



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Variasi Sudut Antar *Mooring Lines* Terhadap Olah Gerak *Floating Production Storage and Offloading (FPSO)* Dengan Sistem Tambat *Spread Mooring*

Rico Ade Putra ¹⁾, Deddy Chrismianto ¹⁾, Andi Trimulyono ¹⁾,

¹⁾Laboratorium Perancangan Kapal Dibantu Komputer

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*e-mail : ricoadeputra@students.undip.ac.id

Abstrak

Struktur lepas pantai berada dalam posisi tetap selama bertahun-tahun dan harus mampu menahan lingkungan yang keras. Dalam kondisi lingkungan aktual, analisis olah gerak FPSO berbasis data lingkungan aktual diperlukan untuk secara akurat menentukan atau memprediksi seakeeping FPSO sebelum operasi lepas pantai. Penelitian mengenai olah gerak FPSO sudah banyak dilakukan tetapi sebagian besar hanya berfokus pada struktur free surface saja. Pada kenyataannya, FPSO merupakan struktur yang perlu ditopang dengan sistem tahanan (*mooring*). Pada penelitian ini, penulis melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi sudut antar *mooring lines* terhadap olah gerak FPSO dengan 3 variasi sudut antar *mooring lines*. Analisis lanjutan berupa rekapitulasi dan pemeringkatan skenario sudut antar *mooring lines*. Penulis melakukan perhitungan olah gerak dan memodelkan *mooring lines* menggunakan bantuan perangkat lunak perkapalan. Hasil rekapitulasi RAO pada frequency domain menunjukkan bahwa sudut antar *mooring lines* sebesar 4^o menduduki peringkat pertama dengan 13 poin, diikuti dengan 3^o menduduki peringkat kedua dengan 12 poin, dan 5^o menduduki peringkat ketiga dengan 11 poin. Sedangkan untuk hasil rekapitulasi actual response pada time domain menunjukkan bahwa sudut antar *mooring lines* sebesar 4^o menduduki peringkat pertama dengan 15 poin, diikuti dengan 3^o menduduki peringkat kedua dengan 11 poin, dan 5^o menduduki peringkat ketiga dengan 10 poin.

Kata Kunci : FPSO, *Mooring Lines*, Olah Gerak,

1. PENDAHULUAN

Dalam upaya mengeksplorasi dan mengeksploitasi sumberdaya lautan, pada khususnya migas di lepas pantai, jangkauan operasinya telah berkembang dari perairan dangkal dengan kondisi lingkungan yang lunak menuju ke perairan sangat dalam dengan kondisi lingkungan yang semakin ganas. Sebagai konsekuensinya konfigurasi anjungan pun telah berkembang, dari bangunan terpancang seperti jacket menjadi anjungan terapung dengan berbagai konfigurasi. Salah satu struktur terapung yaitu FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). FPSO merupakan sebuah fasilitas terapung yang dipasang di sekitar ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang fungsinya untuk memenuhi kebutuhan fasilitas produksi. Pada proses eksplorasi dan

eksploitasi, platform akan melakukan proses pengeboran dan menghasilkan minyak dan gas mentah. Kemudian minyak dan gas mentah tersebut harus diproses menjadi minyak dan gas produk melalui FPSO [1].

Struktur lepas pantai seperti FPSO dioperasikan untuk mengembangkan lapangan minyak dan gas lepas pantai. Sebagian besar struktur lepas pantai harus dioperasikan selama 20 tahun di bawah lingkungan yang keras di lokasi sehingga struktur lepas pantai harus dirancang untuk tahan terhadap lingkungan yang keras. Kapal dapat menghindari lingkungan yang keras dengan mengubah rute operasinya atau dengan berlabuh di pelabuhan. Namun, struktur lepas pantai berada dalam posisi tetap selama bertahun-tahun dan harus mampu menahan lingkungan yang keras. Dalam kondisi lingkungan aktual, diperlukan untuk secara

akurat menentukan atau memprediksi olah gerak FPSO sebelum operasi lepas pantai.

Banyak studi eksperimental dan numerik telah dilakukan untuk menguji pengaruh bentuk lambung FPSO terhadap kinerja hidrodinamik pada gelombang beraturan dan tidak beraturan. Wichers [2] mempelajari FPSO yang ditambatkan di menara yang terkena kombinasi gelombang tidak beraturan dengan angin dan arus. Heurtier dkk. [3] menganalisis FPSO yang ditambatkan dengan dua metode yaitu digabungkan dan tidak digabungkan dalam lingkungan yang keras dan menyimpulkan bahwa analisis yang tidak digabungkan dapat digunakan dengan baik dalam desain awal FPSO tambatan. Pascoal dkk. [4] mempelajari perilaku hidrodinamik FPSO dengan delapan kolom secara eksperimental pada gelombang beraturan dan tidak beraturan. Kim dkk. [5] mengembangkan metode domain waktu untuk menganalisis gerakan FPSO yang ditambatkan menara. Hong dkk. [6] menyelidiki kinerja dinamis LNG-FPSO secara numerik. Chen, Sun dan Zhang [7] mengeksplorasi respon dinamis FPSO berbentuk kapal menggunakan perangkat lunak SEFAM di perairan dalam mengingat amplitudo gerak yang besar. Nishanth, John dan Whyte [8] melakukan analisis hidrodinamik tak berpasangan untuk mempelajari respons FPSO berbentuk kapal di bawah aksi gelombang acak searah. Nam, Kim dan Hong [9] melakukan studi komprehensif tentang masalah berlabuh FPSO dan kapal tanker ulang-alik dalam gelombang.

Somayajula dan Falzarona [10] menyelidiki FPSO berbentuk kapal dalam gelombang tidak beraturan. Mereka menggunakan program simulasi domain waktu untuk memasukkan gaya dan momen frekuensi perbedaan orde kedua. Dalam konteks yang sama, Roy dan Banik [11] melakukan pemeriksaan numerik terhadap respon FPSO berbentuk kapal yang terkena kombinasi gelombang, angin, dan arus. Mereka berasumsi FPSO tertambat di dasar laut yang landai dan gelombangnya tidak beraturan. Model numerik dan analisis diselesaikan menggunakan kode AQWA-ANSYS. Dalam beberapa tahun terakhir, FPSO tipe sandglass telah disajikan sebagai bentuk yang menarik untuk peningkatan kinerja hidrodinamika di laut yang ganas. Tidak hanya memiliki ruang penyimpanan minyak yang lebih besar dibandingkan anjungan laut tradisional, namun juga memiliki kinerja hidrodinamik dan kemampuan beradaptasi yang lebih baik terhadap lingkungan laut yang ekstrem. Konsep badan terapung yang modern dengan tipe sandglass yang inovatif dihadirkan oleh Vijayalakshmi dan Panneerselvam [12]. Mereka menyelidiki FPSO tipe pasir dengan penampang sembilan sisi di air es

secara numerik dan eksperimental. Mereka juga mempelajari pengaruh pelat redaman terhadap respon gerak FPSO tersebut. Yao, Wang dan Huang [13] menyelidiki masalah yang setara dan menyajikan hasil gerakan heave dan pitch dari FPSO tipe sandglass menggunakan metode analisis elemen batas dan spektrum dalam domain frekuensi. Dengan membandingkan hasil yang diperoleh pada benda terapung berbentuk silinder dan segi delapan, diketahui bahwa desain struktur dengan bentuk kaca pasir dapat meningkatkan stabilitas dan karakteristik hidrodinamik suatu FPSO.

Dalam konteks yang sama, Wang dkk. [14] menyelidiki FDPSO tipe pasir (Floating, Drilling, Production, Storage and Offloading) untuk meningkatkan kinerja hidrodinamik FDPSO tipe kapal tradisional dan silinder menggunakan metode berdasarkan teori potensial gelombang. Mereka menggunakan teori aliran potensial dan metode estimasi teknik untuk secara teoritis dan matematis menyimpulkan gaya eksitasi gelombang, massa tambahan dan frekuensi yang sesuai untuk RAO minimum (Response Airway Operator) gerakan heave untuk model tipe sandglass baru. Selain itu, frekuensi yang sesuai untuk RAO minimum dipilih sebagai variabel kontrol untuk merancang parameter bentuk dan dengan demikian meminimalkan respons gerakan heave. Dibandingkan dengan FPSO, FDPSO menunjukkan penambahan rig pengeboran dan oleh karena itu, model terapung yang relevan memiliki struktur kolam bulan berbentuk silinder dengan berbagai radius. Oleh karena itu, karakteristik gerakan heave dari FDPSO yang berbeda disimulasikan oleh BEM. Terakhir, gerak heave FDPSO tipe sandglass dibandingkan dengan yang berbentuk kapal dan silinder. Wang dkk. [15] mempelajari pengaruh parameter bentuk terhadap kinerja gerak FPSO tipe silinder dan kaca pasir pada gelombang reguler amplitudo kecil dan juga pengaruh beban variasi lambat orde kedua terhadap terjadinya kebasahan dek pada FPSO dengan geometri sederhana secara eksperimental dan numerik. Efek dari empat penampang berbeda terhadap kinerja hidrodinamik FPSO tipe sandglass yang terpapar gelombang reguler disajikan oleh Graylee dan Yousefifard [16]. Mereka menyimpulkan bahwa penampang polihedral memberikan karakteristik serupa dibandingkan dengan penampang melingkar tradisional. Jadi, jenis penampang sederhana untuk FPSO dapat digunakan karena biaya konstruksi produksi yang lebih sedikit.

Amplitudo gerakan *heave* dan *pitch* FPSO dengan penambahan peredam juga menjadi perhatian para peneliti. Fathi dan Kherian [17]

mempresentasikan penelitian yang berfokus pada prediksi gerakan roll FPSO berbentuk kapal. Makalah mereka berkontribusi pada pemahaman fisika peredaman gulungan melalui hasil pengujian model, simulasi CFD, dan prediksi aliran potensial. Selain itu, kode komputasi dikembangkan oleh Avalos dan Wanderley [18] untuk mensimulasikan osilasi gulungan paksa pada bagian tengah FPSO dengan berbagai jenis lunas lambung kapal. Konfigurasi lambung kapal yang diusulkan meningkatkan redaman gulungan FPSO. Peng dkk. [19] melakukan studi komprehensif tentang desain baru FPSO bernama Low-Motion FPSO. Ini terdiri dari lambung berbentuk kotak dengan tangki pemberat padat gantung bebas yang terletak jauh di bawah lunas lambung. Penambahan tangki ballast padat ke FPSO konvensional meningkatkan periode gerakan alami yang secara signifikan mengurangi gerakan dalam rentang frekuensi gelombang. Baru-baru ini Sathia dan Vijayalakshmi [20] melakukan percobaan pada model FPSO berbentuk non-kapal dengan berbagai ukuran pelat peredam yang dipasang pada lunas untuk mempelajari pengaruhnya terhadap respon kapal. Berdasarkan temuan mereka, pengurangan gerakan *heave* dan *pitch* FPSO secara signifikan dapat diamati dengan penyediaan pelat lunas.

Struktur FPSO terdiri dari sebuah struktur apung berbentuk sebuah kapal berukuran besar yang ditambatkan secara permanen di sekitar platform pengeboran. Beban lingkungan di sekitar FPSO dapat mempengaruhi gerakan (*motion*) FPSO saat melakukan operasinya dalam proses produksi. Untuk menjaga posisi FPSO agar tetap fixed heading dan meredam gaya dinamis, maka dibutuhkan sebuah sistem tambat (*mooring system*). Gaya-gaya yang terjadi pada sistem tambat sangatlah bergantung pada karakteristik gerakan FPSO, begitu pula sebaliknya.

