



TUGAS AKHIR - MO 141316

**ANALISIS INTERAKSI HIDRODINAMIS STRUKTUR FPSO BERLAMBUNG  
SILINDER *SEVAN STABILIZED PLATFORM* DENGAN *SHUTTLE  
TANKER***

Maria Putri Rosari  
NRP 4312 100 069

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., F.RINA.  
Murdjito, M.Sc.Eng.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - MO 141316

## HYDRODYNAMIC INTERACTION ANALYSIS OF CYLINDRICAL HULL FPSO SEVAN STABILIZED PLATFORM AND SHUTTLE TANKER

Maria Putri Rosari  
NRP 4312100069

Supervisors  
Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., F.RINA.  
Murdjito, M.Sc.Eng.

OCEAN ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Marine Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

**Analisis Interaksi Hidrosdinamis Struktur FPSO Berlambung  
Silinder Sevan Stabilized Platform dengan Shuttle Tanker**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

**MARIA PUTRI ROSARI**

**4312100069**

Disetujui oleh :

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

2. Murdjo, M.Sc. Eng (Pembimbing II)

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

4. Ir. Joswan Joesoef Soedjono, M.Sc (Penguji)

5. Agro Wisudawan, S.T., M.T. (Penguji)

6. Sujantoko, S.T., M.T. (Penguji)

SURABAYA, JULI 2016

**ANALISIS INTERAKSI HIDRODINAMIS STRUKTUR FPSO  
BERLAMBUNG SILINDER *SEVAN STABILIZED PLATFORM* DENGAN  
*SHUTTLE TANKER***

**Nama** : Maria Putri Rosari  
**NRP** : 4312100069  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., F.RINA  
Murdjito, M.Sc.Eng

**ABSTRAK**

*Sevan Stabilized Platform* (SSP) merupakan inovasi baru dalam dunia eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas lepas pantai. Struktur tersebut diklaim mampu menyediakan luasan geladak dan kapasitas muat beban yang lebih besar sekaligus menelan biaya pengadaan yang lebih murah dibandingkan dengan konsep struktur sejenis yang sudah terbilang konvensional seperti *Semisubmersible*, TLP, dan SPAR. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini mencakup analisis respon gerak SSP S400 dan *Shuttle Tanker* 35,000, analisis *tension* sistem tambat SSP dan *Shuttle Tanker*, dan nilai operabilitas SSP. Analisis operabilitas diasumsikan hanya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (beban angin, beban arus, dan beban gelombang) tanpa mempertimbangkan aspek lain seperti penjadwalan, aspek *mechanical*, dan lain-lain. Penelitian ini menyajikan luaran berupa karakteristik respon gerak dan *tension* sistem tambat dalam bentuk *time domain* dari hasil pemodelan numerik. Berdasarkan hasil analisis, dinyatakan bahwa nilai respon gerak terbesar pada operasi *stand alone* terjadi pada kondisi SSP 75% muatan dengan rentang nilai *tension* 2,000 kN sampai 7,000 kN. Nilai respon gerak terbesar SSP dengan *Shuttle Tanker* pada operasi *side by side offloading* dengan jarak 3.3 m terjadi akibat arah pembebanan gelombang sisi. Berdasarkan korelasi antara kriteria operabilitas *side by side offloading* dengan data lingkungan, didapatkan bahwa operabilitas sistem yang didapat dalam pengoperasiannya di perairan Blok Masela adalah sebesar 88.55%. Operasi *side by side offloading* hanya dapat dilakukan pada tinggi gelombang signifikan 2.0 m. Nilai operabilitas SSP dan *Shuttle Tanker* dapat terjadi lebih besar apabila jarak *side by side offloading* antara keduanya ditambahkan.

**Kata kunci** : *Sevan Stabilized Platform*, *side by side offloading*, respon gerak, *tension*, operabilitas

# **HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF CYLINDRICAL HULL FPSO SEVAN STABILIZED PLATFORM AND SHUTTLE TANKER**

**Name** : **Maria Putri Rosari**  
**NRP** : **4312100069**  
**Supervisors** : **Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., F.RINA**  
**Murdjito, M.Sc.Eng**

## **ABSTRACT**

Sevan Stabilized Platform (SSP) is a new type of mono-hull concept to be function as an oil production. SSP offer greater deck area and load capacity along with storage and low motion characteristics for lower cost, compared to other concepts, such as the Semisubmersibles, TLPs, and SPARs. This research has been carried out by analyzing responses of both SSP S400 and the accompanying 35,000 DWT Shuttle Tanker, tension characteristic of their mooring system, and its operability. The operability of SSP is only analyzed based on environmental condition (wind load, current load, and wave load) and not related to other aspects, such as scheduling, mechanical aspects, etc. Numerical model with time domain simulation is used to perform the analysis on the mooring system and vessel motion due to environmental effects. Based on the analysis, the greater motion of stand alone operation happens when SSP is in 75% load condition with the value range of tension 2,000 to 7,000 kN. Greater interaction between SSP and Shuttle Tanker at a side by side distance 3.3 m occurs at beam sea direction of wave heading. Based on the correlation between operability criteria for the side by side offloading operation and environmental data, it can be concluded that operability of the system may achieve up to 88.55%. Maximum sea condition for safe side by side offloading operation would be about 2.0 m significant wave height. The operation may be conducted at higher wave heights if the side by side distance is made larger.

**Keywords** : Sevan Stabilized Platform, side by side offloading, motion, tension, operability

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR .....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.4 MANFAAT PENELITIAN .....	4
1.5 BATASAN MASALAH.....	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	
2.1 TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.2 DASAR TEORI .....	8
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 LANGKAH KERJA .....	29
3.2 PENGUMPULAN DATA .....	31
3.3 SKENARIO PENELITIAN .....	34
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
4.1 PEMODELAN STRUKTUR DAN VALIDASI .....	35
4.2 KARAKTERISTIK GERAK STRUKTUR SSP PADA KONDISI TERAPUNG BEBAS .....	39
4.3 KARAKTERISTIK GERAK STRUKTUR <i>SHUTTLE TANKER</i> PADA KONDISI TERAPUNG BEBAS .....	48
4.4 PERHITUNGAN GELOMBANG DALAM KURUN WAKTU	

PANJANG.....	59
4.5 ANALISIS RESPON GERAK DAN <i>TENSION</i> TALI TAMBAT SSP PADA KONDISI TERTAMBAT <i>STAND ALONE</i> .....	62
4.6 ANALISIS RESPON GERAK DAN <i>TENSION</i> TALI TAMBAT SSP DAN <i>SHUTTLE TANKER</i> PADA KONDISI <i>SIDE BY SIDE</i> <i>OFFLOADING</i> .....	77
4.7 ANALISIS OPERABILITAS SSP DI PERAIRAN BLOK MASELA.....	111
BAB V PENUTUP	
5.1 SIMPULAN.....	115
5.2 SARAN.....	116
DAFTAR PUSTAKA.....	117
LAMPIRAN .....	121

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Proses <i>side by side offloading</i> antara SSP dengan <i>Shuttle Tanker</i> (Sevan Marine, 2011) .....	2
Gambar 2.1 Sevan <i>Stabilized Platform</i> (Sevan Marine, 2011) .....	8
Gambar 2.2 Moda <i>offloading</i> pada SSP (Major, 2013) .....	9
Gambar 2.3 Gerak bangunan apung (Soetomo, 2010).....	15
Gambar 2.4 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung (Djatkiko, 2012).....	16
Gambar 2.5 Gaya lingkungan yang bekerja pada struktur terapung kondisi <i>heading head seas</i> dan gerakan transversal dari <i>mooring lines</i> (Chakrabarti, 1994).....	22
Gambar 2.6 Panjang minimum <i>mooring line</i> (Faltinsen, 1990) .....	24
Gambar 3.1 Diagram alir langkah kerja penelitian .....	29
Gambar 3.2 Model Sevan S400 dalam tiga dimensi (Sevan Marine, 2011).....	32
Gambar 3.3 <i>Principal Dimension</i> Sevan S400 (Sevan Marine, 2011) .....	32
Gambar 3.4 <i>General Arrangement Shuttle Tanker</i> (Tanker Shipping, 2014) .....	33
Gambar 4.1 Model SSP Sevan tampak samping sekaligus tampak depan .....	35
Gambar 4.2 Model <i>Shuttle Tanker</i> tampak longitudinal.....	37
Gambar 4.3 Model <i>Shuttle Tanker</i> tampak haluan .....	38
Gambar 4.4 Model <i>Shuttle Tanker</i> tampak buritan.....	38
Gambar 4.5 RAO <i>surge</i> pada SSP muatan 100%.....	40
Gambar 4.6 RAO <i>sway</i> pada SSP muatan 100% .....	40
Gambar 4.7 RAO <i>heave</i> pada SSP muatan 100% .....	41
Gambar 4.8 RAO <i>roll</i> pada SSP muatan 100%.....	41
Gambar 4.9 RAO <i>pitch</i> pada SSP muatan 100%.....	41
Gambar 4.10 RAO <i>yaw</i> pada SSP muatan 100% .....	42
Gambar 4.11 RAO <i>surge</i> pada SSP muatan 83%.....	43
Gambar 4.12 RAO <i>sway</i> pada SSP muatan 83% .....	43



Gambar 4.13 RAO <i>heave</i> pada SSP muatan 83%.....	44
Gambar 4.14 RAO <i>roll</i> pada SSP muatan 83% .....	44
Gambar 4.15 RAO <i>pitch</i> pada SSP muatan 83% .....	45
Gambar 4.16 RAO <i>yaw</i> pada SSP muatan 83%.....	45
Gambar 4.17 RAO <i>surge</i> pada SSP muatan 75% .....	46
Gambar 4.18 RAO <i>sway</i> pada SSP muatan 75% .....	46
Gambar 4.19 RAO <i>heave</i> pada SSP muatan 75%.....	47
Gambar 4.20 RAO <i>roll</i> pada SSP muatan 75% .....	47
Gambar 4.21 RAO <i>pitch</i> pada SSP muatan 75% .....	48
Gambar 4.22 RAO <i>yaw</i> pada SSP muatan 75%.....	48
Gambar 4.23 RAO <i>surge</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 90% .....	49
Gambar 4.24 RAO <i>sway</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 90% .....	50
Gambar 4.25 RAO <i>heave</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 90% .....	50
Gambar 4.26 RAO <i>roll</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 90%.....	51
Gambar 4.27 RAO <i>pitch</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 90% .....	51
Gambar 4.28 RAO <i>yaw</i> pada SSP <i>Shuttle Tanker</i> muatan 90% .....	52
Gambar 4.29 RAO <i>surge</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 60% .....	53
Gambar 4.30 RAO <i>sway</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 60% .....	53
Gambar 4.31 RAO <i>heave</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 60%.....	54
Gambar 4.32 RAO <i>roll</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 60%.....	54
Gambar 4.33 RAO <i>pitch</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 60% .....	55
Gambar 4.34 RAO <i>yaw</i> pada SSP <i>Shuttle Tanker</i> muatan 60% .....	55
Gambar 4.35 RAO <i>surge</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 10% .....	56
Gambar 4.36 RAO <i>sway</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 10% .....	57
Gambar 4.37 RAO <i>heave</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 10%.....	57
Gambar 4.38 RAO <i>roll</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 10%.....	57
Gambar 4.39 RAO <i>pitch</i> pada <i>Shuttle Tanker</i> muatan 10% .....	58
Gambar 4.40 RAO <i>yaw</i> pada SSP <i>Shuttle Tanker</i> muatan 10%.....	59
Gambar 4.41 Grafik korelasi antara tinggi gelombang dan distribusi kumulatif.....	61
Gambar 4.42 Konfigurasi SSP tertambat .....	63
Gambar 4.43 Respon signifikan <i>surge</i> pada SSP tertambat 100%	

muatan.....	64
Gambar 4.44 Respon signifikan <i>sway</i> pada SSP tertambat 100%	
muatan.....	65
Gambar 4.45 Respon signifikan <i>heave</i> pada SSP tertambat 100%	
muatan.....	65
Gambar 4.46 Respon signifikan <i>roll</i> pada SSP tertambat 100%	
muatan.....	66
Gambar 4.47 Respon signifikan <i>pitch</i> pada SSP tertambat 100%	
muatan.....	66
Gambar 4.48 Respon signifikan <i>yaw</i> pada SSP tertambat 100%	
muatan.....	67
Gambar 4.49 <i>Time history</i> gaya tarik <i>mooring line</i> .....	67
Gambar 4.50 <i>Tension</i> pada <i>line 12</i> pada setiap tinggi gelombang signifikan pada SSP tertambat 100% muatan .....	69
Gambar 4.51 Respon signifikan <i>surge</i> pada SSP tertambat 75%	
muatan.....	71
Gambar 4.52 Respon signifikan <i>sway</i> pada SSP tertambat 75%	
muatan.....	72
Gambar 4.53 Respon signifikan <i>heave</i> pada SSP tertambat 75%	
muatan.....	72
Gambar 4.54 Respon signifikan <i>roll</i> pada SSP tertambat 75%	
muatan.....	73
Gambar 4.55 Respon signifikan <i>pitch</i> pada SSP tertambat 75%	
muatan.....	73
Gambar 4.56 Respon signifikan <i>yaw</i> pada SSP tertambat 75%	
muatan.....	74
Gambar 4.57 <i>Tension</i> pada <i>line 12</i> pada setiap tinggi gelombang signifikan pada SSP tertambat 75% muatan .....	76
Gambar 4.58 Konfigurasi <i>side by side offloading</i> antara SSP dengan <i>Shuttle Tanker</i> tampak atas.....	79
Gambar 4.59 Grafik <i>time history</i> gerak <i>sway</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> kondisi 1 dengan arah pembebanan 0° dan Hs 2 m.....	80

Gambar 4.60 Grafik <i>time history double amplitude heave</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> kondisi 1 dengan arah pembebanan $0^\circ$ dan $H_s$ 2 m.....	81
Gambar 4.61 Grafik <i>time history double amplitude roll</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> kondisi 1 dengan arah pembebanan $0^\circ$ dan $H_s$ 2 m.....	81
Gambar 4.62 Respon gerak <i>surge</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	83
Gambar 4.63 Respon gerak <i>sway</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	84
Gambar 4.64 Respon gerak <i>heave</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	84
Gambar 4.65 Respon gerak <i>roll</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	85
Gambar 4.66 Respon gerak <i>pitch</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	85
Gambar 4.67 Respon gerak <i>yaw</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	86
Gambar 4.68 Respon gerak <i>surge</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	88
Gambar 4.69 Respon gerak <i>sway</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	89
Gambar 4.70 Respon gerak <i>heave</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	89
Gambar 4.71 Respon gerak <i>roll</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	89
Gambar 4.72 Respon gerak <i>pitch</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	90
Gambar 4.73 Respon gerak <i>yaw</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	90
Gambar 4.74 Respon gerak <i>surge</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3 .....	92
Gambar 4.75 Respon gerak <i>sway</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3 .....	93

Gambar 4.76 Respon gerak <i>heave</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3.....	93
Gambar 4.77 Respon gerak <i>roll</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3.....	93
Gambar 4.78 Respon gerak <i>pitch</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3.....	94
Gambar 4.79 Respon gerak <i>yaw</i> SSP dan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3.....	94
Gambar 4.80 <i>Tension line</i> 12 pada skenario <i>side by side offloading</i> kondisi 1, kondisi 2, kondisi 3 .....	105
Gambar 4.81 Konfigurasi tali tambat kapal .....	106
Gambar 4.82 <i>Tension</i> tali tambat kapal 1 pada skenario <i>side by side</i> <i>offloading</i> kondisi 1, kondisi 2, kondisi 3.....	108

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kriteria <i>safety factor</i> tali tambat berdasarkan API RP 2 SK .....	25
Tabel 3.1 <i>Principal Dimension</i> Sevan S400 .....	32
Tabel 3.2 <i>Principal dimension Shuttle Tanker</i> .....	33
Tabel 3.3 <i>Mooring line properties</i> Sevan S400 .....	33
Tabel 3.4 <i>Properties</i> tali tambat kapal .....	34
Tabel 3.5 Data sebaran gelombang Blok Masela.....	34
Tabel 3.6 Data angin dan arus Blok Masela .....	34
Tabel 4.1 Validasi pemodelan Hydrostar SSP terhadap data asli .....	36
Tabel 4.2 Kondisi <i>side by side offloading</i> dengan ukuran <i>Shuttle Tanker</i> maksimum 35000 DWT .....	37
Tabel 4.3 Validasi pemodelan Hydrostar <i>Shuttle Tanker</i> terhadap pemodelan Maxsurf.....	38
Tabel 4.4 Nilai maksimum RAO SSP kondisi 100% muatan .....	39
Tabel 4.5 Nilai maksimum RAO SSP kondisi 83% muatan .....	42
Tabel 4.6 Nilai maksimum RAO SSP kondisi 75% muatan .....	45
Tabel 4.7 Nilai maksimum RAO <i>Shuttle Tanker</i> kondisi 90% muatan.....	49
Tabel 4.8 Nilai maksimum RAO <i>Shuttle Tanker</i> kondisi 60% muatan.....	52
Tabel 4.9 Nilai maksimum RAO <i>Shuttle Tanker</i> kondisi 10% muatan.....	56
Tabel 4.10 Data sebaran gelombang Blok Masela .....	59
Tabel 4.11 Tabulasi perhitungan komponen peluang kumulatif .....	60
Tabel 4.12 Tabulasi perhitungan kurun waktu panjang.....	61
Tabel 4.13 Skenario kasus SSP tertambat.....	63
Tabel 4.14 Tabulasi respon gerak signifikan dari SSP kondisi muatan 100% .....	64
Tabel 4.15 Tabulasi <i>tension</i> signifikan dari SSP kondisi muatan 100% .....	68
Tabel 4.16 Nilai <i>safety factor</i> dari <i>tension</i> signifikan pada struktur SSP tertambat dengan kondisi muatan 100% .....	70
Tabel 4.17 Tabulasi respon gerak signifikan dari SSP kondisi muatan 75% .....	70
Tabel 4.18 Tabulasi <i>tension</i> signifikan dari SSP kondisi muatan 75% .....	74

Tabel 4.19 Nilai <i>safety factor</i> dari <i>tension</i> signifikan pada struktur SSP tertambat dengan kondisi muatan 75%.....	76
Tabel 4.20 Skenario kasus <i>side by side offloading</i> .....	78
Tabel 4.21 Penentuan dimensi <i>fender</i> .....	79
Tabel 4.22 Respon gerak signifikan SSP pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	82
Tabel 4.23 Respon gerak signifikan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 1.....	82
Tabel 4.24 Respon gerak signifikan SSP pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	87
Tabel 4.25 Respon gerak signifikan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 2.....	87
Tabel 4.26 Respon gerak signifikan SSP pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3 .....	91
Tabel 4.27 Respon gerak signifikan <i>Shuttle Tanker</i> pada kondisi <i>side by side offloading</i> kondisi 3.....	91
Tabel 4.28 Rangkuman kondisi kritis <i>side by side offloading</i> berdasarkan respon gerak pada kondisi 1 .....	95
Tabel 4.29 Rangkuman kondisi kritis <i>side by side offloading</i> berdasarkan respon gerak pada kondisi 2 .....	95
Tabel 4.30 Rangkuman kondisi kritis <i>side by side offloading</i> berdasarkan respon gerak pada kondisi 3 .....	96
Tabel 4.31 Ilustrasi kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan respon gerak.....	96
Tabel 4.32 <i>Tension mooring lines</i> pada skenario <i>side by side offloading</i> kondisi 1 .....	102
Tabel 4.33 <i>Tension mooring lines</i> pada skenario <i>side by side offloading</i> kondisi 2 .....	103
Tabel 4.34 <i>Tension mooring lines</i> pada skenario <i>side by side offloading</i> kondisi 3 .....	104
Tabel 4.35 <i>Tension</i> tali tambat kapal pada skenario <i>side by side offloading</i> kondisi .....	107

Tabel 4.36 Rangkuman kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan <i>tension mooring line</i> .....	109
Tabel 4.37 Rangkuman kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan <i>tension Tali tambat kapal</i> .....	110
Tabel 4.38 Kondisi akhir keseluruhan <i>side by side offloading</i> .....	112
Tabel 4.39 Korelasi kondisi batas dengan data sebaran gelombang Blok Masela .....	113

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran A Grafik *Time history* respon gerak *sway*, *heave*, dan *roll* pada skenario *side by side offloading* kondisi 1
- Lampiran B Grafik *Time history* respon gerak *sway*, *heave*, dan *roll* pada skenario *side by side offloading* kondisi 2
- Lampiran C Grafik *Time history* respon gerak *sway*, *heave*, dan *roll* pada skenario *side by side offloading* kondisi 3



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 LATAR BELAKANG

Pertumbuhan populasi dan perkembangan ekonomi merupakan penyebab utama dalam peningkatan kebutuhan energi. Dalam kurun waktu 2010-2040, kebutuhan energi dunia diperkirakan terus meningkat dengan nilai rata-rata peningkatan 1% per tahun (*Outlook for Energy*, 2013). Padahal cadangan hidrokarbon yang tersedia semakin hari semakin sulit didapatkan di perairan-perairan dangkal. Hal ini mengharuskan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi bergerak menuju perairan dalam (*deepwater*) bahkan sangat dalam (*ultra-deep water*). Fenomena yang terjadi terkait pemenuhan kebutuhan energi di lingkup aktivitas eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon lepas pantai adalah semakin mahal biaya yang harus dikeluarkan seiring dengan bertambahnya kedalaman operasi. Terkait dengan kenyataan tersebut, demi memperoleh keuntungan dari aktivitas laut dalam dengan biaya investasi yang besar adalah menambah ukuran unit *processing* dan jumlah *riser* yang digunakan. Sehingga, diperlukan suatu unit struktur yang besar yang mampu menopang beban besar dengan area geladak dan kapasitas penyimpanan yang besar pula.

Pada tahun-tahun terakhir, ditemukanlah sebuah inovasi teknologi konsep struktur apung berlambung silindris yang diklaim mampu menyediakan luasan geladak dan kapasitas muat beban yang lebih besar. Selain itu, dikatakan pula bahwa menelan biaya pengadaan yang harus dikeluarkan lebih murah dibandingkan dengan konsep struktur sejenis yang tipe konvensional seperti struktur apung berbadan dasar kapal (*ship-based*). Lebih lanjut, struktur yang dinamai *Sevan Stabilized Platform* (SSP) ini diklaim memiliki karakteristik gerak yang lebih halus (Sevan Marine, 2011).

Konsep struktur SSP ini pada dasarnya adalah struktur dengan sebuah lambung tunggal berbentuk silinder. Berbeda dengan SPAR yang juga memiliki lambung silinder, lambung SSP memiliki diameter lebih besar dibandingkan dengan tingginya. Konsep SSP diciptakan untuk digunakan

sebagai anjungan pengeboran (*drilling platform*) dan anjungan produksi (*production platform*) seperti FPSO. Melalui penambahan sistem *turret* dan *swivel*, FPSO akan memiliki keandalan yang tinggi untuk dioperasikan di perairan yang lebih ganas. Sedangkan untuk aplikasi di perairan yang lebih moderat cukup dipakai sistem tambat sebar (*spread-mooring*) konvensional (Syvertsen, 2011).

Dalam pengoperasian struktur apung, diperlukan adanya sebuah analisis terhadap perilaku gerak struktur tersebut di lokasi instalasinya. Hal tersebut jelas dilakukan pula terhadap FPSO yang memegang fungsi sebagai sarana pemrosesan dan penyimpanan hidrokarbon hasil pengeboran. Respon gerak struktur baik dalam kondisi *stand alone* ataupun dalam kondisi *offloading* perlu dianalisis. Analisis respon gerak dilakukan untuk melihat bagaimana operabilitas yang dimiliki struktur di lokasi tertentu agar struktur dapat beroperasi secara optimal dan menguntungkan (Dianiswara, 2013).

Keberadaan struktur apung dalam pengoperasiannya juga perlu didukung dengan adanya sistem tambat yang memadai. Sistem tambat berguna sebagai pengikat dan penjaga struktur agar tetap berada pada posisinya. Menurut Djatmiko (2003), gerakan dari suatu struktur terapung menimbulkan adanya gaya-gaya yang bekerja pada sistem tambat (*mooring system*). Begitu juga sebaliknya sistem tambat memberikan gaya pengembali pada struktur agar gerakannya menjadi kecil. Oleh sebab itu, analisis pada sistem tambat perlu dilakukan guna menjaga operabilitas dan keselamatan kinerja di lokasi struktur tersebut beroperasi.



Gambar 1.1 Proses *side by side offloading* antara SSP dengan *Shuttle Tanker* (Sevan Marine, 2011)

Penelitian ini dilakukan guna melihat performa SSP baik dalam kondisi *stand alone* maupun kondisi *offloading* secara *side by side* dengan *Shuttle Tanker*. Hidrokarbon yang ditransfer dari SSP dengan *Shuttle Tanker* diasumsikan adalah minyak.

Analisis dalam penelitian ini diawali dengan melihat terlebih dahulu bagaimana karakteristik gerak struktur SSP dan *Shuttle Tanker* pada kondisi terapung bebas. Analisis dilanjutkan dengan menghitung respon gerak struktur dan *tension* tali tambat SSP pada kondisi tertambat tunggal. Konfigurasi tali tambat SSP adalah secara menyebar dengan jumlah tali tambat sebanyak dua belas buah. Analisis dilanjutkan dengan menghitung respon gerak struktur dan *tension* tali tambat SSP saat proses *offloading* dengan *Shuttle Tanker*. Terakhir, perhitungan nilai operabilitas dilakukan terhadap kriteria kondisi lingkungan setempat.

## **1.2 RUMUSAN MASALAH**

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini meliputi

1. Bagaimana respon gerak struktur dan besar *tension* tali tambat SSP pada kondisi tertambat?
2. Bagaimana respon gerak struktur dan besar *tension* tali tambat SSP pada saat proses *side by side offloading* dengan *Shuttle Tanker*?
3. Bagaimana nilai operabilitas SSP ?

## **1.3 TUJUAN PENELITIAN**

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini meliputi

1. Mengetahui respon gerak struktur dan besar *tension* tali tambat SSP pada kondisi tertambat.
2. Mengetahui respon gerak struktur dan besar *tension* tali tambat SSP pada saat proses *side by side offloading* dengan *Shuttle Tanker*.
3. Mengetahui nilai operabilitas SSP.

#### 1.4 MANFAAT PENELITIAN

Penelitian ini dapat memberikan manfaat yakni menyediakan informasi mengenai karakteristik dan respon gerak struktur SSP, besar *tension* sistem tambat, serta nilai operabilitas struktur SSP. Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan wawasan baru mengenai inovasi teknologi lepas pantai berupa FPSO berlambung silinder yang digunakan dalam operasi wilayah laut dalam.

#### 1.5 BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang terdapat dalam penelitian ini meliputi

1. Penelitian ini memakai objek SSP S400 dan *Shuttle Tanker* kapasitas 35000 DWT.
2. Objek yang dianalisis yakni SSP dan *Shuttle Tanker* dianggap *rigid body*. Beban lingkungan yang ditinjau adalah beban gelombang, beban arus, dan beban angin.
3. Lokasi analisis adalah perairan Laut Masela.
4. Arah pembebanan dalam analisis meliputi  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$ .
5. Tali tambat SSP berjumlah dua belas buah yang dipasang pada tiga titik. Sedangkan konfigurasi *Shuttle Tanker* saat proses *side by side offloading* meliputi empat tali penghubung yang terkoneksi ke struktur SSP.
6. Jangkar pada sistem tambat dianggap *fixed* sehingga tidak diperlukan adanya analisis *holding capacity*.
7. Operasi *offloading* diasumsikan sebagai kegiatan yang harus selesai pada satu kali operasi dari awal dimulainya operasi. Operasi *offloading* tidak dapat ditunda maupun dihentikan sementara.
8. Analisis gaya yang bekerja pada *fender* diabaikan tetapi pemilihan *fender* tetap diperhitungkan.
9. Kontur dasar laut dianggap datar dan rata.
10. *Riser* tidak dianalisis.
11. Faktor operabilitas hanya disebabkan oleh kondisi cuaca dan lingkungan, bukan karena keterlambatan armada, *maintenance*, maupun faktor penghambat yang lain.

## 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan penelitian dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut

### 1. Bab I Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian, manfaat yang diperoleh, ruang lingkup penelitian untuk membatasi analisis yang dilakukan, serta sistematika penulisan laporan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

### 2. Bab II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Bab ini berisi referensi dan juga teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam menyelesaikan Tugas Akhir. Referensi tersebut bersumber pada jurnal lokal maupun internasional, literatur, *code* dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

### 3. Bab III Metode Penelitian

Bab ini berisi tentang alur pengerjaan Tugas Akhir dengan tujuan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam bentuk diagram alir atau *flow chart* yang disusun secara sistematis yang dilengkapi pula dengan data-data penelitian serta penjelasan detail untuk setiap langkah pengerjaannya.

### 4. Bab IV Analisis dan Pembahasan

Bab ini berisi penjelasan mengenai pengolahan data yang diperoleh, pemodelan struktur, pemodelan sistem tambat, serta hasil analisis simulasi model pada *software*. Hasil analisis simulasi mencakup analisis karakteristik SSP dan *Shuttle Tanker* dalam kondisi terapung bebas, analisis respon gerak struktur SSP dan *tension* tali tambat dalam kondisi SSP tertambat, analisis respon gerak SSP dan *Shuttle Tanker* serta *tension* tali tambat pada saat proses *side by side offloading*, dan nilai operabilitas SSP di perairan Masela.

### 5. Bab V Penutup

Bab ini berisi simpulan yang merupakan uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Uraian singkat ini diharapkan bisa menjawab rumusan

masalah yang ada. Pada bab ini terdapat pula saran yang yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait ke depannya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Penggunaan bangunan apung dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas lepas pantai dewasa ini diakibatkan oleh beberapa pertimbangan. Menurut Wibowo (2014), alasan memilih bangunan apung dibandingkan dengan jenis bangunan lain didasari pada kemampuan struktur untuk bisa berpindah setelah operasi selesai dan pertimbangan biaya operasi yang lebih rendah dibanding biaya instalasi sistem perpipaan. Selain itu pertimbangan kapasitas muat dan distribusi cukup besar yang dimiliki bangunan apung juga menjadi alasan masuk akal mengapa keberadaan bangunan apung lebih diunggulkan.

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) merupakan sebuah fasilitas terapung yang dipasang di sekitar ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, memproses, menyimpan, dan menyalurkan minyak dan gas bumi ke tanker (Bungawardani, 2007).

Penelitian mengenai operabilitas struktur apung yang pernah ada salah satunya dilakukan oleh Aghnia (2013) pada objek FSRU dan LNG *Carrier* pada wilayah perairan Lampung. Penelitian tersebut kemudian lebih dispesifikkan menjadi analisis operabilitas sebatas pada siklus *side by side offloading* oleh Dianiswara (2013). Penelitian kemudian dilanjutkan oleh Wibowo (2014) dengan menambahkan analisis akibat variasi jarak horizontal pada saat proses *side by side offloading* dengan objek dan lingkungan yang sama. Dari ketiga penelitian yang saling terkait tersebut, objek yang digunakan masih bersifat konvensional dalam artian bentuk struktur apung yang konvensional berupa struktur berbadan dasar kapal.

Penelitian ini dilakukan dengan mengacu kepada objek temuan terbaru berkonsep struktur apung berlambung silindris, *Sevan Stabilized Platform* yang sebelumnya turut dianalisis oleh Perwitasari (2010) perihal interaksi hidrodinamisnya di wilayah laut utara. Afriana (2011) juga telah melakukan

penelitiannya mengenai SSP dalam hal analisis dinamik *coupled* antara FPSO berlambung silinder, *mooring*, dan *riser* oleh Afriana (2011).

Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Sevan Marine (2011) dan juga Syvertsen (2011), struktur SSP ini dikatakan mampu menghemat biaya pengadaan dibandingkan dengan konsep struktur sejenis yang tipe konvensional seperti struktur apung berbadan dasar kapal. Gagasan tersebut diperkuat dengan hasil penelitian yang menyatakan bahwa struktur SSP diklaim memiliki karakteristik gerak yang lebih halus.

## 2.2 DASAR TEORI

Berikut ini teori-teori pendukung yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini

### 2.2.1 *Sevan Stabilized Platform*



Gambar 2.1 *Sevan Stabilized Platform* (Sevan Marine, 2011)

Konsep *Sevan Stabilized Platform* pada dasarnya adalah struktur dengan sebuah lambung tunggal berbentuk bundar dan berdasarkan pada prinsip stabilitas yang sama dengan struktur apung lainnya. Berbeda dengan SPAR yang juga memiliki lambung silindris, lambung *Sevan Stabilized Platform* berdiameter lebih besar dibandingkan dengan dimensi tingginya, karena sarat operasionalnya biasanya kurang dari sepertiga diameternya.

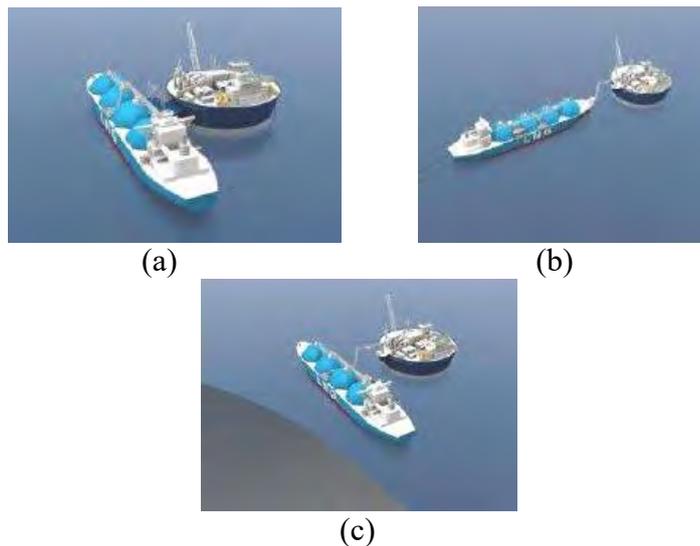


Penampang lambung yang bundar memungkinkan struktur memiliki tahanan hidrodinamis yang sama untuk segala arah pada saat terkena gelombang. Sehingga dalam hal ini Sevan *Stabilized Platform* tidak memerlukan sistem tambahan seperti *turret* maupun *swivel* seperti pada jenis FPSO berbadan kapal.

Dimensi karakteristik dari Sevan *Stabilized Platform* adalah diameter. Hal ini membuatnya menjadi sebuah desain yang berbasis modul yakni ukuran diameter akan menjadi penentu dimensi dari anjungan tersebut. Saat ini Sevan Marine (produsen Sevan *Stabilized Platform*) telah mendesain Sevan *Stabilized Platform* untuk tiga ukuran berdasarkan pada kapasitas penyimpanan minyaknya.

Stabilitas Sevan *Stabilized Platform* sama dengan bangunan apung berbentuk kapal seperti pada umumnya. Luasan bidang air (*water plane area*) yang besar menyebabkan stabilitas yang tinggi sehingga memiliki kapasitas beban geladak yang besar.

### 2.2.2 Offloading pada Sevan *Stabilized Platform*



Gambar 2.2 Moda *offloading* pada SSP (Major, 2013)

Dalam penciptaannya, terdapat tiga jenis moda *offloading* yang mampu dilakukan oleh SSP untuk melakukan transfer hidrokarborn

ke kapal-kapal dengan ukuran yang lebih kecil. Ketiga moda *offloading* tersebut meliputi

a. *Side by side offloading*

Moda *offloading* ini merupakan *offloading* dengan posisi SSP dengan objek kapal bersebelahan. Seperti pengoperasian *side by side offloading* pada umumnya, diperlukan *fender* untuk menahan benturan dan tali tambat kapal yang terhubung antara objek SSP dengan objek kapal.

b. *Tandem offloading*

Konfigurasi *offloading* secara *tandem* memosisikan objek SSP dan objek kapal berada pada satu garis dengan jarak tertentu. Dalam kriteria desain yang dibuat oleh Sevan Marine, disebutkan bahwa *offloading* jenis ini mampu beroperasi sampai pada tinggi gelombang signifikan 4.5 m. Berbeda dengan moda *side by side*, kondisi sarat air kedua objek tidak saling memberikan pengaruh satu sama lain.

c. *Offset side by side offloading*

*Offloading* jenis ini pada dasarnya serupa dengan *side by side offloading*, tetapi, ada jarak yang diberikan antara objek SSP dengan objek kapal. Sistem *fender* tidak lagi diperlukan dan kondisi sarat air kedua objek tidak saling memberikan pengaruh satu sama lain.

### 2.2.3 Dasar analisis sistem tambat

Menurut Portella et al (2000), tipe analisis *mooring* bergantung dari metodologi perhitungan yang melingkupi kompleksitas perhitungan serta efek fisik yang terlibat. Tipe analisis *mooring* tersebut meliputi

a. Analisis statis

Analisis *mooring* yang paling sederhana yang dapat diselesaikan menggunakan persamaan kesetimbangan antara *mean environmental loads* dan gaya pengembali dari tali tambat, dengan beban statis dari *restoring curves* dihitung dengan

formula *catenary*. Parameter yang dapat divariasikan pada perhitungan beban statis meliputi jumlah tali tambat, jenis tali tambat, *pre tension* pada tali tambat, dan ukuran tali tambat.

Normalnya, analisis statis digunakan untuk menghitung tegangan pada tali tambat pada kapal di pelabuhan atau *jetty*, dengan kondisi aksi dari gelombang tidak kritis.

b. Analisis quasi statis

Pada analisis quasi-statis, nilai posisi rata-rata dari *floater* dihitung berdasarkan kesetimbangan statis dibawah aksi dari rata-rata beban eksternal. Posisi rata-rata dari *floater* yakni gerakan frekuensi gelombang ditentukan berdasarkan analisis spektral yang dilakukan dengan *transfer function* dari pergerakan horizontal dari *floater* dan spektrum gelombang. Respon dari pergerakan horizontal serta tegangan pada tali tambat selanjutnya ditentukan berdasarkan *offset* akhir dari *floater*. Pada tipe analisis ini, gerakan vertikal dari *fairlead* serta efek dinamis yang diasosiasikan dengan massa, *damping*, dan percepatan fluida diabaikan.

c. Analisis dinamis

Analisis dinamis memiliki efek variasi waktu terhadap massa, *damping*, dan percepatan fluida. Gerakan dihitung berdasarkan enam derajat kebebasan. Analisis dinamis dipengaruhi oleh efek non linear serta interaksi antar struktur terapung yang selanjutnya disertakan dalam perhitungan.

#### 2.2.4 Dasar analisis dinamis

Berdasarkan DNV OS E301 (2004), metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai dibagi menjadi dua, yaitu

a. *Frequency Domain Analysis*

*Frequency domain analysis* adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. Metode ini bisa digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak, seperti gerakan dan percepatan *platform*,

gaya, dan sudut. Keuntungan metode ini adalah tidak membutuhkan banyak waktu untuk perhitungan, *input* dan *output* juga lebih sering digunakan oleh perancang. Kekurangannya adalah untuk setiap persamaan non-linear harus diubah menjadi linear. Pada *frequency domain analysis*, keseimbangan dinamik dari sistem *linear* dapat diformulasikan dengan persamaan berikut

$$M_{(\omega)}r + C_{(\omega)}r + K_{(\omega)}r = Xe^{i\omega t} \quad (2.1)$$

dengan

$M(\omega)$  = matriks massa fungsi frekuensi (ton)

$C(\omega)$  = matriks *damping* fungsi frekuensi (ton/s)

$K(\omega)$  = matriks kekakuan fungsi frekuensi (kN/m)

$X$  = vektor beban kompleks memberikan informasi pada amplitudo beban dan fase pada semua derajat kebebasan

$r$  = vektor *displacement* (m)

#### b. *Time Domain Analysis*

*Time domain analysis* adalah penyelesaian gerakan dinamis berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini akan menggunakan prosedur integrasi waktu dan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu  $x(t)$ .

Metode analisis *time domain* umumnya dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tali tambat di bawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Keuntungan metode ini dibandingkan metode *frequency domain* adalah semua tipe non-linear (matriks sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Sedangkan kerugiannya adalah membutuhkan waktu perhitungan yang lebih. Menurut DNV OS E301, minimal simulasi *time domain* adalah selama 3 jam (10800 detik).

