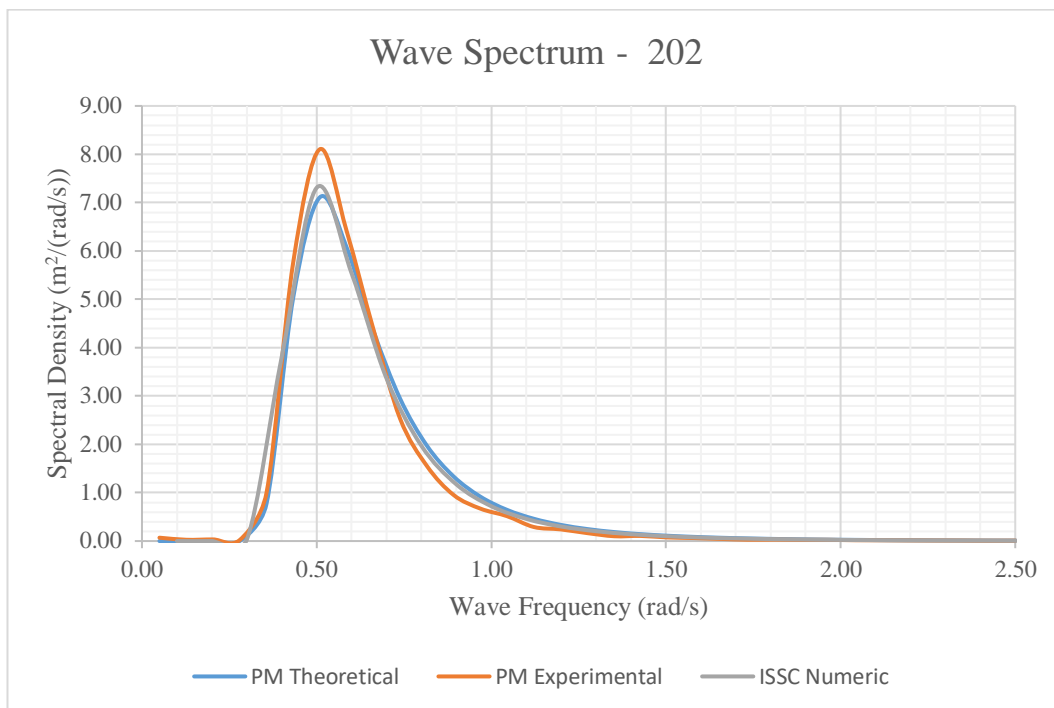
Sebelum melanjutkan ke analisis spektra respon, alangkah baiknya memvalidasi spektrum gelombang yang digunakan oleh perangkat lunak, apakah sudah sesuai dengan spektrum gelombang yang diinginkan atau belum. MOSES tidak memiliki opsi untuk menganalisis menggunakan spektrum gelombang Pierson-Moskowitz,

namun MOSES menyediakan opsi spektrum gelombang ISSC. Kita dapat menghasilkan spektrum gelombang ISSC yang menyerupai spektrum gelombang Pierson-Moskowitz dengan cara memasukan nilai H_s yang sama dan memasukan nilai T_m dari nilai T_p spektrum gelombang Pierson-Moskowitz.

Validasi antara spektrum gelombang Pierson-Moskowitz eksperimen dengan spektrum gelombang ISSC numeris dapat dilihat pada Gambar 4.42 dan 4.43. Secara visual terdapat sedikit perbedaan antara spektrum gelombang Pierson-Moskowitz dan ISSC. Untuk nilai statistiknya dapat dilihat pada Tabel 4.13 dan 4.14. Terdapat *error* pada nilai H_s sebesar 2.42% pada kode 201 dan 0.31% pada kode 202.



Gambar 4. 42 Grafik validasi spektrum gelombang kode 201



Gambar 4. 43 Grafik validasi spektrum gelombang kode 202

Tabel 4. 13 Validasi spektrum gelombang kode 201

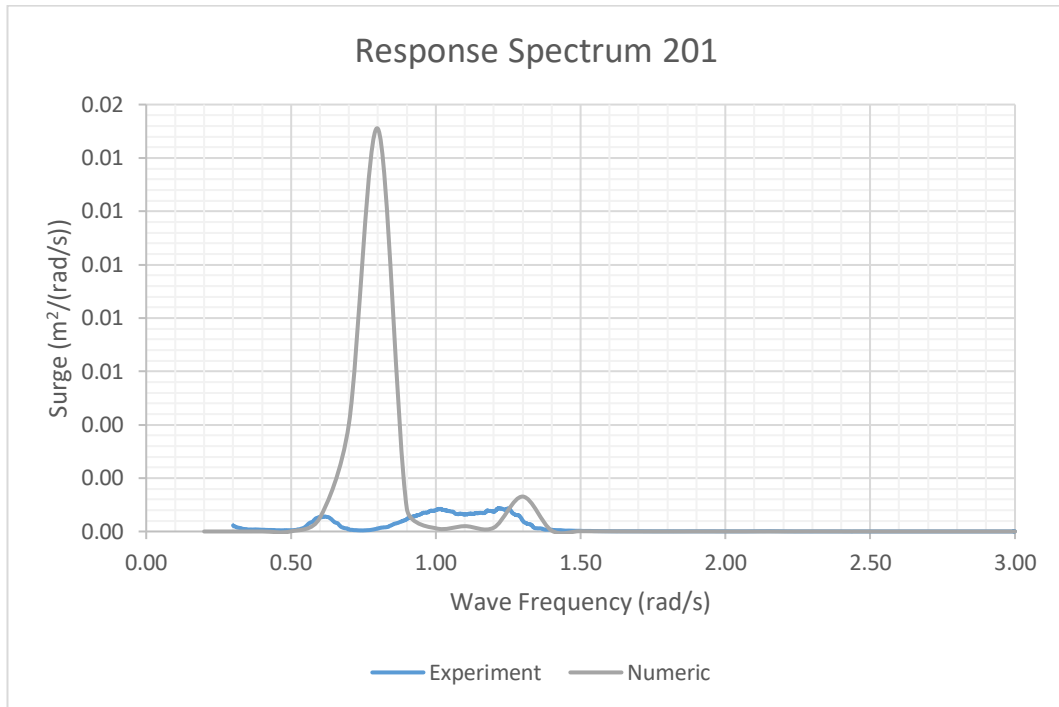
Pierson-Moskowitz Wave Spectrum 201				
Parameter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	m^2	0.37	0.39	4.90%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	0.33	0.39	18.28%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.33	0.45	34.11%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.49	0.87	77.19%
ω	rad/s	1.00	0.88	11.80%
T	s	7.01	6.22	11.32%
T_p	s	5.18	4.51	13.00%
T_z	s	6.64	5.87	11.56%
H_s	m	2.44	2.50	2.42%
H_{avg}	m	1.52	1.56	2.42%
$H_{1/10}$	m	3.10	3.17	2.42%
H^{\wedge}	m	4.69	4.84	3.27%

Tabel 4. 14 Validasi spektrum gelombang kode 202

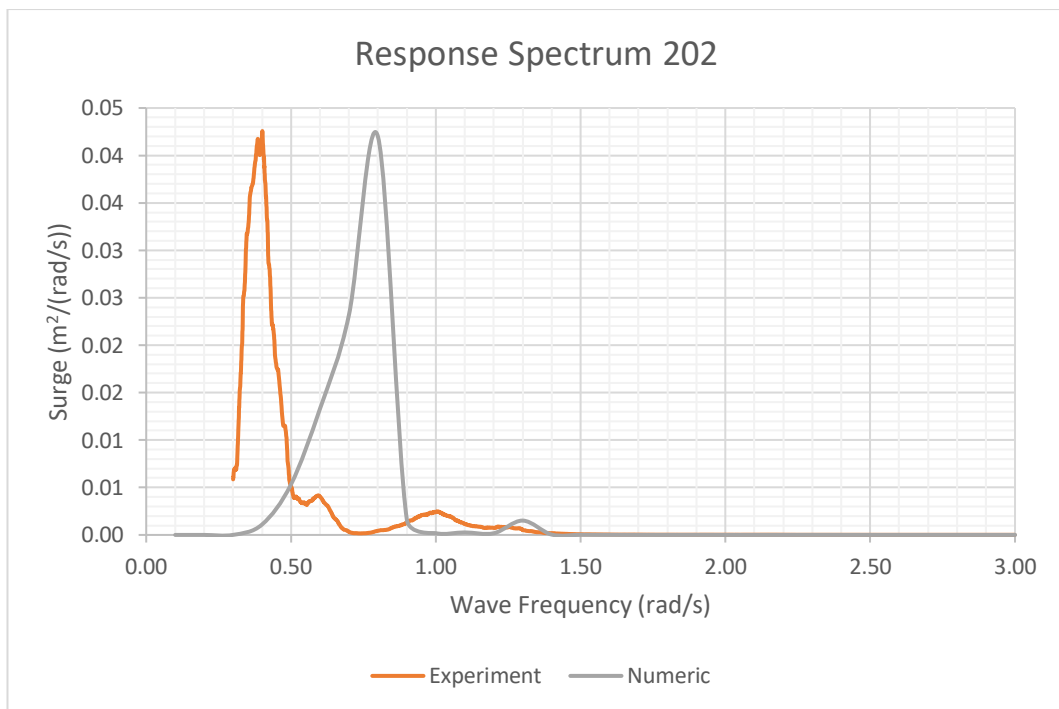
Pierson-Moskowitz Wave Spectrum 202				
Parameter	Unit	Eksperimen	Numeric	Error
m_0	m^2	2.55	2.54	0.63%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	1.58	1.62	2.67%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	1.10	1.20	8.43%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.94	1.22	30.44%
ω	rad/s	1.43	1.36	5.31%
T	s	10.17	9.84	3.21%
T_p	s	6.82	6.22	8.83%
T_z	s	9.56	9.16	4.27%
H_s	m	6.39	6.37	0.31%
H_{avg}	m	4.00	3.98	0.31%
$H_{1/10}$	m	8.12	8.09	0.31%
H^\wedge	m	11.99	11.98	0.01%

4.9.2. Mode Gerak Surge

Perbandingan spektra respon mode gerak *surge* antara eksperimen dan numeris pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.44 dan 4.45. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada spektra respon kode 201 mengingat *increment* pada sumbu *y* yang terlalu kecil. Pada spektra respon kode 202 terdapat selisih letak puncak sebesar 0.40 rad/s, puncak spektra respon eksperimen terdapat pada frekuensi gelombang 0.40 rad/s dan puncak spektra respon numeris terdapat pada frekuensi gelombang 0.80 rad/s.



Gambar 4. 44 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *surge* kode 201

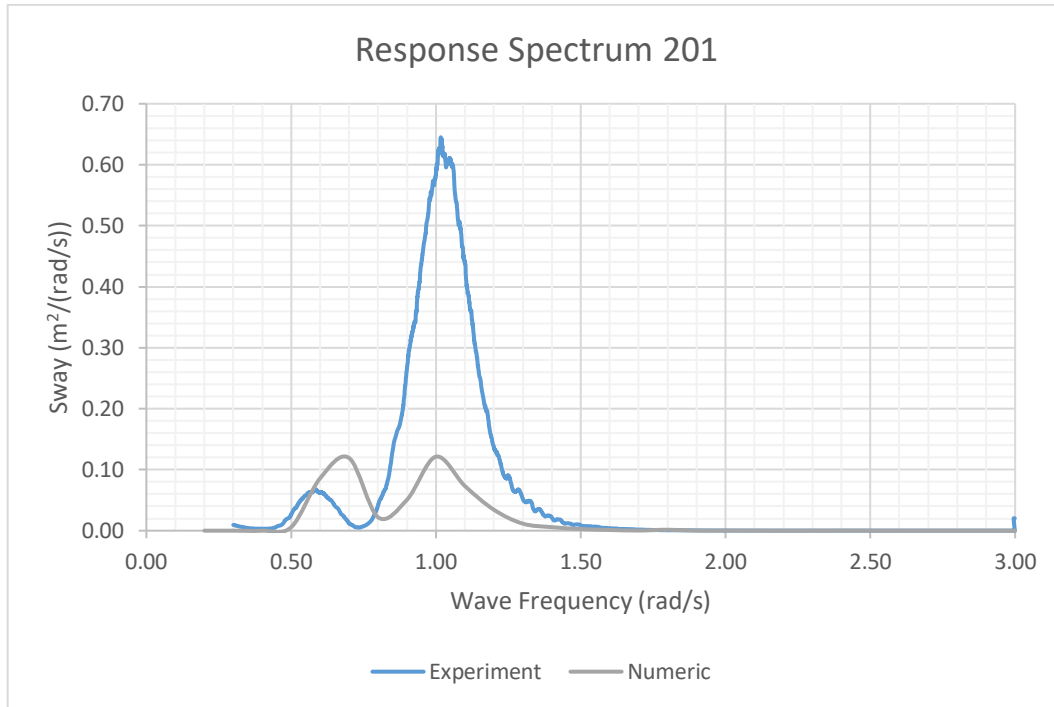


Gambar 4. 45 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *surge* kode 202

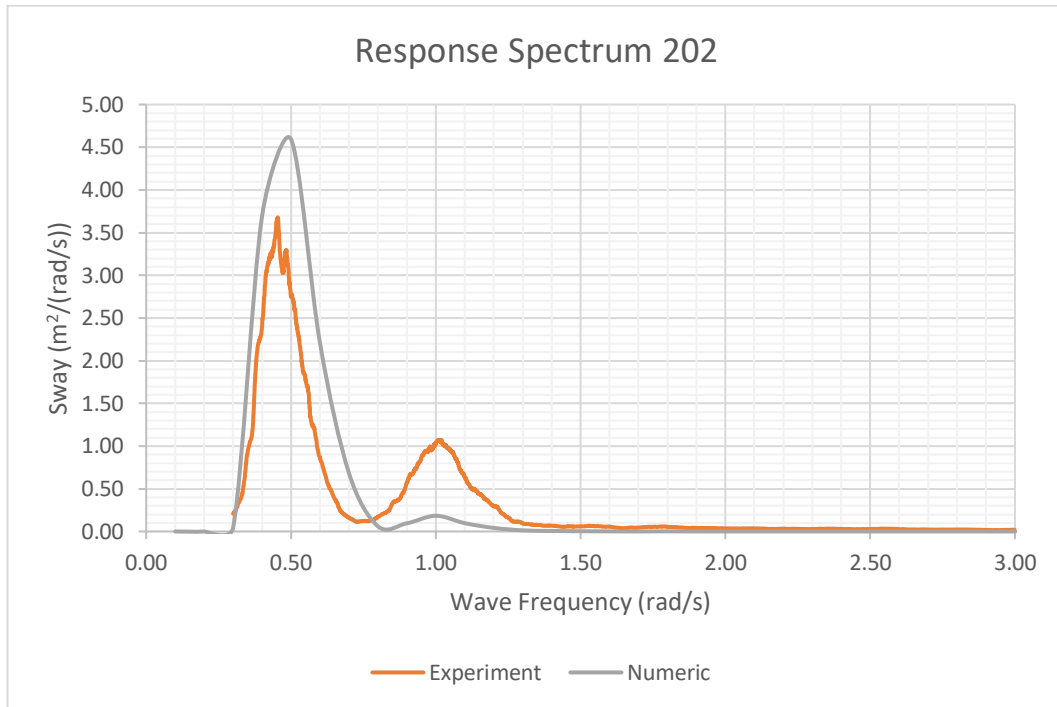
4.9.3. Mode Gerak Sway

Perbandingan spektra respon mode gerak *sway* antara eksperimen dan numeris pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.46 dan 4.47. Terdapat perbedaan tinggi

puncak yang signifikan pada spektra respon kode 201, yaitu pada frekuensi gelombang 1.00 rad/s. Pada spektra respon kode 202 terdapat perbedaan tinggi puncak yang cukup signifikan, yaitu pada frekuensi gelombang 0.45 rad/s dan 1.00 rad/s.



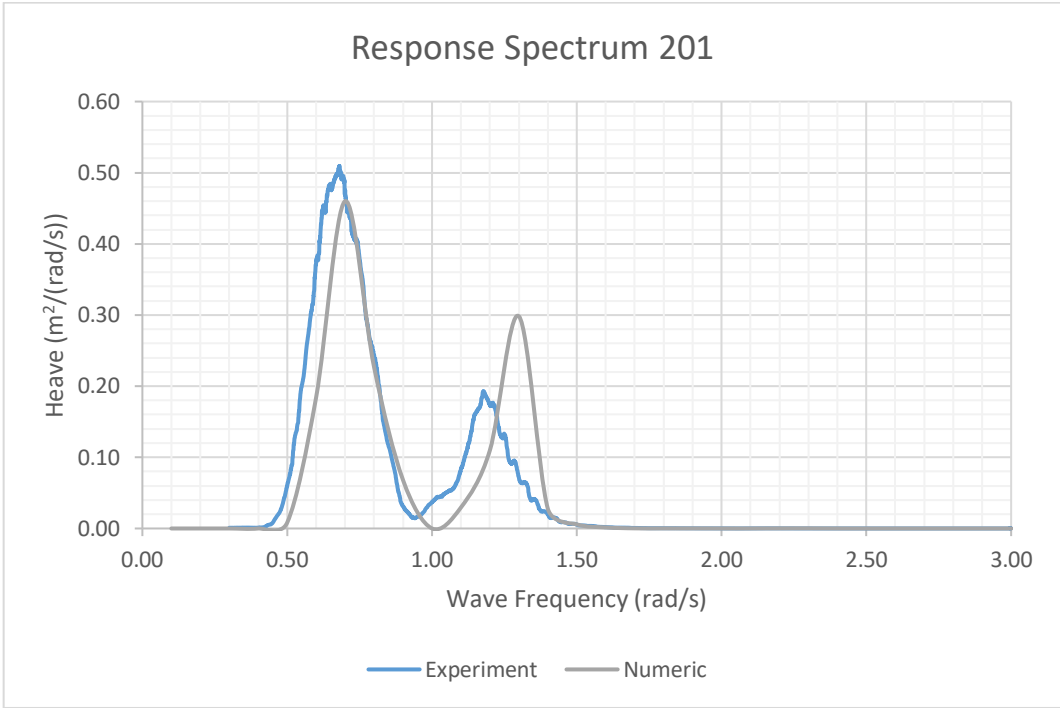
Gambar 4. 46 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *sway* kode 201



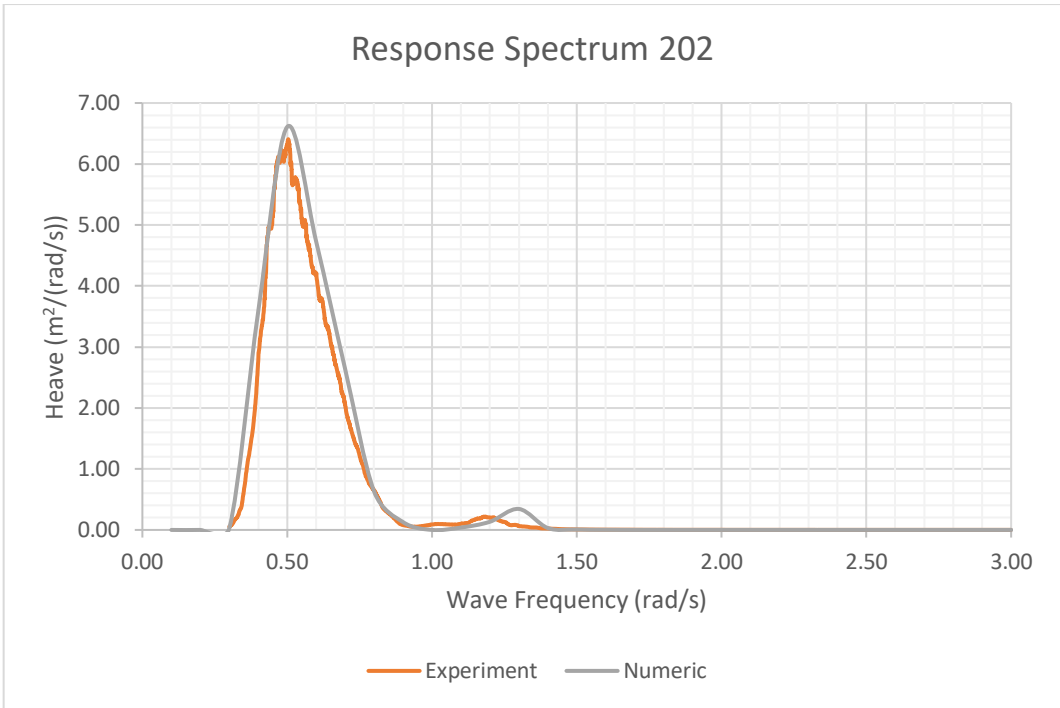
Gambar 4. 47 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *sway* kode 202

4.9.4. Mode Gerak *Heave*

Perbandingan spektra respon mode gerak *heave* antara eksperimen dan numeris pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.48 dan 4.49. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada kedua kondisi spektra respon.



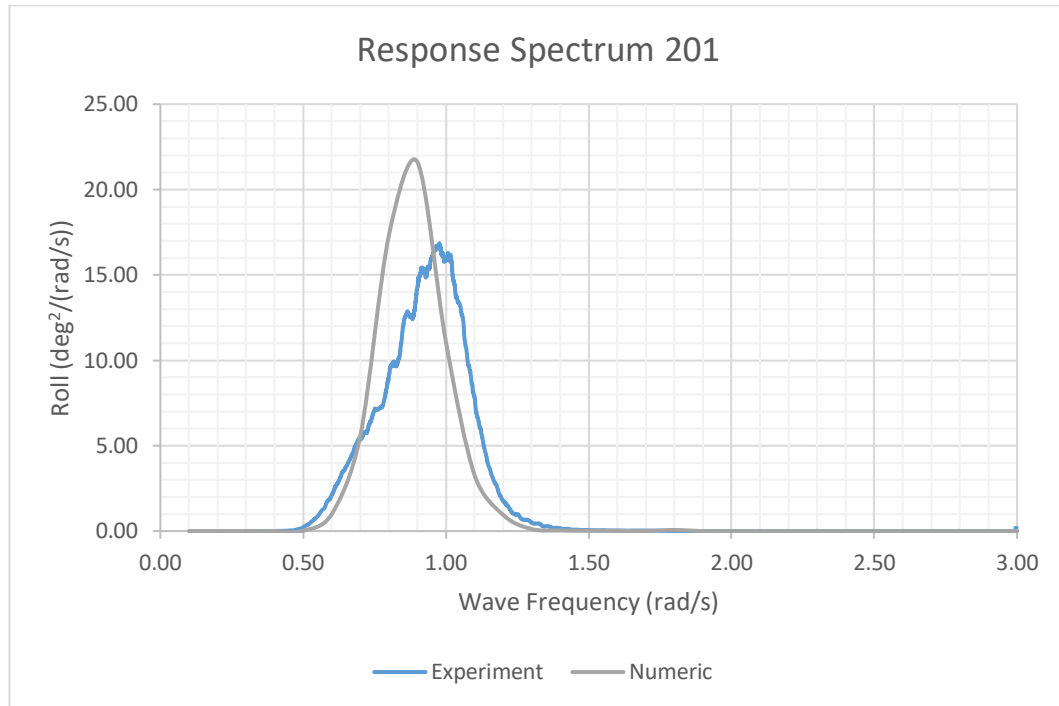
Gambar 4. 48 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *heave* kode 201



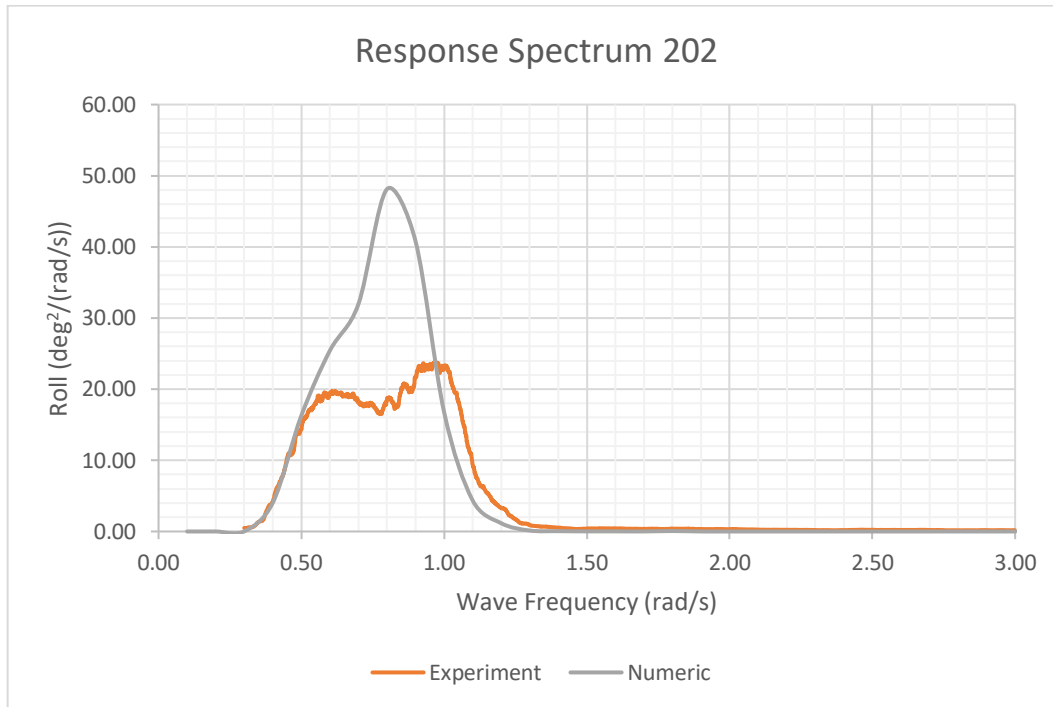
Gambar 4. 49 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *heave* kode 202

4.9.5. Mode Gerak *Roll*

Perbandingan spektra respon mode gerak *roll* antara eksperimen dan numeris pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.50 dan 4.51. Terdapat perbedaan tinggi puncak yang sangat signifikan.pada kedua kondisi spektra respon.



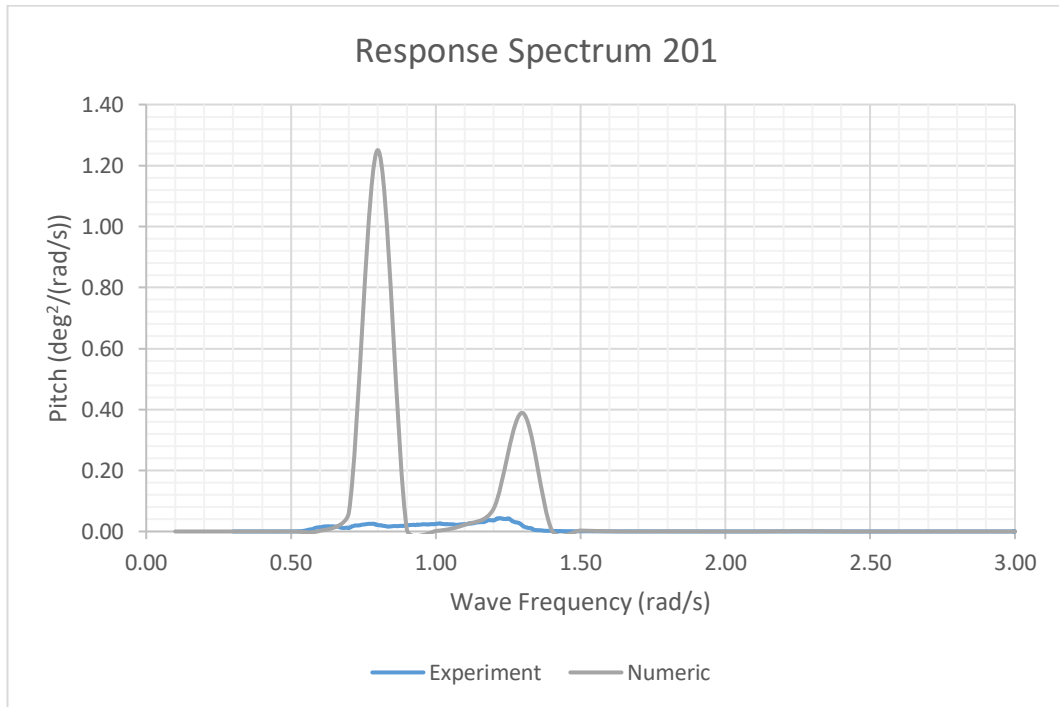
Gambar 4. 50 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *roll* kode 201



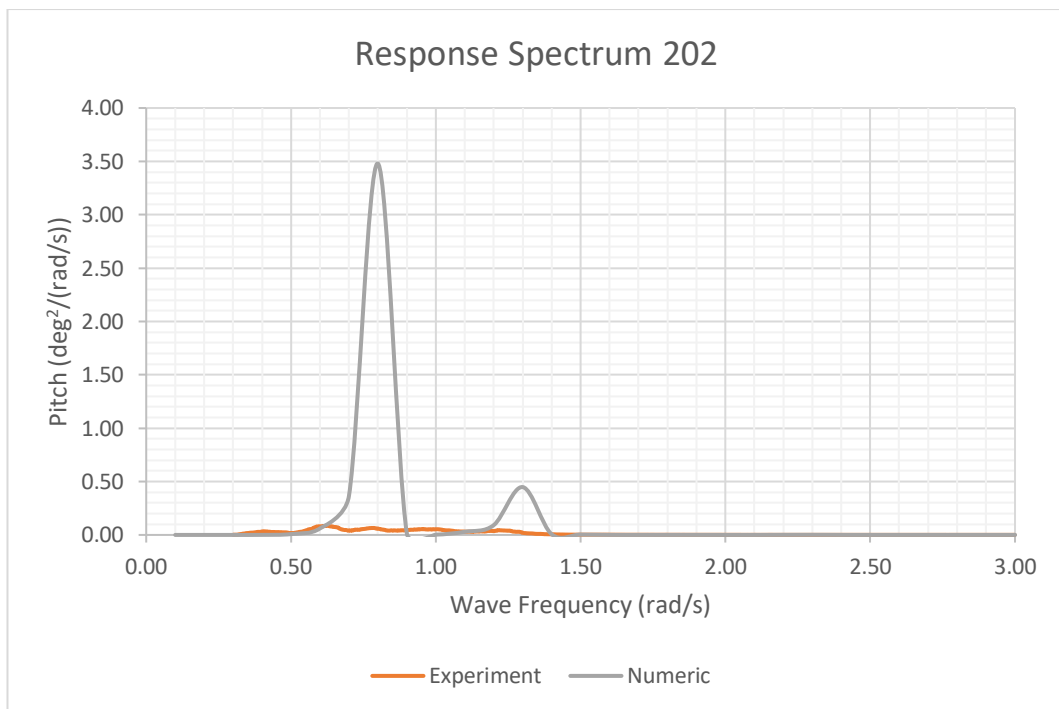
Gambar 4. 51 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *roll* kode 202

4.9.6. Mode Gerak *Pitch*

Perbandingan spektra respon mode gerak *pitch* antara eksperimen dan numeris pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.52 dan 4.53. Terdapat perbedaan tinggi puncak yang cukup signifikan pada spektra respon kode 201, yaitu pada frekuensi gelombang 1.80 rad/s dan 1.30 rad/s. Pada spektra respon kode 202 terdapat perbedaan tinggi puncak yang sangat signifikan, yaitu pada frekuensi gelombang 0.80 rad/s.



Gambar 4. 52 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *pitch* kode 201

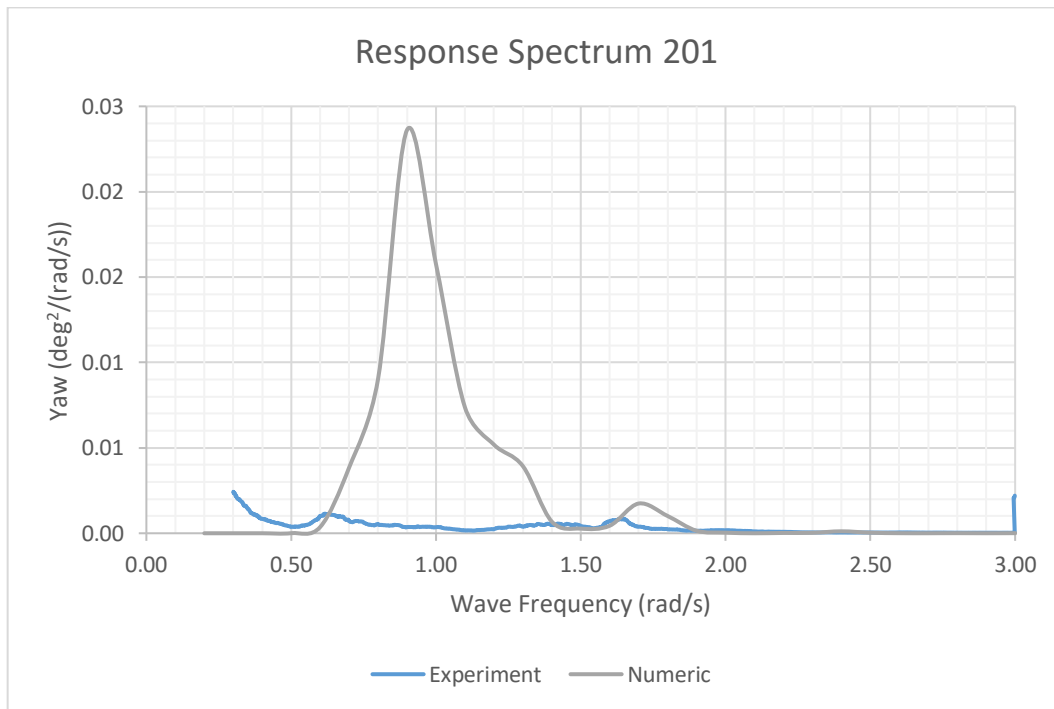


Gambar 4. 53 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak *pitch* kode 202

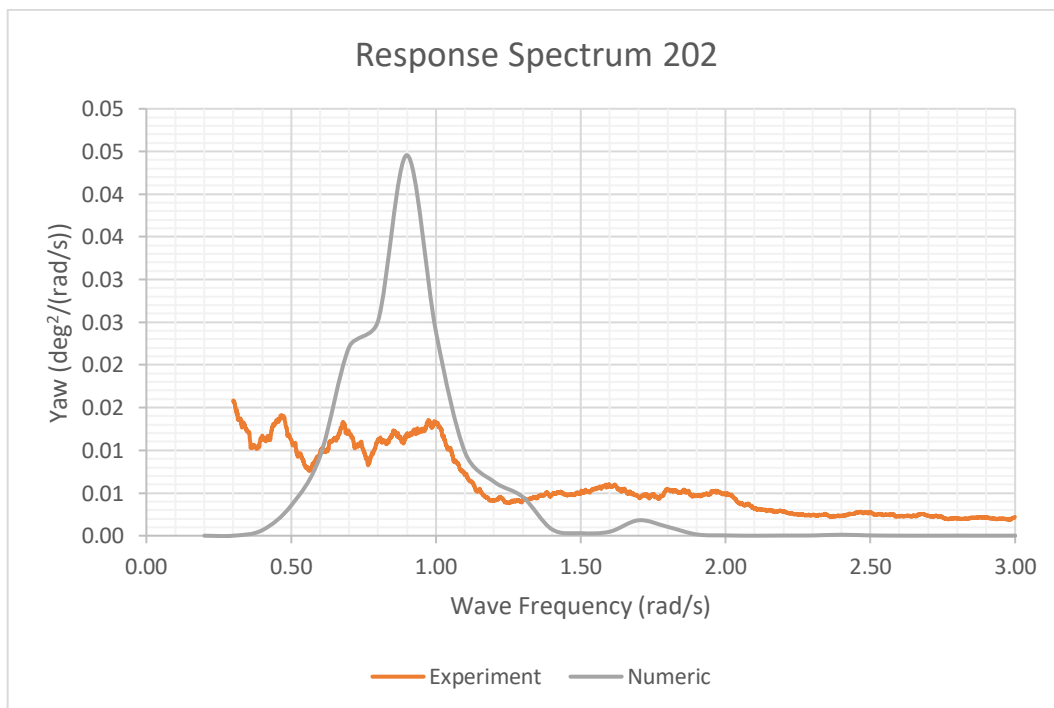
4.9.7. Mode Gerak *Yaw*

Perbandingan spektra respon mode gerak *yaw* antara eksperimen dan numeris pada kedua kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.54 dan 4.55. Tidak terdapat perbedaan

yang cukup signifikan pada kedua kondisi mengingat *increment* pada sumbu y yang terlalu kecil. Namun kedua kondisi memiliki pola spektra respon yang berbeda.



Gambar 4. 54 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak yaw kode 201



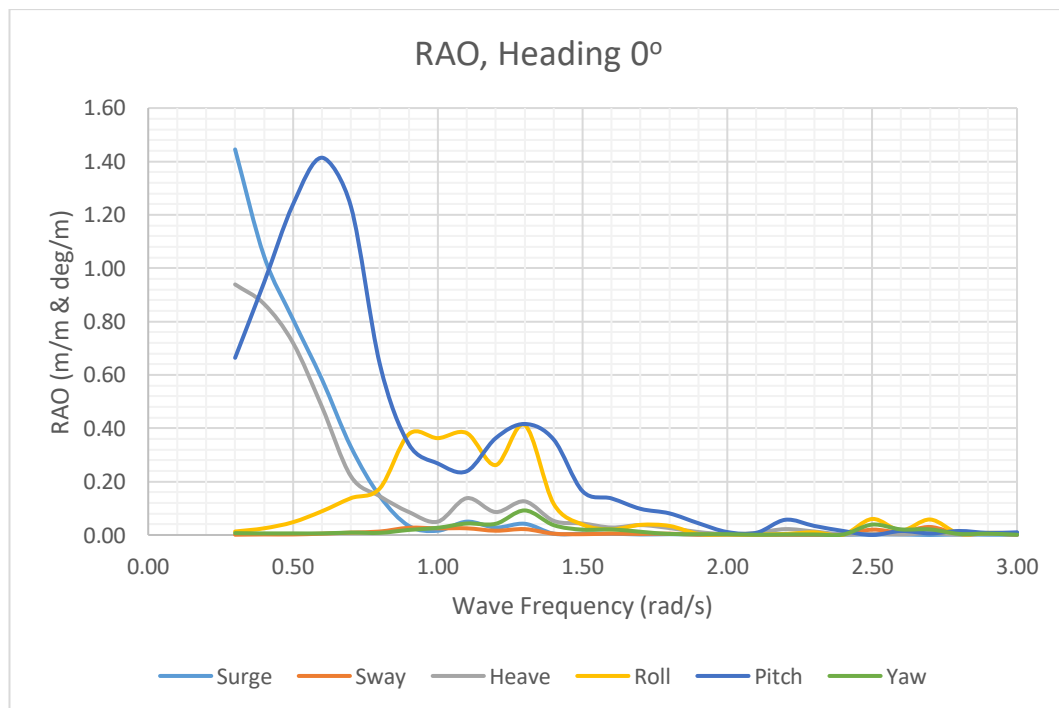
Gambar 4. 55 Grafik perbandingan spektra respon mode gerak yaw kode 202

4.10. Persiapan Analisis Operabilitas

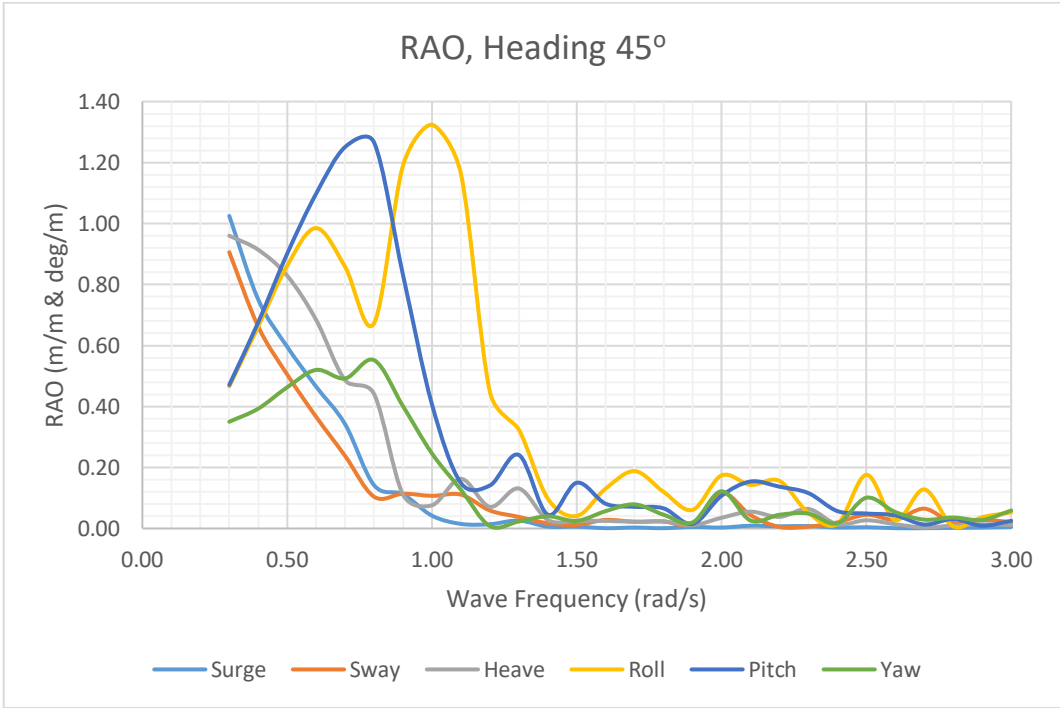
Sebelum melakukan analisis operabilitas yang berdasarkan gerak bangunan apung atau yang biasa disebut *vessel motion*, pada umumnya perlu disiapkan terlebih dahulu RAO dari bangunan apung, *wave scatter*, dan spektrum gelombang tempat bangunan apung akan dioperasikan. Analisis RAO dan spektrum gelombang menggunakan perangkat lunak MOSES. Model *meshing*, konfigurasi sistem tambat, dan parameter-parameter yang akan dipakai sama seperti yang dipakai dalam sub bab 4.1. dan 4.2.

4.10.1. RAO

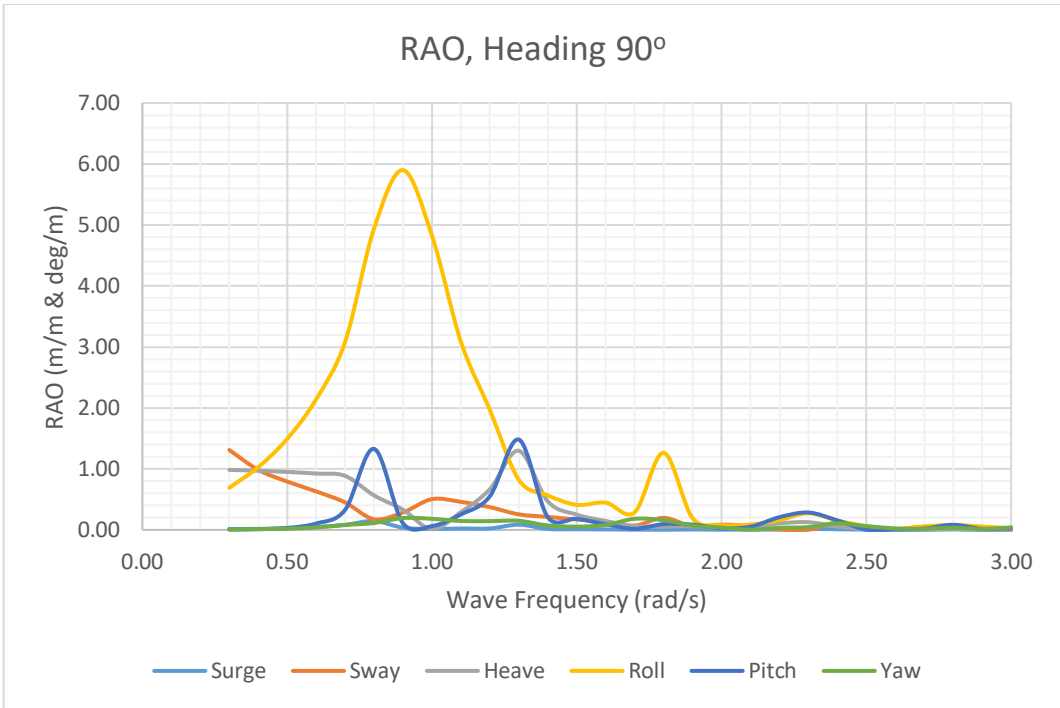
Dalam penelitian tugas akhir ini, batasan arah gelombang yang ditinjau adalah arah 0° , 45° , 90° , 135° , dan 180° . Sesuai dengan arah gelombang yang ditinjau maka *heading* RAO yang dibutuhkan sama seperti arah gelombang yang ditinjau. RAO dari setiap *heading* dapat dilihat pada Gambar 4.56 sampai 4.60.