Oleh sebab itu, sangat penting untuk menganalisis sistem tambat guna menjaga operabilitas dan keselamatan kinerja FPSO. Analisis terhadap sistem tambat dalam berbagai kondisi cuaca juga penting dilakukan untuk mengetahui pengaruh pendorong dan redaman dari sistem tambat pada berbagai moda gerakan dan kekuatan dari sistem tambat. Dengan menghitung

beban-beban lingkungan secara komprehensif akan diketahui respon dinamis struktur.

Spread mooring merupakan sistem tambat dengan multiple mooring legs yang dipasang menyebar pada bagian *bow* maupun *stern*. *Spread mooring* merupakan salah satu sistem tambat yang cocok untuk sarana tambat FPSO dimana sesuai fungsinya yaitu fasilitas produksi. Pada FPSO yang bagian atasnya terdapat fasilitas produksi *crude oil* dan LPG maka posisi *fixed heading* menjadi suatu kebutuhan yang penting. Maka dari itu digunakan sistem tambat spread mooring, karena pergerakan ataupun perputaran dari kapal sangat berpengaruh pada proses produksi LPG.

Penelitian ini akan menganalisis karakteristik perilaku olah gerak FPSO dengan membandingkan hasil RAO dan *actual response* pada FPSO tertambat mooring dalam tiga variasi sudut *mooring lines*. Pada analisa ini dilakukan dengan variasi sudut mooring line pada sistem tambat spread mooring, yaitu dengan 3° , 4° dan 5° . Analisis respon motion kapal dilakukan pada heading 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , dan 315° . Analisis dilakukan dengan menggunakan simulasi *frequency domain* dan *time domain*.

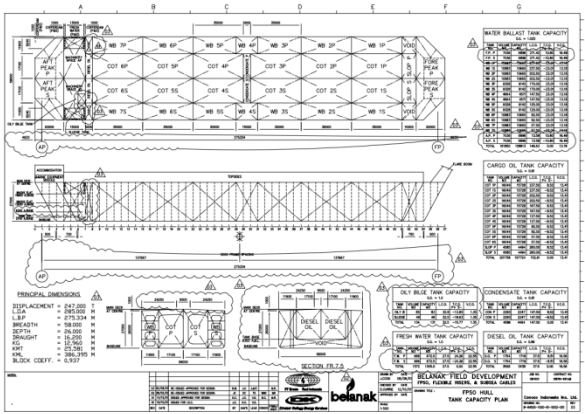
2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Objek yang diteliti dalam penelitian ini adalah FPSO Belanak yang berlokasi di *South Natuna Sea Block B*.

Tabel 1. Principal Dimension FPSO Belanak

PRINCIPAL PARTICULARS	
Length Overall (m)	285 m
Length WL (m)	275.33 m
Breadth Moulded (m)	58 m
Draught (m)	16.2 m
Depth at Side Moulded (m)	26 m



Gambar 1. General Arrangement FPSO

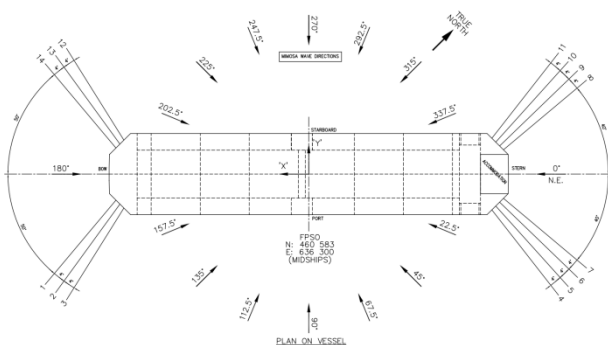
2.2. Data Kondisi Lingkungan Periode 100 Tahunan

Tabel 2. Data Kondisi Lingkungan Periode 100 Tahunan

	Direction From - Relative to True North							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Dir	225	180	135	90	45	0	315	270
Vw (m/s)	18	20	14	11	16	16	14	16
Vc (m/s)	0.7	0.9	0.9	0.5	0.6	0.9	0.9	0.6
Hs (m)	3,5	5,3	2,2	1,9	2,4	2,2	1,8	1,9
Tmin (s)	8,2	9,6	6,6	6,1	6,9	6,5	5,5	6,1
Tmax (s)	13,5	12,6	9,6	9,1	9,9	9,6	8,9	9,1
Hmax (m)	6,7	10,2	4,2	3,6	4,6	4,2	3,5	3,6

2.3. Coordinat Sistem

Pada penelitian ini, digunakan delapan arah beban lingkungan dengan arah *origin* pada arah *north east*.



Gambar 2. Environmental Heading Coordinate System

2.4. Parameter Penelitian

Penelitian ini digunakan untuk mengamati pengaruh dari besar sudut antar *mooring lines* terhadap olah gerak FPSO. Parameter yang dipakai adalah sebagai berikut :

- Parameter Tetap
Ukuran utama FPSO
- Parameter Tidak Tetap
Besar sudut antar *mooring lines*

Pada penelitian ini, penulis menggunakan 3 variasi sudut antar mooring lines yaitu 3°, 4°, dan 5° dengan nilai original data lapangan pada sudut 4°. Sudut tersebut dipilih dengan pertimbangan nilai sampel derajat diatas dan dibawah nilai yang digunakan di lapangan.

2.5. Design Criteria

Pada penelitian ini, permodelan FPSO divalidasi dengan mengacu pada regulasi ABS 2016 [21].

Tabel 3. Rules of ABS 2016

IACS 2013	
Hull Form Dependent	Maximum Error Presentage
Displacement	2%
Draught	1%
KG	1%
Transverse metacentric height	1%
Longitudinal metacentric height	1%
The block coefficient	1%

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Permodelan dan Validasi Model FPSO Kondisi Free Floating

Pemodelan struktur FPSO free floating yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan bantuan *software Rhino* dan *Maxsurf*, dengan berdasarkan pada data yang telah didapatkan yaitu dari *principal dimension* dan *General Arrangement (GA) FPSO*.



Gambar 3. Model 3D Hull FPSO

Apabila FPSO rancangan telah selesai dimodelkan, dilakukan perhitungan hidrostatis untuk mendapatkan displasemen serta ukuran-ukuran lain dari FPSO. Ukuran-ukuran tersebut kemudian digunakan untuk kepentingan validasi. Berikut adalah hasil validasi tersebut :

Tabel 5. Validasi Model

Validasi				% Error	Status
Parameter	Unit	Medco	Software Perkapalan		
Displacement	ton	247,000	247,549	0.2%	OK
T	m	16.2	16.2	0%	OK
KG	m	12.96	12.96	0%	OK
KMT	m	25.581	25.513	0.2%	OK
KML	m	386.395	386.066	0.08%	OK
Cb	-	0.937	0.939	%	OK

Pada tabel validasi, data yang didapatkan (medco) dibandingkan dengan data hasil perhitungan (*maxsurf*). Kemudian, dilakukan perhitungan presentase nilai *error* untuk kemudian disimpulkan apakah model yang dibuat masuk dalam standar yang ditentukan. Berdasarkan hasil perhitungan validasi model FPSO, diketahui bahwa model yang dibuat sudah memenuhi standar eror yang ditetapkan. Sehingga model yang dibuat dapat memasuki tahap analisis lanjutan.

3.2. Analisis Olah Gerak FPSO Kondisi *Free Floating*

Analisis olah gerak dalam penelitian ini dilakukan dengan melakukan perhitungan nilai RAO menggunakan bantuan *software*. *Response Amplitude Operators* (RAO) adalah fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur lambung. RAO dapat juga didefinisikan sebagai hubungan antara amplitudo responkapal terhadap amplitudo gelombang. Dapat dinyatakan dengan bentuk matematis yaitu ($\zeta_{respon}/\zeta_{gelombang}$).

Bentuk umum dari persamaan RAO dalam fungsi frekuensi adalah sebagai berikut :

$$S_{\phi}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) |H(\omega_e)|^2 \quad (1)$$

$$S_{\phi}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) \left| \frac{\phi_a}{\zeta_a} \right|^2 \quad (2)$$

$$RAO = \left| \frac{\text{Amplitudo respon gerakan}}{\text{amplitudo gelombang}} \right|^2 = \left| \frac{\phi_a}{\zeta_a} \right|^2 \quad (3)$$

Dimana :

$S_{\phi}(\omega_e)$ = Fungsi densitas spectrum gelombang [m²-det]

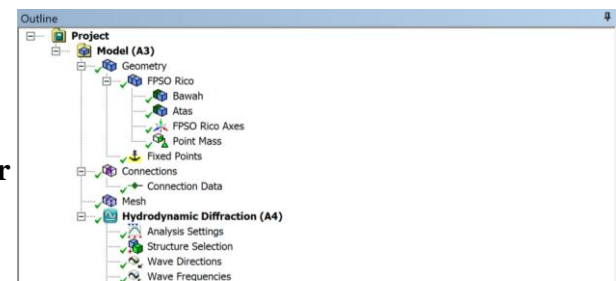
$S_{\zeta}(\omega_e)$ = Fungsi densitas spectrum respon gerakan [m²-det]

Nilai RAO yang didapat berdasarkan perhitungan dan analisa pada lambung kapal FPSO Belanak dengan ukuran sebenarnya dengan menggunakan *software Ansys Aqwa*. Analisa respon motion kapal dilakukan pada 6 derajat kebebasan FPSO dan dilakukan pada sudut heading 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, dan 315° pada kondisi *free floating*. Berikut adalah hasil resume nilai maksimal RAO untuk 6 derajat kebebasan FPSO pada sudut heading 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, dan 315° :

Tabel 6. Resume nilai RAO tertinggi untuk 6 derajat kebebasan FPSO kondisi *free floating*

Heading	Roll (°/m)	Pitch (°/m)	Yaw (°/m)	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)
0°	9,719 E-05	0,587	2,435 E-05	0,275	1,878 E-05	0,315
45°	0,438	0,716	0,350	0,387	0,394	0,694
90°	1,436	0,001 E1	0,001 E1	6,615 E-05	0,837	1,508
135°	0,438	0,716	0,350	0,387	0,394	0,694
180°	8,806 E-05	0,587	2,604 E-05	0,275	2,281 E-05	0,315
225°	0,438	0,716	0,350	0,387	0,394	0,694
270°	1,436	9,825 E-05	0,001 E1	6,341 1E-05	0,837	1,508
315°	0,438	0,716	0,350	0,386	0,394	0,694

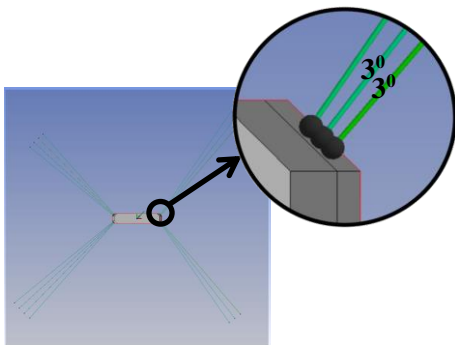
Dari hasil perhitungan RAO untuk kondisi *free surface*, kita mengetahui bahwa nilai RAO maksimum dicapai pada kondisi heave pada sudut heading 270° dengan nilai 1.508 m/m. Pada kondisi roll, RAO tertinggi terjadi pada heading 270° dengan nilai 1.436. Pada kondisi pitch, RAO tertinggi terjadi pada heading 225° dengan nilai 0.716. Pada kondisi yaw, RAO tertinggi terjadi pada heading 135° dengan nilai 0.35. Pada kondisi surge, RAO tertinggi terjadi pada heading 135° dengan nilai 0.387. Pada kondisi sway, RAO tertinggi terjadi pada heading 270° dengan nilai 0.837.