Berikut ini persamaan dalam penyelesaian analisis respon gerak berdasarkan fungsi waktu.

$$[m + A(\omega)]\ddot{x} + C(\omega)\dot{x} + D_1\dot{x} + D_2f(\dot{x}) + Kx = q_{WI} + q_{WA}^1 + q_{WA}^2 + q_{CU} + q_{EXT} \quad (2.2)$$

dengan

$q_{WI}$  = gaya drag angin

$q_{WA}^1$  = gaya gelombang orde 1

$q_{WA}^2$  = gaya gelombang orde 2

$q_{CU}$  = gaya arus

$q_{EXT}$  = gaya eksitasi

### 2.2.5 Beban angin

Beban angin merupakan beban dinamis, tapi beberapa struktur akan meresponnya pada model statis yang paling mendekati. Dalam perancangan bangunan lepas pantai pada umumnya perhitungan beban angin disyaratkan untuk didasarkan pada besarnya kecepatan ekstrem dengan periode ulang 50 atau 100 tahun. Semakin lama periode ulang yang digunakan maka risiko kegagalan semakin besar. Berdasarkan OCIMF *Mooring Equipment Guidelines* (1997), perhitungan beban angin didefinisikan sebagai berikut

$$F_{xw} = C_{xw} \left( \frac{\rho_w}{7600} \right) V_w^2 A_T \quad (2.3)$$

$$F_{yw} = C_{yw} \left( \frac{\rho_w}{7600} \right) V_w^2 A_L \quad (2.4)$$

dengan,

$F_{xw}$  = gaya angin longitudinal (kN)

$F_{yw}$  = gaya angin lateral (kN)

$C_{xw}$  = koefisien gaya angin longitudinal non dimensional

$C_{yw}$  = koefisien gaya angin transversal non dimensional

$\rho_w$  = massa jenis udara (1.223 kg/m<sup>3</sup>)

$V_w^2$  = kecepatan angin pada ketinggian 10 m (m/s)

$A_T$  = luas penampang transversal di atas air (m<sup>2</sup>)

$A_L$  = luas penampang longitudinal di atas air (m<sup>2</sup>)

### 2.2.6 Beban arus

Arus akibat pasang surut memiliki kecepatan yang berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman sesuai fungsi non-linear. Sedangkan arus yang disebabkan karena angin memiliki karakter yang sama tetapi dalam fungsi linear. Arus permukaan di sekitar kapal dibangkitkan dari angin lokal, pasang surut, *stokes drift*, massa jenis arus lokal, dan fenomena *set-up* (Faltinsen, 1990). Berdasarkan OCIMF *Mooring Equipment Guidelines* (1997), perhitungan beban arus didefinisikan sebagai berikut

$$F_{xc} = C_{xc} \left( \frac{\rho_c}{7600} \right) V_c^2 T L_{PP} \quad (2.5)$$

$$F_{yc} = C_{yc} \left( \frac{\rho_c}{7600} \right) V_c^2 T L_{PP} \quad (2.6)$$

dengan

$F_{xc}$  = gaya arus longitudinal (kN)

$F_{yc}$  = gaya arus lateral (kN)

$C_{xc}$  = koefisien gaya arus longitudinal non dimensional

$C_{yc}$  = koefisien gaya arus transversal non dimensional

$\rho_c$  = massa jenis air laut ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_c^2$  = kecepatan arus pada kedalaman 10 m (m/s)

T = sarat air kapal (m)

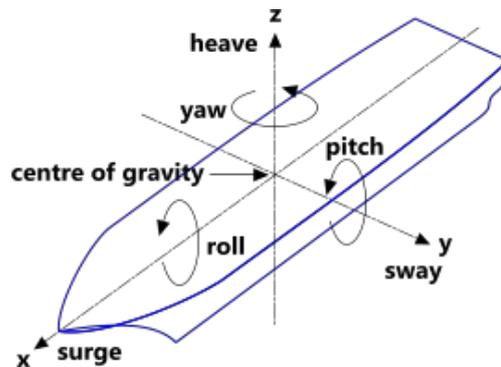
$L_{PP}$  = *length between perpendicular* (m)

### 2.2.7 Teori gerak bangunan apung

Bangunan apung secara garis besar dibagi menjadi dua kategori, meliputi bangunan apung berbadan silindris dan bangunan apung berbadan kapal (Soetomo, 2010). Bangunan apung berbadan silindris dibagi lagi menjadi dua bagian yaitu *single bodied* dan *space framed bodied*. Bangunan apung ramping memiliki kriteria perbandingan antara diameter struktur dengan panjang gelombang datang kurang dari sama dengan 0.2, sedangkan bangunan apung gemuk memiliki kriteria perbandingan antara diameter struktur dengan panjang gelombang datang lebih dari 0.2.

Struktur bangunan apung memiliki enam moda gerakan bebas yang terbagi menjadi dua kelompok yakni moda gerak translasional dan moda gerak rotasional (Bhattacharyya, 1972).

- a. Moda gerak translasional
  - i. *Surge*, arah gerak sumbu x
  - ii. *Sway*, arah gerak sumbu y
  - iii. *Heave*, arah gerak sumbu z
- b. Moda gerak rotasional
  - i. *Roll*, arah gerak sumbu x
  - ii. *Pitch*, arah gerak sumbu y
  - iii. *Yaw*, arah gerak sumbu z



Gambar 2.3 Gerak bangunan apung (Soetomo, 2010)

## 2.2.8 Respon struktur pada gelombang reguler

### 2.2.8.1 *Response Amplitude Operator* (RAO)

*Response Amplitude Operator* (RAO) merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang disebabkan oleh gelombang dengan rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur. Menurut Chakrabarti (1987) RAO dapat didefinisikan sebagai

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (2.7)$$

dengan

$X_p(\omega)$  = amplitudo struktur

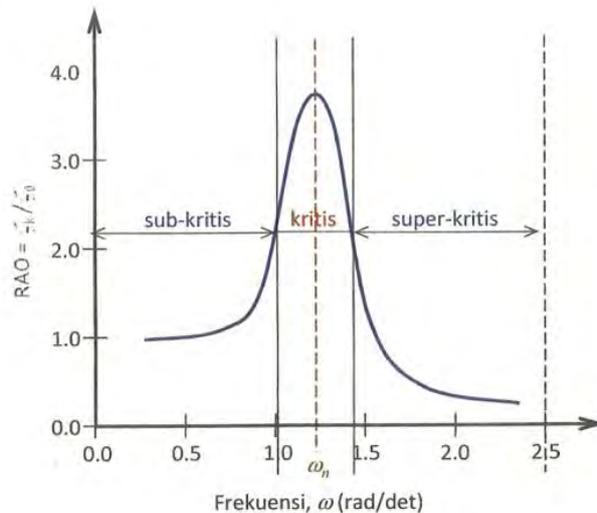
$\eta(\omega)$  = amplitudo gelombang

*Response Amplitude Operator* (RAO) atau disebut juga dengan *transfer function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur (Prasiwi, 2014).

Respon gerakan RAO untuk gerakan translasi (*surge, sway, heave*) merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang) (Djtmiko, 2012). Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan (2.7).

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

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\frac{\omega^2}{g})\zeta_0} \text{ (rad/rad)} \quad (2.8)$$



Gambar 2.4 Bentuk umum grafik respons gerakan bangunan apung (Djtmiko, 2012)



Berdasarkan gambar 2.4, kurva respon gerakan bangunan apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi tiga bagian meliputi

- a. Pertama adalah bagian frekuensi rendah, atau gelombang (dengan periode) panjang, yang disebut daerah sub-kritis. Pada daerah ini bangunan laut akan bergerak mengikuti pola atau kontur elevasi gelombang yang panjang sehingga amplitudo gerakan kurang lebih akan ekuivalen dengan amplitudo gelombang, atau disebut sebagai *contouring*. Dalam korelasi persamaan hidrodinamis, di daerah frekuensi rendah, atau  $\omega^2 < k/(m+a)$ , gerakan akan didominasi oleh faktor kekakuan.
- b. Kedua adalah daerah kritis, meliputi pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi rendah sampai dengan puncak kurva dan diteruskan ke pertengahan lengan kurva di sisi frekuensi tinggi. Puncak kurva berada pada frekuensi alami, yang merupakan daerah resonansi, sehingga respons gerakan mengalami magnifikasi, atau amplitudo gerakan akan beberapa kali lebih besar daripada amplitudo gelombang. Secara hidrodinamis di daerah frekuensi alami, yakni  $k/(m+a) < \omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor redaman.
- c. Ketiga adalah daerah super kritis, yaitu daerah frekuensi tinggi, atau gelombang-gelombang (dengan periode) pendek. Pada daerah ini respons gerakan akan mengecil. Semakin tinggi frekuensi, atau semakin rapat antara puncak-puncak gelombang yang berurutan, maka akan memberikan efek seperti bangunan laut bergerak di atas air yang relatif datar. Oleh karena itu gerakan bangunan laut diistilahkan sebagai *platforming*. Dalam hal korelasi hidrodinamis, gerakan di daerah frekuensi

tinggi ini, dimana  $\omega^2 < k/a$ , gerakan akan didominasi oleh faktor massa (Djatkiko, 2012).

#### 2.2.8.2 *Single body*

Pada bangunan apung *single body*, gerakan enam derajat kebebasan disusun dalam matriks  $6N$ ,  $N$  untuk menunjukkan jumlah badan yang ditinjau. Permasalahan hidrodinamis pada struktur bangunan apung kondisi ini meliputi

a. Gaya dan momen struktur yang beresilasi pada kondisi *still water*

Struktur bangunan apung yang beresilasi terhadap dirinya sendiri akan memberi pengaruh pada osilasi fluida di sekelilingnya dan integrasi fluida yang terpengaruh akan menghasilkan gaya dan momen yang bekerja pada struktur. Total gaya pada struktur didapatkan dari hasil integrasi tekanan yang mengenai luasan permukaan stuktur yang dikenainya. Berdasarkan persamaan gerak koefisien, massa tambah dan redaman pada gerakan harmonik dapat ditentukan. Gaya pengembali dan momen dapat dihitung berdasarkan perhitungan hidrostatis dan massa.

b. Gaya dan momen struktur yang beresilasi akibat gelombang

Gelombang dan momen struktur yang bekerja dikenal dengan gaya dan momen Froude-Krylov dan defraksi. Gaya Froude-Krylov dihasilkan dari area yang dikenai tekanan yang tidak terganggu pola alirannya. Sedangkan gaya defraksi diperoleh dari perubahan area yang dikenai tekanan yang terganggu pola alirannya akibat defraksi.

### 2.2.8.3 *Multi Body*

Pada bangunan apung *multi body*, jumlah matriks massa derajat kebebasan, matriks gerak bangunan apung, dan matriks gaya menjadi  $6N \times 6N$ . Hal tersebut mengindikasikan persamaan gerak kedua bangunan apung merupakan superposisi dari persamaan gerak untuk masing-masing bangunan. Koefisien-koefisien hidrodinamis dapat diselesaikan dengan meninjau radiasi dan defraksi dari masing-masing bangunan apung serta interaksi hidrodinamis bangunan satu akibat bangunan lain, begitu sebaliknya.

### 2.2.9 Respon struktur pada gelombang acak

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, *potential damping*, dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. Sedangkan gelombang yang terjadi di lapangan merupakan gelombang acak sehingga dituntut untuk melakukan analisis respon struktur pada gelombang acak.

Gelombang acak merupakan superposisi dari komponen-komponen pembentuknya berupa gelombang sinusoidal dalam jumlah yang tak terhingga. Tiap-tiap komponen gelombang memiliki tingkat energi tertentu yang dikontribusikan dan secara keseluruhan dapat diakumulasikan dalam bentuk spektrum energi gelombang (Djarmiko, 2012).

Respon struktur pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga kuadrat dari *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung

tersebut beroperasi. Persamaan spektrum respon secara matematis dapat dituliskan sebagai

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2.9)$$

dengan

$$\begin{aligned} S_R &= \text{spektrum respons (m}^2\text{/s)} \\ S(\omega) &= \text{spektrum gelombang (m}^2\text{/s)} \\ RAO(\omega) &= \text{transfer function} \\ \omega &= \text{frekuensi gelombang (rad/s)} \end{aligned}$$

Setelah spektrum respon diperoleh maka intensitas gerakan dapat dihitung sebagai fungsi luasan di bawah kurva spektrum respon atau merupakan variasi elevasi gerakan, yaitu sebagai berikut

$$m_{r0} = \int_0^\infty S_\zeta(\omega) d\omega \quad (2.10)$$

Jika persamaan (2.9) diturunkan akan didapatkan harga-harga statistik gerakan sebagai fungsi varian elevasi gerakan  $m_{r0}$ , misalnya sebagai amplitudo gerakan rata-rata yang dihitung sebagai

$$\bar{\zeta}_r = 1.25\sqrt{m_{r0}} \quad (2.11)$$

Harga amplitudo gerakan signifikan dihitung sebagai

$$\zeta_{rs} = 2.0\sqrt{m_{r0}} \quad (2.12)$$

Amplitudo respon ekstrem yang berpeluang terjadi dalam waktu T jam dapat dihitung dengan persamaan

$$\hat{\zeta}_r = \sqrt{m_{r0}} \times \sqrt{\left\{ 2 \ln \left( \frac{60^2 T}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{r2}}{m_{r0}}} \right) \right\}} \quad (2.13)$$

Harga  $m_{r2}$  merupakan momen kedua dari luasan di bawah kurva spektrum respon.

### 2.2.9.1 Spektrum Gelombang

Sebuah gelombang reguler memuat energi yang diidentifikasi pada setiap unit atau satuan luas permukaannya ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya (Djarmiko, 2012).

$$\frac{dE_T}{dA} = \frac{dE_p + dE_K}{dA} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_0^2 \quad (2.14)$$

dengan

$dE_T$  = energi total

$dA$  = luas permukaan

$dE_P$  = energi potensial

$dE_K$  = energi kinetik

$\zeta_0$  = amplitudo gelombang

Penjumlahan energi dari seluruh komponen gelombang reguler per satuan luas permukaan dapat diekspresikan sebagai kepadatan spektrum gelombang atau lebih dikenal dengan istilah spektrum gelombang.

Bersamaan dengan semakin meningkatnya intensitas studi yang dilakukan mengenai respon gerak pada gelombang acak telah banyak dihasilkan spektrum gelombang yang beragam sesuai dengan kondisi lingkungan yang dianalisis. Jenis-jenis spektrum gelombang yang biasa digunakan dalam perhitungan adalah model Pierson-Moskowitz (1964), ISSC (1964), Scott (1965), Bretschneider (1969), JONSWAP (1973), ITTC (1975) dan Wang (1991).

Spektrum gelombang yang digunakan dalam analisis ini mengacu pada spektrum gelombang JONSWAP karena karakteristik perairan Indonesia yang tertutup atau kepulauan sehingga cocok dengan karakter spektrum JONSWAP (Djatkiko, 2012). Spektrum JONSWAP didasarkan pada percobaan yang dilakukan di *North Sea* merupakan persamaan spektrum hasil modifikasi persamaan spektrum Pierson-Moskowitz dengan persamaan berikut

$$S_j(\omega) = A_\gamma S_{pm}(\omega) \gamma^{\exp\left[-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right]} \quad (2.15)$$

$$S_{pm}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \quad (2.16)$$

dengan

$\gamma$  = parameter puncak

$\sigma$  = parameter bentuk (*shape parameter*)

untuk  $\omega \leq \omega_0 = 0.07$  dan  $\omega \geq \omega_0 = 0.09$

$A_\gamma$  = *normalizing factor*

=  $1 - 0.287 \ln(\gamma)$

$\omega$  = periode gelombang (rad/s)

$\omega_p$  = *angular spectral peak frequency* (rad/s)

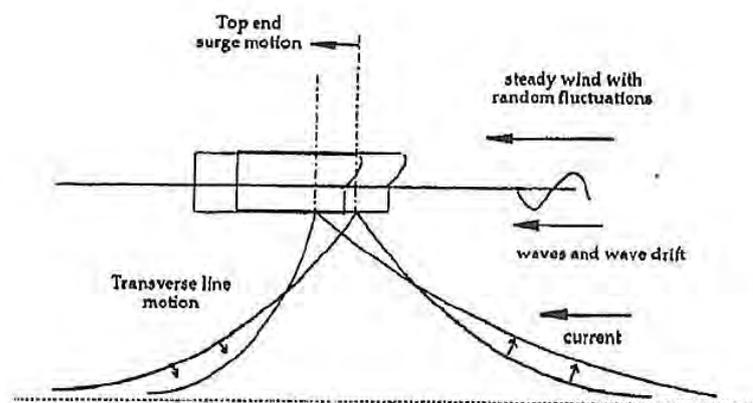
$H_s$  = tinggi gelombang signifikan (m)

$T_p$  = periode puncak (s)

#### 2.2.10 Sistem tambat

Desain dari sistem tambat memerlukan simulasi yang panjang serta *trial* dan *error* akibat dari banyaknya parameter desain. *Trial* dan *error* sangat dibutuhkan mengingat efek non linear dari dinamika sistem tambat.

Sistem tambat berfungsi untuk menahan gerakan struktur terhadap eksitasi gaya lingkungan. Menurut Chakrabarti (1994), dalam mendesain sistem tambat diperlukan suatu sistem cukup kuat untuk menghindari beban signifikan pada suatu *floater* dan membuatnya cukup kaku apabila terjadi *offset* berlebihan.



Gambar 2.5 Gaya lingkungan yang bekerja pada struktur terapung kondisi *heading head seas* dan gerakan transversal dari *mooring lines* (Chakrabarti, 1994)

Menurut API-RP 2SK (2005), tipe *mooring line* yang digunakan pada struktur terapung dibagi menjadi 3 (tiga) kategori, yakni

a. Semua *mooring line* dari tali kabel (*wire rope*)

*Wire rope* lebih ringan daripada rantai. Karena itu, pada umumnya *wire rope* memiliki *restoring force* yang lebih di perairan laut dalam dan memerlukan tegangan awal (*pretension*) yang rendah daripada rantai. Bagaimanapun juga, untuk menghindari terangkatnya *anchor* dari dasar laut maka diperlukan *wire rope* yang sangat panjang. Rusak yang disebabkan oleh abrasi antara *wire rope* dengan dasar laut yang keras terkadang dapat menjadi suatu masalah. Terlebih lagi *wire rope* memerlukan perawatan yang sangat hati-hati. Korosi yang diakibatkan oleh kurangnya pelumasan atau kerusakan mekanik pada *wire rope* dapat menyebabkan lebih banyak kegagalan.

b. Semua *mooring line* dari *chain*.

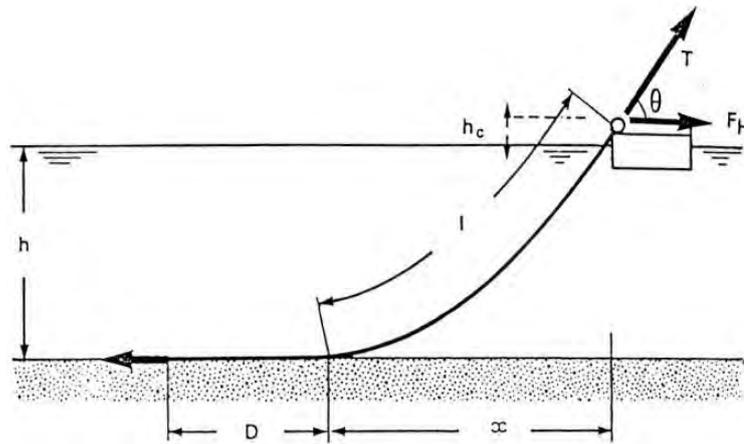
Rantai telah menunjukkan keunggulannya pada *offshore operations*. Rantai juga memiliki daya tahan yang lebih terhadap abrasi dasar laut dan memiliki kontribusi terhadap daya cengkram *anchor* yang sangat signifikan. Namun, karena rantai memiliki berat yang besar maka rantai tidak terlalu banyak digunakan pada kondisi operasi perairan laut dalam.

c. Kombinasi antara *chain* dan *wire rope*.

Dengan pemilihan panjang yang tepat dari gabungan antara *wire rope* dan *chain*, maka akan diperoleh sistem *mooring* yang menguntungkan dengan kondisi *pre tension* yang rendah, *restoring force* yang tinggi, *holding anchor* yang lebih besar, dan daya tahan terhadap abrasi dasar laut yang bagus. Untuk itulah, sistem ini adalah sistem yang paling cocok untuk operasi laut dalam.

#### 2.2.11 Penentuan panjang *mooring line*

Penentuan panjang *mooring line* berfungsi untuk menjaga benda apung agar berada pada posisi yang tepat dan juga agar *mooring line* itu sendiri memiliki panjang dan *pre tension* yang sesuai.



Gambar 2.6 Panjang minimum *mooring line* (Faltinsen, 1990)

$$\frac{l}{h} = \sqrt{\frac{2F_H}{wh} + 1} = \sqrt{\frac{2T}{wh} + 1} \quad (2.17)$$

dengan

- $l$  = panjang minimum tali tambat (m)
- $h$  = jarak vertikal dari *fairlead* ke *seabed* (m)
- $h_m$  = kedalaman air (m)
- $h_c$  = tinggi *fairlead* di atas permukaan air (m)
- $w$  = berat tali tambat di dalam air per satuan panjang
- $F_H$  = *horizontal pre tension*  
= 10% MBL
- $T$  = *tension* maksimum dari tali tambat (*pre tension*) (kN)
- $D$  = *length resting on the seabed* (panjang tali tambat yang menempel pada *seabed*) (m)

### 2.2.12 *Tension* pada *mooring line*

Gerakan pada bangunan apung karena pengaruh beban lingkungan menyebabkan adanya tarikan pada *mooring line*. Tarikan (*tension*) yang terjadi pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi dua, yaitu

- a. *Mean Tension*  
*Tension* pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* pada vessel.
- b. *Maximum Tension*



*Mean tension* yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low-frequency tension*.

Menurut Faltinsen (1990), perhitungan *tension* maksimum tali tambat dapat menggunakan persamaan berikut

$$T_{max} = T_H + wh \quad (2.18)$$

dengan

$T_{max}$  = *tension* maksimum tali tambat (ton)

$T_H$  = *horizontal pre tension* (ton)

$w$  = berat *chain* di air (ton/m)

$h$  = kedalaman perairan (m)

Untuk mengetahui apakah desain sistem tambat pada suatu struktur telah memenuhi batas aman atau tidak, maka harus dilakukan pengecekan terlebih dahulu. Pengecekan tersebut salah satunya didasarkan pada nilai *tension* yang dihasilkan oleh masing-masing tali tambat. Nilai *tension* pada tali tambat harus sesuai dengan kriteria/batasan yang memenuhi *safety factor*. Kriteria *safety factor* tersebut berdasar pada suatu *rule*. Dan yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah mengacu pada *rule* API RP 2SK (2005), yakni sebagai berikut

Tabel 2.1 Kriteria *safety factor* tali tambat berdasarkan API RP 2 SK

Kondisi	<i>Safety Factor</i>
<i>Intact</i>	> 1.67
<i>Damage</i>	> 1.25

Dengan persamaan *safety factor* menurut API RP 2SK adalah

$$Safety\ factor = \frac{Minimum\ breaking\ load}{Maximum\ tension} \quad (2.19)$$

### 2.2.13 Tali tambat antar kapal

Tali tambat antar kapal pada konfigurasi *side by side* umumnya menggunakan *fibre mooring lines*. Berdasarkan OCIMF *Mooring Equipment Guidelines* (1997), *fibre mooring lines* terbuat dari bahan sintesis dan material yang umum digunakan adalah *polyester*, *nylon*, *polypropylene* dan *polyethylene*. *Safety factor* tegangan tali tambat kapal bernilai 2.2 untuk material *nylon* dan 2 untuk material sintesis lainnya.

### 2.2.14 Persamaan gerak sistem

Respon gerak yang terjadi pada bangunan apung yang tertambat dalam sistem dapat dianggap sebagai gerak orde satu (*high frequency*) dan gerak order dua (*low frequency*).

Menurut Liu dan Miao (1987), *wave frequency motions* pada struktur terapung dapat dirumuskan dalam persamaan berikut

$$\begin{aligned} (M_{ij} + \mu_{ij}) \ddot{x}_j^{(1)} + \int_0^\infty K_{ij}(\tau) \dot{x}_j^{(1)}(t-\tau) d\tau + C_{ij} \dot{x}_j^{(1)} \\ = F_i^{moor} + F_i^{wave(1)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, 6$$

dengan

$$x_i^{(1)} = \text{wave frequency motion}$$

$$F_i^{wave(1)} = \text{first order wave force}$$

$$F_i^{moor} = \text{mooring force}$$

$$M = \text{matriks inersia struktur apung}$$

Sedangkan, persamaan *low frequency motions* yang terjadi (Wichers, 1988) adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} (m + \mu_{11}) \ddot{x}_1^{(2)} + \mu_{12} \ddot{x}_2^{(2)} + \mu_{16} \ddot{x}_6^{(2)} + (B_{11} + B_{wdd}) \dot{x}_1^{(2)} \\ = F_1^{wind} + F_1^{current} + F_1^{wave(2)} + F_1^{moor} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} \mu_{21} \ddot{x}_1^{(2)} + (m + \mu_{22}) \ddot{x}_2^{(2)} + \mu_{26} \ddot{x}_6^{(2)} + B_{22} \dot{x}_2^{(2)} \\ = F_2^{wind} + F_2^{current} + F_2^{wave(2)} + F_2^{moor} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} \mu_{61} \ddot{x}_1^{(2)} + \mu_{62} \ddot{x}_2^{(2)} + (I + \mu_{66}) \ddot{x}_6^{(2)} + B_{66} \dot{x}_6^{(2)} \\ = F_6^{wind} + F_6^{current} + F_6^{wave(2)} + F_6^{moor} \end{aligned} \quad (2.23)$$

dengan

$$x^{(2)} = \text{low frequency motion}$$

$B_{11}, B_{22}, B_{33}$	= koefisien <i>damping</i>
$B_{wdd}$	= koefisien <i>wave drift damping</i> arah sumbu-x
$F_i^{\text{current}}$	= gaya arus
$F_i^{\text{wind}}$	= gaya angin
$F_i^{\text{moor}}$	= gaya <i>mooring</i>
$F_i^{\text{wave}(2)}$	= <i>second order wave drift force</i>

### 2.2.15 Operabilitas

Operabilitas merupakan gambaran kemampuan struktur untuk bekerja yakni dengan membandingkan peluang struktur untuk bekerja dan data sebaran gelombang di tempat struktur beroperasi. Operabilitas dicapai jika batasan kriteria tidak terlampaui. Apabila kriteria operabilitas terlampaui, maka bangunan laut harus menghentikan operasinya, atau yang disebut dengan *down time*

Menurut Djatmiko (2012), langkah paling awal dalam melakukan evaluasi operabilitas adalah menetapkan skenario pengoperasian bangunan laut. Skenario harus memuat semua faktor yang akan terkait, baik secara langsung maupun tidak langsung. Berikut merupakan kriteria operabilitas yang digunakan pada saat *offloading* dan *connecting*.

Sedangkan persamaan operabilitas (Djatkiko, 2012) adalah sebagai berikut

$$\text{operabilitas} = \left( \frac{N_a}{N_a + N_d} \right) \times 100\% \quad (2.19)$$

dengan

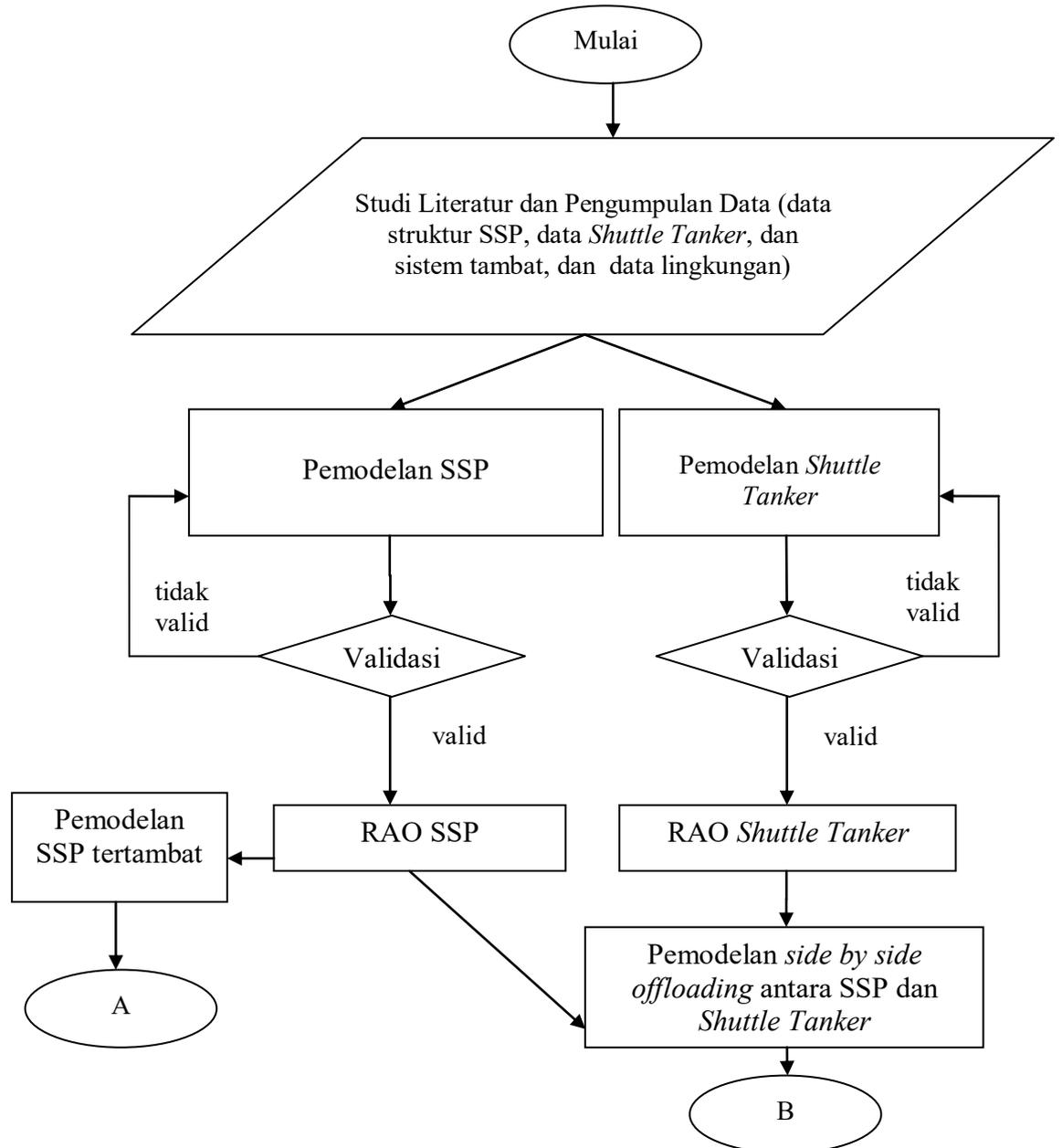
$N_a$  : Jumlah kejadian di bawah syarat batas

$N_d$  : Jumlah kejadian melebihi syarat batas

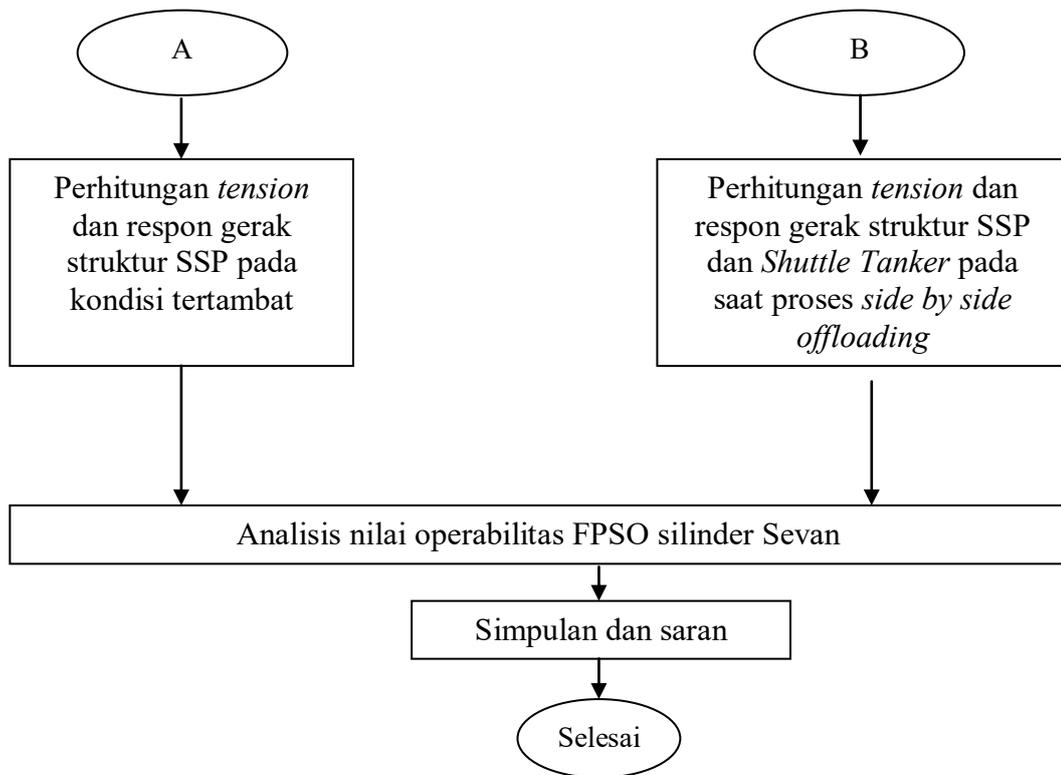
### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 LANGKAH KERJA

Langkah kerja penelitian yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir (*flow chart*) berikut



Gambar 3.1 Diagram alir langkah kerja penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir langkah kerja penelitian (lanjutan)

Diagram alir langkah kerja tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut

1. Studi literatur dan pengumpulan data

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari berbagai bahan acuan seperti jurnal, buku, dan refensi lain seperti artikel di internet. Studi literatur bertujuan untuk membantu memahami dan menguraikan permasalahan dalam penelitian ini. Pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan penelitian-penelitian terkait yang sudah dilakukan di waktu sebelumnya.

2. Pemodelan SSP dan dan *Shuttle Tanker*

Pemodelan struktur dilakukan berdasarkan data-data yang telah dikumpulkan. Pemodelan dilakukan pada *software* Hydrostar.

3. Validasi

Validasi dilakukan untuk memastikan apakah model yang dibuat sudah valid dengan data yang tersedia. Nilai toleransi validasi mengacu kepada *ABS Rules for Building and Classing MODU* (2012).

4. RAO SSP dan RAO *Shuttle Tanker*

Model yang telah valid kemudian di *run* untuk mendapatkan karakteristik geraknya atau disebut pula dengan RAO. RAO ini pula yang akan dijadikan masukan dalam langkah analisis selanjutnya.

5. Pemodelan SSP tertambat

Pemodelan ini menggambarkan SSP dalam kondisi tertambat. Masukan pemodelan adalah hasil dari analisis hidrodinamik objek pada kondisi terapung bebas.

6. Perhitungan *tension* dan respon gerak struktur SSP pada kondisi tertambat

Analisis pada tahap ini dilakukan untuk mendapatkan besar *tension* tali tambat dan juga respon gerak SSP. Analisis dilakukan dengan arah pembebanan  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$ .

7. Pemodelan *side by side offloading* antara SSP dan *Shuttle Tanker*

Pemodelan ini menggambarkan SSP dalam kondisi *side by side offloading* dengan *Shuttle Tanker*. Masukan pemodelan adalah hasil dari analisis hidrodinamik objek pada kondisi terapung bebas.

8. Perhitungan *tension* dan respon gerak struktur SSP pada saat proses *side by side offloading* dengan *Shuttle Tanker*

Analisis pada tahap ini dilakukan untuk mendapatkan *tension* tali tambat dan juga respon SSP pada saat kondisi *side by side offloading* dengan *Shuttle Tanker*. Analisis dilakukan dengan arah pembebanan  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $90^\circ$ .

9. Analisis nilai operabilitas SSP berdasarkan

Perhitungan nilai operabilitas juga meninjau aspek lingkungan dengan melihat data sebaran gelombang.

10. Simpulan dan saran.

## 3.2 PENGUMPULAN DATA

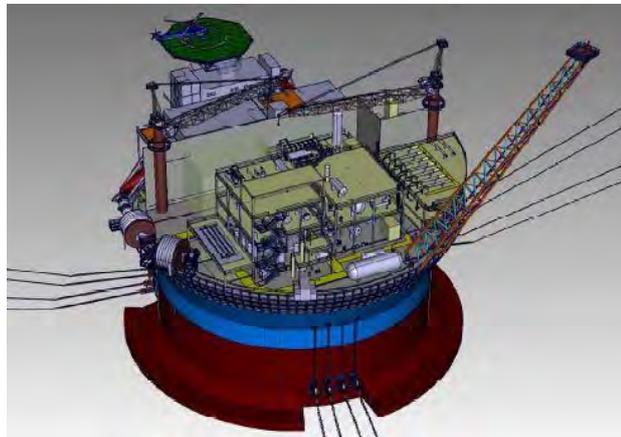
### 3.2.1 Data Sevan S400

Berikut data struktur FPSO berlambung silinder Sevan yang akan digunakan sebagai objek dalam penelitian ini.

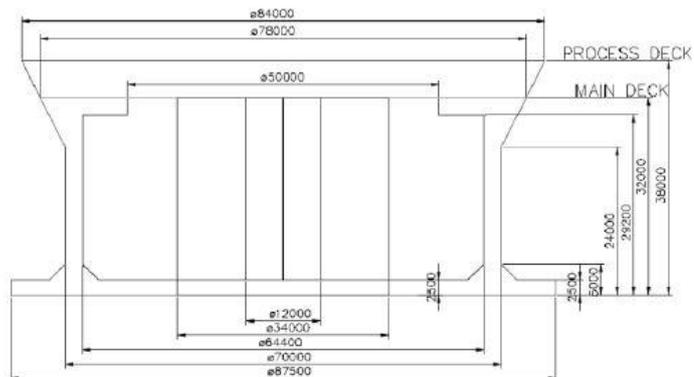
Tabel 3.1 *Principal Dimension* Sevan S400

Parameter	Satuan	Dimensi
Diameter <i>main hull cylinder</i>	m	70
Diameter <i>main deck</i>	m	78
Diameter <i>process deck</i>	m	84
Area <i>process deck</i>	m <sup>2</sup>	5675
Diameter <i>pontoon</i>	m	87.5
Tinggi <i>pontoon</i>	m	2.5 / 5.0
Elevasi <i>main deck</i>	m	32
Elevasi <i>process deck</i>	m	38
Elevasi <i>start flare</i>	m	24
Radius girasi <i>roll</i>	m	22.3
Radius girasi <i>pitch</i>	m	22.3
Radius girasi <i>yaw</i>	m	32
Sarat	m	20.72
<i>Displacement</i>	ton	87900
<i>Free board ke main deck</i>	m	11.3
<i>Free board ke process deck</i>	m	16.3
VCG	m	18.23
GM	m	5.14

(sumber : Sevan Marine, 2011)



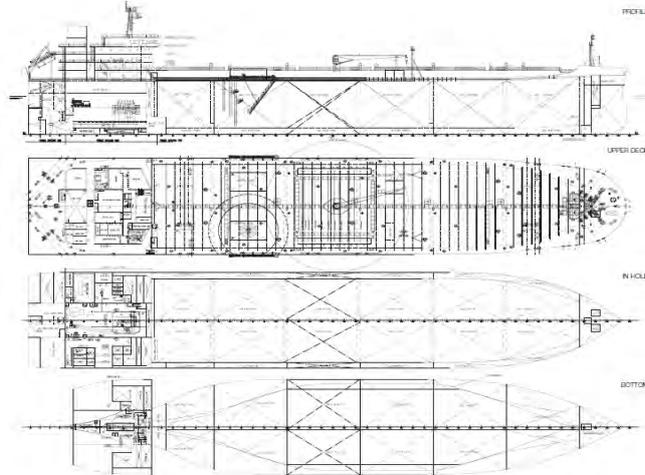
Gambar 3.2 Model Sevan S400 dalam tiga dimensi (Sevan Marine, 2011)



Gambar 3.3 *Principal Dimension* Sevan S400 (Sevan Marine, 2011)

### 3.2.2 Data Shuttle Tanker 35000 DWT

Berikut data struktur *Shuttle Tanker* yang akan digunakan sebagai objek dalam penelitian ini.



Gambar 3.4 *General Arrangement Shuttle Tanker* (Tanker Shipping, 2014)

Tabel 3.2 *Principal dimension Shuttle Tanker*

Parameter	Satuan	Dimensi
LOA	m	181
LPP	m	171
B	m	28
D	m	15.4
T	m	11.7

### 3.2.3 Data mooring line properties pada Sevan S400

Berikut data *mooring line* pada Sevan S400 yang akan digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 3.3 *Mooring line properties Sevan S400*

Segmen	Diameter (mm)	Minimum Breaking Load (kN)	Modulus Elastisitas (kN/m <sup>2</sup> )	Berat di Udara (kN/m)
<i>Lower Chain</i>	178	21027	6.218	0.46 x 10 <sup>8</sup>
<i>Polyester Rope</i>	290	14336	500	1 x 10 <sup>8</sup>
<i>Upper chain</i>	178	21027	6.218	0.46 x 10 <sup>8</sup>

(sumber : Sevan Marine, 2011)

### 3.2.4 Data tali tambat kapal

Berikut data tali tambat kapal yang akan digunakan dalam penelitian ini.



Tabel 3.4 *Properties* tali tambat kapal

Material	Diameter (mm)	Minimum Breaking Load (kN)	Axial Stiffness (kN/m)	Berat di Udara (kN/m)
<i>Polyester rope</i>	95	1538.462	$0.544 \times 10^5$	0.06

(sumber : Perwitasari, 2010)

### 3.2.5 Data lingkungan

Berikut ini data lingkungan dari lokasi yang akan dipakai sebagai lokasi analisis dalam penelitian ini. Penelitian ini dilakukan dengan memakai data dari Blok Masela (09° 07' 51" S / 130° 28' 00" E). Data lingkungan meliputi data gelombang, data angin, dan data arus.

