



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Optimasi Disain *Spread Mooring* Dengan Konfigurasi Variasi *Line Terhadap Six Degrees Of Freedom (DOF)* Olah Gerak Pada Kapal *Floating Storage And Offloading (FSO)*

M Ikbal Afdhal¹⁾, Untung Budiarto¹⁾, Imam Pujo Mulyatno¹⁾

¹⁾Laboratorium Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
e-mail : ikbal.dexters@gmail.com

Abstrak

Floating Storage and Offloading (FSO) adalah fasilitas terapung untuk produksi dan penyimpanan sementara minyak dan gas bumi berbentuk kapal yang secara permanen ditambatkan di lokasi operasi. Sistem tambat menyebar (*spread mooring system*) merupakan salah satu *mooring system* yang digunakan untuk meredam gerakan dinamis pada FSO akibat beban lingkungan. Tugas akhir ini melakukan analisa terhadap karakteristik gerakan FSO dengan *spread mooring system*. *Tension* maksimum pada *chain line* dan *Excursion* FSO menggunakan software *MOSES ver.7.10* dan *Orcaflex 9.2a*. Dari hasil penelitian yang dilakukan terhadap FSO Barakuda kondisi *moored*, dapat diambil kesimpulan bahwa *mooring system* dengan konfigurasi desain *Spread mooring* dengan *chain R4 studless 92 mm cetenary* merupakan *mooring system* yang paling sesuai untuk digunakan pada FSO yang mengalami kondisi pembebanan *damage line* atau *ultimate limit state (ULS)* paling ekstrem. *Excursion* maksimum terjadi pada heading 45° sebesar $x = 9,71$ dan $y = 13,45$ m dalam kondisi *damage*. *Excursion* tersebut sesuai persyaratan fungsionalnya, yaitu sebesar 20% kedalaman perairan. Pada kondisi *damage line*, *tension* signifikan terbesar adalah 5787,96 kN yang terjadi pada *chain line L02* heading 45° . Sedangkan untuk kondisi *intact*, *tension* terbesar adalah 4095,42 kN terjadi pada *chain line L02* untuk heading 45° . dan *anchor holding capacity* signifikan terbesar adalah 5659,90 Kn untuk desain *spread mooring* dengan *R4 studless* ($\varphi = 92$ mm) terjadi pada *chain line L02* untuk heading 45° . Harga *safety factor (SF)* terkecil 1.34 untuk kondisi *damage*. Menurut *API RP 2SK 2nd edition*, *SF* minimal untuk kondisi *damage* adalah 1.25, sehingga dapat disimpulkan bahwa *chain R4 studless* ($\varphi = 92$ mm) aman untuk digunakan sebagai *mooring system*.

Kata Kunci : *Spread mooring*, *Convensional Bouy Mooring*, *Excursion*, *Floating Storage And Offloading*, *Tension*

1. PENDAHULUAN

Kabupaten Natuna memiliki sumber daya hidrokarbon terbesar dikawasan Asia Pasifik yang mencapai 298,81 juta barel minyak, sedangkan cadangan gas bumi mencapai 222 triliun kaki kubik (TCT).

Untuk mengeksplor cadangan hidrokarbon yang tersebar dibanyak titik, maka dibutuhkan suatu struktur apung yang bersifat *mobile unit*.

Floating, Storage, and Offloading (FSO) merupakan struktur apung atau kapal yang dapat digunakan untuk kegiatan eksplorasi hidrokarbon di lepas pantai. Struktur terapung (*floating*

structures) memiliki kelebihan dibandingkan dengan struktur terpancang yakni dinilai lebih ekonomis sebab tidak memerlukan struktur baru dan dapat dimanfaatkan kembali ketika masa eksplorasi telah selesai serta berbasis teknologi *Mobile Offshore Production Unit (MOPU)*. [1]

Selama beroperasi Kapal FSO mengalami gerakan pada kondisi tertentu yang dipengaruhi oleh beban lingkungan yakni berupa gelombang laut, arus dan angin sehingga diperlukan analisa dan perhitungan mengenai besaran pergerakan kapal FSO. Untuk menjaga kapal FSO agar tetap pada posisinya, maka dibutuhkan sistem tambat

(*mooring System*) yang berguna sebagai pengikat kapal FSO.[2]

Sistem tambat (*mooring System*) adalah salah satu teknologi untuk meredam pergerakan struktur apung yang ditambat karena bersifat mampu bergerak bebas meskipun bergerah sesuai arah beban lingkungan namun tetap tertambat pada tali tambat (*mooring line*) untuk membantu proses *weathervaning* sehingga kegiatan operasi berjalan dengan aman.