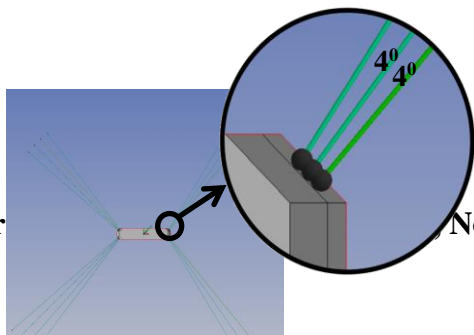
Gambar 6. *Outline Frame Capturing Analysis Hydrodynamic Diffraction pada FPSO Free Surface*

3.3. Permodelan Spread Mooring FPSO dengan Variasi Sudut Antar Mooring Lines

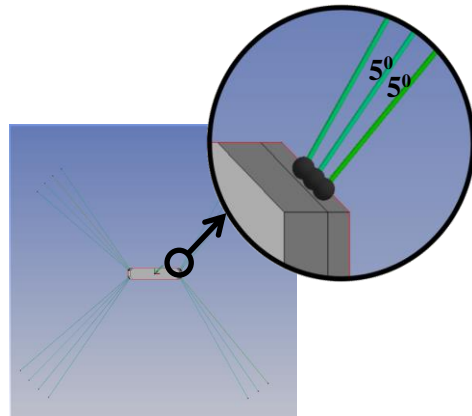
Spread mooring FPSO dengan variasi sudut antar *mooring lines* dimodelkan dengan menggunakan bantuan *software ansys aqwa*. Penulis tidak melakukan perubahan pada panjang *mooring lines*. Untuk jumlah total *mooring lines* disamakan dengan data real FPSO Belanak di lapangan yaitu berjumlah 14 *mooring lines*. Jumlah *mooring lines* juga disamakan dengan kondisi asli FPSO Belanak yakni 8 *mooring lines* di bagian haluan (4 *starboard* dan 4 *portside*) dan 6 *mooring lines* di bagian buritan (3 *starboard* dan 3 *portside*). Pada setiap variasi/skenario, sudut konfigurasi untuk haluan dan buritan tidak diubah. Untuk haluan yakni sebesar 80° dan untuk buritan yakni 100° . Sudut konfigurasi haluan 80° berasal dari 40° ke kanan dari center line dan 40° ke kiri dari center line. Sedangkan sudut konfigurasi haluan 100° berasal dari 50° ke kanan dari center line dan 50° ke kiri dari center line.



Gambar 4. *Spread Mooring FPSO dengan sudut antar mooring lines sebesar 3°*



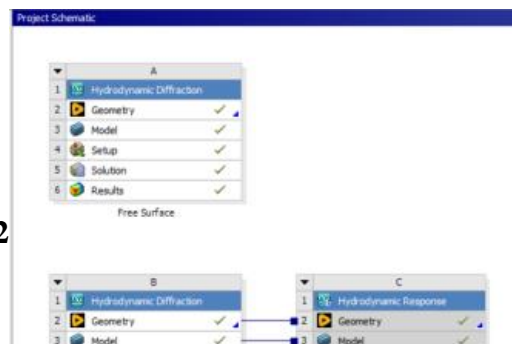
Gambar 5. *Spread Mooring FPSO dengan sudut antar mooring lines sebesar 4°*



Gambar 6. *Spread Mooring FPSO dengan sudut antar mooring lines sebesar 5°*

Langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut :

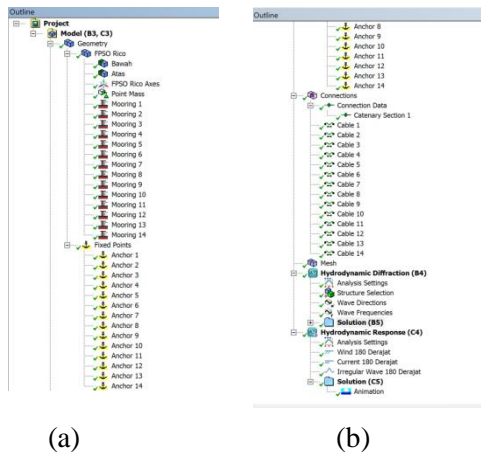
1. Menentukan posisi/koordinat x,y,z dari *fixed points/anchor*.
2. Menentukan posisi/koordinat x,y,z dari *connection point/mooring*.
3. Menghubungkan *anchor* dan *mooring* melalui *insert connection*, kemudian pilih *cable*. Untuk data *catenary section*, disesuaikan dengan data yang didapatkan dari data mooring FPSO.



Gambar 9. Grafik RAO Roll Skenario I

Berdasarkan Gambar 11, nilai puncak *roll* maksimum terjadi pada *heading* 315⁰ dengan nilai RAO 17,2938 ⁰/m. Sedangkan nilai *roll* puncak minimum terjadi pada *heading* 0⁰ dengan nilai RAO 0,0755 ⁰/m. Hal ini disebabkan karena terdapat mooring dan posisi FPSO yang dibuat miring dengan arah *heading* 0⁰ Arah Timur Laut sehingga menyebabkan sedikit perubahan pada posisi maksimum *Roll*.

Gambar 7. *Frame Capturing* pada *Project Schematic* variasi sudut antar *mooring lines*



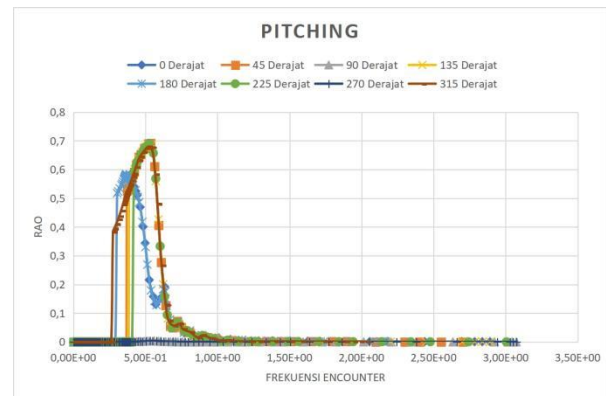
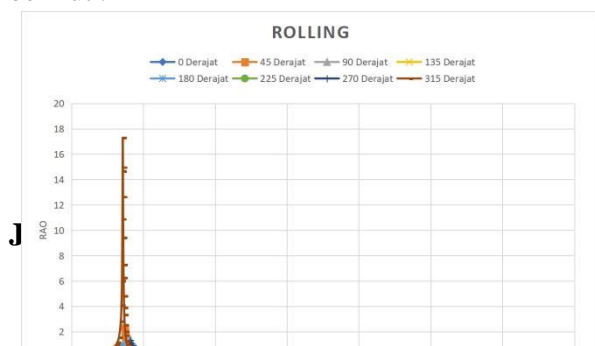
(a)

(b)

Gambar 8. (a) *Frame Capturing* pada *Outline Mooring* dan *Anchor* ; (b) *Frame Capturing* pada *Outline Cable (chain)*

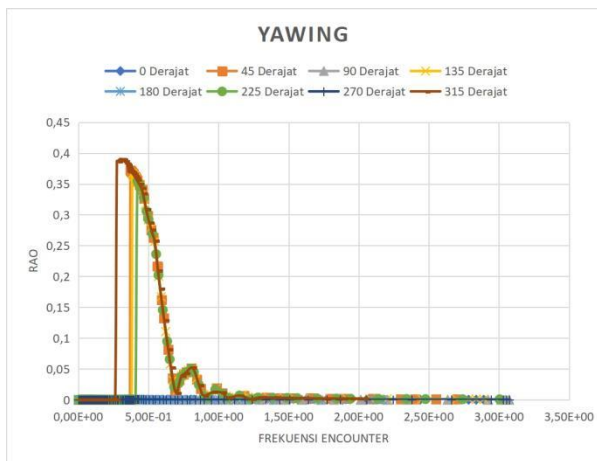
3.1. Analisis Olah Gerak FPSO pada Skenario I (Sudut Antar *Mooring Lines* 3⁰) dengan Frekuensi Domain

Berdasarkan hasil pengolahan data dari *software ansys aqwa*, didapatkan hasil berupa grafik untuk Respons Amplitude Operators(RAO) untuk keenam derajat kebebasan FPSO sebagai berikut :



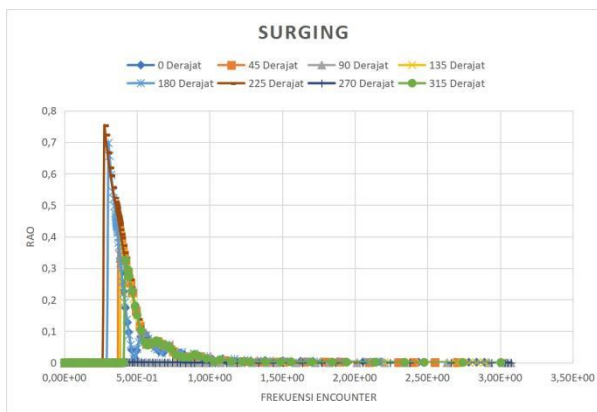
Gambar 12. Grafik RAO *Pitch* Skenario I

Berdasarkan Gambar 12, nilai puncak *pitch* maksimum terjadi pada *heading* 225⁰ dengan nilai RAO 0,691 ⁰/m. Sedangkan nilai *pitch* puncak minimum terjadi pada *heading* 90⁰ dengan nilai RAO 0,003 ⁰/m. *Pitch* tertinggi terjadi pada sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat *pitch* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *pitch* yaitu 90⁰.



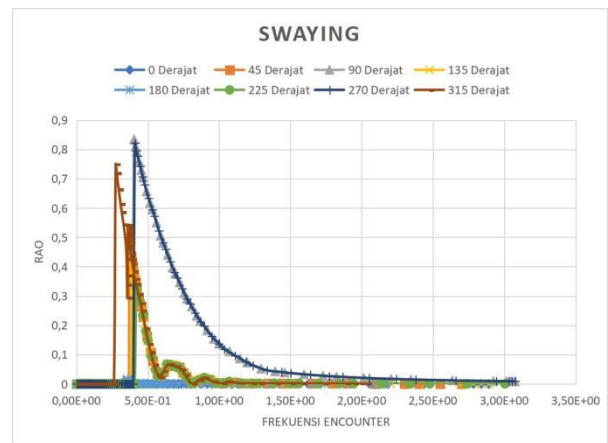
Gambar 13. Grafik RAO Yaw Skenario I

Berdasarkan Gambar 13, nilai puncak *yaw* maksimum terjadi pada *heading* 315⁰ dengan nilai RAO 0,3901 ⁰/m. Sedangkan nilai *yaw* minimum terjadi pada *heading* 0⁰ dengan nilai RAO 0,0001 ⁰/m. *Yaw* tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *yaw* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *yaw* yaitu 0⁰.