Tabel 3.5 Data sebaran gelombang Blok Masela

		Hs (m)					Total
		0.1 - 1	1.1 - 2	2.1 - 3	3.1 - 4	4.1 - 5	
Tp (s)	0.1 - 2	0	0	0	0	0	0
	2.1 - 4	0.58	0	0	0	0	0.58
	4.1 - 6	9.51	4.43	0	0	0	13.94
	6.1 - 8	5.12	6.9	4.74	0.03	0	16.79
	8.1 - 10	8.2	3.5	5.6	0.78	0.04	18.12
	10.1 - 12	10.8	20.8	0.15	0.01	0.01	31.77
	12.1 - 14	9.3	2.68	0.02	0	0	12
	14.1 - 16	2.93	2.46	0.04	0	0	5.43
	16.1 - 18	0.42	0.77	0.03	0	0	1.22
18.1 - 20	0.05	0.096	0	0	0	0.146	
Total		46.91	41.636	10.58	0.82	0.05	<b>100.0</b>
Kumulatif		46.9	88.5	99.1	99.9	<b>100.0</b>	

(sumber : FUGRO, 2012)

Tabel 3.6 Data angin dan arus Blok Masela

Parameter	Kecepatan (m/s)
Angin	16.91
Arus	0.5

(sumber : Mahdarreza, 2010)

## 3.3 SKENARIO PENELITIAN

Skenario analisis yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari dua kondisi utama meliputi kondisi *stand alone* SSP dan kondisi *side by side offloading* SSP dengan *Shuttle Tanker*. Analisis dilakukan dari tiga *heading* yang berbeda meliputi 0°, 45°, dan 90°. Lebih lanjut, analisis dilanjutkan dengan menambahkan variasi tinggi gelombang signifikan sesuai dengan data sebaran gelombang yang ada dengan tujuan untuk mencari nilai operabilitas FPSO berlambung silinder Sevan di lokasi Blok Masela.

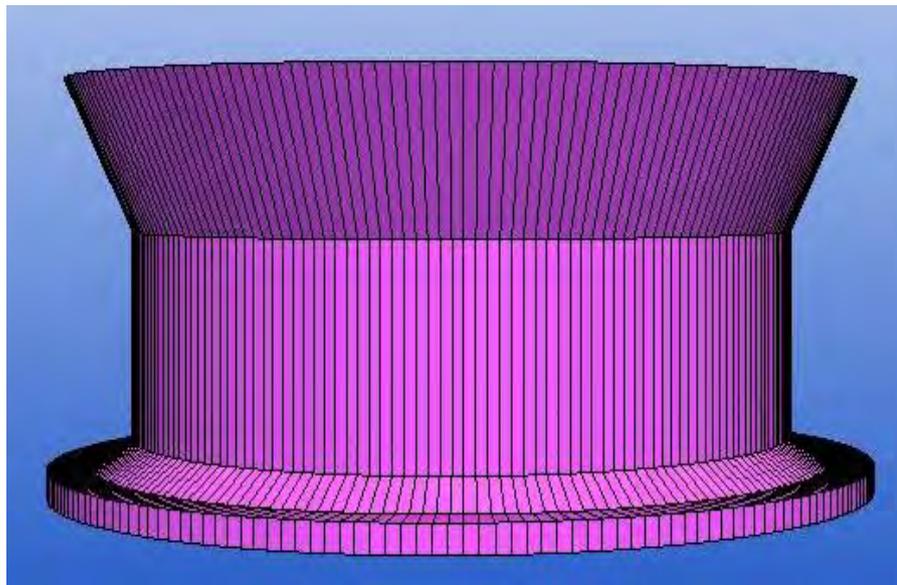
## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 PEMODELAN STRUKTUR DAN VALIDASI

Langkah awal penelitian ini adalah melakukan pemodelan terhadap objek yakni objek SSP dan *Shuttle Tanker*. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* Hydrostar dibantu dengan *software* Maxsurf dalam menentukan koordinat atau *marker* dari objek yang akan diamati serta sebagai acuan validasi dimensi dan aspek-aspek hidrostatik.

#### 4.1.1 Pemodelan dan Validasi Struktur SSP

Berikut ini adalah hasil pemodelan SSP pada *software* Hydrostar.



Gambar 4.1 Model SSP tampak samping sekaligus tampak depan

Validasi pemodelan SSP dilakukan terhadap data asli berdasarkan *ABS Rules for Building and Classing MODU 2012*. Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa model yang sudah dibuat sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Hasil validasi pemodelan SSP dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Aspek yang ditinjau dalam validasi meliputi beberapa aspek hidrostatik struktur yakni *displacement*, *displacement volume*, luas bidang garis air (WPA), jarak antara titik *keel* ke titik *metacenter* baik secara transversal (KMT) maupun longitudinal (KML), jari-jari

*metacenter* transversal (BMT) dan longitudinal (BML), tinggi *metacenter* transversal (GMT) dan longitudinal (GML), serta titik apung objek yang dalam hal ini hanya ditinjau pada sumbu Z (VCB) saja dikarenakan nilai titik apung pada sumbu X (LCB) dan sumbu Y (TCB) bernilai 0.

Tabel 4.1 Validasi pemodelan SSP

Aspek	Batas Kriteria Selisih	Nilai				Persentase Selisih
		Data		Hydrostar		
<i>Displacement</i>	2.00%	87900.00	ton	88259.31	ton	0.41%
<i>Displacement volume</i>	1.00%	85756.09	m <sup>3</sup>	86106.643 9	m <sup>3</sup>	0.41%
WPA	1.00%	3840	m <sup>2</sup>	3843.563	m <sup>2</sup>	0.09%
KMT	1.00%	23.34	m	23.34	m	0.00%
KML	1.00%	23.34	m	23.34	m	0.00%
BMT	1.00%	13.61	m	13.65	m	0.29%
BML	1.00%	13.61	m	13.65	m	0.29%
VCB	1.00%	9.73	m	9.69	m	0.41%
GMT	1.00%	5.14	m	5.11	m	0.58%
GML	1.00%	5.14	m	5.11	m	0.58%

Hasil validasi menunjukkan bahwa model SSP yang dibuat telah valid. Hal ini dibuktikan dengan persentase selisih antara nilai dari hasil pemodelan dan nilai dari data asli tidak melampaui nilai batas kriteria selisih.

#### 4.1.2 Pemodelan dan Validasi Struktur *Shuttle Tanker*

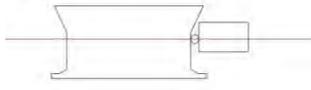
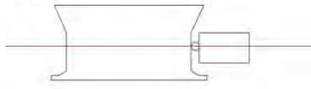
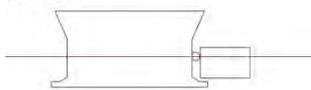
Pemilihan *Shuttle Tanker* yang sesuai dalam penelitian ini diperlukan mengingat bentuk geometris SSP yang cenderung sulit. Penyesuaian bentuk *Shuttle Tanker* berpengaruh kepada kemampuan proses *offloading* dalam moda *side by side* dilakukan. Penyesuaian ukuran *Shuttle Tanker* juga diperlukan dengan mempertimbangkan perubahan-perubahan sarat air pada kedua objek ketika *side by side offloading* terjadi.

Dari hasil perhitungan dan pengilustrasian operasi *side by side offloading*, didapatkan ketentuan bahwa ukuran maksimum *Shuttle Tanker* yang dapat melakukan operasi *side by side offloading* secara optimal adalah *Shuttle Tanker* berkapasitas 35000 DWT.

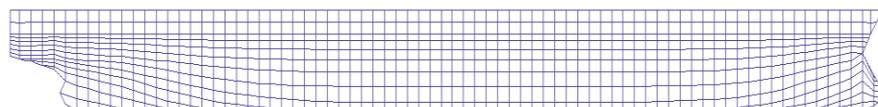
Pada Tabel 4.2, ditunjukkan bahwa pemindahan 90% muatan pada *Shuttle Tanker* sama dengan 25% muatan pada SSP. Perubahan

sarat air yang terjadi pada kedua objek masih berada pada batas aman posisi *side by side offloading*. Artinya, pada kondisi *still water*, baik lambung *Shuttle Tanker* maupun lambung SSP tidak saling bersentuhan bahkan bertubrukan.

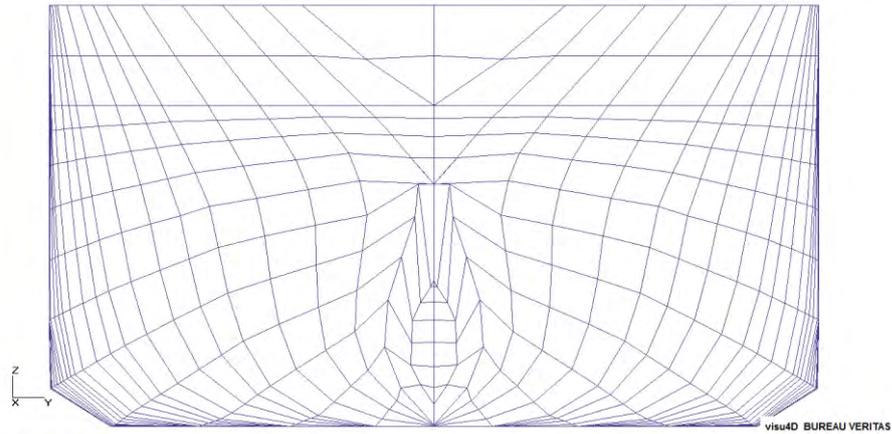
Tabel 4.2 Kondisi *side by side offloading* dengan ukuran *Shuttle Tanker* maksimum 35000 DWT

Kondisi	FPSO Sevan		<i>Shuttle Tanker</i>		Ilustrasi
	Persentase muatan (%)	Sarat air (m)	Persentase muatan (%)	Sarat air (m)	
1	100	20.72	10	6.8	Kondisi 1 
2	83	17.13	60	8.4	Kondisi 2 
3	75	15.19	100	10.7	Kondisi 3 

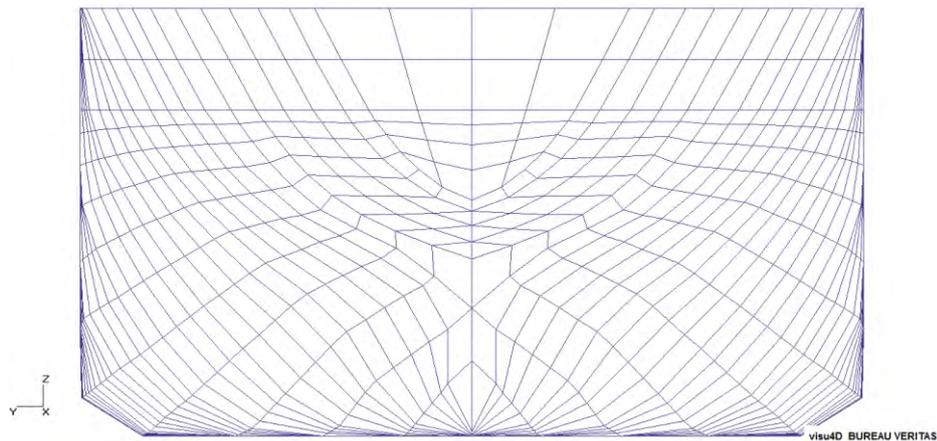
Sama halnya dengan pemodelan SSP, pemodelan *Shuttle Tanker* dilakukan pada *software* Hydrostar. Namun, dalam melakukan pemodelan *Shuttle Tanker*, diperlukan bantuan *software* Maxsurf untuk mempermudah menentukan koordinat-koordinat *Shuttle Tanker*. Berikut ini hasil pemodelan *Shuttle Tanker*.



Gambar 4.2 Model *Shuttle Tanker* tampak longitudinal



Gambar 4.3 Model *Shuttle Tanker* tampak haluan



Gambar 4.4 Model *Shuttle Tanker* tampak buritan

Validasi *Shuttle Tanker* dilakukan terhadap data hidrostatis hasil pemodelan *software* Maxsurf berdasarkan *ABS Rules for Building and Classing* MODU 2012. Hasil validasi *Shuttle Tanker* dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Validasi pemodelan *Shuttle Tanker*

Aspek	Batas Kriteria Selisih	Nilai				Persentase Selisih
		Maxsurf		Hydrostar		
<i>Displacement</i>	2.00%	43349	ton	42949.7	ton	0.92%
<i>Displacement volume</i>	1.00%	224.183	m <sup>3</sup>	225.09	m <sup>3</sup>	0.40%
WPA	1.00%	4424.662	m <sup>2</sup>	4414.042	m <sup>2</sup>	0.24%
KMT	1.00%	11.738	m	11.79	m	0.44%
KML	1.00%	231.463	m	232.37	m	0.39%
BMT	1.00%	6.16	m	6.18	m	0.32%
BML	1.00%	225.885	m	226.76	m	0.39%
VCB	1.00%	81.359	m	81.29	m	0.08%
GMT	1.00%	5.578	m	5.61	m	0.57%
GML	1.00%	4.46	m	4.5	m	0.94%

Hasil validasi menunjukkan bahwa model *Shuttle Tanker* yang dibuat telah valid. Hal ini dibuktikan dengan persentase selisih antara nilai dari hasil pemodelan dan nilai dari data asli tidak melampaui nilai batas kriteria selisih.

## 4.2 KARAKTERISTIK GERAK STRUKTUR SSP PADA KONDISI TERAPUNG BEBAS

Langkah analisis setelah dilakukan pemodelan dan validasi struktur adalah mencari karakteristik struktur. Karakteristik struktur ini merupakan karakteristik yang didapatkan ketika struktur dalam posisi terapung bebas. Karakteristik ini dikenal dengan istilah *Response Amplitude Operator* (RAO) seperti sudah dijelaskan pada bab sebelumnya.

Karakteristik SSP ditinjau dalam tiga kondisi muatan mengacu kepada skenario analisis secara keseluruhan. Tiga kondisi tersebut meliputi SSP 100% muatan, SSP 83% muatan, dan SSP 75% muatan.

### 4.2.1 SSP kondisi 100% muatan

Rangkuman nilai maksimum RAO pada struktur SSP kondisi 100% muatan dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

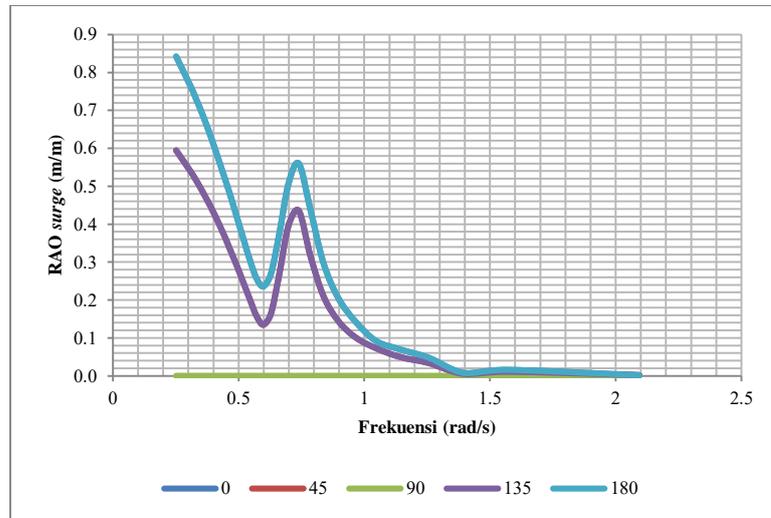
Tabel 4.4 Nilai maksimum RAO SSP kondisi 100% muatan

Moda gerak	Heading				
	0°	45°	90°	135°	180°
<i>Surge</i> (m/m)	0.842	0.595	0.000	0.595	0.842
<i>Sway</i> (m/m)	0.000	0.595	0.842	0.595	0.000
<i>Heave</i> (m/m)	3.851	3.851	3.851	3.851	3.851
<i>Roll</i> (deg/m)	0.000	1.136	1.376	1.136	0.000
<i>Pitch</i> (deg/m)	1.376	1.136	0.000	1.136	1.376
<i>Yaw</i> (deg/m)	0.026	0.024	0.028	0.030	0.026

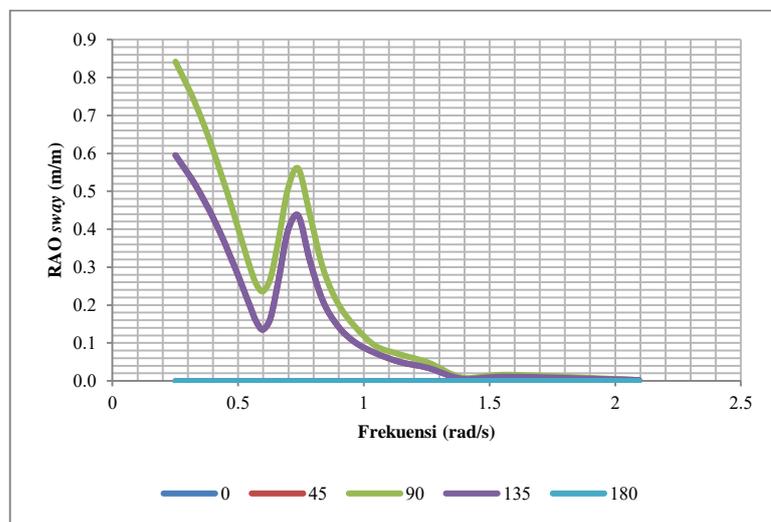
Karakteristik SSP pada muatan 100% dapat dilihat pada gambar 4.5 sampai dengan 4.10.

Karakteristik gerak SSP memiliki kesamaan antara gerak *surge* dengan moda gerak *sway* dan antara moda gerak *roll* dan moda gerak *pitch*. Nilai amplitudo tertinggi dalam moda gerak *surge* dan *sway* sebesar 0.842 m/m pada arah pembebanan 0° dan 180° untuk *surge* dan 90° pada *sway*. Pada arah pembebanan 45° dan 135° amplitudo

keduanya memiliki nilai yang sama yakni sebesar 0.595 m/m. RAO bernilai 0 m/m pada sudut 90° untuk gerak *surge* serta 0° dan 180° untuk gerak *sway*.

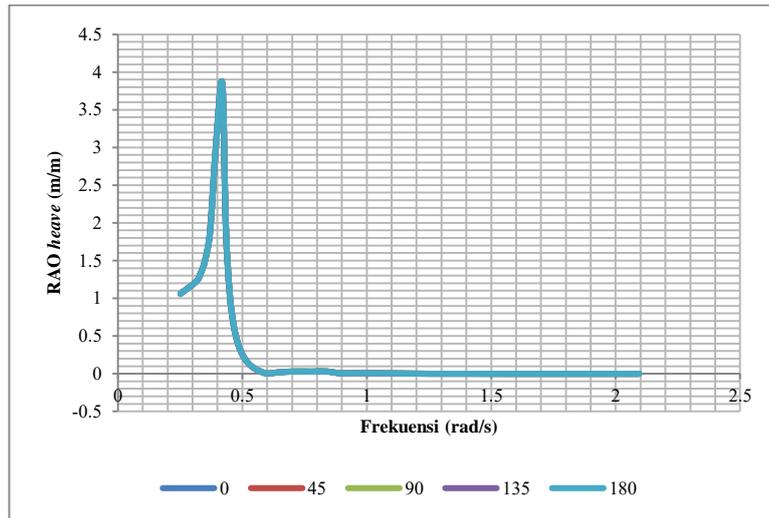


Gambar 4.5 RAO *surge* pada SSP muatan 100%

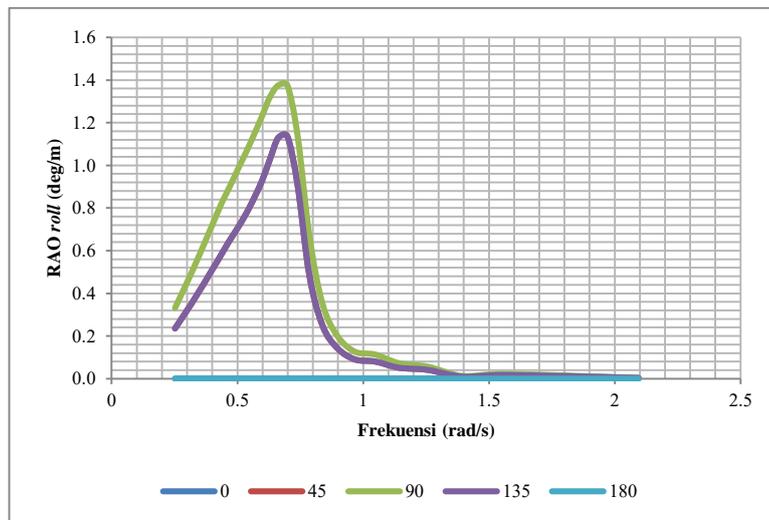


Gambar 4.6 RAO *sway* pada SSP muatan 100%

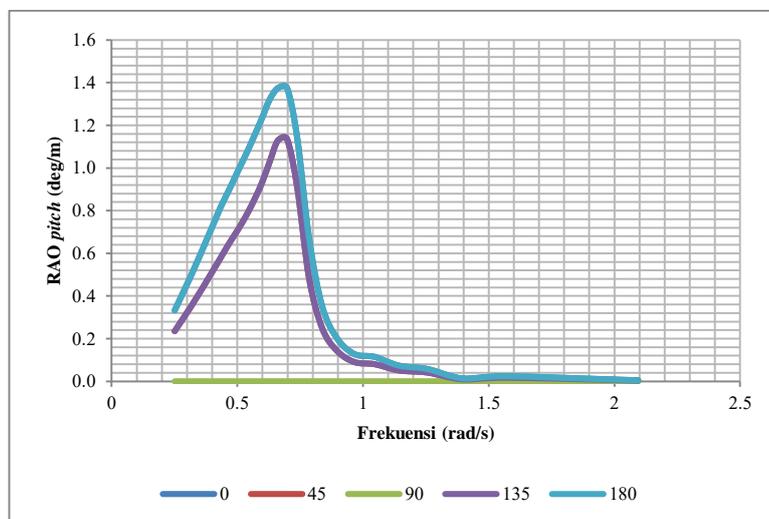
Bentuk dasar benda yang berupa silinder juga menyebabkan nilai RAO pada moda gerak *heave* sama untuk setiap sudut pembebanan. Amplitudo RAO terjadi dengan nilai sebesar 3.851 m/m.



Gambar 4.7 RAO *heave* pada SSP muatan 100%



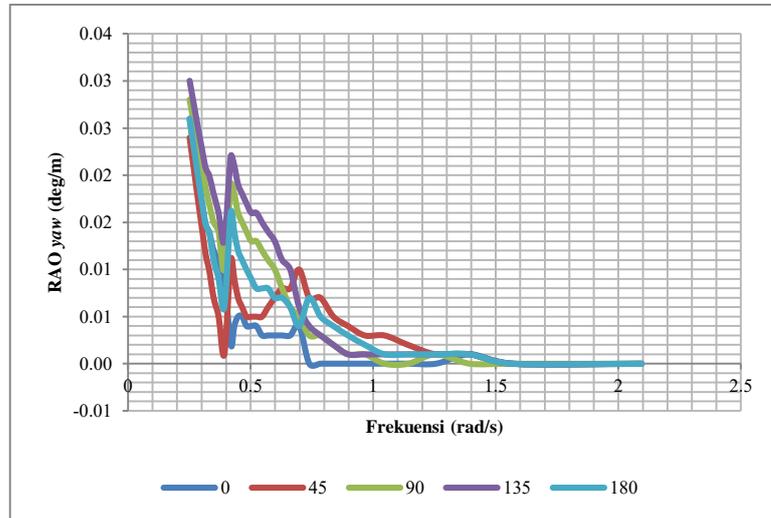
Gambar 4.8 RAO *roll* pada SSP muatan 100%



Gambar 4.9 RAO *pitch* pada SSP muatan 100%



Pada moda gerak *roll* dan *pitch* amplitudo tertinggi yang terjadi bernilai 1.376 deg/m pada sudut 90° untuk moda gerak *roll* serta sudut 0° dan 180° untuk moda gerak *pitch*. Pada sudut 45° dan 135°, keduanya memiliki nilai amplitudo sebesar 1.136 deg/m. RAO memiliki nilai 0 deg/m pada sudut 90° untuk moda gerak *roll* serta sudut 0° dan 180° untuk moda gerak *pitch*.



Gambar 4.10 RAO yaw pada SSP muatan 100%

Nilai RAO pada moda gerak *yaw*, karakteristik gerak memiliki nilai mendekati 0 deg/m pada setiap sudut.

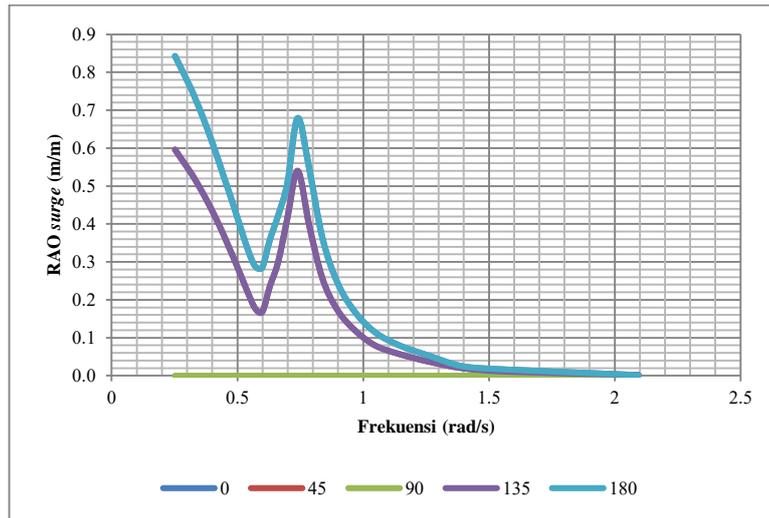
#### 4.2.2 SSP kondisi 83% muatan

Rangkuman nilai maksimum RAO pada struktur SSP kondisi 83% muatan dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

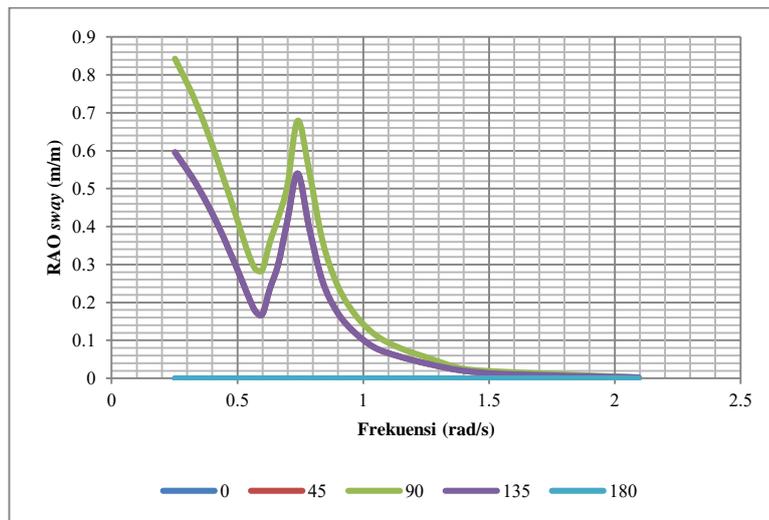
Tabel 4.5 Nilai maksimum RAO SSP kondisi 83% muatan

Moda gerak	Heading				
	0°	45°	90°	135°	180°
<i>Surge</i> (m/m)	0.843	0.596	0.000	0.596	0.843
<i>Sway</i> (m/m)	0.000	0.596	0.843	0.596	0.000
<i>Heave</i> (m/m)	3.769	3.769	3.769	3.769	3.769
<i>Roll</i> (deg/m)	0.000	0.963	1.209	0.963	0.000
<i>Pitch</i> (deg/m)	1.209	0.963	0.000	0.963	1.209
<i>Yaw</i> (deg/m)	0.026	0.024	0.028	0.030	0.026

Karakteristik SSP pada muatan 83% dapat dilihat pada gambar 4.11 sampai dengan 4.16.

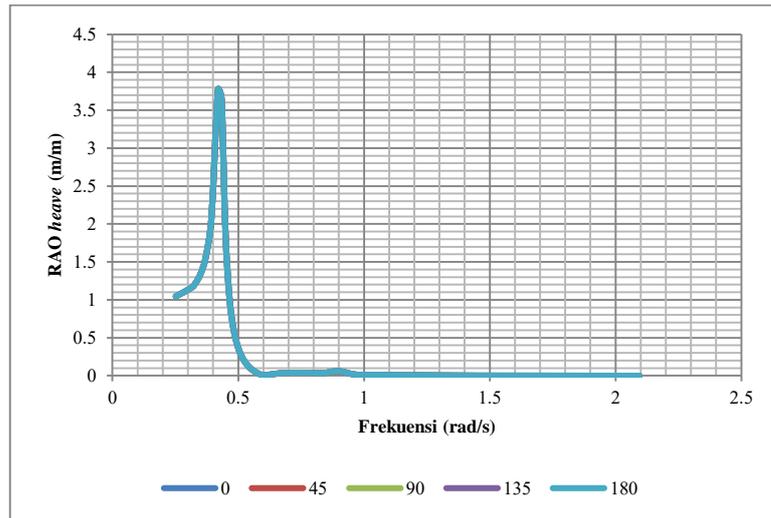


Gambar 4.11 RAO surge pada SSP muatan 83%



Gambar 4.12 RAO sway pada SSP muatan 83%

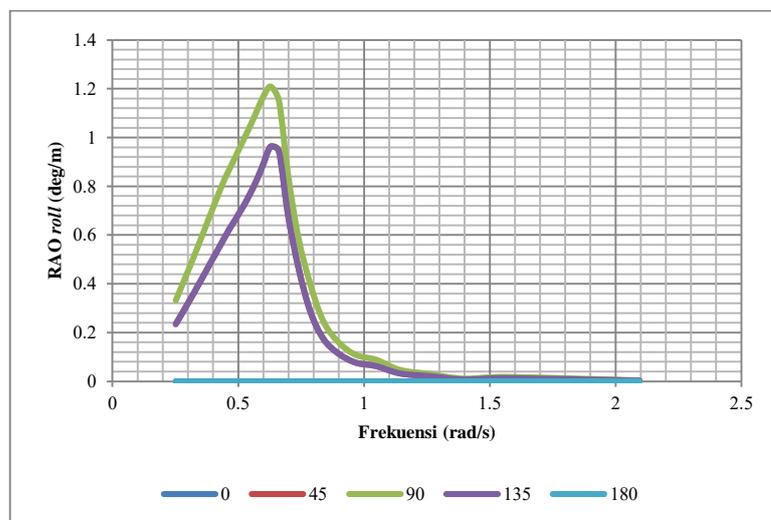
Nilai amplitudo tertinggi pada moda gerak surge dan sway adalah sebesar 0.843 m/m masing-masing pada arah pembebanan 0° dan 180° untuk surge dan 90° pada sway. Nilai ini hanya berbeda sedikit dengan nilai yang terjadi pada saat kondisi SSP berada dalam kondisi 100% muatan. Sebanding dengan selisih nilai tersebut, amplitudo yang terjadi pada arah pembebanan 45° dan 135° bernilai sebesar 0.596 m/m. RAO tetap bernilai 0 m/m pada sudut 90° untuk gerak surge serta 0° dan 180° untuk gerak sway.



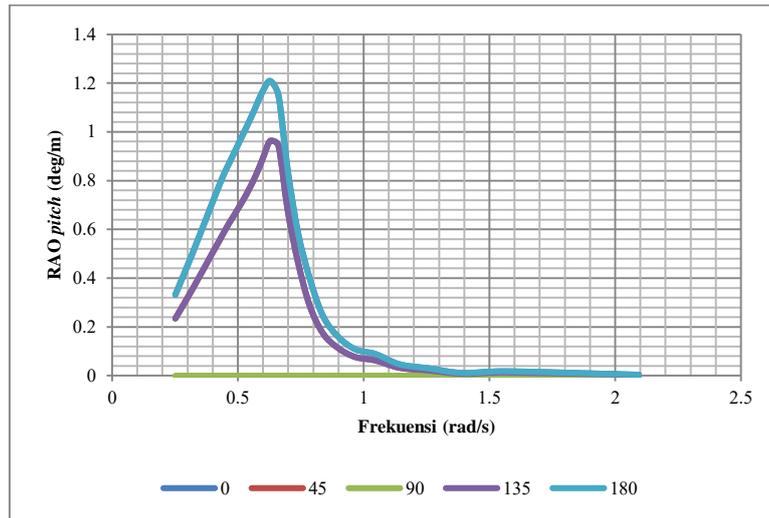
Gambar 4.13 RAO *heave* pada SSP muatan 83%

Amplitudo RAO gerak *heave* terjadi sama rata pada setiap arah pembebanan yakni sebesar 3.77 m/m.

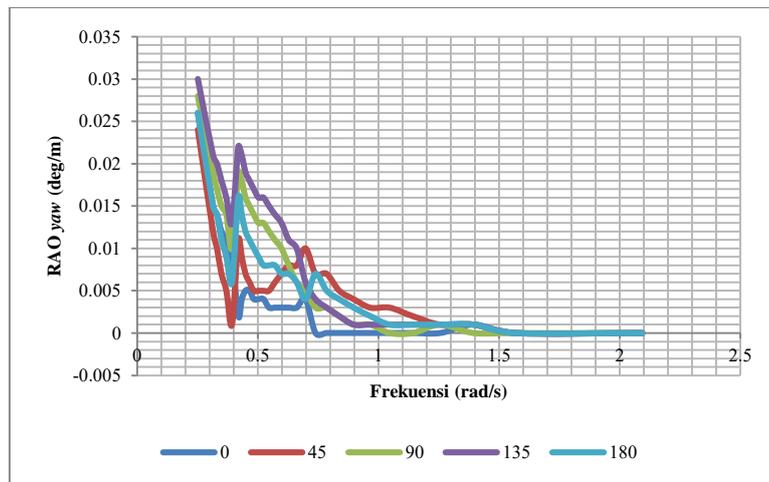
Pada moda gerak *roll* dan *pitch* amplitudo tertinggi yang terjadi bernilai 1.209 deg/m pada sudut 90° untuk moda gerak *roll* serta sudut 0° dan 180° untuk moda gerak *pitch*. Pada sudut 45° dan 135°, keduanya memiliki nilai amplitudo sebesar 0.9625 deg/m. RAO memiliki nilai 0 deg/m pada sudut 90° untuk moda gerak *roll* serta sudut 0° dan 180° untuk moda gerak *pitch*.



Gambar 4.14 RAO *roll* pada SSP muatan 83%



Gambar 4.15 RAO *pitch* pada SSP muatan 83%



Gambar 4.16 RAO *yaw* pada SSP muatan 83%

Nilai RAO pada moda gerak *yaw*, karakteristik gerak memiliki nilai mendekati 0 deg/m pada setiap sudut.

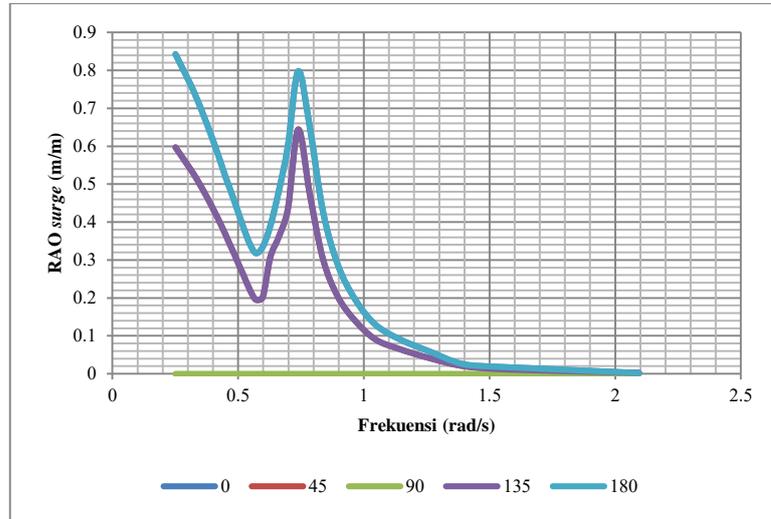
#### 4.2.3 SSP kondisi 75% muatan

Rangkuman nilai maksimum RAO pada struktur SSP kondisi 75% muatan dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut.

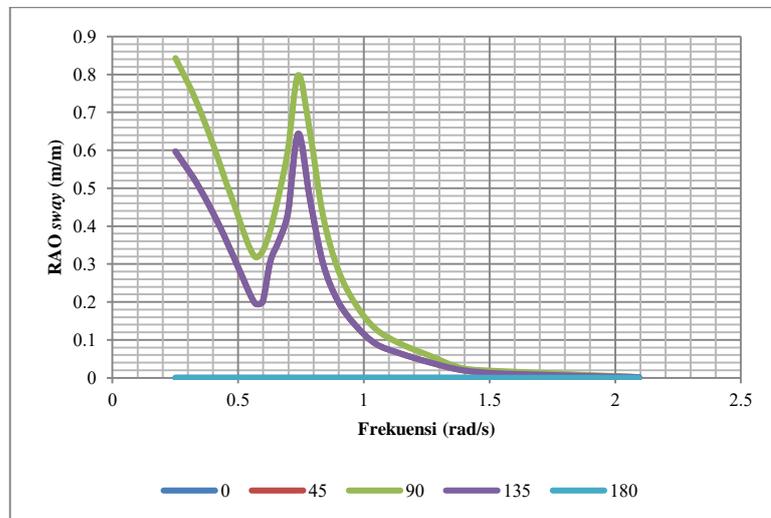
Tabel 4.6 Nilai maksimum RAO SSP kondisi 75% muatan

Moda gerak	Heading				
	0°	45°	90°	135°	180°
<i>Surge</i> (m/m)	0.843	0.644	0.000	0.644	0.843
<i>Sway</i> (m/m)	0.000	0.644	0.843	0.644	0.000
<i>Heave</i> (m/m)	3.820	3.820	3.820	3.820	3.820
<i>Roll</i> (deg/m)	0.000	0.898	1.098	0.898	0.000
<i>Pitch</i> (deg/m)	1.098	0.898	0.000	0.898	1.098
<i>Yaw</i> (deg/m)	0.026	0.024	0.028	0.030	0.026

Karakteristik SSP pada muatan 75% dapat dilihat pada gambar 4.17 sampai dengan 4.22.

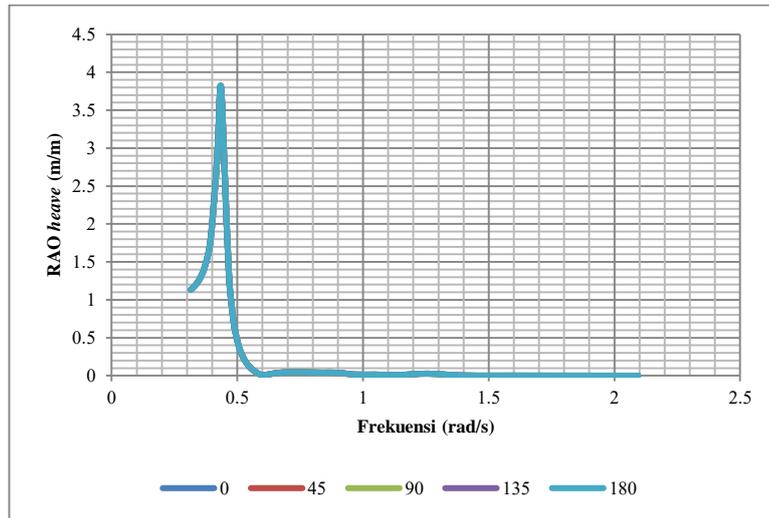


Gambar 4.17 RAO surge pada SSP muatan 75%



Gambar 4.18 RAO sway pada SSP muatan 75%

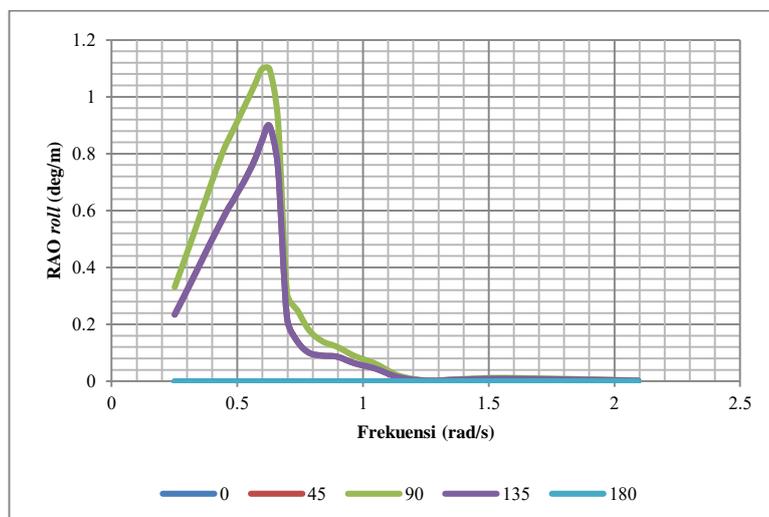
Nilai amplitudo tertinggi pada moda gerak surge dan sway pada kondisi SSP 75% muatan sebesar 0.844 m/m masing-masing pada arah pembebanan 0° dan 180° untuk surge dan 90° pada sway. Amplitudo yang terjadi pada arah pembebanan 45° dan 135° bernilai sebesar 0.597 m/m. RAO tetap bernilai 0 m/m pada sudut 90° untuk gerak surge serta 0° dan 180° untuk gerak sway.