Gerakan dari kapal FSO pada *mooring system* menyebabkan adanya gaya yang bekerja berupa *tension force*, *restoring force* dan *damping*. Gaya yang terjadi pada *mooring system* bergantung pada karakteristik *motion* kapal FSO.[1]

Berdasarkan penelitian sebelumnya pada kapal FPSO 140 KDWT didapat nilai *Excursion* maksimum untuk kondisi *transient* pada *heading* 180o sebesar 5.52 m. *Excursion* tersebut tidak melampaui persyaratan fungsionalnya, yaitu sebesar 20% kedalaman perairan. Pada kondisi *transient*, *tension* signifikan terbesar adalah 123.5 ton yang terjadi pada *chain line* no 1 *heading* 180°. Harga *safety factor* (SF) terkecil 1.86 untuk kondisi *transient*. [3] Dan dipenelitian lain, Tegangan maksimum yang didapatkan dari tiap skenario analisis selalu terjadi pada *mooring line* ke-1 dengan konfigurasi sistem tambat baik saat *in line* maupun *between line* sebesar 1178.73 kN (operasi) dan 1662.27 kN (badai). [4] Analisa juga menunjukkan pada Belida FSO *Project* nilai *maximum line tension* pada kondisi *intact* sebesar 4161,7 kN dan kondisi *damage* sebesar 5892,7 kN dengan *safety factor* pada kondisi *intact* sebesar 1,96 dan kondisi *damage* sebesar 1,39 dengan data lingkungan berupa kondisi badai.[5]

Maka dari itu, dalam kesempatan kali ini peneliti ingin melakukan penelitian terhadap salah satu jenis *morring system* yakni *spread mooring* dengan variasi *line* untuk mengetahui besarnya nilai *tension* yang terjadi pada *mooring line* dan besarnya nilai *excurtion* yang didapat akibat beban lingkungan saat kondisi tertambat. Tujuannya untuk mendapatkan desain *spread mooring* yang optimal berdasarkan nilai *tension* dan *excurtion* yang sesuai dengan *design criteria*.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

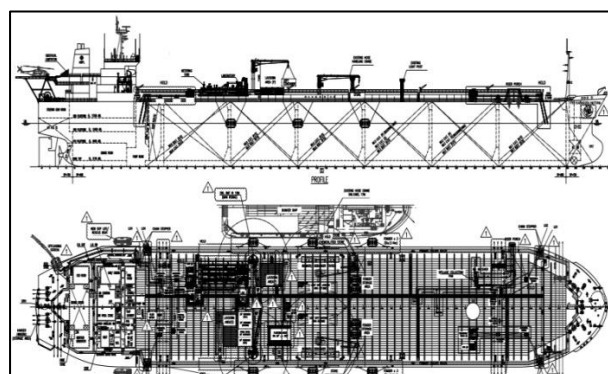
Optimasi desain *spread mooring* dilakukan pada kapal FSO Barakuda yang merupakan bagian dari Belida FSO *project* yang berlokasi di *South Natuna Sea – Block B*.

Tabel 1. Data Kapal FSO Barakuda

PRINCIPAL PARTICULARS		
LENGTH O.A	244,60	m
LENGTH B.P	233,00	m
BREADTH (MOULD)	42,00	m
DEPTH (MOULD)	22,20	m
DRAFT(SCANTLING)	15,50	m
DRAFT (DESIGNED)	14,90	m
BLOCK COFF (LBP)	~0,826	

Tabel 2. Data lingkungan 100 tahun RP *conditions*

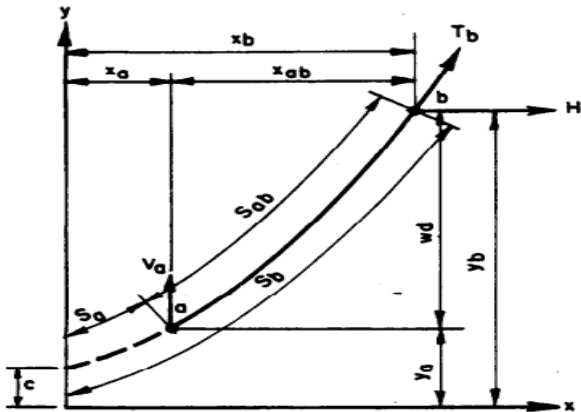
Tabel 3. Data lingkungan 10 tahun RP <i>conditions</i>									
	-	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Dir	-	225	180	135	90	45	0	315	270
Dir	-	225	180	135	90	45	0	315	270
Vw	m/s	20	20	12	11	14	14	14	14
Hs	m	4,5	5	2,3	2	2,3	2,3	3	3,3
Tp	s	10	10,3	8,7	8,6	8,7	8,7	9,2	9,3
Tz	s	7,5	7,7	6,5	6,4	6,5	6,5	6,8	6,9
Hmax	m	8,2	9,2	4,1	3,7	4,1	4,1	5,5	5,9
Tmax	s	9,2	9,5	8	7,9	8	8	8,4	8,6
Vc1	m/s	0,95	1,05	0,95	0,74	0,74	0,89	1	0,89
Vc2	m/s	0,71	0,79	0,71	0,55	0,55	0,67	0,75	0,67
Vc3	m/s	0,49	0,55	0,49	0,38	0,38	0,46	0,52	0,46
Vw	m/s	18	18	11	10	13	13	13	13
Hs	m	4	4,4	2	1,8	2	2	2,6	2,9
Tp	s	9,7	9,9	8,6	8,5	8,6	8,6	9	9,1
Tz	s	7,2	7,4	6,4	6,3	6,4	6,4	6,7	6,8
Hmax	m	7,2	8,1	3,6	3,2	3,6	3,6	4,8	5,2
Tmax	s	8,9	9,2	7,9	7,8	7,9	7,9	8,2	8,4
Vc1	m/s	0,8	0,89	0,8	0,62	0,62	0,76	0,85	0,76
Vc2	m/s	0,62	0,69	0,62	0,48	0,48	0,59	0,66	0,59
Vc3	m/s	0,45	0,5	0,45	0,35	0,35	0,43	0,48	0,43



Gambar 1. *General arrangement* kapal FSO

2.2. Konfigurasi Mooring Line

Jenis konfigurasi *mooring line* yang digunakan yakni *catenary system* dengan perhitungan matematis sebagai berikut.[6]



Gambar 2. Gambar perhitungan untuk *catenary system*.