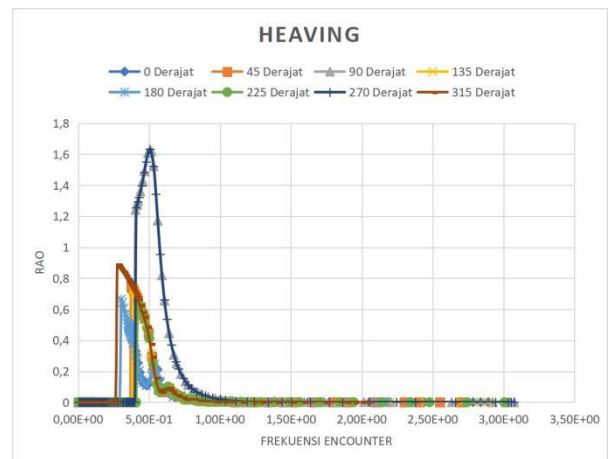
Gambar 14. Grafik RAO Surge Skenario I

Berdasarkan Gambar 14, nilai puncak *surge* maksimum terjadi pada *heading* 225⁰ dengan nilai RAO 0,7522 m/m. Sedangkan nilai *surge* minimum terjadi pada *heading* 270⁰ dengan nilai RAO 0,0017 m/m. *Surge* tertinggi terjadi pada sudut 225⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *surge* dimana bergerak translasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *surge* yaitu 270⁰.



Gambar 15. Grafik RAO Sway Skenario I

Berdasarkan Gambar 15, nilai puncak *sway* maksimum terjadi pada *heading* 90⁰ dengan nilai RAO 0,8343 m/m. Sedangkan nilai *sway* minimum terjadi pada *heading* 0⁰ dengan nilai RAO 0,0011 m/m. *Sway* tertinggi terjadi pada sudut 90⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *sway* dimana bergerak translasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *sway* yaitu 0⁰.

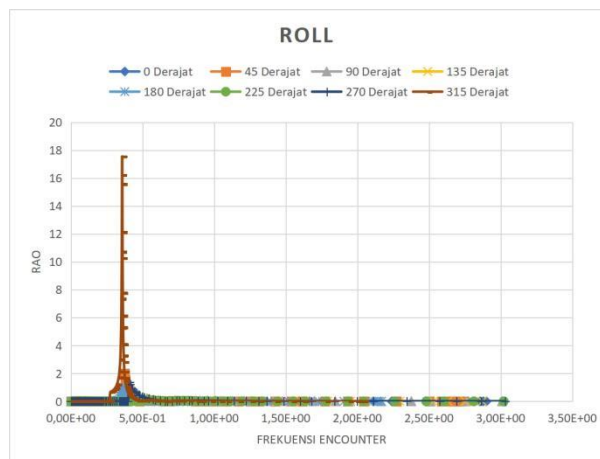


Gambar 16. Grafik RAO Heave Skenario I

Berdasarkan Gambar 16, nilai puncak *heave* maksimum terjadi pada *heading* 270⁰ dengan nilai RAO 1,6345 m/m. Sedangkan nilai *heave* minimum terjadi pada *heading* 0⁰ dengan nilai RAO 0,3907 m/m. *Heave* tertinggi terjadi pada sudut 270⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *heave* dimana bergerak translasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *heave* yaitu 0⁰.

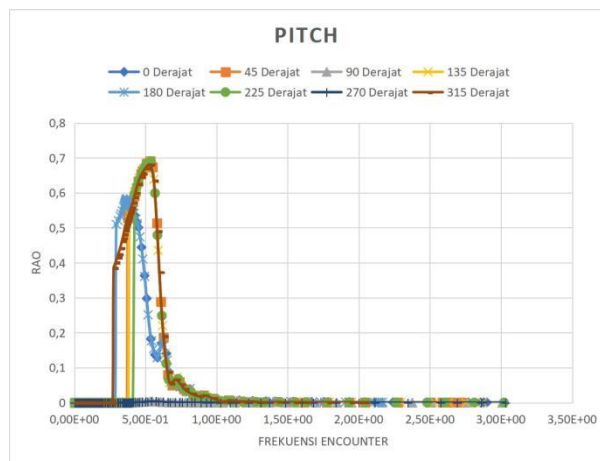
3.2. Analisis Olah Gerak FPSO pada Skenario II (Sudut Antar *Mooring Lines* 4⁰) dengan Frekuensi Domain

Berdasarkan hasil pengolahan data dari *software ansys aqwa*, didapatkan hasil berupa grafik untuk *Respons Amplitude Operators (RAO)* untuk keenam derajat kebebasan FPSO sebagai berikut :



Gambar 17. Grafik RAO Roll Skenario II

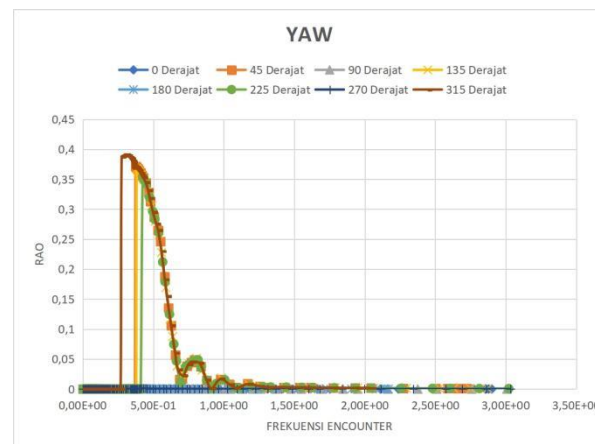
Berdasarkan Gambar 17, nilai puncak *roll* maksimum terjadi pada *heading* 315⁰ dengan nilai RAO 17,5369 ⁰/m. Sedangkan nilai *roll* puncak minimum terjadi pada *heading* 0⁰ dengan nilai RAO 0,0864 ⁰/m. *Roll* tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *roll* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *roll* yaitu 0⁰. *Roll* tertinggi pada sudut 315⁰ juga disebabkan karena terdapat mooring dan posisi FPSO yang dibuat miring dengan arah *heading* 0⁰ Arah Timur Laut sehingga menyebabkan sedikit perubahan pada posisi maksimum *Roll*.



Gambar 18. Grafik RAO Pitch Skenario II

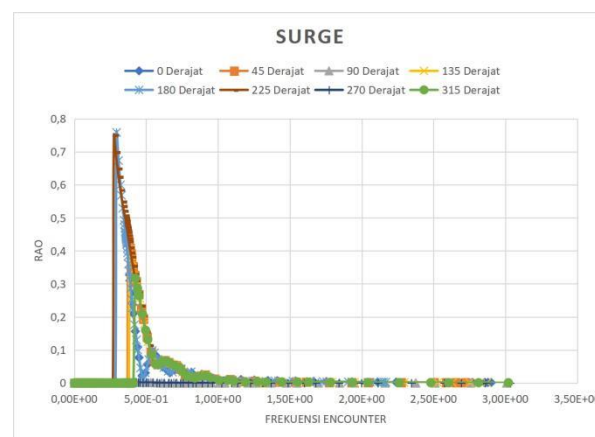
Berdasarkan Gambar 18, nilai puncak *pitch* maksimum terjadi pada *heading* 225⁰ dengan nilai RAO 0,6902 ⁰/m. Sedangkan nilai *pitch* puncak

minimum terjadi pada *heading* 90⁰ dengan nilai RAO 0,0032 ⁰/m. *Pitch* tertinggi terjadi pada sudut 225⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *pitch* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *pitch* yaitu 90⁰.



Gambar 19. Grafik RAO Yaw Skenario II

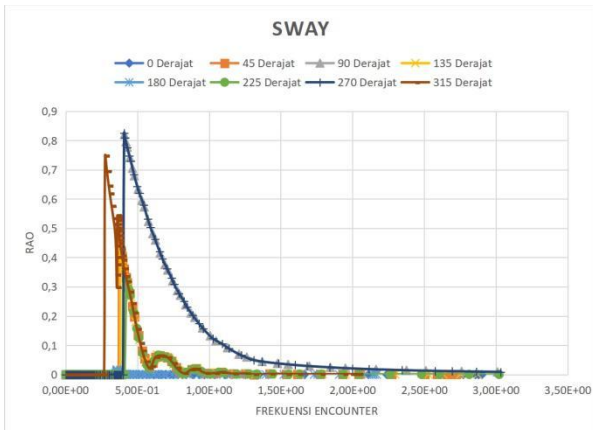
Berdasarkan Gambar 19, nilai puncak *yaw* maksimum terjadi pada *heading* 315⁰ dengan nilai RAO 0,3912 ⁰/m. Sedangkan nilai *yaw* puncak minimum terjadi pada *heading* 0⁰ dengan nilai RAO 0,0001 ⁰/m. *Yaw* tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *yaw* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *yaw* yaitu 0⁰.



Gambar 20. Grafik RAO Surge Skenario II

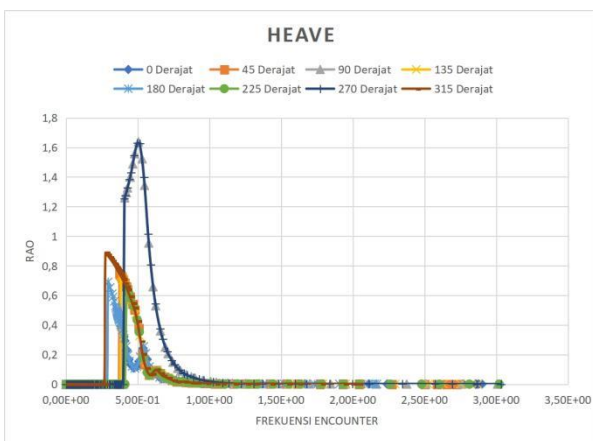
Berdasarkan Gambar 20, nilai puncak *surge* maksimum terjadi pada *heading* 180⁰ dengan nilai RAO 0,7581 m/m. Sedangkan nilai *surge* puncak minimum terjadi pada *heading* 270⁰ dengan nilai RAO 0,0018 m/m. *Surge* tertinggi terjadi pada sudut 180⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat

surge dimana bergerak translasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *surge* yaitu 270° .



Gambar 21. Grafik RAO Sway Skenario II

Berdasarkan Gambar 21, nilai puncak *sway* maksimum terjadi pada *heading* 270° dengan nilai RAO 0,8252 m/m. Sedangkan nilai *sway* puncak minimum terjadi pada *heading* 0° dengan nilai RAO 0,0012 m/m. *Sway* tertinggi terjadi pada sudut 270° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *sway* dimana bergerak translasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *sway* yaitu 0° .

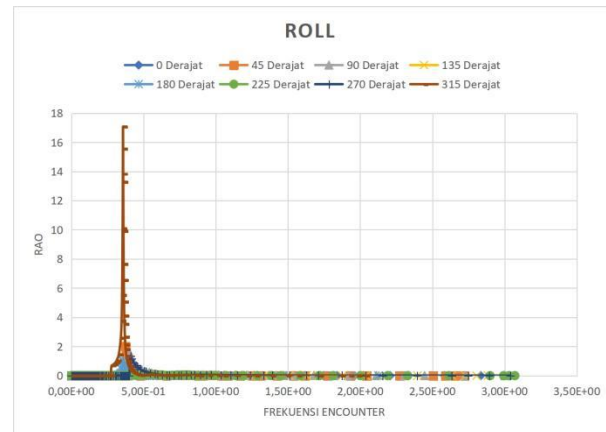


Gambar 22. Grafik RAO Heave Skenario II

Berdasarkan Gambar 22, nilai puncak *heave* maksimum terjadi pada *heading* 90° dengan nilai RAO 1,6365 m/m. Sedangkan nilai *heave* puncak minimum terjadi pada *heading* 0° dengan nilai RAO 0,3956 m/m. *Heave* tertinggi terjadi pada sudut 90° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *heave* dimana bergerak translasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *heave* yaitu 0° .