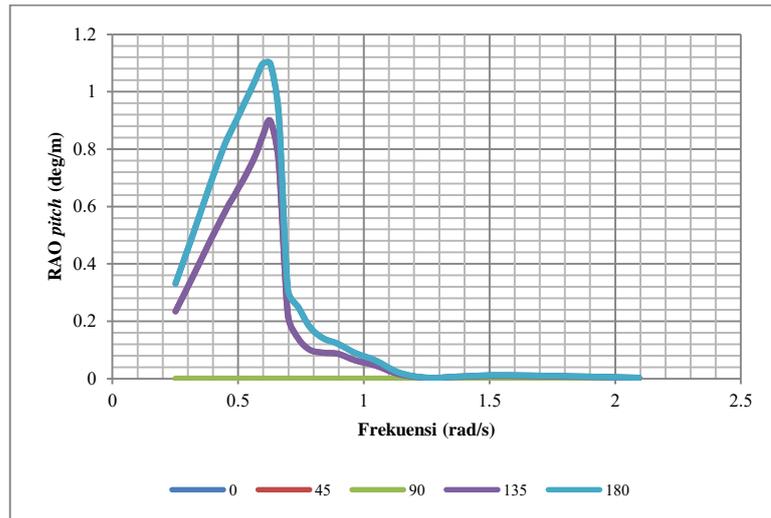
Gambar 4.19 RAO *heave* pada SSP muatan 75%

Amplitudo RAO gerak *heave* terjadi sama rata pada setiap arah pembebanan yakni sebesar 3.82 m/m.

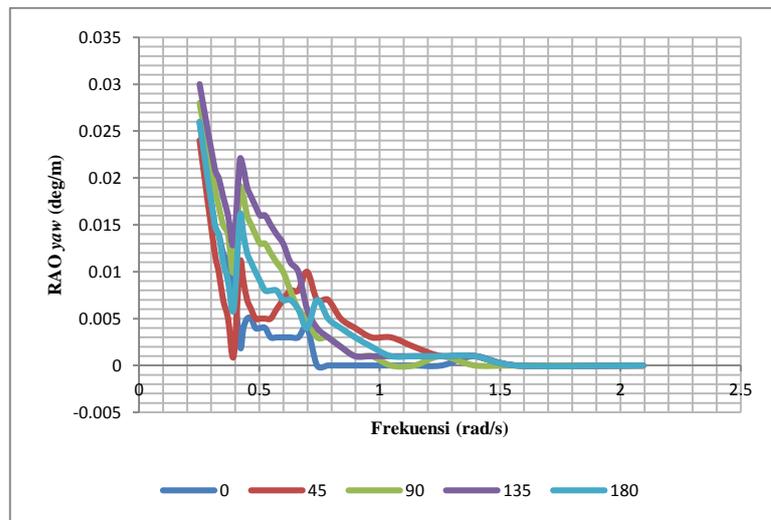
Pada moda gerak *roll* dan *pitch* amplitudo tertinggi yang terjadi bernilai 1.098 deg/m pada sudut 90° untuk moda gerak *roll* serta sudut 0° dan 180° untuk moda gerak *pitch*. Pada sudut 45° dan 135°, keduanya memiliki nilai amplitudo sebesar 0.898 deg/m. RAO memiliki nilai 0 deg/m pada sudut 90° untuk moda gerak *roll* serta sudut 0° dan 180° untuk moda gerak *pitch*.



Gambar 4.20 RAO *roll* pada SSP muatan 75%



Gambar 4.21 RAO *pitch* pada SSP muatan 75%



Gambar 4.22 RAO *yaw* pada SSP muatan 75%

Nilai RAO pada moda gerak *yaw*, karakteristik gerak memiliki nilai mendekati 0 deg/m pada setiap sudut.

#### 4.3 KARAKTERISTIK GERAK STRUKTUR *SHUTTLE TANKER* PADA KONDISI TERAPUNG BEBAS

Karakteristik *Shuttle Tanker* ditinjau dalam tiga kondisi muatan mengacu kepada skenario analisis secara keseluruhan. Tiga kondisi tersebut meliputi *Shuttle Tanker* 90% muatan, *Shuttle Tanker* 60% muatan, dan *Shuttle Tanker* 10% muatan.

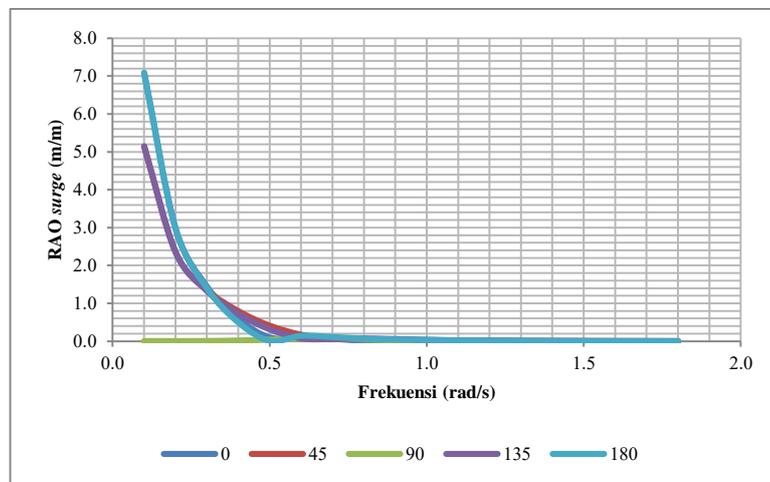
#### 4.3.1 Shuttle Tanker kondisi 90% muatan

Rangkuman nilai maksimum RAO pada struktur *Shuttle Tanker* kondisi 90% muatan dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Nilai maksimum RAO *Shuttle Tanker* kondisi 90% muatan

Moda gerak	Heading				
	0°	45°	90°	135°	180°
<i>Surge</i> (m/m)	7.080	5.141	0.074	5.141	7.080
<i>Sway</i> (m/m)	0.000	5.141	7.456	5.141	0.000
<i>Heave</i> (m/m)	0.956	0.979	1.244	0.979	0.956
<i>Roll</i> (deg/m)	0.000	1.071	11.694	1.177	0.000
<i>Pitch</i> (deg/m)	1.127	1.333	0.490	1.179	1.061
<i>Yaw</i> (deg/m)	0.000	1.363	0.085	1.363	0.000

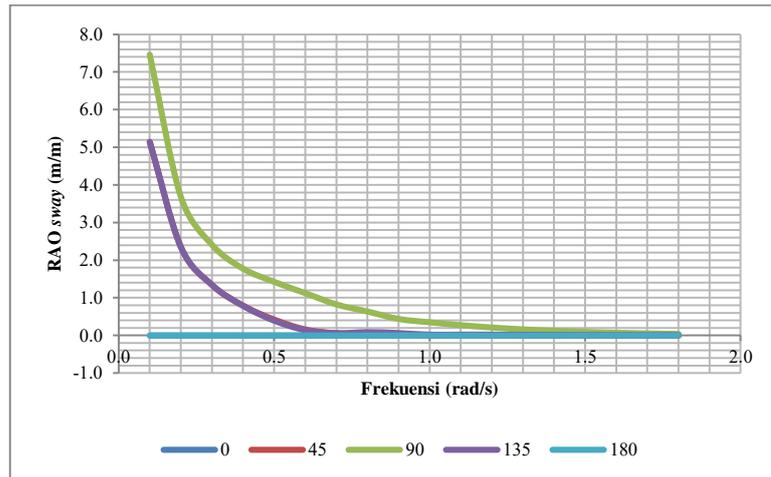
Karakteristik *Shuttle Tanker* pada muatan 90% dapat dilihat pada gambar 4.23 sampai dengan 4.28.



Gambar 4.23 RAO *surge* pada *Shuttle Tanker* muatan 90%

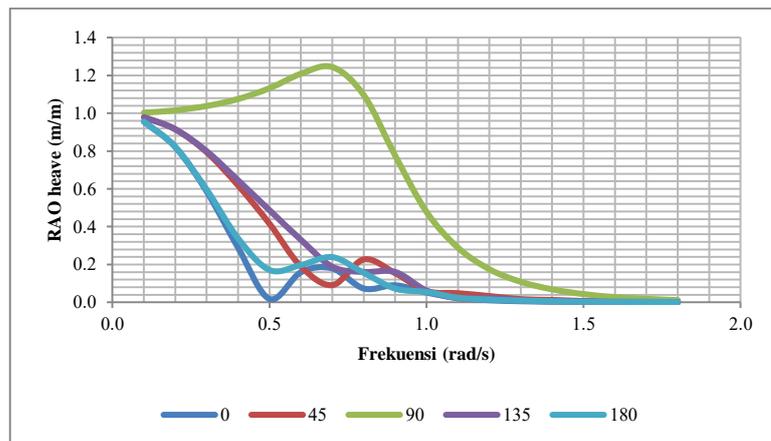
Karakteristik gerak *Shuttle Tanker* amatlah berbeda dengan karakteristik gerak FPSO berlambung silinder Sevan. Dalam kondisi pembebanan 90% muatan, nilai RAO tertinggi dalam moda gerak *surge* terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180° dengan nilai sebesar 7.08 m/m. Dilanjutkan dengan nilai RAO sebesar 5.141 m/m pada arah pembebanan 45° dan 135°. RAO bernilai 0 m/m pada arah pembebanan 90°.





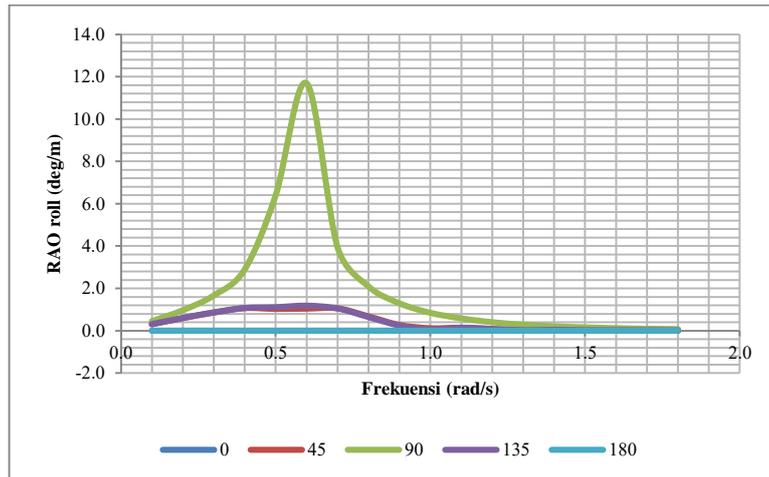
Gambar 4.24 RAO *sway* pada *Shuttle Tanker* muatan 90%

Pada moda gerak *sway*, amplitudo terbesar bernilai 7.456 m/m arah pembebanan 90°. Pada sudut 45° dan 135° amplitudo gerakan terjadi masing-masing sebesar 5.141 m/m. RAO bernilai 0 m/m pada arah pembebanan 0° dan 180°.



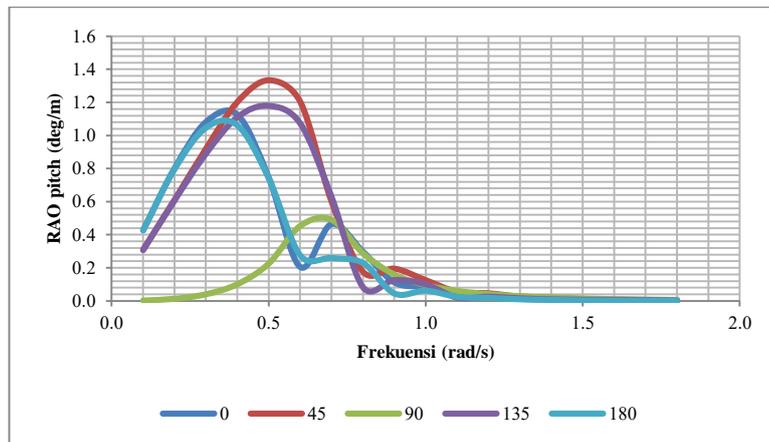
Gambar 4.25 RAO *heave* pada *Shuttle Tanker* muatan 90%

Karakteristik gerak *heave* pada *Shuttle Tanker* kondisi 90% muatan memiliki nilai terbesar pada arah pembebanan 90° dengan nilai 1.244 m/m. Nilai RAO terbesar untuk sudut 45° dan 135° masing-masing bernilai 0.979 m/m. Pada sudut 0° dan 180°, nilai tertinggi RAO masing-masing sebesar 0.956 m/m.



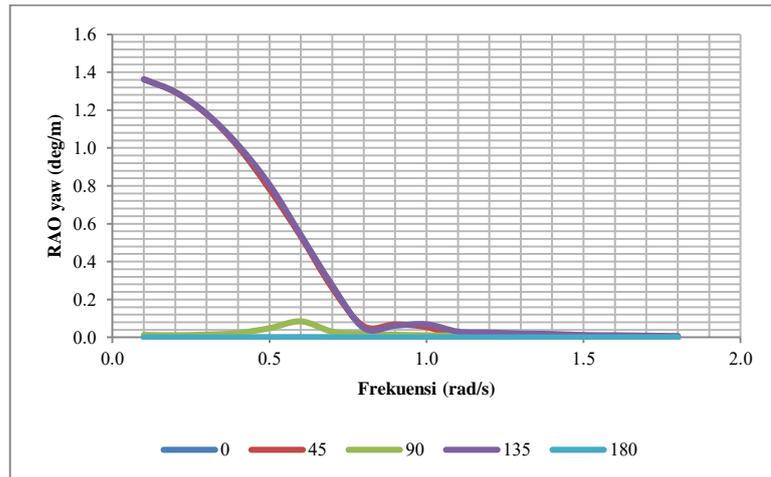
Gambar 4.26 RAO roll pada Shuttle Tanker muatan 90%

Nilai RAO terbesar pada moda gerak roll terletak pada arah pembebanan 90° dengan nilai 11.694 deg/m, dilanjutkan dengan arah pembebanan 45° dan 135° masing-masing bernilai 1.177 deg/m. Nilai RAO sebesar 0 deg/m terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180°.



Gambar 4.27 RAO pitch pada Shuttle Tanker muatan 90%

Pada gerak pitch, nilai RAO tertinggi terjadi sebesar 1.333 deg/m pada arah pembebanan 45° dilanjutkan dengan 1.179 deg/m pada arah pembebanan 135°. Nilai RAO yakni 1.126 deg/m dan 1.061 deg/m terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180°. Sedangkan nilai puncak RAO yang relatif kecil dibandingkan arah pembebanan lain dimiliki oleh arah pembebanan 90° yakni sebesar 0.49 deg/m.



Gambar 4.28 RAO yaw pada *Shuttle Tanker* muatan 90%

Moda gerak *yaw* memiliki nilai RAO tertinggi sebesar 1.363 deg/m pada arah pembebanan 135° dan 45°. Pada arah pembebanan 90° nilai RAO tertinggi terjadi sebesar 0.085 deg/m. Pada arah pembebanan 0° dan 180°, RAO bernilai 0 deg/m.

#### 4.3.2 *Shuttle Tanker* kondisi 60% muatan

Rangkuman nilai maksimum RAO pada struktur *Shuttle Tanker* kondisi 60% muatan dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

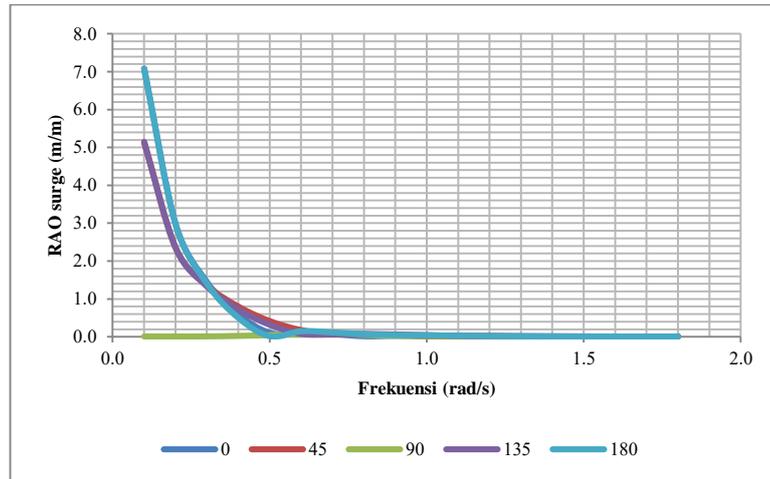
Tabel 4.8 Nilai maksimum RAO *Shuttle Tanker* kondisi 60% muatan

Moda gerak	Heading				
	0°	45°	90°	135°	180°
<i>Surge</i> (m/m)	7.082	5.143	0.076	5.143	7.082
<i>Sway</i> (m/m)	0.000	5.145	7.460	5.145	0.000
<i>Heave</i> (m/m)	0.957	0.980	1.245	0.980	0.957
<i>Roll</i> (deg/m)	0.000	1.072	11.695	1.178	0.000
<i>Pitch</i> (deg/m)	1.126	1.333	0.489	1.178	1.061
<i>Yaw</i> (deg/m)	0.000	1.361	0.083	1.361	0.000

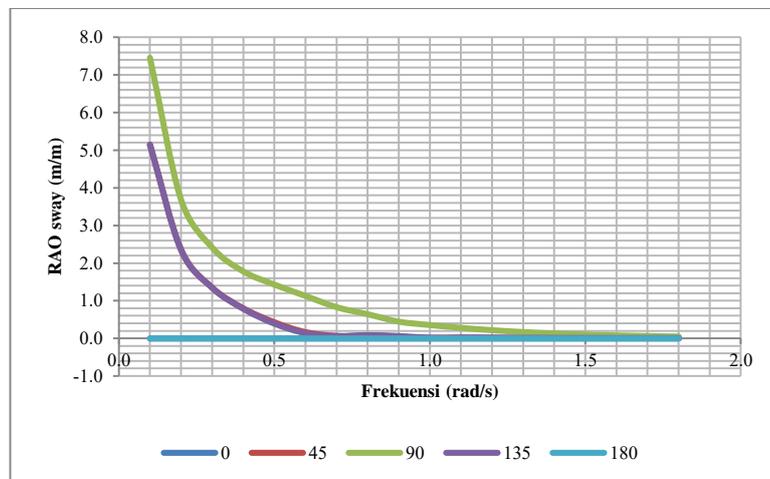
Karakteristik *Shuttle Tanker* pada muatan 60% dapat dilihat pada gambar 4.29 sampai dengan 4.34.

Dalam kondisi pembebanan 60% muatan, nilai RAO tertinggi dalam moda gerak *surge* terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180° dengan nilai sebesar 7.082 m/m. Dilanjutkan dengan nilai RAO

sebesar 5.143 m/m pada arah pembebanan 45° dan 135°. RAO bernilai 0 m/m pada arah pembebanan 90°.



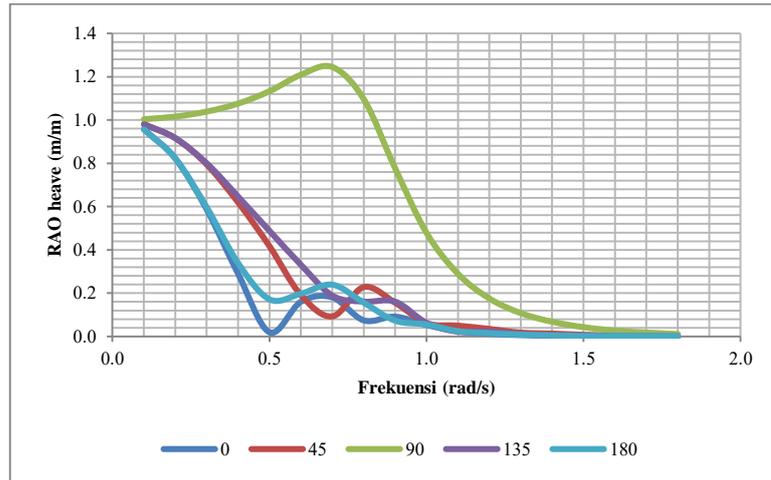
Gambar 4.29 RAO surge pada Shuttle Tanker muatan 60%



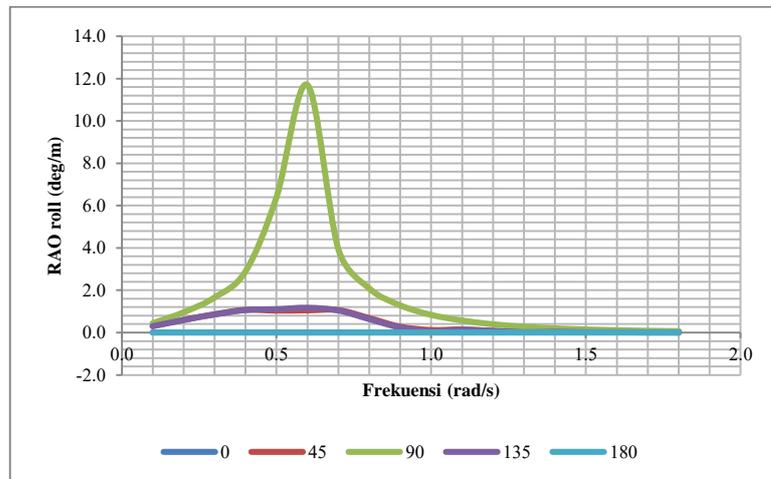
Gambar 4.30 RAO sway pada Shuttle Tanker muatan 60%

Pada moda gerak *sway*, amplitudo terbesar bernilai 7.46 m/m arah pembebanan 90°. Pada sudut 45° dan 135° amplitudo gerakan terjadi masing-masing sebesar 5.145 m/m dan 0.64 m/m. RAO bernilai 0 m/m pada arah pembebanan 0° dan 180°.

Karakteristik gerak *heave* pada Shuttle Tanker kondisi 90% muatan memiliki nilai terbesar pada arah pembebanan 90° dengan nilai 1.245 m/m. Nilai RAO terbesar untuk sudut 45° dan 135° masing-masing bernilai 0.98 m/m. Pada sudut 0° dan 180°, nilai tertinggi RAO sebesar 0.957 m/m.



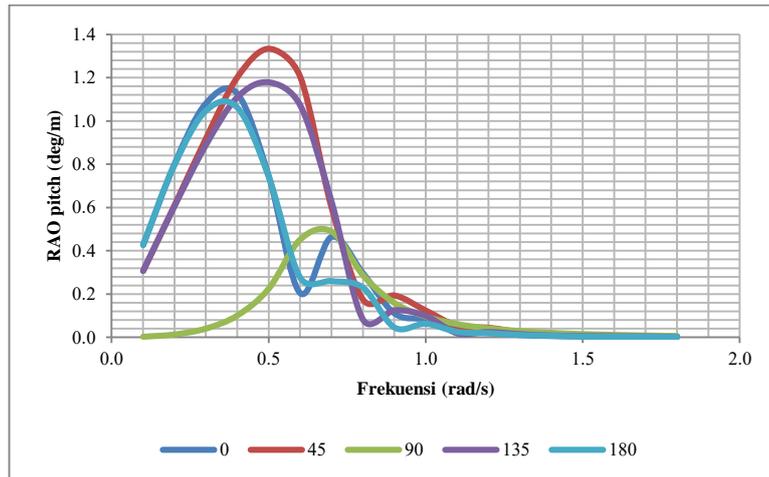
Gambar 4.31 RAO heave pada Shuttle Tanker muatan 60%



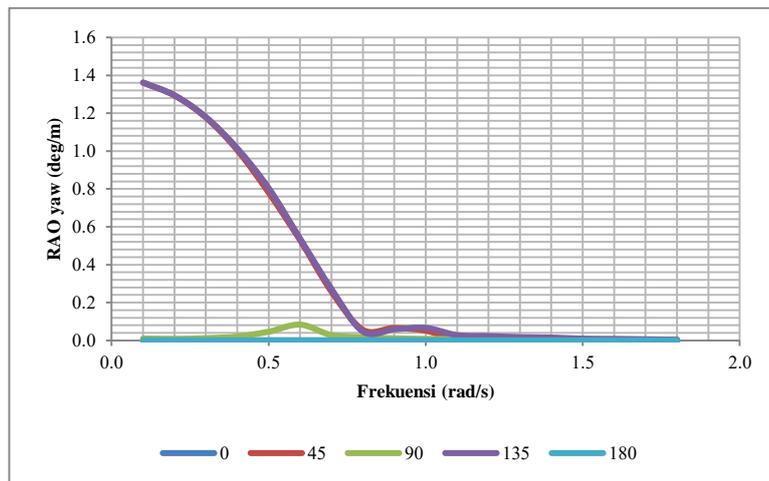
Gambar 4.32 RAO roll pada Shuttle Tanker muatan 60%

Nilai RAO terbesar pada moda gerak *roll* terletak pada arah pembebanan  $90^\circ$  dengan nilai 11.695 deg/m, dilanjutkan dengan arah pembebanan  $45^\circ$  dan  $135^\circ$  masing-masing bernilai 1.072 deg/m dan 1.178 deg/m. Nilai RAO sebesar 0 deg/m terjadi pada arah pembebanan  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ .

Pada gerak *pitch*, nilai RAO tertinggi terjadi sebesar 1.333 deg/m pada arah pembebanan  $45^\circ$  dilanjutkan dengan 1.178 deg/m pada arah pembebanan  $135^\circ$ . Nilai RAO yakni 1.126 deg/m dan 1.061 deg/m terjadi pada arah pembebanan  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ . Sedangkan nilai puncak RAO yang relatif kecil dibandingkan arah pembebanan lain dimiliki oleh arah pembebanan  $90^\circ$  yakni sebesar 0.489 deg/m.



Gambar 4.33 RAO *pitch* pada *Shuttle Tanker* muatan 60%



Gambar 4.34 RAO *yaw* pada *Shuttle Tanker* muatan 60%

Moda gerak *yaw* memiliki nilai RAO tertinggi sebesar 1.361 deg/m pada arah pembebanan 135° dan 45°. Pada arah pembebanan 90° nilai RAO tertinggi terjadi sebesar 0.083 deg/m. Pada arah pembebanan 0° dan 180°, RAO bernilai 0 deg/m.

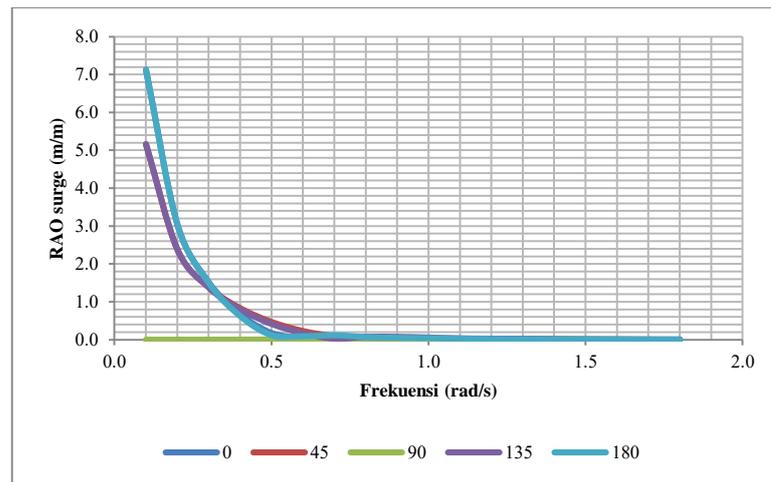
#### 4.3.3 *Shuttle Tanker* kondisi 10% muatan

Rangkuman nilai maksimum RAO pada struktur *Shuttle Tanker* kondisi 10% muatan dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4.9 Nilai maksimum RAO *Shuttle Tanker* kondisi 10% muatan

Moda gerak	Heading				
	0°	45°	90°	135°	180°
<i>Surge</i> (m/m)	7.122	5.158	0.035	5.158	7.122
<i>Sway</i> (m/m)	0.000	5.150	7.461	5.150	0.000
<i>Heave</i> (m/m)	0.958	0.984	1.548	0.984	0.958
<i>Roll</i> (deg/m)	0.000	1.562	10.098	1.634	0.000
<i>Pitch</i> (deg/m)	1.103	1.203	0.254	1.137	1.071
<i>Yaw</i> (deg/m)	0.000	1.268	0.052	1.268	0.000

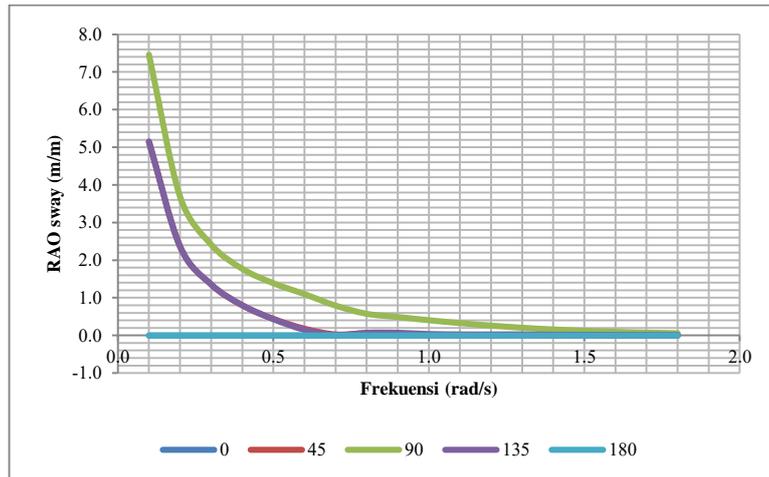
Karakteristik *Shuttle Tanker* pada muatan 10% dapat dilihat pada gambar 4.35 sampai dengan 4.40 berikut



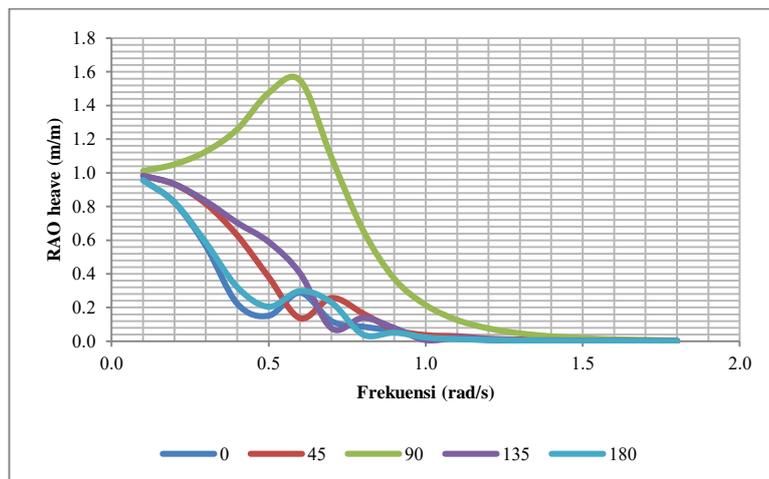
Gambar 4.35 RAO *surge* pada *Shuttle Tanker* muatan 10%

Dalam kondisi pembebanan 10% muatan, nilai RAO tertinggi dalam moda gerak *surge* terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180° dengan nilai sebesar 7.122 m/m. Dilanjutkan dengan nilai RAO sebesar 5.158 m/m pada arah pembebanan 45° dan 135°. RAO bernilai 0.035 m/m pada arah pembebanan 90°.

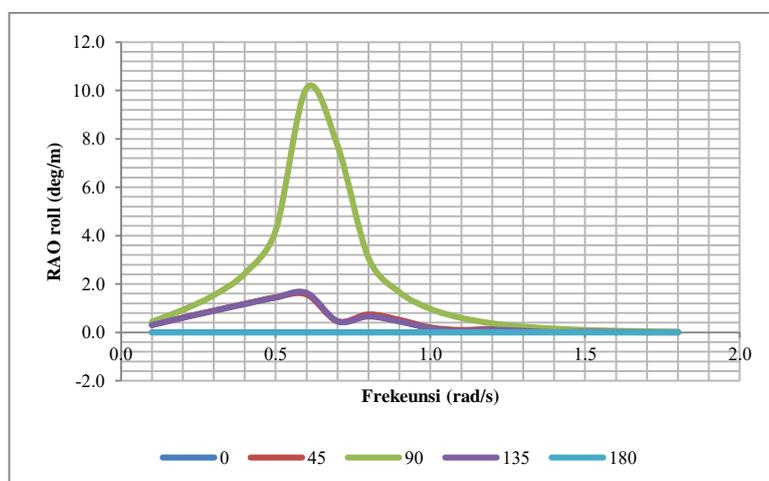
Pada moda gerak *sway*, amplitudo terbesar bernilai 7.461 m/m arah pembebanan 90°. Pada sudut 45° dan 135° amplitudo gerakan terjadi masing-masing sebesar 5.150 m/m. RAO bernilai 0 m/m pada arah pembebanan 0° dan 180°.



Gambar 4.36 RAO *sway* pada *Shuttle Tanker* muatan 10%



Gambar 4.37 RAO *heave* pada *Shuttle Tanker* muatan 10%



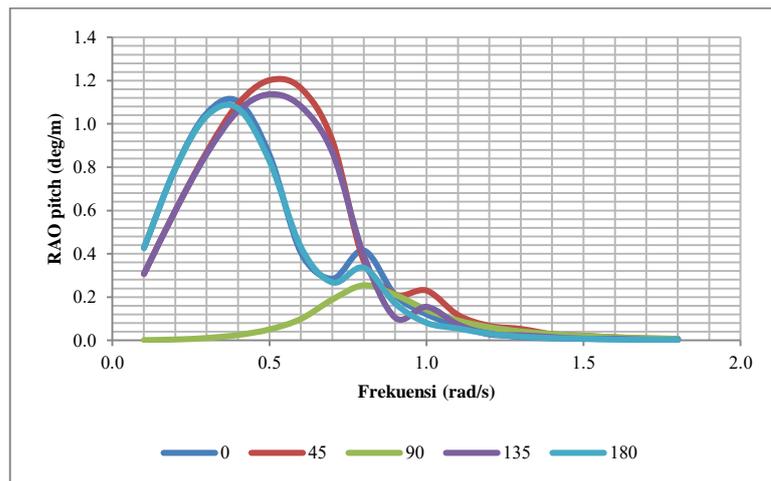
Gambar 4.38 RAO *roll* pada *Shuttle Tanker* muatan 10%

Karakteristik gerak *heave* pada *Shuttle Tanker* kondisi 90% muatan memiliki nilai terbesar pada arah pembebanan 90° dengan



nilai 1.548 m/m. Nilai RAO terbesar untuk sudut 45° dan 135° masing-masing bernilai 0.984 m/m dan 1.01 m/m. Pada sudut 0° dan 180°, nilai tertinggi RAO sebesar 0.958 m/m.

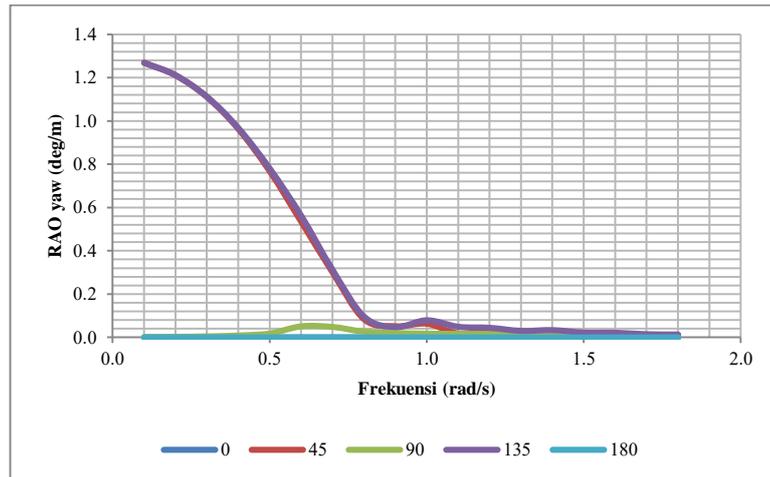
Nilai RAO terbesar pada moda gerak *roll* terletak pada arah pembebanan 90° dengan nilai 10.098 deg/m, dilanjutkan dengan arah pembebanan 45° dan 135° masing-masing bernilai 1.562 deg/m dan 1.634 deg/m. Nilai RAO sebesar 0 deg/m terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180°.



Gambar 4.39 RAO *pitch* pada *Shuttle Tanker* muatan 10%

Pada gerak *pitch*, nilai RAO tertinggi terjadi sebesar 1.203 deg/m pada arah pembebanan 45° dilanjutkan dengan 1.137 deg/m pada arah pembebanan 135°. Nilai RAO yakni 1.103 deg/m dan 1.071 deg/m terjadi pada arah pembebanan 0° dan 180°. Sedangkan nilai puncak RAO yang relatif kecil dibandingkan arah pembebanan lain dimiliki oleh arah pembebanan 90° yakni sebesar 0.254 deg/m.

Moda gerak *yaw* memiliki nilai RAO tertinggi sebesar 1.268 deg/m pada arah pembebanan 135°. Nilai tertinggi pada arah pembebanan 45° sebesar 0.052 deg/m. Pada arah pembebanan 90° nilai RAO tertinggi terjadi sebesar 0.01 deg/m. Pada arah pembebanan 0° dan 180°, RAO bernilai 0 deg/m.



Gambar 4.40 RAO yaw pada *Shuttle Tanker* muatan 10%

#### 4.4 PERHITUNGAN GELOMBANG DALAM KURUN WAKTU TERTENTU

Dalam melakukan analisis untuk mendapatkan hasil simulasi interaksi FPSO berlambung silinder Sevan dengan *Shuttle Tanker*, terlebih dahulu data lingkungan setempat, dalam hal ini Blok Masela, diolah untuk mendapatkan hasil intensitas gelombang signifikan dalam kurun waktu tertentu. Kurun waktu tersebut adalah kurun waktu yang memungkinkan terjadinya gelombang akibat badai yang perlu diperhitungkan dalam perancangan.

Tabel 4.10 Data sebaran gelombang Blok Masela

		Hs (m)					Total
		0.1 - 1	1.1 - 2	2.1 - 3	3.1 - 4	4.1 - 5	
Tp (s)	0.1 - 2	0	0	0	0	0	0
	2.1 - 4	0.58	0	0	0	0	0.58
	4.1 - 6	9.51	4.43	0	0	0	13.94
	6.1 - 8	5.12	6.9	4.74	0.03	0	16.79
	8.1 - 10	8.2	3.5	5.6	0.78	0.04	18.12
	10.1 - 12	10.8	20.8	0.15	0.01	0.01	31.77
	12.1 - 14	9.3	2.68	0.02	0	0	12
	14.1 - 16	2.93	2.46	0.04	0	0	5.43
	16.1 - 18	0.42	0.77	0.03	0	0	1.22
18.1 - 20	0.05	0.096	0	0	0	0.146	
Total		46.91	41.636	10.58	0.82	0.05	100.0
Kumulatif		46.9	88.5	99.1	99.9	100.0	

(sumber : FUGRO, 2012)

Untuk mengantisipasi ketidakpastian dalam pengukuran gelombang, maka dalam perhitungan disarankan jumlah persentase gelombang dari tabel

ditambah 0.5. Antisipasi tersebut dilakukan untuk mengantisipasi persentase kejadian gelombang signifikan di atas 5 m. Analisis ini menggunakan prosedur analisis kurun waktu panjang dalam memprediksi tinggi gelombang signifikan yang dibantu dengan penyelesaian grafis. Perhitungan komponen peluang kumulatif untuk kurun waktu panjang dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Tabulasi perhitungan komponen peluang kumulatif

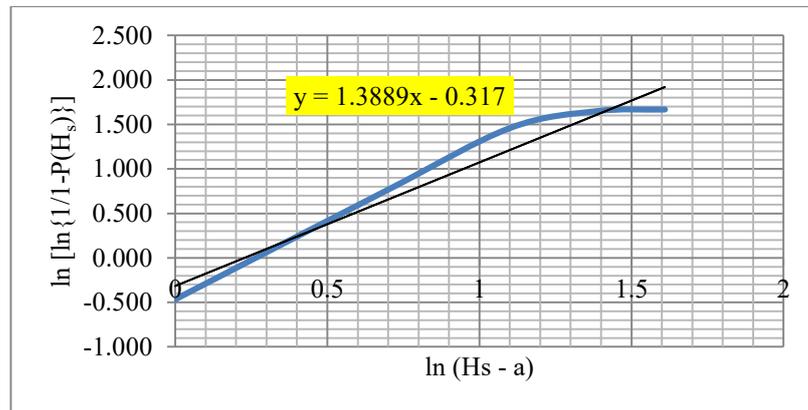
Hs	P(Hs)	ln (Hs - a)	ln [ln {1/1-P(Hs)}]
1	0.467	0	-0.464
2	0.881	0.693147	0.756
3	0.986	1.098612	1.457
4	0.994	1.386294	1.649
5	0.995	1.609438	1.667

Keterangan Tabel 4.5 adalah sebagai berikut

- Nilai Hs pada kolom 1 didapat dari nilai terbesar pada setiap interval Hs.
- Nilai P(Hs) pada kolom 2 didapat dari hasil pembagian kumulatif pada Tabel 3 untuk setiap interval dengan 100.5. Nilai 100.5 didapatkan dari penjumlahan dari 100% dengan 0.5% sebagai akibat dari tidak dicantumkan interval  $H_s > 5$  m.
- Nilai x pada kolom 3 didapat dari persamaan  $x = \ln(Hs - a)$ . Variabel a merupakan acuan batas bawah tinggi gelombang sebesar 0 m.
- Nilai y pada kolom 4 didapat dari persamaan  $y = \ln \left[ \ln \left\{ \frac{1}{1-P(Hs)} \right\} \right]$ .