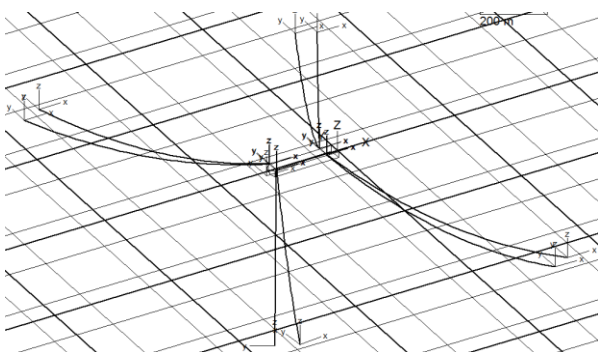
$$x_{ab} = c \ln \left[\frac{\frac{V_a}{H} + \frac{S_{ab}}{c} + \sqrt{1 + \left(\frac{V_a}{H} + \frac{S_{ab}}{c}\right)^2}}{\frac{V_a}{H} + \sqrt{1 + \left(\frac{V_a}{H}\right)^2}} \right] \quad (9)$$

$$S_a = \frac{V_a}{W} \quad (10)$$

$$S_b = S_a + S_{ab} \quad (11)$$

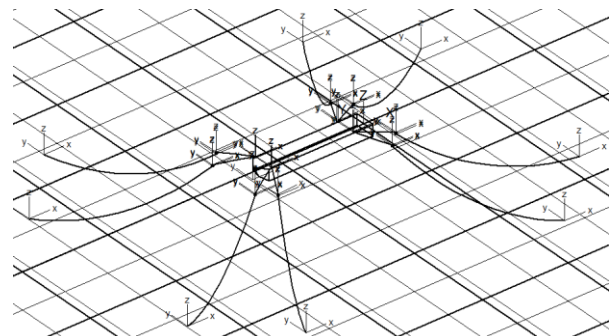
$$y_b = \sqrt{S_b^2 + c^2} \quad (12)$$

Dimana W adalah berat rantai didalam air dalam Kilogram. S adalah panjang kurva dari titik $(0,c)$ ke titik (x,y) dalam Meter. H adalah Gaya horizontal pada titik (x,y) dalam kN. c adalah jarak dari titik origin ke y -intercept dalam Meter. V adalah gaya vertikal pada titik (x,y) dan T adalah *line tension* pada titik (x,y) dalam kN.



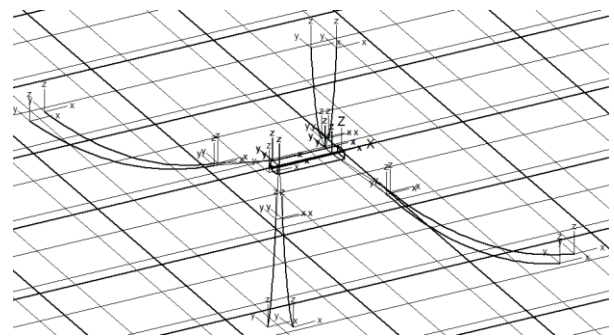
Gambar 3. (Model 1) Desain *Spread mooring* dengan *chain*

Spread mooring merupakan sarana tambat FSO yang paling sederhana, karena pada *system* ini kapal tidak memungkinkan untuk bergerak atau berputar akibat efek-efek beban lingkungan. Model ini terdiri dari 8 *line* dengan *chain* R4 *studless* diameter 92 mm sepanjang 850 meter yang terhubung dari *fairlead* ke *seabea* serta sudut masuk 60° dan 65° .



Gambar 4. (Model 2) Desain *convensional bouy mooring*

Conventional buoy mooring adalah salah satu jenis struktur terapung untuk tempat menambat kapal di mana kapal ditambat dengan *rope* ke *buoy* dan *buoy* dijangkar ke *seabed* dengan rantai. Model ini terdiri dari 8 *line* dengan menggunakan *wire rope* diameter 150 mm dan *chain* R4 *studless* diameter 92 mm dan 8 *buoy* berdiameter 4,8 m dan tinggi 2,8 m. Sudut masuk *line* yakni 30° dan 60° dengan panjang *wire* ke *buoy* 80 m dan *buoy* ke *seabed* 230 m.



Gambar 5. (Model 3) Desain *Spread mooring* dengan *wire* dan *chain*.

Model ini merupakan kombinasi material dari *spread mooring system* dengan *wire* dan *chain*. Dimana, *wire* yang terhubung dari *fairlead* ke *chain* dan *chain* ke seabed, terdiri dari 8 *line* dengan *wire* berdiameter 200 mm sepanjang 100 meter dan *chain* R4 *studlink* berdiameter 92 mm sepanjang 750 meter, serta sudut masuk 60° dan 65° . Antara *wire* dan *chain* digunakan *clump* sebagai penghubung.