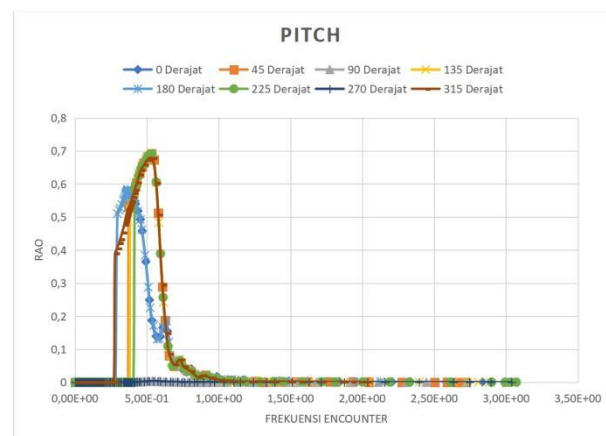
3.3. Analisis Olah Gerak FPSO pada Skenario III (Sudut Antar *Mooring Lines* 5°) dengan Frekuensi Domain

Berdasarkan hasil pengolahan data dari *software ansys aqwa*, didapatkan hasil berupa grafik untuk Respons Amplitude Operators (RAO) untuk keenam derajat kebebasan FPSO sebagai berikut :



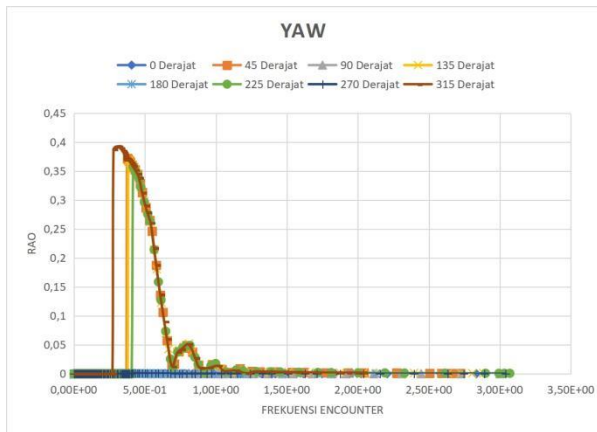
Gambar 23. Grafik RAO Roll Skenario III

Berdasarkan Gambar 23, nilai puncak *roll* maksimum terjadi pada *heading* 315° dengan nilai RAO 17,0553 $^{\circ}$ /m. Sedangkan nilai *roll* puncak minimum terjadi pada *heading* 0° dengan nilai RAO 0,0864 $^{\circ}$ /m. *Roll* tertinggi terjadi pada sudut 315° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *roll* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *roll* yaitu 0° . *Roll* tertinggi pada sudut 315° juga disebabkan karena terdapat *mooring* dan posisi FPSO yang dibuat miring dengan arah *heading* 0° Arah Timur Laut sehingga menyebabkan sedikit perubahan pada posisi maksimum *Roll*.



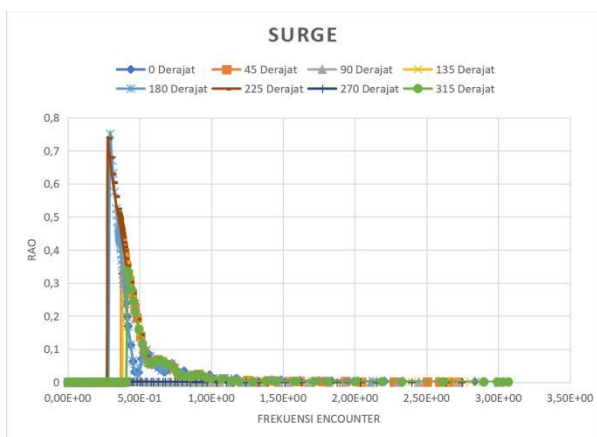
Gambar 24. Grafik RAO Pitch Skenario III

Berdasarkan Gambar 24, nilai puncak *pitch* maksimum terjadi pada heading 45° dengan nilai RAO $0,6917 \text{ }^{\circ}/\text{m}$. Sedangkan nilai *pitch* minimum terjadi pada heading 90° dengan nilai RAO $0,003 \text{ }^{\circ}/\text{m}$. *Pitch* tertinggi terjadi pada sudut 45° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *pitch* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu *y*. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *pitch* yaitu 90° .



Gambar 25. Grafik RAO Yaw Skenario III

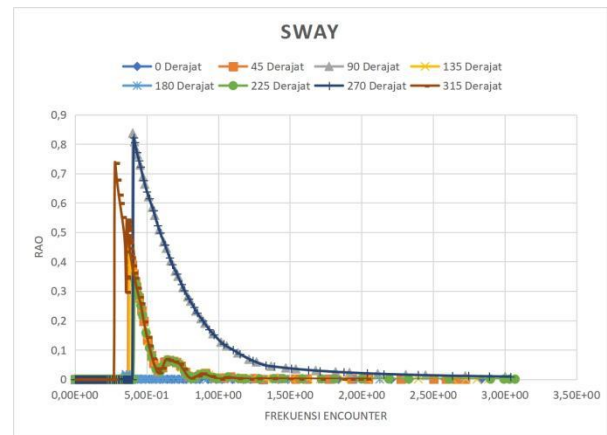
Berdasarkan Gambar 25, nilai puncak *yaw* maksimum terjadi pada heading 315° dengan nilai RAO $0,3923 \text{ }^{\circ}/\text{m}$. Sedangkan nilai *yaw* minimum terjadi pada heading 0° dengan nilai RAO $0,0001 \text{ }^{\circ}/\text{m}$. *Yaw* tertinggi terjadi pada sudut 315° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *yaw* dimana bergerak rotasi terhadap sumbu *z*. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *yaw* yaitu 0° .



Gambar 26. Grafik RAO Surge Skenario III

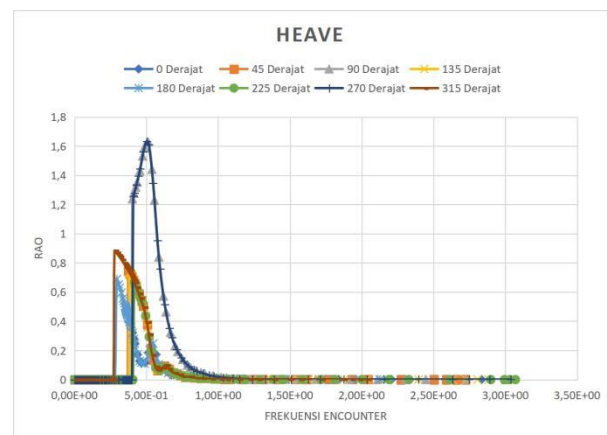
Berdasarkan Gambar 26, nilai puncak *surge* maksimum terjadi pada heading 180° dengan nilai RAO $0,7506 \text{ m}/\text{m}$. Sedangkan nilai *surge* minimum terjadi pada heading 270° dengan nilai RAO $0,0017 \text{ m}/\text{m}$. *Surge* tertinggi terjadi pada

sudut 180° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *surge* dimana bergerak translasi terhadap sumbu *x*. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *surge* yaitu 270° .



Gambar 27. Grafik RAO Sway Skenario III

Berdasarkan Gambar 27, nilai puncak *sway* maksimum terjadi pada heading 90° dengan nilai RAO $0,8372 \text{ m}/\text{m}$. Sedangkan nilai *sway* minimum terjadi pada heading 0° dengan nilai RAO $0,0012 \text{ m}/\text{m}$. *Sway* tertinggi terjadi pada sudut 90° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *sway* dimana bergerak translasi terhadap sumbu *y*. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *sway* yaitu 0° .



Gambar 28. Grafik RAO Heave Skenario III

Berdasarkan Gambar 28, nilai puncak *heave* maksimum terjadi pada heading 270° dengan nilai RAO $1,6335 \text{ m}/\text{m}$. Sedangkan nilai *heave* minimum terjadi pada heading 0° dengan nilai RAO $0,3961 \text{ m}/\text{m}$. *Heave* tertinggi terjadi pada sudut 270° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah *head* yang sesuai/searah dengan sifat *heave* dimana bergerak translasi terhadap sumbu *z*.

Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah *heave* yaitu 0° .

3.4. Rekapitulasi Nilai RAO terbaik Frekuensi Domain

Setelah hasil perhitungan nilai RAO untuk 6 derajat kebebasan FPSO untuk masing-masing skenario didapatkan, dilakukan analisis untuk mendapatkan rekomendasi sudut antar *mooring lines*. Hal ini dilakukan dengan menganalisis nilai maksimum RAO pada tiap derajat kebebasan FPSO, tiap derajat sudut heading, dan tiap skenario sudut antar *mooring lines* FPSO. Kemudian, dilakukan pemeringkatan nilai RAO pada tiap derajat kebebasan FPSO. Berikut adalah tabel hasil rekapitulasi nilai RAO terbaik :

Tabel 7. Rekapitulasi Nilai RAO Roll

RAO Roll Terbaik			
No	Skenario	Nilai RAO	Posisi Heading
1	5°	17,0553	315°
2	3°	17,2938	315°
3	4°	17,5369	315°

Tabel 8. Rekapitulasi Nilai RAO Pitch

RAO Pitch Terbaik			
No	Skenario	Nilai RAO	Posisi Heading
1	4°	0,6902	225°
2	3°	0,691	225°
3	5°	0,6917	45°

Tabel 9. Rekapitulasi Nilai RAO Yaw

RAO Yaw Terbaik			
No	Skenario	Nilai RAO	Posisi Heading
1	3°	0,3901	315°
2	4°	0,3912	315°
3	5°	0,3923	315°

Tabel 10. Rekapitulasi Nilai RAO Surge

RAO Surge Terbaik			
No	Skenario	Nilai RAO	Posisi Heading
1	5°	0,7506	180°
2	3°	0,7522	225°
3	4°	0,7581	180°

Tabel 11. Rekapitulasi Nilai RAO Sway

RAO Sway Terbaik			
No	Skenario	Nilai RAO	Posisi Heading
1	4°	0,8252	270°
2	3°	0,8343	90°
3	5°	0,8372	90°

Tabel 12. Rekapitulasi Nilai RAO Heave

RAO Heave Terbaik			
No	Skenario	Nilai RAO	Posisi Heading
1	4°	1,6365	90
2	5°	1,6335	270
3	3°	1,6345	270

Setelah dilakukan analisis nilai RAO terbaik untuk tiap derajat kebebasan FPSO, dilakukan analisis lanjutan berupa pemeringkatan untuk seluruh skenario pada seluruh derajat kebebasan FPSO. Pemeringkatan akhir dilakukan dengan memberikan poin 3 untuk skenario yang menduduki peringkat 1, poin 2 untuk skenario yang menduduki peringkat 2, dan poin 1 untuk skenario yang menduduki peringkat 3. Hasil pemeringkatan tertera dalam tabel berikut :

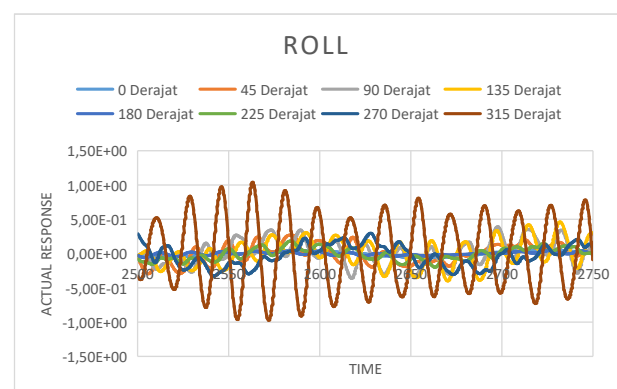
Tabel 13. Rekapitulasi Pemeringkatan Skenario

Rekapitulasi Pemeringkatan Skenario		
No	Skenario	Total Poin
1	4°	13
2	3°	12
3	5°	11

Berdasarkan hasil pemeringkatan skenario, diketahui bahwa FPSO dengan sudut antar *mooring lines* sebesar 4° memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan skenario yang lain yaitu 3° dan 5° . Pada keadaan sebenarnya, sudut antar *mooring lines* yang diaplikasikan pada FPSO Belanak di lapangan adalah 4° . Sehingga menurut perhitungan dan skenario yang penulis buat, sudut antar *mooring lines* yang telah diaplikasikan oleh FPSO Belanak sudah sesuai.