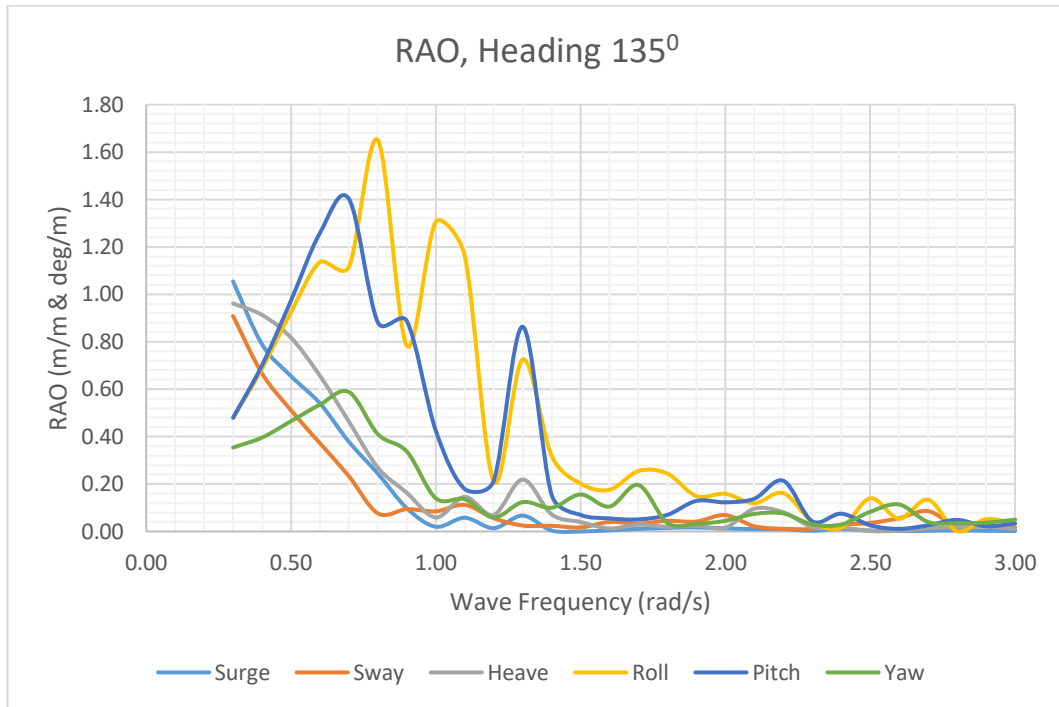
Gambar 4. 56 Grafik RAO heading 0°



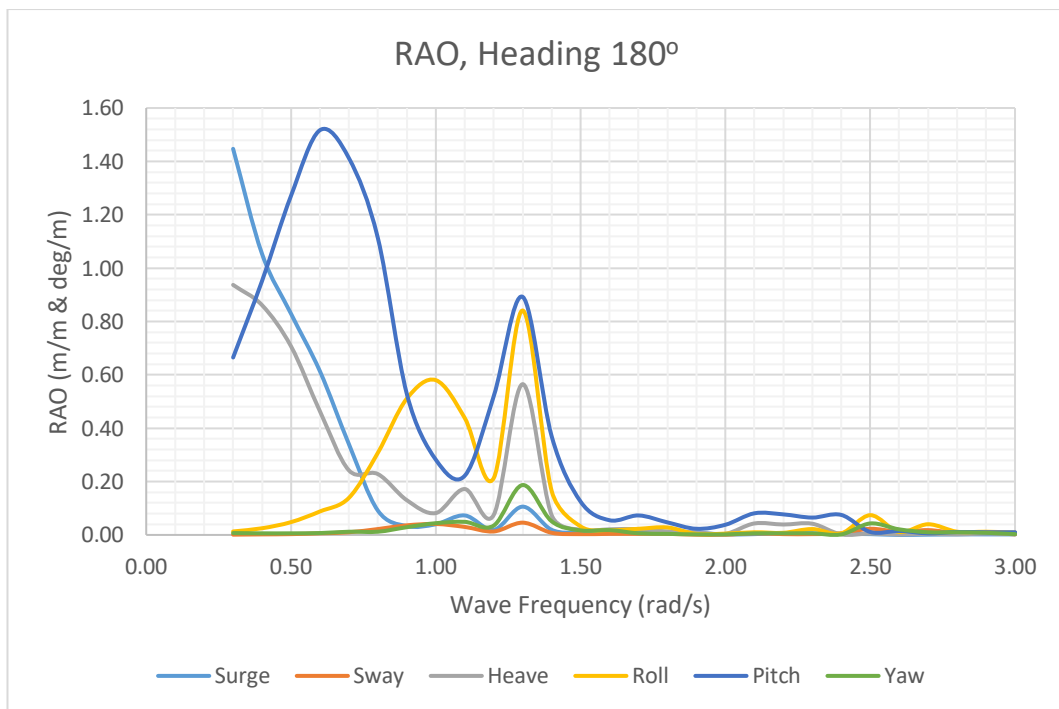
Gambar 4. 57 Grafik RAO heading 45°



Gambar 4. 58 Grafik RAO heading 90°



Gambar 4. 59 Grafik RAO *heading 135°*

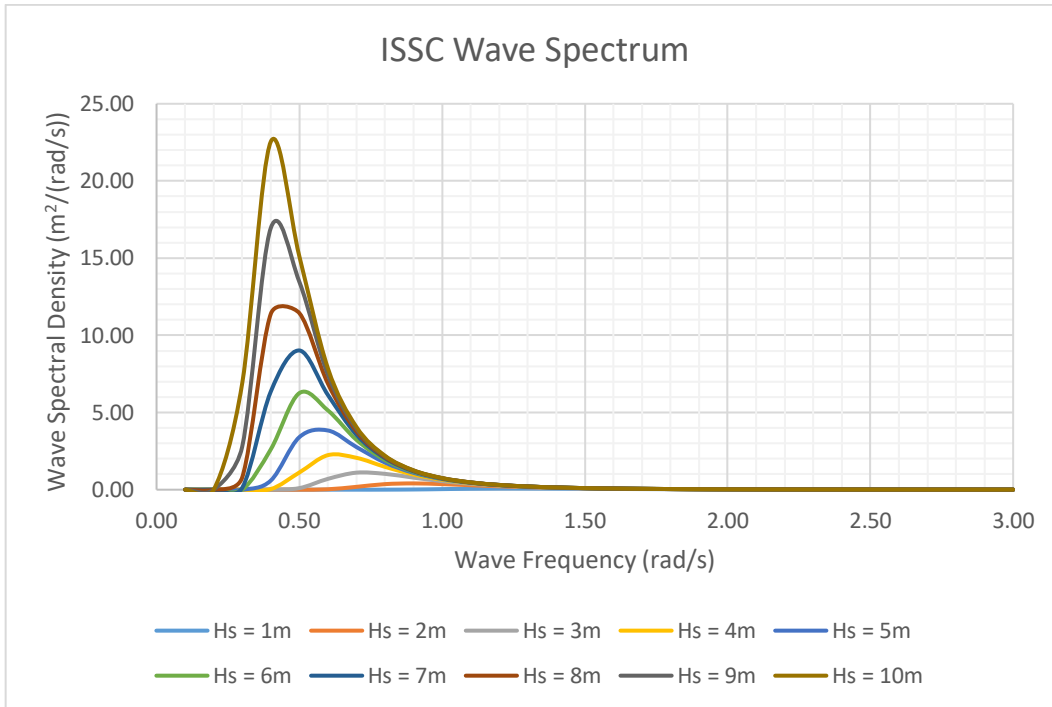


Gambar 4. 60 Grafik RAO *heading 180°*

4.10.2. Spektrum Gelombang

Spektrum gelombang yang digunakan dalam analisis operabilitas adalah spektrum gelombang ISSC. Spektrum gelombang ISSC digunakan berdasarkan untuk

menyerupai spektrum gelombang yang digunakan saat eksperimen yaitu spektrum gelombang Pierson-Moskowitz, dan karena MOSES tidak menyediakan opsi spektrum gelombang Pierson-Moskowitz. Variasi H_s dan T_p yang digunakan dalam analisis ini dapat dilihat pada Gambar 4.61 dan Tabel 4.15.

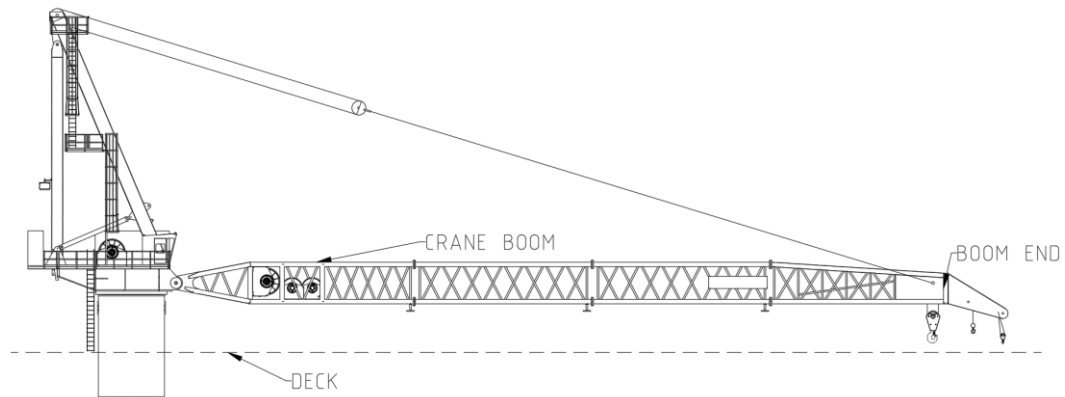


Gambar 4. 61 Grafik variasi spektrum gelombang ISSC

Tabel 4. 15 Variasi H_s dan T_p pada spektrum gelombang ISSC

ISSC Wave Spectrum		
H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)
1	3.86	5.00
2	5.46	7.08
3	6.69	8.67
4	7.72	10.01
5	8.63	11.19
6	9.46	12.26
7	10.21	13.24
8	10.92	14.15
9	11.58	15.01
10	12.21	15.82

4.10.3. Penentuan Koordinat *Crane Pedestal* dan *Boom End* pada *Crane*



Gambar 4. 62 *Crane* yang digunakan oleh *floating crane catamaran*

Dalam kriteria yang dipakai untuk menentukan operabilitas *crane* pada *crane vessel* yang telah dijelaskan pada sub bab 2.2.11., salah satu batasan *crane* dapat beroperasi adalah gerak *heave* pada ujung *boom*. Untuk mendapatkan gerakan ini perlu dilakukan analisis *relative motion* terhadap *crane pedestal* pada masing-masing *crane*. Analisis *relative motion* dilakukan menggunakan perangkat lunak MOSES. Sebelum dapat menganalisis *relative motion*, koordinat *boom end* dan *crane pedestal* dari tiap-tiap *crane* harus diketahui terlebih dahulu. Koordinat mengacu pada titik *zero point* bangunan apung pada MOSES. Koordinat *boom end* dan *crane pedestal* dari tiap-tiap *crane* dan radius tempuhnya dapat dilihat pada Tabel 4.17 dan 4.18 dan untuk mempermudah penulisan dibuat kode-kode yang penjelasannya dapat dilihat pada Tabel 4.16. Visualisasi posisi *crane* dapat dilihat pada Lampiran C.

Tabel 4. 16 Penjelasan kode-kode posisi *crane*

MOSES	
Code	Explanation
SBC1MI	Starboard Crane 225 Minimum Arm
SBC1MA	Starboard Crane 225 Maximum Arm
SBC2MI	Starboard Crane 270 Minimum Arm
SBC2MA	Starboard Crane 270 Maximum Arm
SBC3MI	Starboard Crane 315 Minimum Arm
SBC3MA	Starboard Crane 315 Maximum Arm
PSC1MI	Port Side Crane 45 Minimum Arm
PSC1MA	Port Side Crane 45 Maximum Arm
PSC2MI	Port Side Crane 90 Minimum Arm
PSC2MA	Port Side Crane 90 Maximum Arm
PSC3MI	Port Side Crane 135 Minimum Arm
PSC3MA	Port Side Crane 135 Maximum Arm
PSC4MI	Port Side Crane 180 Minimum Arm
PSC4MA	Port Side Crane 180 Maximum Arm
PSC5MI	Port Side Crane 225 Minimum Arm
PSC5MA	Port Side Crane 225 Maximum Arm

Tabel 4. 17 Koordinat *starboard crane*

Starboard Crane						
Arm	Minimum			Maximum		
	x	y	z	x	y	z
Crane Pedestal	37.79	12.98	14.40	37.79	12.98	14.40
225	46.17	21.36	70.20	76.53	51.71	17.73
270	37.79	24.83	70.20	37.79	67.76	17.73
315	29.41	21.36	70.20	-0.95	51.71	17.73

Tabel 4. 18 Koordinat *port side crane*

Port Side Crane						
Arm	Minimum			Maximum		
	x	y	z	x	y	z
Crane Pedestal	86.40	-12.98	14.40	86.40	-12.98	14.40
45	78.02	-21.36	70.20	47.67	-51.71	17.73
90	86.40	-24.83	70.20	86.40	-67.75	17.73
135	94.78	-21.36	70.20	125.13	-51.71	17.73
180	98.25	-12.98	70.20	141.17	-12.98	17.73
225	94.78	-4.60	70.20	125.13	25.75	17.73

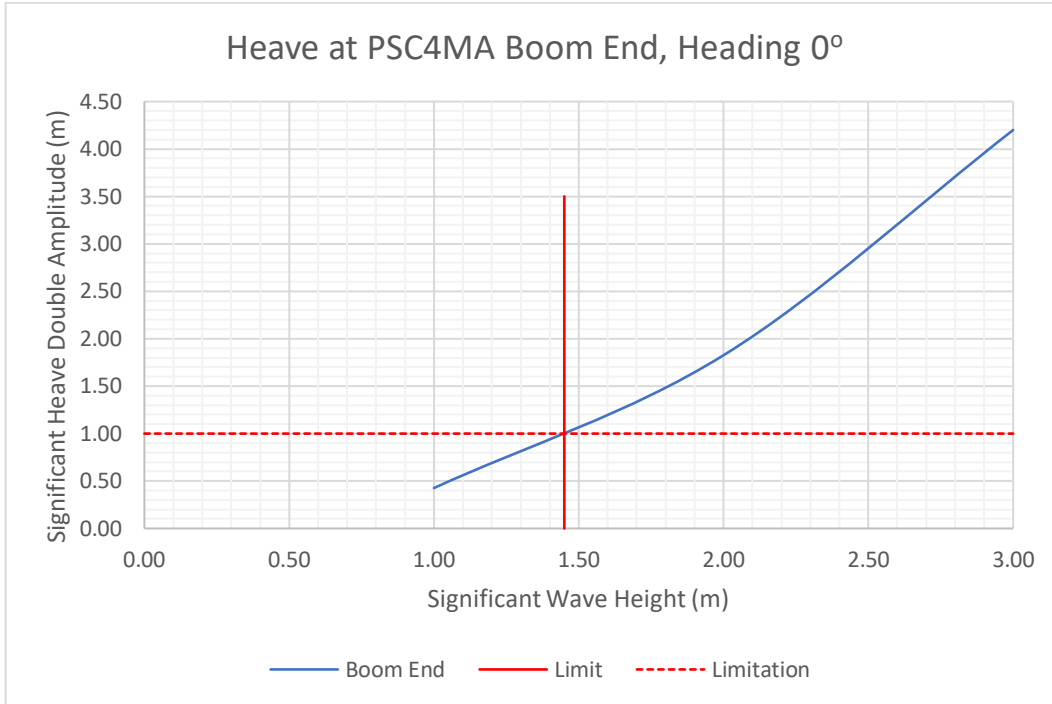
4.11. Analisis Operabilitas Crane

Kriteria yang digunakan dalam menentukan operabilitas *crane* menggunakan nilai tinggi signifikan atau *double amplitude* sebagai batasannya. *Double amplitude* didapatkan dari spektra respon. MOSES dapat mengeluarkan hasil statistik spektra respon yang sedang ditinjau, namun perlu diperhatikan bahwa MOSES selalu menampilkan data statistik berupa *single amplitude*. *Single amplitude* perlu dikali dengan 2 terlebih dahulu untuk mendapatkan data *double amplitude*.

Batasan tinggi gelombang signifikan untuk operasi crane tertera pada sub bab selanjutnya, namun hanya ditunjukkan grafik yang hanya menjadi batasan operasinya saja, untuk lebih lengkap mengenai semua grafik posisi yang ditinjau dapat dilihat pada Lampiran D.

4.11.1. Operabilitas Crane Heading 0°

Hubungan antara *significant double amplitude* dan batas operasi *crane* dapat dilihat dalam Gambar 4.63 dan penjelasan dari grafik dapat dilihat pada Tabel 4.19. Saat *heading* 0°, batas yang diperbolehkan untuk *crane* beroperasi secara maksimum adalah saat H_s 1.45 m. Operasi *crane* dibatasi oleh *port side crane* mengarah 180° saat radius jangkauan maksimum.



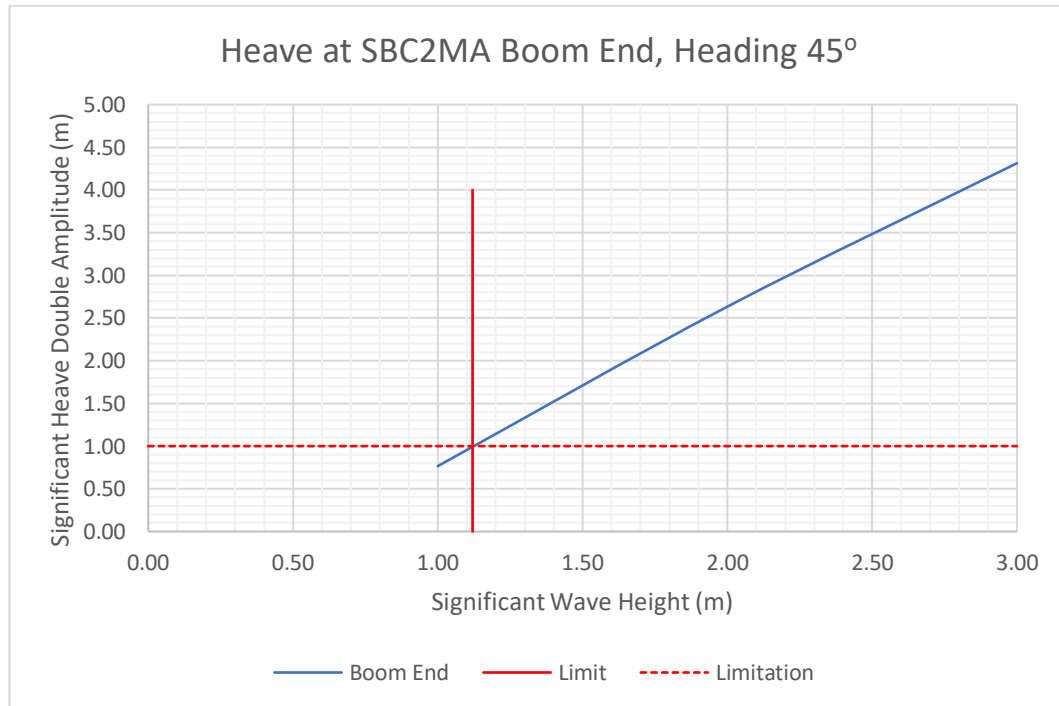
Gambar 4. 63 Grafik hubungan antara *significant heave double amplitude* dengan batas operasi *crane* saat *heading* 0° kode PSC4MA

Tabel 4. 19 Penjelasan dari grafik kode PSC4MA saat *heading* 0°

Operability	
H _s (m)	1.45
PSC4MA	Port Side Crane 180 Maximum Arm

4.11.2. Operabilitas Crane Heading 45°

Hubungan antara *significant double amplitude* dan batas operasi *crane* dapat dilihat dalam Gambar 4.64 dan penjelasan dari grafik dapat dilihat pada Tabel 4.20. Saat *heading* 45°, batas yang diperbolehkan untuk *crane* beroperasi secara maksimum adalah saat H_s 1.12 m. Operasi *crane* dibatasi oleh *starboard crane* mengarah 270° saat radius jangkauan maksimum.



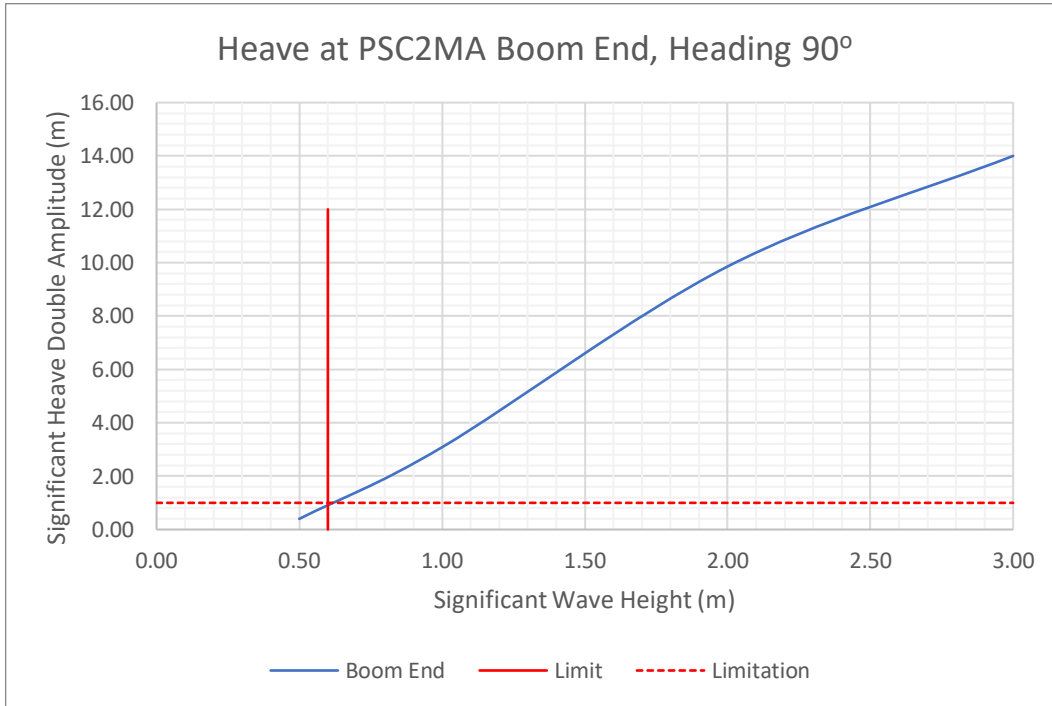
Gambar 4. 64 Grafik hubungan antara *significant heave double amplitude* dengan batas operasi *crane* saat *heading* 45° kode SBC2MA

Tabel 4. 20 Penjelasan dari grafik kode SBC2MA saat *heading* 45°

Operability	
H_s (m)	1.12
SBC2MA	Starboard Crane 270 Maximum Arm

4.11.3. Operabilitas Crane Heading 90°

Hubungan antara *significant double amplitude* dan batas operasi crane dapat dilihat dalam Gambar 4.65 dan penjelasan dari grafik dapat dilihat pada Tabel 4.21. Saat heading 90°, batas yang diperbolehkan untuk crane beroperasi secara maksimum adalah saat H_s 0.60 m. Operasi crane dibatasi oleh *port side crane* mengarah 90° saat radius jangkauan maksimum.



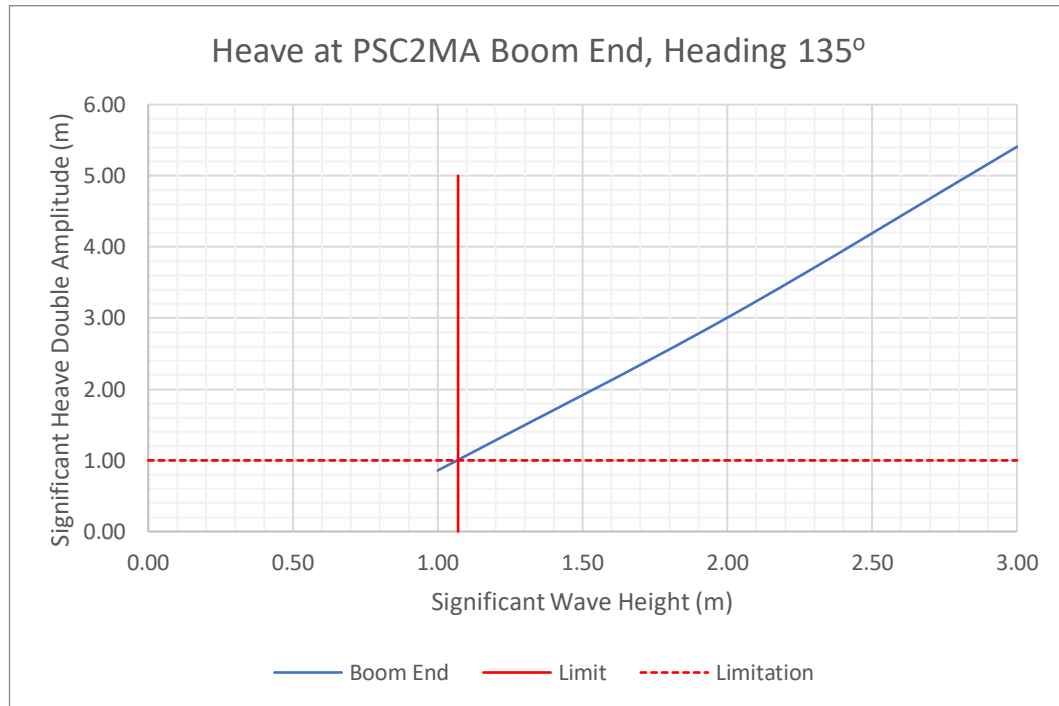
Gambar 4. 65 Grafik hubungan antara *significant heave double amplitude* dengan batas operasi crane saat heading 90° kode PSC2MA

Tabel 4. 21 Penjelasan dari grafik kode PSC2MA saat heading 90°

Operability	
H_s (m)	0.60
PSC2MA	Port Side Crane 90 Maximum Arm

4.11.4. Operabilitas Crane Heading 135°

Hubungan antara *significant double amplitude* dan batas operasi *crane* dapat dilihat dalam Gambar 4.66 dan penjelasan dari grafik dapat dilihat pada Tabel 4.22. Saat *heading* 135°, batas yang diperbolehkan untuk *crane* beroperasi secara maksimum adalah saat H_s 1.07 m. Operasi *crane* dibatasi oleh *port side crane* mengarah 90° saat radius jangkauan maksimum.



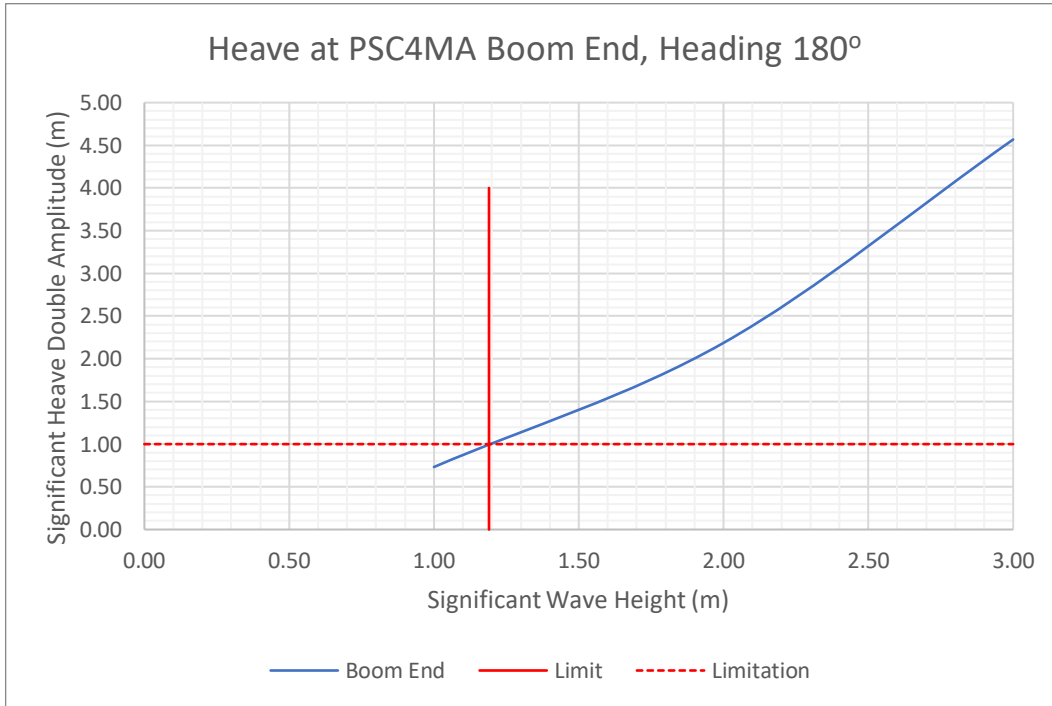
Gambar 4. 66 Grafik hubungan antara *significant heave double amplitude* dengan batas operasi *crane* saat *heading* 135° kode PSC2MA

Tabel 4. 22 Penjelasan dari grafik kode PSC2MA saat *heading* 135°

Operability	
H_s (m)	1.07
PSC2MA	Port Side Crane 90 Maximum Arm

4.11.5. Operabilitas *Crane Heading 180°*

Hubungan antara *significant double amplitude* dan batas operasi *crane* dapat dilihat dalam Gambar 4.67 dan penjelasan dari grafik dapat dilihat pada Tabel 4.23. Saat *heading 180°*, batas yang diperbolehkan untuk *crane* beroperasi secara maksimum adalah saat H_s 1.19 m. Operasi *crane* dibatasi oleh *port side crane* mengarah 180° saat radius jangkauan maksimum.



Gambar 4. 67 Grafik hubungan antara *significant heave double amplitude* dengan batas operasi *crane* saat *heading 180°* kode PSC4MA

Tabel 4. 23 Penjelasan dari grafik kode PSC4MA saat *heading 180°*

Operability	
H_s (m)	1.19
PSC4MA	Port Side Crane 180 Maximum Arm

BAB V

PENUTUP

1.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat setelah melakukan analisis dan menuliskan hasilnya dalam bab IV adalah untuk menjawab rumusan masalah pada bab I. Kesimpulan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Spektra respon hasil analisis numeris maupun eksperimen memiliki selisih yang berbeda-beda tergantung pada mode gerak yang ditinjau. Pada kode 201, mode gerak *pitch* memiliki selisih yang paling signifikan dibandingkan mode gerak yang lainnya yaitu sebesar 190.58% *error* antara tinggi signifikan *pitch* eksperimen (0.54°) dan numeris (1.57°). Dan pada kode 202, mode gerak *pitch* memiliki selisih yang paling signifikan dibandingkan mode gerak yang lainnya yaitu sebesar 184.33% *error* antara tinggi signifikan *pitch* eksperimen (0.84°) dan numeris (2.40°).
2. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan terjadinya selisih antara spektra respon hasil analisis numeris dan eksperimen adalah sebagai berikut:
 - a. Kualitas *meshing* model numeris. Dalam penelitian tugas akhir ini, MOSES hanya mampu membuat *meshing* sebanyak 7800 panel. Pada bagian-bagian tertentu *meshing* masih terlihat kasar. Hal ini dapat mengakibatkan perbedaan pada *displacement* dan bentuk lambung antara model skala eksperimen dan numeris. Model skala eksperimen memiliki *displacement* 8646 ton dan model numeris memiliki *displacement* 8567 ton.
 - b. Perbedaan bentuk lambung model numeris. Salah satu alasan berbedanya bentuk lambung adalah dengan *draft* yang sama (4.7 m) dihasilkan *displacement* yang berbeda antara model skala eksperimen dan model numeris. Bentuk lambung bangunan apung sangat berkaitan dengan gaya reaksi yang dihasilkan dari bangunan apung.

- c. Perbedaan kekakuan sistem tambat. Pada pemodelan eksperimen, kekakuan sistem tambat berasal dari pegas tunggal yang kekakuannya konstan, sedangkan pada pemodelan numeris sistem tambat dibuat *catenary* yang kekakuannya tidak konstan.
 - d. Selisih antara spektrum gelombang eksperimen dan numeris
3. Sesuai kriteria yang digunakan, yaitu Operation Limitations of Offshore Crane Vessels – Offshore Technology Conference, operabilitas *crane* pada *floating crane catamaran* dapat disimpulkan sebagai berikut:
- a. *Crane* pada *floating crane catamaran* memiliki operabilitas yang paling tinggi saat *heading vessel* 0° terhadap arah datang gelombang (*head seas*). *Crane* dapat beroperasi secara maksimum hingga H_s 1.45 m.
 - b. *Crane* pada *floating crane catamaran* memiliki operabilitas yang paling rendah saat *heading vessel* 90° terhadap arah datang gelombang (*beam seas*). *Crane* dapat beroperasi secara maksimum hingga H_s 0.60 m.
 - c. Dari setiap *heading vessel* terhadap arah datang gelombang, *port side crane* dan *starboard crane* memiliki operabilitas yang selalu berbeda. Ini disebabkan oleh letak *crane pedestal* yang berbeda dari kedua *crane*, dalam penelitian tugas akhir ini letaknya tidak simetris.

1.2. Saran

Saran yang dapat penulis berikan kepada peneliti selanjutnya yang akan melanjutkan penelitian serupa adalah sebagai berikut:

1. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap sistem tambat model eksperimen yang bisa merepresentasikan sistem tambat *catenary* pada keadaan *real*.
2. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap model numeris menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA. ANSYS AQWA dapat menghasilkan *meshing* dengan jumlah panel yang lebih banyak.
3. Dapat dilakukan penelitian lebih lanjut terkait operabilitas *crane* saat *crane* mengangkat muatannya menggunakan kriteria dari DNVGL.

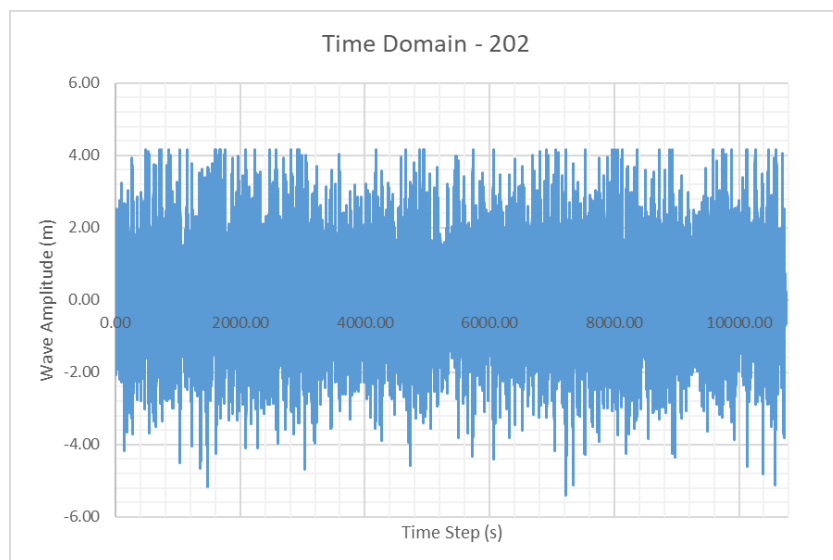
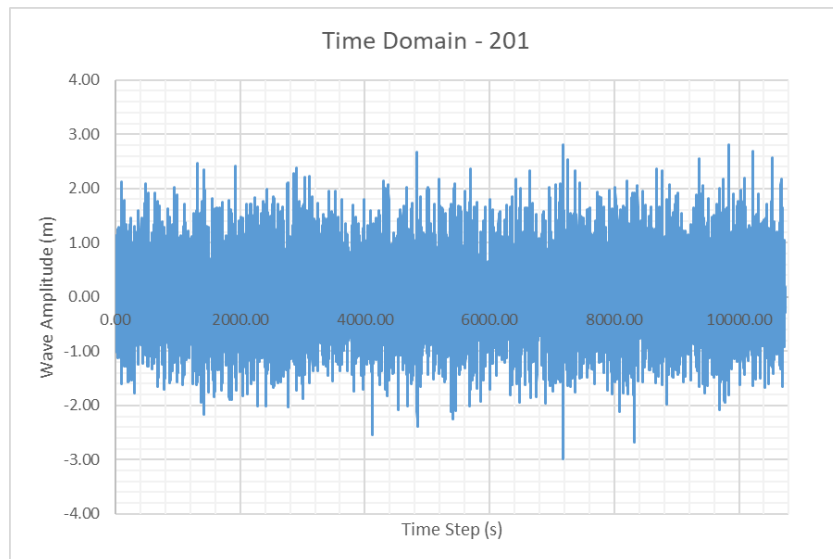
DAFTAR PUSTAKA

- Chakrabarti, Subrata Kumar. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Dorchester: Computational Mechanics Publications, 1987.
- Chakrabarti, Subrata Kumar. *Offshore Structure Modeling*. Singapore: World Scientific Publishing, 1994.
- Chen, Xiaohong, Jun Zhang, dan W. Ma. "On Dynamic Coupling Effects between a SPAR and Its Mooring Lines." *Ocean Engineering* 28 (2001): 863-887.
- Clauss, G. F. dan T. Riekert. "Operational Limitations of Offshore Crane Vessels." *Offshore Technology Conference* 6217 (1990): 161-170.
- Djarmiko, Eko Budi. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: ITS Press, 2012.
- Faltinsen, O. M. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- Jiang, Zhiyu et al. "Dynamic Response Analysis of a Catamaran Installation Vessel during the Positioning of a Wind Turbine Assembly onto a SPAR Foundation." *Marine Structures* 61 (2018): 1-24.
- Journee, J. M. J. dan W. W. Massie. *Offshore Hydromechanics*. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- Munson, M. Arthur. "A Study on the Importance of and Time Spent on Different Modeling Steps." *SIGKDD Explorations* 13, no. 2 (2009): 65-71.
- Newman, J. N. *Marine Hydrodynamics*. Massachusetts: MIT, 1977.
- Pierson, Willard J. Jr. dan Lionel Moskowitz. "A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii." *Journal of Geophysical Research* 69, no. 24 (1964): 5181-5190.

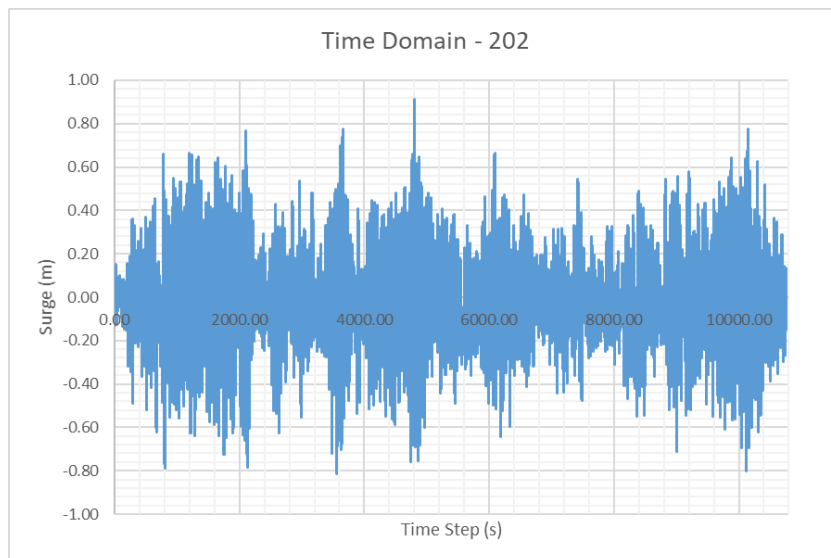
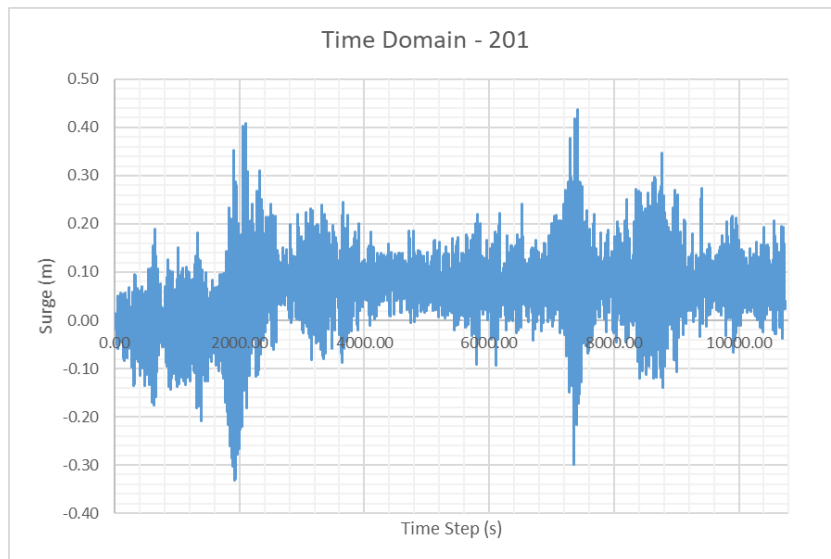
- Pratiwi, Intan Sukma Bella. *Analisa Kinerja Floating Crane Vessel saat Proses Pengangkatan dalam Operasi Jacket Platform Removal*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- Rosenkranz, Volker H. dan Carlos Alvarez-Cascos G. Maurino. "On-Board STS-Crane on a Catamaran Container Vessel as Combination of Jib- and Gantry-crane Serving Small Ports, Improving Logistic Efficiency." *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 48 (2012): 3471-3481.
- Sarpkaya, Turgut "Sarp". *Wave Forces on Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- Stendal, Lars Christian. *Analysis Methods for Mooring Systems with Focus on Accidental Limit State*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- Sun, Yougang et al. "Dynamics Analysis and Active Control of a Floating Crane." *Tehnicki Vjesnik* 22, Juni (2015): 1383-1391.

LAMPIRAN A
***TIME HISTORY* EKSPERIMEN**

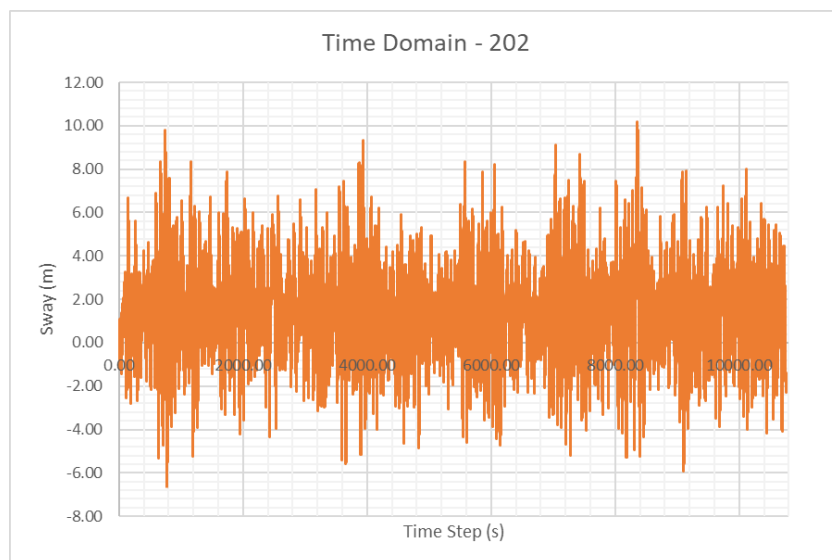
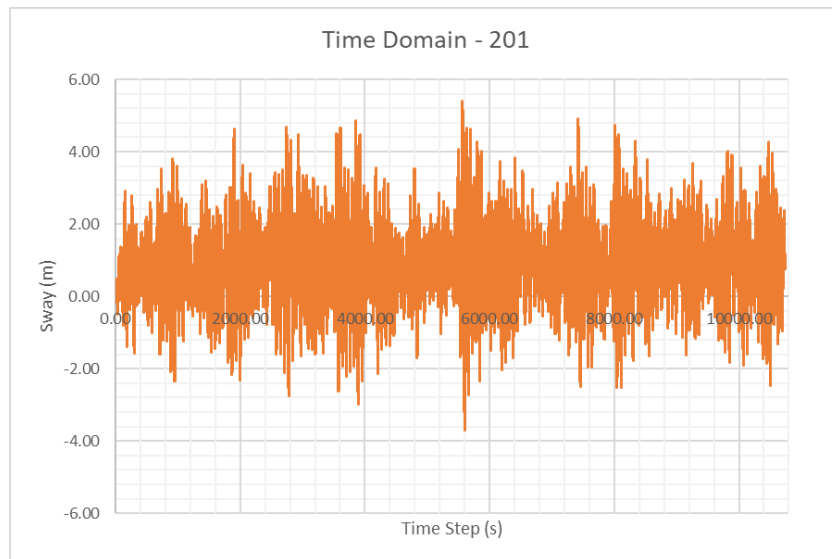
Di bawah ini merupakan grafik *time history* gelombang eksperimen kode 201 dan 202.



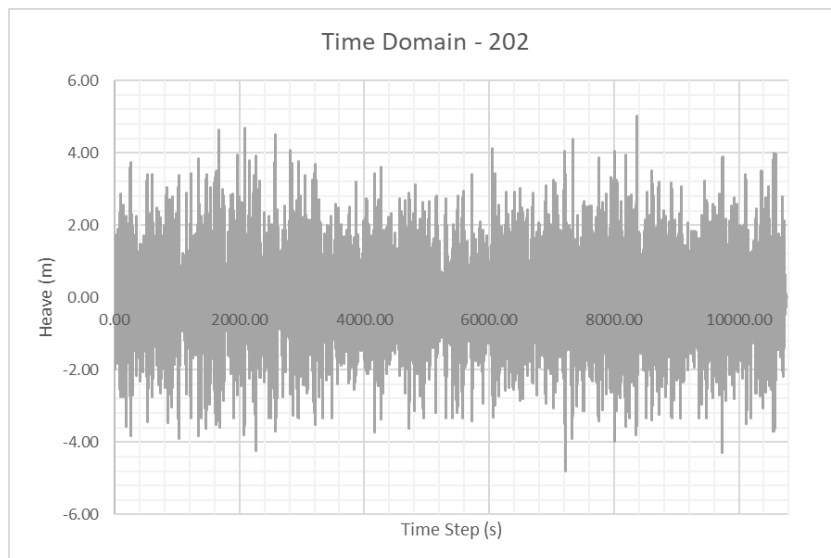
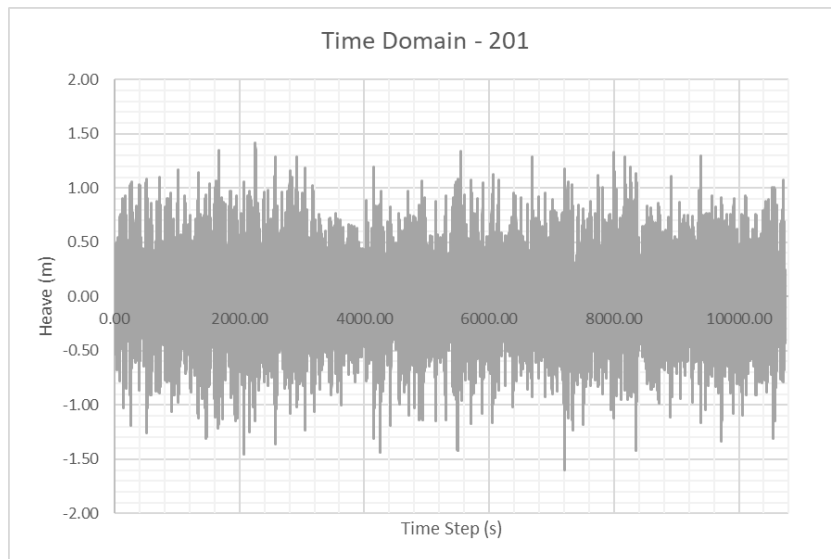
Di bawah ini merupakan grafik *time history* gerakan *surge* eksperimen kode 201 dan 202.



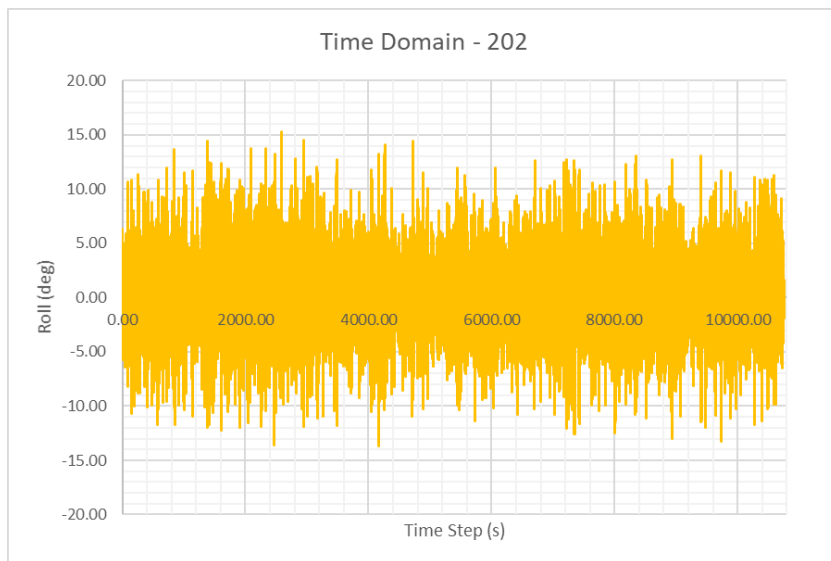
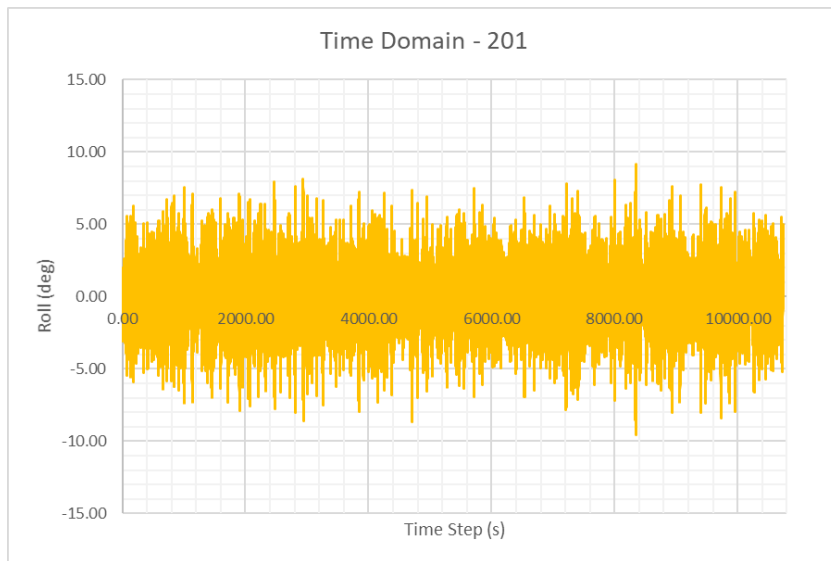
Di bawah ini merupakan grafik *time history* gerakan *sway* eksperimen kode 201 dan 202.



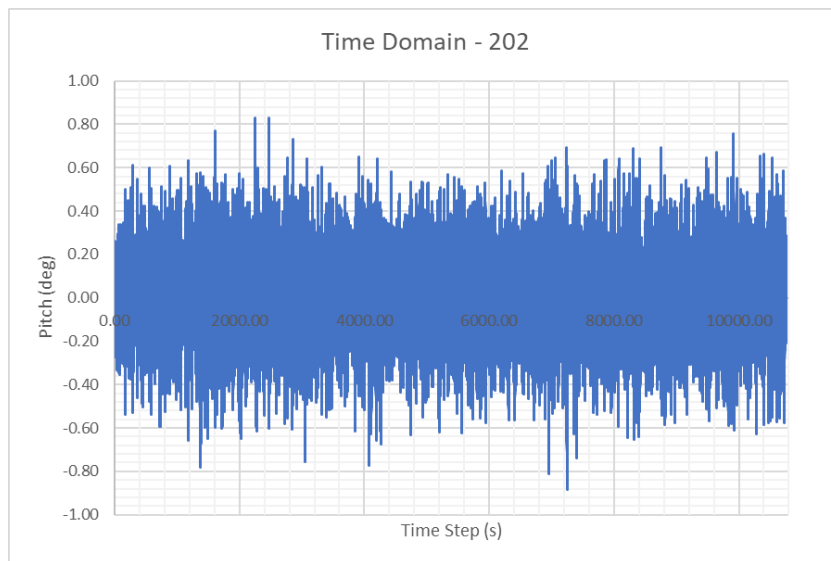
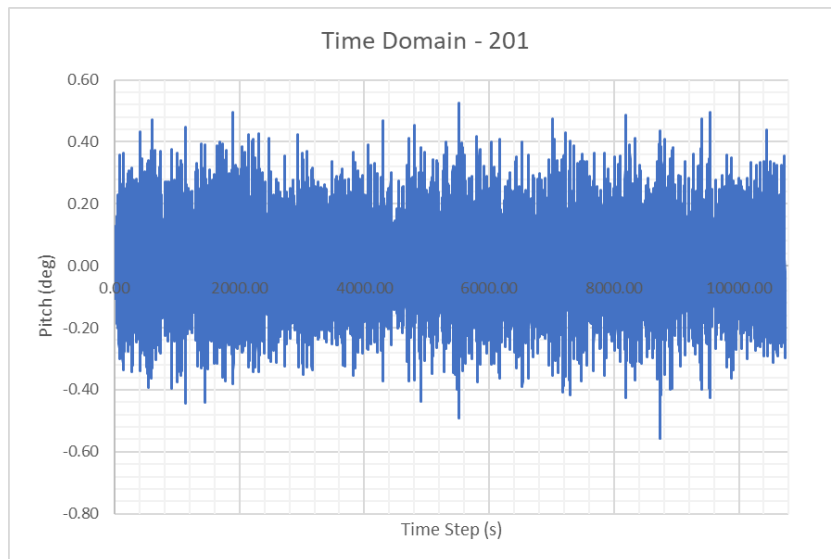
Di bawah ini merupakan grafik *time history* gerakan *heave* eksperimen kode 201 dan 202.