Karakteristik hidrodinamik pada kapal untuk ketiga variasi model *spread mooring* dibuat yang

relatif sama. Model pertama, *spread mooring* dibuat delapan *line* dengan panjang *chain* 850 meter. Model kedua adalah pengembangan dari *spread mooring* yakni jenis *conventional bouy mooring* (CBM) dengan total panjang *line* yakni 380 meter. Model ketiga merupakan kombinasi material *wire* dan *chain* untuk *system spread mooring* dengan penghubung *clump* antara *wire* dan *chain* sepanjang 850 meter .

2.3. Wave Drift Force

Beban gelombang merupakan beban terbesar yang ditimbulkan oleh beban lingkungan pada bangunan lepas pantai (*offshore structure*).

Perhitungan beban gelombang dapat direpresentasikan dengan perhitungan gaya gelombang. Teori perhitungan gaya gelombang yang tepat untuk analisa *mooring* pada FSO adalah teori *diffraction-radiation*. Dalam teori ini bilamana suatu struktur mempunyai ukuran yang relatif besar, yakni memiliki ukuran yang kurang lebih sama dengan panjang gelombang, maka keberadaan struktur ini akan mempengaruhi timbulnya perubahan arah pada medan gelombang disekitarnya. [7]

Gaya gelombang *time series* dapat dibangkitkan dari spektrum gelombang. Gaya gelombang terdiri dari dua yakni *first order* dan *second order*.

Gaya gelombang *first order*

$$F_w^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N F_w^{(1)}(\omega_i) \cos[\omega_i t + \varepsilon_i] a_i \quad (1)$$

Dimana $F_w^{(1)}(t)$ adalah gaya gelombang *first order* pada rentang waktu. $F_w^{(1)}(\omega)$ adalah gaya eksitasi gelombang *first order* per-unir amplitud gelombang rentang waktu. ε_i adalah sudut fase komponen gelombang *first order*. ω adalah frakuensi gelombang (rad/sec). a_i adalah amplitud komponen gelombang *first order* dari $\sqrt{2 S(\omega) d\omega}$ dan $S(\omega)$ adalah fungsi kepadatan spectra gelombang.

Gaya gelombang *second order* :

$$F_w^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j D_{ij} \cos [(\omega_i + \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \quad (2)$$

Dimana D_{ij} adalah *drift force* per unit amplitud gelombang.

2.4. Spektrum Gelombang

Pada penelitian ini, untuk wave train yang digunakan yakni spektrum *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP). Persamaan ini merupakan modifikasi dari persamaan spektrum *Pierson-Morkowitz* yang disesuaikan dengan kondisi perairan natuna. Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis sebagai berikut:[8]

$$S_{(\omega)} = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4}(\frac{\omega_m}{\omega})^4} \gamma^\delta \quad (5)$$

$$\omega_0 = 2\pi \left(\frac{g}{U}\right) (x)^{-0,33} \quad (6)$$

$$\delta = -\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2}; \omega = 0,076x_0^{(-0,22)} \alpha = \frac{gx}{U^2} \quad (7)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07; & \omega \leq \omega_m \\ 0,09; & \omega \geq \omega_m \end{cases} \quad (8)$$

Dimana γ adalah parameter puncak dan δ adalah parameter bentuk shape. ω adalah frakuensi gelombang (rad/sec). Untuk $\omega \leq \omega_0$ sama dengan 0,07 dan $\omega \geq \omega_0$ sama dengan 0,09. Harga α yakni 0,0076 (X_0)^{-0,22}, untuk X_0 tidak diketahui maka α yakni 0,0081.

2.5. Dynamic Analysis

Analisis dinamik menyumbang berbagai efek waktu karena *mass*, *damping*, dan *fluid acceleration* . Dalam pendekatan ini, gerakan *fairlead* yang bervariasi waktu dihitung dari gelombang, *surge*, *sway*, *heave*, *pitch*, *roll*, dan gerakan *yaw*.

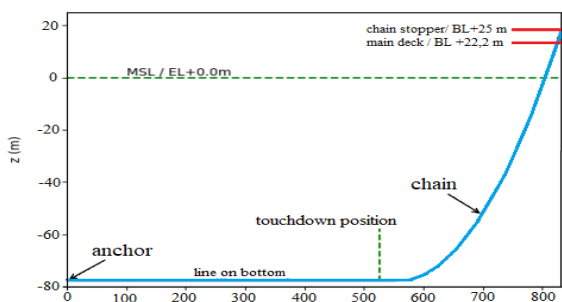
Model dinamik digunakan untuk memprediksi respon *mooring line* terhadap gerakan *fairlead*. Dua metode, *frequency domain* dan analisis *time domain* dapat digunakan untuk memprediksi beban *mooring* dinamis.