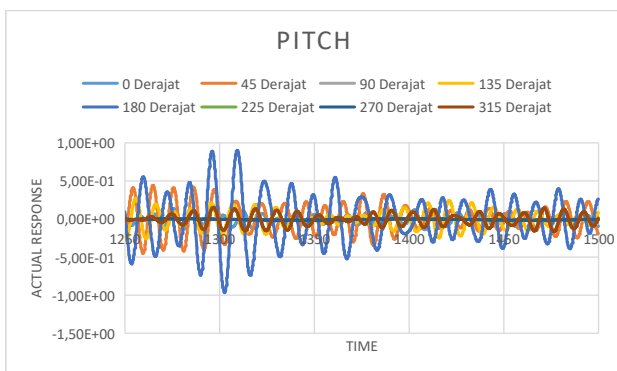
3.5. Analisis Olah Gerak FPSO pada Skenario I (Sudut Antar *Mooring Lines* 3°) dengan Time Domain

Berdasarkan hasil pengolahan data dari *software ansys aqwa*, didapatkan hasil berupa grafik untuk *actual response* untuk keenam derajat kebebasan FPSO sebagai berikut :



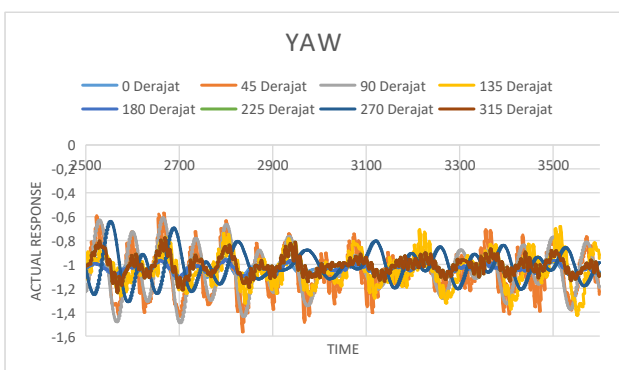
Gambar 27 Grafik Actual Response Roll Skenario I

Berdasarkan Gambar 27, nilai puncak roll maksimum terjadi pada heading 315⁰ dengan nilai Actual Response 1,52 ⁰/m. Sedangkan nilai roll puncak minimum terjadi pada heading 180⁰ dengan nilai Actual Response 0,21 ⁰/m. Roll tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat roll dimana bergerak rotasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah roll yaitu 180⁰.



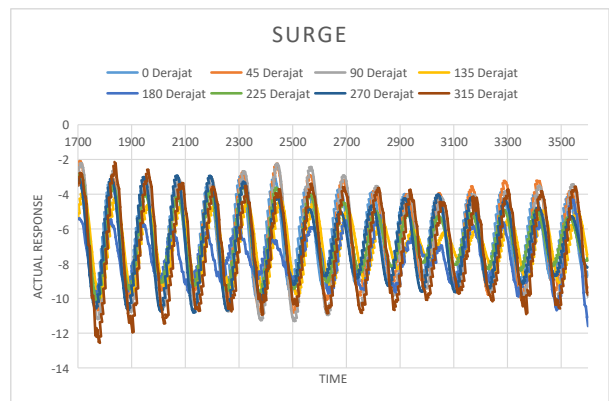
Gambar 28 Grafik Actual Response Pitch Skenario I

Berdasarkan Gambar 28, nilai puncak pitch maksimum terjadi pada heading 315⁰ dengan nilai Actual Response 1,99 ⁰/m. Sedangkan nilai pitch puncak minimum terjadi pada heading 270⁰ dengan nilai Actual Response 0,01 ⁰/m. Pitch tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat pitch dimana bergerak rotasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah pitch yaitu 270⁰.



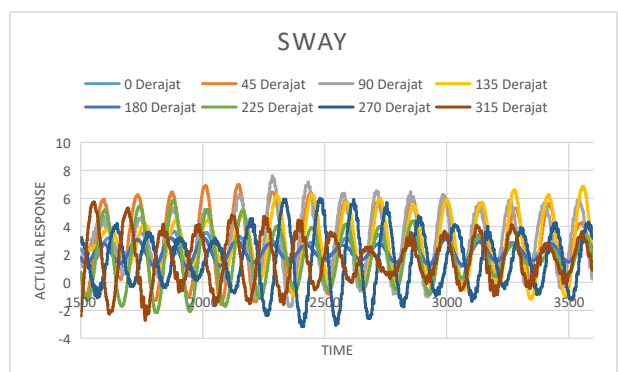
Gambar 29 Grafik Actual Response Yaw Skenario I

Berdasarkan Gambar 29, nilai puncak yaw maksimum terjadi pada heading 315⁰ dengan nilai Actual Response 1,01 ⁰/m. Sedangkan nilai yaw puncak minimum terjadi pada heading 0⁰ dengan nilai Actual Response 0 ⁰/m. Yaw tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat yaw dimana bergerak rotasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah yaw yaitu 0⁰.



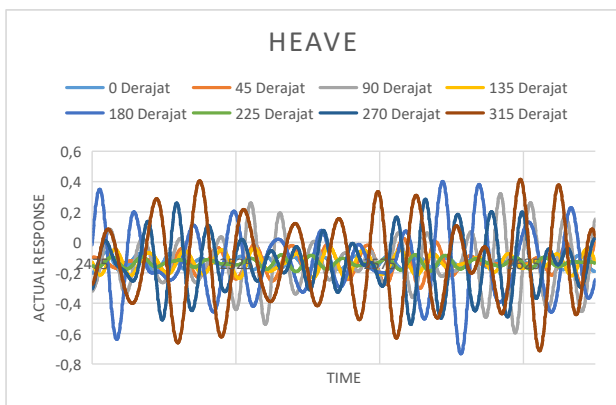
Gambar 30 Grafik Actual Response Surge Skenario I

Berdasarkan Gambar 30, nilai puncak surge maksimum terjadi pada heading 45⁰ dengan nilai Actual Response 0,17 m/m. Sedangkan nilai surge puncak minimum terjadi pada heading 270⁰ dengan nilai Actual Response -0,08 m/m. Surge tertinggi terjadi pada sudut 45⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat surge dimana bergerak translasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah surge yaitu 270⁰.



Gambar 31 Grafik Actual Response Sway Skenario I

Berdasarkan Gambar 31, nilai puncak sway maksimum terjadi pada heading 90^0 dengan nilai Actual Response $0,8372 \text{ m/m}$. Sedangkan nilai sway puncak minimum terjadi pada heading 0^0 dengan nilai Actual Response $0,0012 \text{ m/m}$. Sway tertinggi terjadi pada sudut 90^0 karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat sway dimana bergerak translasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah sway yaitu 0^0 .

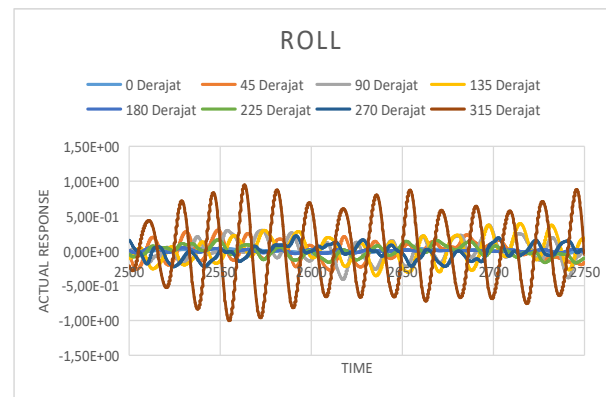


Gambar 32 Grafik Actual Response Heave Skenario I

Berdasarkan Gambar 32, nilai puncak heave maksimum terjadi pada heading 90^0 dengan nilai Actual Response $7,6 \text{ m/m}$. Sedangkan nilai heave puncak minimum terjadi pada heading 180^0 dengan nilai Actual Response $4,41 \text{ m/m}$. Heave tertinggi terjadi pada sudut 90^0 karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat heave dimana bergerak translasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah heave yaitu 180^0 .

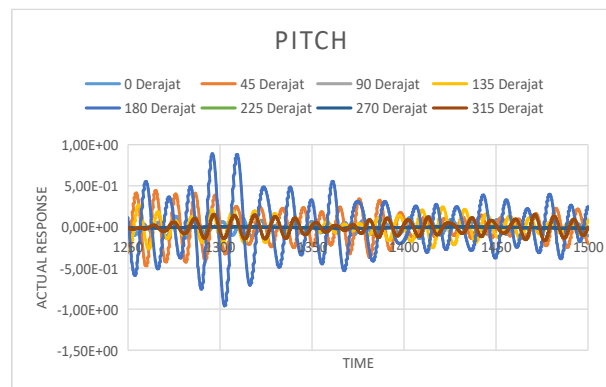
3.6. Analisis Olah Gerak FPSO pada Skenario II (Sudut Antar Mooring Lines 4^0) dengan Time Domain

Berdasarkan hasil pengolahan data dari *software ansys aqwa*, didapatkan hasil berupa grafik untuk *actual response* untuk keenam derajat kebebasan FPSO sebagai berikut :



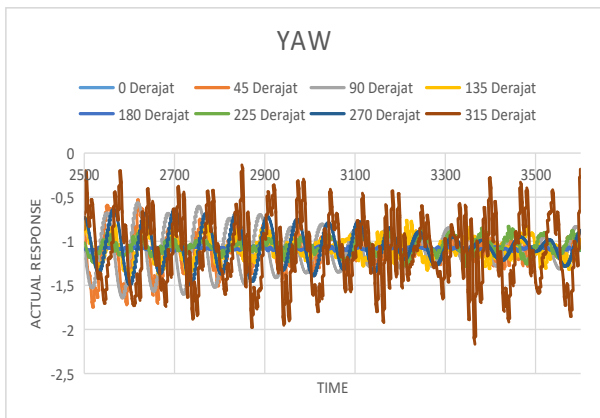
Gambar 33 Grafik Actual Response Roll Skenario II

Berdasarkan Gambar 33, nilai puncak roll maksimum terjadi pada heading 315^0 dengan nilai Actual Response $17,0553 \text{ }^0/\text{m}$. Sedangkan nilai roll puncak minimum terjadi pada heading 0^0 dengan nilai Actual Response $0,0864 \text{ }^0/\text{m}$. Roll tertinggi terjadi pada sudut 315^0 karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat roll dimana bergerak rotasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah roll yaitu 0^0 .