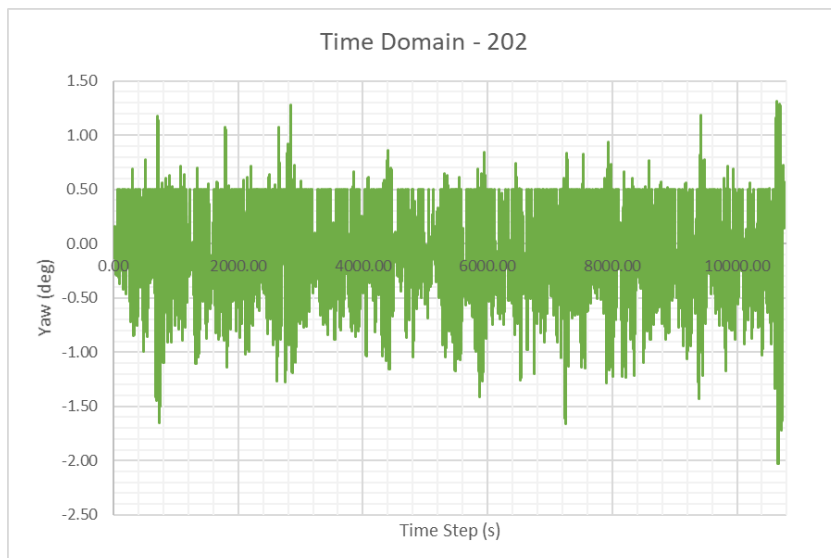
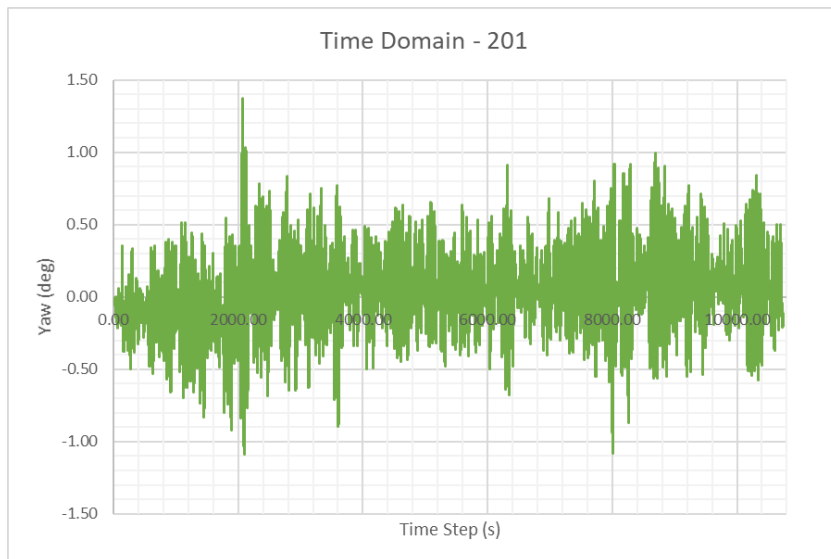
Di bawah ini merupakan grafik *time history* gerakan *roll* eksperimen kode 201 dan 202.



Di bawah ini merupakan grafik *time history* gerakan *pitch* eksperimen kode 201 dan 202.



Di bawah ini merupakan grafik *time history* gerakan yaw eksperimen kode 201 dan 202.



LAMPIRAN B
STATISTIK SPEKTRA RESPON

Berikut adalah statistik spektra respon mode gerakan *surge* dan *sway* eksperimen dan numeris kode 201.

Response Spectrum 201				
Surge				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	m^2	0.00	0.00	360.29%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	0.00	0.00	276.84%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.00	0.00	199.95%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.00	0.00	88.44%
ω	rad/s	0.92	1.16	25.63%
T	s	6.21	7.58	22.15%
T_p	s	5.27	6.65	26.17%
T_z	s	5.99	7.42	23.88%
ζ_{xs}	m	0.08	0.18	114.54%
ζ_{xavg}	m	0.05	0.11	114.54%
$\zeta_{x1/10}$	m	0.10	0.22	114.54%
ζ_x^{\wedge}	m	0.16	0.33	111.46%

Response Spectrum 201				
Sway				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	m^2	0.17	0.05	68.14%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	0.17	0.05	72.17%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.18	0.04	74.94%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.22	0.05	78.18%
ω	rad/s	0.95	1.06	11.08%
T	s	6.18	7.07	14.48%
T_p	s	5.69	6.10	7.15%
T_z	s	6.08	6.86	12.77%
ζ_{ys}	m	1.64	0.92	43.55%
ζ_{yavg}	m	1.02	0.58	43.55%
$\zeta_{y1/10}$	m	2.08	1.17	43.55%
ζ_y^{\wedge}	m	3.16	1.77	44.01%

Berikut adalah statistik spektra respon mode gerakan *heave* dan *roll* eksperimen dan numeris kode 201.

Response Spectrum 201				
Heave				
Parameter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	m^2	0.16	0.15	3.07%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	0.13	0.14	9.09%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.11	0.14	23.09%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.12	0.18	51.42%
ω	rad/s	1.13	1.00	11.37%
T	s	7.71	6.85	11.14%
T_p	s	6.21	5.60	9.84%
T_z	s	7.39	6.56	11.26%
ζ_{zs}	m	1.59	1.56	1.54%
ζ_{zavg}	m	0.99	0.98	1.54%
$\zeta_{z1/10}$	m	2.02	1.99	1.54%
ζ_z^{\wedge}	m	3.03	3.01	0.74%

Response Spectrum 201				
Roll				
Parameter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	deg^2	5.72	6.11	6.87%
m_1	$\text{deg}^2(\text{rad/s})$	5.30	5.41	2.21%
m_2	$\text{deg}^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	5.05	4.88	3.33%
m_4	$\text{deg}^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	5.06	4.19	17.08%
ω	rad/s	1.05	1.11	5.73%
T	s	6.79	7.10	4.56%
T_p	s	6.28	6.78	7.98%
T_z	s	6.69	7.03	5.14%
ζ_{rxs}	deg	9.57	9.89	3.38%
ζ_{rxavg}	deg	5.98	6.18	3.38%
$\zeta_{rx1/10}$	deg	12.15	12.56	3.38%
ζ_{rx}^{\wedge}	deg	18.39	18.94	3.03%

Berikut adalah statistik spektra respon mode gerakan *pitch* dan *yaw* eksperimen dan numeris kode 201.

Response Spectrum 201				
Pitch				
Parameter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	deg^2	0.02	0.15	744.38%
m_1	$\text{deg}^2(\text{rad/s})$	0.02	0.15	723.87%
m_2	$\text{deg}^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.02	0.16	711.57%
m_4	$\text{deg}^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.03	0.21	709.28%
ω	rad/s	0.94	0.95	1.52%
T	s	6.20	6.36	2.49%
T_p	s	5.48	5.49	0.14%
T_z	s	6.04	6.17	2.00%
ζ_{rys}	deg	0.54	1.57	190.58%
ζ_{ryavg}	deg	0.34	0.98	190.58%
$\zeta_{ry1/10}$	deg	0.69	1.99	190.58%
ζ^{\wedge}_{ry}	deg	1.05	3.03	190.20%

Response Spectrum 201				
Yaw				
Parameter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	deg^2	0.00	0.01	725.01%
m_1	$\text{deg}^2(\text{rad/s})$	0.00	0.01	686.44%
m_2	$\text{deg}^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.00	0.01	486.95%
m_4	$\text{deg}^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.00	0.01	140.12%
ω	rad/s	0.70	0.94	33.99%
T	s	5.96	6.25	4.90%
T_p	s	3.42	5.34	56.35%
T_z	s	5.14	6.09	18.56%
ζ_{rzs}	deg	0.12	0.35	187.23%
ζ_{rzavg}	deg	0.08	0.22	187.23%
$\zeta_{rz1/10}$	deg	0.15	0.44	187.23%
ζ^{\wedge}_{rz}	deg	0.24	0.68	184.02%

Berikut adalah statistik spektra respon mode gerakan *surge* dan *sway* eksperimen dan numeris kode 202.

Response Spectrum 202				
Surge				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	m^2	0.01	0.01	31.69%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	0.00	0.01	94.63%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.00	0.00	140.57%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.00	0.00	70.97%
ω	rad/s	1.64	1.32	19.09%
T	s	12.77	8.64	32.34%
T_p	s	6.54	7.76	18.62%
T_z	s	11.46	8.48	26.01%
ζ_{xs}	m	0.31	0.36	14.75%
ζ_{xavg}	m	0.20	0.22	14.75%
$\zeta_{x1/10}$	m	0.40	0.46	14.75%
ζ_x^{\wedge}	m	0.58	0.68	17.25%

Response Spectrum 202				
Sway				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	m^2	0.99	0.05	94.62%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	0.72	0.05	93.42%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.71	0.04	93.69%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	1.70	0.05	97.21%
ω	rad/s	1.02	1.06	4.31%
T	s	8.65	7.07	18.23%
T_p	s	4.05	6.10	50.36%
T_z	s	7.43	6.86	7.65%
ζ_{ys}	m	3.98	0.92	76.81%
ζ_{yavg}	m	2.49	0.58	76.81%
$\zeta_{y1/10}$	m	5.06	1.17	76.81%
ζ_y^{\wedge}	m	7.60	1.77	76.68%

Berikut adalah statistik spektra respon mode gerakan *heave* dan *roll* eksperimen dan numeris kode 202.

Response Spectrum 202				
Heave				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	m^2	1.63	1.91	17.33%
m_1	$m^2(\text{rad/s})$	0.93	1.10	18.86%
m_2	$m^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.57	0.69	21.15%
m_4	$m^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.31	0.39	24.88%
ω	rad/s	1.63	1.60	1.89%
T	s	11.04	10.90	1.29%
T_p	s	8.51	8.38	1.50%
T_z	s	10.64	10.47	1.59%
ζ_{zs}	m	5.11	5.53	8.32%
ζ_{zavg}	m	3.19	3.46	8.32%
$\zeta_{z1/10}$	m	6.49	7.03	8.32%
ζ_z^{\wedge}	m	9.50	10.30	8.45%

Response Spectrum 202				
Roll				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	deg^2	13.85	18.85	36.08%
m_1	$\text{deg}^2(\text{rad/s})$	11.62	14.55	25.20%
m_2	$\text{deg}^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	11.13	11.74	5.52%
m_4	$\text{deg}^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	18.36	8.54	53.48%
ω	rad/s	1.04	1.24	18.65%
T	s	7.49	8.14	8.69%
T_p	s	4.89	7.37	50.61%
T_z	s	7.01	7.96	13.56%
ζ_{rxs}	deg	14.89	17.37	16.65%
ζ_{rxavg}	deg	9.30	10.85	16.65%
$\zeta_{rx1/10}$	deg	18.91	22.06	16.65%
ζ_{rx}^{\wedge}	deg	28.52	32.98	15.64%

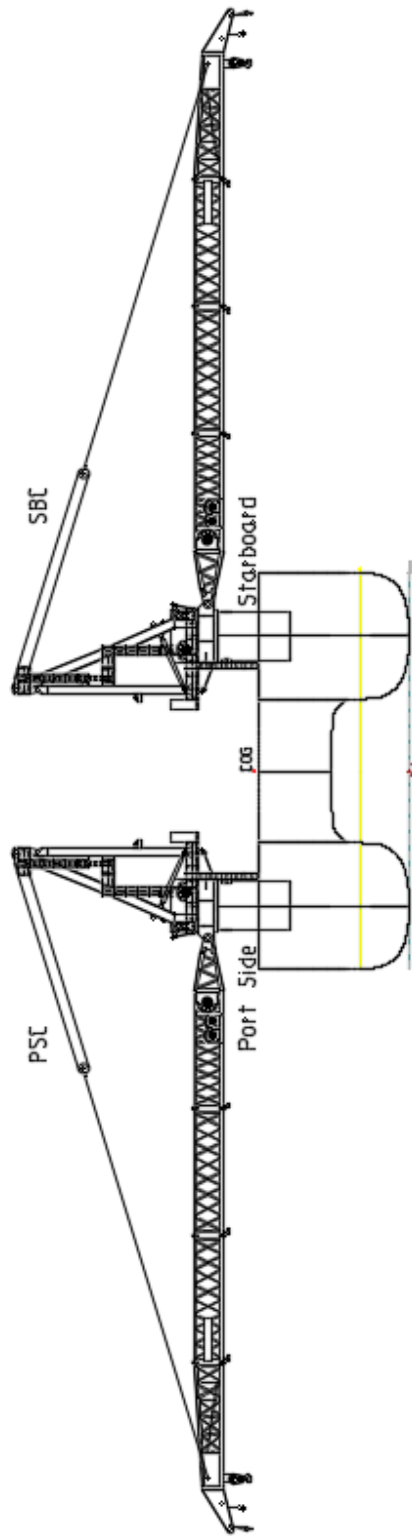
Berikut adalah statistik spektra respon mode gerakan *pitch* dan *yaw* eksperimen dan numeris kode 202.

Response Spectrum 202				
Pitch				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	deg^2	0.04	0.36	708.46%
m_1	$\text{deg}^2(\text{rad/s})$	0.04	0.32	717.64%
m_2	$\text{deg}^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.04	0.29	661.94%
m_4	$\text{deg}^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.06	0.31	401.77%
ω	rad/s	1.00	1.08	7.31%
T	s	7.22	7.14	1.12%
T_p	s	4.98	6.13	23.23%
T_z	s	6.74	6.95	3.01%
ζ_{rys}	deg	0.84	2.40	184.33%
ζ_{ryavg}	deg	0.53	1.50	184.33%
$\zeta_{ry1/10}$	deg	1.07	3.04	184.33%
ζ_{ry}^{\wedge}	deg	1.62	4.59	183.76%

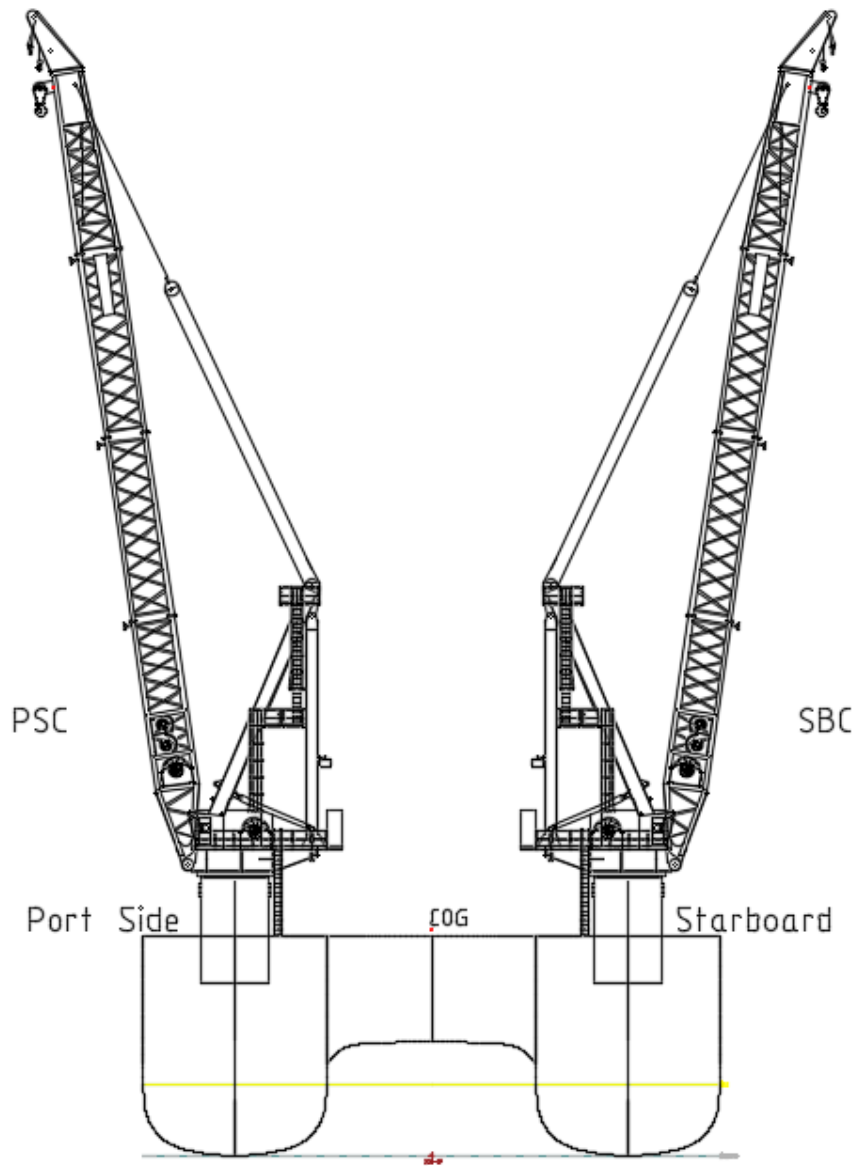
Response Spectrum 202				
Yaw				
Paremeter	Unit	Eksperiment	Numeric	Error
m_0	deg^2	0.02	0.02	0.96%
m_1	$\text{deg}^2(\text{rad/s})$	0.02	0.01	25.20%
m_2	$\text{deg}^2(\text{rad}^2/\text{s}^2)$	0.03	0.01	55.89%
m_4	$\text{deg}^2(\text{rad}^4/\text{s}^4)$	0.13	0.02	88.24%
ω	rad/s	0.62	1.05	69.57%
T	s	5.17	6.98	34.97%
T_p	s	3.04	5.89	93.64%
T_z	s	4.48	6.77	51.28%
ζ_{rzs}	deg	0.51	0.51	0.48%
ζ_{rzavg}	deg	0.32	0.32	0.48%
$\zeta_{rz1/10}$	deg	0.64	0.64	0.48%
ζ_{rz}^{\wedge}	deg	1.00	0.97	2.23%

LAMPIRAN C
POSISI *CRANE*

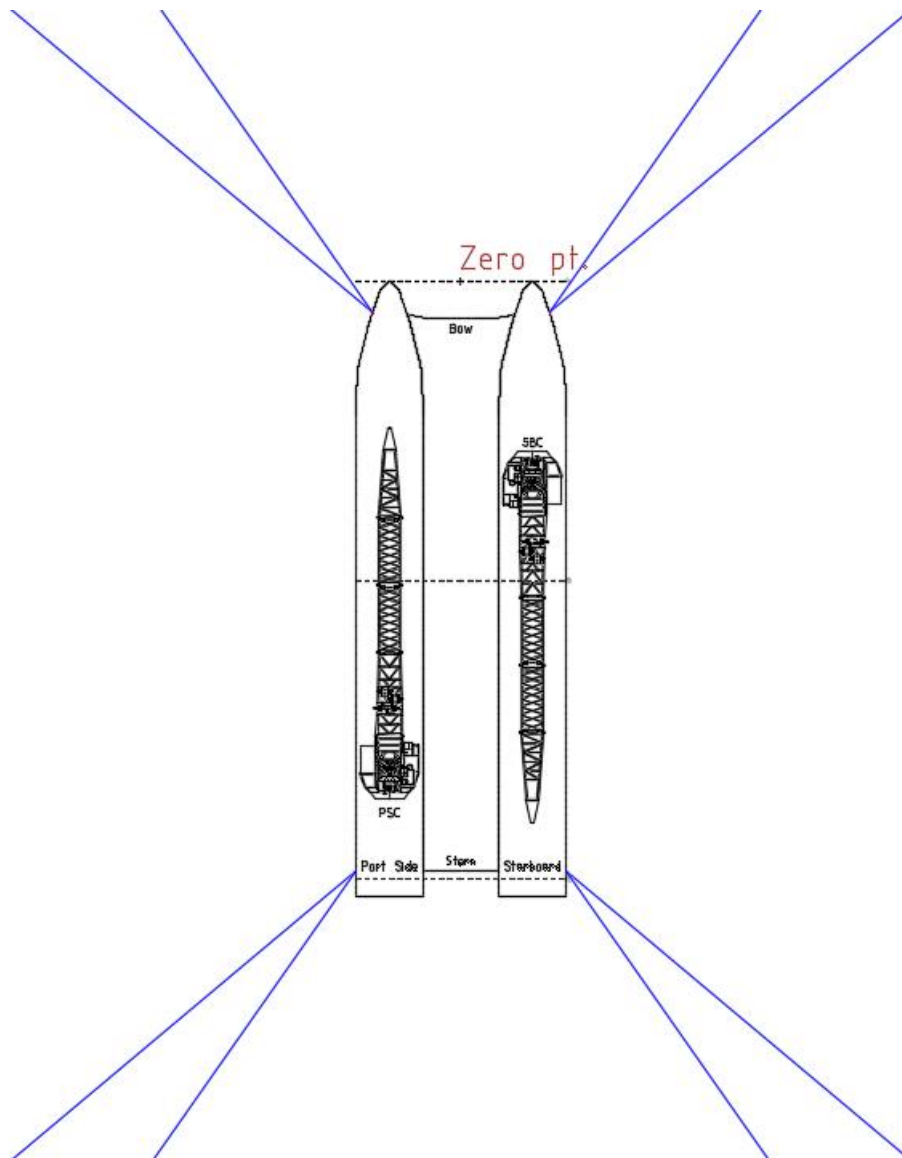
Crane dan floating crane catamaran tampak melintang saat maximum arm.



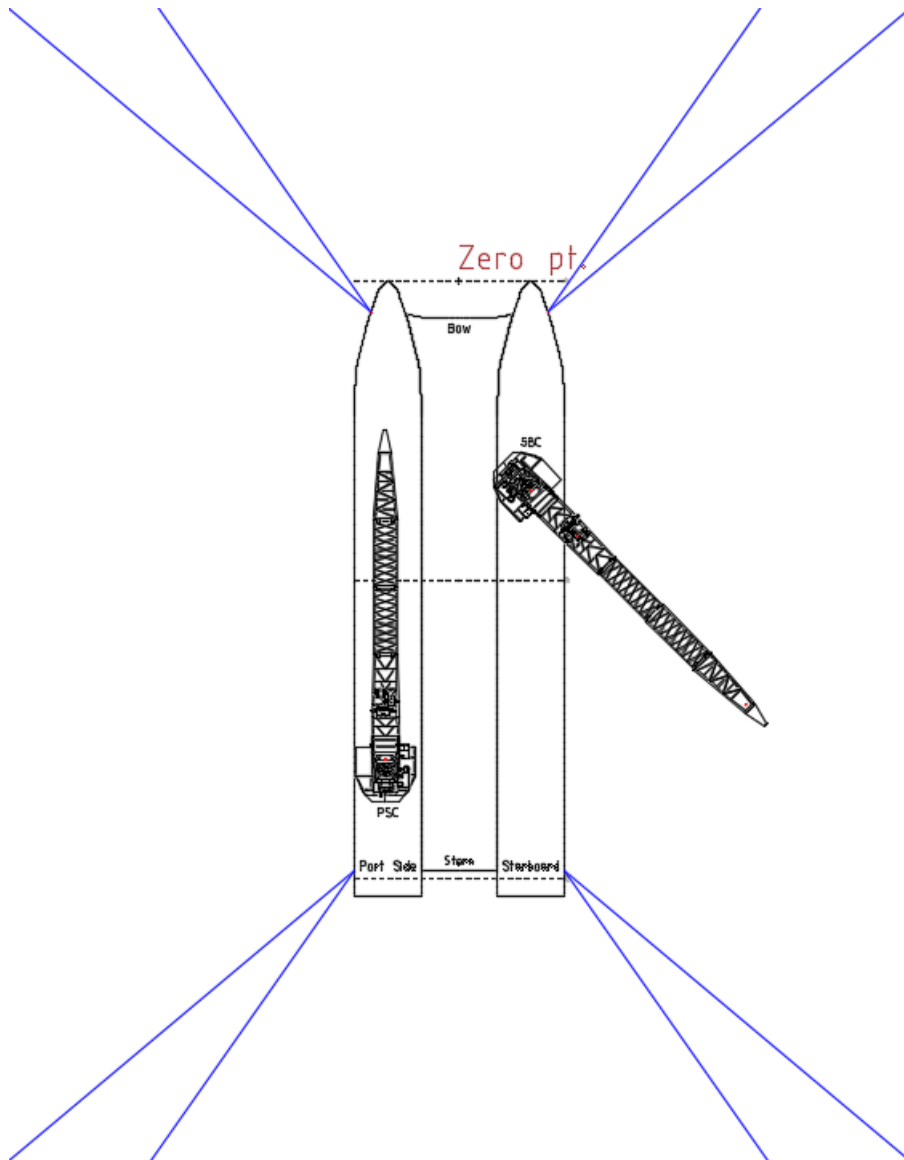
Crane dan *floating crane catamaran* tampak melintang saat *minimum arm*.



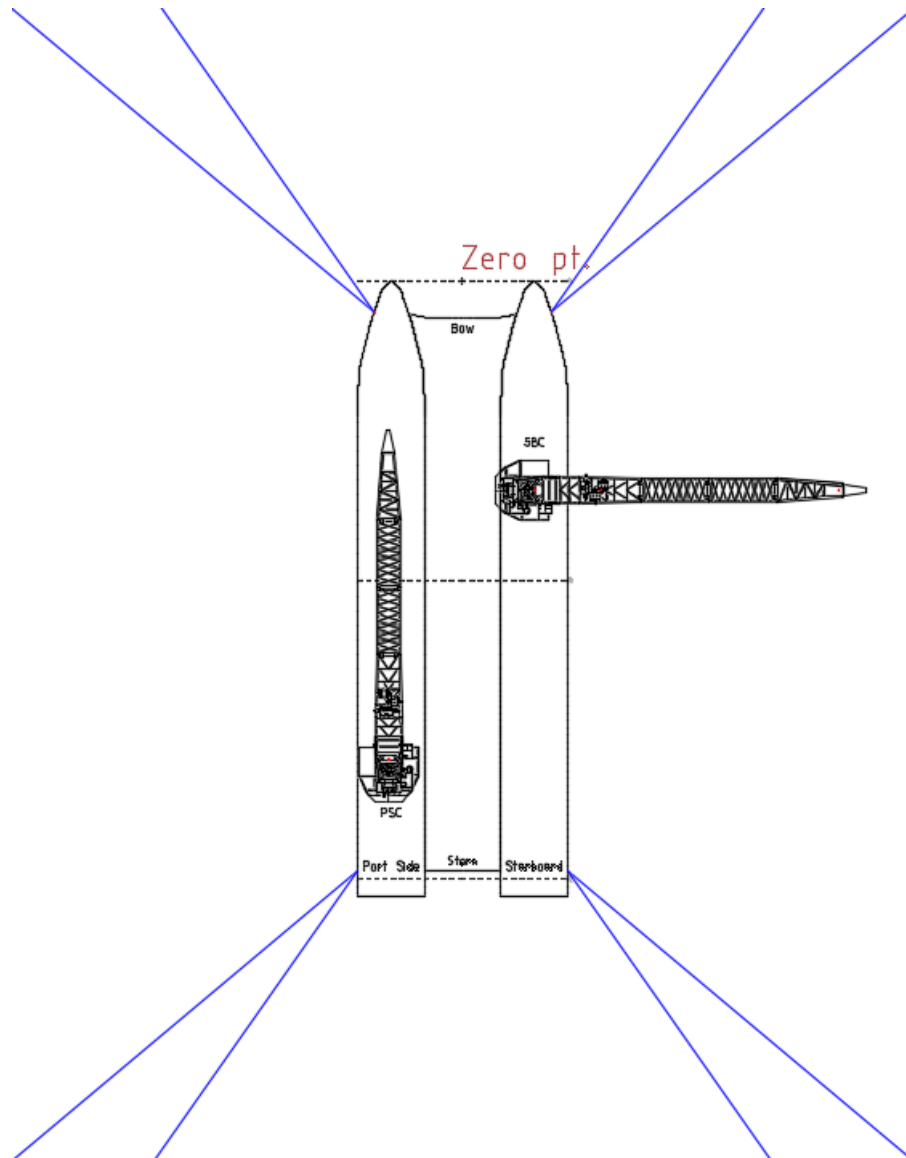
Crane dan floating crane catamaran tampak atas.



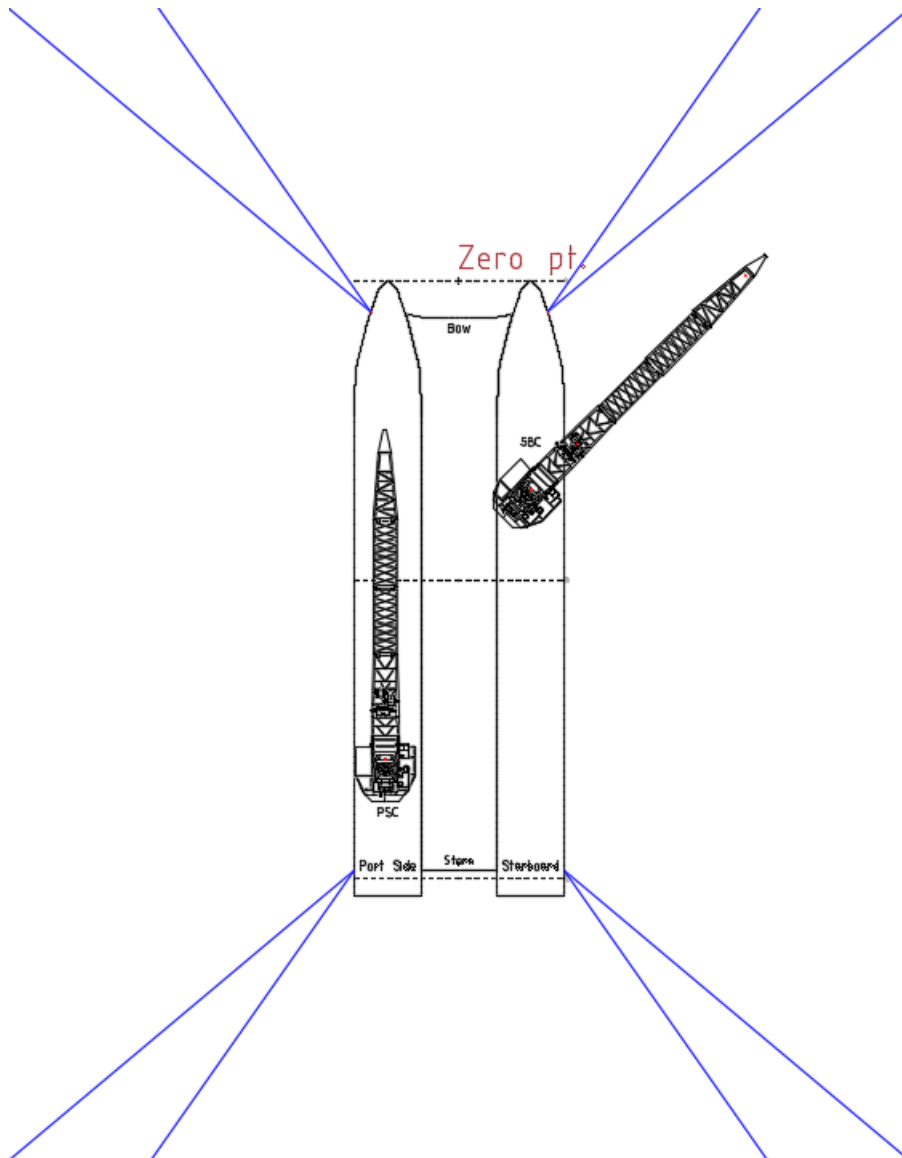
Crane dan *floating crane catamaran* tampak atas kode SBC1.



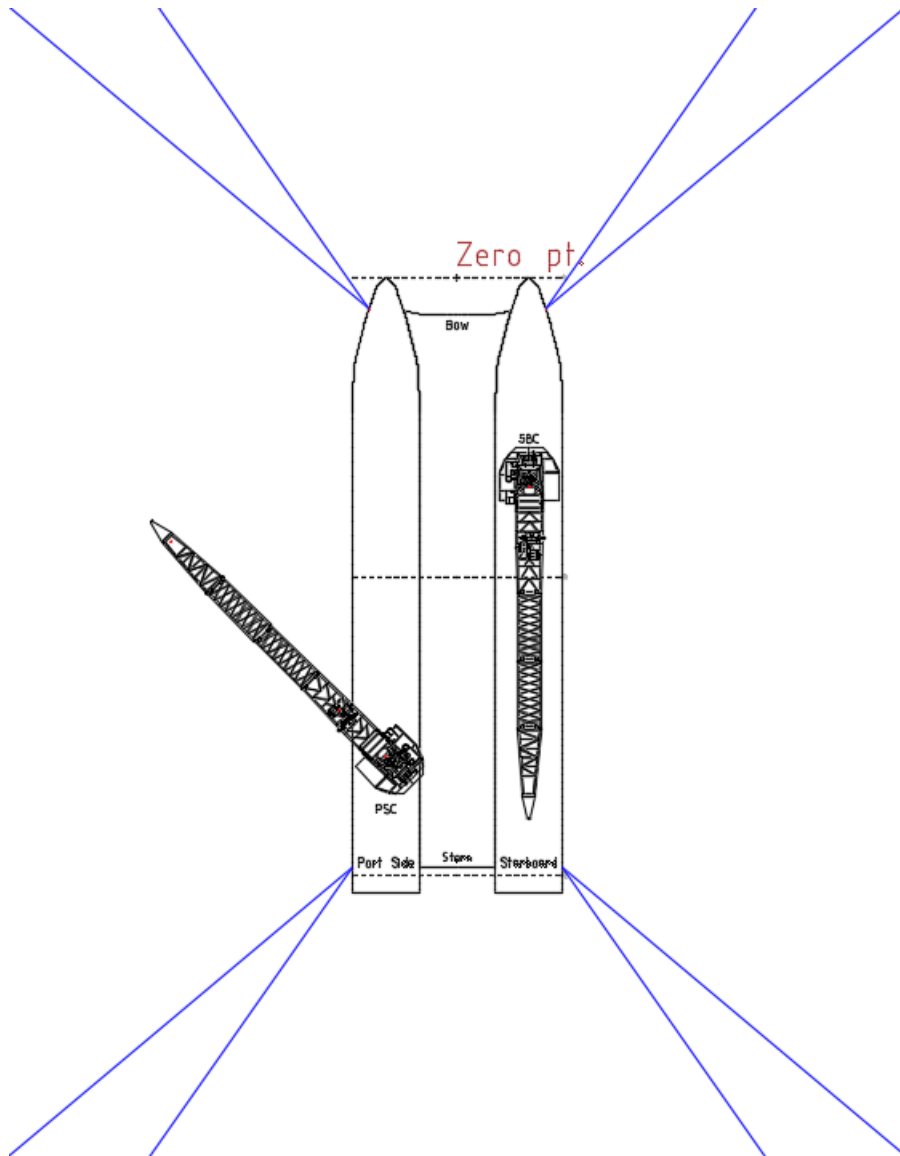
Crane dan *floating crane catamaran* tampak atas kode SBC2.



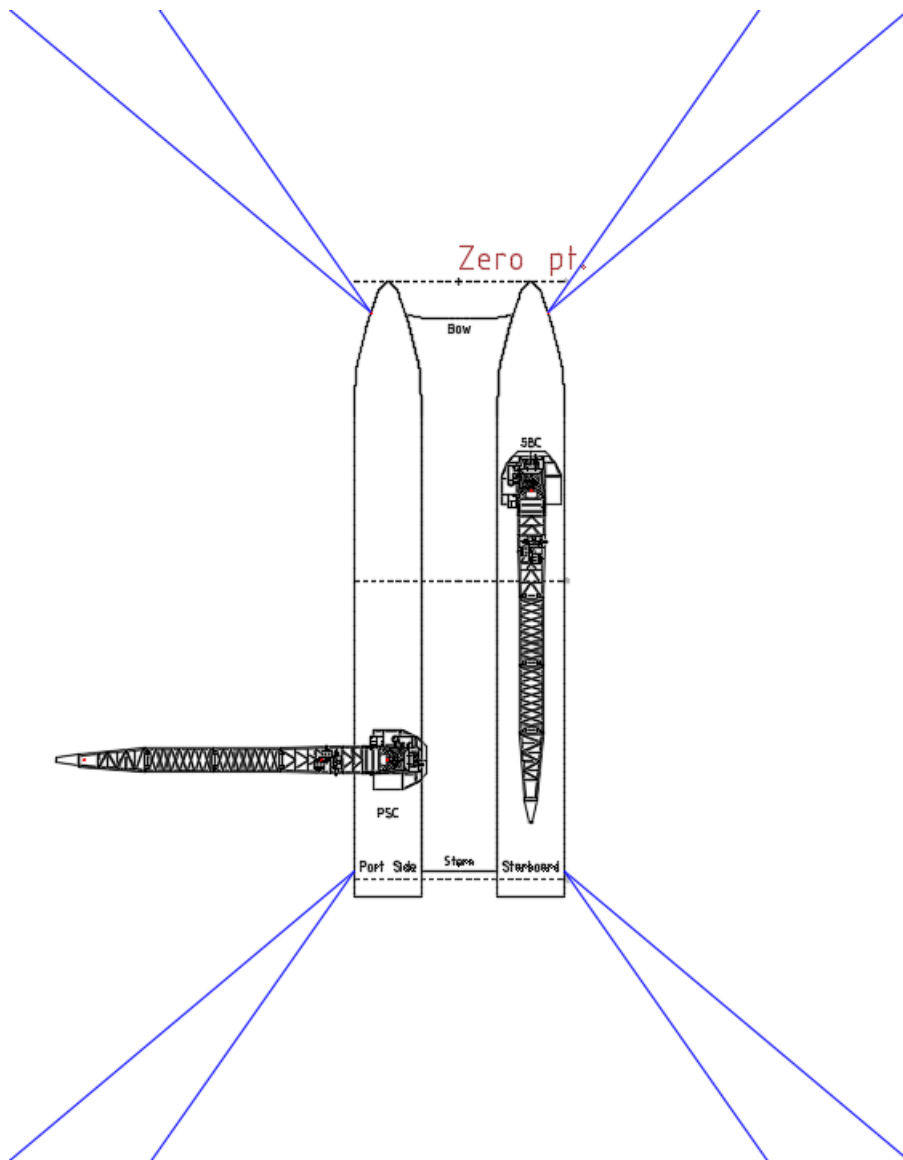
Crane dan *floating crane catamaran* tampak atas kode SBC3.



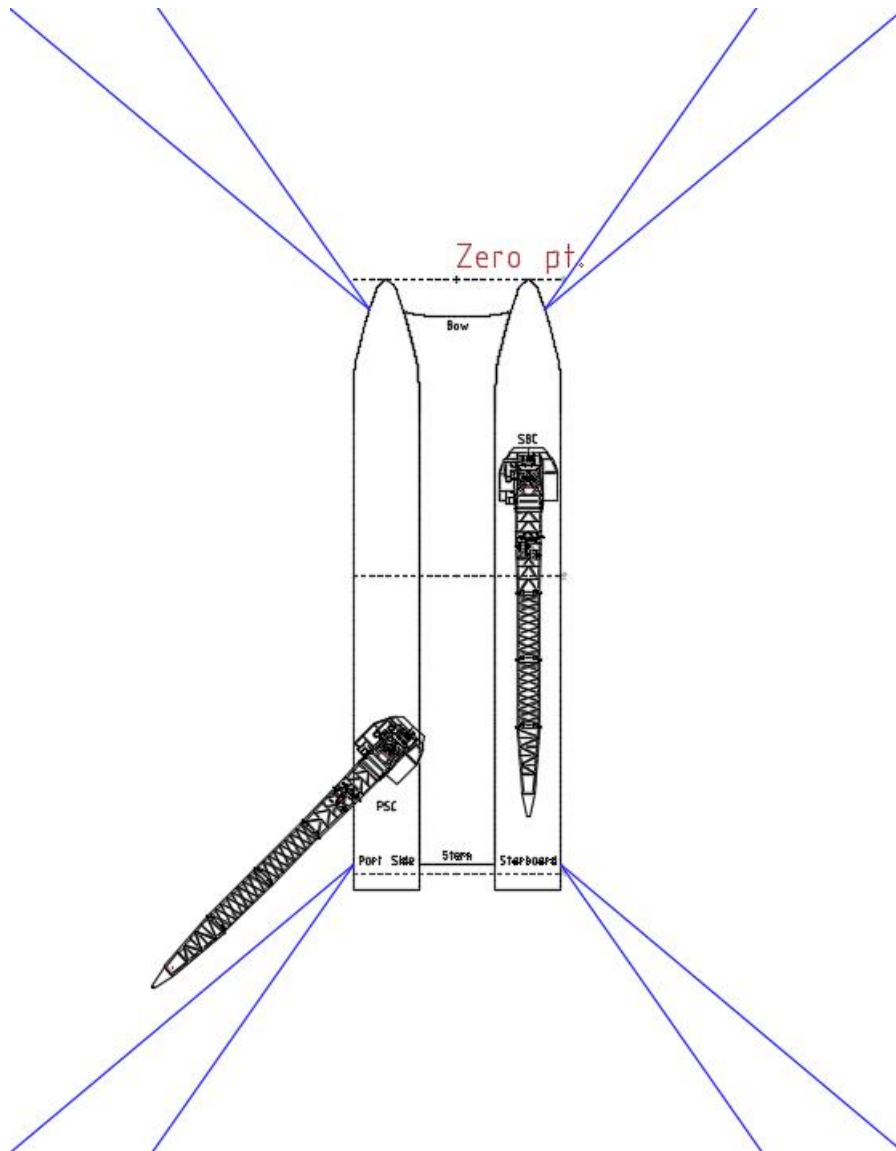
Crane dan floating crane catamaran tampak atas kode PSC1.



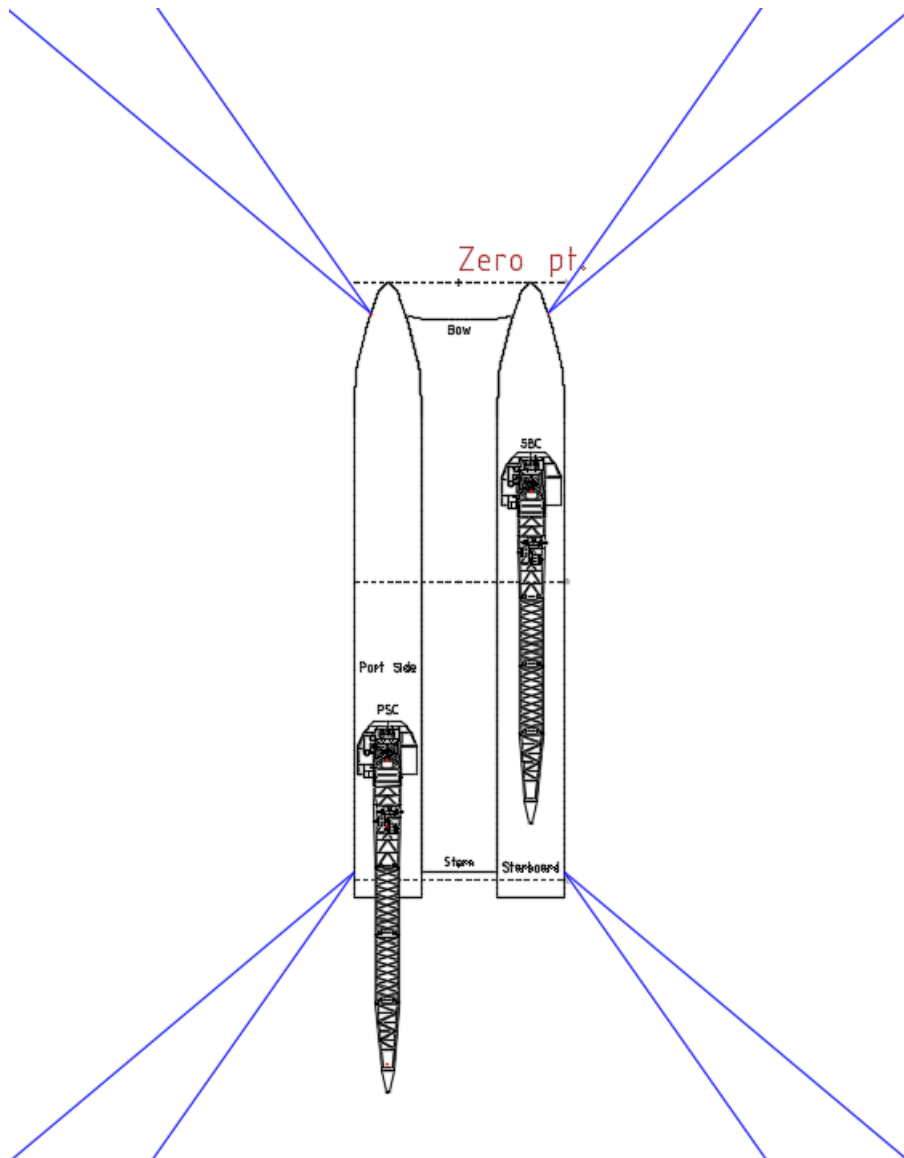
Crane dan floating crane catamaran tampak atas kode PSC2.



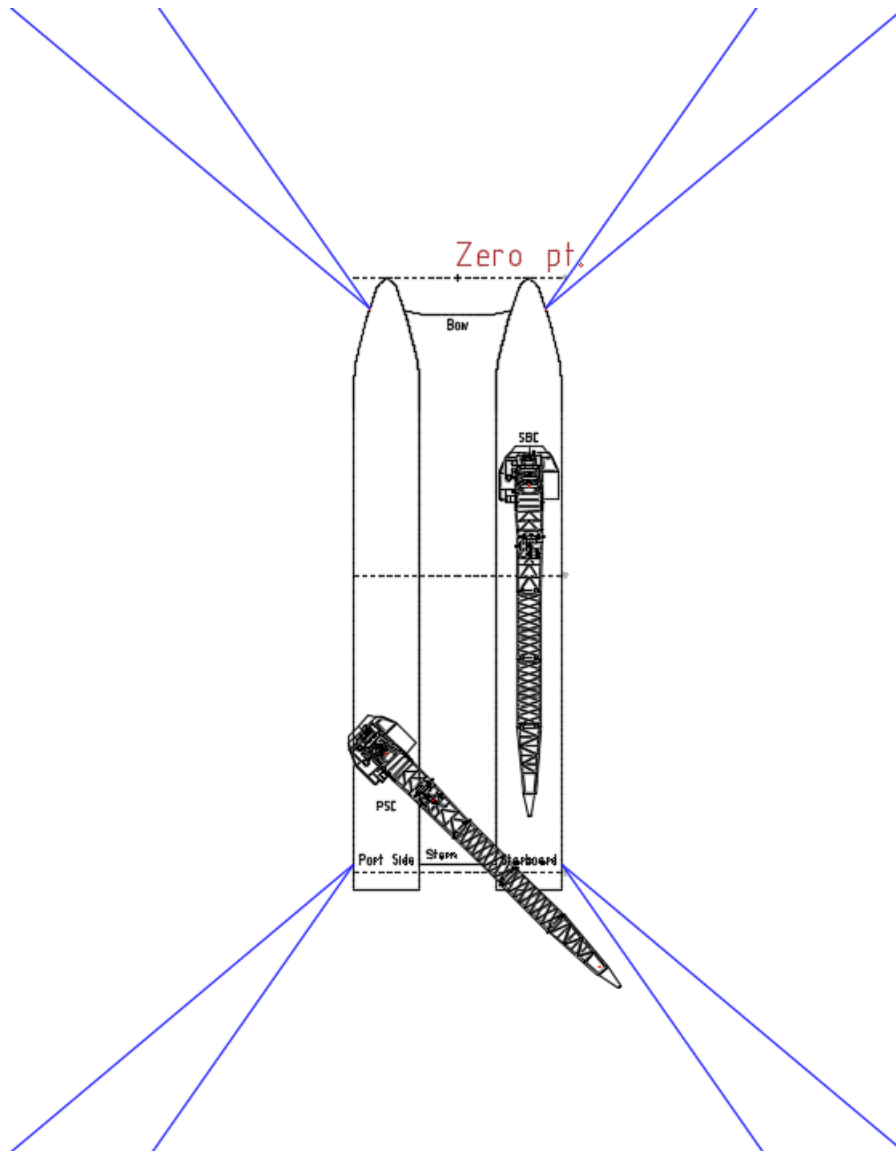
Crane dan *floating crane catamaran* tampak atas kode PSC3.