Dalam analisa ini, *wind coefficient*, *current*, *steady wave drift force*, *low frequency wind* dan *maen drift force* disertakan dalam inputan.[7]

2.6. Catenary System

Sistem tambat *catenary* adalah sistem tambat yang paling umum di perairan dangkal. Melalui gaya gravitasi antara *floating unit* dan dasar laut, akan menunjukkan bentuk khas dari garis gantung bebas. *Catenary* menggantung secara horizontal di dasar laut. Akibatnya panjang *catenary* harus lebih besar dari kedalaman air dan titik jangkar

dalam sistem tambat *catenary* dikenakan gaya horizontal. [5]

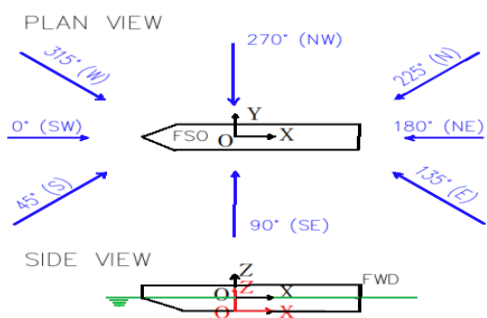


Gambar 6. Mooring Catenary System Pattern

Sistem tambat *catenary* terdiri dari satu atau beberapa jalur individual yang terhubung ke struktur terapung di *fairlead* dan dasar laut di jangkar. Bagian yang tersuspensi dari setiap garis akan membentuk *catenary*, di mana bentuknya tergantung pada berat garis di samping horizontal dan jarak vertikal antara *fairlead* dan jangkar, sehingga hanya jangkar saja dikenakan kekuatan horizontal. [4].

2.7. Coordinat system

Pada penelitian desain *spread mooring* digunakan delapan koordinat arah beban lingkungan pada kapal dan untuk arah *true origin* pada *heading north east* (NE). [5]



Gambar 7. Environmental heading coordinate system

2.8. Design Creteria

Pada penelitian ini, untuk validasi hasil *tension* tiap *line* menggunakan criteria dari API RP 2SK sebagai berikut: [7]

Tabel 4. Kriteria desain *mooring system* berdasarkan API RP 2K

Criteria	intact	damage
Line tension	1,67	1,25
Anchor tension	1,5	1
Anchor uplift	No uplift	Uplift angel Less than 20 ⁰

2.9. Loading condition

Dalam analisa karakteristik gerakan kapal FSO, pembebanan menjadi input untuk menentukan nilai gerakan kapal yang akan menjadi pertimbangan dalam desain *mooring system*. [5]

Tabel 5. Data *Loading condition* kapal FSO

		Ballast	Full Load	Medium
draft	m	7	14,9	10,95
displacement	MT	54712,7	123659	88370,4
LCG	m	9,9	6,56	8,7
TCG	m	0	0	0
VCG	m	10,08	13,71	11,04
Rxx	m	16,36	13,09	14,28
Ryy	m	60	55,01	55,4
Rzz	m	60,85	55,54	56,05
Heave period	natural s	9,49	11,42	10,5
Roll period	natural s	10,58	15,15	11,95
Pitch period	natural s	8,68	9,42	9,04

2.10. Jenis Material Yang Digunakan Pada Mooring Line

Berikut data material yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 6. Data rantai R4 *studless*

Type	R4 studless
Length (m)	850
Diamentier (mm)	92
Mass in seawater (kg/m)	134
MBL (kN)	7842,38

Tabel 7. Data *wire nylon* (8 strand multiplait)

Type	Wire rope
Length (m)	100
Diamentier (mm)	150 dan 200
Mass in seawater (kg/m)	1,5 dan 2,6
MBL(kN)	3688,88 dan 6558,013

Tabel 8. Data rantai R4 *studlink*

Type	R4 studlink
Length (m)	650
Diamentier (mm)	92
Mass in seawater (kg/m)	147
MBL (kN)	7842,38

2.11. Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konstruksi Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro di Jalan. Prof. Soedarto SH, Semarang, Jawa Tengah.

2.12. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian

Alat yang digunakan untuk membantu dalam penelitian ini adalah sebuah laptop dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Operating system: Windows 7 64-bit
2. Processor: Intel® Core™ i5-5200U CPU @ 2.20GHz
3. Memory: 4000 MB RAM
VGA: AMD Radeon Graphic

Sedangkan bahan atau dalam penelitian ini berarti *software* yang digunakan adalah:

1. AutoCAD 2010
2. Maxsurf Stability
3. MOSES 7.1
4. Orcaflex 9.2

2.13. Pendekatan Permodelan

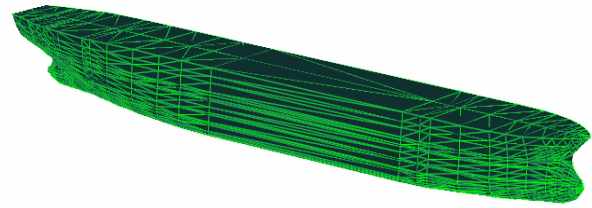
Tahapan langkah pembuatan model yang akan dianalisa menggunakan metode *3D Diffraction* dapat dijelaskan secara garis besar menjadi sebagai berikut:

1. Pembuatan model 3 dimensi menggunakan *software* MOSES 7.1
2. Permodelan *Load case* dilakukan pada *software* Maxsurf Stability.
3. Analisa kondisi *free floating* menggunakan MOSES Motion 7.1 dengan *output respon motion* RAO dan QTF.
4. Output dari MOSES 7.1 akan di input ke Orcaflex 9.2 sebagai respon motion kapal.
5. Permodelan *mooring line* dilakukan pada *software* Orcaflex 9.2 dengan menggunakan analisa Dinamik.
6. Output yang diperoleh yakni nilai Tension pada tiap line dan nilai *Excurtion* tiap Kondisi kapal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Permodelan Kapal FSO

Dengan menggunakan *software* MOSES 7.1, FSO dimodelkan dalam kondisi *free floating* untuk memperoleh karakteristik gerakan kapal.