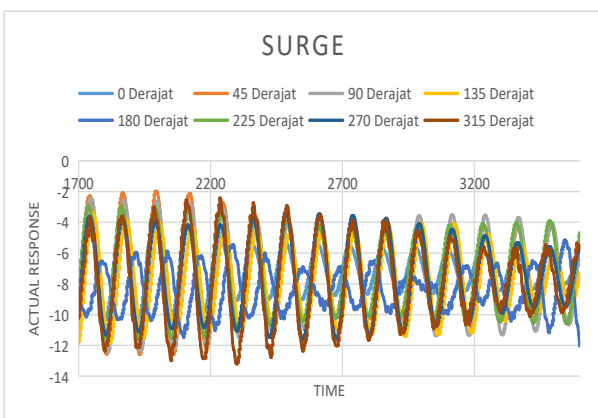
Gambar 34 Grafik Actual Response Pitch Skenario II

Berdasarkan Gambar 34, nilai puncak pitch maksimum terjadi pada heading 45^0 dengan nilai Actual Response $0,6917 \text{ }^0/\text{m}$. Sedangkan nilai pitch puncak minimum terjadi pada heading 90^0 dengan nilai Actual Response $0,003 \text{ }^0/\text{m}$. Pitch tertinggi terjadi pada sudut 45^0 karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat pitch dimana bergerak rotasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah pitch yaitu 90^0 .



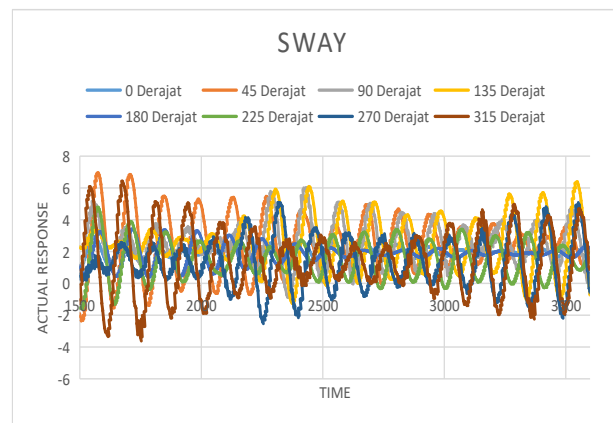
Gambar 35 Grafik Actual Response Yaw Skenario II

Berdasarkan Gambar 35, nilai puncak yaw maksimum terjadi pada heading 315° dengan nilai Actual Response $0,3923 \text{ }^{\circ}/\text{m}$. Sedangkan nilai yaw puncak minimum terjadi pada heading 0° dengan nilai Actual Response $0,0001 \text{ }^{\circ}/\text{m}$. Yaw tertinggi terjadi pada sudut 315° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat yaw dimana bergerak rotasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah yaw yaitu 0° .



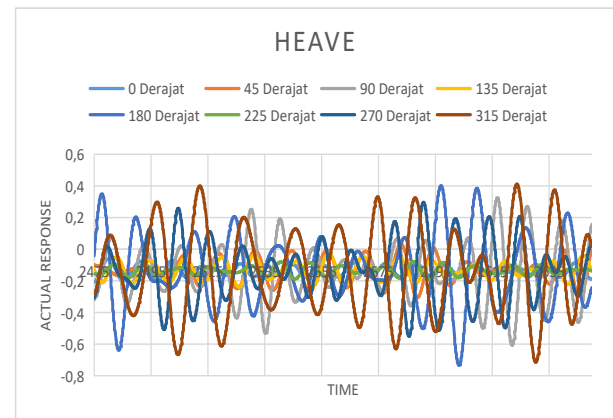
Gambar 36 Grafik Actual Response Surge Skenario II

Berdasarkan Gambar 36, nilai puncak surge maksimum terjadi pada heading 180° dengan nilai Actual Response $0,7506 \text{ m}/\text{m}$. Sedangkan nilai surge puncak minimum terjadi pada heading 270° dengan nilai Actual Response $0,0017 \text{ m}/\text{m}$. Surge tertinggi terjadi pada sudut 180° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat surge dimana bergerak translasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah surge yaitu 270° .



Gambar 37 Grafik Actual Response Sway Skenario II

Berdasarkan Gambar 37, nilai puncak sway maksimum terjadi pada heading 90° dengan nilai Actual Response $0,8372 \text{ m}/\text{m}$. Sedangkan nilai sway puncak minimum terjadi pada heading 0° dengan nilai Actual Response $0,0012 \text{ m}/\text{m}$. Sway tertinggi terjadi pada sudut 90° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat sway dimana bergerak translasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah sway yaitu 0° .

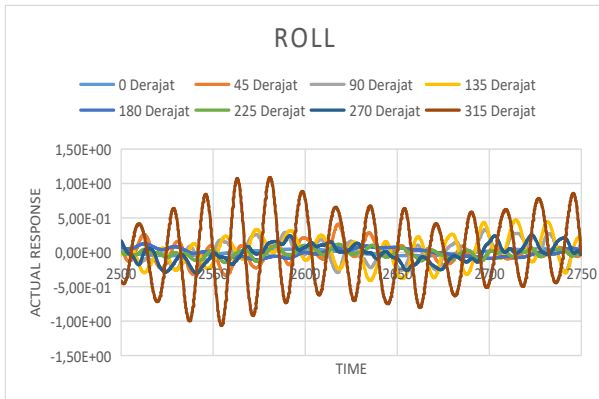


Gambar 38 Grafik Actual Response Heave Skenario II

Berdasarkan Gambar 38, nilai puncak heave maksimum terjadi pada heading 270° dengan nilai Actual Response $1,6335 \text{ m}/\text{m}$. Sedangkan nilai heave puncak minimum terjadi pada heading 0° dengan nilai Actual Response $0,3961 \text{ m}/\text{m}$. Heave tertinggi terjadi pada sudut 270° karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat heave dimana bergerak translasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah heave yaitu 0° .

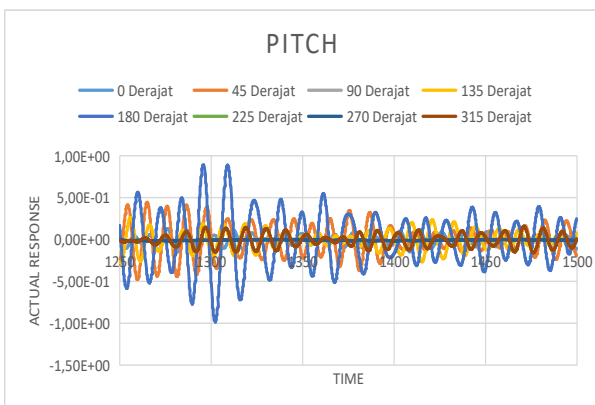
3.7. Analisis Olah Gerak FPSO pada Skenario III (Sudut Antar *Mooring Lines* 5⁰) dengan Time Domain

Berdasarkan hasil pengolahan data dari *software ansys aqwa*, didapatkan hasil berupa grafik untuk *actual response* untuk keenam derajat kebebasan FPSO sebagai berikut :



Gambar 39 Grafik Actual Response Roll Skenario III

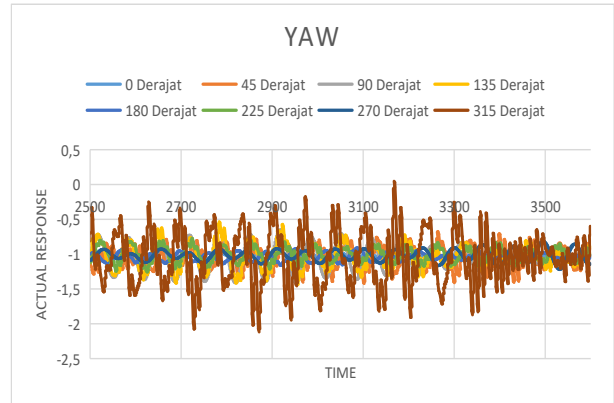
Berdasarkan Gambar 39, nilai puncak roll maksimum terjadi pada heading 315⁰ dengan nilai Actual Response 17,0553 ⁰/m. Sedangkan nilai roll puncak minimum terjadi pada heading 0⁰ dengan nilai Actual Response 0,0864 ⁰/m. Roll tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat roll dimana bergerak rotasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah roll yaitu 0⁰.



Gambar 40 Grafik Actual Response Pitch Skenario III

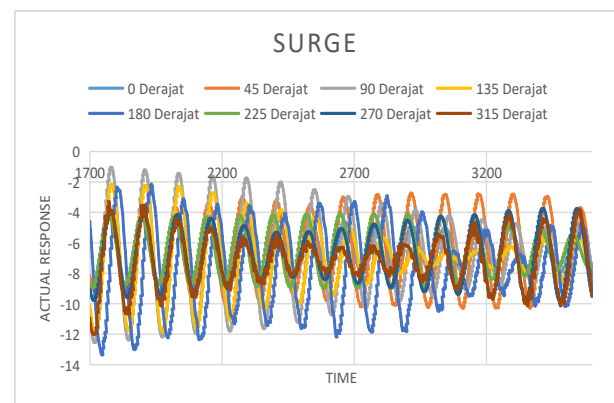
Berdasarkan Gambar 40, nilai puncak pitch maksimum terjadi pada heading 45⁰ dengan nilai Actual Response 0,6917 ⁰/m. Sedangkan nilai pitch puncak minimum terjadi pada heading 90⁰ dengan

nilai Actual Response 0,003 ⁰/m. Pitch tertinggi terjadi pada sudut 45⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat pitch dimana bergerak rotasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah pitch yaitu 90⁰.



Gambar 41 Grafik Actual Response Yaw Skenario III

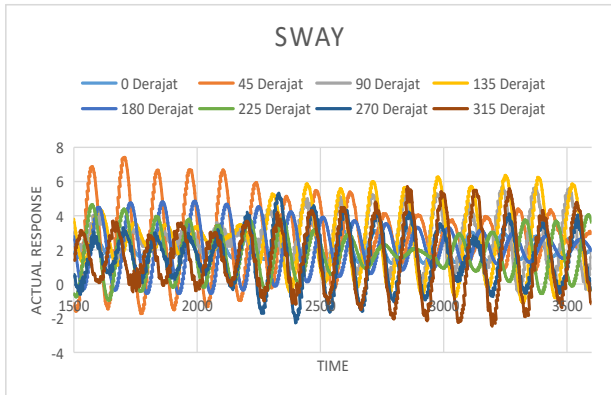
Berdasarkan Gambar 41, nilai puncak yaw maksimum terjadi pada heading 315⁰ dengan nilai Actual Response 0,3923 ⁰/m. Sedangkan nilai yaw puncak minimum terjadi pada heading 0⁰ dengan nilai Actual Response 0,0001 ⁰/m. Yaw tertinggi terjadi pada sudut 315⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat yaw dimana bergerak rotasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah yaw yaitu 0⁰.