Crane dan floating crane catamaran tampak atas kode PSC4.

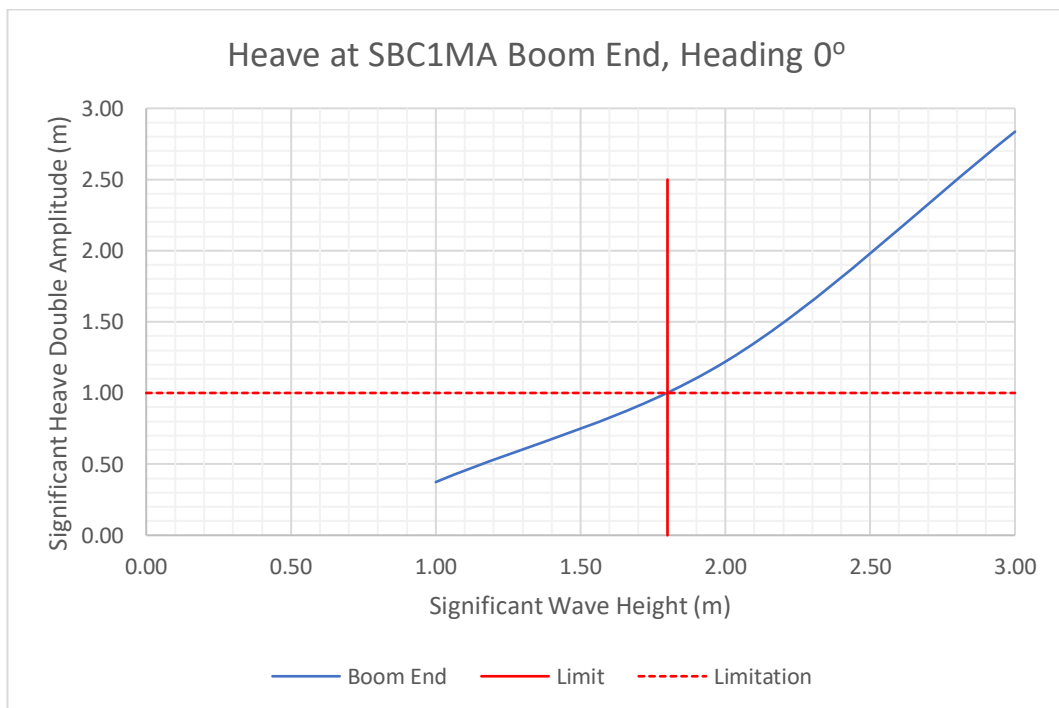
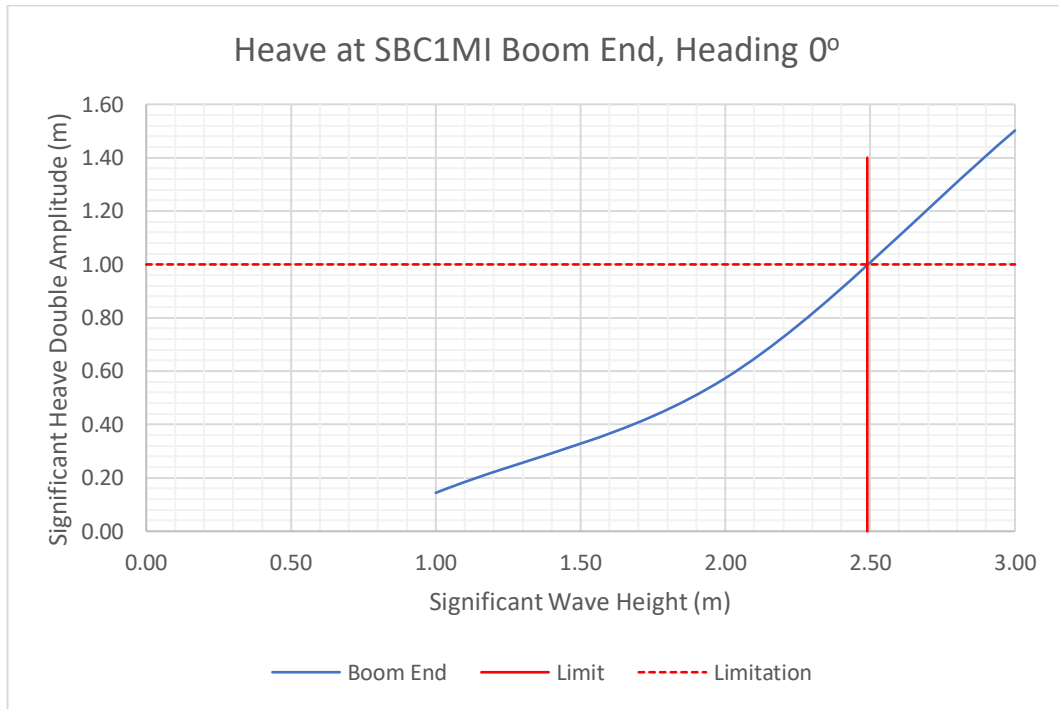


Crane dan *floating crane catamaran* tampak atas kode PSC5.

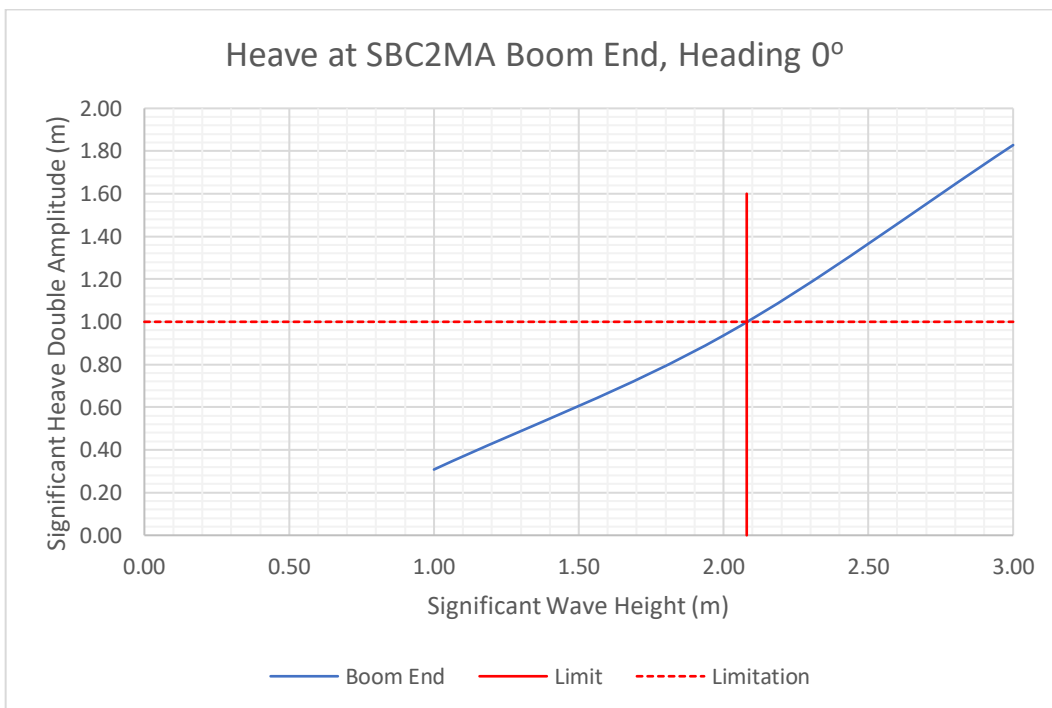
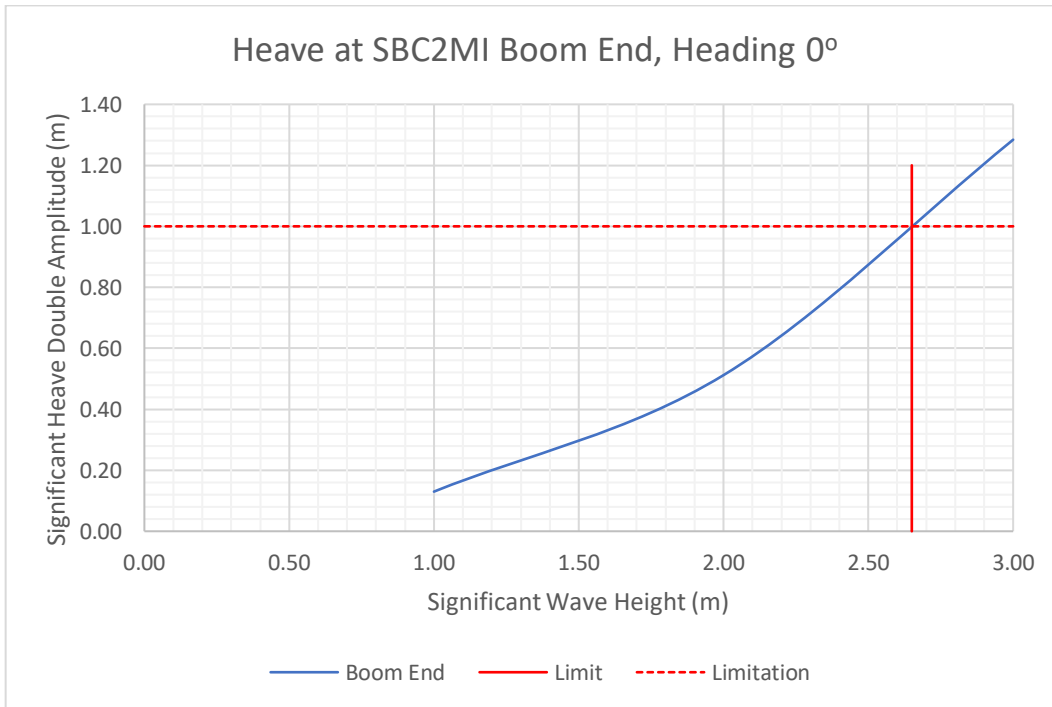


LAMPIRAN D
GRAFIK OPERABILITAS *CRANE*

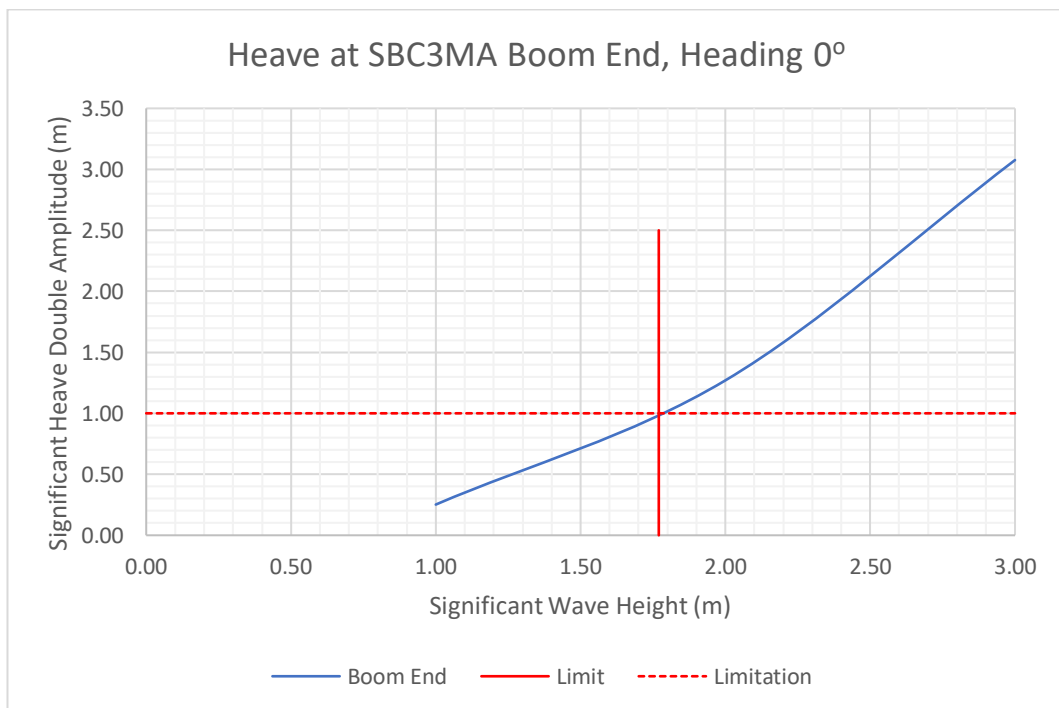
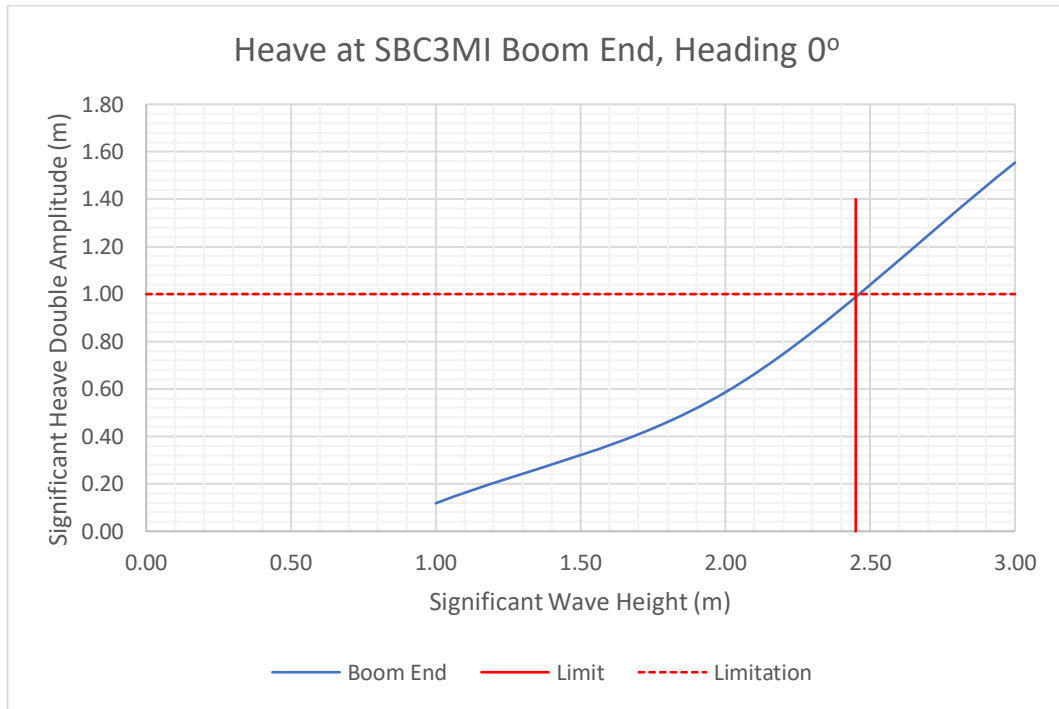
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC1MI dan SBC1MA pada *heading* 0°.



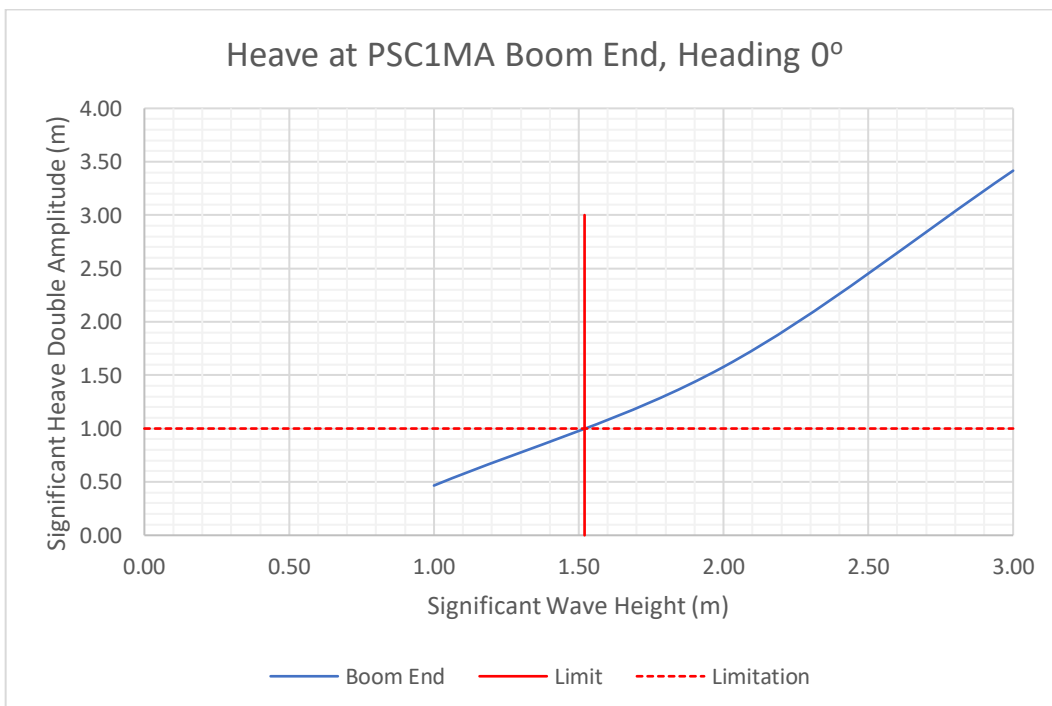
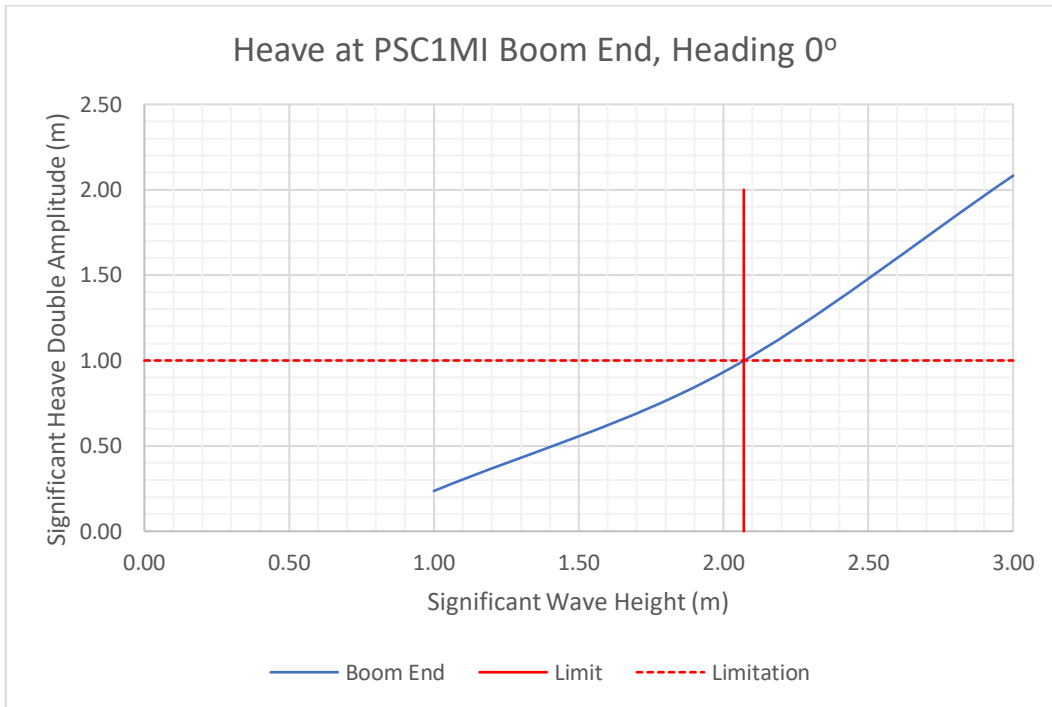
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC2MI dan SBC2MA pada *heading* 0°.



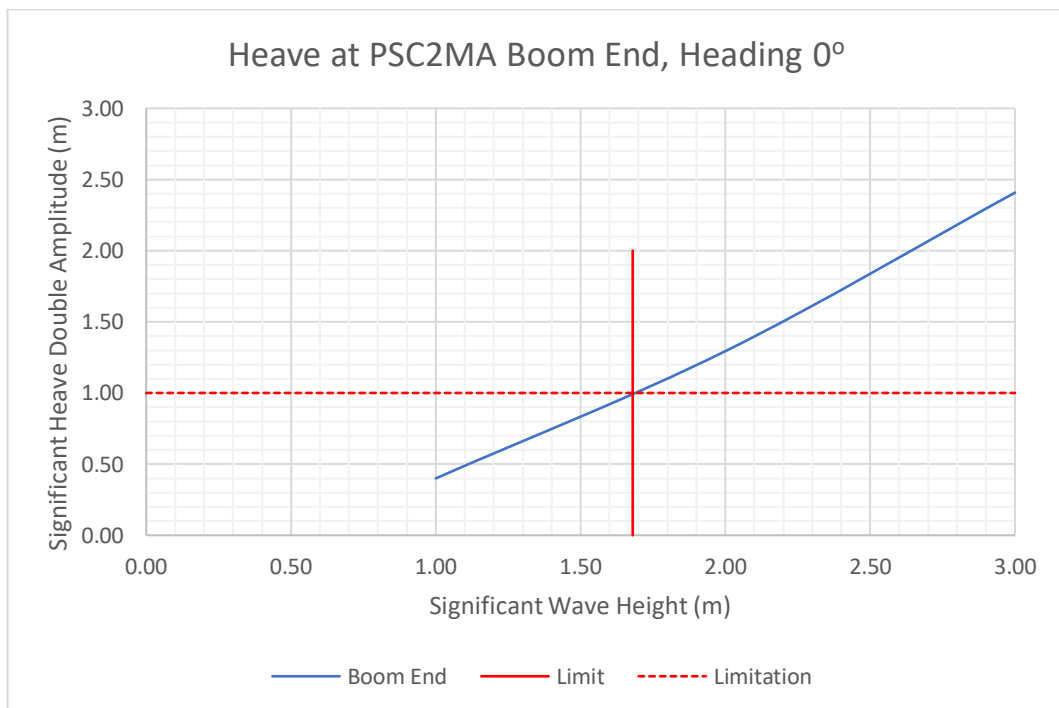
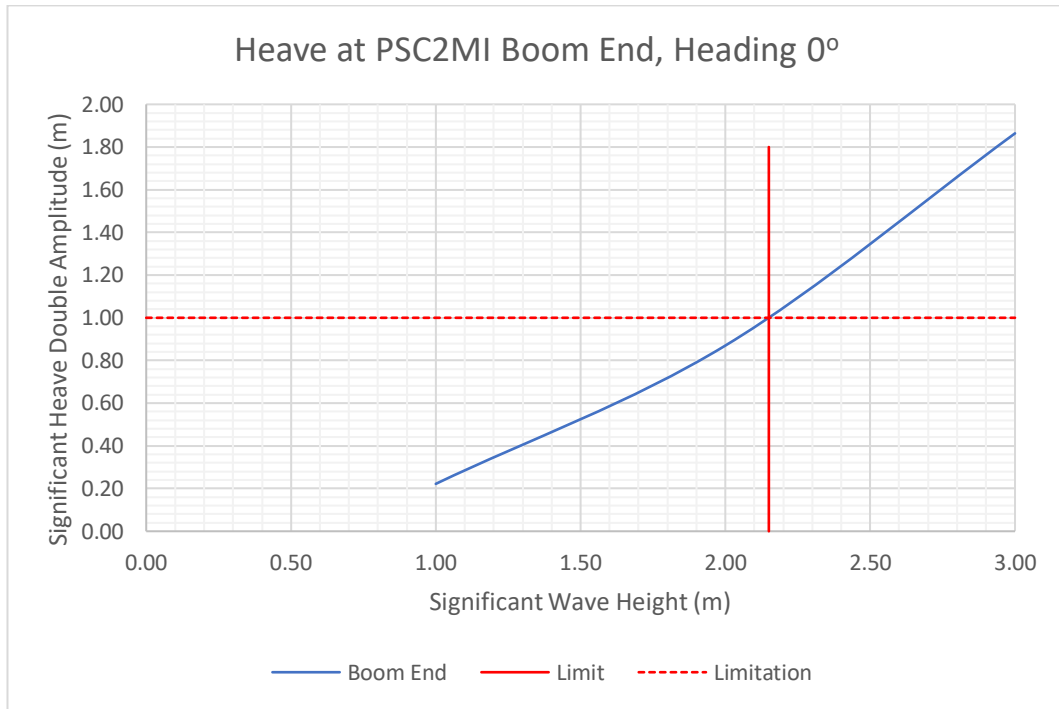
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC3MI dan SBC3MA pada *heading* 0°.



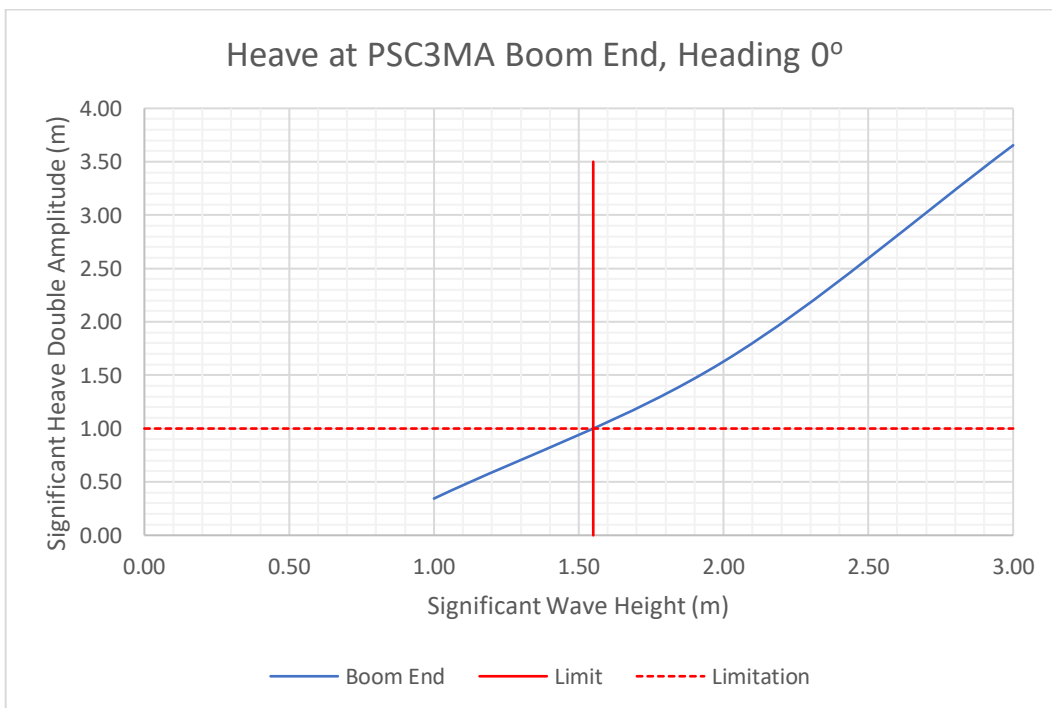
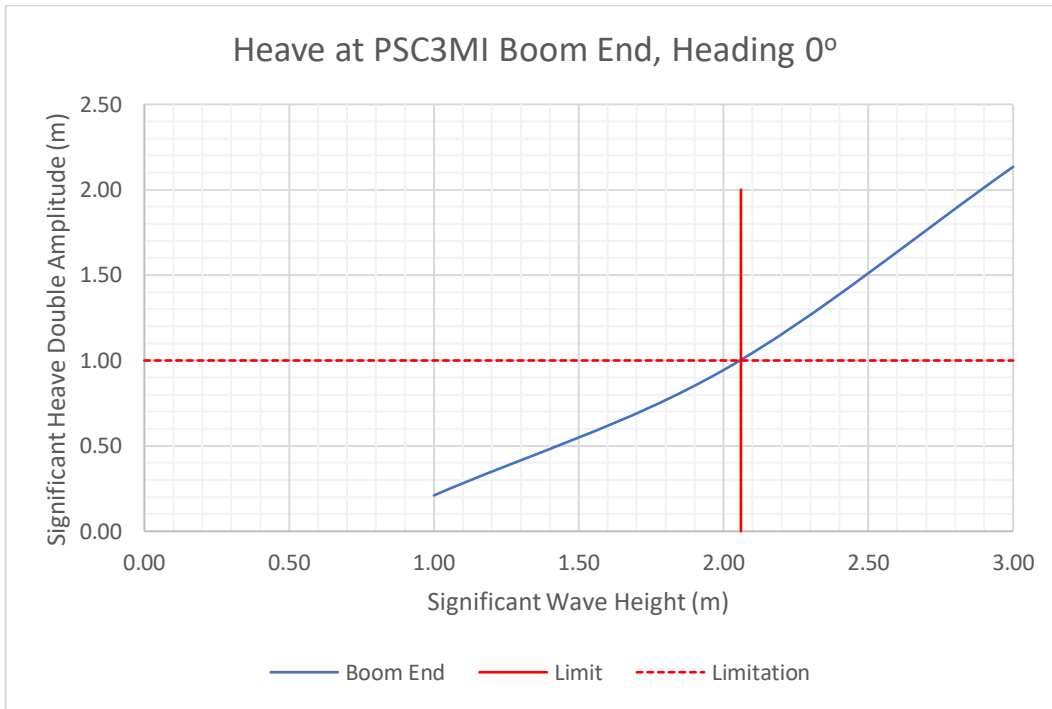
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC1MI dan PSC1MA pada *heading* 0°.



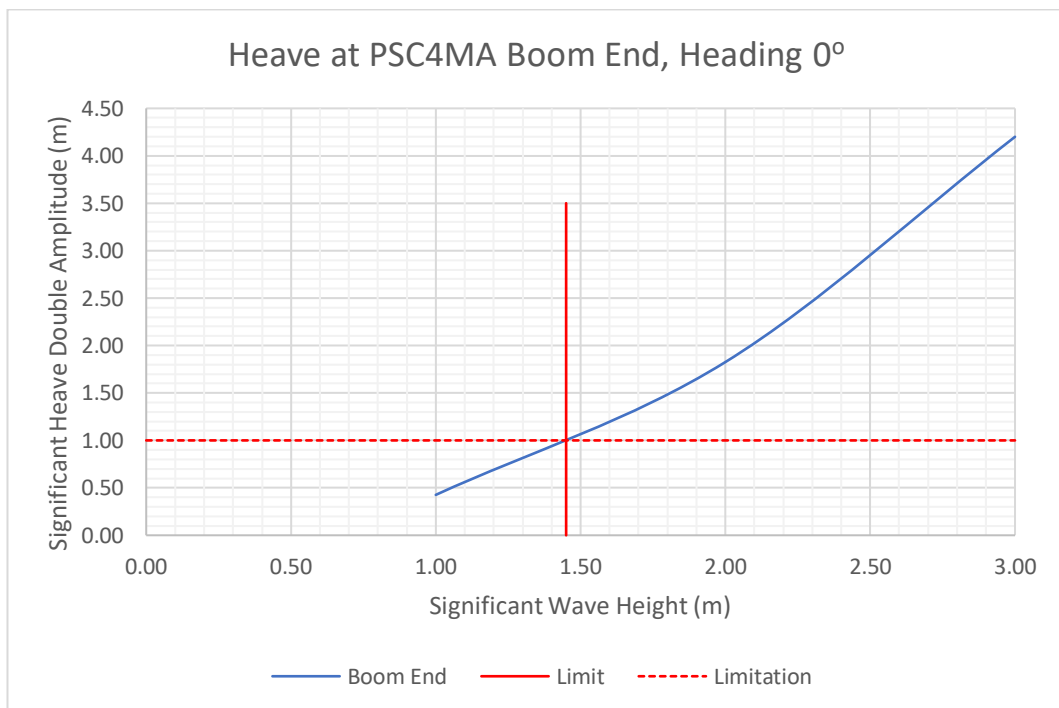
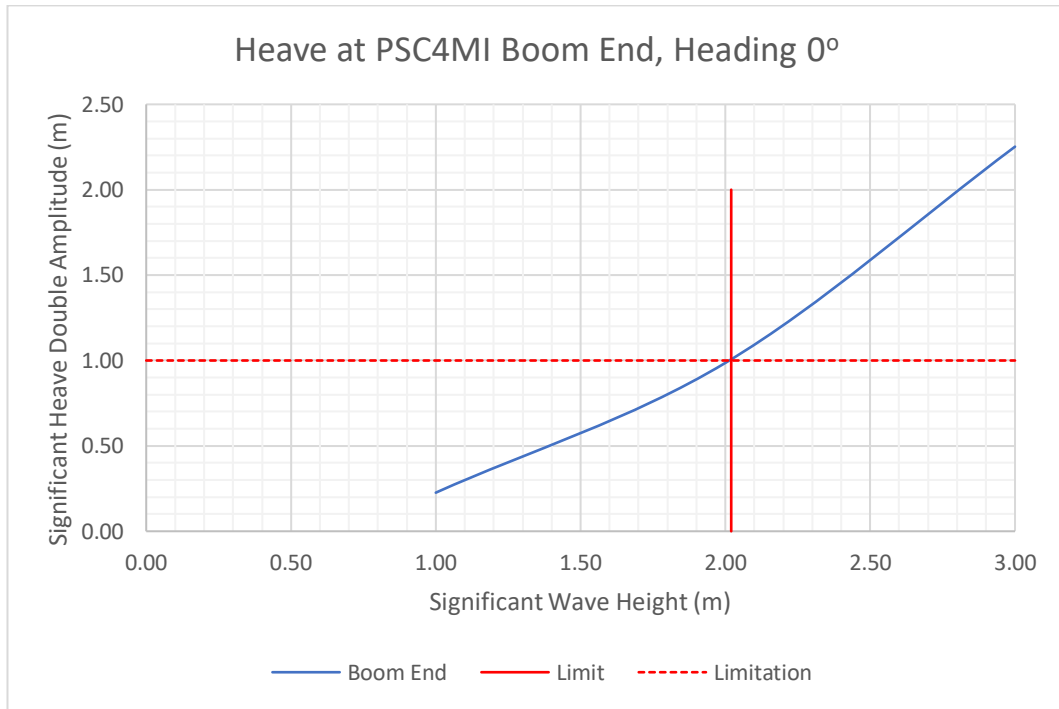
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC2MI dan PSC2MA pada *heading* 0°.



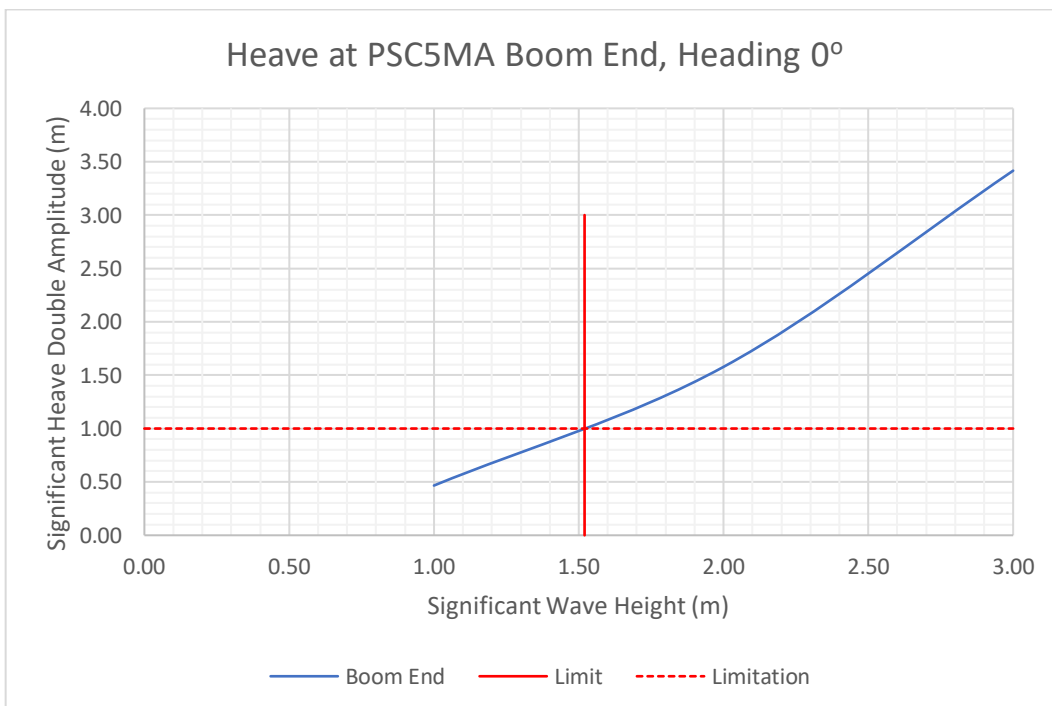
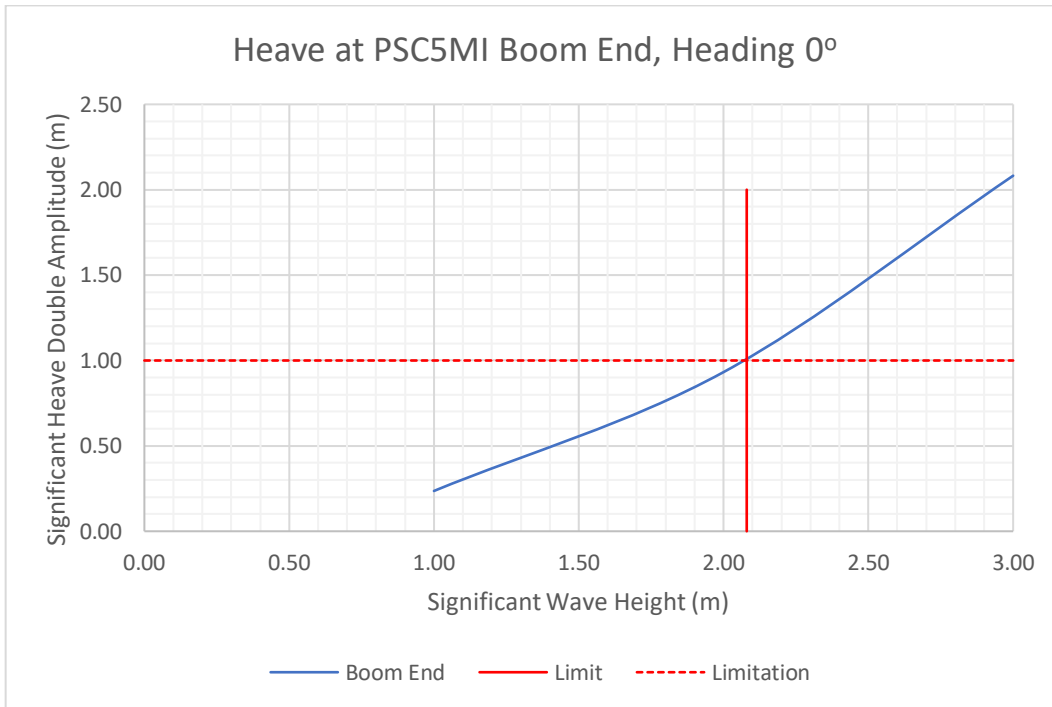
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC3MI dan PSC3MA pada *heading* 0°.



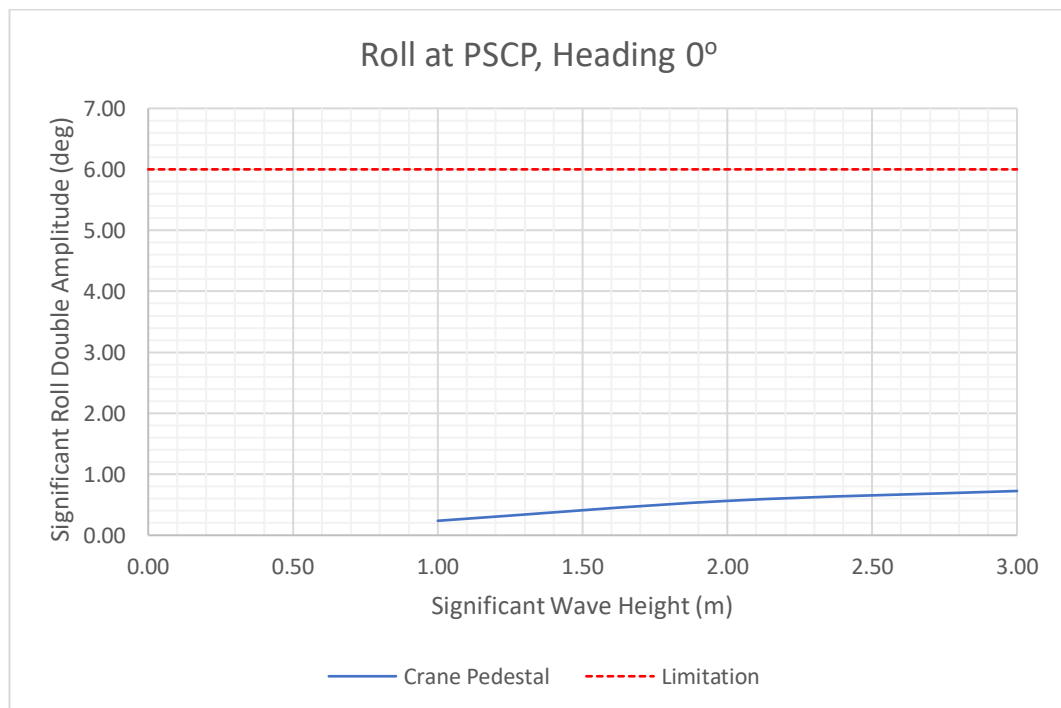
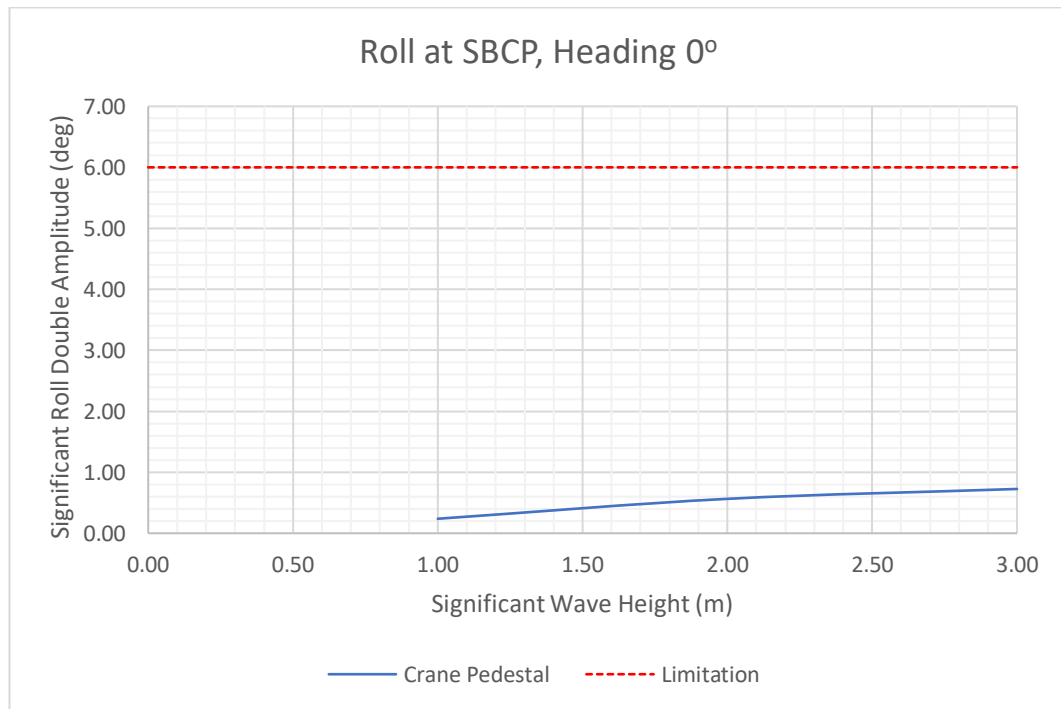
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC4MI dan PSC4MA pada *heading* 0°.



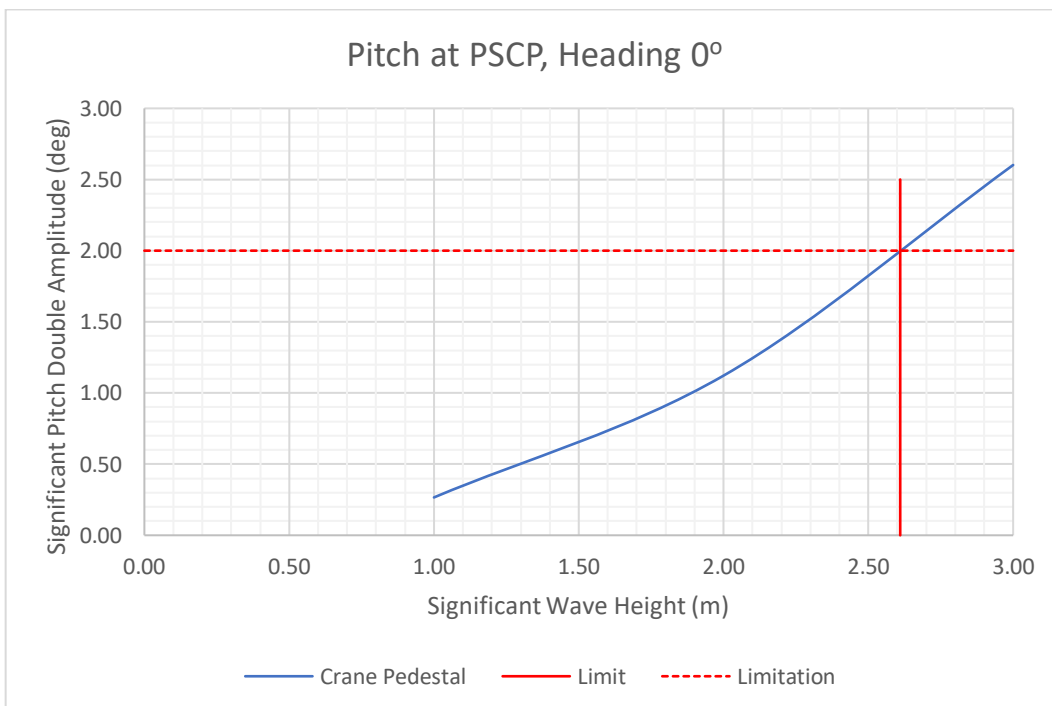
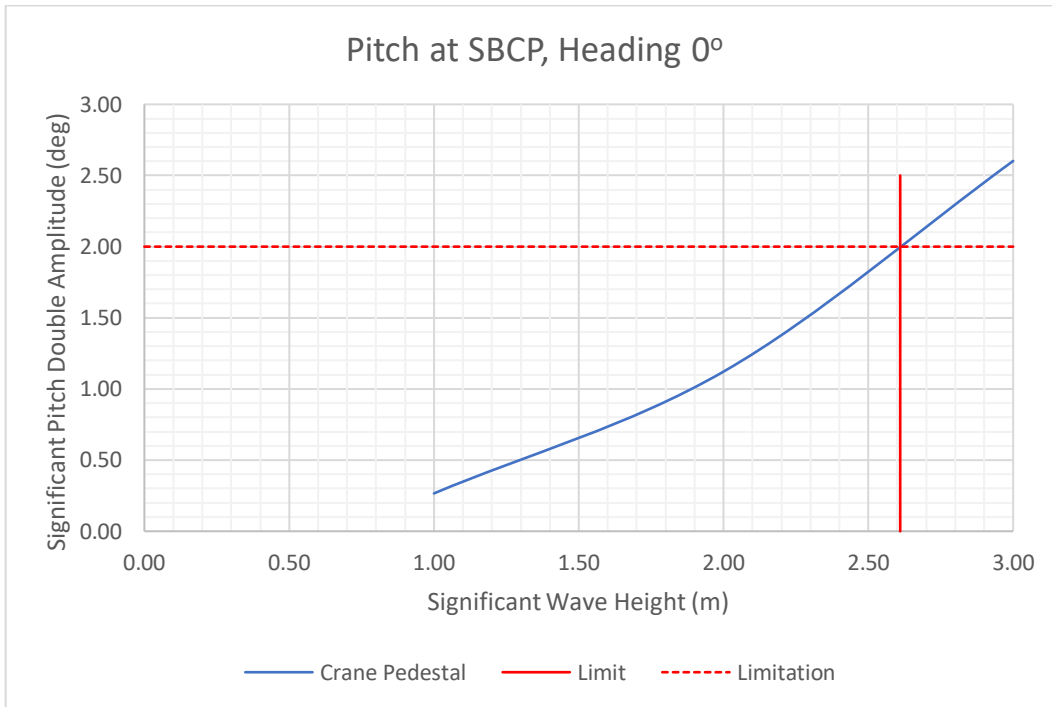
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC5MI dan PSC5MA pada *heading* 0°.