Gambar 8. Model 3D kapal FSO Barakuda

Setelah dilakukan permodelan dilakukan komparasi dengan data kapal untuk mengetahui karakteristik kapal apakah telah sesuai sehingga dapat dilakukan analisa pada tahap selanjutnya.

Tabel 9. Hasil validasi model kapal FSO

	Moses	Data	Validasi	Status
Disp (t)	123451	122554	99%	OK
Vol (m ³)	120439,9	119565	99%	OK
Cb	0,809	0,82	99%	OK

3.2. Response amplitude operator (RAO)

Response amplitude operator (RAO) adalah fungsi matematis untuk mengetahui respons oleh bangunan apung yang berdasarkan amplitudonya sebagai akibat beban eksitasi gelombang dalam rentang frekuensi atau periode tertentu. Dengan kata lain, RAO adalah informasi karakteristik gerakan bangunan laut terhadap gelombang dengan fungsi operator.

Respon gerakan RAO translasi adalah perbandingan langsung antara amplitudo gerakannya disbanding dengan amplitudo gelombang insiden [3].

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} (m/m) \quad (13)$$

Dimana ζ_{k0} adalah amplitude struktur dan ζ_k adalah amplitude gelombang

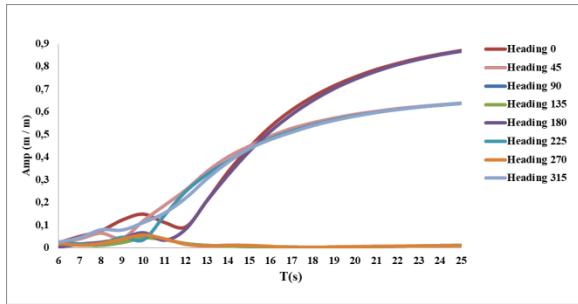
Sedangkan gerakan RAO untuk gerakan rotasi adalah perbandingan antara amplitude gerakan rotasi (Radian) dengan kemiringan gelombang, yakni perkalian antara angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden.

$$RAO = \frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)\zeta_0} (rad/rad) \quad (14)$$

Dimana ζ_{k0} adalah amplitude struktur dan ζ_k adalah amplitude gelombang. ω adalah

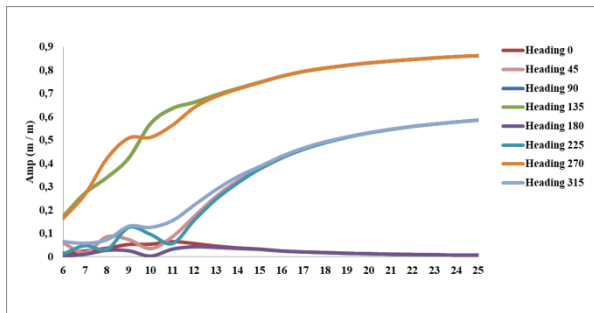
frekuensi gelombang (rad/sec) dan g adalah percepatan gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Nilai RAO yang didapat berdasarkan perhitungan dan analisa pada lambung kapal FSO Barakuda dengan ukuran sebenarnya dengan menggunakan software Maxsurf dan MOSES dengan analisa *Quasi-Static*. Anlisa respon motion kapal dilakukan pada heading 180 (NE) untuk beban lingkungan terbesar kondisi *free floating*.



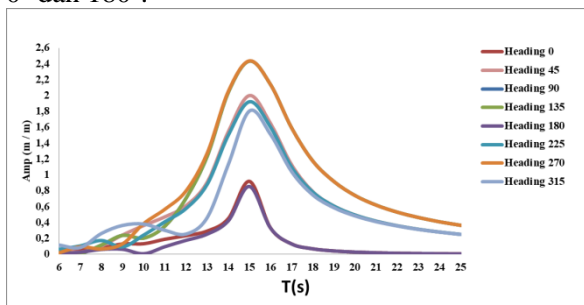
Gambar 9. RAO Surge full load condition

Grafik respon *motion surge* kondisi *free floating* menunjukan pada heading 180 mengalami nilai signifikan terbesar yakni 0,87 m/m sedangkan nilai terkecil terjadi pada heading 90⁰ dan 270⁰.



Gambar 10. RAO Sway full load condition

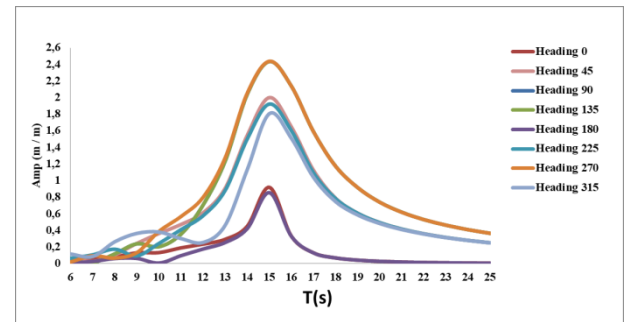
Grafik respon *motion sway* kondisi *free floating* menunjukan pada heading 90 dan 270 mengalami nilai signifikan terbesar yakni 0,862 m/m sedangkan nilai terkecil terjadi pada heading 0⁰ dan 180⁰.