Hasil perhitungan pada tabel 4.4 tersebut kemudian diplot dalam sebuah diagram dengan nilai pada kolom 3 sebagai absis dan nilai pada kolom 4 sebagai ordinat. Lebih lanjut, dari grafik, seperti yang terlihat pada gambar 4.41, dilakukan analisis regresi untuk mendapatkan persamaan dari *trendline* yang digunakan sebagai panduan untuk menyelesaikan analisis prediksi tinggi gelombang dalam kurun waktu tertentu. Berdasarkan gambar 4.41 dapat diambil simpulan bahwa

persamaan regresi yang diperkirakan sesuai dengan sebaran data gelombang perairan Blok Masela adalah  $y = 1.3899x - 0.317$



Gambar 4.41 Grafik korelasi antara tinggi gelombang dan distribusi kumulatif

Perhitungan prediksi tinggi gelombang signifikan dalam kurun waktu dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Tabulasi perhitungan kurun waktu panjang

Kurun Waktu (tahun)	$P_y(H_s)$	$\ln [\ln \{1/1-P_y(H_s)\}]$	$\ln (H_s - a)$	$H_s$ (m)
1	0.9996575	2.076855563	1.7236	5.6
10	0.9999658	2.330387401	1.9061	6.7
100	0.9999966	2.53246662	2.0516	7.8
1000	0.9999997	2.700494675	2.1726	8.8

Keterangan tabel 4.6 adalah sebagai berikut

- Nilai kurun waktu pada kolom 1 adalah kurun waktu yang akan dianalisis.
- Nilai  $P_y(H_s)$  pada kolom 2 didapat dari persamaan  $1 - \frac{3}{\text{kurun waktu} \times 365 \times 24}$ .  $P_y(H_s)$  di sini merupakan peluang terjadinya badai dalam kurun waktu tertentu. Adapun 3 merupakan durasi badai yakni 3 jam.
- Nilai y pada kolom 3 adalah hasil persamaan  $y = \ln \left[ \ln \left\{ \frac{1}{1-P_y(H_s)} \right\} \right]$ .
- Nilai x pada kolom 4 adalah hasil persamaan regresi dengan y merupakan nilai pada kolom 3.
- Nilai  $H_s$  pada kolom 5 adalah hasil dari persamaan  $H_s = e^x$

Prediksi tinggi gelombang signifikan yang diperoleh dari analisis ini nantinya akan dipaai dalam analisis respon struktur pada gelombang acak. Analisis kondisi operasi didasarkan pada gelombang 1 tahunan sedangkan analisis kondisi *survival* didasarkan pada gelombang 100 tahunan.

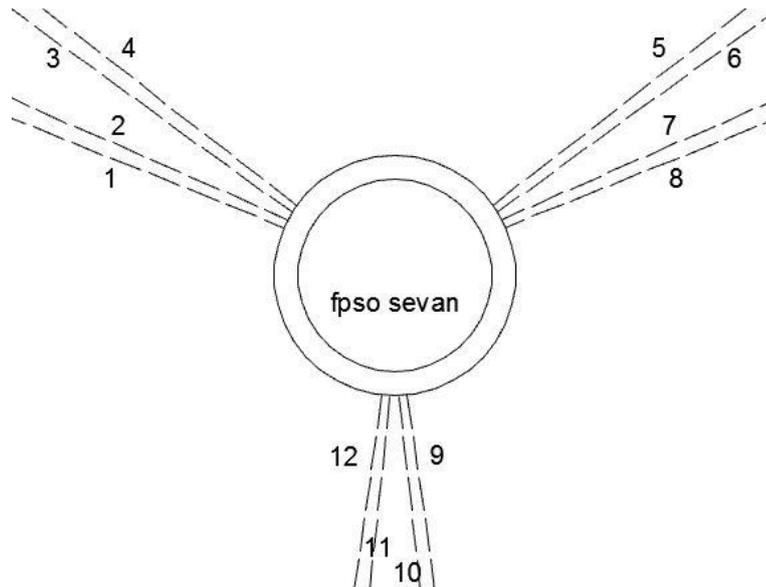
Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa, didapatkan nilai 5.6 m untuk tinggi gelombang signifikan 1 tahunan; 6.7 m untuk tinggi gelombang signifikan 10 tahunan; 7.8 m untuk tinggi gelombang signifikan 100 tahunan, dan 8.8 m untuk tinggi gelombang signifikan 1000 tahunan.

#### **4.5 ANALISIS RESPON GERAK DAN *TENSION* TALI TAMBAT SSP PADA KONDISI TERTAMBAT *STAND ALONE***

##### **4.5.1 Skenario analisis dan konfigurasi SSP dalam kondisi tertambat *stand alone***

Kondisi tertambat *stand alone* dalam bagian ini memiliki pengertian yakni kondisi SSP yang tertambat tunggal dengan menjalankan fungsinya sebagai FPSO tanpa ada objek lain di dekatnya dan tanpa ada aktivitas *offloading* sama sekali. Analisis ini dilakukan pada dua kondisi muatan yakni ketika SSP berada dalam kondisi muatan penuh dan kondisi ketika muatan SSP minimum. Muatan minimum yang dimaksud adalah kapasitas hidrokarbon minyak yang masih tersisa pasca melakukan transfer ke *Shuttle Tanker*. Analisis dilakukan dalam tiga arah pembebanan yakni 0°, 90°, dan 45° dengan variasi nilai tinggi gelombang signifikan sesuai dengan periode ulang hasil perhitungan pada bab sebelumnya untuk melihat perilaku struktur dalam rentang tinggi gelombang 1 tahunan hingga 100 tahunan.

Dalam pengoperasiannya, SSP ditambat pada 12 *mooring* yang terkonfigurasi menyebar (*spread mooring*) dan terbagi menjadi 3 titik dengan masing-masing titik terdiri dari 4 *mooring lines*. Berikut ini adalah gambaran konfigurasi serta skenario lengkap analisis SSP tertambat.



Gambar 4.42 Konfigurasi SSP tertambat

Tabel 4.13 Skenario kasus SSP tertambat

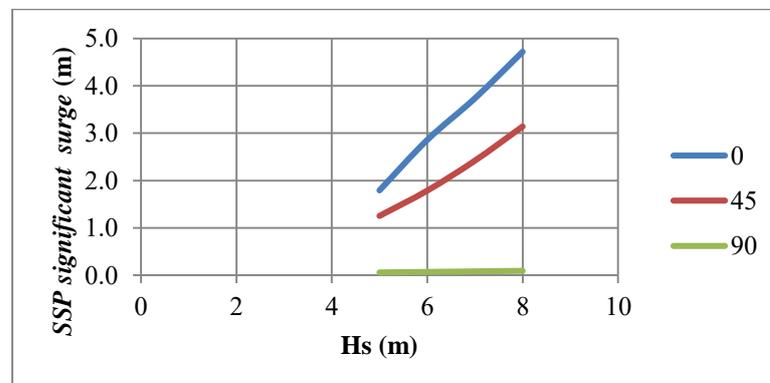
Nomor	Muatan FPSO Sevan	Heading (°)	Hs (m)
1	100%	0	4
2			5
3			6
4			7
5		8	
6		45	4
7			5
8			6
9			7
10		8	
11		90	4
12			5
13	6		
14	7		
15	8		
16	75%	0	4
17			5
18			6
19			7
20		8	
21		45	4
22			5
23			6
24			7
25		8	
26		90	4
27			5
28			6
29			7
30	8		

#### 4.5.2 Analisis respon gerak SSP tertambat kondisi 100% muatan

Berikut ini tabulasi nilai respon gerak signifikan dari struktur SSP untuk tiap-tiap kasus yang dianalisis

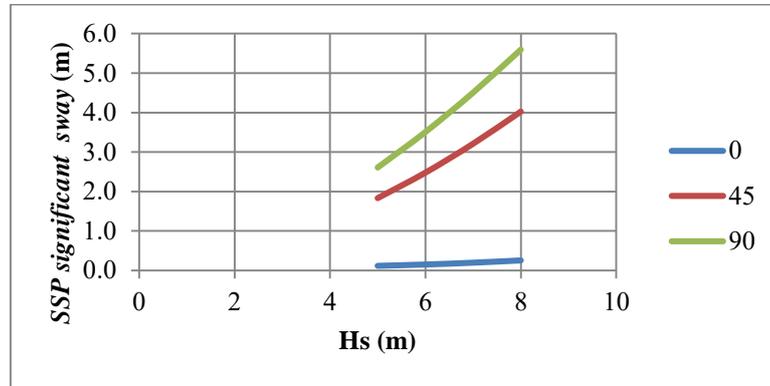
Tabel 4.14 Tabulasi respon gerak signifikan dari SSP kondisi muatan 100%

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		Hs 5 m	Hs 6 m	Hs 7 m	Hs 8 m
0	<i>Surge</i> (m)	1.794	2.856	3.736	4.717
	<i>Sway</i> (m)	0.114	0.150	0.198	0.258
	<i>Heave</i> (m)	0.262	0.316	0.370	0.425
	<i>Roll</i> (deg)	0.065	0.067	0.081	0.095
	<i>Pitch</i> (deg)	1.961	2.364	2.770	3.180
	<i>Yaw</i> (deg)	0.084	0.099	0.116	0.134
45	<i>Surge</i> (m)	1.252	1.786	2.419	3.141
	<i>Sway</i> (m)	1.832	2.479	3.212	4.027
	<i>Heave</i> (m)	0.261	0.314	0.368	0.422
	<i>Roll</i> (deg)	1.433	1.727	2.023	2.322
	<i>Pitch</i> (deg)	1.397	1.550	1.816	2.085
	<i>Yaw</i> (deg)	0.182	0.232	0.261	0.290
90	<i>Surge</i> (m)	0.060	0.070	0.080	0.090
	<i>Sway</i> (m)	2.609	3.509	4.509	5.598
	<i>Heave</i> (m)	0.270	0.318	0.373	0.429
	<i>Roll</i> (deg)	2.340	2.454	2.878	3.307
	<i>Pitch</i> (deg)	0.397	0.553	0.625	0.695
	<i>Yaw</i> (deg)	0.145	0.151	0.182	0.217



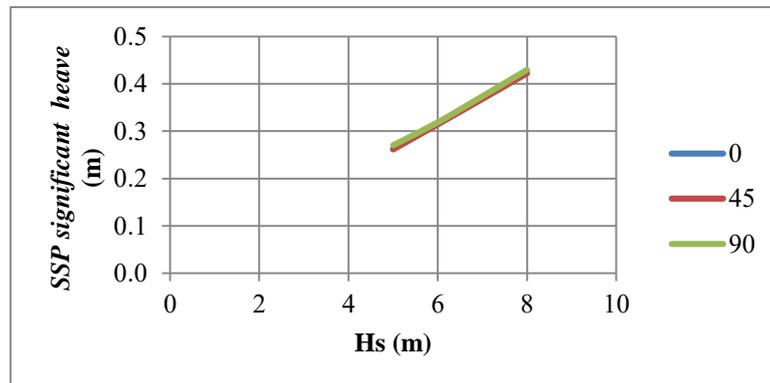
Gambar 4.43 Respon signifikan *surge* pada SSP tertambat 100% muatan

Respon gerak *surge* meningkat seiring dengan bertambahnya tinggi gelombang signifikan. Gambar 4.43 menunjukkan bahwa respon gerak *surge* memiliki nilai terbesar pada arah pembebanan  $0^\circ$  dan nilai terkecil pada arah pembebanan  $90^\circ$ .



Gambar 4.44 Respon signifikan *sway* pada SSP tertambat 100% muatan

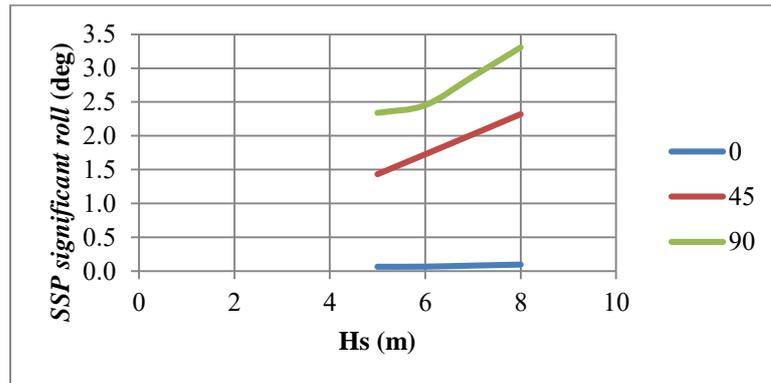
Sama halnya dengan respon gerak *surge*, respon gerak *sway* meningkat seiring dengan bertambahnya tinggi gelombang signifikan. Gambar 4.44 menunjukkan bahwa respon gerak *sway* memiliki nilai terbesar pada arah pembebanan  $90^\circ$  dan nilai terkecil pada arah pembebanan  $0^\circ$ .



Gambar 4.45 Respon signifikan *heave* pada SSP tertambat 100% muatan

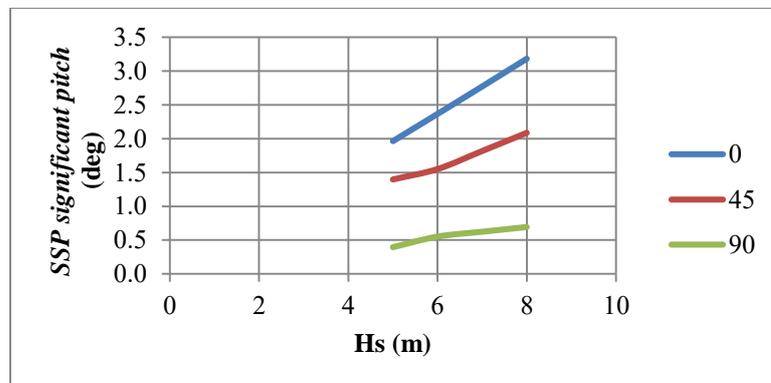
Nilai respon gerak *heave* cenderung sama untuk setiap arah pembebanan. Hal ini dikarenakan bentuk dasar silinder pada SSP sehingga respon gerak translasi sumbu Z ini bernilai sama bila dikenai gaya dari segala arah.





Gambar 4.46 Respon signifikan *roll* pada SSP tertambat 100% muatan

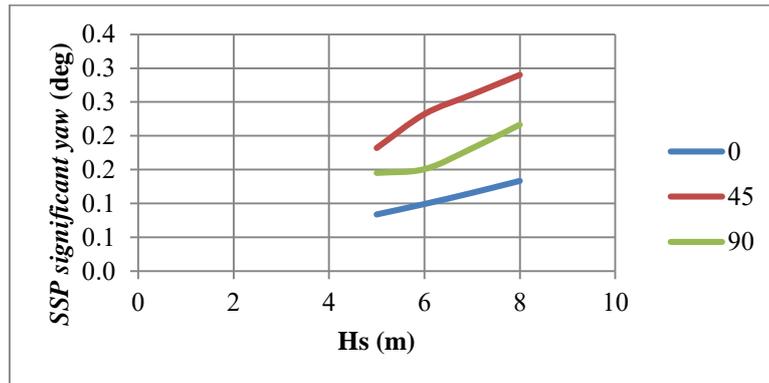
Arah pembebanan 90° terbukti memberi pengaruh terbesar pada SSP dalam melakukan gerak rotasional sumbu X. Gambar 4.46 menunjukkan bahwa nilai respon gerak *roll* terbesar terjadi pada arah pembebanan 90° sedangkan respon gerak *roll* terkecil terjadi pada arah pembebanan 0°.



Gambar 4.47 Respon signifikan *pitch* pada SSP tertambat 100% muatan

Berkebalikan dengan respon gerak *roll*, respon gerak *pitch* terbesar terjadi pada arah pembebanan 0° dan respon gerak *pitch* terkecil terjadi pada arah pembebanan 90°. Nilai yang dihasilkan antara respon gerak *roll* dan *pitch* relatif sama dikarenakan bentuk silinder yang menjadi bentuk dasar SSP.

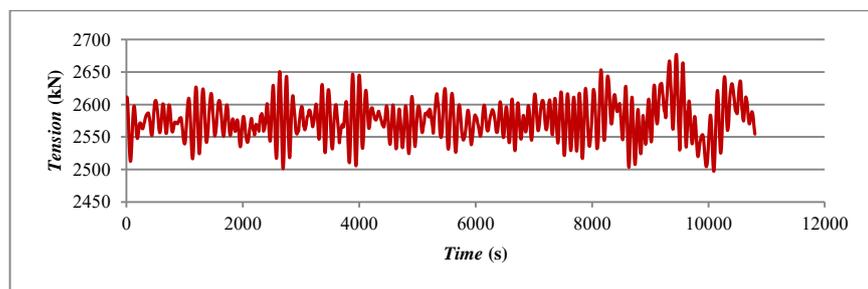
Respon gerak *yaw* memiliki kecenderungan bernilai 0 pada setiap arah pembebanan sesuai dengan karakteristik geraknya. Lagipula, dalam kondisi tertambat, respon gerak *yaw* akan lebih terbatas jika dibandingkan saat SSP berada dalam kondisi terapung bebas.



Gambar 4.48 Respon signifikan yaw pada SSP tertambat 100% muatan

#### 4.5.3 Analisis *tension* sistem tambat pada SSP tertambat kondisi 100% muatan

Dalam melakukan penelitian terhadap objek bangunan apung tertambat, analisis mengenai besarnya nilai gaya tarik yang terjadi pada sistem tambat sangat diperlukan untuk mengetahui kemampuan sistem tambat tersebut bekerja. Besarnya nilai *tension* pada sistem tambat sangat dipengaruhi oleh respon gerak struktur. Terdapat 12 buah tali tambat yang menghubungkan struktur SSP ke dasar laut, berikut tabulasi nilai *tension* signifikan dari setiap tali tambat pada SSP kondisi 100% muatan.



Gambar 4.49 *Time history* gaya tarik *mooring line*

Gaya tarik luaran dari hasil analisis yang terlihat seperti pada Gambar 4.49 diolah untuk didapatkan nilai signifikannya. Rangkuman nilai signifikan untuk setiap *tension mooring line* dapat dilihat pada Tabel 4.15

Tabel 4.15 Tabulasi *tension* signifikan dari SSP kondisi muatan 100%

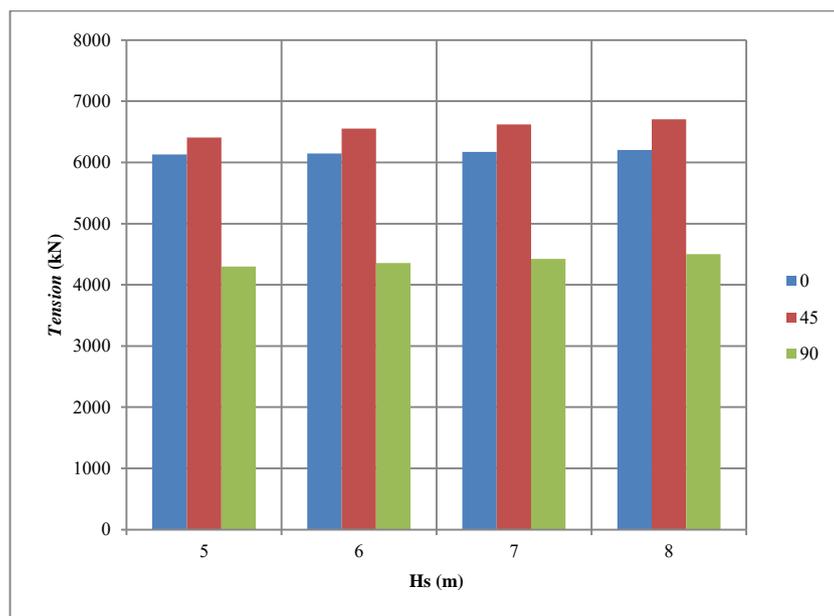
Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 5 m	Hs 6 m	Hs 7 m	Hs 8 m
0	1	4347.296	4395.790	4455.672	4527.812
	2	4831.345	4878.315	4936.641	5007.321
	3	4593.248	4632.891	4681.916	4741.462
	4	4595.286	4633.496	4680.712	4738.030
	5	4224.708	4250.831	4272.659	4290.404
	6	4267.834	4293.436	4315.061	4332.869
	7	4489.305	4513.656	4535.571	4555.301
	8	4016.167	4039.253	4060.677	4080.539
	9	6112.440	6120.954	6137.787	6162.330
	10	2706.002	2713.230	2726.893	2747.061
	11	2717.592	2728.333	2746.879	2773.169
	12	6132.054	6146.461	6170.612	6203.861
45	1	4218.333	4232.924	4250.716	4272.033
	2	4696.928	4709.401	4724.583	4742.886
	3	4432.808	4437.457	4443.029	4449.737
	4	4433.255	4436.490	4440.393	4445.146
	5	4162.199	4185.171	4209.035	4232.432
	6	4205.356	4228.422	4252.169	4275.154
	7	4434.114	4457.211	4480.517	4503.208
	8	3966.688	3987.403	4008.845	4030.336
	9	6364.077	6505.012	6570.063	6654.106
	10	2913.384	3026.102	3084.236	3153.752
	11	2938.942	3053.259	3113.462	3164.637
	12	6408.737	6551.811	6619.245	6705.880
90	1	4053.164	4075.256	4090.868	4109.274
	2	4514.257	4539.901	4558.570	4579.509
	3	4245.880	4267.068	4296.202	4328.189
	4	4243.525	4265.326	4296.175	4329.981
	5	4205.816	4227.671	4248.134	4285.923
	6	4253.704	4274.832	4294.555	4331.279
	7	4525.174	4541.706	4557.037	4583.723
	8	4060.917	4075.644	4089.285	4113.009
	9	4302.946	4358.365	4425.862	4506.058
	10	2871.577	2920.343	2978.559	3047.300
	11	2870.497	2919.271	2977.487	3046.225
	12	4301.141	4356.545	4424.010	4504.179

Nilai pada setiap *line* berbeda satu sama lain tergantung pada arah pembebanan dan besarnya nilai respon gerak struktur. Pada arah pembebanan 0°, nilai *tension* terbesar terdapat pada kelompok *line* 1 sampai 4, dan kelompok *line* 9 sampai 12. Respon gerak *surge* menyebabkan SSP bergerak secara translasi terhadap sumbu X dan rotasi terhadap sumbu Y sehingga beban tarik yang diterima

kelompok *line* 1 sampai 4 dan kelompok *line* 8 sampai 12 lebih besar.

Pada arah pembebanan  $45^\circ$ , sama halnya dengan arah pembebanan  $0^\circ$ , nilai *tension* terbesar dialami oleh kelompok *line* 1 sampai 4 dan kelompok *line* 9 sampai 12. Sedangkan pada arah pembebanan  $90^\circ$ , *tension* terbesar dialami oleh kelompok *line* 1 sampai 4 dan kelompok *line* 5 sampai 8.

Berikut ini tren dari nilai *tension* yang terjadi pada salah satu *line* yang menanggung gaya tarik terbesar yakni *line* 12.



Gambar 4.50 *Tension* pada *line* 12 pada setiap tinggi gelombang signifikan pada SSP tertambat 100% muatan

Nilai *tension* tersebut kemudian dicek dengan menggunakan kriteria *safety factor* untuk mengetahui apakah struktur SSP dapat beroperasi dengan aman pada rentang periode ulang yang dianalisis.

Tabel 4.16 Nilai *safety factor* dari *tension* signifikan pada struktur SSP tertambat dengan kondisi muatan 100%

Heading 0°				
	5	6	7	8
Tension	6132.05	6146.46	6170.61	6203.86
SF	2.34	2.33	2.32	2.31
Heading 45°				
	5	6	7	8
Tension	6408.74	6551.81	6619.25	6705.88
SF	2.24	2.19	2.17	2.14
Heading 90°				
	5	6	7	8
Tension	4525.17	4541.71	4558.57	4583.72
SF	3.17	3.16	3.14	3.13

Pengecekan nilai *safety factor* yang dilakukan mengacu kepada nilai *tension* terbesar yang terjadi pada setiap arah pembebanan dan setiap tinggi gelombang signifikan yang terjadi. Tabel 4.10 menunjukkan semua *tension* yang terjadi dalam rentang periode ulang mulai dari 1 tahunan hingga 100 tahunan masuk dalam batas aman yakni  $> 1.67$  sesuai dengan kriteria yang tercantum pada API RP 2SK. Hal ini berarti struktur SSP dalam kondisi 100% muatan dapat beroperasi dengan aman di wilayah Blok Masela.

#### 4.5.4 Analisis respon gerak SSP tertambat kondisi 75% muatan

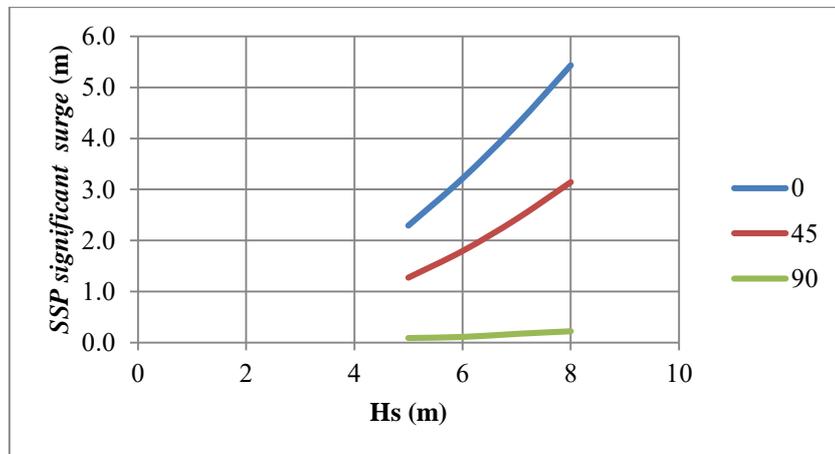
Berikut ini tabulasi nilai respon gerak signifikan dari struktur SSP pada setiap skenario kasus

Tabel 4.17 Tabulasi respon gerak signifikan dari SSP kondisi muatan 75%

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		Hs 5 m	Hs 6 m	Hs 7 m	Hs 8 m
0	<i>Surge</i> (m)	2.292	3.215	4.265	5.434
	<i>Sway</i> (m)	0.132	0.172	0.220	0.276
	<i>Heave</i> (m)	0.544	0.668	0.766	0.868
	<i>Roll</i> (deg)	0.236	0.283	0.335	0.396
	<i>Pitch</i> (deg)	3.939	4.775	5.616	6.460
	<i>Yaw</i> (deg)	0.121	0.139	0.158	0.178

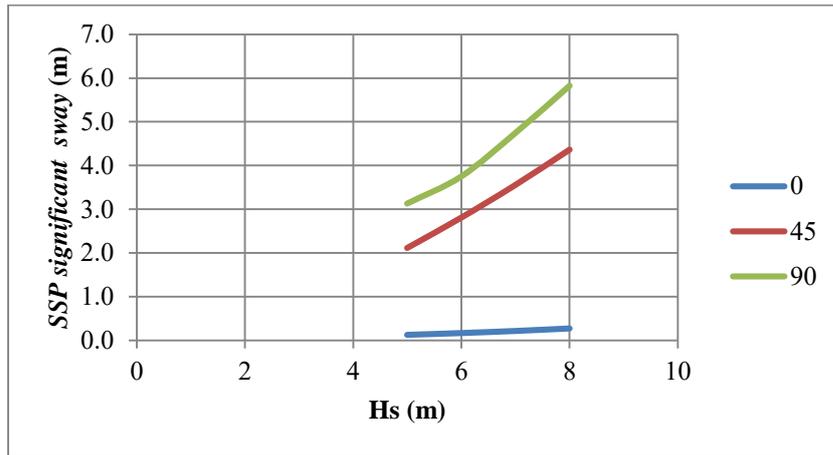
Tabel 4.17 Tabulasi respon gerak signifikan dari SSP kondisi muatan 75% (lanjutan)

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		Hs 5 m	Hs 6 m	Hs 7 m	Hs 8 m
45	<i>Surge</i> (m)	1.275	1.796	2.425	3.146
	<i>Sway</i> (m)	2.114	2.808	3.556	4.364
	<i>Heave</i> (m)	0.574	0.666	0.762	0.861
	<i>Roll</i> (deg)	2.963	3.665	4.387	5.118
	<i>Pitch</i> (deg)	2.557	3.080	3.598	4.112
	<i>Yaw</i> (deg)	0.290	0.345	0.410	0.467
90	<i>Surge</i> (m)	0.090	0.110	0.170	0.220
	<i>Sway</i> (m)	3.131	3.752	4.748	5.827
	<i>Heave</i> (m)	0.590	0.687	0.787	0.891
	<i>Roll</i> (deg)	4.146	5.107	6.082	7.057
	<i>Pitch</i> (deg)	0.793	0.949	1.021	1.091
	<i>Yaw</i> (deg)	0.203	0.258	0.296	0.362



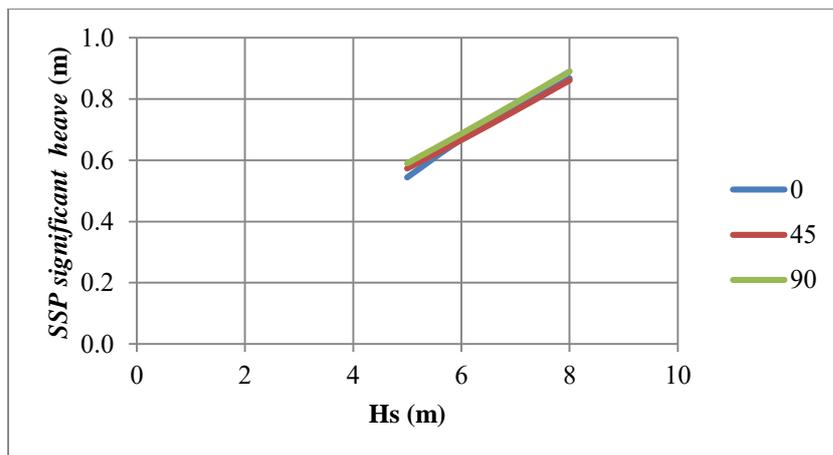
Gambar 4.51 Respon signifikan *surge* pada SSP tertambat 75% muatan

Respon gerak *surge* meningkat seiring dengan bertambahnya tinggi gelombang signifikan. Gambar 4.51 menunjukkan bahwa respon gerak *surge* memiliki nilai terbesar pada arah pembebanan 0° dan nilai terkecil pada arah pembebanan 90°.



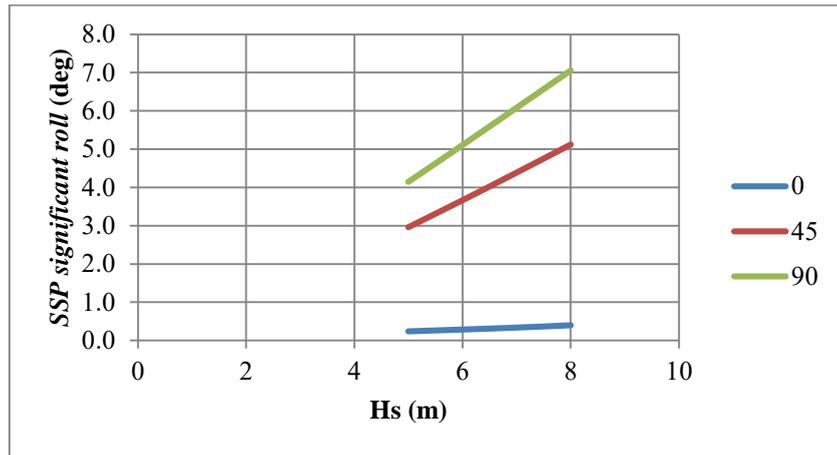
Gambar 4.52 Respon signifikan *sway* pada SSP tertambat 75% muatan

Sama halnya dengan respon gerak *surge*, respon gerak *sway* meningkat seiring dengan bertambahnya tinggi gelombang signifikan. Gambar 4.52 menunjukkan bahwa respon gerak *sway* memiliki nilai terbesar pada arah pembebanan 90° dan nilai terkecil pada arah pembebanan 0°.



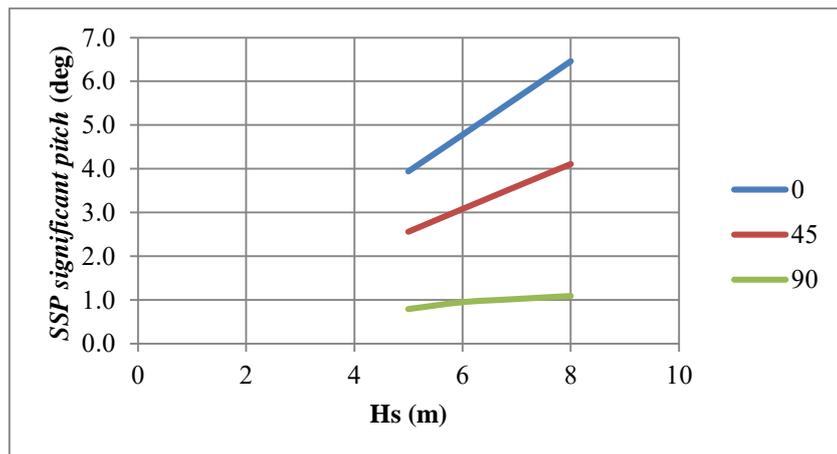
Gambar 4.53 Respon signifikan *heave* pada SSP tertambat 75% muatan

Nilai respon gerak *heave* cenderung sama untuk setiap arah pembebanan. Hal ini dikarenakan bentuk dasar silinder pada SSP sehingga respon gerak translasi sumbu Z ini bernilai sama bila dikenai gaya dari segala arah.



Gambar 4.54 Respon signifikan *roll* pada SSP tertambat 75% muatan

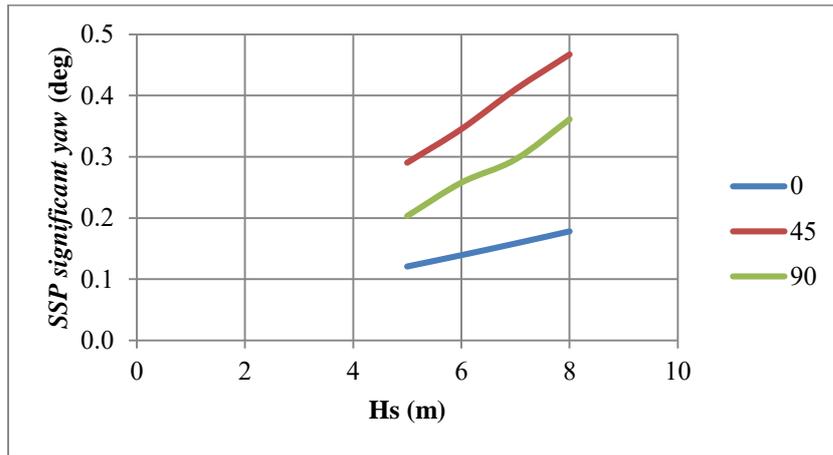
Arah pembebanan 90° terbukti memberi pengaruh terbesar pada SSP dalam melakukan gerak rotasional sumbu X. Gambar 4.54 menunjukkan bahwa nilai respon gerak *roll* terbesar terjadi pada arah pembebanan 90° sedangkan respon gerak *roll* terkecil terjadi pada arah pembebanan 0°.



Gambar 4.55 Respon signifikan *pitch* pada SSP tertambat 75% muatan

Berkebalikan dengan respon gerak *roll*, respon gerak *pitch* terbesar terjadi pada arah pembebanan 0° dan respon gerak *pitch* terkecil terjadi pada arah pembebanan 90°. Nilai yang dihasilkan antara respon gerak *roll* dan *pitch* relatif sama dikarenakan bentuk silinder yang menjadi bentuk dasar SSP.





Gambar 4.56 Respon signifikan yaw pada SSP tertambat 75% muatan

Respon gerak yaw memiliki kecenderungan bernilai 0 pada setiap arah pembebanan sesuai dengan karakteristik geraknya. Lagipula, dalam kondisi tertambat, respon gerak yaw akan lebih terbatas jika dibandingkan saat SSP berada dalam kondisi terapung bebas.

#### 4.5.3 Analisis *tension* sistem tambat pada SSP tertambat kondisi 75% muatan

Berikut tabulasi nilai *tension* signifikan dari setiap tali tambat pada SSP kondisi 75% muatan.

Tabel 4.18 Tabulasi *tension* signifikan dari SSP kondisi muatan 75%

Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 5 m	Hs 6 m	Hs 7 m	Hs 8 m
0	1	4590.987	4637.822	4693.342	4758.073
	2	5074.197	5119.933	5174.051	5237.123
	3	4831.656	4871.659	4918.827	4973.530
	4	4832.158	4870.500	4915.648	4967.999
	5	4407.613	4425.770	4444.098	4462.067
	6	4448.236	4465.874	4484.032	4502.089
	7	4637.788	4657.317	4677.661	4698.176
	8	4163.781	4180.067	4197.680	4215.805
	9	6386.526	6453.480	6553.544	6654.197
	10	2955.782	3009.071	3086.863	3166.004
	11	2979.866	3038.141	3118.710	3200.192
	12	6429.858	6507.414	6611.240	6713.283

Tabel 4.18 Tabulasi *tension* signifikan dari SSP kondisi muatan 75%  
(lanjutan)

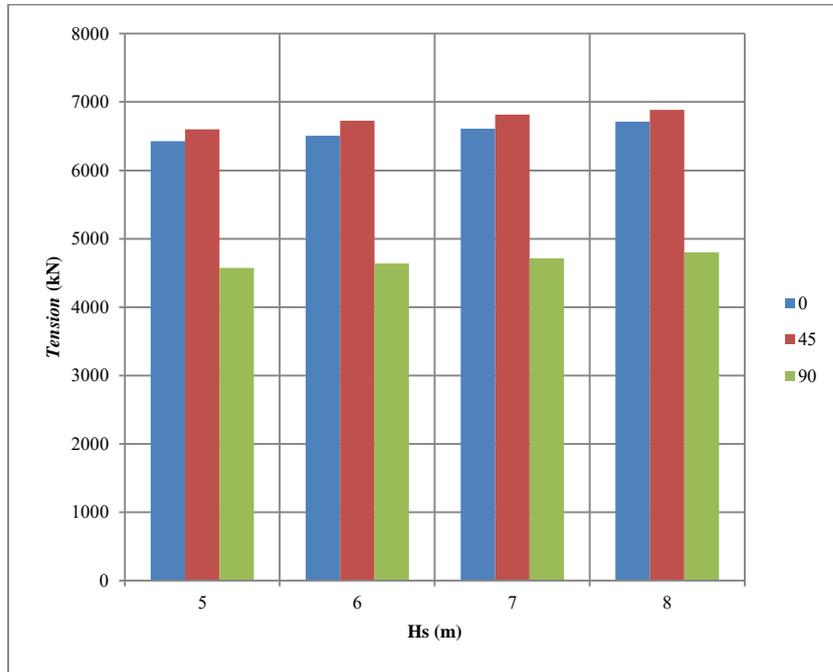
Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 5 m	Hs 6 m	Hs 7 m	Hs 8 m
45	1	4446.436	4463.809	4483.796	4506.730
	2	4921.464	4936.552	4954.199	4974.530
	3	4661.992	4666.681	4672.312	4679.005
	4	4661.241	4664.495	4668.507	4673.400
	5	4270.535	4291.299	4322.655	4423.178
	6	4322.411	4342.400	4372.643	4671.807
	7	4140.351	4154.608	4172.171	4561.859
	8	4503.208	4596.412	4613.501	4635.140
	9	6364.077	6683.217	6767.765	6832.259
	10	3113.350	3184.235	3252.704	3307.400
	11	3209.147	3281.005	3340.265	3599.475
	12	6599.475	6725.910	6815.501	6887.670
90	1	4254.299	4274.992	4297.781	4476.306
	2	4717.644	4742.352	4769.504	4954.167
	3	4424.689	4456.831	4499.011	4692.510
	4	4420.240	4453.828	4498.169	4694.263
	5	4521.340	4537.409	4553.709	4570.048
	6	4567.515	4584.284	4601.210	4618.005
	7	4840.796	4853.090	4864.942	4876.095
	8	4370.843	4381.025	4390.943	4400.578
	9	4573.912	4639.474	4716.370	4805.124
	10	3125.387	3187.666	3260.660	3344.130
	11	3124.274	3186.557	3259.572	3343.054
	12	4571.944	4637.510	4714.410	4803.165

Sama halnya dengan nilai pada setiap SSP kondisi 100% muatan, nilai *line* berbeda satu sama lain tergantung pada arah pembebanan dan besarnya nilai respon gerak struktur. Namun secara umum, nilai *tension* yang terjadi pada kondisi SSP 75% muatan lebih besar jika dibandingkan dengan nilai *tension* pada kondisi SSP 100% muatan. Pada arah pembebanan 0°, nilai *tension* terbesar terdapat pada kelompok *line* 1 sampai 4, dan kelompok *line* 9 sampai 12. Respon gerak *surge* menyebabkan SSP bergerak secara translasi terhadap sumbu X dan rotasi terhadap sumbu Y sehingga beban tarik yang diterima kelompok *line* 1 sampai 4 dan kelompok *line* 8 sampai 12 lebih besar.