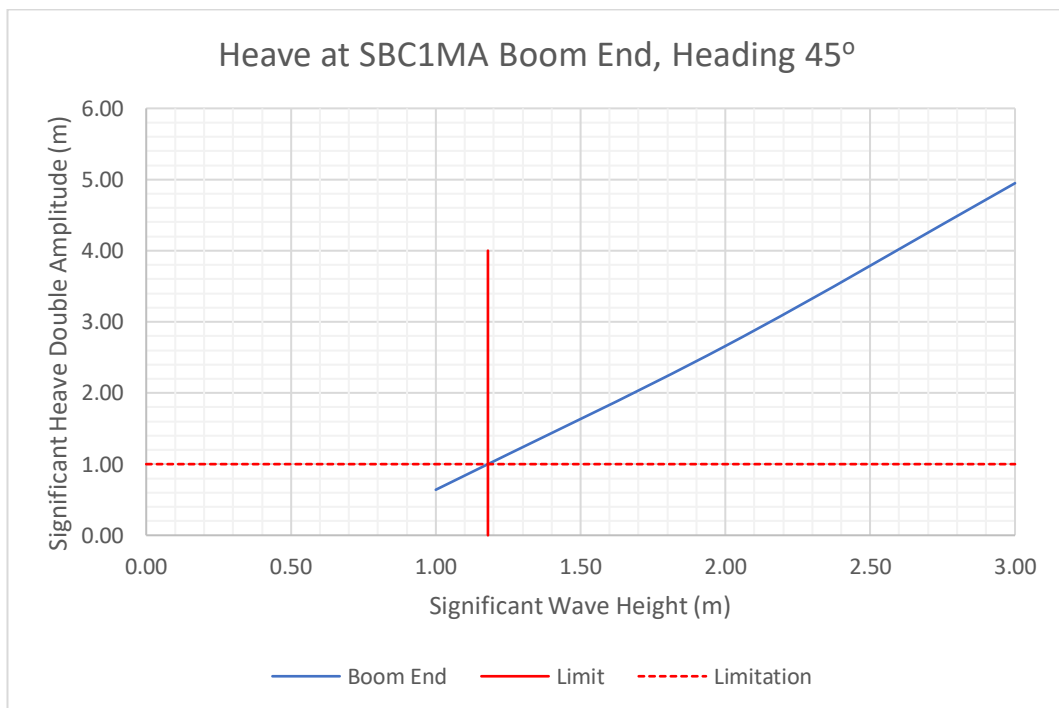
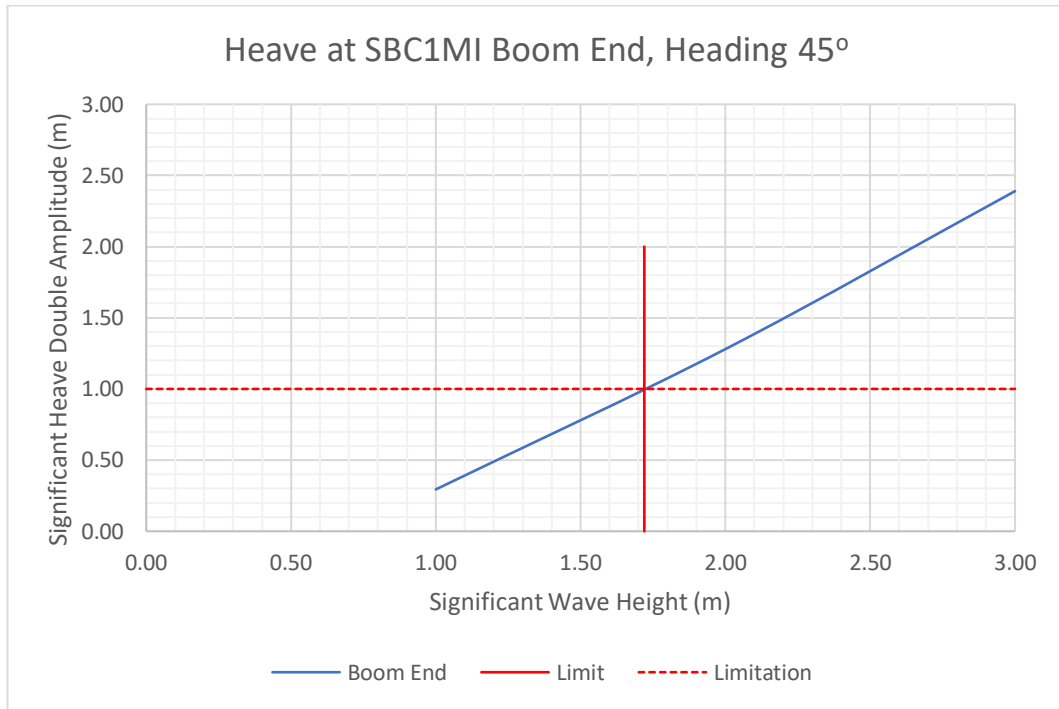
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *roll* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 0°.



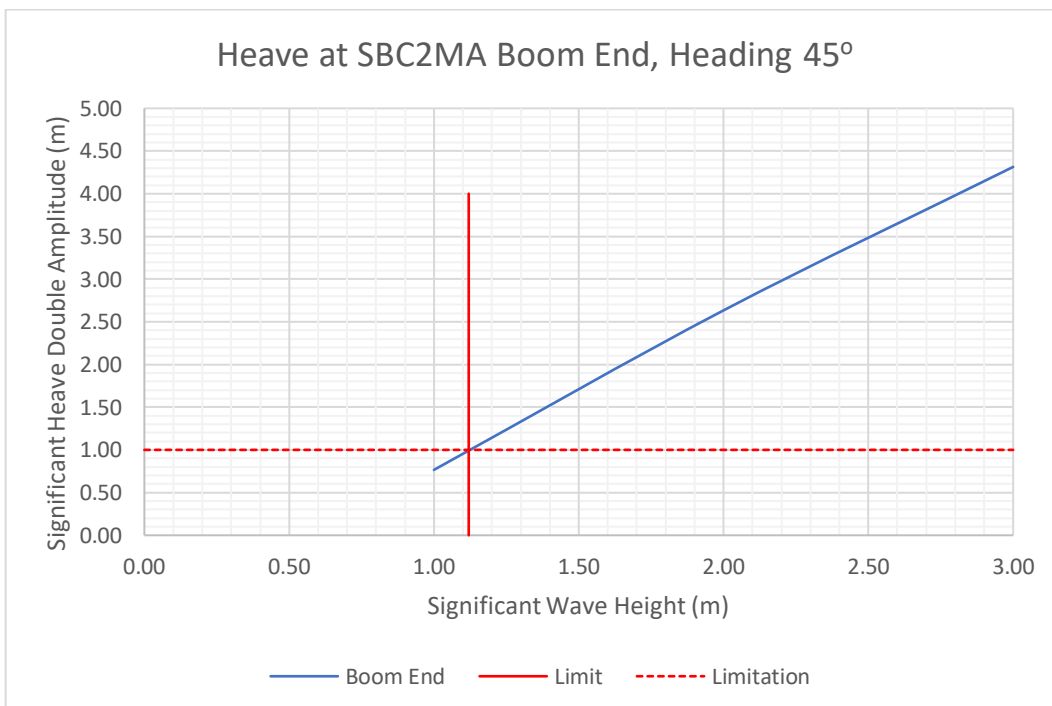
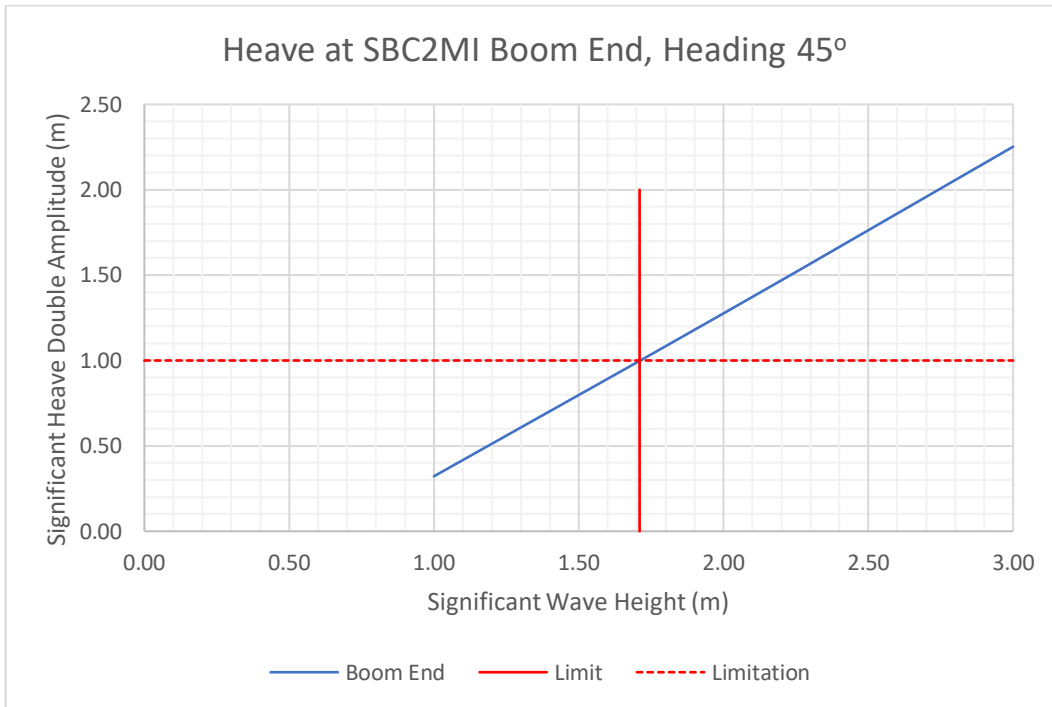
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *pitch* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 0°.



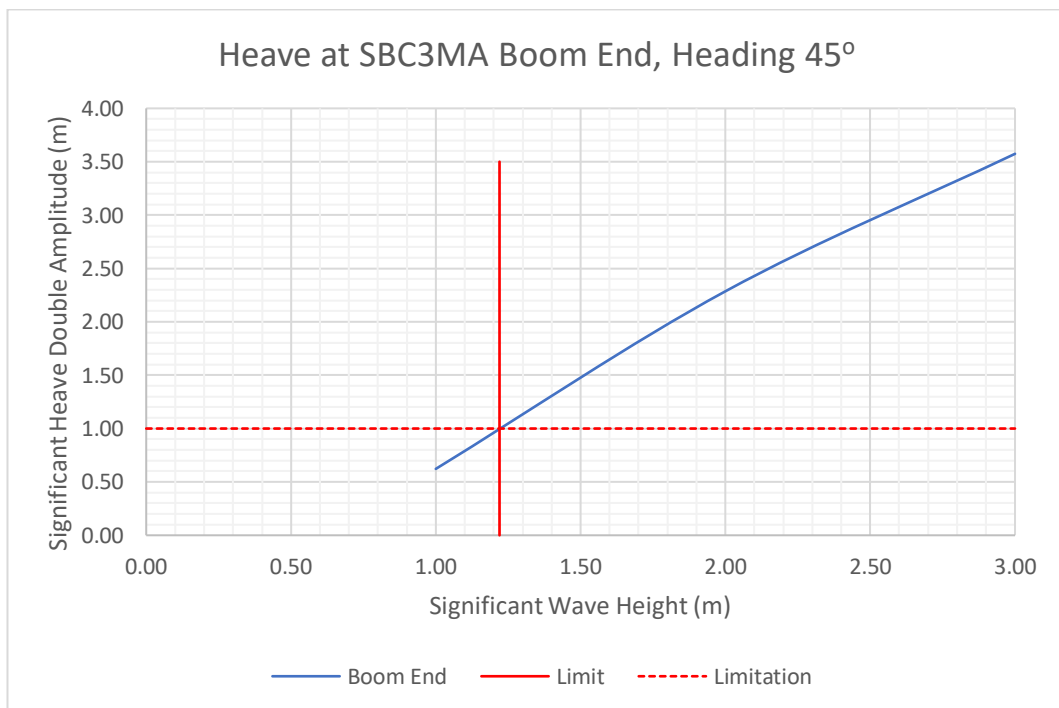
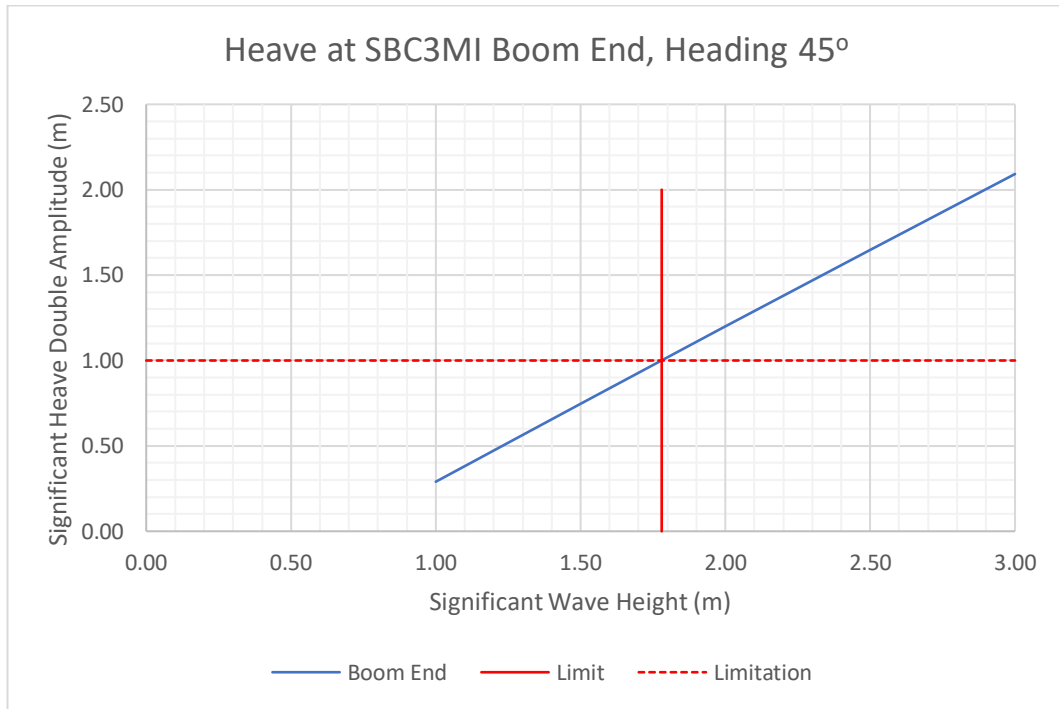
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC1MI dan SBC1MA pada *heading* 45°.



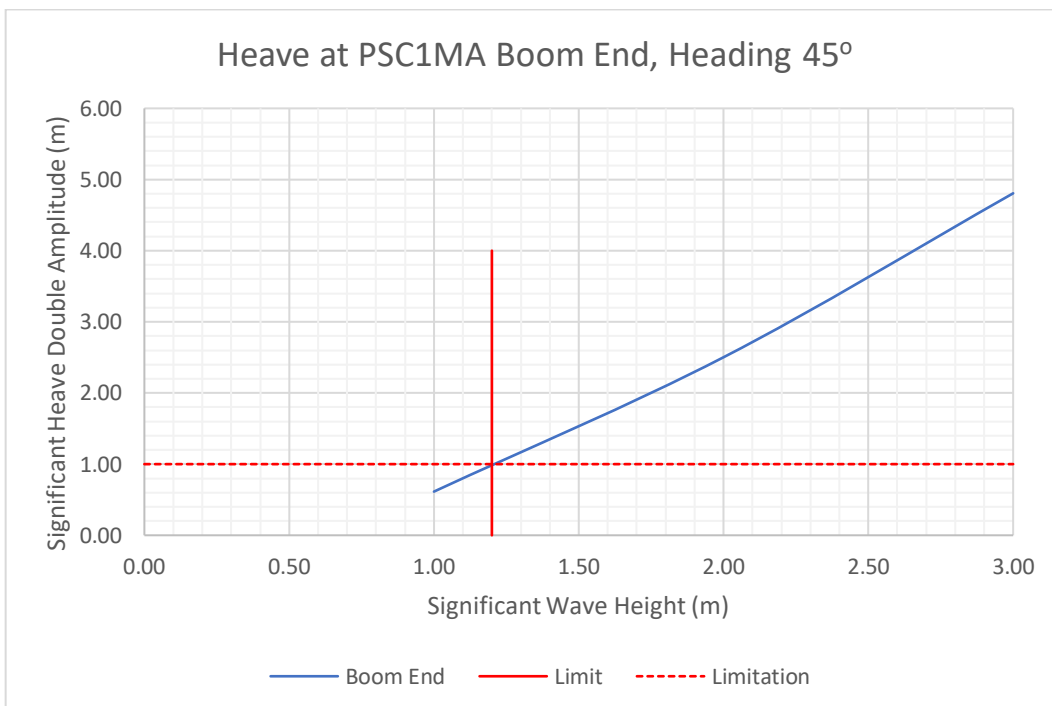
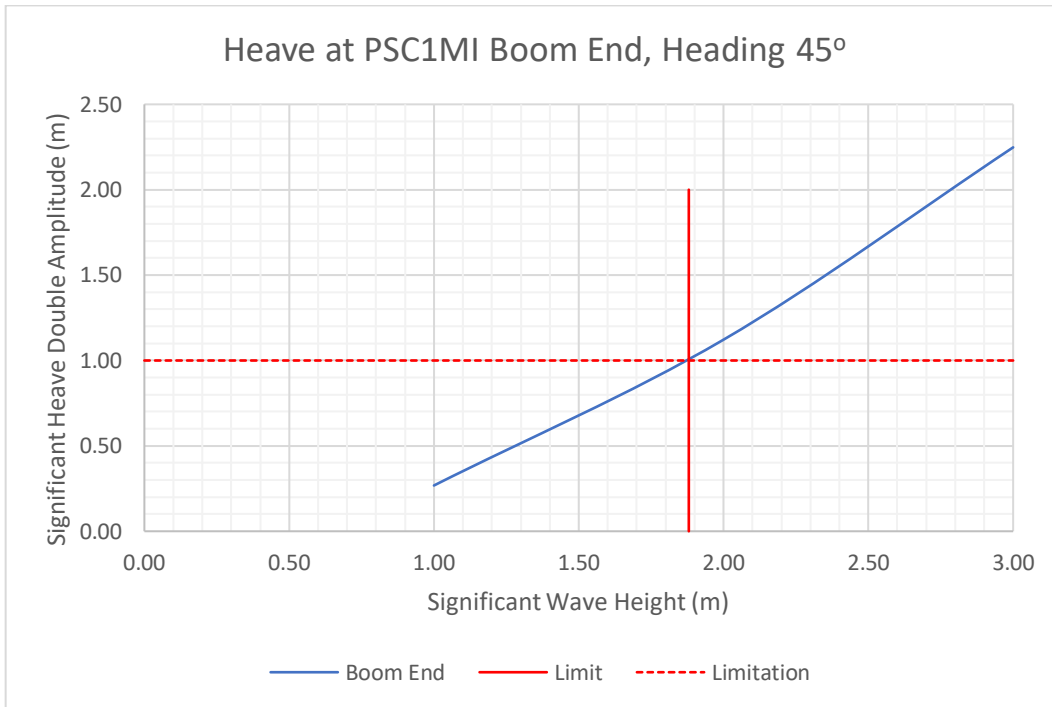
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC2MI dan SBC2MA pada *heading* 45°.



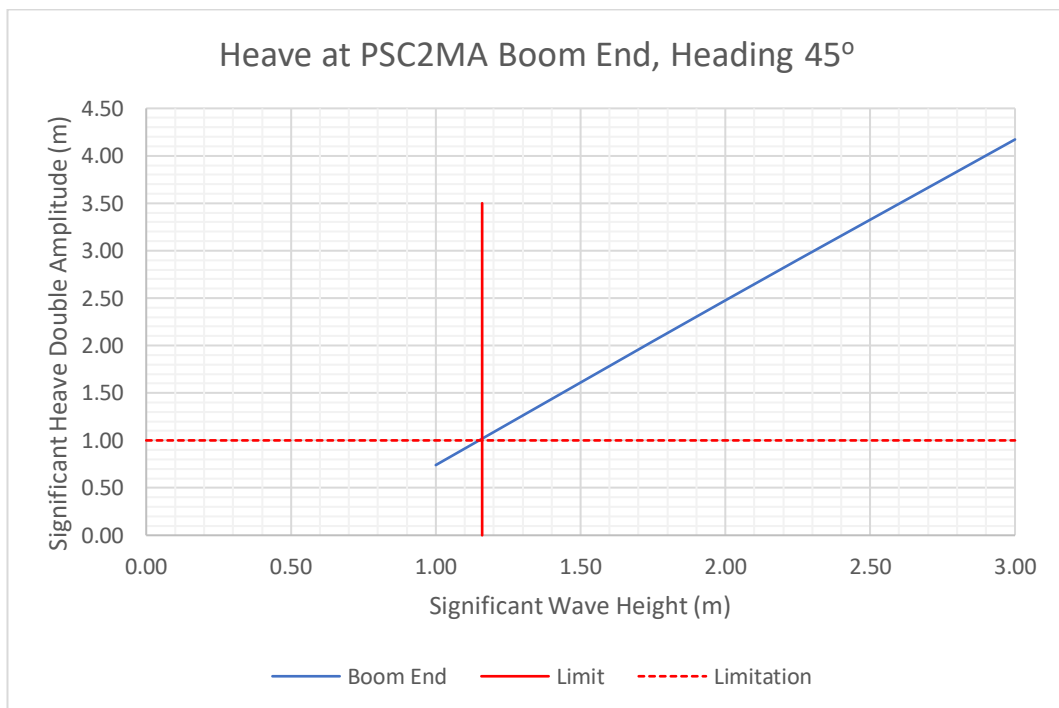
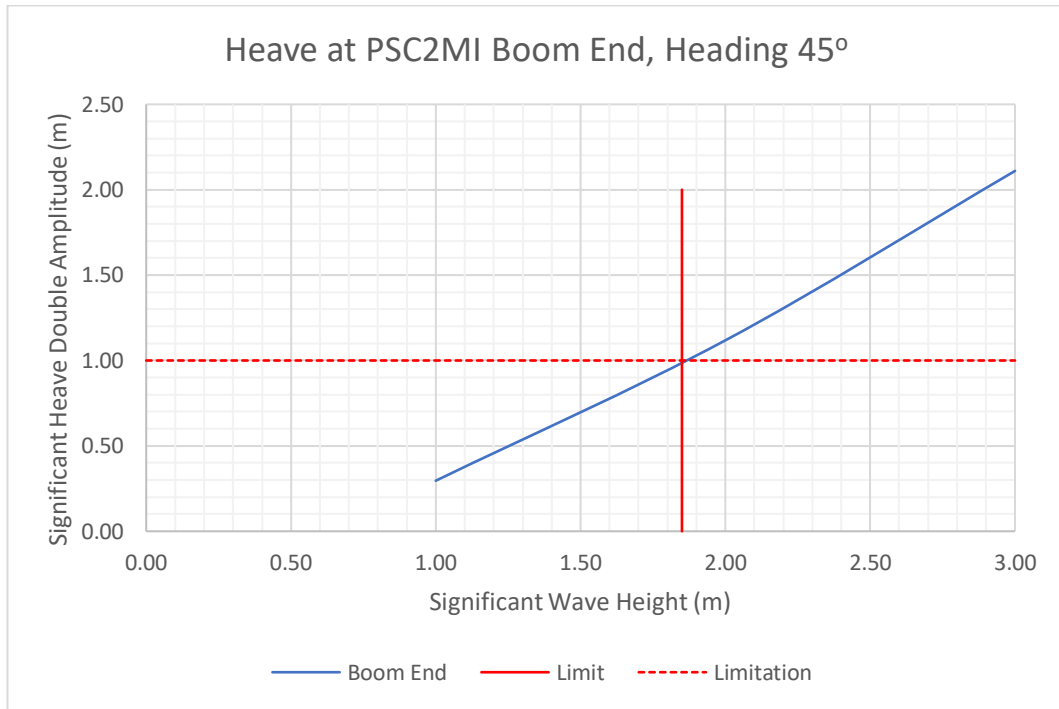
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC3MI dan SBC3MA pada *heading* 45°.



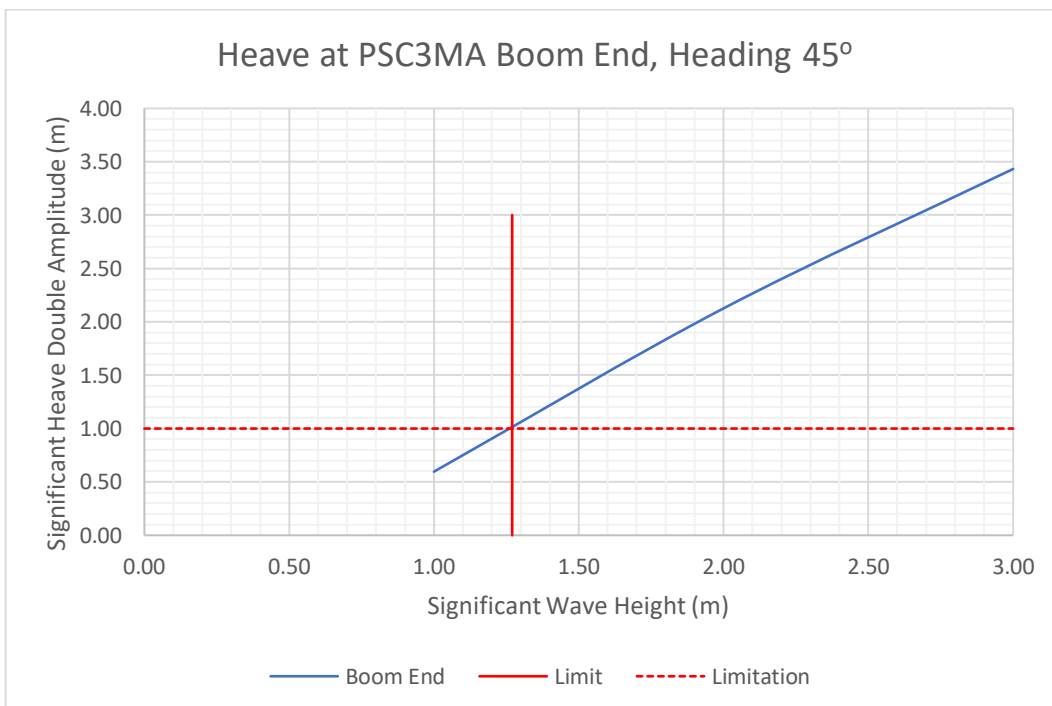
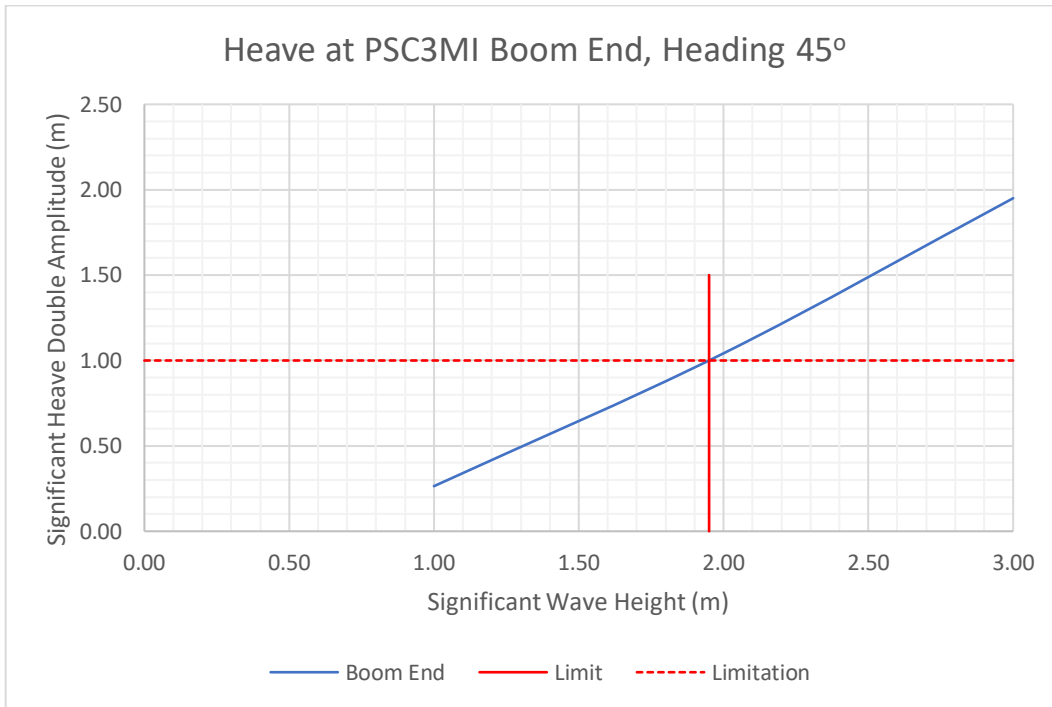
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC1MI dan PSC1MA pada *heading* 45°.



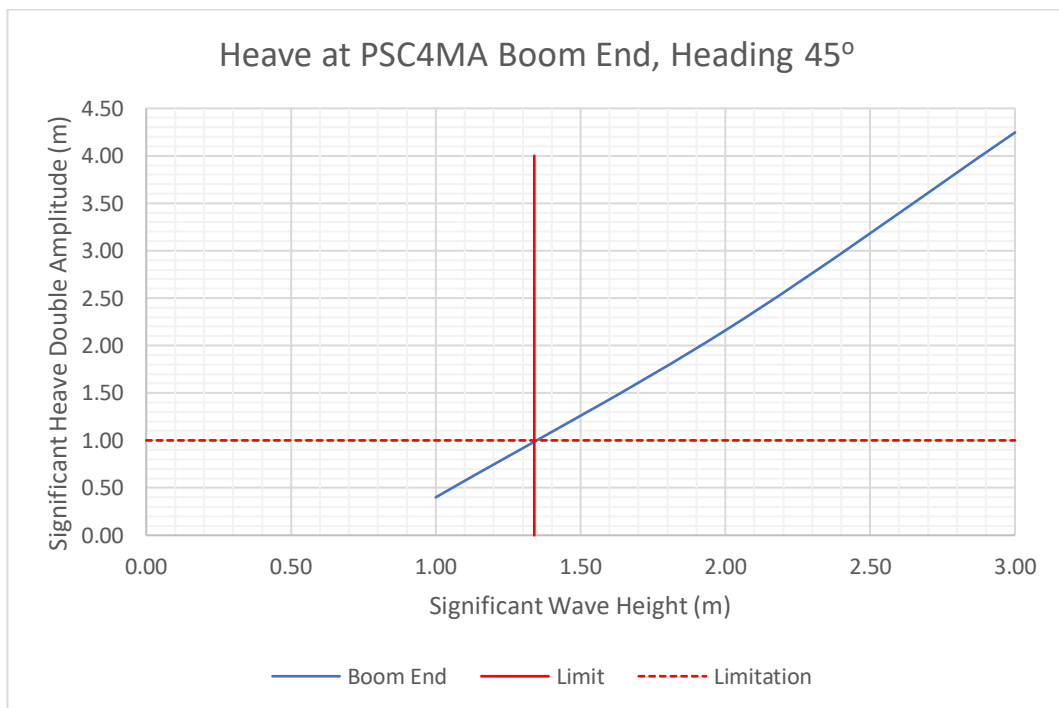
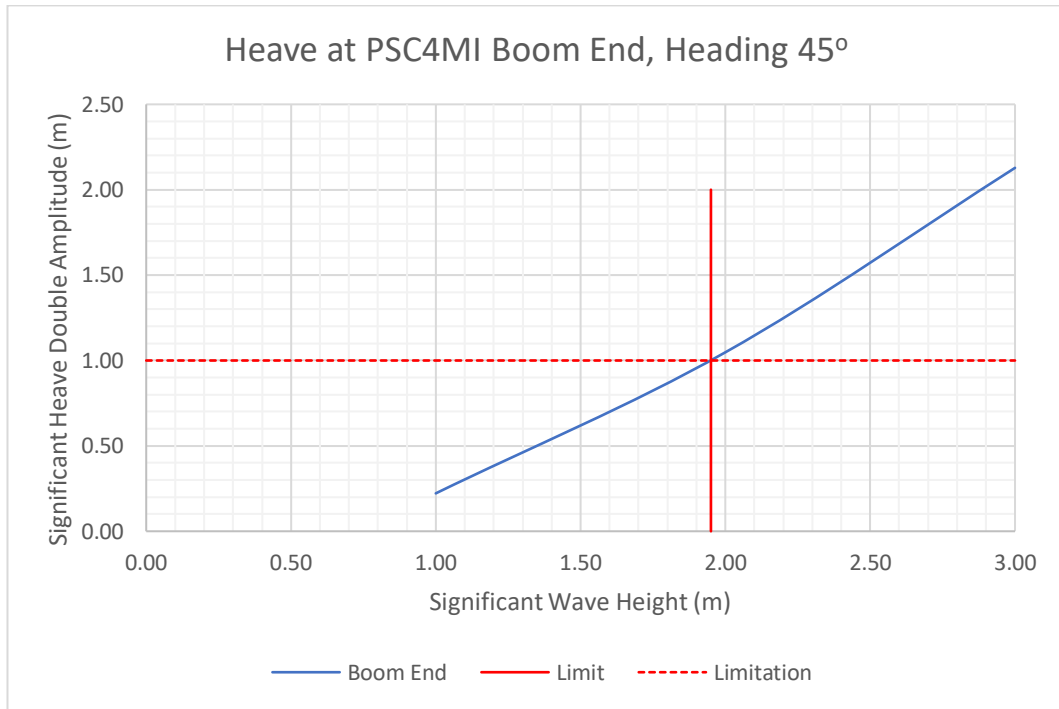
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC2MI dan PSC2MA pada *heading* 45°.



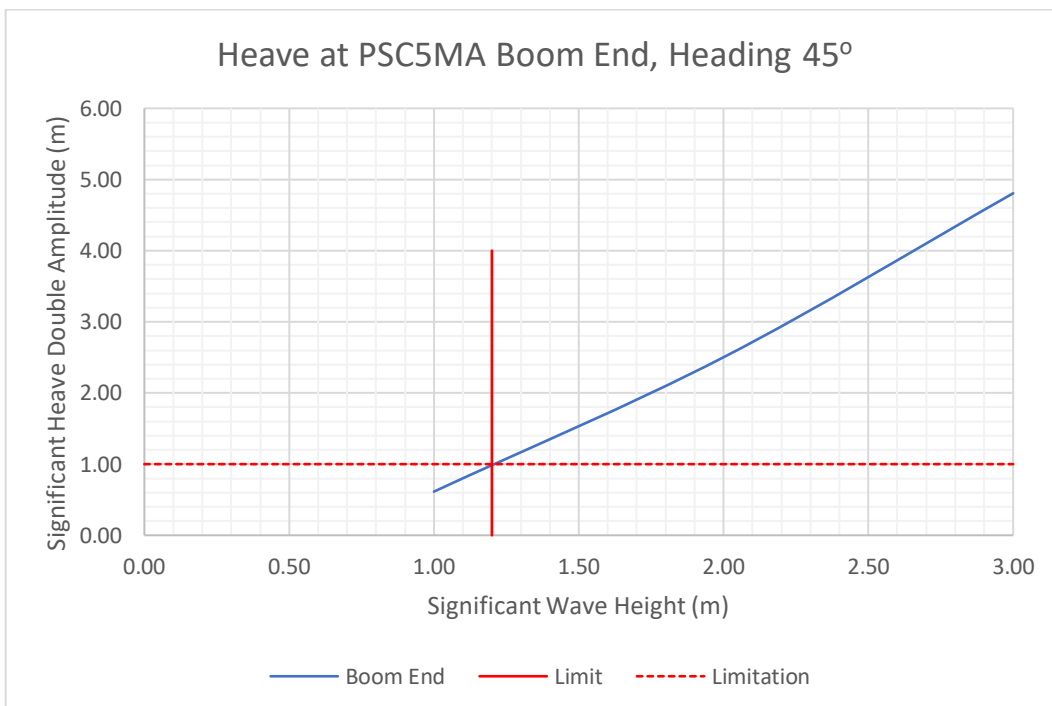
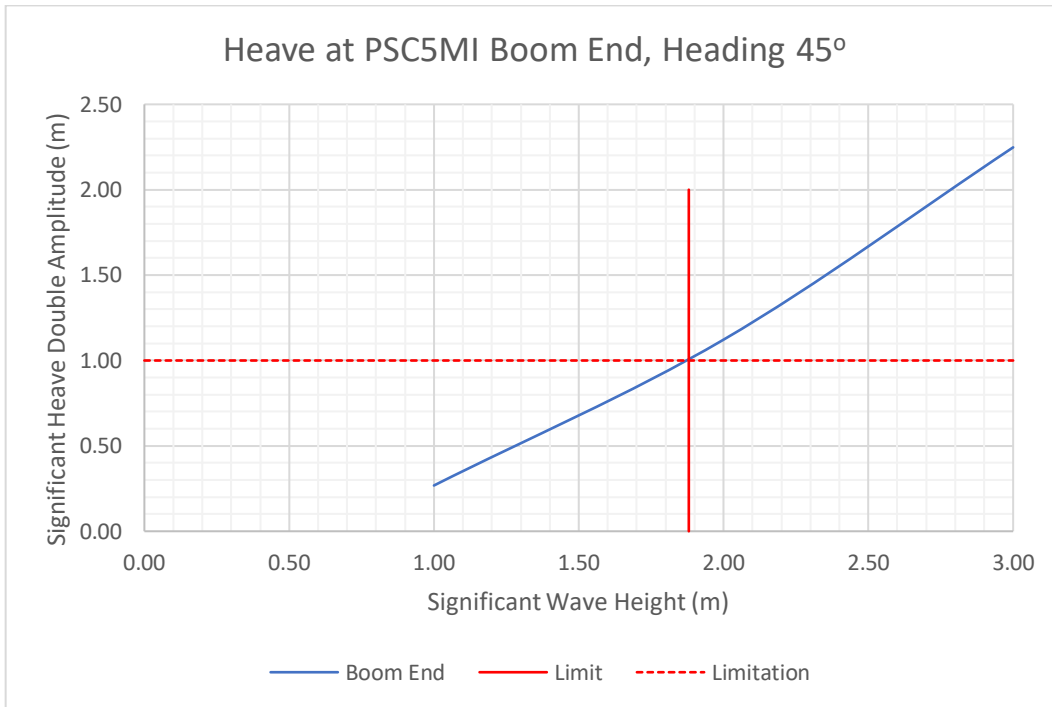
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC3MI dan PSC3MA pada *heading* 45°.



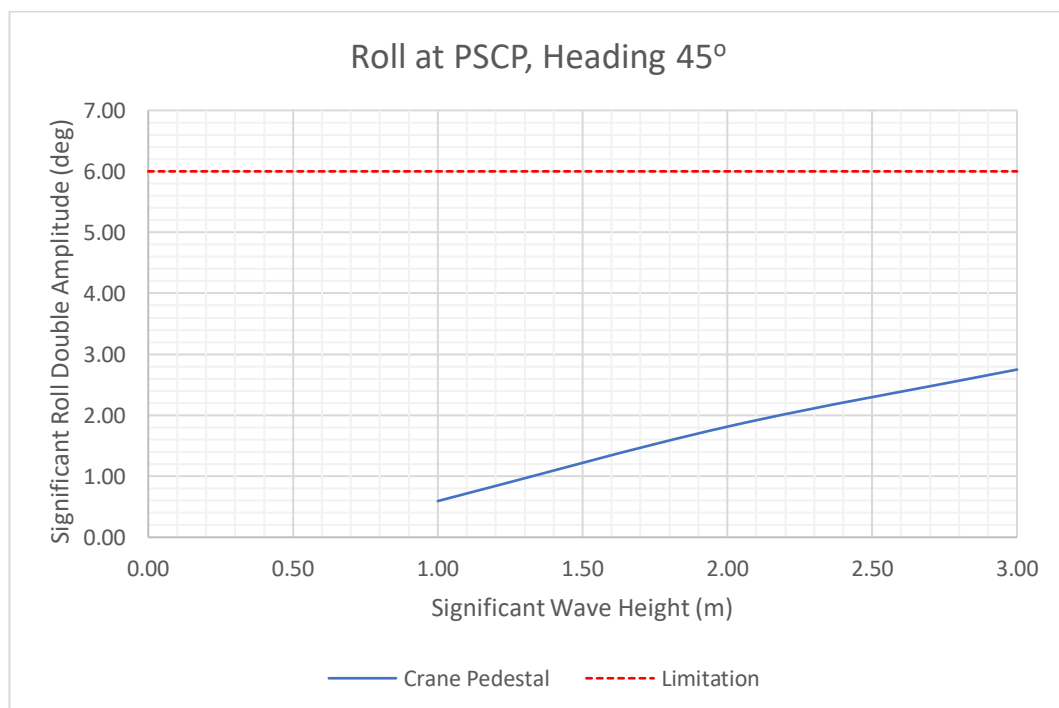
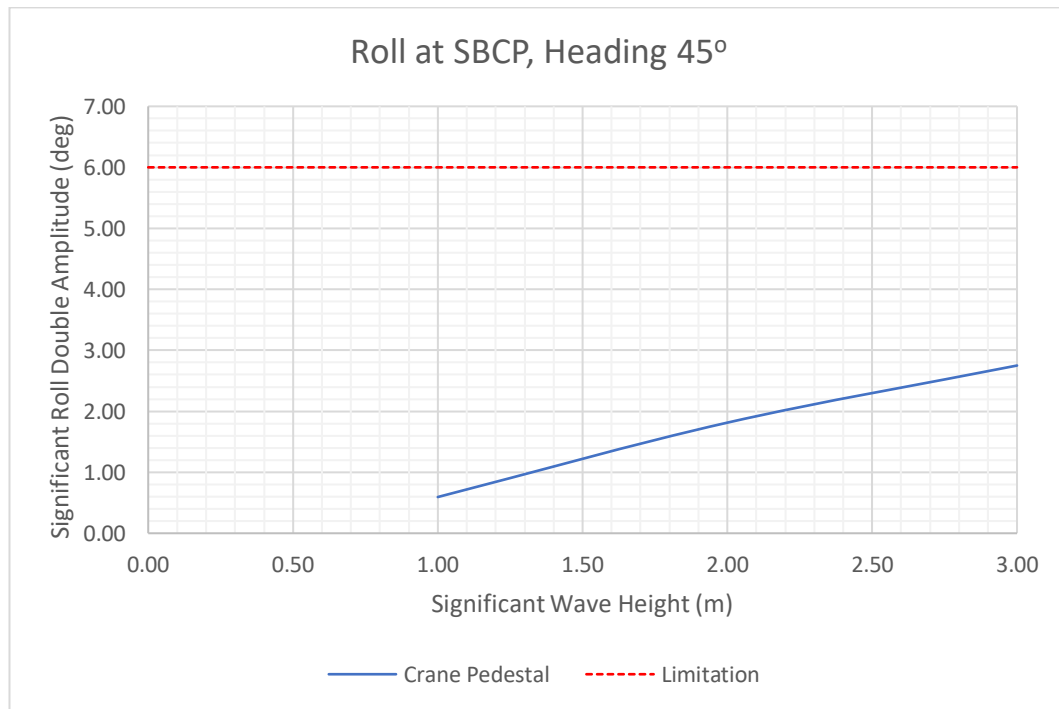
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC4MI dan PSC4MA pada *heading* 45°.



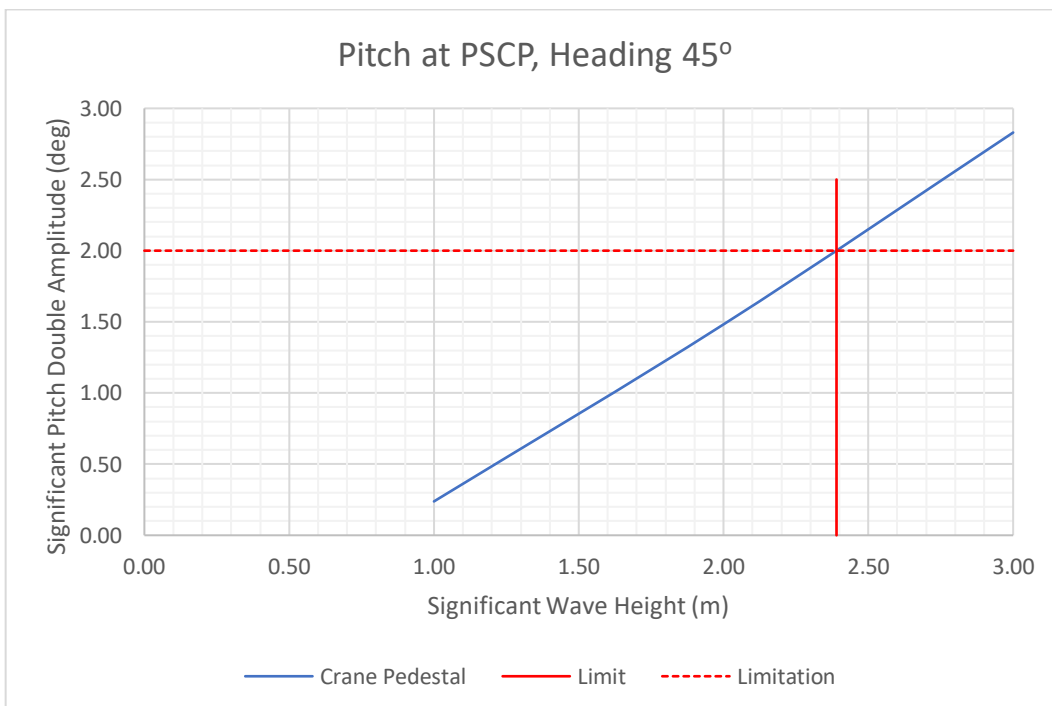
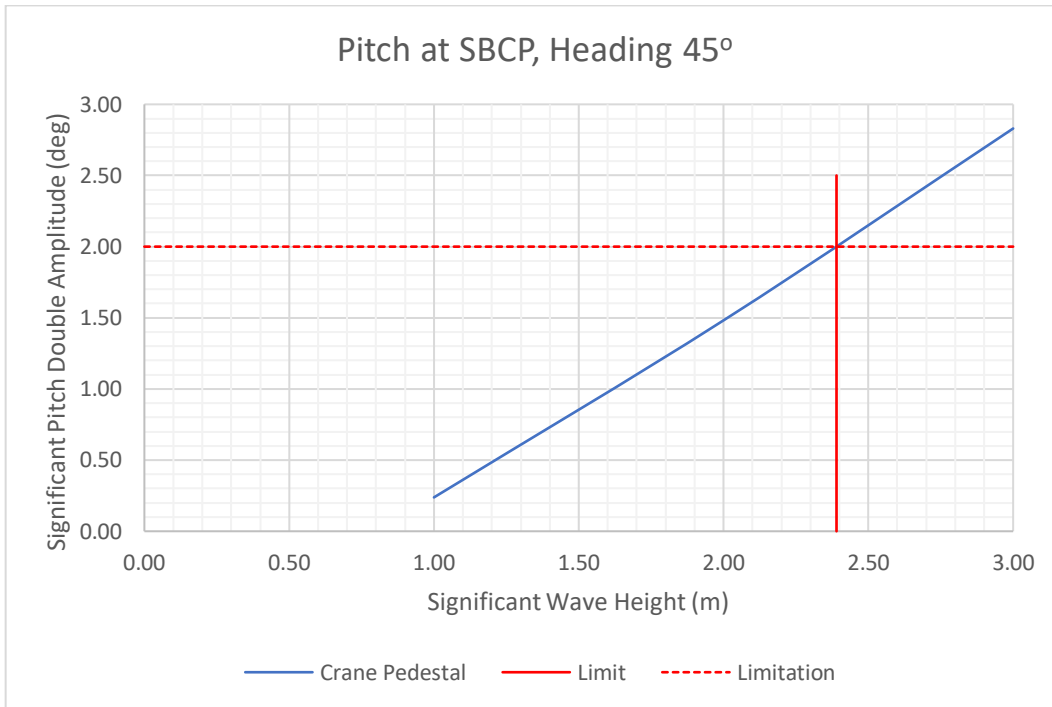
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC5MI dan PSC5MA pada *heading* 45°.