Gambar 11. RAO Heave full load condition

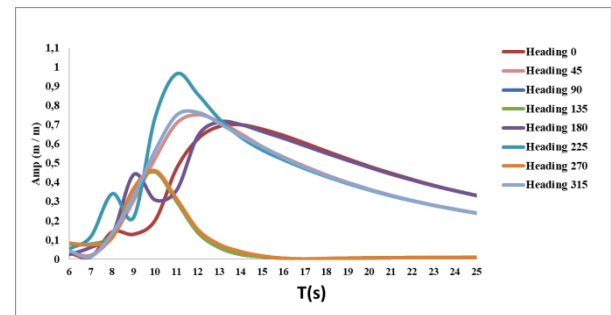
Grafik respon *motion heave* kondisi *free floating* menunjukan pada heading 90 dan 270 mengalami nilai signifikan terbesar yakni 0,996

m/m sedangkan nilai terkecil terjadi pada heading 0⁰ dan 180⁰.



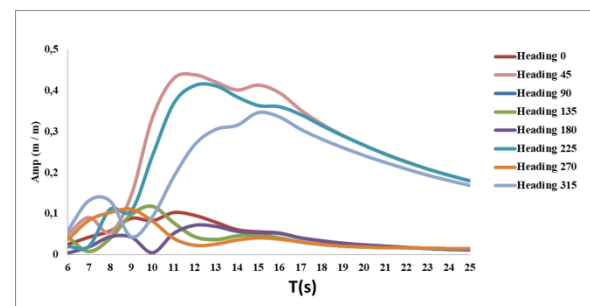
Gambar 12. RAO Roll full load condition

Grafik respon *motion roll* kondisi *free floating* menunjukan pada heading 90 dan 270 mengalami nilai signifikan terbesar yakni 2,439 m/m sedangkan nilai terkecil terjadi pada heading 0⁰ dan 180⁰.



Gambar 13. RAO Pitch full load condition

Grafik respon *motion pitch* kondisi *free floating* menunjukan pada heading 135 mengalami nilai signifikan terbesar yakni 0,998 m/m sedangkan nilai terkecil terjadi pada heading 90⁰ dan 270⁰.



Gambar 14. RAO Yaw full load condition

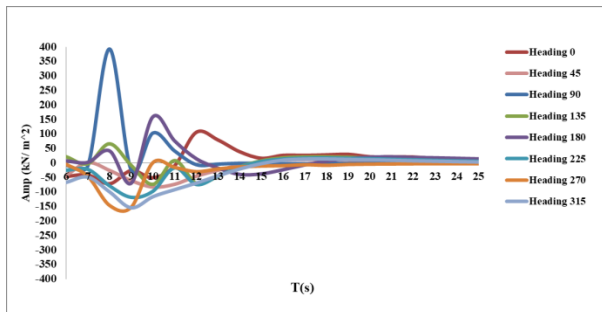
Grafik respon *motion sway* kondisi *free floating* menunjukan pada heading 45 mengalami nilai signifikan terbesar yakni 0,439 m/m sedangkan nilai terkecil terjadi pada heading 90⁰ dan 270⁰.

Dari analisa grafik RAO FSO pada kondisi *free floating* diketahui bahwa secara umum karakteristik gerakannya pada enam derajat

kebebasan olah gerak kapal yakni *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw* akan berbeda dengan nilai RAO *motion* dengan *mooring system*. Nilai RAO *motion* FSO dengan *mooring system* relatif lebih kecil daripada nilai RAO *motion* FSO tanpa *mooring system*. Dengan kata lain, semakin bertambahnya jumlah *chain line* dari suatu *mooring system* yang bekerja pada FPSO maka besar respon motion tertinggi akan semakin menurun. Hal ini dikarenakan pada FPSO dengan *mooring system* terdapat gaya pengembali (*restoring force*) dari *chain line*. [9]

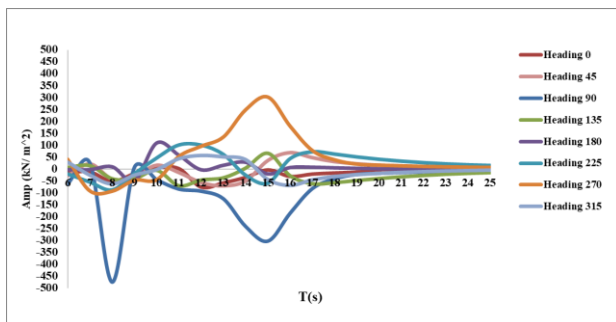
3.3. Mean Wave Drift Force

Dari analisa *wave drift force* pada kapal *free floating* diperoleh amplitudo pada gerak *surge*, *sway* dan *yaw* karena ketiga gerakan tersebut merupakan gerak yang berpengaruh dominan pada kekuatan *mooring system* FSO kondisi *moored* akibat dari *second order* yang akan menentukan besar kecilnya *tension* yang terjadi pada *chain line* karena adanya *drifting force* pada FSO. [3]



Gambar 15. Mean drift force Surge full load condition.