Pada arah pembebanan 45°, sama halnya dengan arah pembebanan 0°, nilai *tension* terbesar dialami oleh kelompok *line* 1 sampai 4 dan kelompok *line* 9 sampai 12. Sedangkan pada arah

pembebanan  $90^\circ$ , *tension* terbesar dialami oleh kelompok *line* 1 sampai 4 dan kelompok *line* 5 sampai 8.

Berikut ini tren dari nilai *tension* yang terjadi pada salah satu *line* yang menanggung gaya tarik terbesar yakni *line* 12.



Gambar 4.57 *Tension* pada *line* 12 pada setiap tinggi gelombang signifikan pada SSP tertambat 75% muatan

Nilai *safety factor* pada sistem tambat pada struktur SSP kondisi 75% muatan dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Nilai *safety factor* dari *tension* signifikan pada struktur SSP tertambat dengan kondisi muatan 75%

Heading $0^\circ$				
	5	6	7	8
Tension	6429.86	6429.86	6429.86	6429.86
SF	2.23	2.23	2.23	2.23
Heading $45^\circ$				
	5	6	7	8
Tension	6599.47	6599.47	6599.47	6599.47
SF	2.17	2.17	2.17	2.17
Heading $90^\circ$				
	5	6	7	8
Tension	4840.80	4840.80	4840.80	4840.80
SF	2.96	2.96	2.96	2.96

Pengecekan nilai *safety factor* yang dilakukan mengacu kepada nilai *tension* terbesar yang terjadi pada setiap arah pembebanan dan setiap tinggi gelombang signifikan yang terjadi. Tabel 4.19 menunjukkan semua *tension* yang terjadi dalam rentang periode ulang mulai dari 1 tahunan hingga 100 tahunan masuk dalam batas aman yakni  $> 1.67$  sesuai dengan kriteria yang tercantum pada API RP 2SK. Hal ini berarti struktur SSP dalam kondisi 75% muatan dapat beroperasi dengan aman di wilayah Blok Masela.

#### **4.6 ANALISIS RESPON GERAK DAN *TENSION* TALI TAMBAT SSP DAN *SHUTTLE TANKER* PADA KONDISI *SIDE BY SIDE OFFLOADING***

##### **4.6.1 Skenario analisis dan konfigurasi *side by side offloading***

Skenario lengkap kasus yang dianalisis dalam bagian ini mengacu kepada tiga macam kondisi pemuatan yang terjadi pada saat *side by side offloading* dilakukan baik yang terjadi pada SSP maupun pada *Shuttle Tanker*. Kondisi *side by side offloading* dianalisis dalam tiga arah pembebanan yakni  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , dan  $45^\circ$ . Variasi tinggi gelombang signifikan mengacu kepada data sebaran gelombang dilakukan pula untuk melihat batasan sampai sejauh mana operasi *side by side offloading* dapat dilakukan mengingat bentuk geometri antara SSP dan *Shuttle Tanker* yang tidak lazim atau boleh dikatakan pengoperasiannya belum banyak dilakukan.

Nilai respon gerak kedua struktur didapatkan dari grafik *time history* hasil perhitungan dari pemodelan. Nilai hasil olahan grafik *time history* yang dianalisis meliputi nilai signifikan dan nilai maksimum. Nilai signifikan digunakan untuk melihat tren respon gerak pada setiap kondisi muatan, arah pembebanan, maupun tinggi gelombang signifikan. Sedangkan nilai maksimum digunakan untuk melihat kondisi kritis *side by side offloading* yang terjadi. Kondisi kritis tersebut digunakan untuk menentukan batas aman aktivitas *side by side offloading* dapat dilakukan.

Dalam analisis *side by side offloading*, nilai respon gerak kedua struktur yang ditinjau sebatas pada moda gerak *sway*, *heave*, dan *roll*. Ketiga gerak ini saling berhubungan satu sama lain dan memberi efek paling signifikan dalam interaksi antara SSP dengan *Shuttle Tanker*.

Berikut ini skenario lengkap analisis *side by side offloading*.

Tabel 4.20 Skenario kasus *side by side offloading*

Nomor	Muatan FPSO Sevan	Muatan <i>Shuttle Tanker</i>	Heading (°)	Hs (m)
1	100% muatan	10% muatan	0	2
2				3
3				4
4				5
5			45	2
6				3
7				4
8				5
9			90	2
10				3
11				4
12				5
13	83% muatan	60% muatan	0	2
14				3
15				4
16				5
17			45	2
18				3
19				4
20				5
21			90	2
22				3
23				4
24				5
25	75% muatan	90% muatan	0	2
26				3
27				4
28				5
29			45	2
30				3
31				4
32				5
33			90	2
34				3
35				4
36				5

Dalam konfigurasi *side by side offloading* antara FPSO berlambung silinder Sevan dengan *Shuttle Tanker*, terdapat empat tali tambat kapal dan tiga buah *fender* yang dipasang untuk mendukung operasi *side by side offloading*. Pemilihan *fender*

dilakukan untuk mengetahui apakah *fender* yang digunakan mampu meredam benturan antara dua objek akibat beban lingkungan. Prosedur pemilihan *fender* dilakukan berdasarkan OCIMF *Ship to Ship Transfer – Consideration Applicable to Reverse Lightering*.

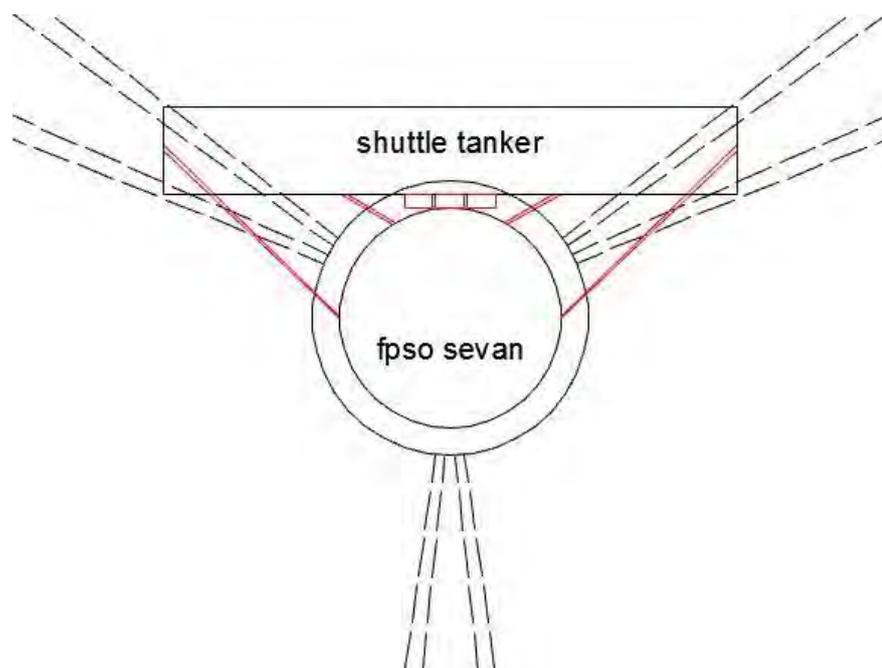
Diperlukan adanya perhitungan *equivalent displacement coefficient* terlebih dahulu dengan persamaan berikut

$$C = \frac{\text{Safety Factor} \times \text{Displacement objek 1} \times \text{Displacement objek 2}}{\text{Displacement objek 1} + \text{Displacement objek 2}} \quad (4.1)$$

Dari hasil perhitungan dengan nominal *safety factor* sebesar 2, didapatkan nilai *equivalent displacement coefficient* sebesar 39576.26 ton, maka, *fender* yang dianjurkan untuk digunakan memiliki kategori ketentuan sebagai berikut

Tabel 4.21 Penentuan dimensi *fender*

<i>Equivalent displacement coefficient (ton)</i>	Kecepatan relatif (m/s)	<i>Berthing energy (ton m)</i>	Ukuran <i>fender</i> (diam x panjang)
50000	0.2	4.8	3.3 m x 6.5 m

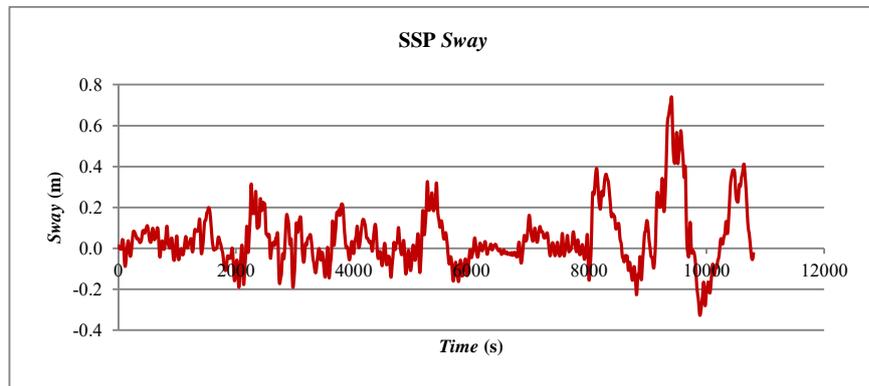


Gambar 4.58 Konfigurasi *side by side offloading* antara SSP dengan *Shuttle Tanker* tampak atas

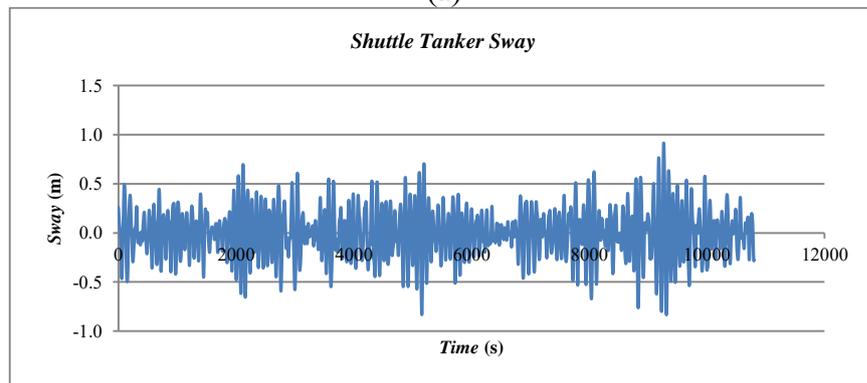
Dalam pengoperasian aktivitas *side by side offloading*, diperlukan pula sistem tambat yang menjadi penghubung antara struktur SSP dengan *Shuttle Tanker*. Terdapat empat buah tali tambat yang berfungsi sebagai penghubung antara struktur SSP dengan *Shuttle Tanker*.

#### 4.6.2 Analisis respon gerak pada skenario *side by side offloading* kondisi 1

Nilai respon gerak pada skenario *side by side offloading* didapatkan dengan mengolah grafik *time history* respon gerak selama tiga jam. Grafik *time history* menampilkan informasi mengenai kondisi dan posisi kedua struktur yang saling berinteraksi pada suatu fungsi waktu.

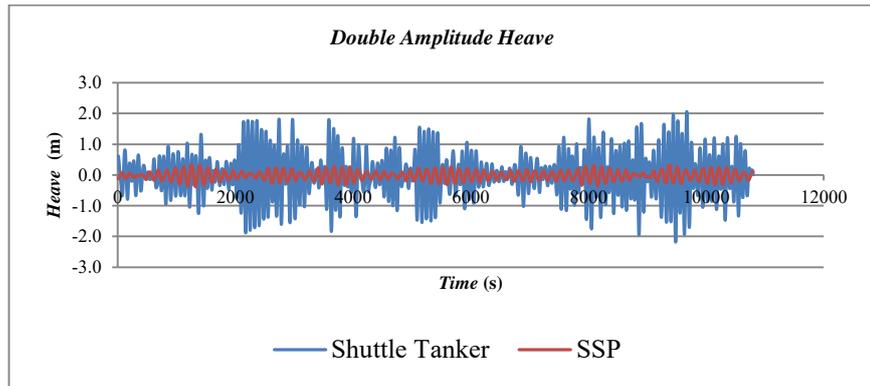


(a)

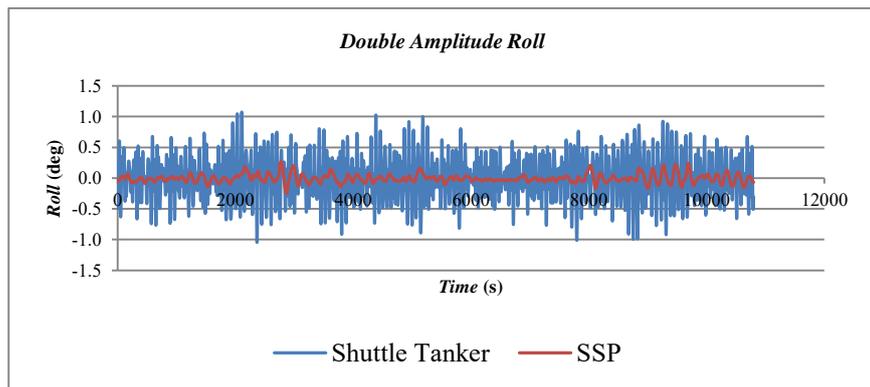


(b)

Gambar 4.59 Grafik *time history* gerak *sway* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) kondisi 1 dengan arah pembebanan  $0^\circ$  dan  $H_s$  2 m



Gambar 4.60 Grafik *time history double amplitude heave* SSP dan *Shuttle Tanker* kondisi 1 dengan arah pembebanan  $0^\circ$  dan  $H_s$  2 m



Gambar 4.61 Grafik *time history double amplitude roll* SSP dan *Shuttle Tanker* kondisi 1 dengan arah pembebanan  $0^\circ$  dan  $H_s$  2 m

Pada beberapa waktu tertentu, baik SSP dan *Shuttle Tanker* berada pada satu fase yakni keduanya bergerak pada arah yang sama. Namun, dikarenakan, bentuk dasar keduanya yang berbeda, di beberapa waktu tertentu juga, gerak SSP dan *Shuttle Tanker* menjadi berbeda fase. Dalam hal ini keduanya bergerak ke arah yang berlawanan. Perbedaan bentuk dasar struktur yang terjadi antara SSP dengan *Shuttle Tanker* menyebabkan periode gerak yang terjadi pada kedua struktur tersebut berbeda. Perbedaan ini dapat dianalisis dengan melihat kondisi respon gerak struktur pada suatu waktu.

Nilai-nilai pada grafik *time history* diolah untuk mengetahui respon gerak signifikan dan respon gerak maksimum. Respon gerak signifikan digunakan untuk melihat tren respon gerak yang terjadi pada setiap skenario *side by side offloading*. Sedangkan nilai



maksimum digunakan untuk melihat kondisi kritis kedua struktur. Kondisi kritis tersebut digunakan untuk mengecek batas aman pengoperasian *side by side offloading*. Berikut ini tabulasi nilai respon gerak struktur pada skenario *side by side offloading* kondisi 1.

Tabel 4.22 Respon gerak signifikan SSP pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
0	<i>Surge</i> (m)	1.210	1.820	2.430	3.050
	<i>Sway</i> (m)	0.116	0.174	0.232	0.290
	<i>Heave</i> (m)	0.109	0.162	0.213	0.264
	<i>Roll</i> (deg)	0.026	0.039	0.052	0.053
	<i>Pitch</i> (deg)	0.559	0.838	1.117	1.286
	<i>Yaw</i> (deg)	0.155	0.307	0.606	0.929
45	<i>Surge</i> (m)	0.913	1.328	1.852	2.366
	<i>Sway</i> (m)	0.421	0.645	0.881	1.077
	<i>Heave</i> (m)	0.150	0.246	0.336	0.427
	<i>Roll</i> (deg)	0.265	0.397	0.529	0.661
	<i>Pitch</i> (deg)	0.345	0.517	0.689	0.861
	<i>Yaw</i> (deg)	0.499	0.748	0.998	1.247
90	<i>Surge</i> (m)	0.300	0.390	0.410	0.510
	<i>Sway</i> (m)	0.579	0.823	1.073	1.440
	<i>Heave</i> (m)	0.101	0.146	0.193	0.241
	<i>Roll</i> (deg)	1.306	1.546	1.860	2.034
	<i>Pitch</i> (deg)	0.050	0.206	0.278	0.348
	<i>Yaw</i> (deg)	0.058	0.087	0.116	0.124

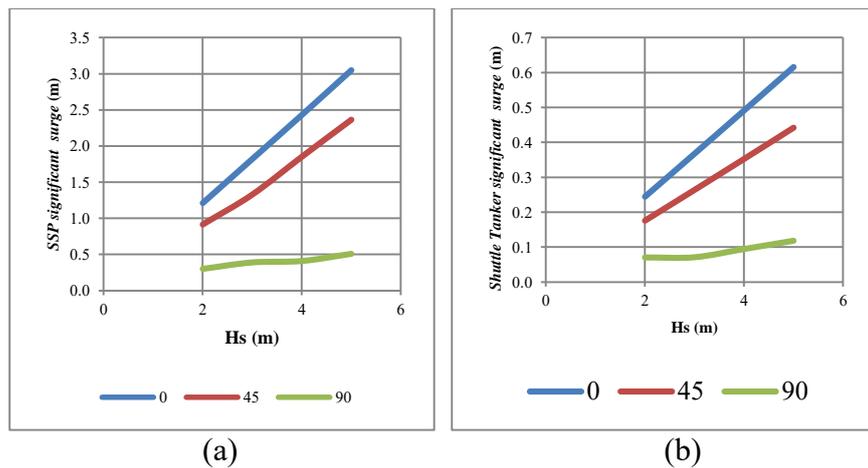
Tabel 4.23 Respon gerak signifikan *Shuttle Tanker* pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
0	<i>Surge</i> (m)	0.245	0.368	0.491	0.615
	<i>Sway</i> (m)	0.332	0.616	0.821	1.027
	<i>Heave</i> (m)	0.948	1.422	1.895	2.369
	<i>Roll</i> (deg)	0.306	0.458	0.611	0.764
	<i>Pitch</i> (deg)	0.615	0.922	1.229	1.536
	<i>Yaw</i> (deg)	0.818	2.315	2.671	2.995

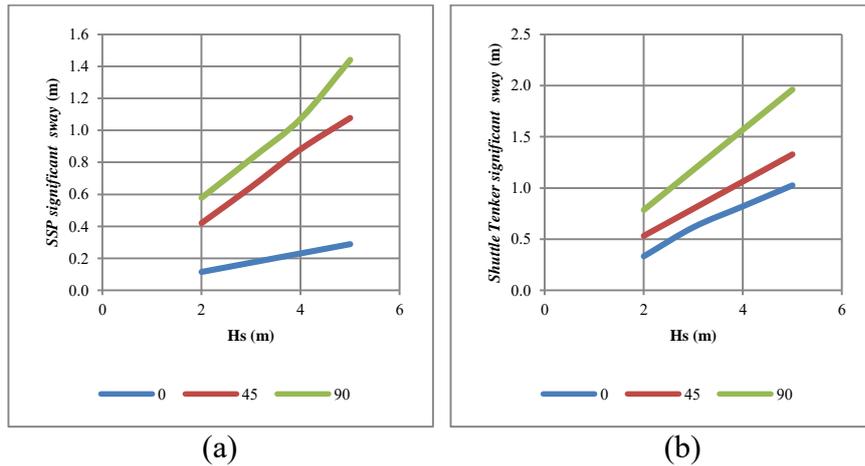
Tabel 4.23 Respon gerak signifikan *Shuttle Tanker* pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1 (lanjutan)

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
45	<i>Surge</i> (m)	0.175	0.264	0.352	0.442
	<i>Sway</i> (m)	0.532	0.798	1.063	1.329
	<i>Heave</i> (m)	1.130	1.696	2.261	2.826
	<i>Roll</i> (deg)	0.602	0.902	1.203	1.504
	<i>Pitch</i> (deg)	0.477	0.716	0.955	1.193
	<i>Yaw</i> (deg)	2.245	2.682	3.059	3.535
90	<i>Surge</i> (m)	0.070	0.071	0.094	0.118
	<i>Sway</i> (m)	0.785	1.177	1.569	1.961
	<i>Heave</i> (m)	0.548	1.031	1.375	1.719
	<i>Roll</i> (deg)	1.240	1.861	2.481	3.101
	<i>Pitch</i> (deg)	0.277	0.359	0.479	0.598
	<i>Yaw</i> (deg)	0.674	1.593	1.761	1.933

Kondisi perbandingan respon gerak struktur SSP dan *Shuttle Tanker* pada setiap moda gerak dapat dilihat pada gambar 4.62 sampai 4.67

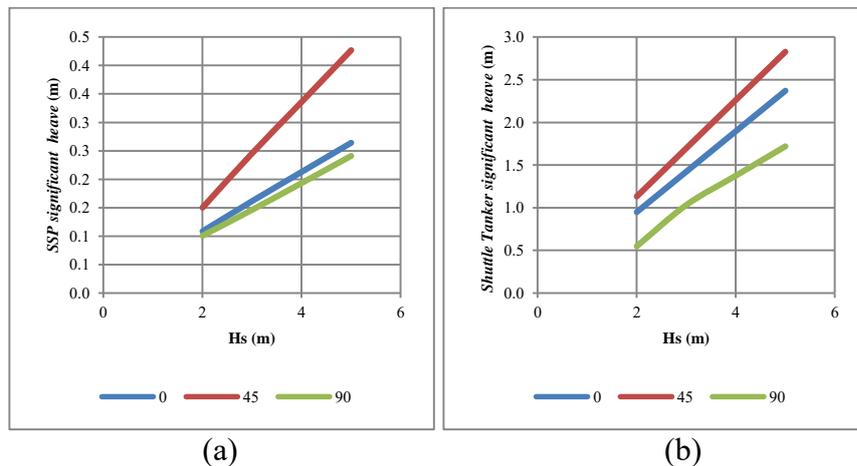


Gambar 4.62 Respon gerak *surge* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1



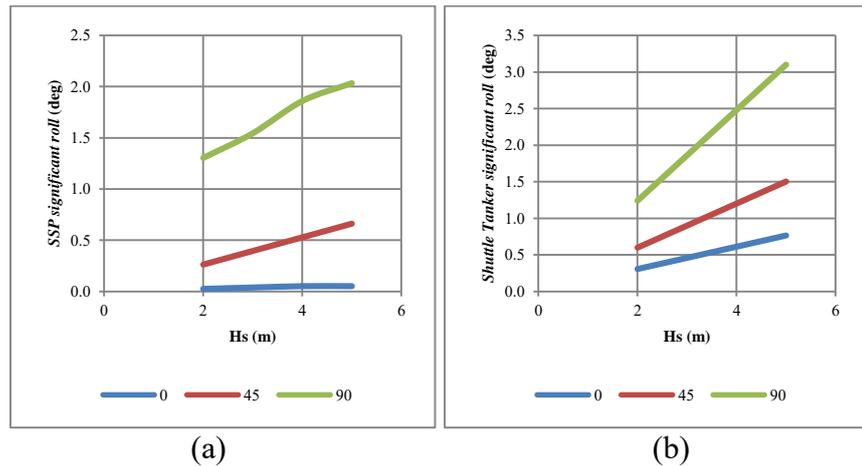
Gambar 4.63 Respon gerak *sway* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1

Respon gerak *surge* yang terjadi antara SSP dengan *Shuttle Tanker* memiliki tren yang sama pada kenaikan tinggi gelombang signifikan. Pada sistem *side by side offloading* dalam kondisi 1 ini, arah pembebanan  $0^\circ$  memberikan pengaruh yang paling besar terhadap respon gerak *surge*. Sama halnya dengan respon gerak *surge*, respon gerak *sway* pada kedua objek meningkat seiring dengan meningkatnya tinggi gelombang signifikan. Gerakan *sway* terbesar terjadi pada arah pembebanan  $90^\circ$ .

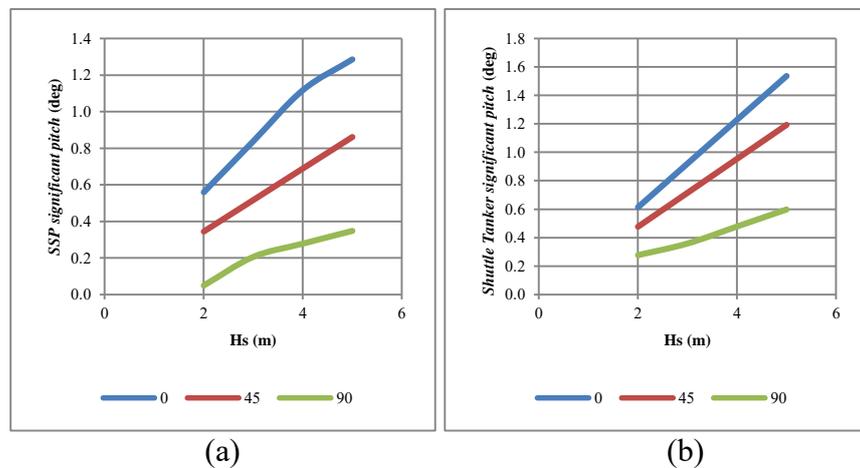


Gambar 4.64 Respon gerak *heave* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1

Respon gerak *heave* terbesar pada sistem *side by side offloading* kondisi 1 diakibatkan oleh arah pembebanan  $45^\circ$ . Sedangkan respon gerak *heave* terendah diakibatkan oleh arah pembebanan  $90^\circ$ .

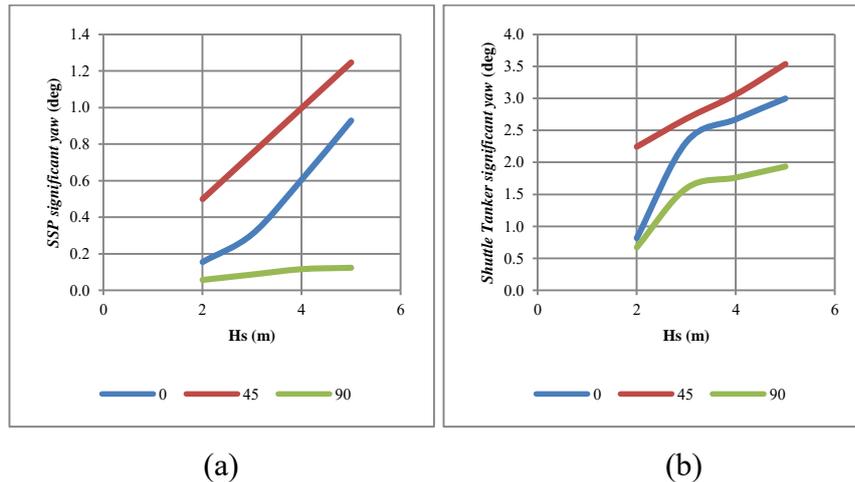


Gambar 4.65 Respon gerak *roll* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1



Gambar 4.66 Respon gerak *pitch* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1

Sebanding dengan respon gerak *sway*, arah pembebanan 90° membawa dampak yang besar pada respon gerak *roll* dan arah pembebanan 0° menghasilkan respon gerak yang kecil. Begitu pula dengan nilai respon gerak *pitch*, karakteristik grafik yang terjadi pada respon gerak *pitch* serupa dengan karakteristik respon gerak *surge*. Nilai *pitch* terbesar terletak pada arah pembebanan 0° sedangkan nilai terkecil terletak pada arah pembebanan 90°.



Gambar 4.67 Respon gerak yaw SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 1

Nilai respon gerak yaw pada SSP cenderung lebih kecil dibandingkan respon gerak pada *Shuttle Tanker*. Hal ini disebabkan karena *Shuttle Tanker* memiliki luas penampang terhadap arah pembebanan lebih panjang dan lebih lebar dibanding SSP yang memiliki bentuk dasar silinder. Nilai respon gerak yaw terbesar terjadi pada arah pembebanan 45°.

#### 4.6.3 Analisis respon gerak pada skenario *side by side offloading* kondisi 2

Secara umum, respon gerak yang terjadi pada operasi *side by side offloading* kondisi 2 memiliki karakteristik tren yang sama dengan kondisi 1. Namun, besarnya nilai respon gerak pada kedua objek jelas berbeda. Pada kondisi 2, respon gerak SSP bertambah seiring dengan berkurangnya muatan hidrokarbon minyak. Sedangkan nilai respon gerak *Shuttle Tanker* berkurang dikarenakan penambahan muatan yang ditransfer dari SSP. Analisis dan pembahasan respon gerak pada kondisi 2 tidak lagi dijelaskan seperti pada kondisi 1 tetapi nilai hasil tabulasi respon gerak signifikan dan grafik dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 4.24 Respon gerak signifikan SSP pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
0	<i>Surge</i> (m)	2.151	2.654	2.943	3.178
	<i>Sway</i> (m)	0.081	0.178	0.326	0.521
	<i>Heave</i> (m)	0.285	0.369	0.443	0.506
	<i>Roll</i> (deg)	0.199	0.470	0.808	1.188
	<i>Pitch</i> (deg)	0.970	1.536	2.075	2.575
	<i>Yaw</i> (deg)	0.462	0.895	1.313	1.785
45	<i>Surge</i> (m)	0.967	1.835	2.279	2.460
	<i>Sway</i> (m)	0.547	0.661	0.903	1.194
	<i>Heave</i> (m)	0.286	0.376	0.451	0.515
	<i>Roll</i> (deg)	0.838	1.386	1.899	2.377
	<i>Pitch</i> (deg)	0.647	1.042	1.519	2.001
	<i>Yaw</i> (deg)	1.950	2.174	2.499	2.887
90	<i>Surge</i> (m)	0.518	0.581	0.645	0.855
	<i>Sway</i> (m)	0.778	1.306	1.634	1.901
	<i>Heave</i> (m)	0.272	0.340	0.398	0.459
	<i>Roll</i> (deg)	1.118	1.767	2.483	3.115
	<i>Pitch</i> (deg)	0.080	0.209	0.380	0.595
	<i>Yaw</i> (deg)	0.026	0.092	0.126	0.155

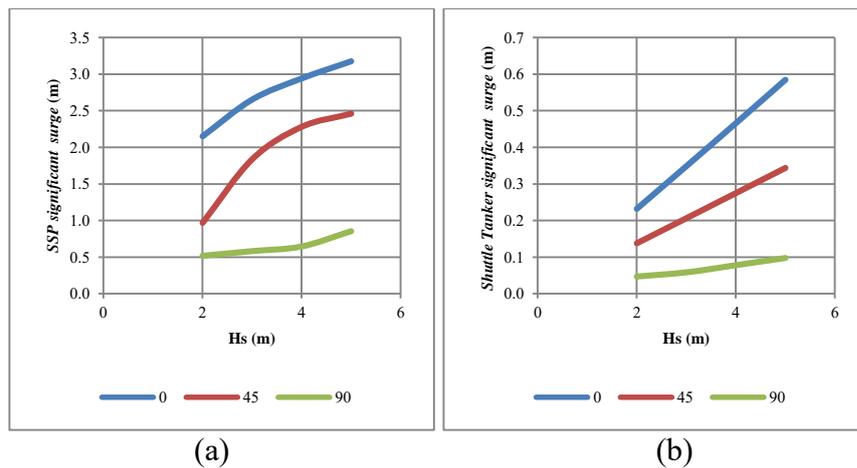
Tabel 4.25 Respon gerak signifikan *Shuttle Tanker* pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
0	<i>Surge</i> (m)	0.232	0.348	0.466	0.585
	<i>Sway</i> (m)	0.094	0.174	0.232	0.289
	<i>Heave</i> (m)	0.782	1.173	1.564	1.955
	<i>Roll</i> (deg)	0.065	0.097	0.129	0.162
	<i>Pitch</i> (deg)	0.579	0.869	1.159	1.449
	<i>Yaw</i> (deg)	0.262	1.290	1.721	2.128

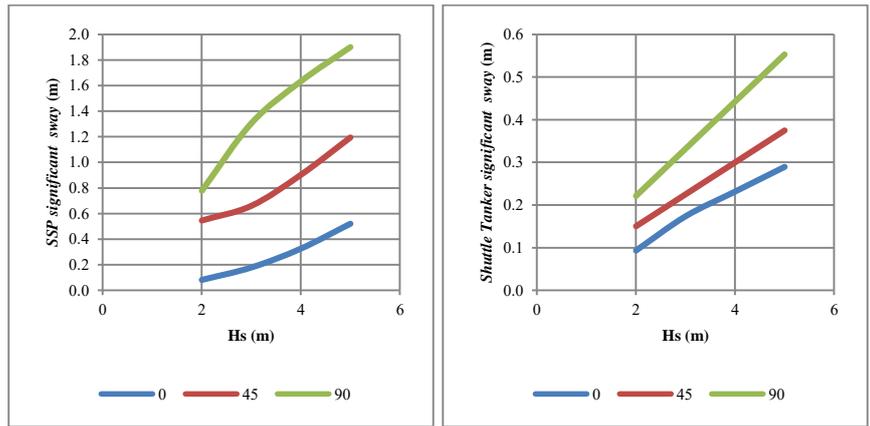
Tabel 4.25 Respon gerak signifikan *Shuttle Tanker* pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2 (lanjutan)

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
45	<i>Surge</i> (m)	0.137	0.206	0.275	0.344
	<i>Sway</i> (m)	0.150	0.225	0.300	0.375
	<i>Heave</i> (m)	1.004	1.506	2.008	2.510
	<i>Roll</i> (deg)	0.270	0.406	0.541	0.676
	<i>Pitch</i> (deg)	0.475	0.712	0.950	1.187
	<i>Yaw</i> (deg)	1.950	2.174	2.499	2.887
90	<i>Surge</i> (m)	0.047	0.058	0.078	0.098
	<i>Sway</i> (m)	0.221	0.332	0.442	0.553
	<i>Heave</i> (m)	0.487	0.792	1.056	1.320
	<i>Roll</i> (deg)	1.238	1.857	2.476	3.095
	<i>Pitch</i> (deg)	0.199	0.298	0.397	0.497
	<i>Yaw</i> (deg)	0.262	0.895	1.313	1.685

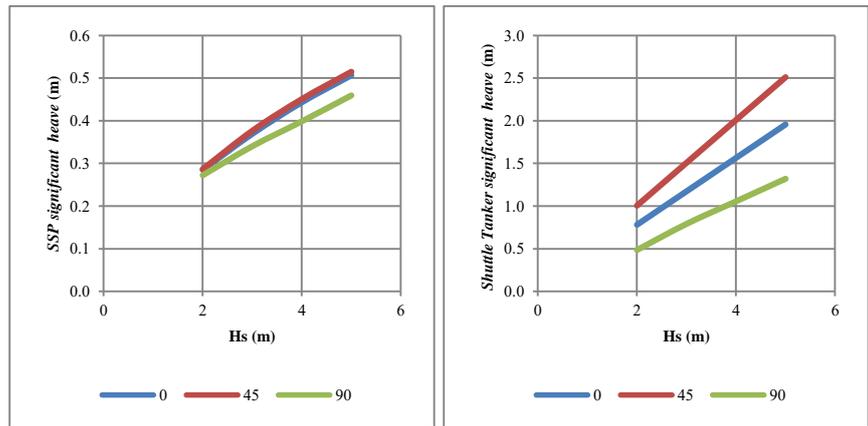
Kondisi perbandingan respon gerak struktur SSP dan *Shuttle Tanker* pada setiap moda gerak dapat dilihat pada gambar 4.68 sampai 4.73



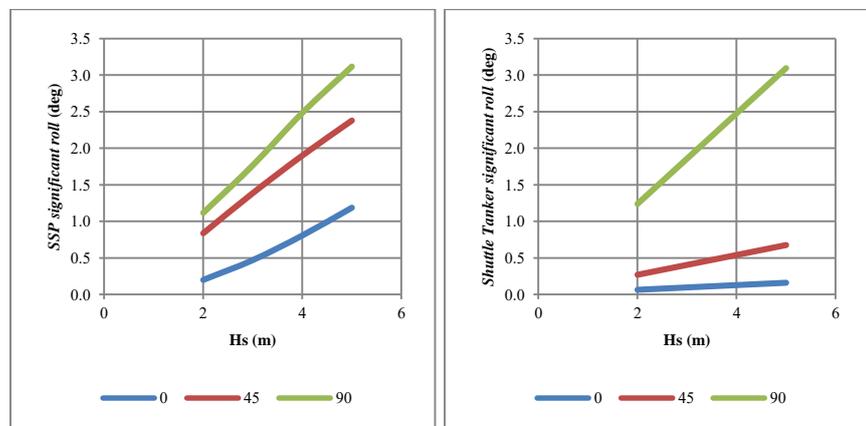
Gambar 4.68 Respon gerak *surge* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2



(a) (b)  
 Gambar 4.69 Respon gerak *sway* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2

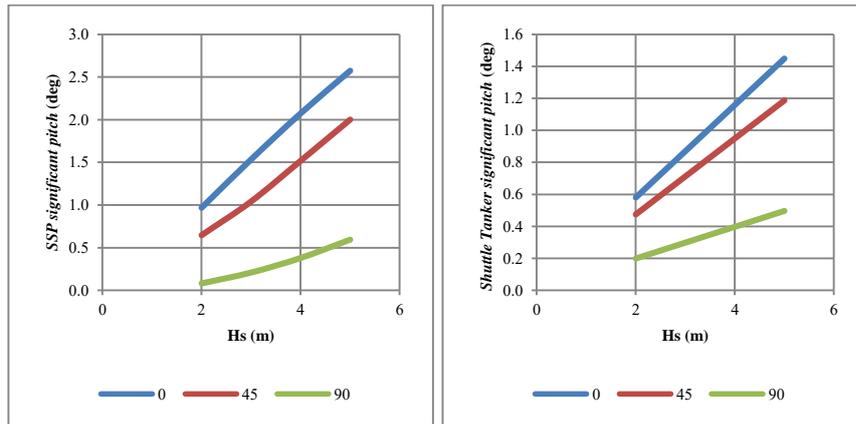


(a) (b)  
 Gambar 4.70 Respon gerak *heave* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2

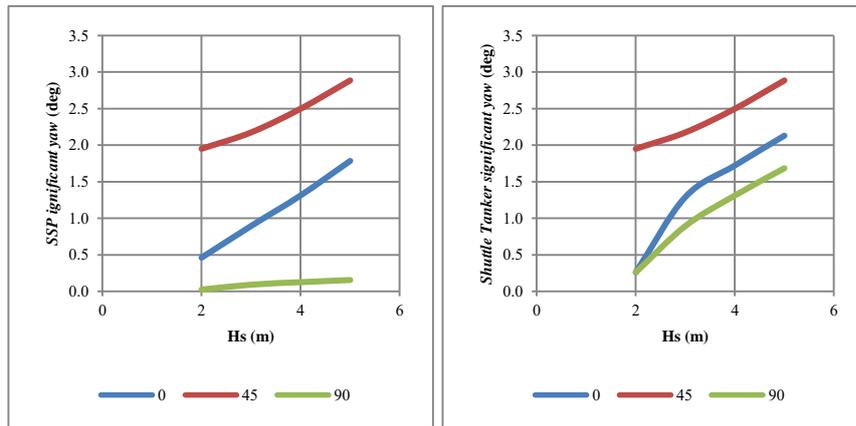


(a) (b)  
 Gambar 4.71 Respon gerak *roll* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2





(a) (b)  
 Gambar 4.72 Respon gerak *pitch* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2



(a) (b)  
 Gambar 4.73 Respon gerak *yaw* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 2

#### 4.6.4 Analisis respon gerak pada skenario *side by side offloading* kondisi 3

Sama dengan analisis pada kondisi 2, analisis dan pembahasan respon gerak pada kondisi 3 tidak lagi dijelaskan seperti pada kondisi 1 tetapi nilai hasil tabulasi respon gerak signifikan dan grafik dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 4.26 Respon gerak signifikan SSP pada kondisi *side by side offloading* kondisi 3

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
0	<i>Surge</i> (m)	2.207	2.688	3.047	3.451
	<i>Sway</i> (m)	0.188	0.417	0.674	0.958
	<i>Heave</i> (m)	0.608	0.911	1.215	1.519
	<i>Roll</i> (deg)	0.257	0.490	0.859	1.378
	<i>Pitch</i> (deg)	1.079	1.556	2.130	2.721
	<i>Yaw</i> (deg)	0.600	1.190	1.721	2.128
45	<i>Surge</i> (m)	0.990	1.500	2.100	2.510
	<i>Sway</i> (m)	0.587	0.672	1.031	1.480
	<i>Heave</i> (m)	0.764	0.996	1.328	1.640
	<i>Roll</i> (deg)	0.880	1.853	2.470	3.088
	<i>Pitch</i> (deg)	0.680	1.091	1.562	2.067
	<i>Yaw</i> (deg)	2.245	2.682	3.119	3.535
90	<i>Surge</i> (m)	0.799	0.887	0.896	0.956
	<i>Sway</i> (m)	0.987	1.549	1.857	2.210
	<i>Heave</i> (m)	0.453	0.680	0.907	1.133
	<i>Roll</i> (deg)	1.480	2.077	2.717	3.524
	<i>Pitch</i> (deg)	0.139	0.218	0.391	0.648
	<i>Yaw</i> (deg)	0.040	0.129	0.158	0.183