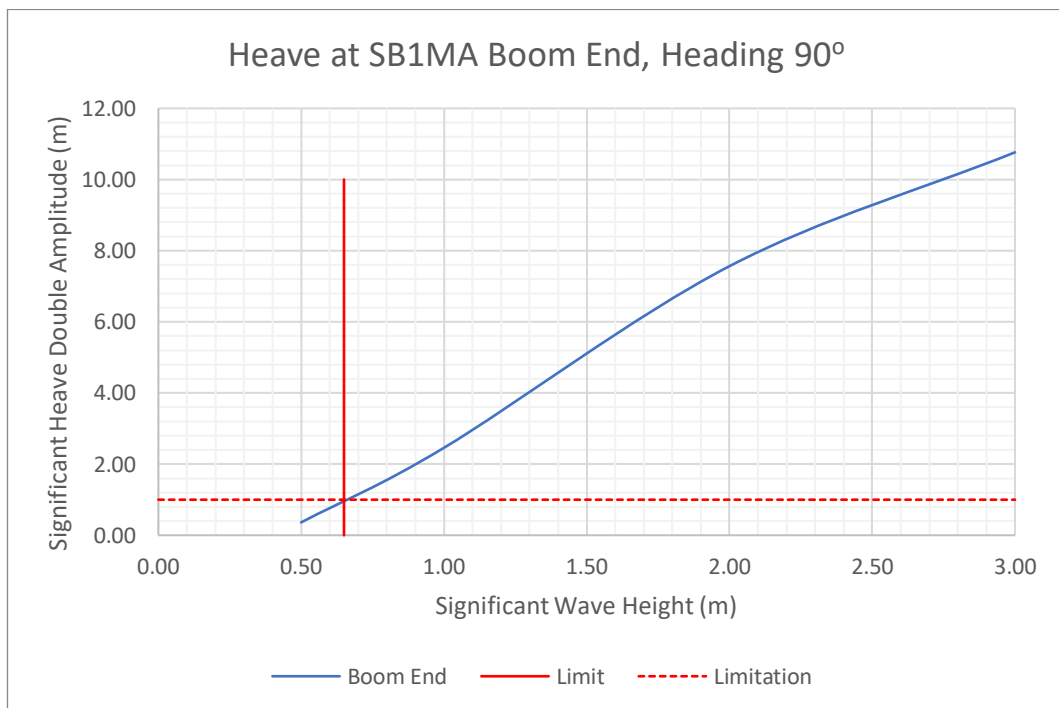
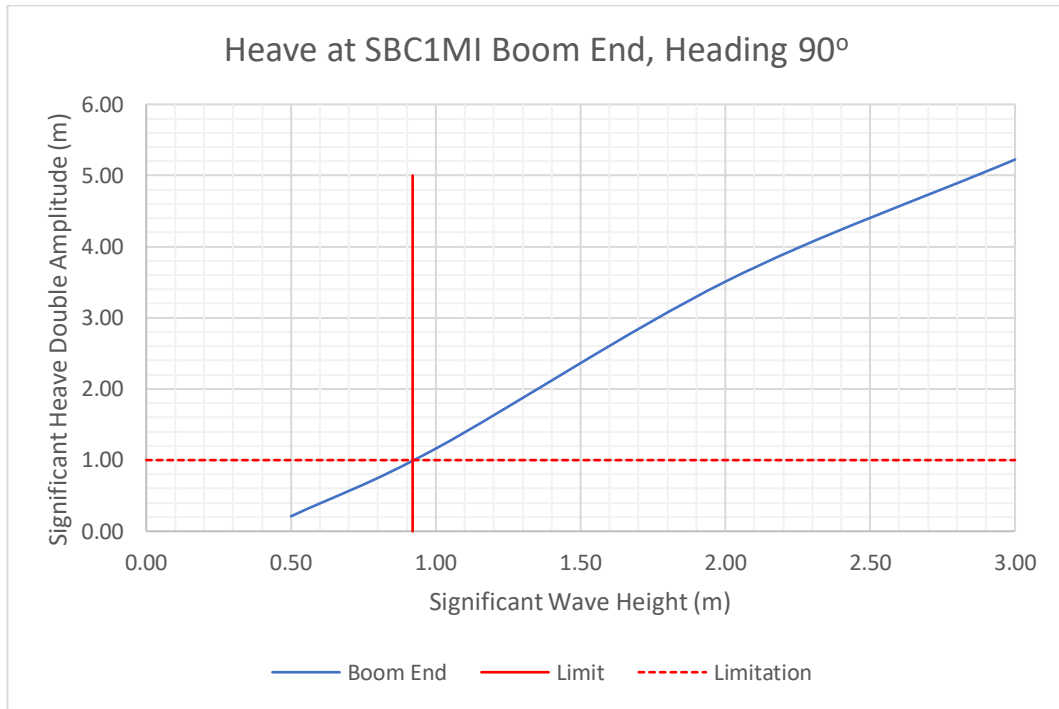
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *roll* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 45°.



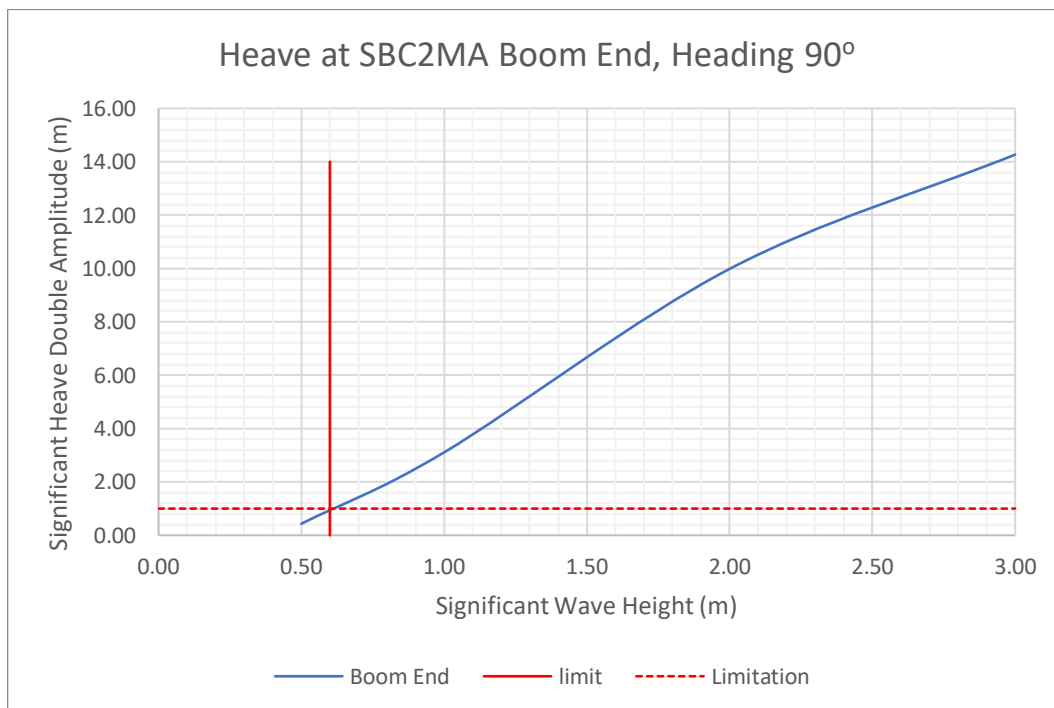
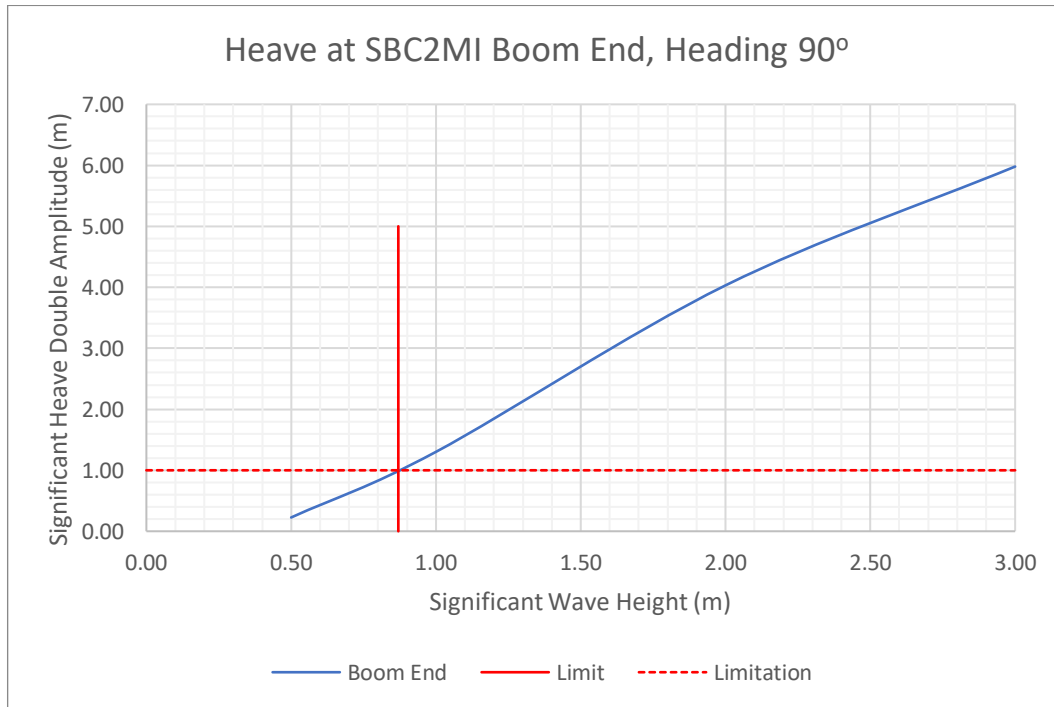
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *pitch* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 45°.



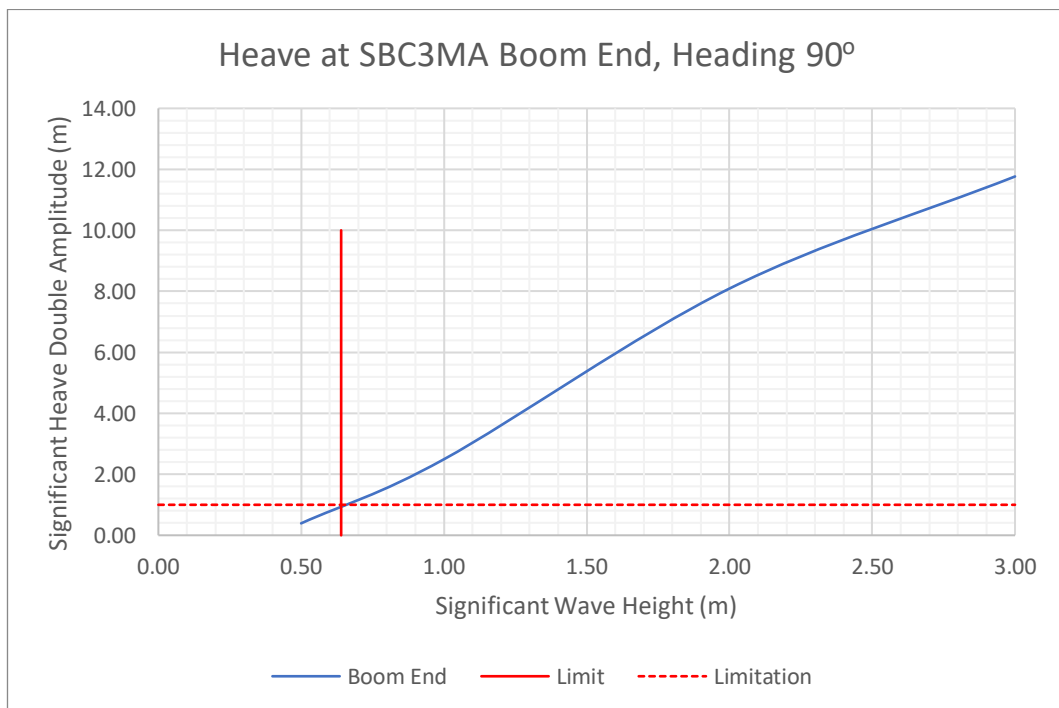
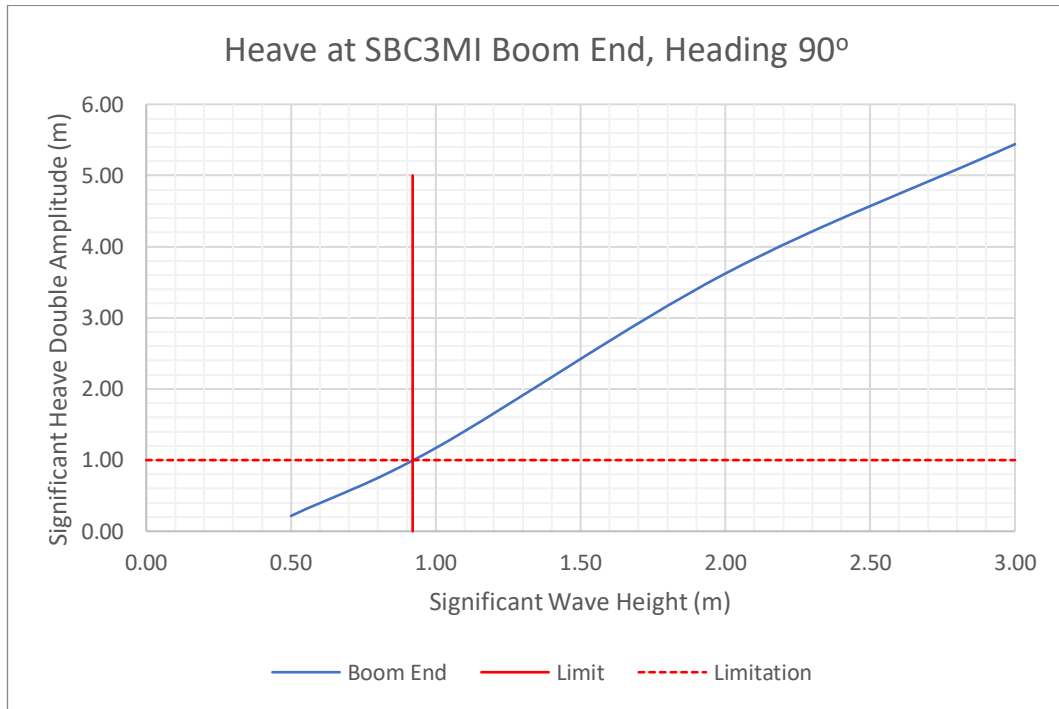
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC1MI dan SBC1MA pada *heading* 90°.



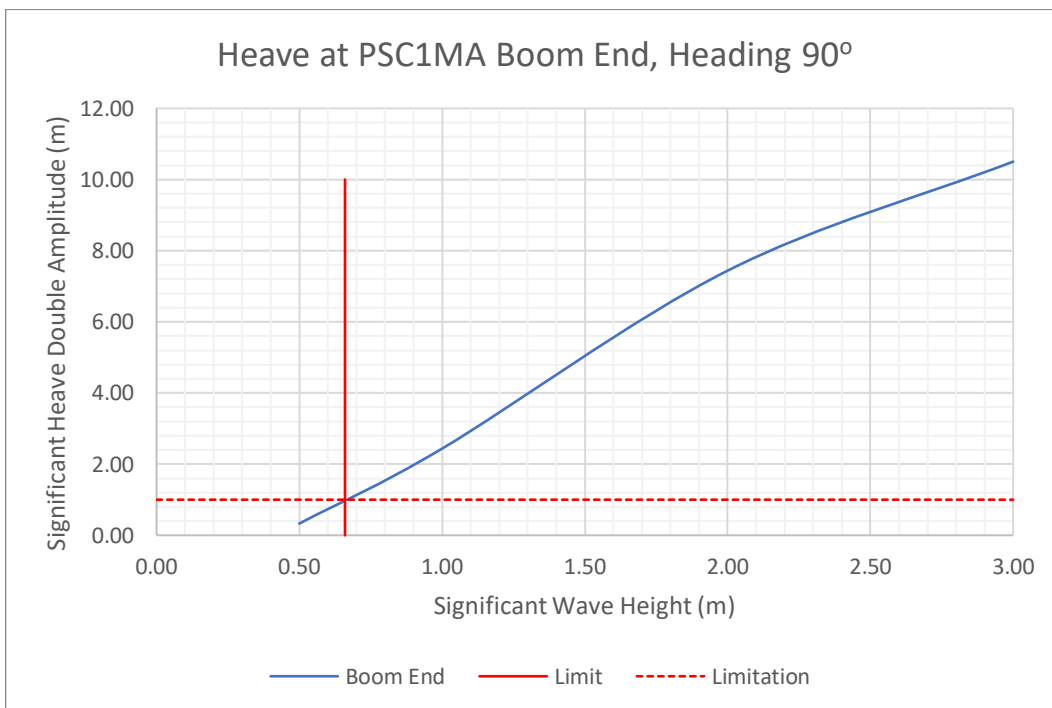
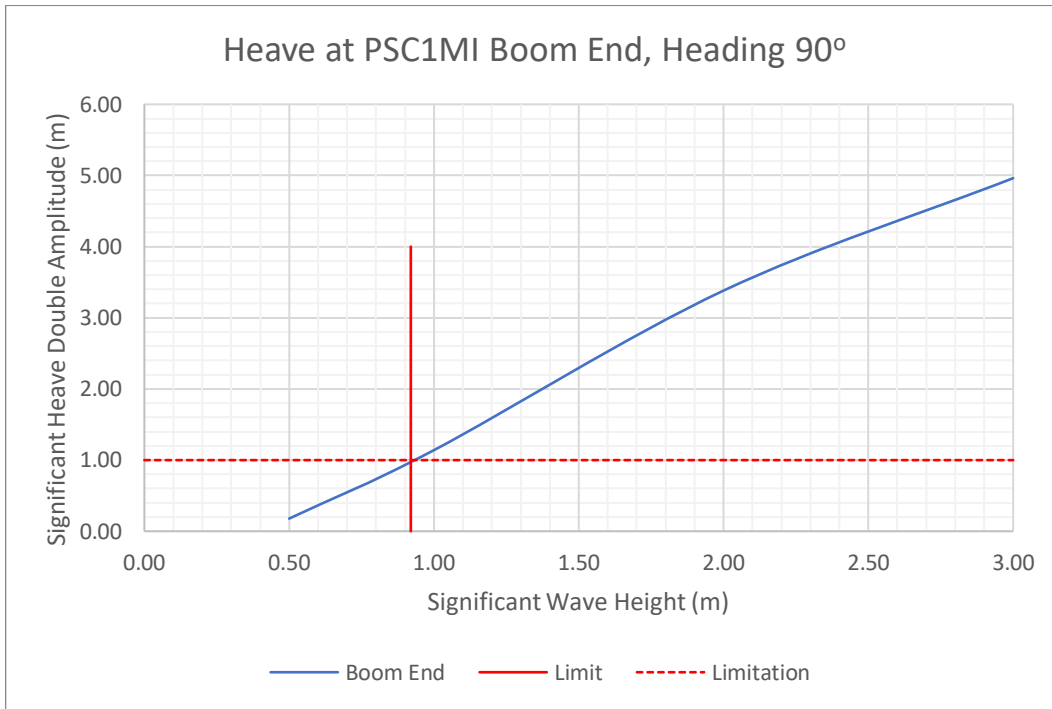
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC2MI dan SBC2MA pada *heading* 90°.



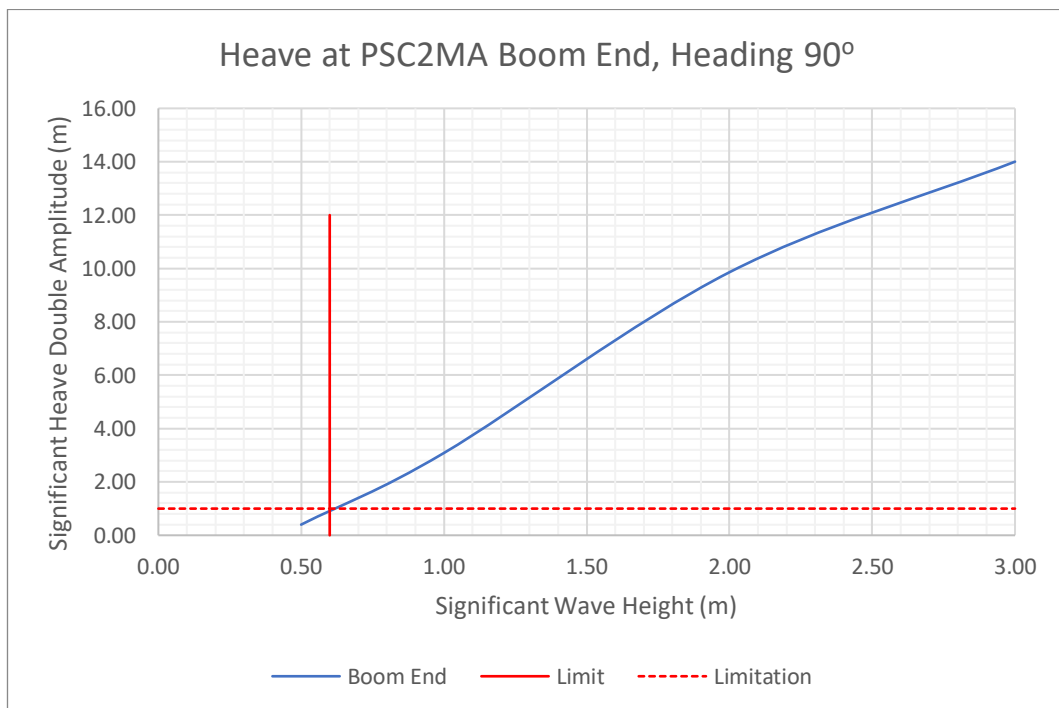
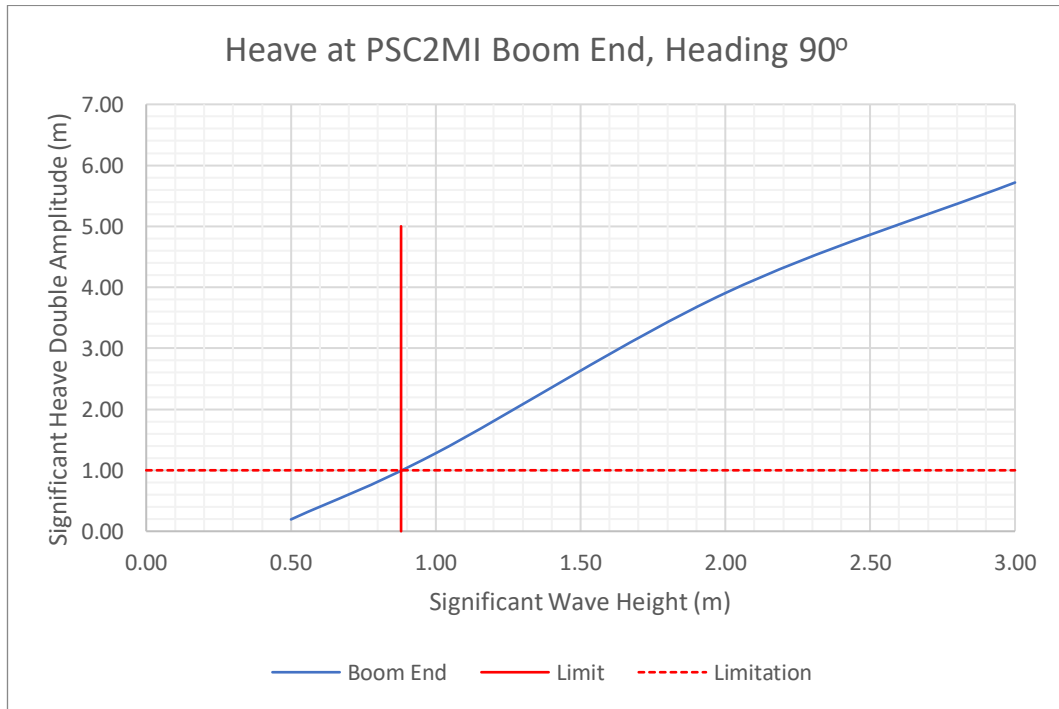
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi crane mode gerakan *heave* kode SBC3MI dan SBC3MA pada *heading* 90°.



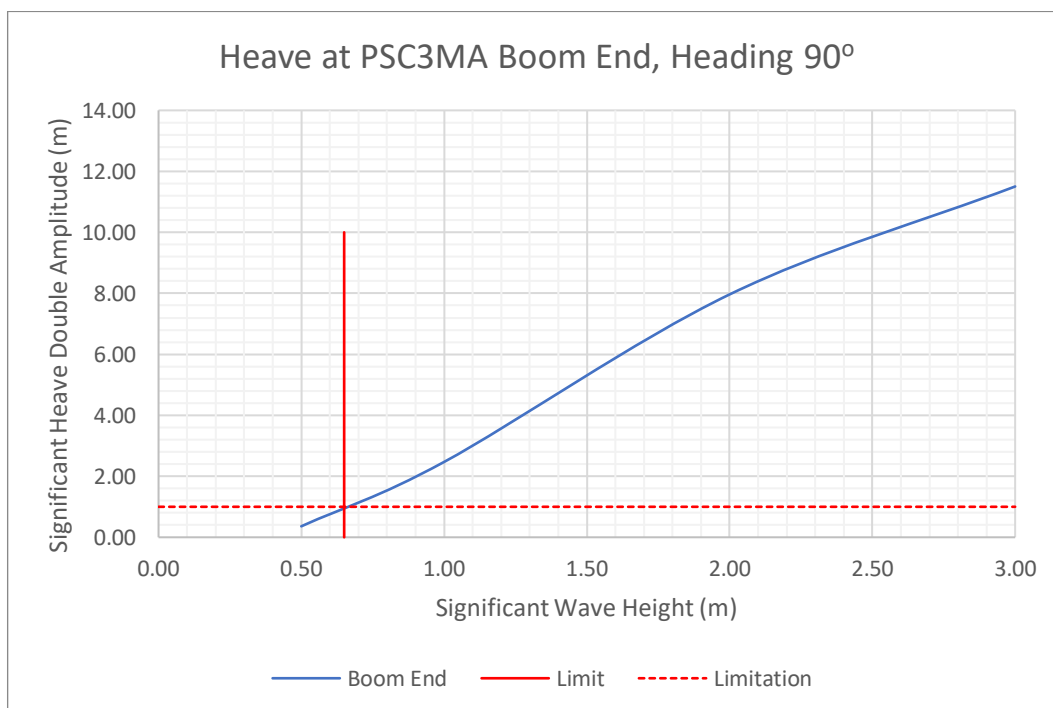
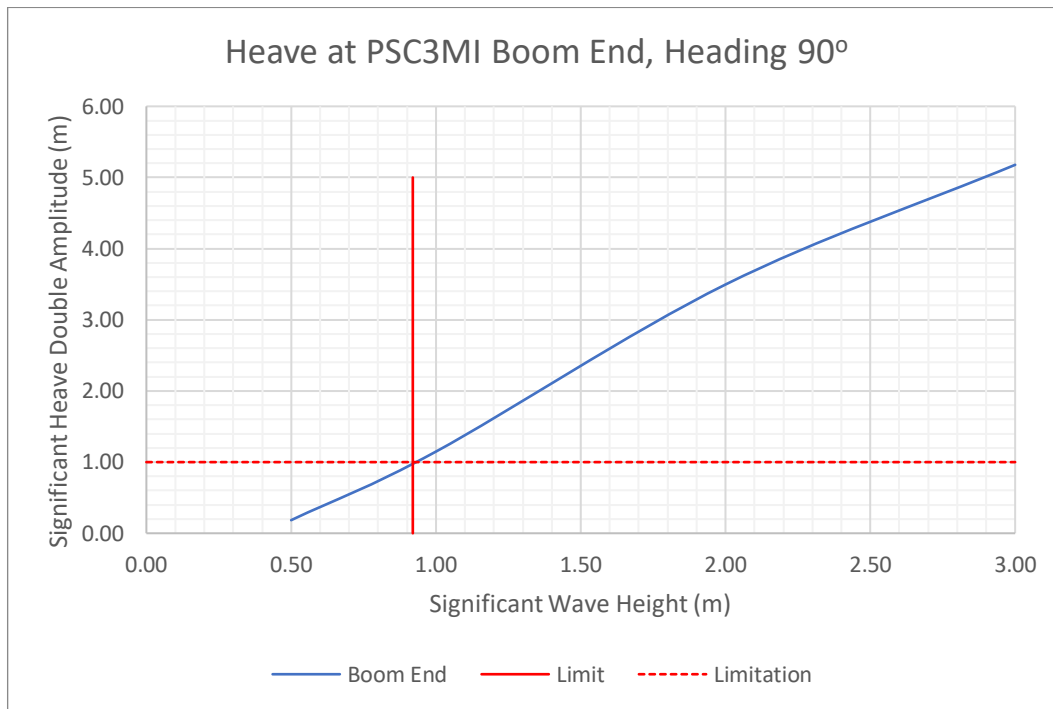
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC1MI dan PSC1MA pada *heading* 90°.



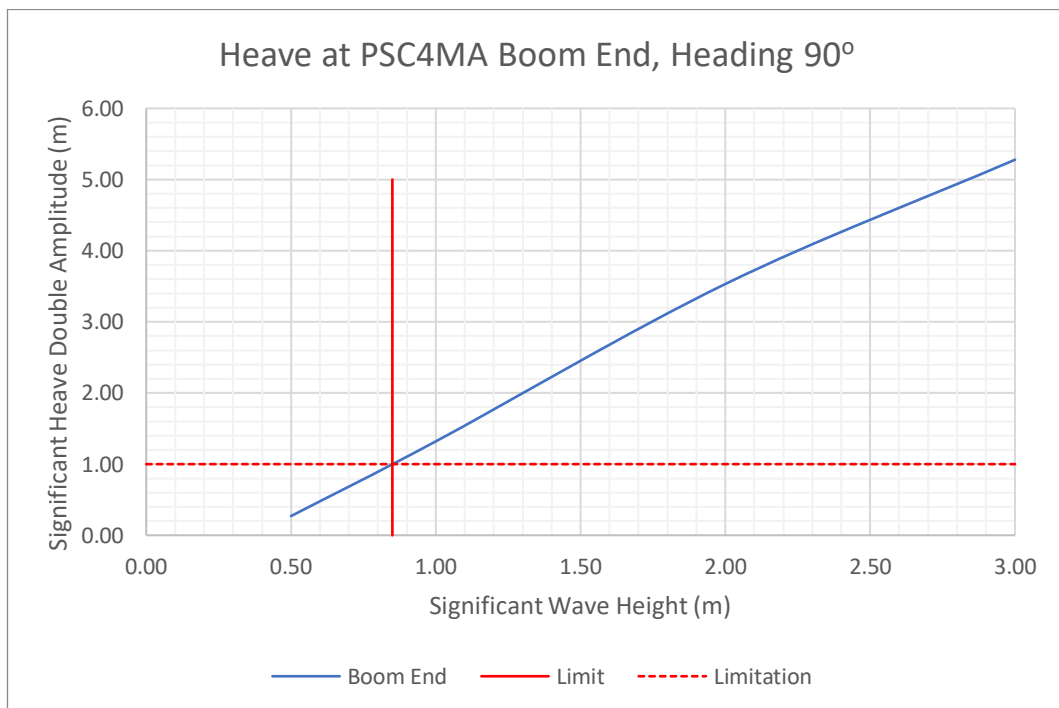
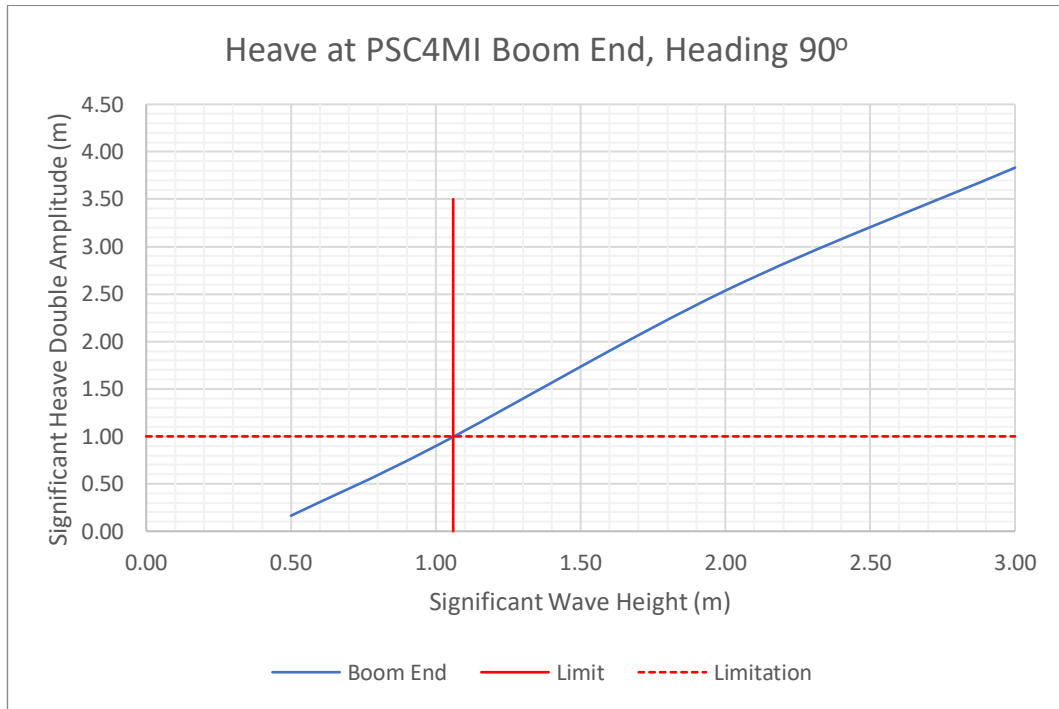
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi crane mode gerakan *heave* kode PSC2MI dan PSC2MA pada *heading* 90°.



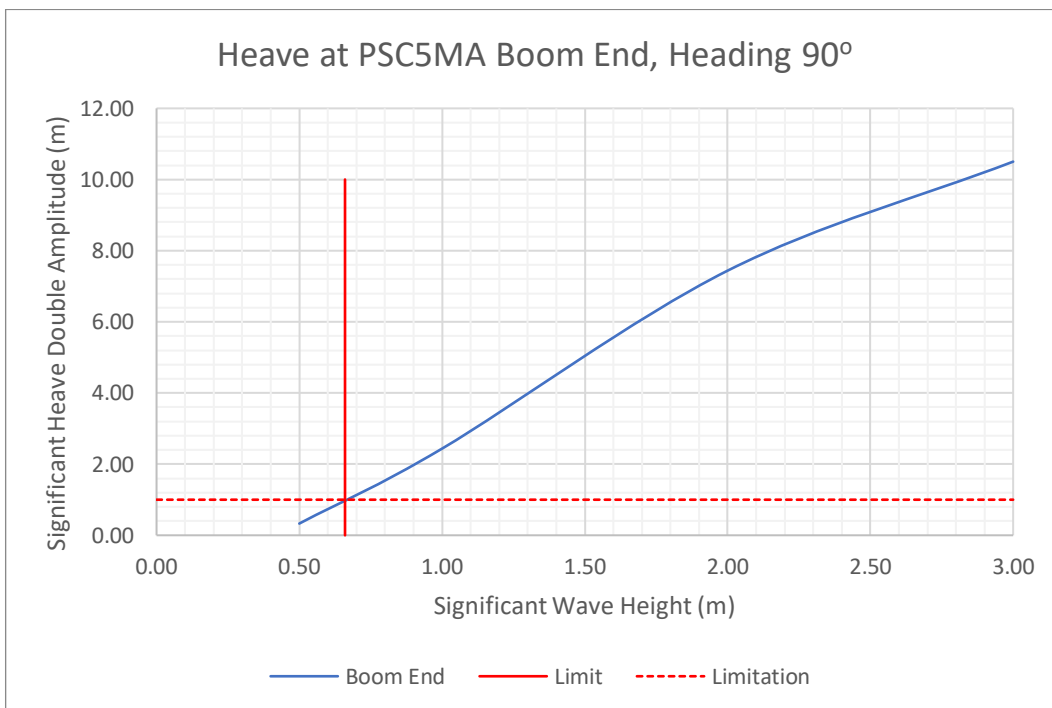
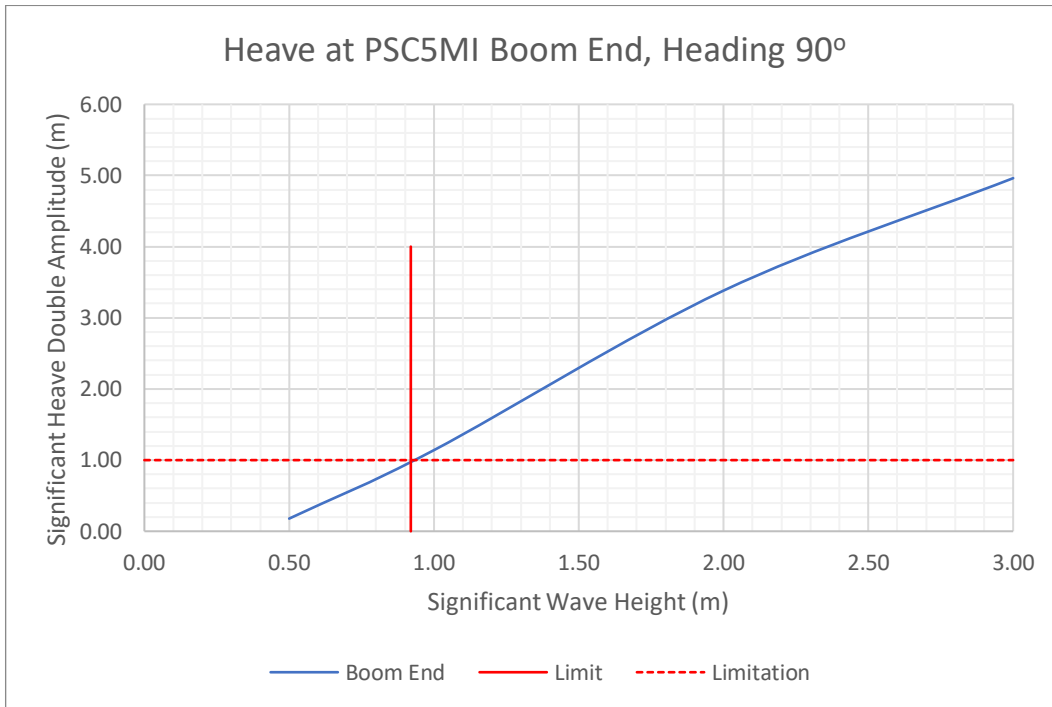
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC3MI dan PSC3MA pada *heading* 90°.



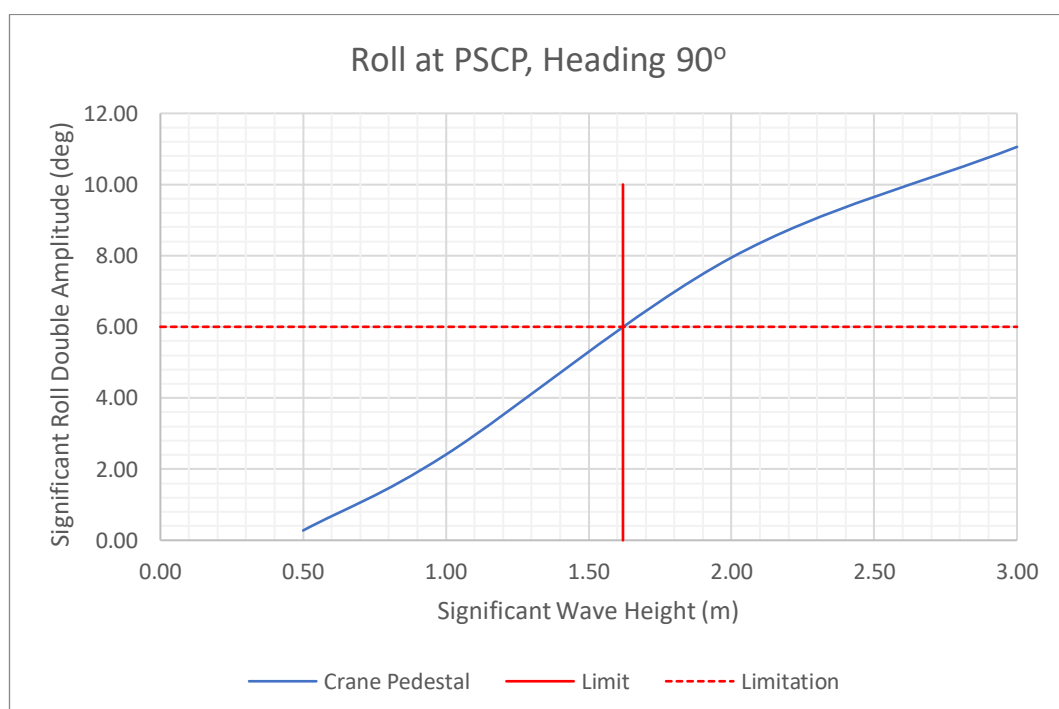
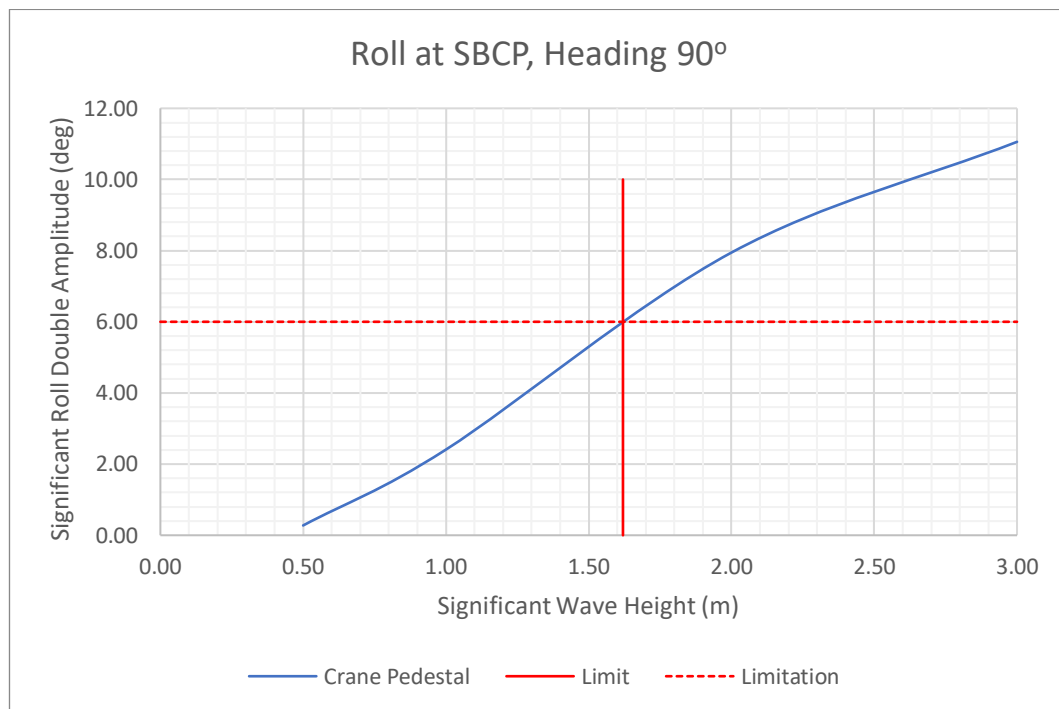
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC4MI dan PSC4MA pada *heading* 90°.



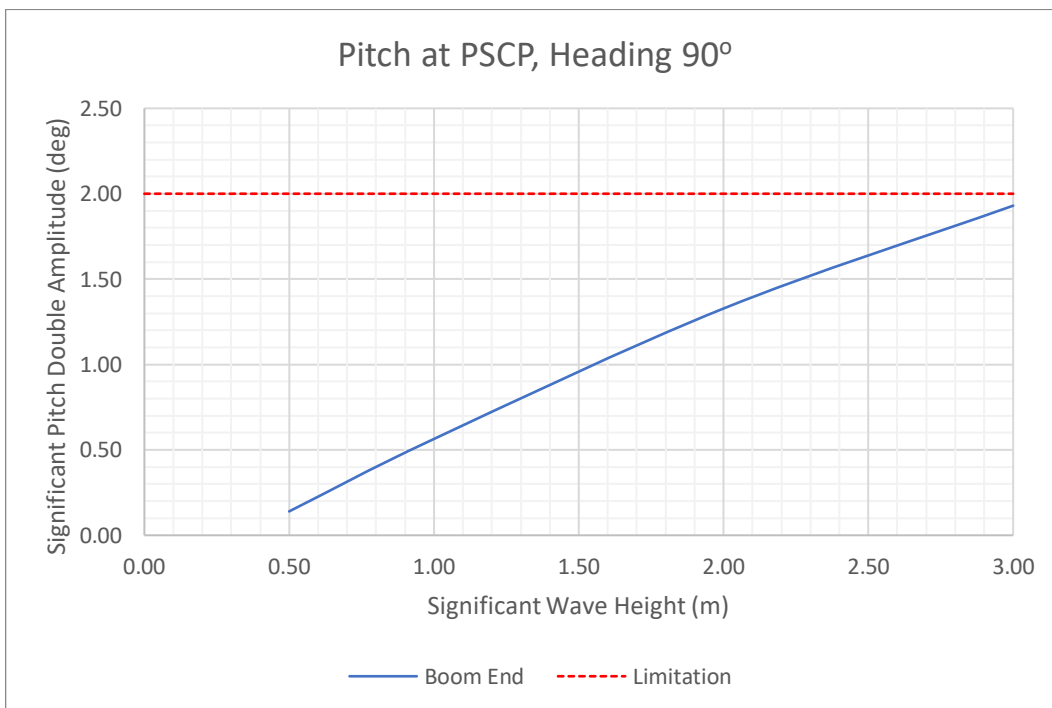
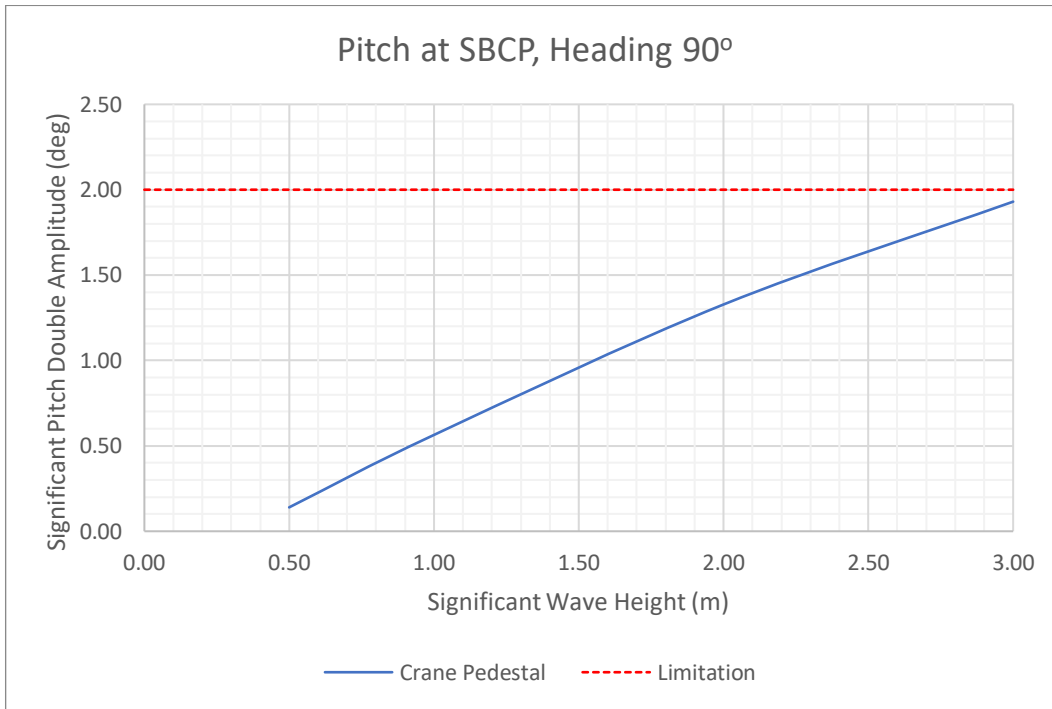
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC5MI dan PSC5MA pada *heading* 90°.