Gambar 42 Grafik Actual Response Surge Skenario III

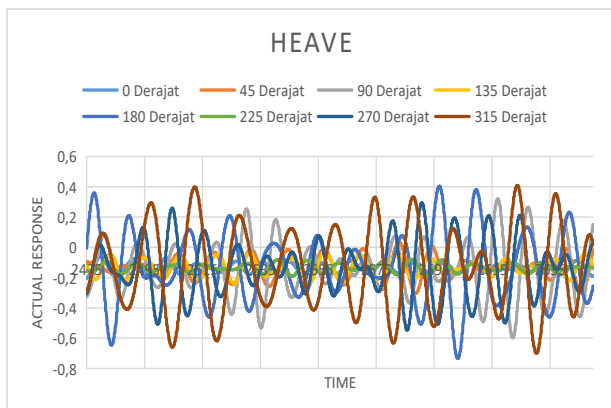
Berdasarkan Gambar 42, nilai puncak surge maksimum terjadi pada heading 180⁰ dengan nilai Actual Response 0,7506 m/m. Sedangkan nilai

surge puncak minimum terjadi pada heading 270⁰ dengan nilai Actual Response 0,0017 m/m. Surge tertinggi terjadi pada sudut 180⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat surge dimana bergerak translasi terhadap sumbu x. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah surge yaitu 270⁰.



Gambar 43 Grafik Actual Response Sway Skenario III

Berdasarkan Gambar 43, nilai puncak sway maksimum terjadi pada heading 90⁰ dengan nilai Actual Response 0,8372 m/m. Sedangkan nilai sway puncak minimum terjadi pada heading 0⁰ dengan nilai Actual Response 0,0012 m/m. Sway tertinggi terjadi pada sudut 90⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat sway dimana bergerak translasi terhadap sumbu y. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah sway yaitu 0⁰.



Gambar 44 Grafik Actual Response Heave Skenario III

Berdasarkan Gambar 44, nilai puncak heave maksimum terjadi pada heading 270⁰ dengan nilai Actual Response 1,6335 m/m. Sedangkan nilai

heave puncak minimum terjadi pada heading 0⁰ dengan nilai Actual Response 0,3961 m/m. Heave tertinggi terjadi pada sudut 270⁰ karena sudut tersebut merupakan sudut dengan arah head yang sesuai/searah dengan sifat heave dimana bergerak translasi terhadap sumbu z. Sedangkan, sudut terkecil adalah sudut yang arahnya tegak lurus terhadap arah heave yaitu 0⁰.

3.8. Rekapitulasi Nilai Actual Response terbaik Time Domain

Setelah hasil perhitungan nilai Actual Response untuk 6 derajat kebebasan FPSO untuk masing-masing skenario didapatkan, dilakukan analisis untuk mendapatkan rekomendasi sudut antar mooring lines. Hal ini dilakukan dengan menganalisis nilai maksimum Actual Response pada tiap derajat kebebasan FPSO, tiap derajat sudut heading, dan tiap skenario sudut antar mooring lines FPSO. Kemudian, dilakukan pemeringkatan nilai Actual Response pada tiap derajat kebebasan FPSO. Berikut adalah tabel hasil rekapitulasi nilai Actual Response terbaik :

Tabel 14. Rekapitulasi Nilai Actual Response Roll

Actual Response Roll Terbaik			
No	Skenario	Nilai Actual Response	Posisi Heading
1	4 ⁰	1,4	315 ⁰
2	3 ⁰	1,47	315 ⁰
3	5 ⁰	1,52	315 ⁰

Tabel 15. Rekapitulasi Nilai Actual Response Pitch

Actual Response Pitch Terbaik			
No	Skenario	Nilai Actual Response	Posisi Heading
1	4 ⁰	1,97	315 ⁰
2	3 ⁰	1,98	315 ⁰
3	5 ⁰	2,02	315 ⁰

Tabel 9. Rekapitulasi Nilai Actual Response Yaw

RAO Yaw Terbaik			
No	Skenario	Nilai Actual Response	Posisi Heading
1	3 ⁰	0,98	315 ⁰
2	4 ⁰	0,99	315 ⁰
3	5 ⁰	1,01	315 ⁰

Tabel 16. Rekapitulasi Nilai *Actual Response* Surge

Actual Response Surge Terbaik			
No	Skenario	Nilai Actual Response	Posisi Heading
1	4 ⁰	0,03	45 ⁰
2	5 ⁰	0,05	45 ⁰
3	3 ⁰	0,16	45 ⁰

Tabel 17. Rekapitulasi Nilai *Actual Response* Sway

Actual Response Sway Terbaik			
No	Skenario	Nilai Actual Response	Posisi Heading
1	5 ⁰	7,4	45 ⁰
2	4 ⁰	7,6	90 ⁰
3	3 ⁰	7,7	45 ⁰

Tabel 18. Rekapitulasi Nilai *Actual Response* Heave

Actual Response Heave Terbaik			
No	Skenario	Nilai Actual Response	Posisi Heading
1	3 ⁰	1,43	315 ⁰
2	4 ⁰	1,47	315 ⁰
3	5 ⁰	1,48	315 ⁰

Setelah dilakukan analisis nilai *Actual Response* terbaik untuk tiap derajat kebebasan FPSO, dilakukan analisis lanjutan berupa pemeringkatan untuk seluruh skenario pada seluruh derajat kebebasan FPSO. Pemeringkatan akhir dilakukan dengan memberikan poin 3 untuk skenario yang menduduki peringkat 1, poin 2 untuk skenario yang menduduki peringkat 2, dan poin 1 untuk skenario yang menduduki peringkat 3. Hasil pemeringkatan tertera dalam tabel berikut :

Tabel 19. Rekapitulasi Pemeringkatan Skenario *Time Domain*

Rekapitulasi Pemeringkatan Skenario		
No	Skenario	Total Poin
1	4 ⁰	15
2	3 ⁰	11
3	5 ⁰	10

Berdasarkan hasil pemeringkatan skenario pada *time domain*, diketahui bahwa FPSO dengan sudut antar *mooring lines* sebesar 4⁰ memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan skenario yang lain yaitu 3⁰ dan 5⁰. Pada keadaan sebenarnya, sudut antar *mooring lines* yang diaplikasikan pada FPSO Belanak di lapangan adalah 4⁰. Sehingga menurut

perhitungan dan seknario yang penulis buat, sudut antar *mooring lines* yang telah diaplikasikan oleh FPSO Belanak sudah sesuai.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisa di atas,beberapa hal yang dapat disimpulkan pada penelitian ini, antara lain:

- Pada kondisi free surface, nilai RAO Roll maksimum dicapai pada sudut heading 2700. Nilai RAO Pitch maksimum dicapai pada sudut heading 2250. Nilai RAO Yaw maksimum dicapai pada sudut heading 1350. Nilai RAO Surge maksimum dicapai pada sudut heading 1350. Nilai RAO Sway maksimum dicapai pada sudut heading 2700. Nilai RAO Heave maksimum dicapai pada sudut heading 2700.
- Variasi sudut antar *mooring lines* menyebabkan perubahan pada nilai frekuensi encounter sehingga menyebabkan perbedaan pada nilai RAO yang berdampak pada olah gerak FPSO. Hal ini dapat dilihat dari nilai maksimum RAO yang diperoleh. Nilai maksimum RAO pada tiap derajat kebebasan FPSO mempunyai nilai yang berbeda pada tiap variasi.
- Variasi Sudut antar mooring lines skenario II (4⁰) memiliki kecenderungan nilai puncak RAO (*frequency domain*) dan *actual response* (*time domain*) terendah dibandingkan dengan sekario I (3⁰) dan skenario III (5⁰)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. B. Djatmiko, Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak. Surabaya: ITS Press, 2012.
- [2] J. E. W. Wichers, Combining metocean parameters on SPM moored tankers. International Conference in Ocean Engineering COE'96, Madras, India, December 1996.
- [3] J. M. Heurtier, P. Buhan, E. Fontaine, C. Cunff, F. Biolley and C. Berhault, Coupled dynamic response of moored FPSO with risers. The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, June 17–22, Stavanger, Norway, 2001.
- [4] R. Pascoal, C. G. Scares, G. Facon, F. Pétrié and M. Vaché, Hydrodynamic analysis and motions of the OCTOPLUS platform. 23rd

- International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME 2004, June 20–25, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.
- [5] M. H. Kim, B. J. Koo, R. M. Mercier and E. G. Mercier, Vessel/mooring/riser coupled dynamic analysis of a turret–moored FPSO compared with OTRC experiment. *Ocean Engineering* 32(14–15), pp. 1780–1802, 2005.
- [6] Y. P. Hong, Y. Wada, Y. H. Choi and S. E. Kim, An experimental and numerical study on the motion characteristics of side-by-side moored LNG-FPSO and LNG carrier. 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, July 21–26, Osaka, Japan, 2009.
- [7] J. M. Chen, Y. Sun and P. Zhang, Dynamic response analysis of FPSO based on SESAM. *Advanced Materials Research* 694–697, pp. 267–270, 2013.
- [8] R. Nishanth, K. V. John and A. Whyte, Dynamic Behaviour of FPSO In Kikeh Field Under Different Loading Conditions, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 04, Feb. 2016.
- [9] B. W. Nam, Y. Kim and S. Y. Hong, Time-domain simulation of berthing problem between FPSO and shuttle tanker in waves. *Applied Ocean Research* 58, pp. 49–61, 2016.
- [10] A. Somayaula and J. Falzarano, A comparative assessment of approximate methods to simulate second order roll motion of FPSOs. *Ocean Systems Engineering* 7(1), pp. 53–74, 2017.
- [11] S. Roy and A. K. Banik, Dynamic responses of an FPSO moored on sloped seabed under the action of environmental loads. *Ocean Systems Engineering* 8(3), pp. 329–343, 2018.
- [12] R. Vijayalakshmi and R. Panneerselvam, Hydrodynamic response of a non-ship-shaped FPSO vessel with damping plates. *Journal of Marine Science Technology* 17, pp. 187–202, 2012.
- [13] Y. X. Yao, W. H. Wang and Y. Huang, Concept design of a new sandglass-type floating production storage and offloading system. *Journal of Shanghai Jiaotong University* 48(4), pp. 558–564, 2014.
- [14] W. H. Wang, Y. X. Yao, M. S. Ye, L. L. Wang and Y. Huang, Research on design scheme and hydrodynamic performance of floating body based on sandglass-type FDPSO. *Ships and Offshore Structures* 11(5), pp. 540–550, 2015.
- [15] W. H. Wang, L. L. Wang, Y. Z. Du, Y. X. Yao and Y. Huang, Numerical and experimental analysis on motion performance of new sandglass-type floating body in waves. *Journal of Marine Structures* 46, pp. 56–77, 2016.
- [16] A. Graylee and M. Yousifard, The effects of different cross sections on the hydrodynamic behaviour of sandglass-type FPSOs exposed to regular waves. *Journal of Marine Engineering & Technology* 19, 4, pp. 197–206, 2019.
- [17] R. V. Veer, F. Fathi and J. G. Kherian, On roll hydrodynamics of FPSO's fitted with bilge keels and riser balcony. *Proceedings of the ASME 2011, 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 19–24, Rotterdam, Netherlands, 2011.
- [18] G. O. Avalos and J. Wanderley, Numerical study of forced roll oscillation of FPSO with bilge keel. *Ocean Engineering* 147, pp. 304–317, 2018.
- [19] C. Peng, A. M. Mansour, C. Wu, R. Zuccolo, C. Ji, B. Greiner and H. G. Sung, Numerical and experimental investigation on the global performance of a novel design of a Low Motion FPSO. *Ocean Systems Engineering* 8(4), pp. 427–439, 2018.
- [20] R. Sathia and R. Vijayalakshmi, Effect of keel plate on the performance of FPSO suitable for arctic ice environment. *Ships and Offshore Structures* 15, 9, pp. 963–973, 2019.
- [21] American Bureau Of Shipping.: Rules For Building and Classing Mobile Offshore Drilling Units, The United States Coast Guard Alternate Compliance Program, 2016.