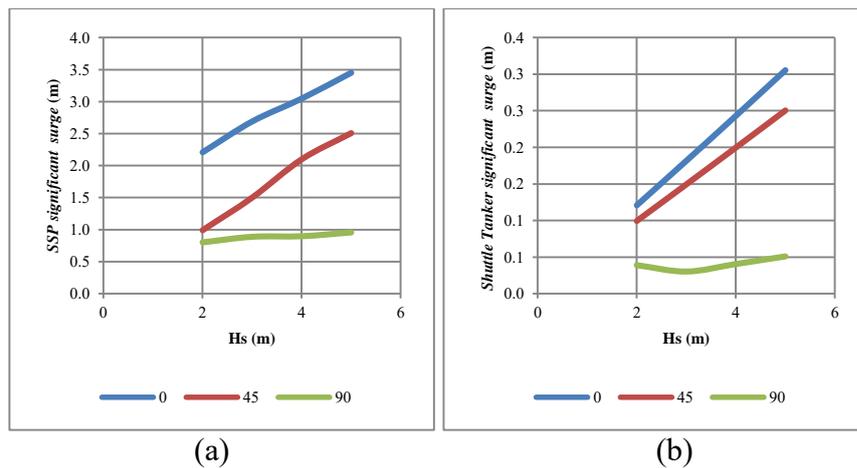
Tabel 4.27 Respon gerak signifikan *Shuttle Tanker* pada kondisi *side by side offloading* kondisi 3

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
0	<i>Surge</i> (m)	0.121	0.182	0.243	0.305
	<i>Sway</i> (m)	0.028	0.042	0.056	0.070
	<i>Heave</i> (m)	0.608	0.911	1.215	1.519
	<i>Roll</i> (deg)	0.026	0.039	0.052	0.065
	<i>Pitch</i> (deg)	0.559	0.838	1.117	1.397
	<i>Yaw</i> (deg)	0.055	0.310	0.638	0.929

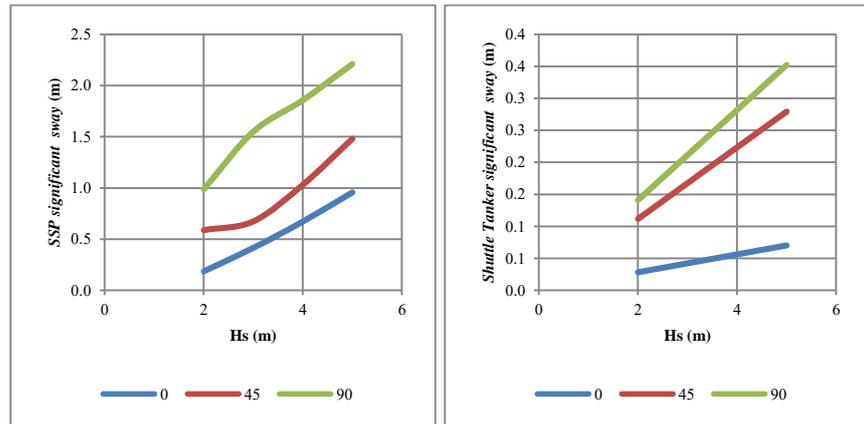
Tabel 4.27 Respon gerak signifikan *Shuttle Tanker* pada kondisi *side by side offloading* kondisi 3 (lanjutan)

Heading (°)	Moda gerak	Nilai signifikan			
		2	3	4	5
45	<i>Surge</i> (m)	0.099	0.150	0.200	0.251
	<i>Sway</i> (m)	0.112	0.168	0.223	0.279
	<i>Heave</i> (m)	0.964	1.446	1.928	2.410
	<i>Roll</i> (deg)	0.265	0.397	0.529	0.661
	<i>Pitch</i> (deg)	0.345	0.517	0.689	0.861
	<i>Yaw</i> (deg)	0.499	0.748	0.998	1.247
90	<i>Surge</i> (m)	0.039	0.030	0.041	0.051
	<i>Sway</i> (m)	0.141	0.211	0.282	0.352
	<i>Heave</i> (m)	0.453	0.680	0.907	1.133
	<i>Roll</i> (deg)	0.880	1.853	2.470	3.088
	<i>Pitch</i> (deg)	0.139	0.209	0.278	0.348
	<i>Yaw</i> (deg)	0.038	0.087	0.116	0.145

Kondisi perbandingan respon gerak struktur SSP dan *Shuttle Tanker* pada setiap moda gerak dapat dilihat pada gambar 4.74 sampai 4.79

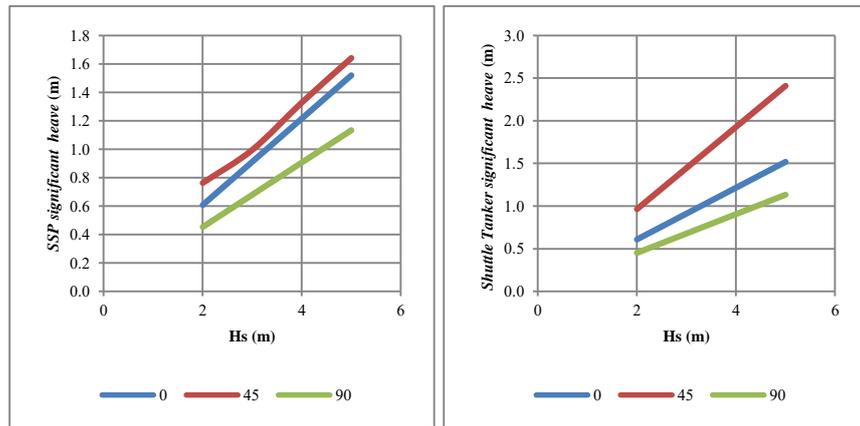


Gambar 4.74 Respon gerak *surge* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 3



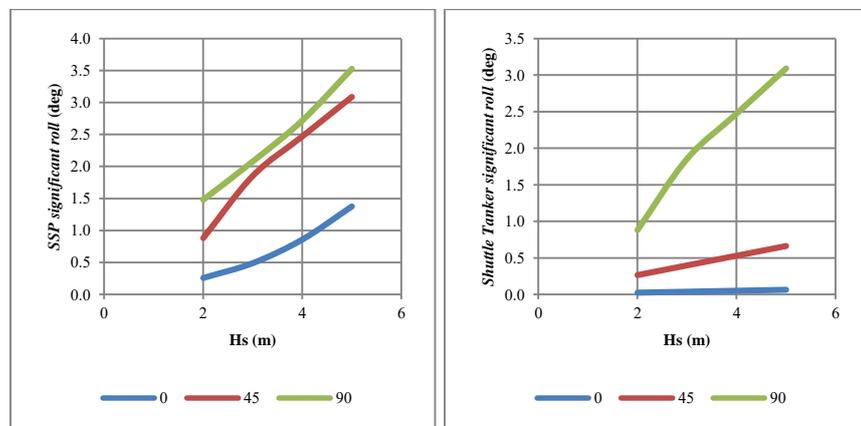
(a) (b)

Gambar 4.75 Respon gerak sway SSP (a) dan Shuttle Tanker (b) pada kondisi side by side offloading kondisi 3



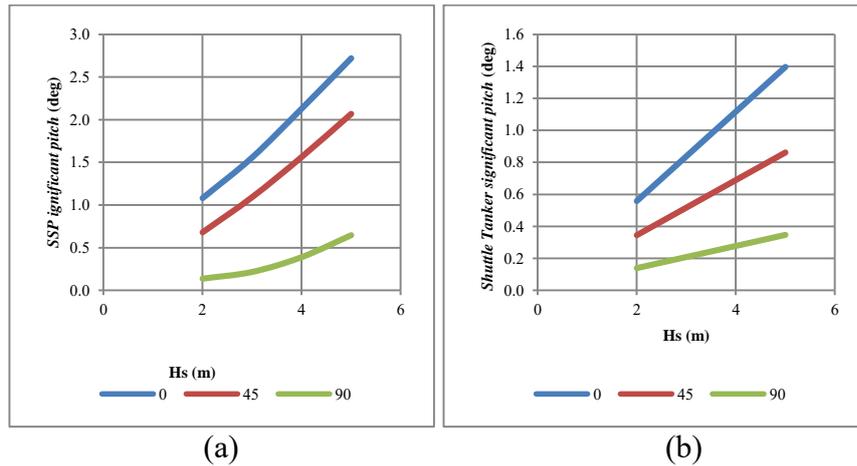
(a) (b)

Gambar 4.76 Respon gerak heave SSP (a) dan Shuttle Tanker (b) pada kondisi side by side offloading kondisi 3

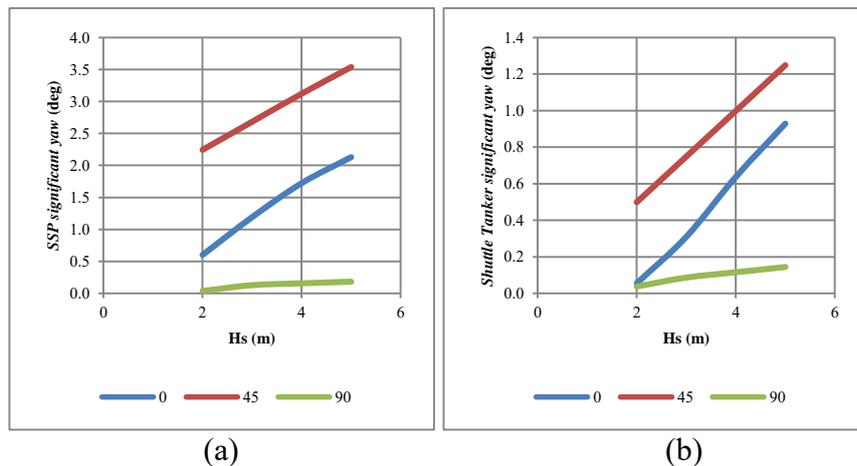


(a) (b)

Gambar 4.77 Respon gerak roll SSP (a) dan Shuttle Tanker (b) pada kondisi side by side offloading kondisi 3



Gambar 4.78 Respon gerak *pitch* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 3



Gambar 4.79 Respon gerak *yaw* SSP (a) dan *Shuttle Tanker* (b) pada kondisi *side by side offloading* kondisi 3

#### 4.6.5 Analisis kondisi kritis untuk setiap kasus berdasarkan respon gerak

Berdasarkan hasil analisis dari setiap kasus yang sudah dilakukan, didapatkan gambaran mengenai posisi kedua objek ketika proses *side by side offloading* berlangsung. Kondisi kritis dalam analisis ini mengacu kepada gabungan gerak *sway*, *heave*, dan *roll* pada respon gerak maksimum. Ketiga gerakan tersebut menjadi moda gerak penentu sistem *side by side offloading* dalam berjalan dengan aman atau tidak. Hasil yang sudah diperoleh tersebut memudahkan penarikan simpulan mengenai sampai pada batas kondisi berapakah operasi *side by side offloading* berada dalam batas aman dilakukan. Berikut ini rangkuman mengenai kondisi kritis pada

setiap kasus yang bisa menjadi representasi dari aman atau tidaknya operasi *side by side offloading* untuk dilakukan.

Tabel 4.28 Rangkuman kondisi kritis *side by side offloading* berdasarkan respon gerak pada kondisi 1

KONDISI 1					
Heading	Moda gerak	Nilai maksimum (m)			
		Hs 2 meter	Hs 3 meter	Hs 4 meter	Hs 5 meter
0	SSP sway	0.701	0.758	0.816	0.874
	SSP heave	0.312	0.450	0.676	0.910
	SSP roll	0.213	0.470	0.808	1.188
	Shuttle Tanker sway	-0.883	-0.897	-0.911	-0.925
	Shuttle Tanker heave	1.900	2.242	3.653	5.062
	Shuttle Tanker roll	-0.988	-5.125	-6.776	-8.303
45	SSP sway	0.922	1.041	1.290	1.556
	SSP heave	0.773	0.942	1.195	1.591
	SSP roll	0.859	1.288	1.718	2.147
	Shuttle Tanker sway	-1.240	-1.296	-1.352	-1.527
	Shuttle Tanker heave	1.560	3.342	5.125	5.909
	Shuttle Tanker roll	-2.963	-5.173	-8.782	-11.947
90	SSP sway	1.053	1.243	1.494	1.861
	SSP heave	0.277	0.414	0.523	0.714
	SSP roll	2.828	4.835	6.266	8.194
	Shuttle Tanker sway	-1.650	-1.720	-1.787	-2.179
	Shuttle Tanker heave	0.829	1.031	2.532	3.662
	Shuttle Tanker roll	-4.716	-6.766	-9.276	-12.628

Tabel 4.29 Rangkuman kondisi kritis *side by side offloading* berdasarkan respon gerak pada kondisi 2

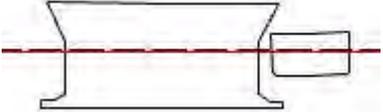
KONDISI 2					
Heading	Moda gerak	Nilai maksimum (m)			
		Hs 2 meter	Hs 3 meter	Hs 4 meter	Hs 5 meter
0	SSP sway	0.721	0.797	0.945	1.140
	SSP heave	0.603	0.823	1.127	1.298
	SSP roll	0.963	1.445	1.927	2.408
	Shuttle Tanker sway	-0.332	-0.616	-0.821	-1.027
	Shuttle Tanker heave	0.782	1.508	2.678	3.849
	Shuttle Tanker roll	-0.963	-2.344	-4.487	-6.691
45	SSP sway	0.934	1.124	1.361	1.582
	SSP heave	0.797	1.216	1.793	1.860
	SSP roll	0.908	1.386	1.899	2.377
	Shuttle Tanker sway	-0.730	-0.996	-1.262	-1.407
	Shuttle Tanker heave	1.103	2.389	3.848	5.305
	Shuttle Tanker roll	-2.284	-3.915	-5.346	-7.484
90	SSP sway	1.120	1.648	1.975	2.243
	SSP heave	0.595	0.799	1.002	1.200
	SSP roll	2.963	5.772	7.696	9.620
	Shuttle Tanker sway	-1.003	-1.395	-1.776	-1.832
	Shuttle Tanker heave	0.548	0.792	1.408	2.259
	Shuttle Tanker roll	-4.135	-6.203	-8.620	-12.537

Tabel 4.30 Rangkuman kondisi kritis *side by side offloading* berdasarkan respon gerak pada kondisi 3

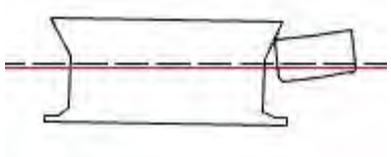
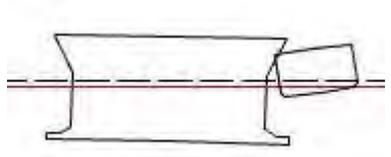
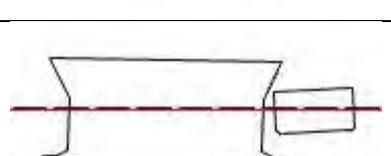
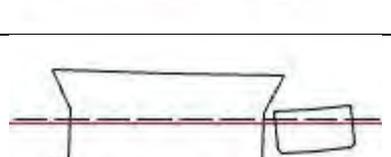
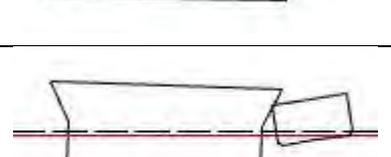
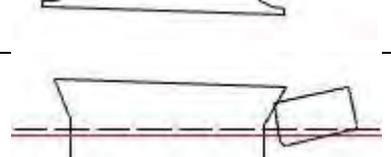
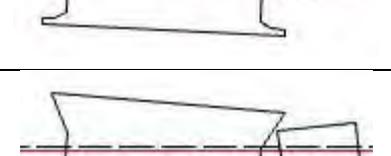
KONDISI 3					
Heading	Moda gerak	Nilai maksimum (m)			
		Hs 2 meter	Hs 3 meter	Hs 4 meter	Hs 5 meter
0	SSP sway	-0.748	-0.977	-1.234	-1.518
	SSP heave	0.667	1.104	1.558	1.757
	SSP roll	-0.963	-1.445	-1.927	-2.408
	Shuttle Tanker sway	0.360	0.440	0.498	0.556
	Shuttle Tanker heave	0.608	1.179	2.201	3.248
	Shuttle Tanker roll	0.891	2.195	4.323	5.542
45	SSP sway	-0.956	-1.048	-1.399	-1.849
	SSP heave	0.902	1.239	1.637	1.905
	SSP roll	-2.058	-3.342	-4.116	-5.145
	Shuttle Tanker sway	0.940	1.015	1.090	1.165
	Shuttle Tanker heave	1.004	1.446	2.240	3.301
	Shuttle Tanker roll	1.908	3.803	5.258	7.274
90	SSP sway	-1.224	-1.787	-2.094	-2.447
	SSP heave	0.667	0.937	1.292	1.554
	SSP roll	-3.947	-5.921	-7.895	-9.868
	Shuttle Tanker sway	1.220	1.331	1.441	1.552
	Shuttle Tanker heave	0.453	0.680	1.002	1.751
	Shuttle Tanker roll	1.857	3.158	8.271	10.339

Peninjauan kondisi kritis pada setiap kasus berfungsi untuk mendapatkan informasi mengenai kemungkinan tubrukan yang terjadi antar struktur. Berikut ini adalah rangkuman ilustrasi dari kondisi kritis berdasarkan Tabel 4.28 sampai Tabel 4.30

Tabel 4.31 Ilustrasi kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan respon gerak

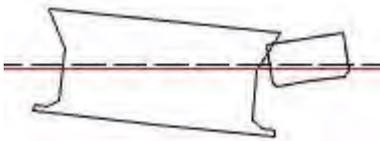
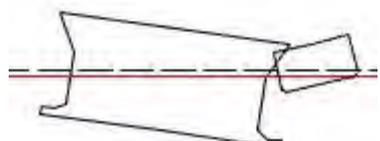
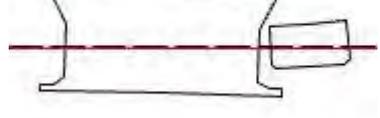
Kasus			Ilustrasi	Keterangan
Kondisi	Heading (°)	Hs (m)		
1	0	2		<i>Operable</i>
1	0	3		<i>Operable</i>

Tabel 4.31 Rangkuman ilustrasi kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan respon gerak (lanjutan)

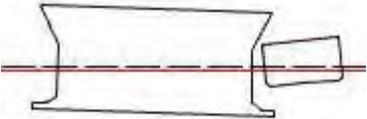
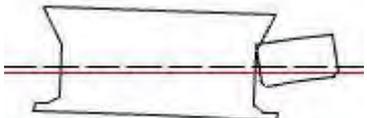
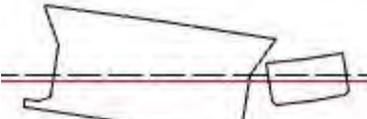
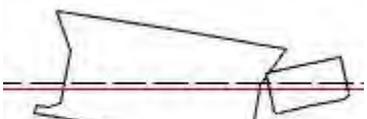
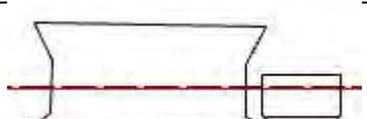
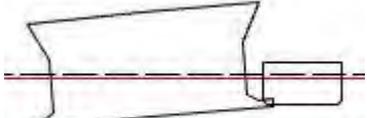
Kasus			Ilustrasi	Keterangan
Kondisi	Heading (°)	Hs (m)		
1	0	4		<i>Shut down</i>
1	0	5		<i>Shut down</i>
1	45	2		<i>Operable</i>
1	45	3		<i>Operable</i>
1	45	4		<i>Shut down</i>
1	45	5		<i>Shut down</i>
1	90	2		<i>Operable</i>
1	90	3		<i>Operable</i>



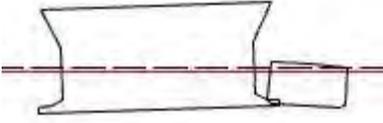
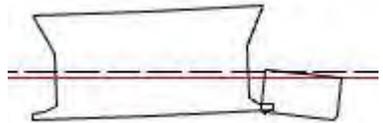
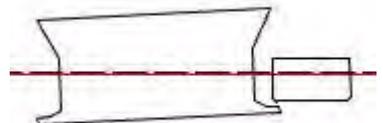
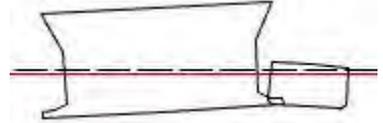
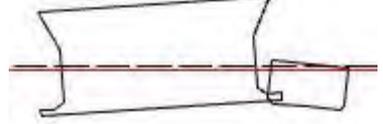
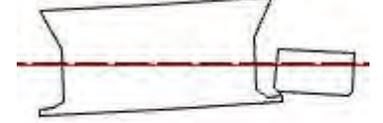
Tabel 4.31 Rangkuman ilustrasi kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan respon gerak (lanjutan)

Kasus			Ilustrasi	Keterangan
Kondisi	Heading (°)	Hs (m)		
1	90	4		<i>Shut down</i>
1	90	5		<i>Shut down</i>
2	0	2		<i>Operable</i>
2	0	3		<i>Operable</i>
2	0	4		<i>Operable</i>
2	0	5		<i>Shut down</i>
2	45	2		<i>Operable</i>
2	45	3		<i>Operable</i>

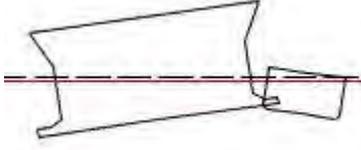
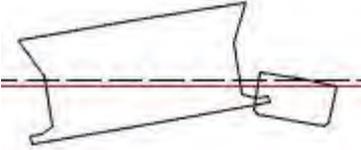
Tabel 4.31 Rangkuman ilustrasi kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan respon gerak (lanjutan)

Kasus			Ilustrasi	Keterangan
Kondisi	Heading (°)	Hs (m)		
2	45	4		<i>Operable</i>
2	45	5		<i>Shut down</i>
2	90	2		<i>Operable</i>
2	90	3		<i>Operable</i>
2	90	4		<i>Operable</i>
2	90	5		<i>Shut down</i>
3	0	2		<i>Operable</i>
3	0	3		<i>Shut down</i>

Tabel 4.31 Rangkuman ilustrasi kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan respon gerak (lanjutan)

Kondisi	Kasus		Ilustrasi	Keterangan
	Heading (°)	Hs (m)		
3	0	4		<i>Shut down</i>
3	0	5		<i>Shut down</i>
3	45	2		<i>Operable</i>
3	45	3		<i>Shut down</i>
3	45	4		<i>Shut down</i>
3	45	5		<i>Shut down</i>
3	90	2		<i>Operable</i>
3	90	3		<i>Shut down</i>

Tabel 4.31 Rangkuman ilustrasi kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan respon gerak (lanjutan)

Kasus			Ilustrasi	Keterangan
Kondisi	Heading (°)	Hs (m)		
3	90	4		<i>Shut down</i>
3	90	5		<i>Shut down</i>

Berdasarkan hasil rangkuman ilustrasi, maka dapat dijelaskan bahwa,

- Operasi *side by side offloading* kondisi 1, baik dari arah pembebanan 0°, 45°, maupun 90° hanya mampu dilakukan pada maksimal tinggi gelombang signifikan 3 m.
- Operasi *side by side offloading* kondisi 2, baik dari arah pembebanan 0°, 45°, maupun 90° hanya mampu dilakukan pada maksimal tinggi gelombang signifikan 4 m.
- Operasi *side by side offloading* kondisi 3, baik dari arah pembebanan 0°, 45°, maupun 90° hanya mampu dilakukan pada maksimal tinggi gelombang signifikan 2 m.

Maka, di antara ketiga skenario kondisi tersebut, operasi *side by side* yang paling aman adalah ketika kondisi 2 yakni ketika SSP berada pada kondisi 83% muatan dan *Shuttle Tanker* berada pada kondisi 60% muatan. Hal ini terjadi karena pada kondisi tersebut, sarat air masing-masing objek memungkinkan objek tersebut untuk bisa lebih bebas melakukan moda gerak. Sedangkan pada kondisi 3, sarat air yang dimiliki *Shuttle Tanker* tinggi, sehingga lebih banyak bagian yang tercelup dan membuat posisi lambung *Shuttle Tanker* berdekatan dengan *outer skirt* struktur SSP. Sehingga, dalam respon

pergerakannya besar terutama pada moda gerak *heave* dan *roll*, lambung *Shuttle Tanker* bertubrukan dengan *outer skirt* SSP.

#### 4.6.6 Analisis *tension* tali tambat pada aktivitas *side by side offloading*.

Dalam pengoperasian *side by side offloading*, terdapat 12 tali tambat dan 4 tali tambat kapal yang harus dianalisis. Analisis dilakukan dengan mengolah hasil *time history* selama 3 jam untuk mendapatkan nilai signifikan pada setiap tali untuk setiap skenario analisis. Berikut ini rangkuman nilai *tension* tali tambat untuk setiap kasus.

Tabel 4.32 *Tension mooring lines* pada skenario *side by side offloading* kondisi 1

Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
0	1	4207.970	4224.995	4242.768	4262.266
	2	4690.820	4706.429	4722.284	4739.485
	3	4443.602	4456.035	4467.480	4478.526
	4	4447.219	4458.856	4469.024	4478.476
	5	4221.103	4252.856	4252.856	4269.898
	6	4236.153	4260.026	4291.495	4308.385
	7	4274.965	4456.566	4488.994	4507.854
	8	3983.688	4010.600	4028.234	4471.531
	9	6003.397	6007.503	6011.096	6014.319
	10	2633.222	2636.090	2637.384	2995.477
	11	2634.722	2667.398	2677.773	2684.393
	12	6065.627	6073.147	6082.125	6092.477
45	1	3930.3619	3935.9091	3940.4584	3960.4552
	2	4059.1886	4081.3074	4082.1534	4131.438
	3	4111.1122	4131.8207	4132.9368	4179.6237
	4	4179.8396	4180.033	4203.276	4203.4806
	5	4317.371	4321.4049	4324.5373	4370.8076
	6	4323.3216	4327.0013	4331.5675	4373.5381
	7	4382.453	4393.9573	4397.3431	4424.2342
	8	4641.2006	4643.0911	4660.9622	4673.8644
	9	6190.304	6221.573	6259.462	6304.450
	10	2778.203	2807.001	2841.907	2882.895
	11	2802.026	2837.977	2881.413	2932.588
	12	6226.887	6268.590	6319.594	6380.796

Tabel 4.32 *Tension mooring lines pada skenario side by side offloading kondisi 1 (lanjutan)*

Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
90	1	4049.732	4064.483	4078.197	4090.479
	2	4513.261	4529.753	4545.054	4558.749
	3	4243.401	4264.589	4284.373	4302.171
	4	4242.768	4264.568	4284.966	4303.374
	5	4204.542	4226.397	4246.861	4265.309
	6	4252.507	4273.635	4293.358	4311.180
	7	4523.988	4540.520	4555.851	4569.630
	8	4060.257	4074.984	4088.625	4100.869
	9	4230.592	4308.993	4385.835	4473.894
	10	2800.739	2866.038	2930.191	3001.775
	11	2800.620	2866.836	2931.091	3002.129
	12	4230.096	4309.697	4386.958	4474.000

Tabel 4.33 *Tension mooring lines pada skenario side by side offloading kondisi 2*

Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
0	1	4356.882	4387.176	4413.850	4434.724
	2	4839.412	4868.156	4892.883	4911.442
	3	4599.350	4618.878	4633.666	4638.673
	4	4603.090	4621.686	4632.136	4635.311
	5	4319.128	4337.846	4378.102	4411.600
	6	4368.028	4385.675	4424.537	4455.465
	7	4585.872	4612.592	4643.547	4677.101
	8	4112.043	4136.322	4164.769	4195.053
	9	6225.054	6227.600	6230.180	6232.634
	10	2829.617	2831.036	2831.284	2831.758
	11	2844.921	2865.446	2884.719	2893.110
	12	6274.991	6301.414	6312.370	6323.792
45	1	4247.255	4260.556	4262.749	4298.787
	2	4719.415	4728.541	4772.030	4786.262
	3	4409.290	4411.181	4437.787	4494.749
	4	4374.822	4402.996	4403.543	4433.181
	5	4226.635	4246.162	4279.988	4317.131
	6	4278.086	4296.344	4329.587	4364.456
	7	4562.797	4578.090	4601.170	4616.686
	8	4104.720	4117.499	4136.841	4147.300
	9	6442.873	6483.010	6530.127	6584.596
	10	2999.460	3054.850	3100.268	3153.067
	11	3015.718	3092.077	3146.538	3209.808
	12	6483.049	6544.337	6606.431	6678.696

Tabel 4.33 *Tension mooring lines pada skenario side by side*  
offloading kondisi 2 (lanjutan)

Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
90	1	4169.277	4198.077	4223.130	4237.484
	2	4632.620	4665.628	4696.433	4715.985
	3	4342.170	4382.819	4429.162	4462.692
	4	4338.161	4380.231	4428.940	4464.508
	5	4297.922	4325.782	4373.910	4415.953
	6	4349.155	4375.769	4422.521	4463.360
	7	4642.675	4656.817	4688.194	4716.164
	8	4178.687	4189.592	4214.980	4237.823
	9	4377.239	4462.578	4572.516	4660.640
	10	2937.035	3006.734	3090.283	3157.835
	11	2936.932	3007.694	3091.815	3157.502
	12	4377.170	4464.306	4574.939	4659.281

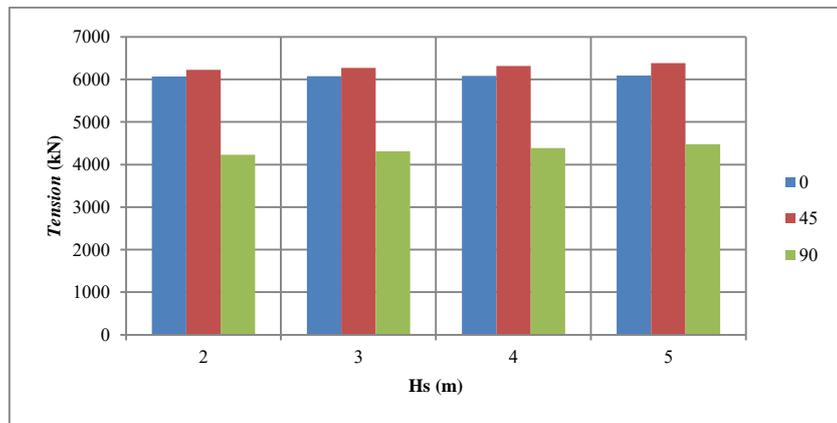
Tabel 4.34 *Tension mooring lines pada skenario side by side*  
offloading kondisi 3

Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
0	1	4472.803	4476.306	4482.673	4489.767
	2	4937.525	4952.567	4954.167	4964.105
	3	4641.946	4663.556	4686.980	4692.510
	4	4642.084	4660.145	4686.392	4694.263
	5	4324.701	4352.200	4381.240	4425.487
	6	4368.378	4395.780	4424.927	4471.155
	7	4615.192	4618.400	4646.245	4688.043
	8	4151.387	4152.829	4174.194	4210.947
	9	6249.294	6265.111	6288.165	6322.329
	10	2832.280	2843.637	2863.944	2893.121
	11	2871.168	2877.443	2892.290	2927.793
	12	6294.032	6302.499	6335.011	6379.137
45	1	4382.851	4386.262	4396.896	4402.037
	2	4709.117	4847.383	4860.107	4867.250
	3	4534.460	4536.684	4547.918	4583.266
	4	4493.261	4527.227	4527.925	4542.691
	5	4357.320	4377.758	4399.500	4421.734
	6	4399.058	4420.022	4442.212	4464.926
	7	4626.996	4648.865	4671.398	4694.171
	8	4158.332	4177.583	4197.710	4218.101
	9	6455.078	6589.472	6673.166	6713.808
	10	3016.508	3101.632	3166.567	3199.667
	11	3046.409	3117.105	3182.766	3219.059
	12	6491.765	6614.308	6698.521	6744.632

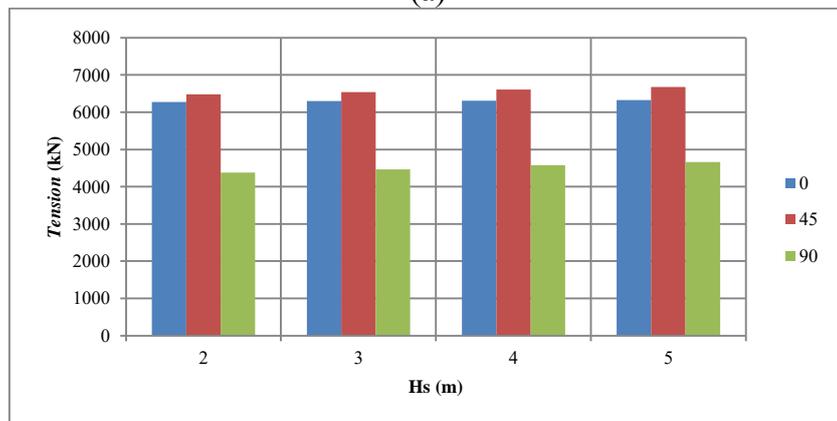
Tabel 4.34 *Tension mooring lines* pada skenario *side by side* offloading kondisi 3 (lanjutan)

Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
90	1	4260.442	4270.541	4280.347	4289.869
	2	4730.226	4742.471	4754.291	4765.412
	3	4458.082	4474.697	4491.447	4508.066
	4	4459.965	4476.291	4492.948	4509.682
	5	4469.605	4488.526	4525.487	4532.515
	6	4521.815	4539.935	4571.155	4582.677
	7	4788.043	4812.942	4820.591	4849.325
	8	4310.947	4349.677	4354.028	4377.967
	9	4386.526	4586.978	4689.695	4766.821
	10	2955.782	3112.308	3190.766	3252.527
	11	2979.866	3113.776	3193.027	3254.379
	12	4429.858	4590.330	4693.985	4769.308

Untuk mempermudah, analisis terhadap *tension* pada setiap skenario diwakili oleh satu *line* saja yakni *line* dengan *tension* terbesar. Berikut ini grafik *tension* untuk setiap skenario

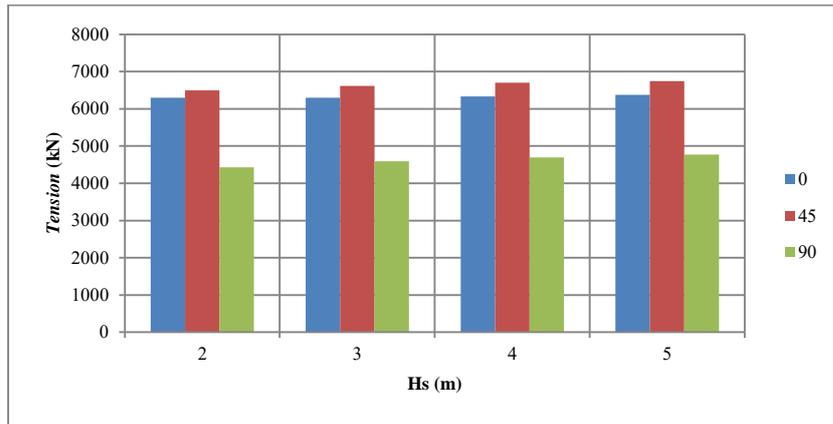


(a)



(b)



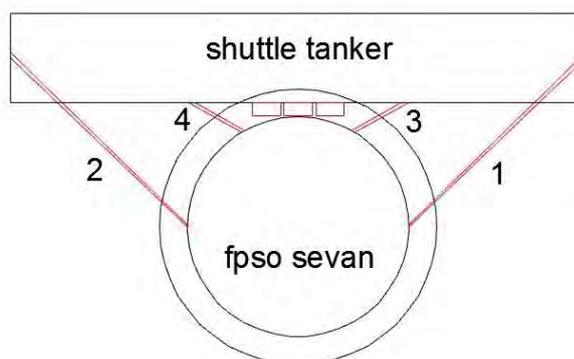


(c)

Gambar 4.80 *Tension line 12* pada skenario *side by side offloading* kondisi 1 (a), kondisi 2 (b), dan kondisi 3 (c)

Besarnya nilai gaya tarik pada setiap tali berbeda satu sama lain tergantung pada beban yang mengenainya. Gambar 4.76 menunjukkan grafik nilai *tension* pada salah satu *line* yakni *line 12*. Baik pada kondisi 1, kondisi 2, maupun kondisi 3, nilai *tension* tertinggi terjadi pada arah pembebanan gelombang  $45^\circ$  sebesar 6380.796 kN untuk kondisi 1, 6678.696 kN, dan 6744.32 kN. *Tension* mengalami kenaikan secara berturut-turut pada kondisi 1, 2, dan 3. Hal ini terjadi akibat berkurangnya muatan hidrokarbon pada SSP yang menyebabkan semakin bertambahnya respon gerak pada struktur.

Selanjutnya, analisis *tension* juga perlu dilakukan terhadap tali tambat kapal yang menghubungkan SSP dengan *Shuttle Tanker*. Konfigurasi tali tambat dapat dilihat pada gambar 4.81



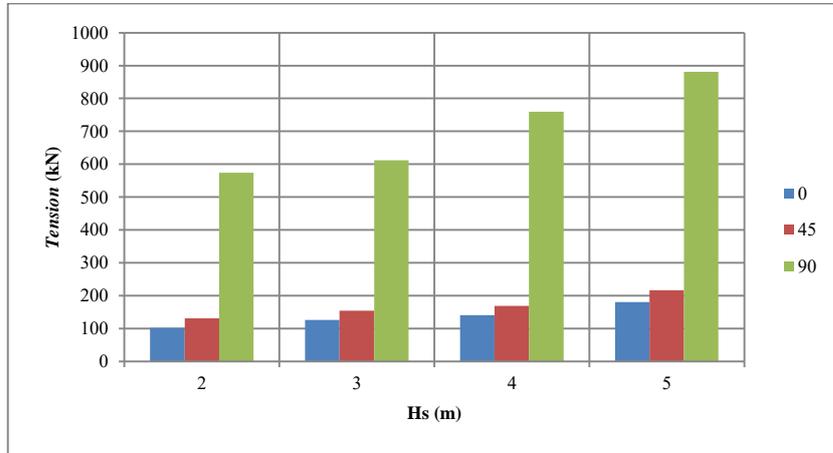
Gambar 4.81 Konfigurasi tali tambat kapal

Besarnya nilai gaya tarik yang terjadi untuk setiap skenario dapat dilihat pada Tabel 4.35

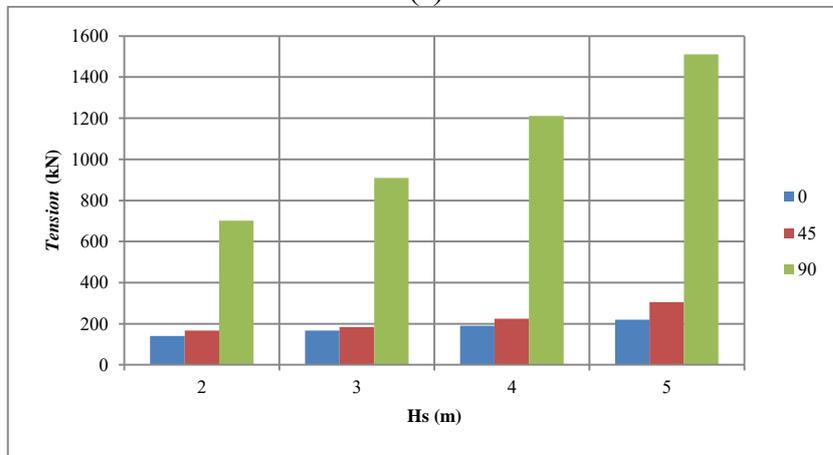
Tabel 4.35 *Tension* tali tambat kapal pada aktivitas *side by side offloading*

KONDISI 1					
Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
0	1	102.80	126.50	141.08	180.95
	2	324.60	353.53	426.28	559.04
	3	102.60	125.99	140.45	179.67
	4	323.20	351.58	423.75	555.83
45	1	131.35	155.12	168.92	217.02
	2	311.07	400.77	495.91	587.92
	3	131.09	155.11	180.44	216.40
	4	311.03	400.43	495.14	586.57
90	1	574.60	612.31	760.17	880.83
	2	580.20	900.19	1020.63	1020.98
	3	573.65	610.75	750.38	880.18
	4	580.10	890.60	1020.06	1020.07
KONDISI 2					
Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
0	1	140.24	167.03	190.95	219.93
	2	326.82	425.24	517.59	605.49
	3	139.84	166.54	192.53	219.03
	4	326.75	424.63	516.38	603.59
45	1	167.24	183.51	225.10	305.38
	2	455.97	557.96	747.94	931.01
	3	165.98	181.70	223.07	303.11
	4	454.06	555.36	744.91	927.59
90	1	700.71	910.36	1210.81	1510.77
	2	619.28	959.11	1260.13	1360.39
	3	700.63	900.82	1210.01	1500.71
	4	618.04	958.27	1250.18	1350.33
KONDISI 3					
Heading (°)	Line	Nilai signifikan (kN)			
		Hs 2 m	Hs 3 m	Hs 4 m	Hs 5 m
0	1	174.60	186.29	193.16	235.88
	2	619.28	743.26	820.79	906.16
	3	173.65	184.73	186.66	233.32
	4	618.04	740.96	817.55	902.19
45	1	164.37	177.12	203.95	255.97
	2	449.00	528.33	645.89	805.58
	3	163.54	175.77	202.36	253.73
	4	447.16	525.50	642.35	801.37
90	1	641.00	820.15	1111.95	1500.14
	2	690.87	1020.28	1540.19	1640.85
	3	640.83	811.68	1110.18	1490.30
	4	690.67	1010.48	1530.17	1630.78

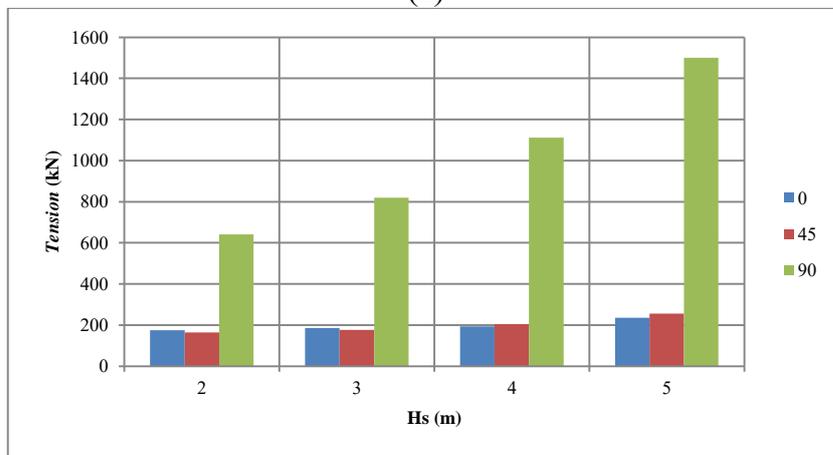
Sama halnya dengan analisis *tension* pada *mooring line*, analisis terhadap *tension* tali tambat kapal pada setiap skenario diwakili oleh satu *line* saja yakni *line* dengan *tension* terbesar. Berikut ini grafik *tension* untuk setiap skenario.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.82 *Tension* tali tambat kapal 1 pada skenario *side by side offloading* kondisi 1 (a), kondisi 2 (b), dan kondisi 3 (c)

Grafik pada gambar 4.82 menunjukkan nilai terbesar tali tambat kapal terjadi pada arah pembebanan 90°. Hal ini terjadi karena tali tambat kapal difungsikan untuk menahan respon struktur *sway* dan *roll* untuk agar posisi SSP dan *Shuttle Tanker* dapat berada dalam batas aman. Nilai *tension* meningkat berturut-turut dari kondisi 1, lalu kondisi 2, dan kondisi 3 dikarenakan bertambahnya *displacement* pada *Shuttle Tanker* akibat muatan hidrokarbon minyak hasil transfer dari SSP.