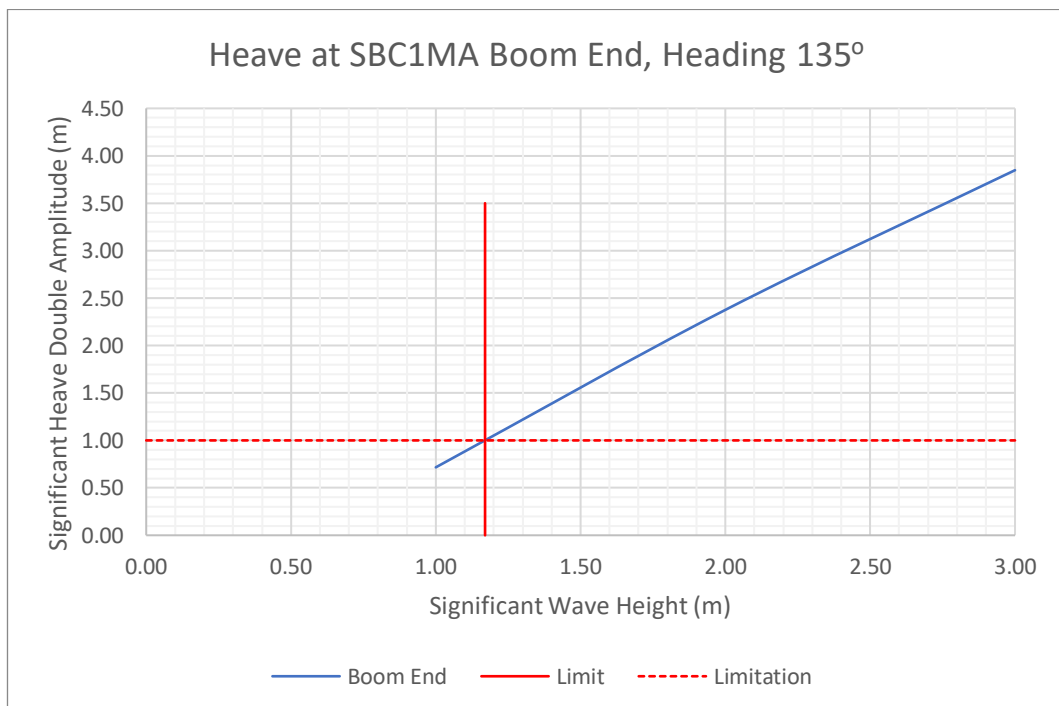
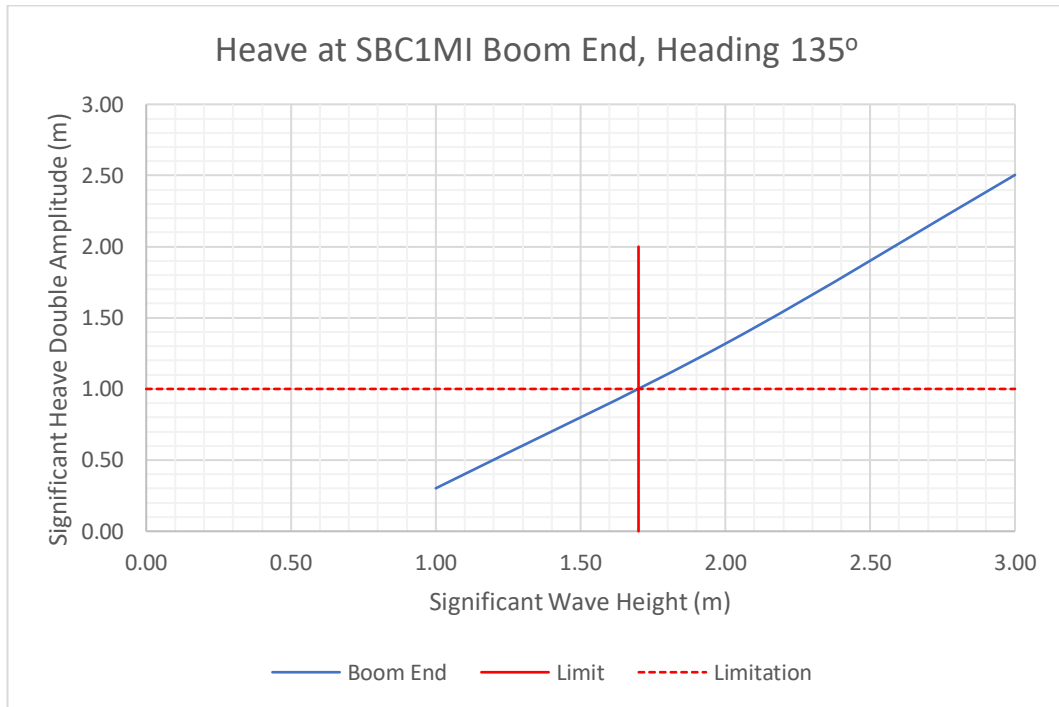
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *roll* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 90°.



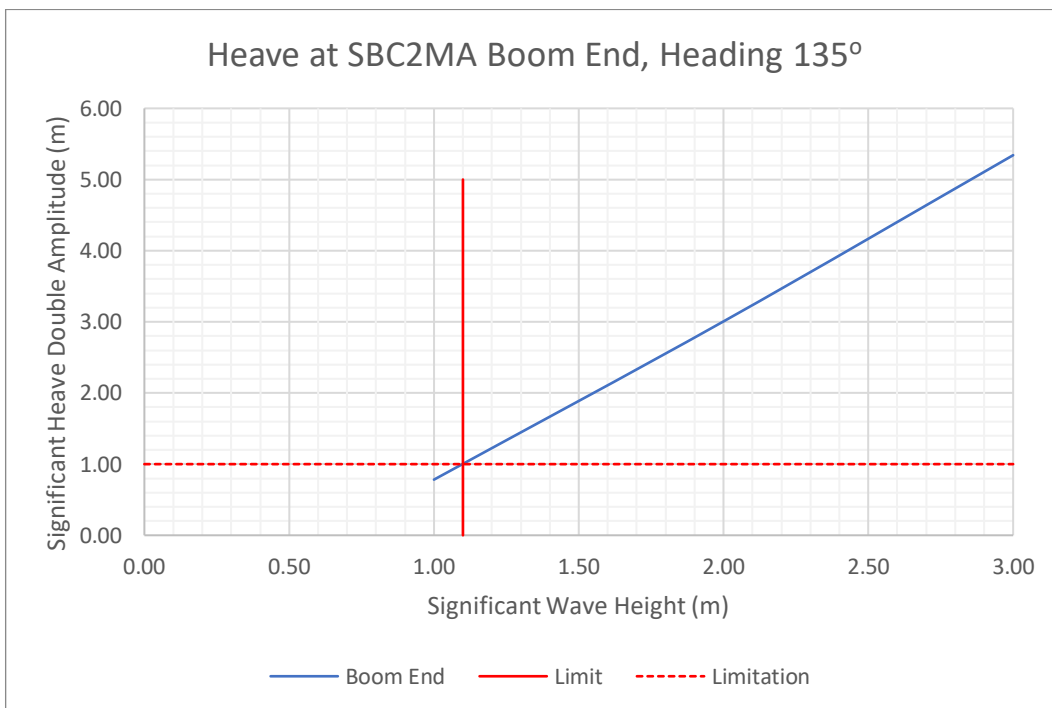
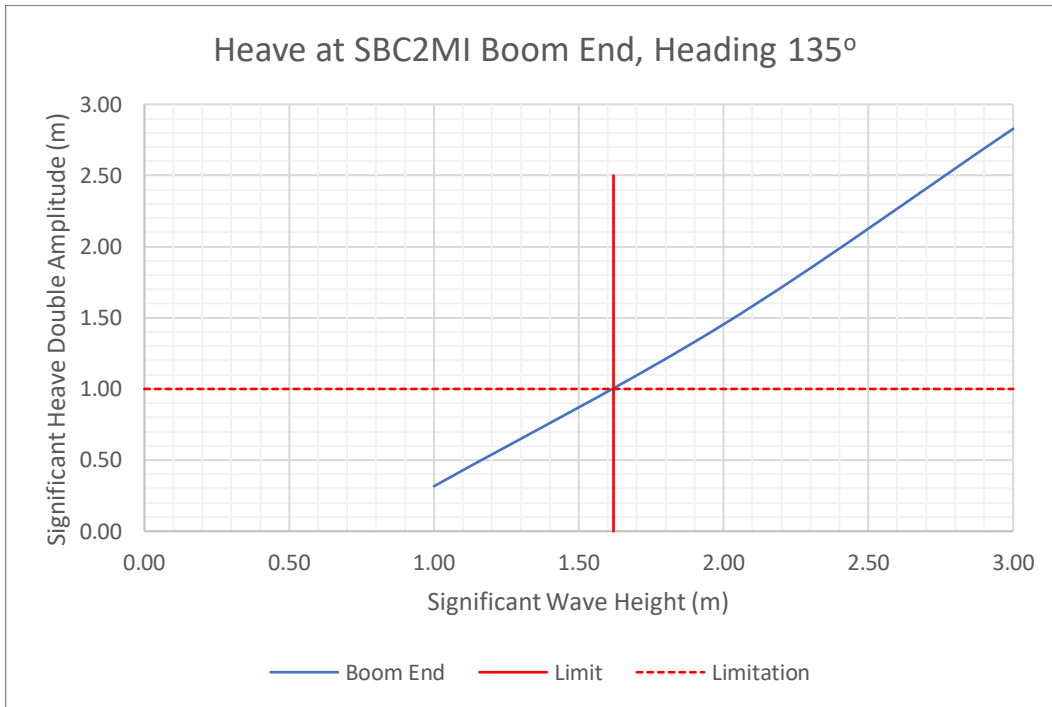
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *pitch* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 90°.



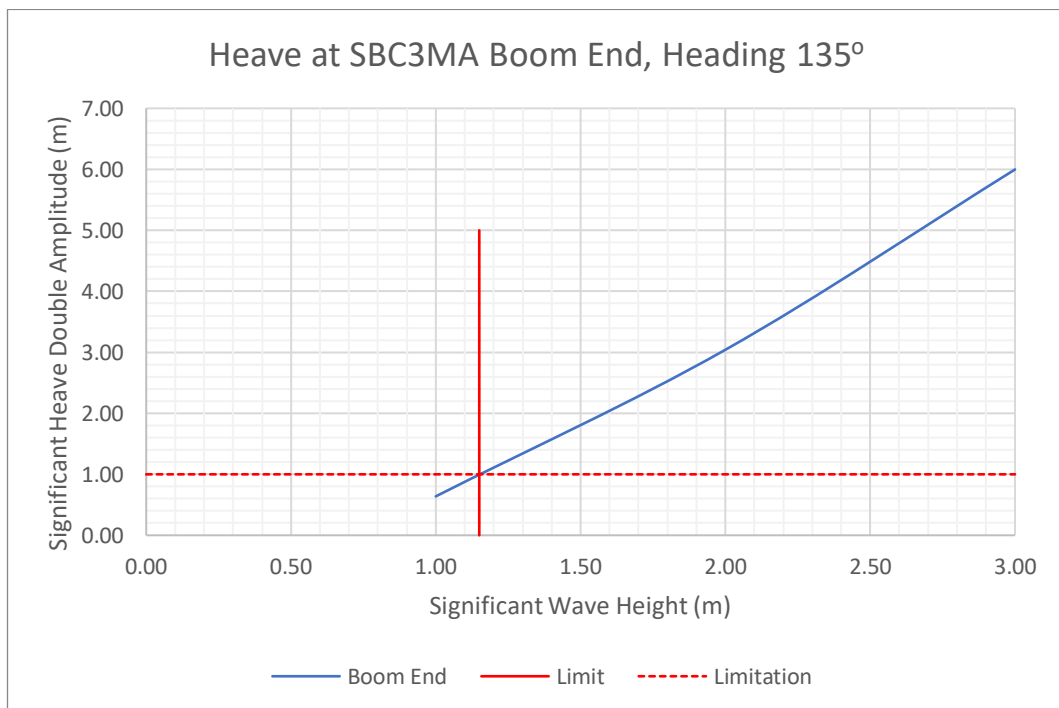
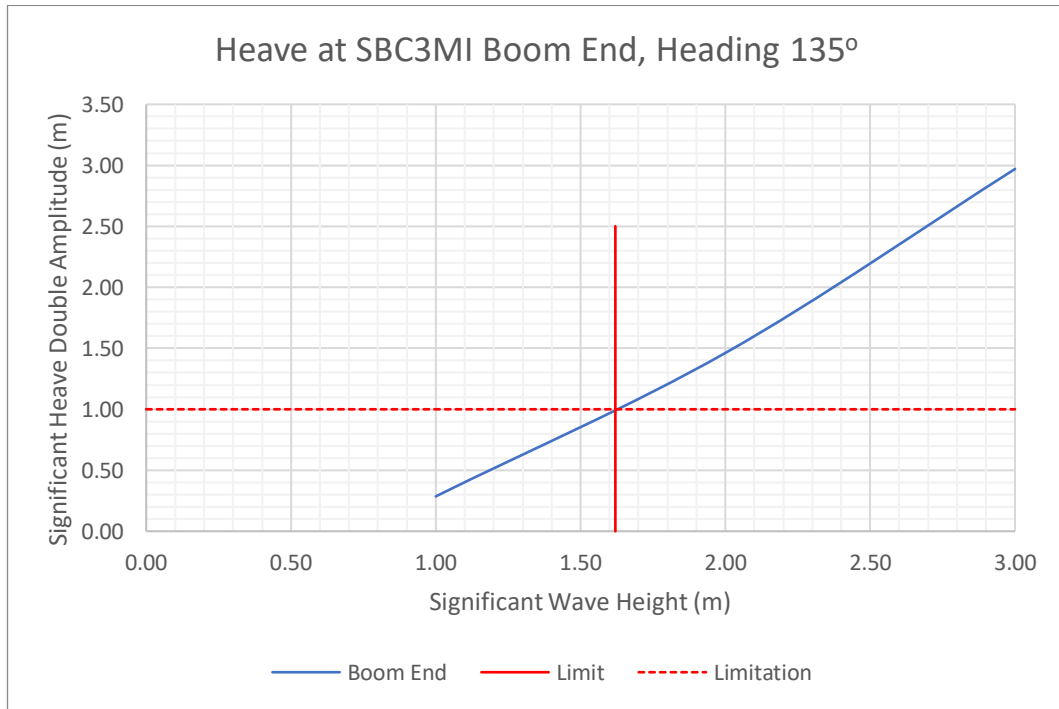
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC1MI dan SBC1MA pada *heading* 135°.



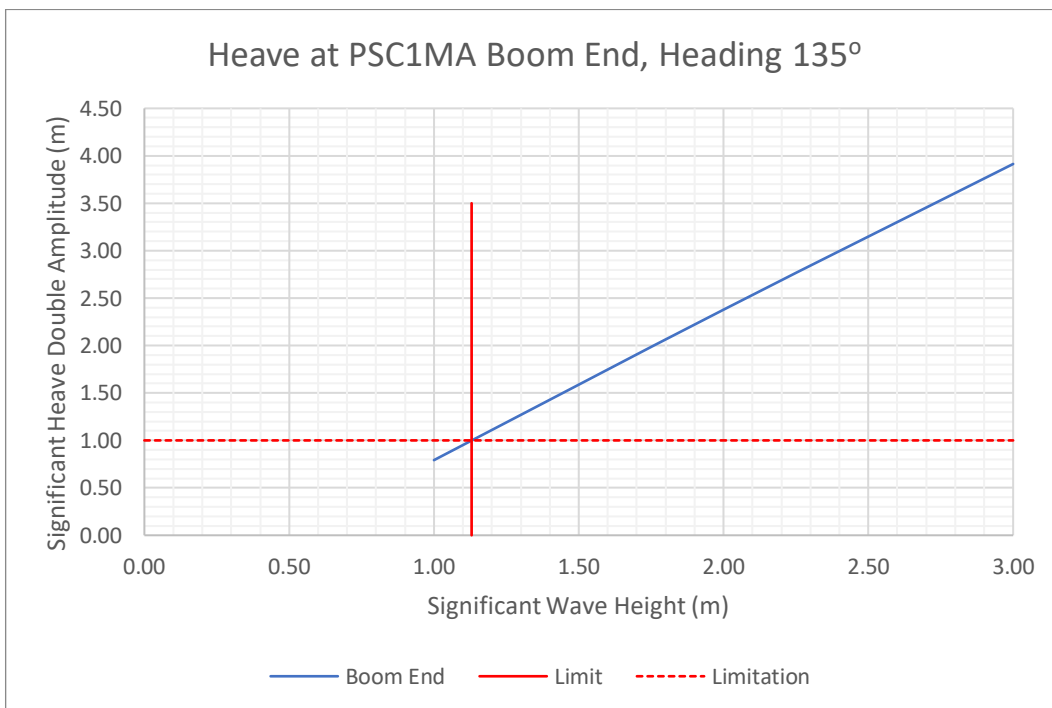
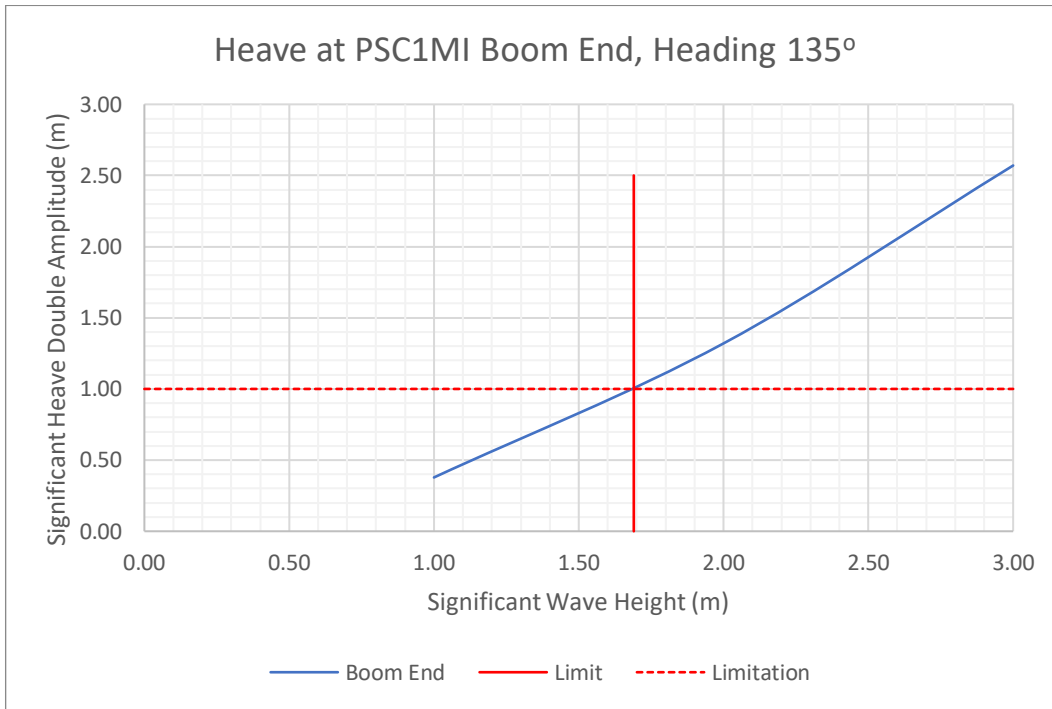
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC2MI dan SBC2MA pada *heading* 135°.



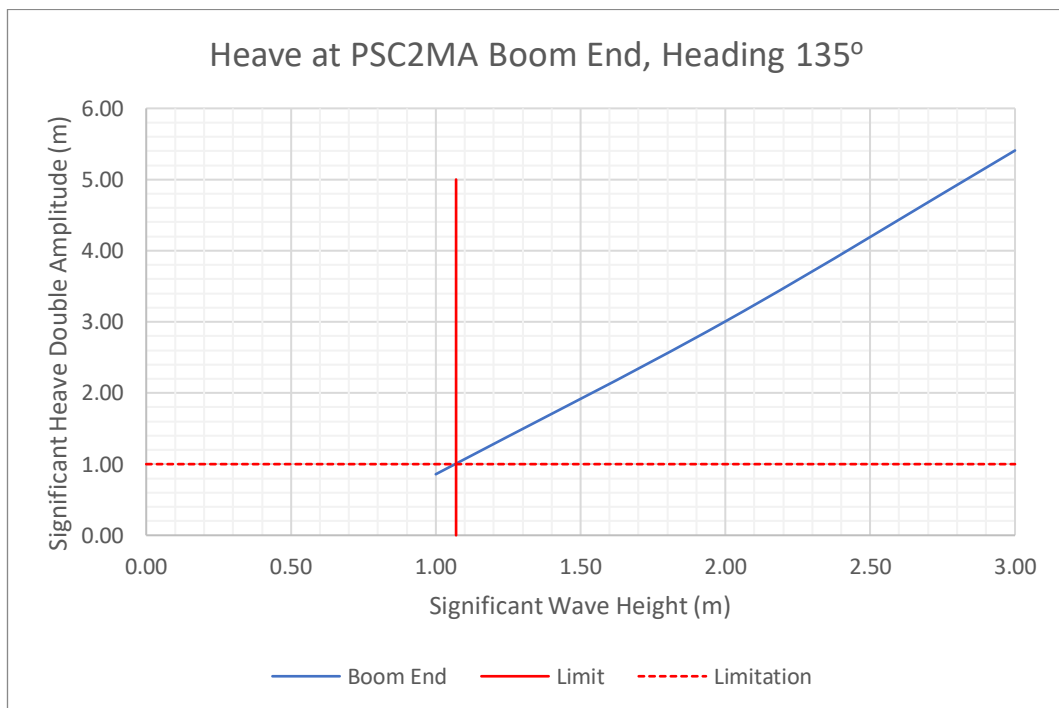
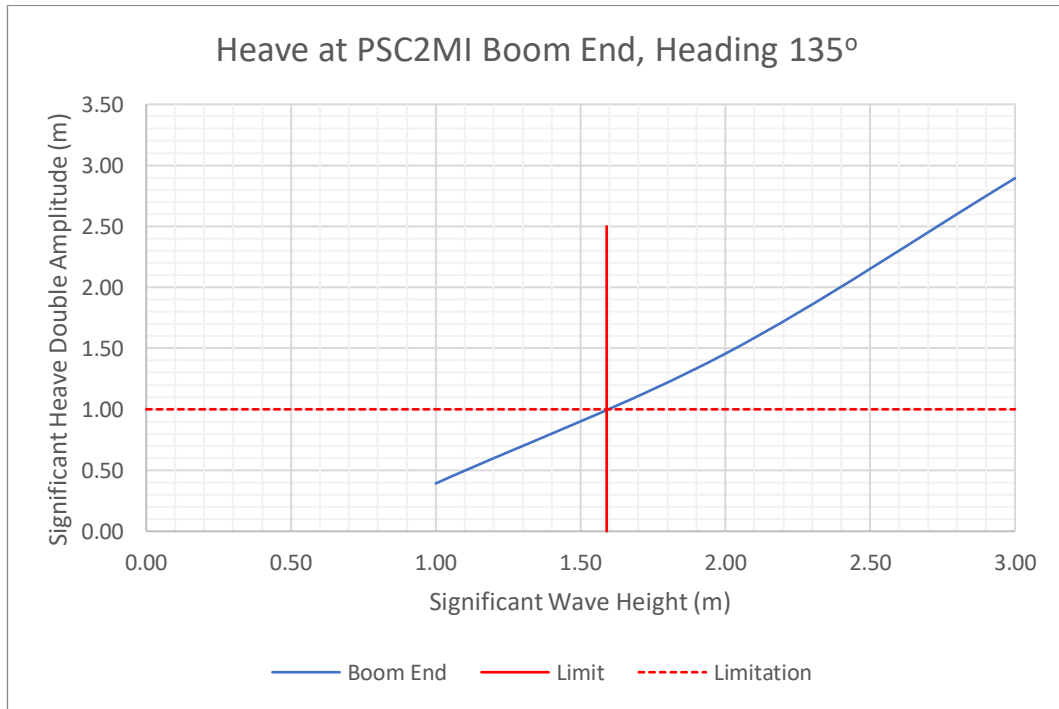
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC3MI dan SBC3MA pada *heading* 135°.



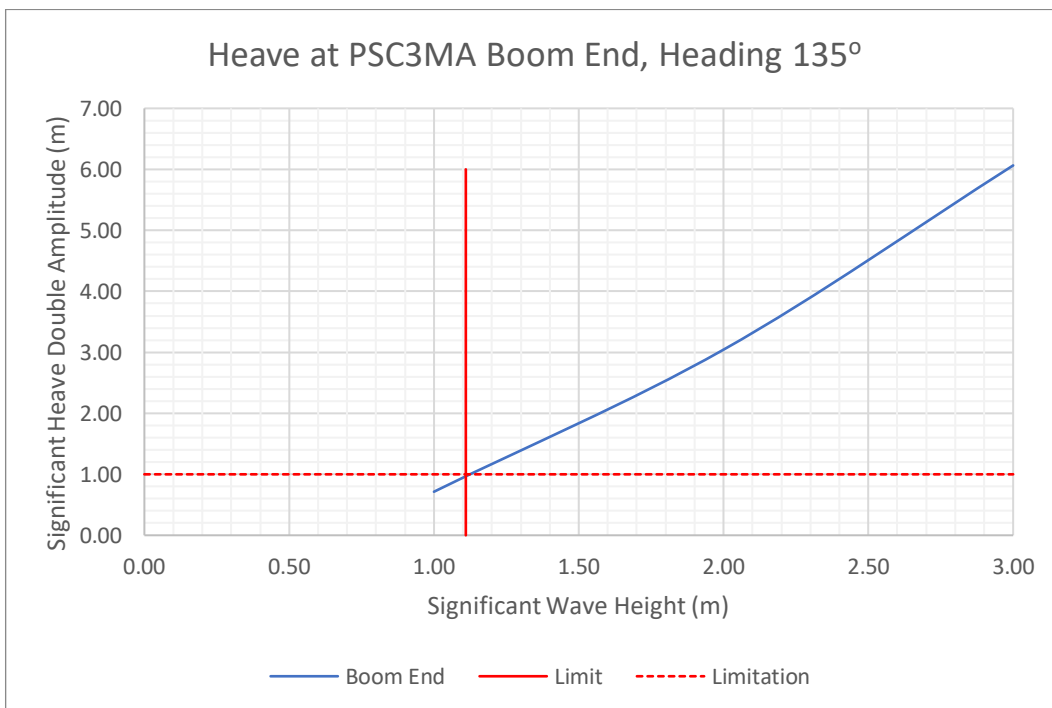
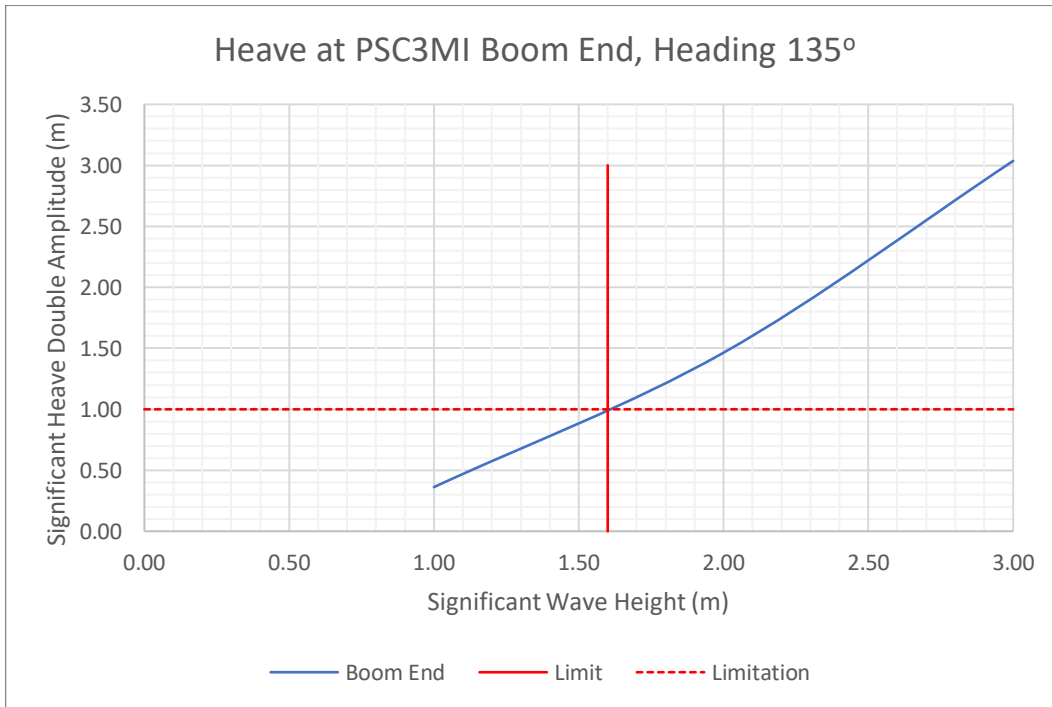
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC1MI dan PSC1MA pada *heading* 135°.



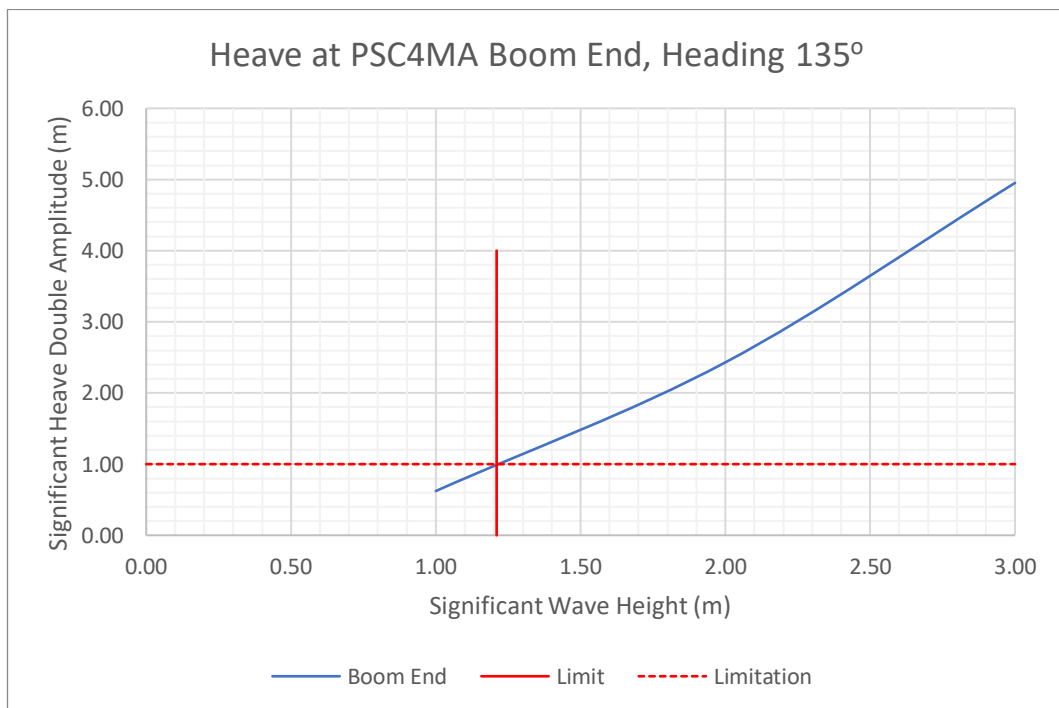
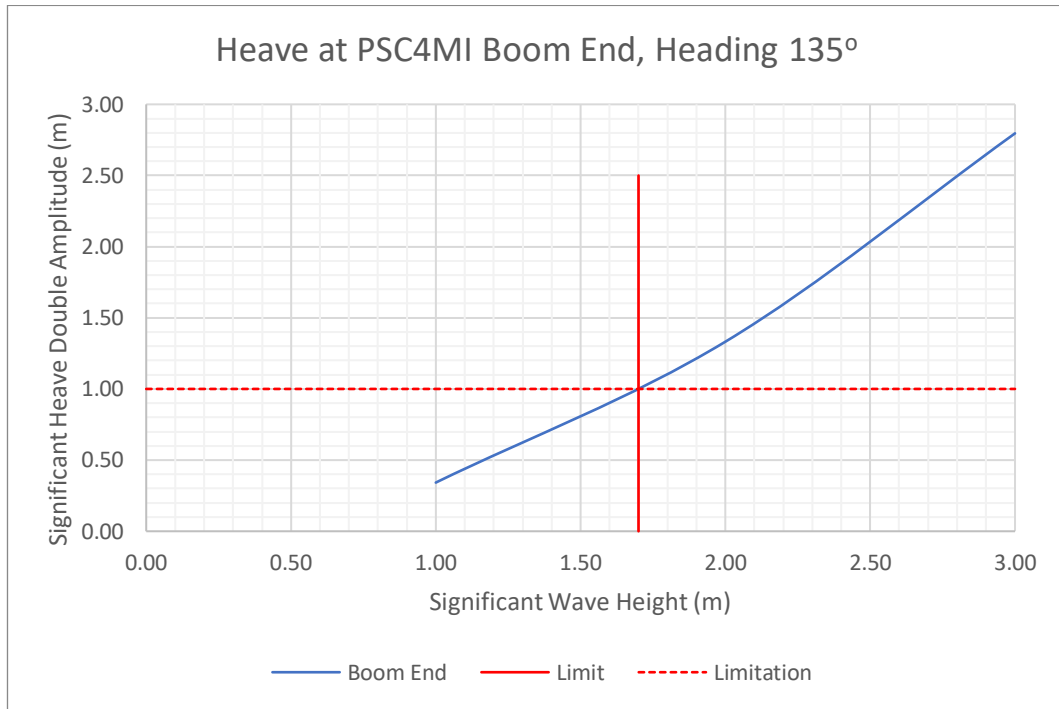
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC2MI dan PSC2MA pada *heading* 135°.



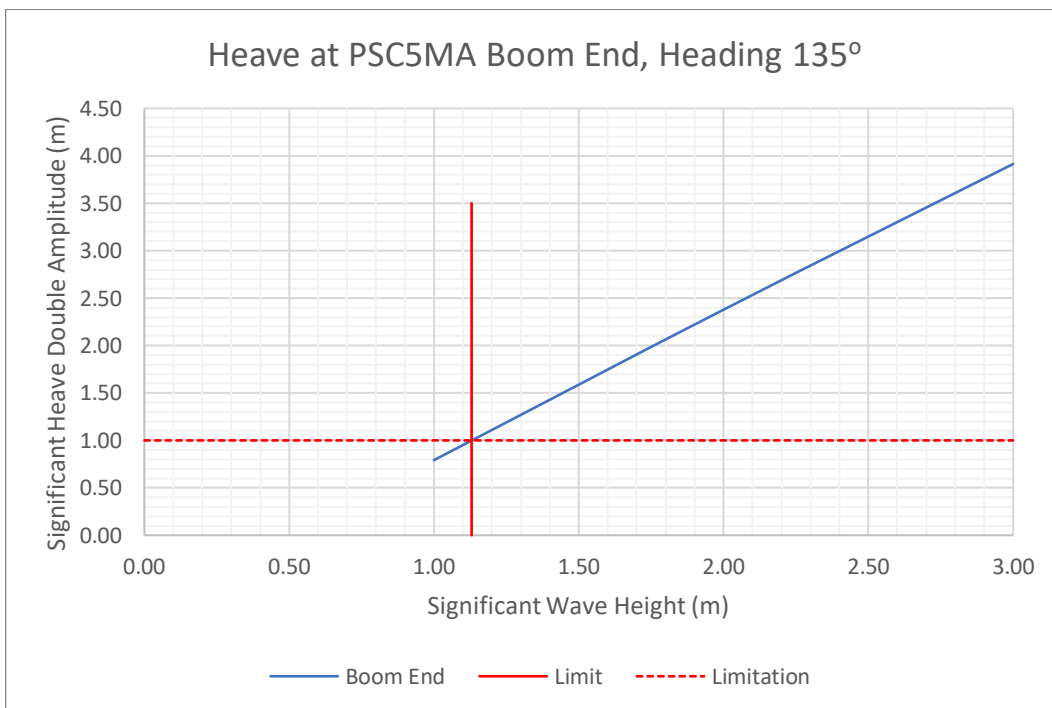
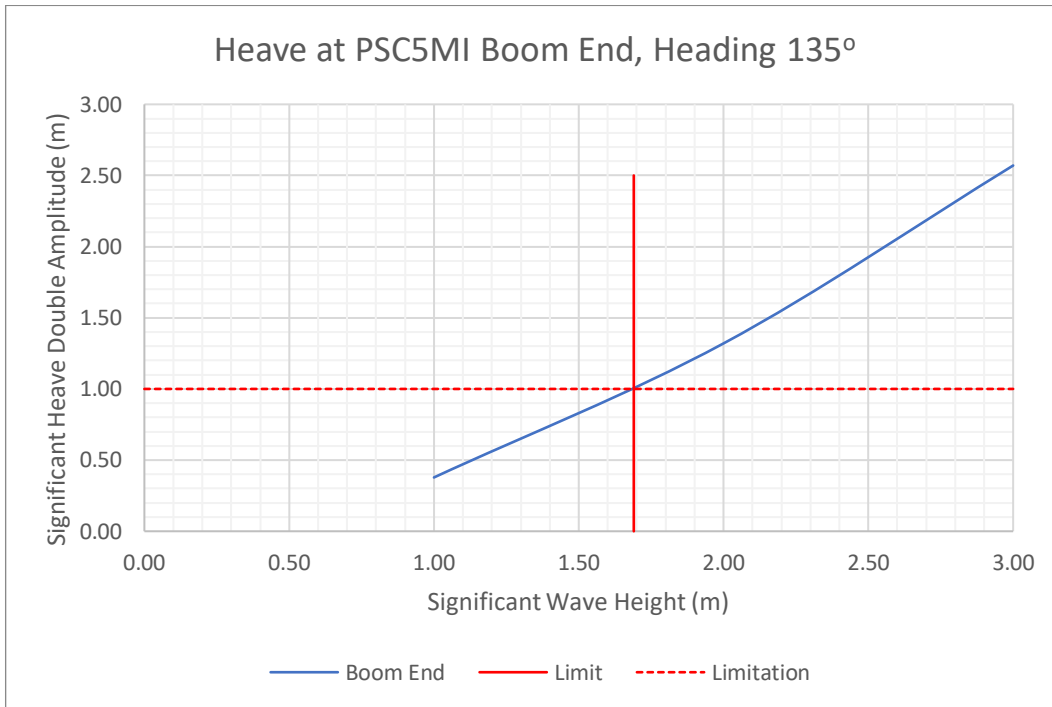
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC3MI dan PSC3MA pada *heading* 135°.



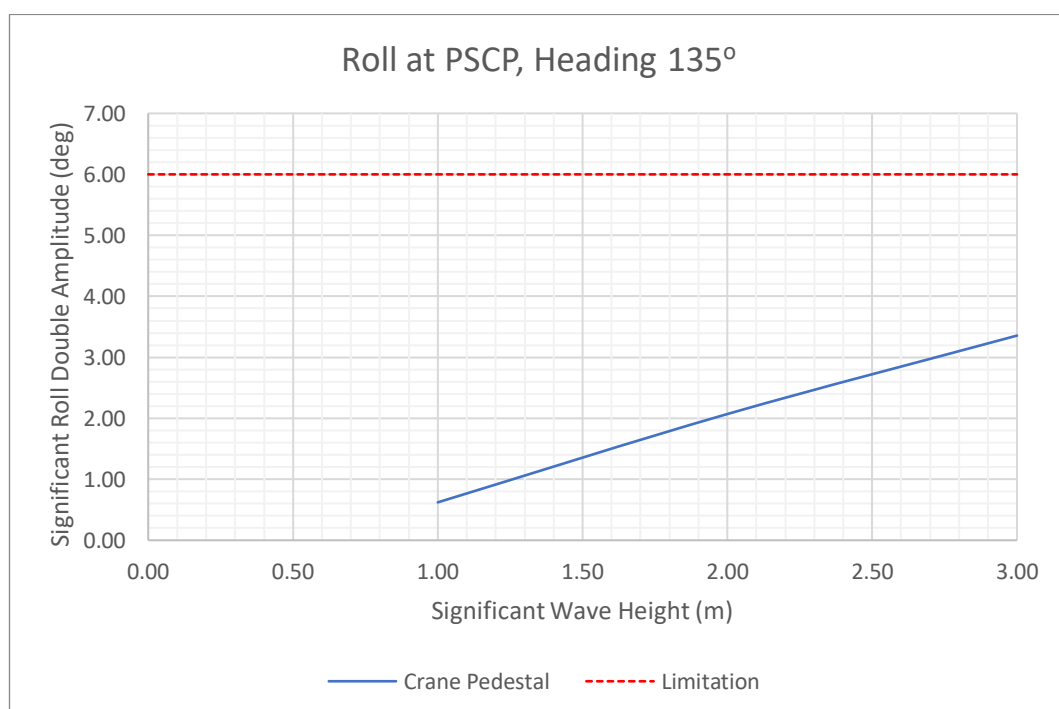
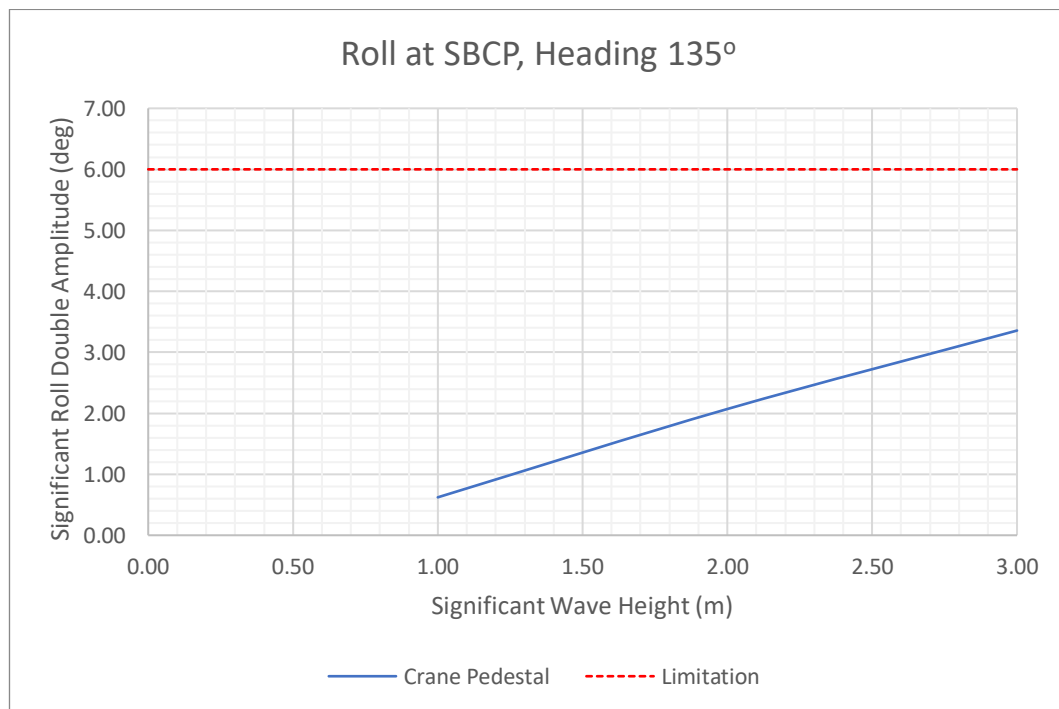
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC4MI dan PSC4MA pada *heading* 135°.



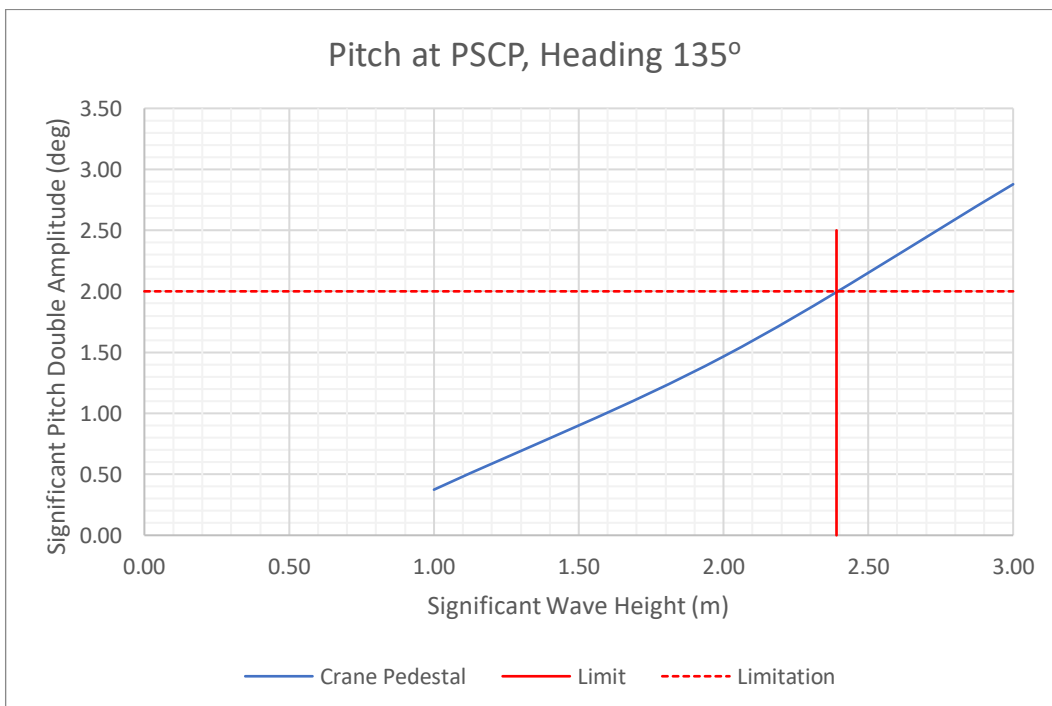
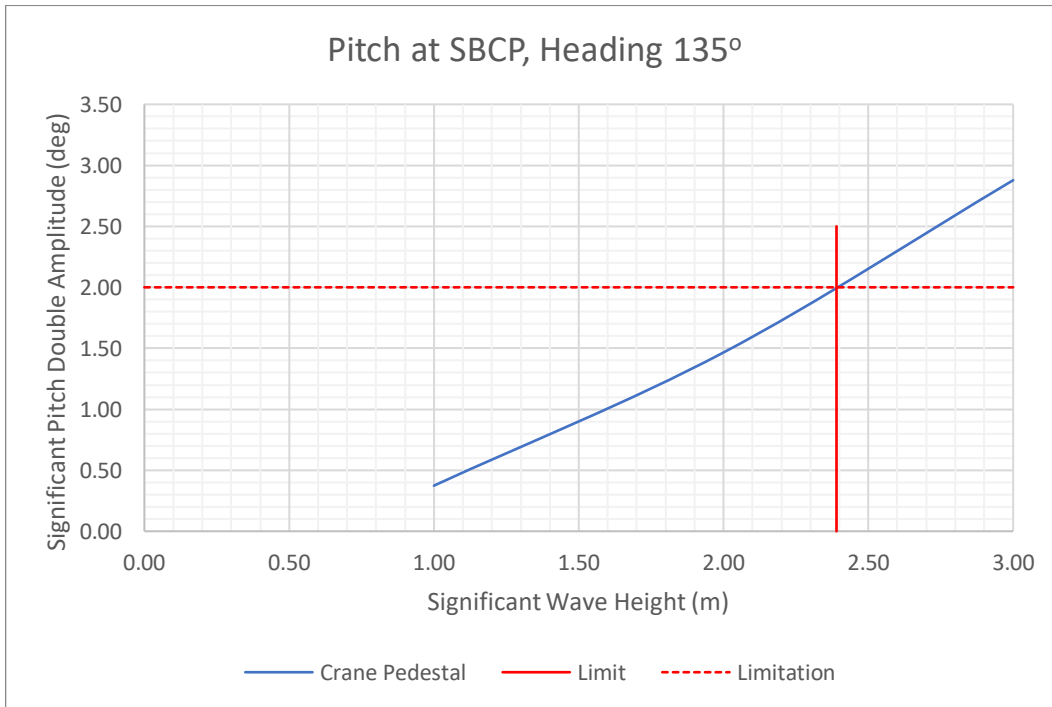
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC5MI dan PSC5MA pada *heading* 135°.



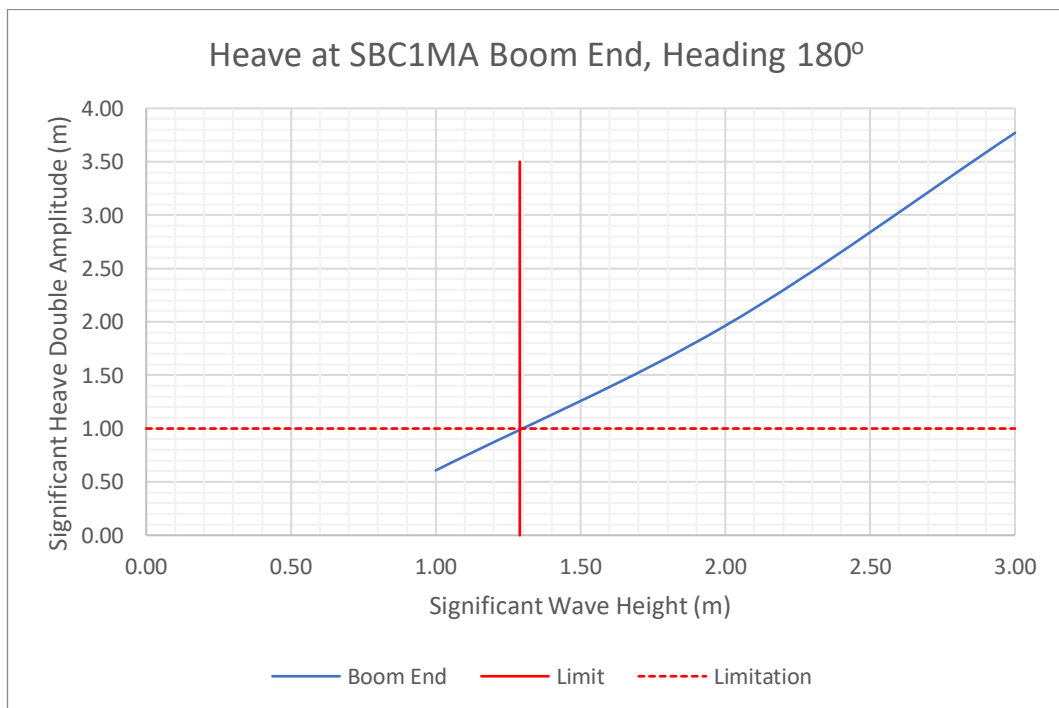
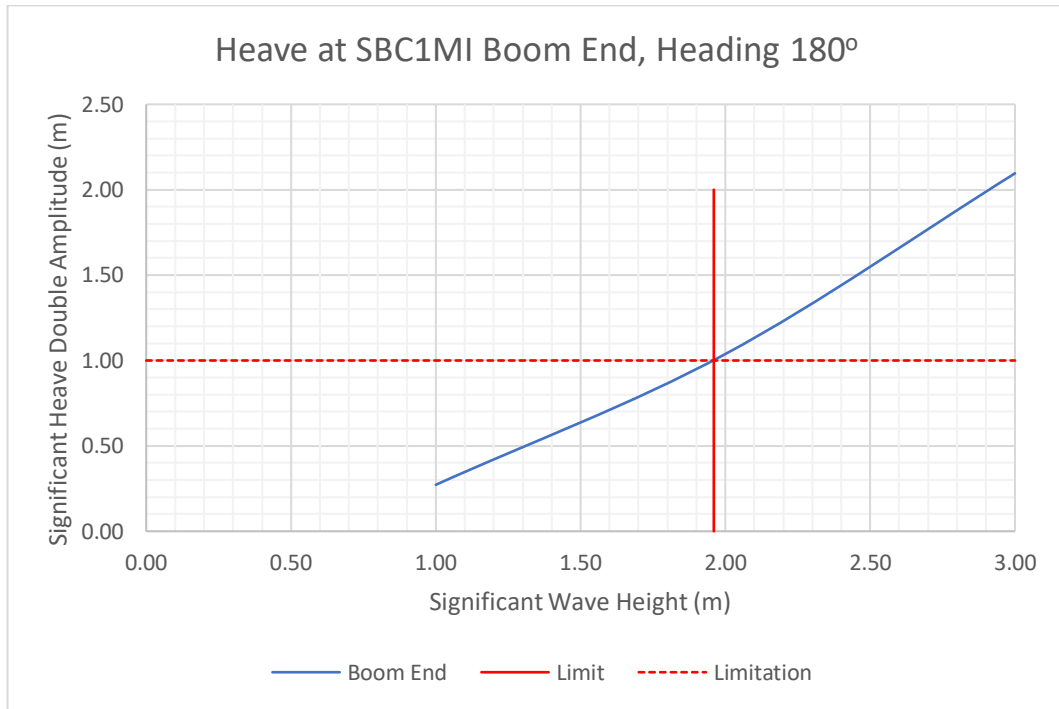
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *roll* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 135°.



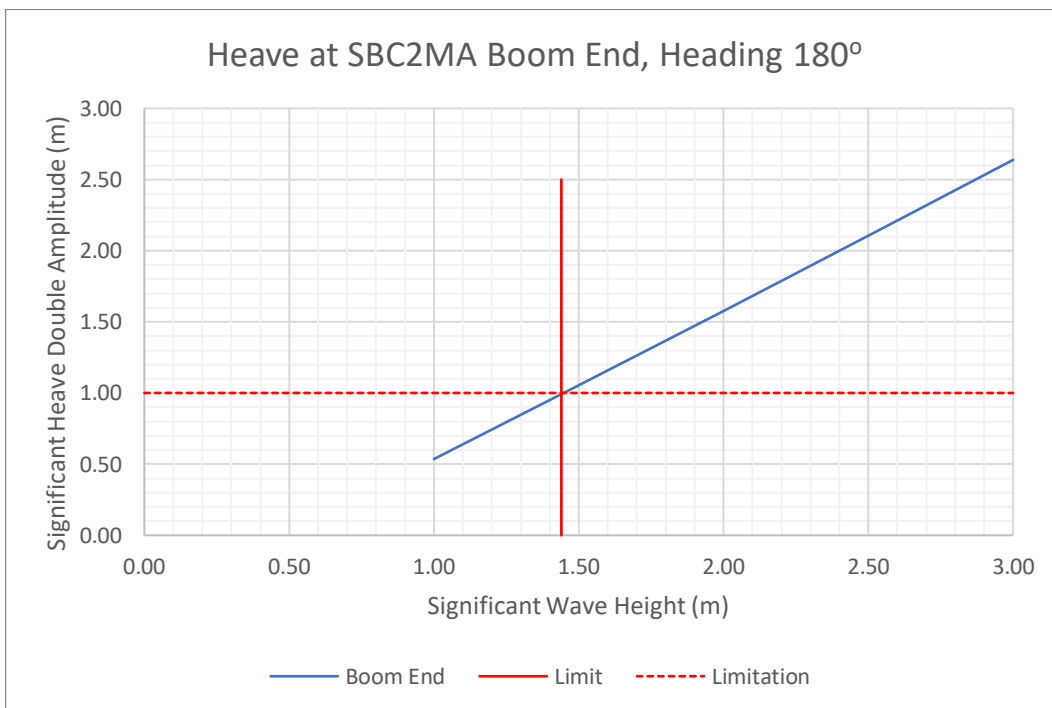
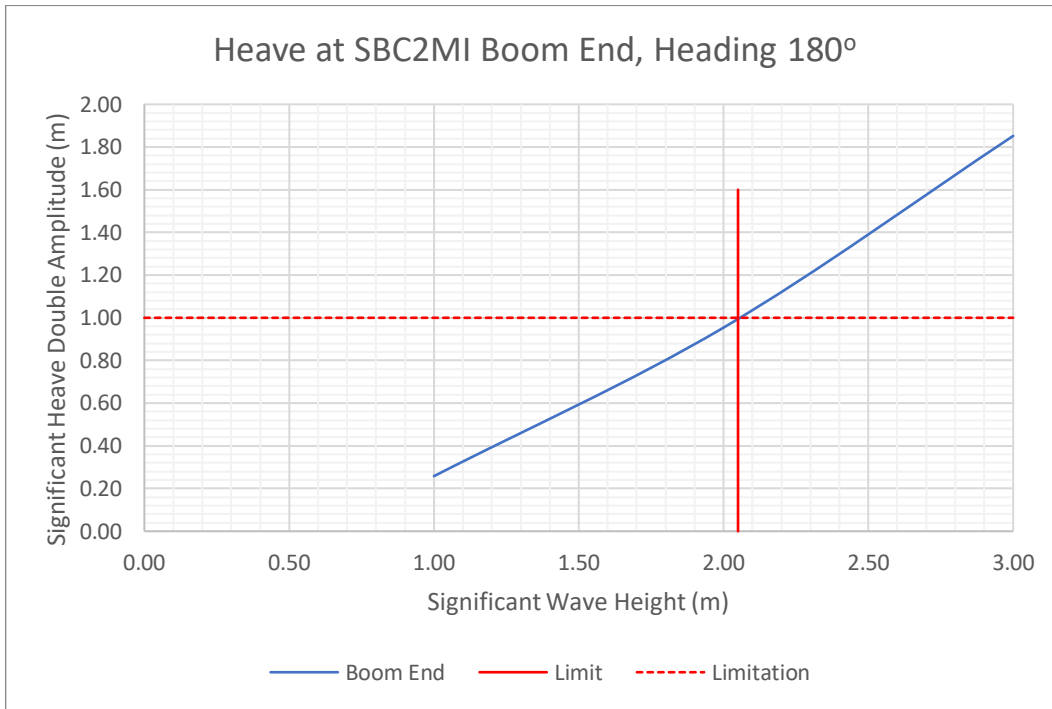
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *pitch* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 135°.



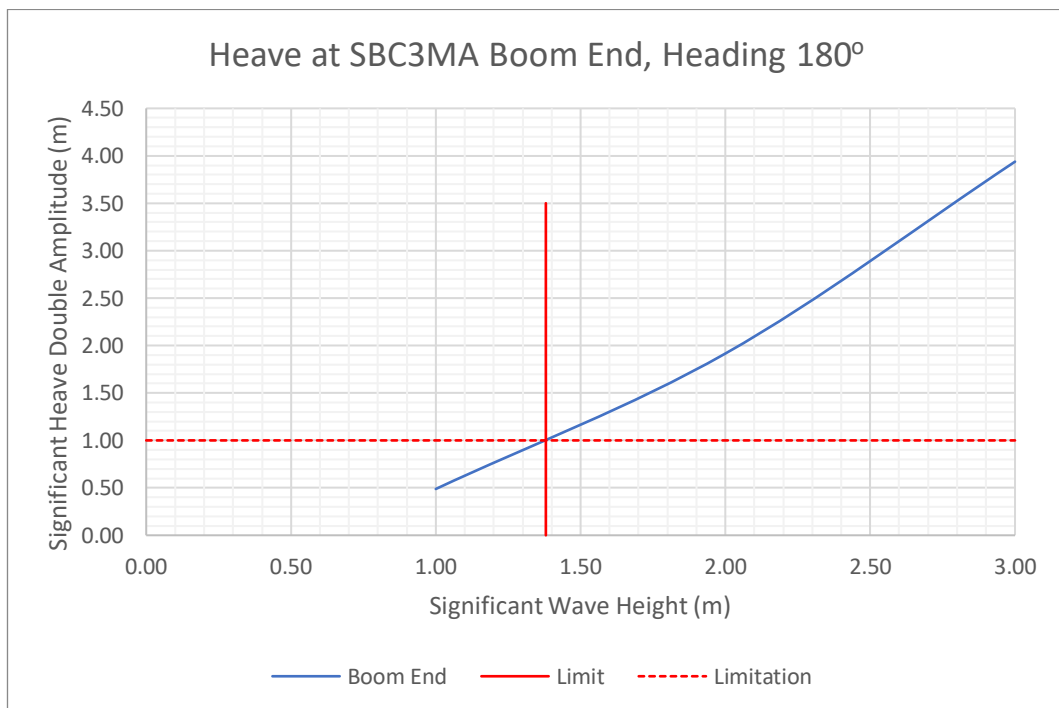
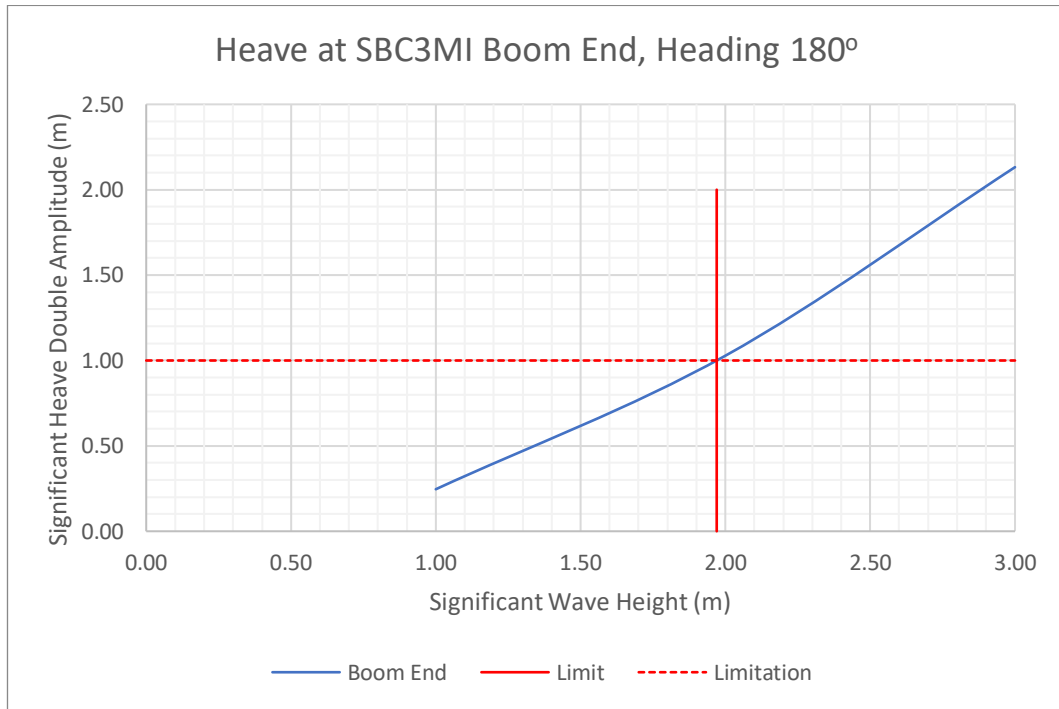
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC1MI dan SBC1MA pada *heading* 180°.



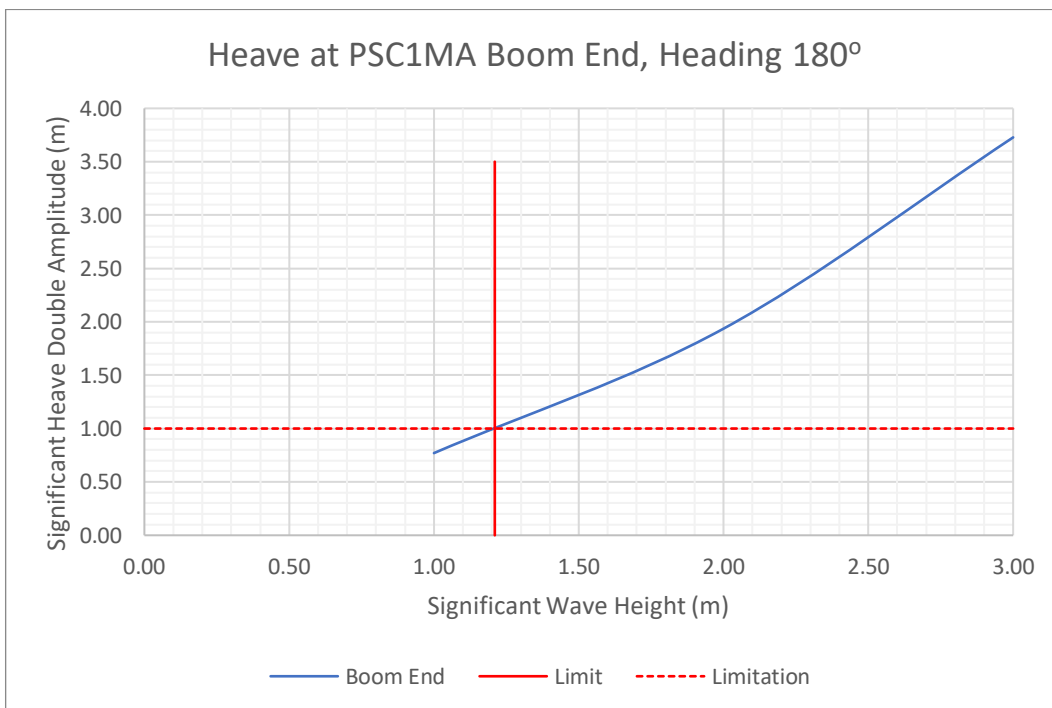
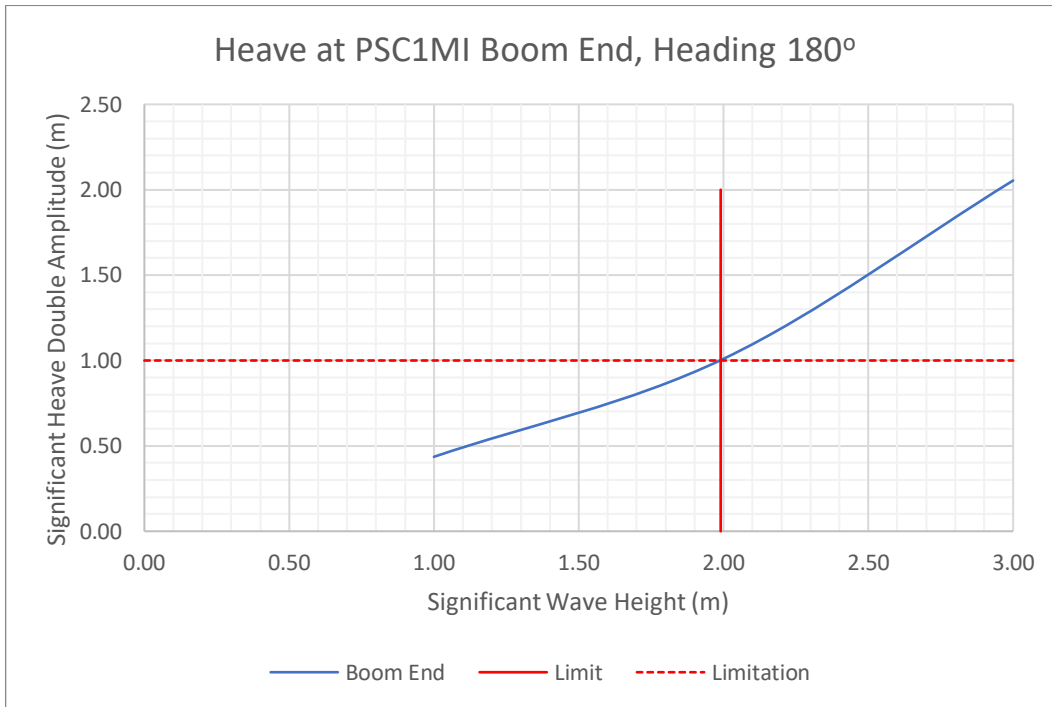
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC2MI dan SBC2MA pada *heading* 180°.



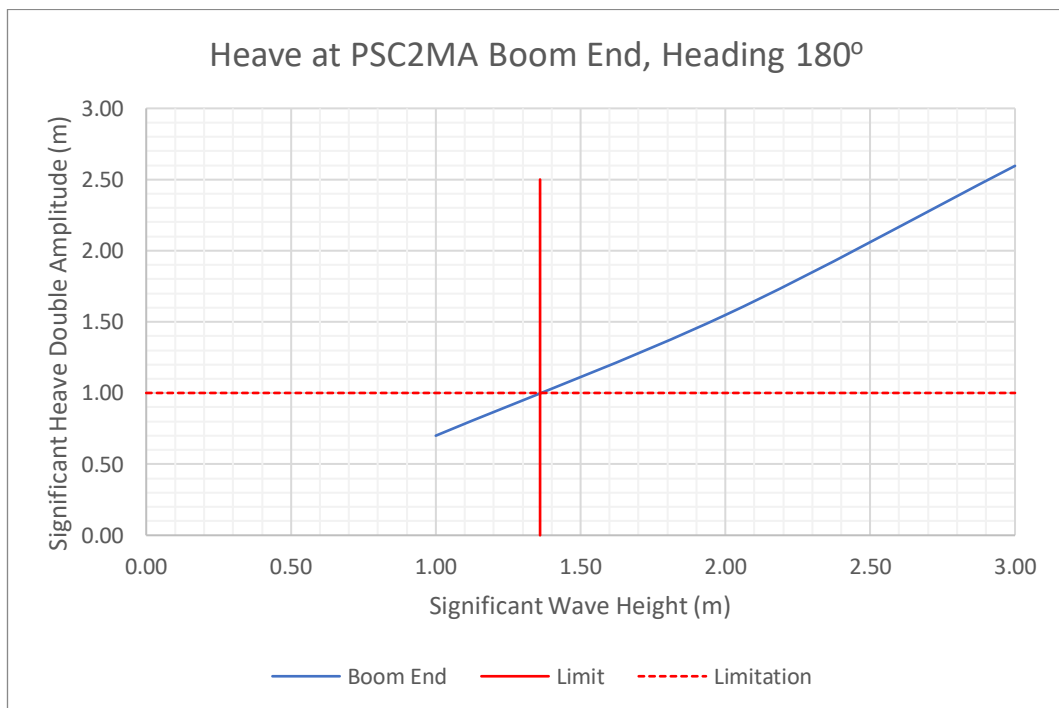
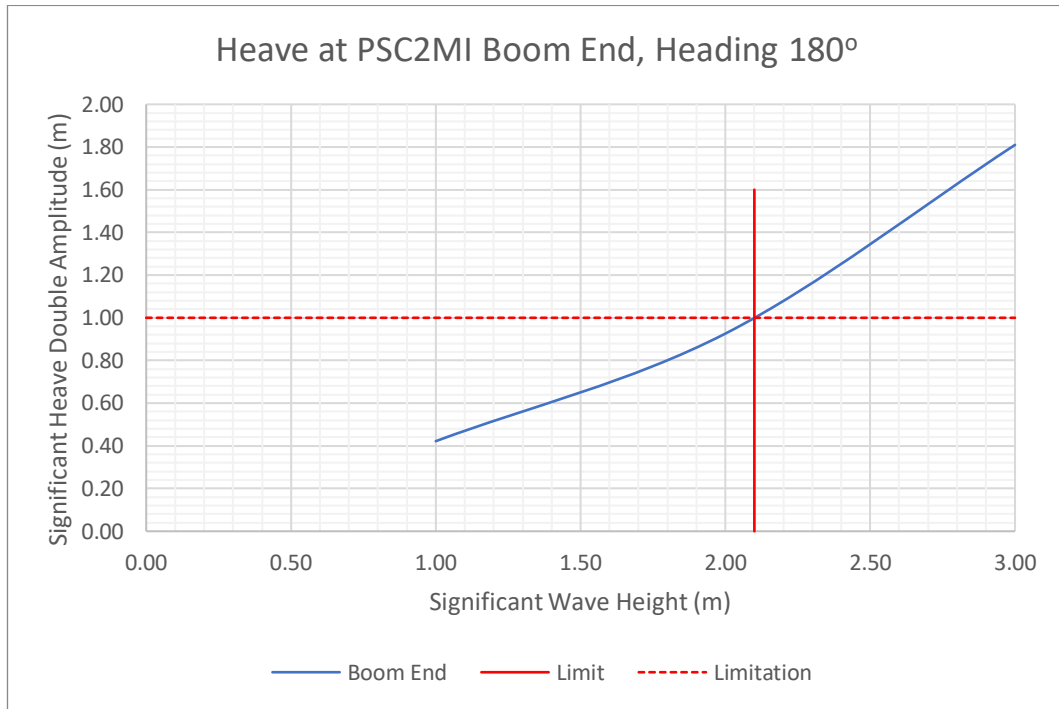
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode SBC3MI dan SBC3MA pada *heading* 180°.



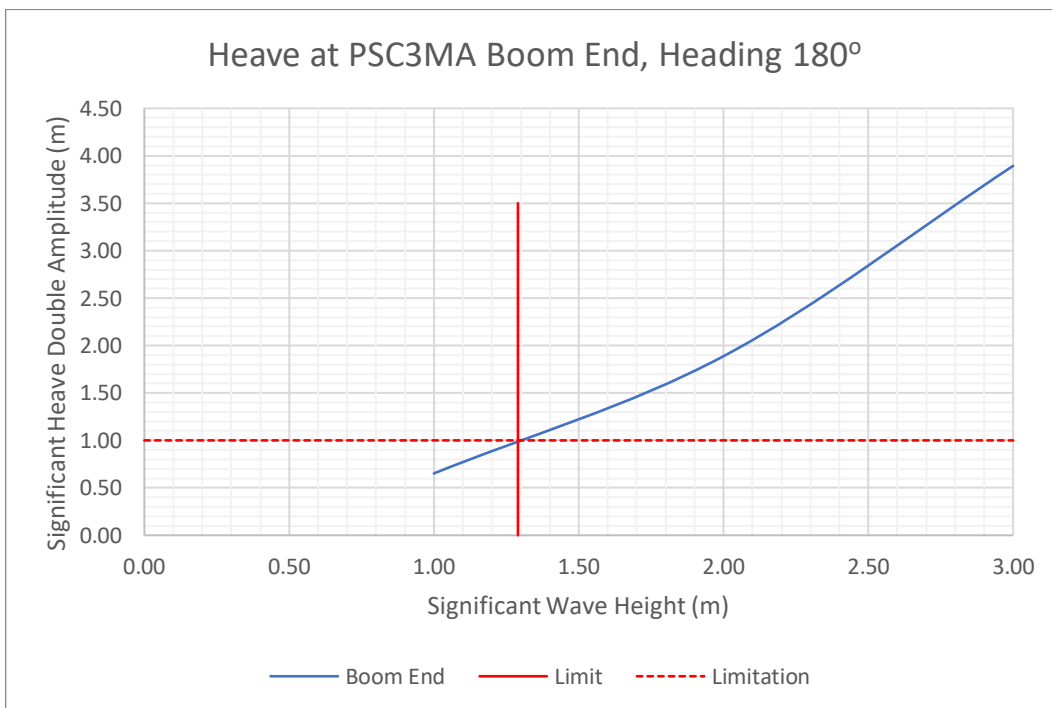
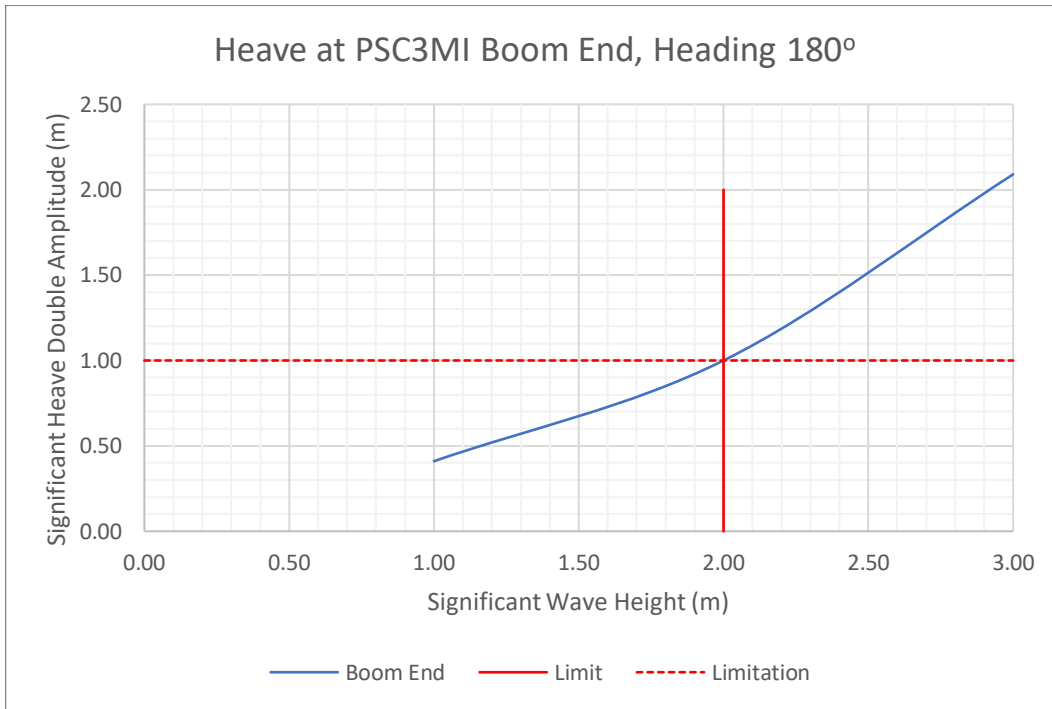
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC1MI dan PSC1MA pada *heading* 180°.



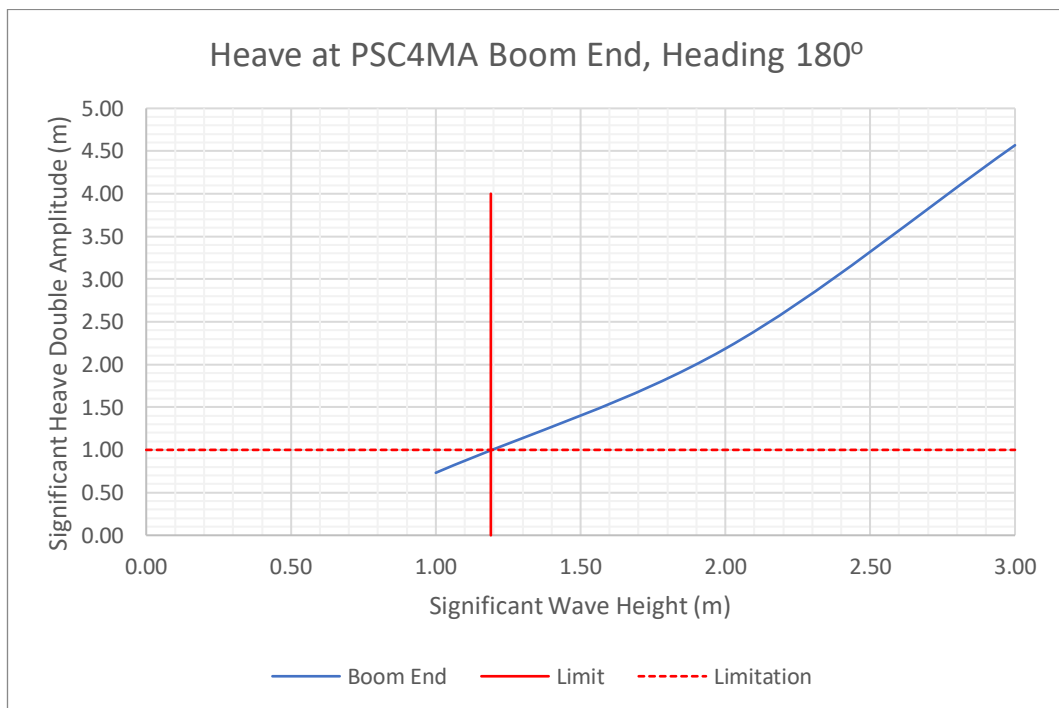
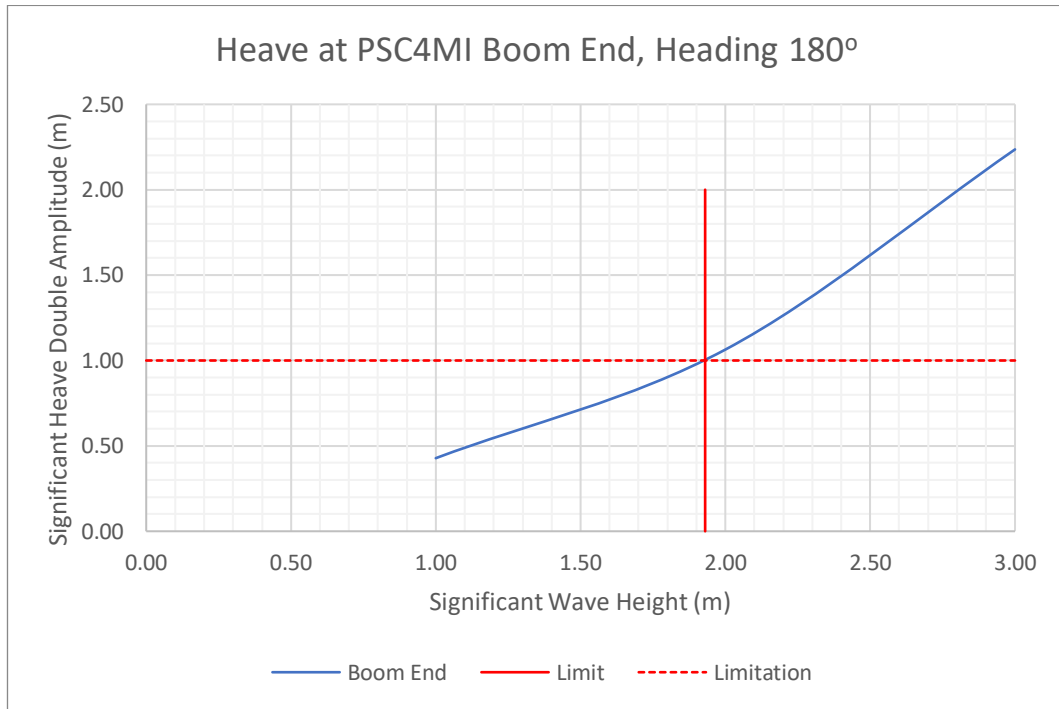
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC2MI dan PSC2MA pada *heading* 180°.



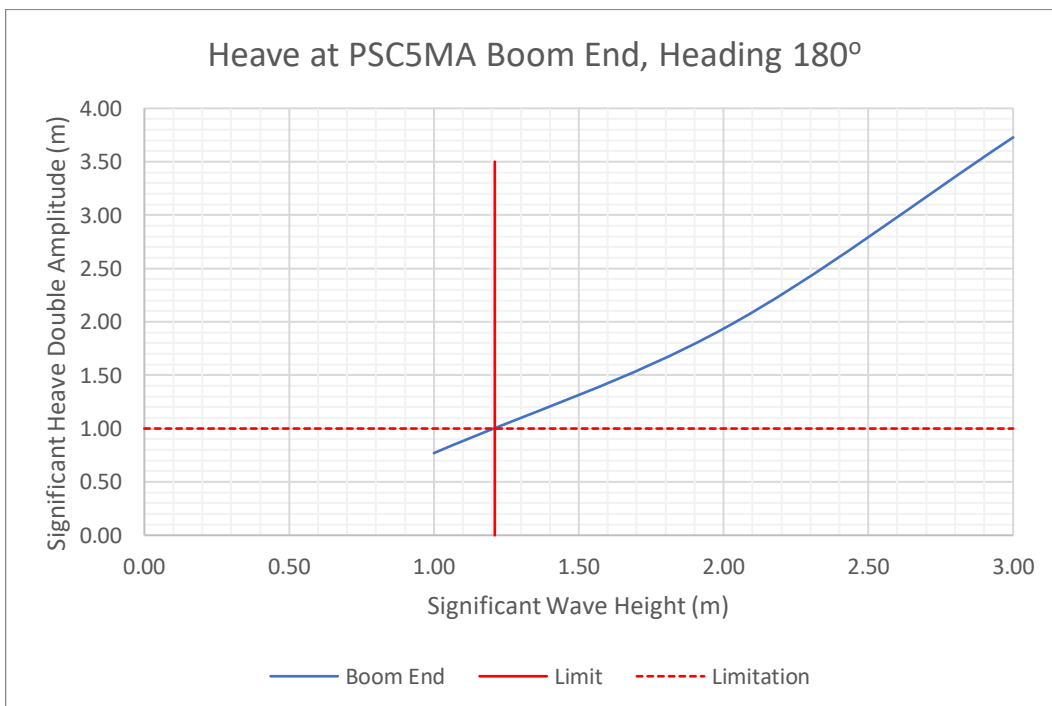
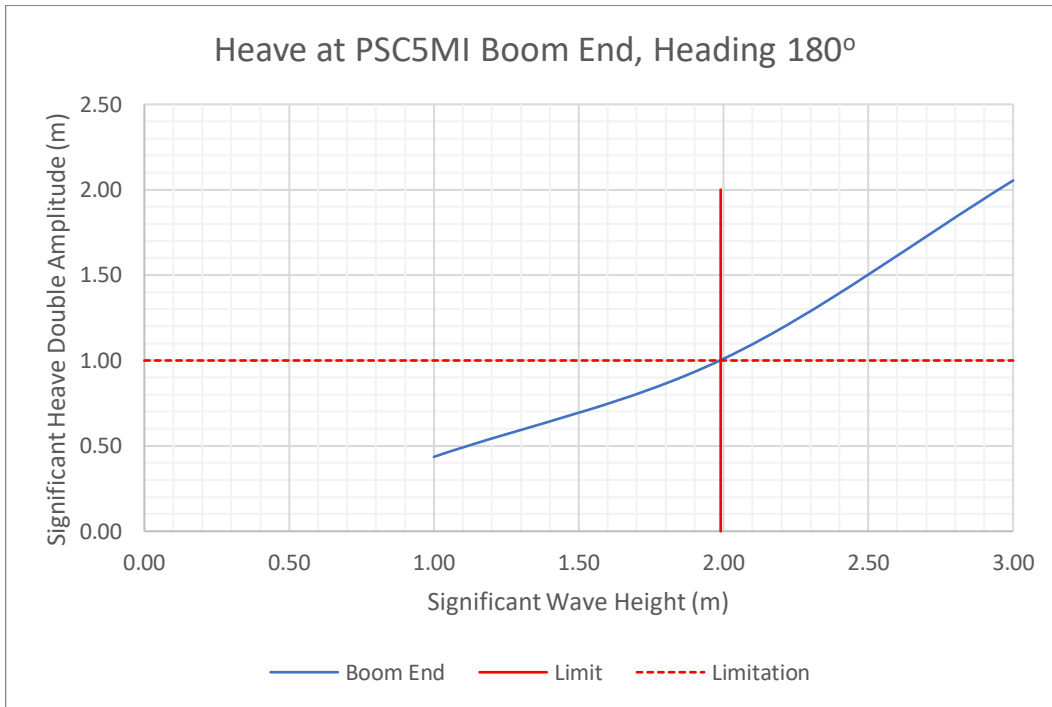
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC3MI dan PSC3MA pada *heading* 180°.



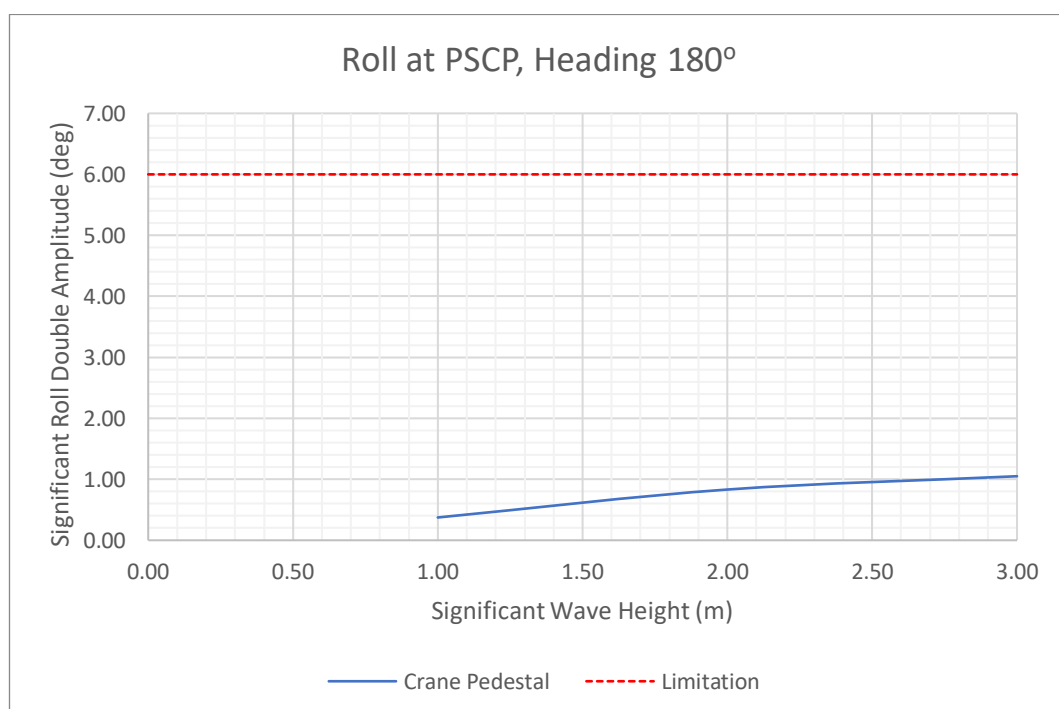
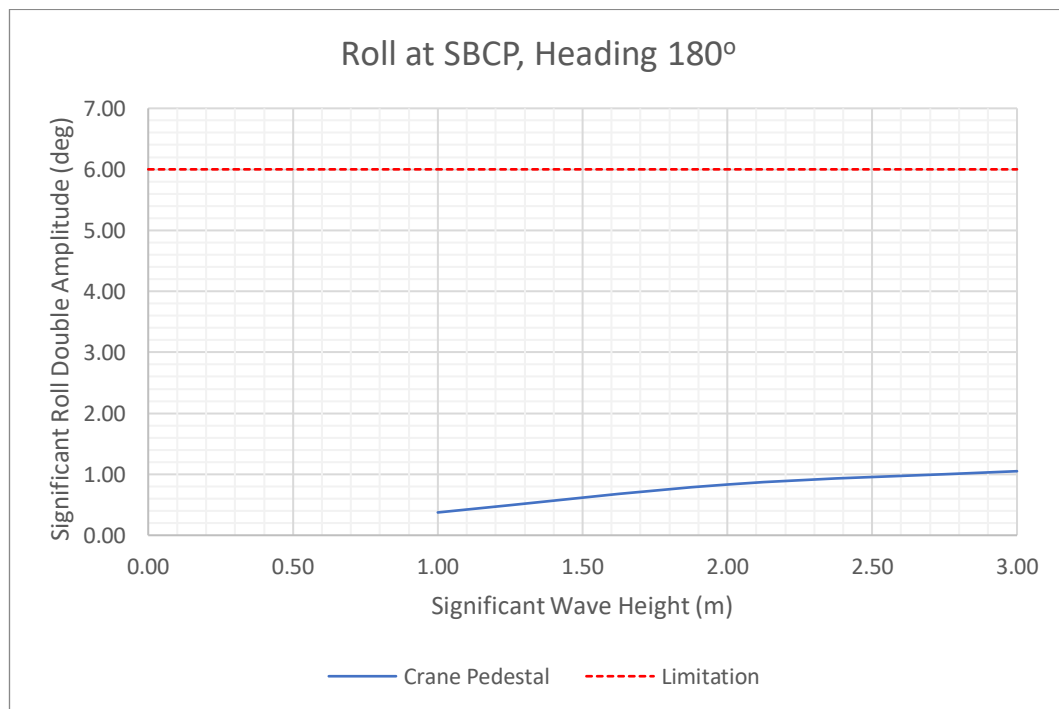
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC4MI dan PSC4MA pada *heading* 180°.



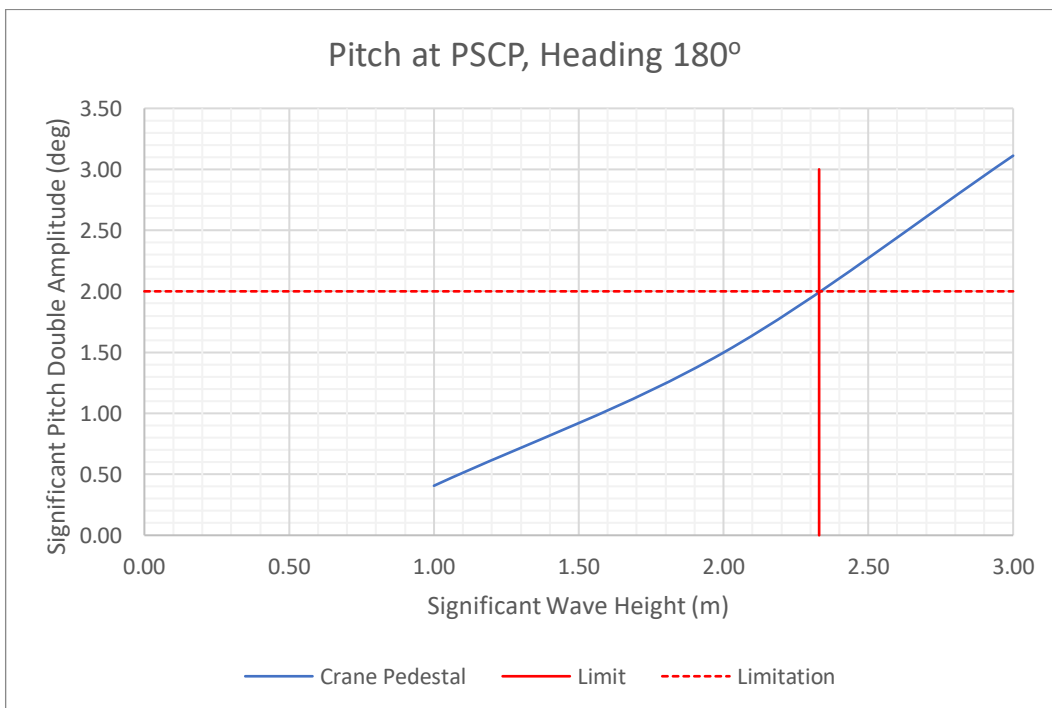
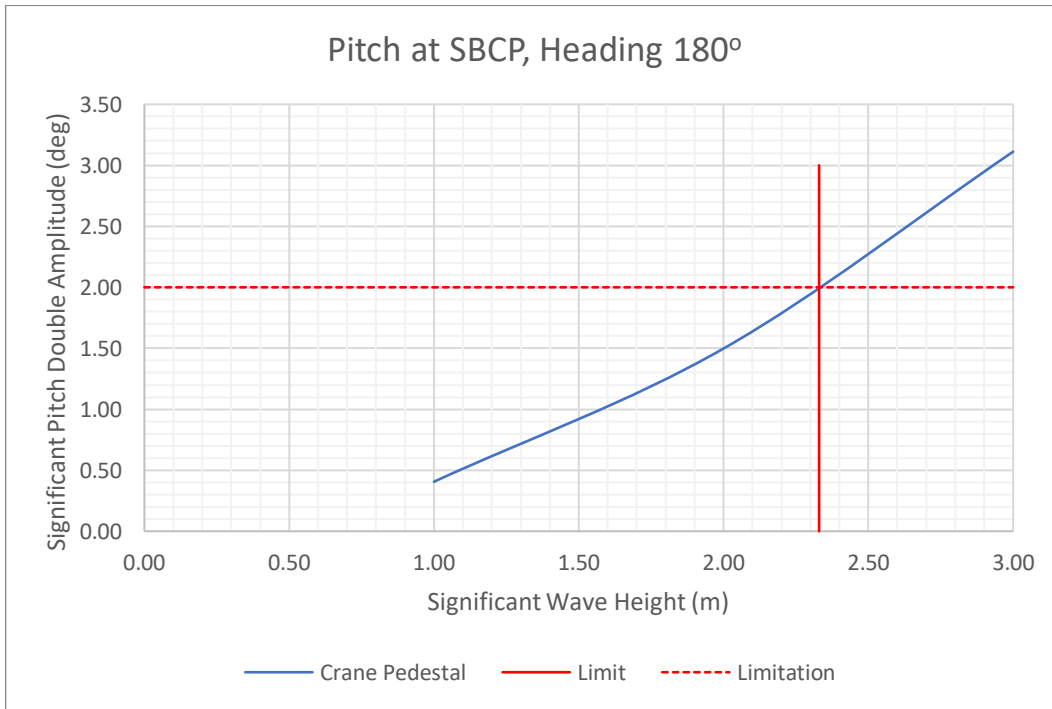
Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *heave* kode PSC5MI dan PSC5MA pada *heading* 180°.



Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *roll* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 180°.



Di bawah ini merupakan grafik batas operasi *crane* mode gerakan *pitch* kode SBCP dan PSCP pada *heading* 180°.



BIODATA PENULIS



Rizky Arrico Farhan, dilahirkan di Jakarta pada tanggal 2 Desember 1997, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDI Al-Azhar 17 Bintaro, SMPI Al-Azhar 3 Bintaro, dan SMA Taruna Nusantara Magelang. Setelah lulus SMA pada tahun 2016, penulis diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya melalui jalur SBMPTN dan terdaftar dengan NRP 04311640000057. Selama menempuh masa

perkuliahan, penulis sempat aktif menjadi Staff Departemen Kewirausahaan HIMATEKLA 2017/2018, Staff Ahli Departemen Sosial Masyarakat HIMATEKLA 2018/2019, Anggota UKM Maritime Challenge 2017/2019, Pengurus Laboratorium OPRES 2018/2020. Penulis juga aktif mengikuti berbagai kepanitiaan di kampus. Pada tahun 2019, penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktik di PT. Saipem Indonesia Naval Division selama dua bulan. Selama masa studi Strata I yang ditempuh selama empat tahun, penulis tertarik dalam bidang hidrodinamika lepas pantai dan rancang bangun bangunan lepas pantai.