#### 4.6.7 Analisis kondisi kritis untuk setiap kasus berdasarkan *tension*

Setelah menganalisis besarnya *tension* yang terjadi baik pada *mooring line* maupun pada tali tambat kapal, diperlukan adanya pengecekan untuk mengetahui apakah sistem tambat berada dalam batas aman. Pengecekan *safety factor* mengacu kepada nilai *tension* terbesar pada setiap skenario.

Berikut ini hasil rangkuman dari *tension* yang didapat dari keseluruhan pengolahan kasus. Nilai *safety factor* yang harus dipenuhi agar operasi dikatakan aman pada *mooring* untuk kondisi *intact* adalah  $> 1.67$  sedangkan nilai *safety factor* untuk tali tambat kapal dengan material dasar sintetis adalah  $> 2$ .

Tabel 4.36 Rangkuman kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan *tension mooring line*

Kondisi	Heading (°)	Hs (m)	Tension mooring (kN)	MBL mooring (kN)	Safety Factor mooring line
1	0	2	6065.63	14336.00	2.36
1	0	3	6073.15	14336.00	2.36
1	0	4	6082.12	14336.00	2.36
1	0	5	6092.48	14336.00	2.35
1	45	2	6226.89	14336.00	2.30
1	45	3	6268.59	14336.00	2.29
1	45	4	6319.59	14336.00	2.27
1	45	5	6380.80	14336.00	2.25
1	90	2	4523.99	14336.00	3.17
1	90	3	4540.52	14336.00	3.16
1	90	4	4555.85	14336.00	3.15
1	90	5	4569.63	14336.00	3.14
2	0	2	6274.99	14336.00	2.28
2	0	3	6301.41	14336.00	2.28

Tabel 4.36 Rangkuman kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan *tension mooring line* (lanjutan)

Kondisi	Heading (°)	Hs (m)	Tension mooring (kN)	MBL mooring (kN)	Safety Factor mooring line
2	0	4	6312.37	14336.00	2.27
2	0	5	6323.79	14336.00	2.27
2	45	2	6483.05	14336.00	2.21
2	45	3	6544.34	14336.00	2.19
2	45	4	6606.43	14336.00	2.17
2	45	5	6678.70	14336.00	2.15
2	90	2	4642.67	14336.00	3.09
2	90	3	4665.63	14336.00	3.07
2	90	4	4696.43	14336.00	3.05
2	90	5	4716.16	14336.00	3.04
3	0	2	6294.03	14336.00	2.28
3	0	3	6302.50	14336.00	2.27
3	0	4	6335.01	14336.00	2.26
3	0	5	6379.14	14336.00	2.25
3	45	2	6491.76	14336.00	2.21
3	45	3	6614.31	14336.00	2.17
3	45	4	6698.52	14336.00	2.14
3	45	5	6744.63	14336.00	2.13
3	90	2	4788.04	14336.00	2.99
3	90	3	4812.94	14336.00	2.98
3	90	4	4820.59	14336.00	2.97
3	90	5	4849.32	14336.00	2.96

Tabel 4.37 Rangkuman kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan *tension tali tambat kapal*

Kondisi	Heading (°)	Hs (m)	Tension tali tambat kapal (kN)	MBL tali tambat (kN)	Safety Factor tali tambat	Keterangan
1	0	2	324.60	1538.46	4.74	Operable
1	0	3	353.53	1538.46	4.35	Operable
1	0	4	426.28	1538.46	3.61	Operable
1	0	5	559.04	1538.46	2.75	Operable
1	45	2	311.07	1538.46	4.95	Operable
1	45	3	400.77	1538.46	3.84	Operable
1	45	4	495.91	1538.46	3.10	Operable
1	45	5	587.92	1538.46	2.62	Operable
1	90	2	580.20	1538.46	2.65	Operable
1	90	3	900.19	1538.46	1.71	Shut down
1	90	4	1020.63	1538.46	1.51	Shut down
1	90	5	1020.98	1538.46	1.51	Shut down
2	0	2	326.82	1538.46	4.71	Operable

Tabel 4.37 Rangkuman kondisi kritis pada setiap kasus berdasarkan *tension* tali tambat kapal (lanjutan)

Kondisi	Heading (°)	Hs (m)	Tension tali tambat kapal (kN)	MBL tali tambat (kN)	Safety Factor tali tambat	Keterangan
2	45	3	557.96	1538.46	2.76	Operable
2	45	4	747.94	1538.46	2.06	Operable
2	45	5	931.01	1538.46	1.65	Shut down
2	90	2	700.71	1538.46	2.20	Operable
2	90	3	959.11	1538.46	1.60	Shut down
2	90	4	1260.13	1538.46	1.22	Shut down
2	90	5	1510.77	1538.46	1.02	Shut down
3	0	2	619.28	1538.46	2.48	Operable
3	0	3	743.26	1538.46	2.07	Operable
3	0	4	820.79	1538.46	1.87	Shut down
3	0	5	906.16	1538.46	1.70	Shut down
3	45	2	449.00	1538.46	3.43	Operable
3	45	3	528.33	1538.46	2.91	Operable
3	45	4	645.89	1538.46	2.38	Operable
3	45	5	805.58	1538.46	1.91	Shut down
3	90	2	690.87	1538.46	2.23	Operable
3	90	3	1020.28	1538.46	1.51	Shut down
3	90	4	1540.19	1538.46	1.00	Shut down
3	90	5	1640.85	1538.46	0.94	Shut down

#### 4.7 ANALISIS OPERABILITAS SSP DI PERAIRAN BLOK MASELA

Nilai operabilitas dalam penelitian ini terbagi menjadi dua yakni kemampuan SSP beroperasi secara tunggal dan kemampuan SSP melakukan aktivitas *side by side offloading* dengan *shuttle tanker*.

Analisis pada jenis operabilitas ketika pengoperasian tunggal mengarah kepada keadaan lingkungan yang ditunjukkan dengan nilai pada periode ulang, dalam hal ini tinggi gelombang signifikan. Berdasarkan hasil pembahasan pada bagian sebelumnya, SSP dengan konfigurasi tali tambat sedemikian dinyatakan mampu beroperasi sampai pada batas rentang gelombang periode ulang 100 tahunan. Hal ini dibuktikan dengan nilai *safety factor* yang tidak kurang dari syarat batas yang telah ditetapkan.

Dalam penelitian ini, operabilitas lebih dititikberatkan pada kemampuan SSP melakukan aktivitas *side by side offloading* dengan *shuttle tanker*. Operabilitas diasumsikan hanya dipengaruhi oleh faktor cuaca yakni kondisi

lingkungan di lokasi setempat. Dua aspek yang sangat berpengaruh dalam analisis operabilitas fase ini adalah posisi kedua struktur, dalam artian mengalami tubrukan atau tidak, dan kemampuan tali tambat baik *mooring lines* maupun tali tambat kapal dalam menahan beban akibat respon gerak yang terjadi. Dari hasil rangkuman tiap kondisi kritis untuk setiap kasus yang dianalisis, maka dapat ditentukan nilai operabilitasnya sebagai berikut.

Tabel 4.38 Kondisi akhir keseluruhan *side by side offloading*

Kondisi	Heading (°)	Hs (m)	Respon gerak	Tension	Hasil akhir
1	0	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
1	0	3	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
1	0	4	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
1	0	5	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
1	45	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
1	45	3	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
1	45	4	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
1	45	5	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
1	90	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
1	90	3	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
1	90	4	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
1	90	5	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
2	0	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
2	0	3	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
2	0	4	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
2	0	5	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
2	45	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
2	45	3	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
2	45	4	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
2	45	5	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
2	90	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
2	90	3	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
2	90	4	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
2	90	5	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
3	0	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
3	0	3	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
3	0	4	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
3	0	5	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
3	45	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
3	45	3	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
3	45	4	<i>Shut down</i>	<i>Operable</i>	<i>Shut down</i>
3	45	5	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
3	90	2	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>	<i>Operable</i>
3	90	3	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
3	90	4	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>
3	90	5	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>	<i>Shut down</i>

Dari olahan yang sudah dilakukan tersebut, maka dapat diketahui bahwa proses *side by side offloading* berada dalam kondisi aman sampai pada batas tinggi gelombang signifikan 2 m. Lebih lanjut, kondisi batas tersebut kemudian dikorelasikan dengan kondisi lingkungan setempat yakni data sebaran gelombang.

Tabel 4.39 Korelasi kondisi batas dengan data sebaran gelombang Blok Masela

		Hs (m)					Total
		0.1 - 1	1.1 - 2	2.1 - 3	3.1 - 4	4.1 - 5	
Tp (s)	0.1 - 2	0	0	0	0	0	0
	2.1 - 4	0.58	0	0	0	0	0.58
	4.1 - 6	9.51	4.43	0	0	0	13.94
	6.1 - 8	5.12	6.9	4.74	0.03	0	16.79
	8.1 - 10	8.2	3.5	5.6	0.78	0.04	18.12
	10.1 - 12	10.8	20.8	0.15	0.01	0.01	31.77
	12.1 - 14	9.3	2.68	0.02	0	0	12
	14.1 - 16	2.93	2.46	0.04	0	0	5.43
	16.1 - 18	0.42	0.77	0.03	0	0	1.22
	18.1 - 20	0.05	0.096	0	0	0	0.146
Total		46.91	41.636	10.58	0.82	0.05	<b>100.0</b>
Kumulatif		46.9	88.5	99.1	99.9	<b>100.0</b>	

Tabel berwarna merah menunjukkan kondisi sudah melampaui syarat batas sehingga tidak mungkin lagi dilakukan operasi sedangkan tabel berwarna hijau merupakan daerah aman dilakukannya operasi *side by side offloading*. Berdasarkan persamaan operabilitas yang sudah dijelaskan di bagian sebelumnya yakni persamaan (2.19), nilai operabilitas SSP dalam melakukan *side by side offloading* dengan *Shuttle Tanker* berkapasitas 35000 DWT adalah 88.55%.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

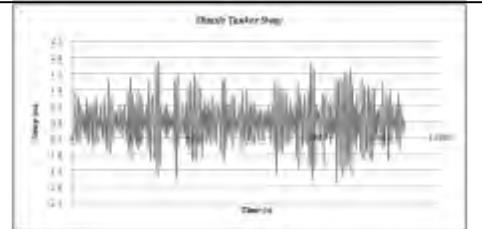
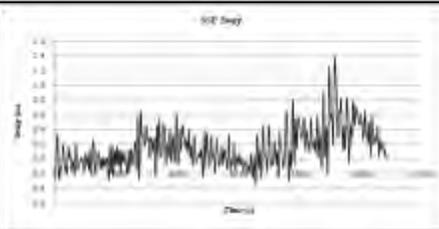
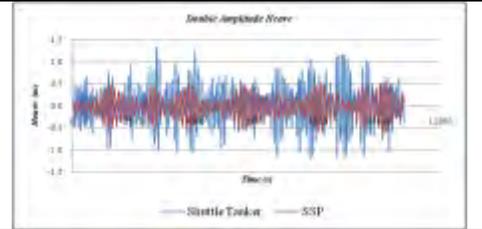
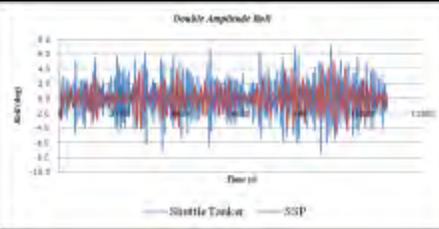
## LAMPIRAN A

Grafik *time history* respon gerak *sway*, *heave*, dan *roll* pada skenario *side by side offloading* kondisi 1

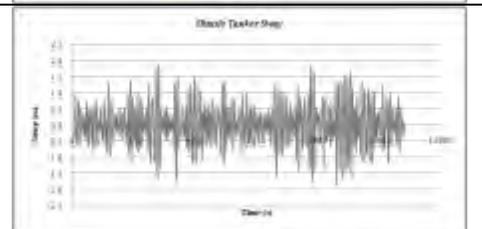
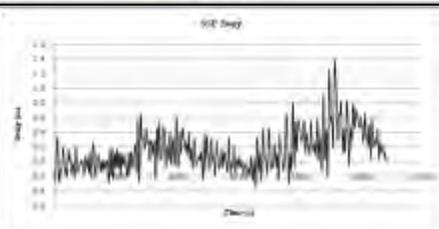
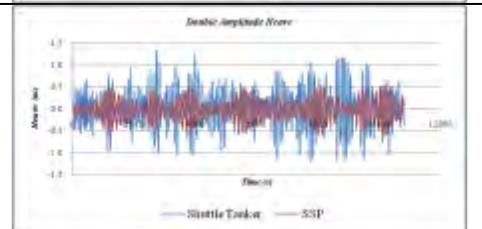
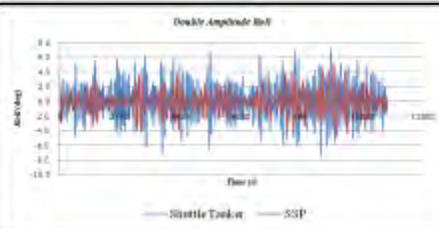
Kondisi 1 – Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 2 m		
Kondisi 1 - Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 3 m		
Kondisi 1 - Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 4 m		
Kondisi 1 - Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 5 m		



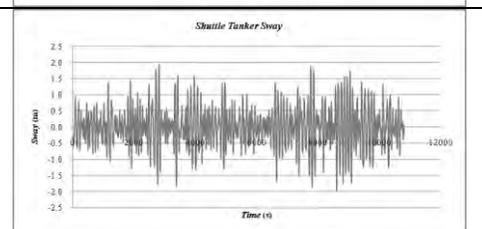
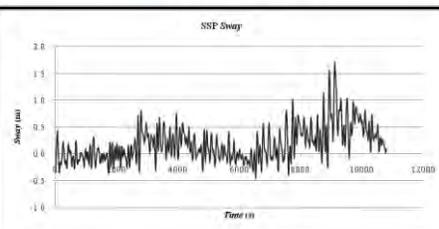
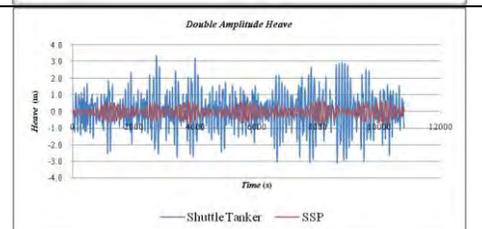
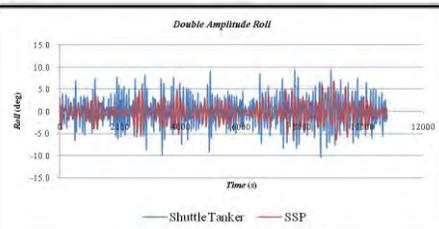
Kondisi 1 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 2 m



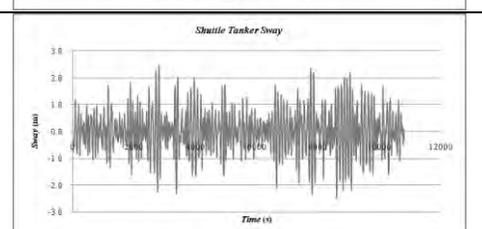
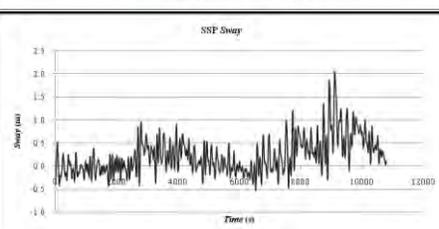
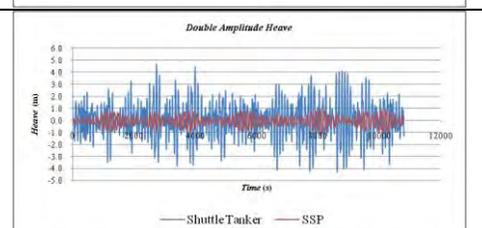
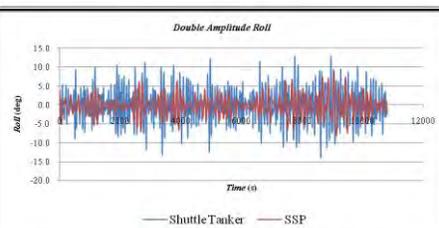
Kondisi 1 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 3 m



Kondisi 1 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 4 m



Kondisi 1 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 5 m



## LAMPIRAN B

Grafik *time history* respon gerak *sway*, *heave*, dan *roll* pada skenario *side by side offloading* kondisi 2

<p style="text-align: center;">Kondisi 2 – Arah pembebanan <math>0^\circ</math> – Hs 2 m</p>		
<p style="text-align: center;">Kondisi 2 - Arah pembebanan <math>0^\circ</math> – Hs 3 m</p>		
<p style="text-align: center;">Kondisi 2 - Arah pembebanan <math>0^\circ</math> – Hs 4 m</p>		
<p style="text-align: center;">Kondisi 2 - Arah pembebanan <math>0^\circ</math> – Hs 5 m</p>		





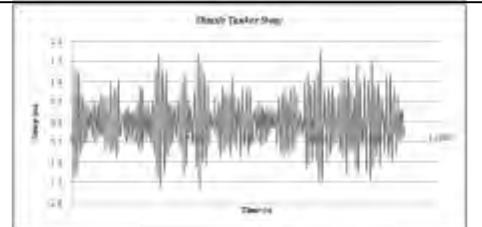
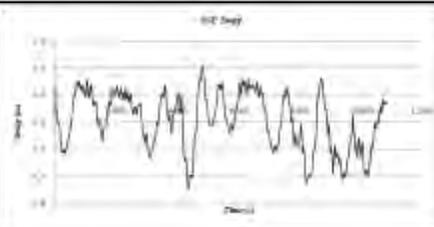
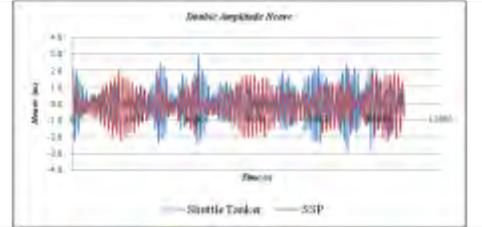
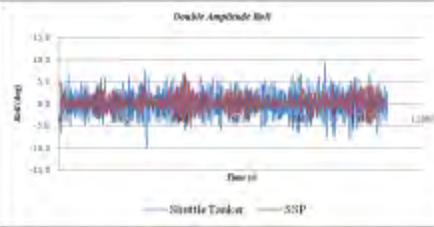
### LAMPIRAN C

Grafik *time history* respon gerak *sway*, *heave*, dan *roll* pada skenario *side by side offloading* kondisi 3

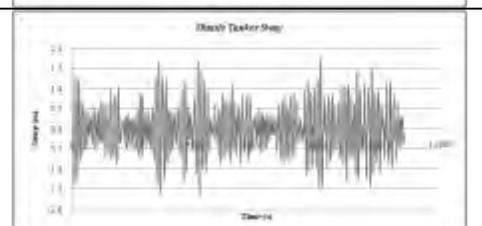
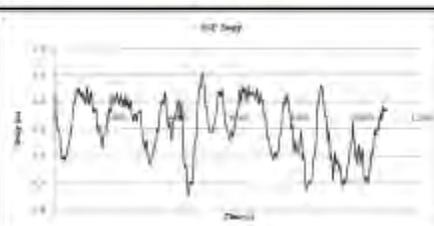
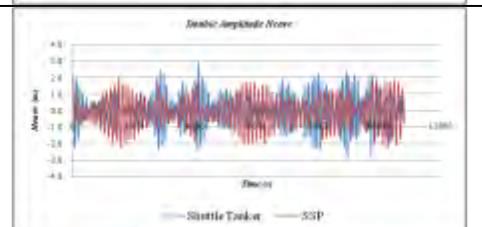
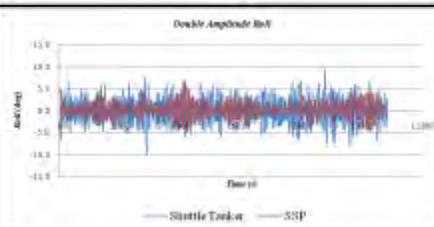
Kondisi 3 – Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 2 m	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Roll</p>	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Heave</p>
	<p style="text-align: center;">SSP Sway</p>	<p style="text-align: center;">Shuttle Tanker Sway</p>
Kondisi 3 - Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 3 m	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Roll</p>	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Heave</p>
	<p style="text-align: center;">SSP Sway</p>	<p style="text-align: center;">Shuttle Tanker Sway</p>
Kondisi 3 - Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 4 m	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Roll</p>	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Heave</p>
	<p style="text-align: center;">SSP Sway</p>	<p style="text-align: center;">Shuttle Tanker Sway</p>
Kondisi 3 - Arah pembebanan $0^\circ$ – Hs 5 m	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Roll</p>	<p style="text-align: center;">Deckle Amplitude Heave</p>
	<p style="text-align: center;">SSP Sway</p>	<p style="text-align: center;">Shuttle Tanker Sway</p>



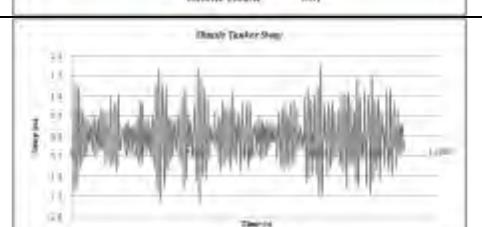
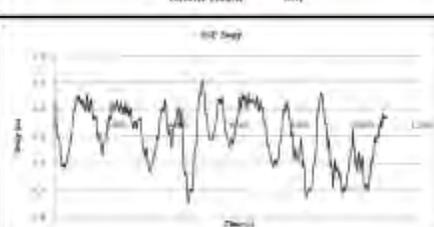
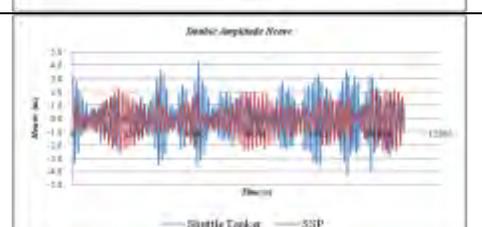
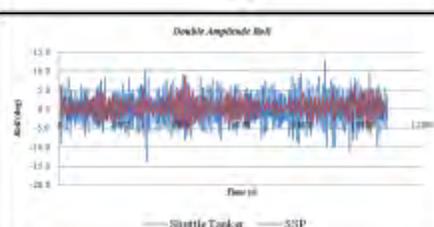
Kondisi 3 - Arah pembebanan  $45^\circ$  –  
Hs 2 m



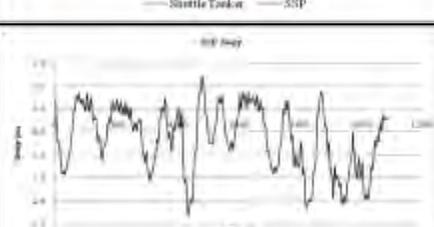
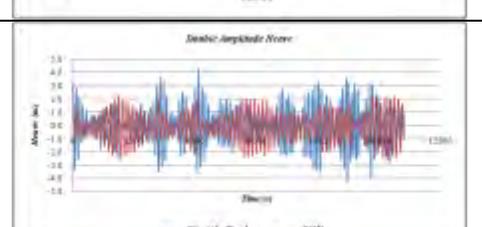
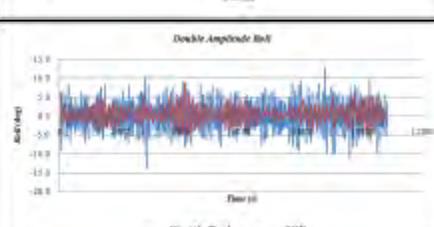
Kondisi 3 - Arah pembebanan  $45^\circ$  –  
Hs 3 m



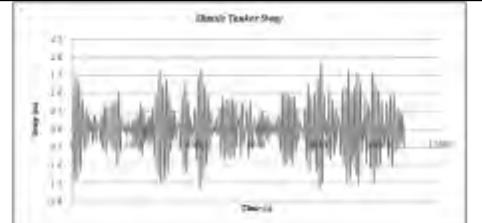
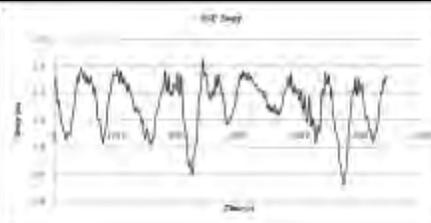
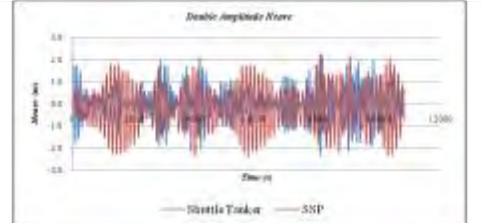
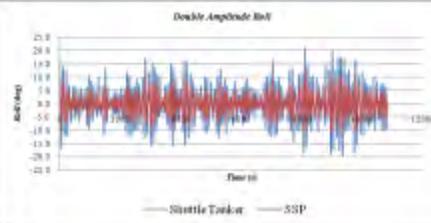
Kondisi 3 - Arah pembebanan  $45^\circ$  –  
Hs 4 m



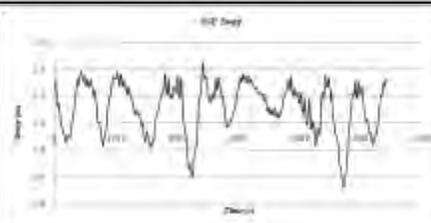
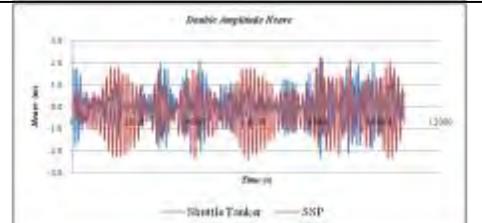
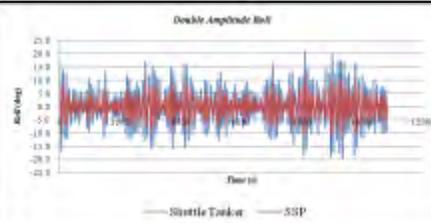
Kondisi 3 - Arah pembebanan  $45^\circ$  –  
Hs 5 m



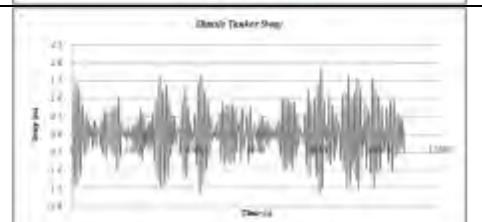
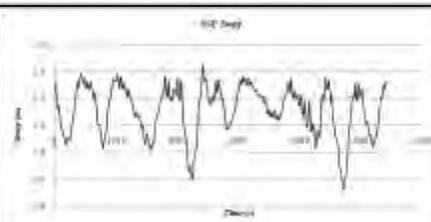
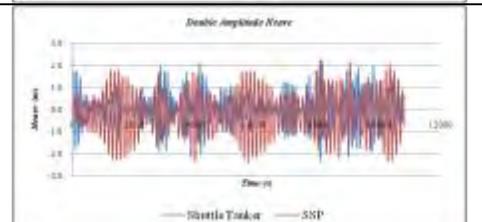
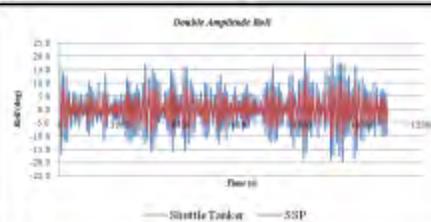
Kondisi 3 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 2 m



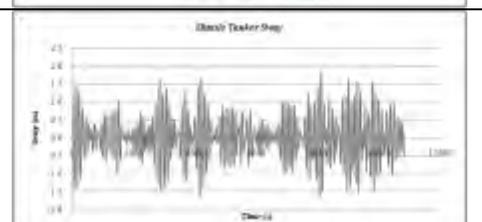
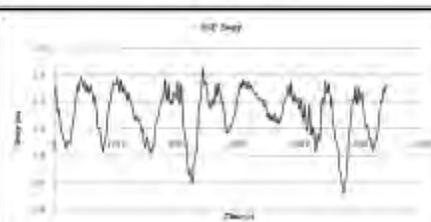
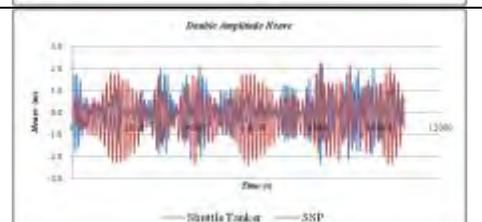
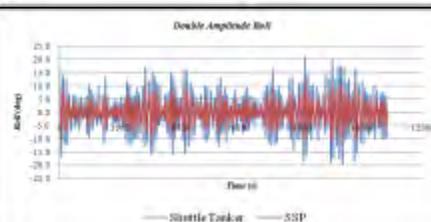
Kondisi 3 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 3 m



Kondisi 3 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 4 m



Kondisi 3 - Arah pembebanan  $90^\circ$  –  
Hs 5 m



## BAB V PENUTUP

### 5.1 SIMPULAN

Dari hasil analisis yang telah dilakukan terhadap interaksi hidrodinamis antara SSP dengan *Shuttle Tanker*, maka dapat disimpulkan bahwa

1. Pada kondisi tertambat dan beroperasi tunggal dengan dikenai beban lingkungan operasi, FPSO berlambung silinder Sevan mengalami respon gerak terbesar pada kondisi muatan 75% pada arah pembebanan  $0^\circ$  untuk gerak *surge* dan *pitch*, arah pembebanan  $45^\circ$  untuk gerak *heave* dan *yaw*, serta arah pembebanan  $90^\circ$  untuk gerak *sway* dan *roll*. *Tension* yang terjadi pada *mooring line* berada pada rentang nilai 2000 hingga 7000 kN rentang nilai *safety factor* 2 hingga 3.
2. Pada kondisi operasi *side by side offloading*, analisis lingkungan divariasikan sesuai dengan data sebaran gelombang. Tren kenaikan nilai *tension* dan ekskursi berbanding lurus dengan kenaikan nilai tinggi gelombang signifikan. Dari tiga macam arah pembebanan yang dilakukan, arah  $0^\circ$  berpengaruh pada respon gerak *surge* dan *pitch*, arah pembebanan  $45^\circ$  untuk gerak *heave* dan *yaw*, serta arah pembebanan  $90^\circ$  untuk gerak *sway* dan *roll*. *Tension* yang terjadi pada *mooring line* berada pada rentang nilai 2000 hingga 7000 kN. *Tension* yang terjadi pada tali tambat kapal berada pada rentang nilai 200 hingga 1500 kN dengan rentang nilai *safety factor* 0 hingga 3. Peluang terjadinya tubrukan yang terjadi antara SSP dengan *Shuttle Tanker* terbesar terletak pada analisis kondisi 3 yakni ketika muatan FPSO 75% dan muatan *Shuttle Tanker* 90%. Kondisi yang riskan tubrukan tersebut terjadi dikarenakan adanya *outer skirt* pada bagian bawah FPSO yang berdekatan dengan lambung kapal akibat perubahan sarat air kedua struktur ketika *offloading* terjadi.
3. Analisis operabilitas yang dilakukan terhadap SSP di perairan Blok Masela terdiri dari dua bagian yakni analisis operabilitas ketika SSP beroperasi tunggal tanpa adanya aktivitas *offloading* dan analisis ketika

SSP melakukan *side by side offloading* dengan *Shuttle Tanker* berkapasitas 35000 DWT. Diasumsikan operabilitas dalam penelitian kali ini hanya dipengaruhi oleh faktor lingkungan daerah lokasi. Analisis operabilitas operasi tunggal menghasilkan nilai operabilitas 100% dalam rentang kondisi lingkungan 1 tahunan sampai 100 tahunan. Sedangkan analisis operabilitas dari *side by side offloading* menghasilkan nilai 88.55% dengan batasan bahwa operasi *side by side offloading* antara SSP dengan *Shuttle Tanker* berkapasitas 35000 DWT hanya bisa dilakukan sampai pada tinggi gelombang signifikan 2 m.

## 5.2 SARAN

Kekurangsempurnaan penelitian ini masih ditemukan lantaran masih banyak hal-hal yang disederhanakan dan diabaikan, maka, untuk meningkatkan bahasan dalam penelitian selanjutnya, berikut ini beberapa saran yang dapat disampaikan

1. Diperlukan adanya analisis SSP mengikutsertakan pengaruh *riser*.
2. Analisis gaya yang terjadi pada *fender* perlu dilakukan.
3. Analisis *side by side offloading* dengan mempertimbangkan *standing wave*.
4. Analisis komparasi *offloading* dengan menggunakan dua metode lainnya yakni *tandem offloading* dan *offset side by side offloading*.
5. Analisis variasi jarak pada *offloading* berkonfigurasi *offset side by side*.

## DAFTAR PUSTAKA

- ABS MODU. 2012. *Rules for Building and Classing*. American Bureau of Shipping.
- Afriana, R. 2011. *Coupled Dynamic Analysis of Cylindrical FPSO, Moorings, and Riser Based on Numerical Simulation*. Master Thesis of Department of Offshore Technology, Faculty of Science and Technology. Stavanger : University of Stavanger.
- Aghnia, M. Z. 2013. *Analisis Operabilitas FSRU akibat Beban Lingkungan Berbasis Ranah Waktu*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- API RP 2SK 3<sup>rd</sup> edition. 2005. *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. American Petroleum Institute.
- Barras, C. B. 2004. *Ship Design and Performance for Masters and Mates*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Bhattacharyya, R. 1972. *Dynamics of Marine Vehicles*. New York : John Wileys and Sons.
- Bungawardani. 2007. *Analisis Perilaku Dinamis FPSO dengan Sistem External Turret Mooring*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- BV. 2015. *HydroSTAR v7.25 for Experts User Manual*. Paris : Bureau Veritas.
- BV. 2014. *Ariane7 User Manual*. Paris : Bureau Veritas.
- Chakrabarti, S. K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structure*. Boston : Computational Mechanics Publication Southampton.
- Chen, X. 2011. *Offshore Hydrodynamics and Applications*. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering . Paris.
- Dianiswara, A. 2013. *Kajian Operabilitas FSRU saat Siklus Offloading dengan Skema Side by Side akibat Pengaruh Cuaca*. Tesis Program Magister Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Djarmiko, E B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya : ITS Press.

- DNV OS E301. 2004. *Position Mooring*. Det Norske Veritas.
- Faltinsen, O. M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structure*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Fugro. 2012. *Abadi Gas Field Development Metocean Criteria for Masela Field*.
- Journée, J. M. J., et al. 2001. *Offshore Hydromechanics*. Delft : Delft University of Technology.
- Koo, B. J. dan M. H. Kim. 2006. *Global Analysis of FPSO and Shuttle Tankers during Side by Side Offloading*. Minerals Management Service under the MMS/OTRC Cooperative Research Agreement, 1435-01-99-CA 31003, Task Order 73604, MMS Project Number and OTC Industry Consortium. Texas.
- Kupras, L. K. 1976. *Optimisation Method and Parametric Design in Precontracted Ship Design*. International Shipbuilding Progress.
- Li, X, et al. 2006. *Research on Motion Response of Soft Yoke Mooring FPSO System*. Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco.
- Liu, Y. dan Miao Guoping. 1998. *Theory of Motion of Ships on Waves*. Shanghai : Shanghai Jiao Tong University Press.
- Mahdarreza A. 2010. *Analisis Perilaku Floating LNG pada Variasi Metocean terhadap Externeal Turret Mooring System berbasis Simulasi Time Domain*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Major, F. 2013. *Benefits of a Cylindrically Shaped Floater for an FPSO Application in Cyclone Exposed Environments*. Perth : INSTOK Deep Water Conference.
- OCIMF. 1994. *Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs, 2<sup>nd</sup> Edition*. Oil Companies International Marine Forum.
- OCIMF. 1997. *Mooring Equipment Guidelines 2<sup>nd</sup> Edition*. Oil Companies International Marine Forum.
- Outlook for Energy*. 2013. A view to 2040 <[www.exxonmobil.com](http://www.exxonmobil.com)>

- Perwitasari, R. N. 2010. *Hydrodynamics Interaction and Mooring Analysis for Offloading between FPSO and LNG Shuttle Tanker*. Master Thesis of Department of Marine Technology. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology.
- Portella, et al. 2001. *Deepwater Mooring Systems Design and Analysis*. PROJEMAR. Brazil.
- Prasiwi, Rizki Amalia. 2014. *Analisis Perilaku FPSO (Floating Production Storage and Offloading) terhadap Internal Turret Mooring System Berbasis Simulasi Time Domain*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sevan Marine. 2011. *Western Isles Development Project (WIDP) FPSO - FEED Study - Mooring Analysis Report*. 54850-SMA-J-RA-0010.
- Soetomo, J. 2010. *Hidrodinamika II*. Kumpulan Materi Kuliah Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Syvertsen, K. 2011. *The SSP : A New Class of Hull for the Oil Industry*. Trondheim.
- Tanker Shipping. 2014. *Tenacity Reflects a Determined Approach to Efficiency*. Tanker Shipping and Trade <[www.tankershipping.com](http://www.tankershipping.com)>
- The Yokohama Rubber Co. Ltd. 2006. *Yokohama Floating Fenders Pneumatic 50 & 60*. Tokyo.
- Thurston, S. P. and T. R. Bard. 2003. *Brazil's Evolving Deepwater Risk Reward Profile*. Proceedings of 2003 Offshore Technology Conference, OTC 15052.
- Vryhof. 2000. *Anchor Manual*. Amsterdam : Vryhof Anchor.
- Wichers, J. E.W. 1988. *Wave-current Interaction Effects on Moored Tankers in High Seas*. Offshore Technology Conference Paper No. OTC5631. Houston.
- Wibowo, Y. A. 2014. *Analisis Pengaruh Variasi Jarak Horizontal antara FSRU dan LNGC saat Side by Side Offloading Terhadap Perilaku Gerak Kapal dan Gaya Tarik Coupling Line*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

## BIODATA PENULIS



**Maria Putri Rosari**, merupakan mahasiswa Program Sarjana Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Lahir di Surabaya, 19 September 1994 dan menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas pada tahun 2012 di SMA PL Santo Yosef, Surakarta. Pada tahun 2016, penulis menyelesaikan Tugas Akhir sebagai syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS. Sebagai mahasiswa, penulis aktif terlibat dalam kegiatan-kegiatan organisasi mahasiswa seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan

dan Badan Eksekutif Mahasiswa. Penulis juga sering terlibat aktif dalam kegiatan-kegiatan sosial dalam bidang pendidikan seperti ITS Mengajar. Dalam menyelesaikan studinya, penulis juga sering dilibatkan dalam beberapa proyek rekayasa terkait bidang keilmuan Teknik Kelautan, meliputi proyek *risk assessment and integrity check* pada struktur Total E&P Indonesia, HCML *offshore jacket load out*, dan penelitian Kapal Perintis Ditjen Hubla. Penulis pernah menjalani magang kerja di PT ZEE Indonesia dan menguasai beberapa program terkait dengan bidang teknologi rekayasa lepas pantai, antara lain Bentley SACS, Bentley MOSES, Bentley Maxsurf, Orcina Orcaflex, BV HydroSTAR, dan BV Ariane.