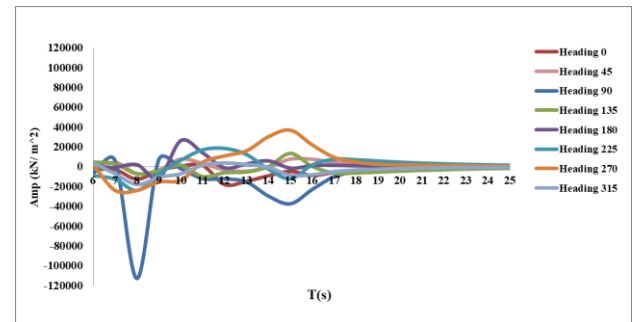
Grafik gaya *drift surge* kondisi *free floating* menunjukan pada *heading 90* mengalami nilai signifikan terbesar yakni 393 kN/m² pada rentang waktu T sebesar 8 detik.



Gambar 16. Mean drift force Sway full load condition.

Grafik gaya *drift sway* kondisi *free floating* menunjukan pada *heading 90* mengalami

nilai signifikan terbesar yakni -474,7 kN/m² pada rentang waktu T sebesar 8 detik.



Gambar 17. Mean drift force yaw full load condition.

Grafik gaya *drift sway* kondisi *free floating* menunjukan pada *heading 90* mengalami nilai signifikan terbesar yakni -112747,700 kN.m/m² pada rentang waktu T sebesar 8 detik.

3.4. Analisa tension mooring line pada kondisi intact dan damage

Analisa pada *mooring line* berupa *tension* maksimum pada kapal FSO dilakukan dengan memasukkan parameter hidrostatis berupa *hydrodynamic drag*, *wave load* (*first load*), *wind load* dan *wave drift load* (*second order*) untuk setiap konfigurasi dalam kondisi terkena beban lingkungan.

Tabel 10. Hasil *tension* pada desain pertama

Case	Damage(kN)		Intact(kN)	
	Storm	Operating	Storm	Operating
Heading	45	45	90	90
Damage line	L02	L02	L00	L00
L01	5787,96	4671,08	3606,20	2678,49
L02	0,00	0,00	4095,42	3004,10
L03	2284,08	1621,92	3417,67	2422,39
L04	1979,29	1443,79	3279,82	2353,41
L05	595,72	612,88	693,08	726,98
L06	600,08	622,46	680,75	715,65
L07	594,21	665,75	434,14	513,31
L08	630,05	696,87	434,39	509,64

Hasil analisa pada model pertama didapat nilai *tension* terbesar terjadi di *heading 45°* pada *line L01* sebesar 5787,96 kN pada kondisi *damage line L02* dan kondisi *intact* terjadi pada *heading 90°* di *line L02* sebesar 4095,42 kN.

Tabel 11. Hasil *tension* pada desain kedua.

Case	Damage(kN)		Intact(kN)	
	Storm	Operating	Storm	Operating
Heading	0	0	0	0
Damage line	L08	L01	L00	L00
L01	2783,90	0,00	1997,90	1847,80
L02	409,89	435,27	393,55	389,16
L03	126,71	64,18	104,65	95,03
L04	6,71	19,55	215,00	104,13
L05	78,12	28,98	74,00	18,33
L06	249,44	37,31	162,01	145,18
L07	498,88	516,79	462,72	443,07
L08	0,00	2445,53	2113,24	1957,69

Hasil analisa pada model kedua didapat nilai *tension* terbesar terjadi di *heading* 0° pada *line* L01 sebesar 2783,90 kN pada kondisi *damage line* L08 dan kondisi *intact* terjadi pada *heading* 0° di *line* L01 sebesar 1997,90 kN.

Tabel 12. Hasil *tension* pada desain ketiga.

Case	Damage(kN)		Intact(kN)	
	Strom	Operating	Strom	Operating
Heading	45	45	45	45
Damage line	L02	L01	L00	L00
L01	4648,54	0,00	4084,55	3682,50
L02	0,00	4046,82	4080,27	3699,98
L03	1490,55	696,86	1266,85	603,67
L04	1235,31	415,32	1025,87	357,61
L05	59,33	51,15	44,71	39,51
L06	60,64	54,44	45,41	32,91
L07	217,14	198,45	276,82	108,71
L08	242,65	258,14	328,00	171,70

Hasil analisa pada model ketiga didapat nilai *tension* terbesar terjadi di *heading* 45° pada *line* L01 sebesar 4648,54 kN pada kondisi *damage line* L02 dan kondisi *intact* terjadi pada *heading* 45° di *line* L01 sebesar 4084,55 kN.

Analisa optimasi disain *Spread mooring* dilakukan dengan menggunakan 3 desain variasi *mooring line* yaitu (1) Model pertama, *Spread mooring* dengan material R4 *Studless* diameter 92 mm. (2) Model kedua, *Convensional Bouy Mooring* dengan materal *wire-rope* 150 mm. (3) Model ketiga, *Spread mooring* dengan material kombinasi *wire-rope* diameter 200 mm dan *chain* R4 *Studlink* diameter 92.

Berdasarkan analisa yang dilakukan pada ketiga disain variasi konfigurasi *mooring system* bahwa *tension* maksimum terjadi pada dasain *spread mooring* R4 *studless* 92 mm dengan

kondisi *damage* dan *heading* 45 pada *line* L01 sebesar 5787,96 kN serta kondisi *intact* dan *heading* 90 pada *line* L02 sebesar 4095,42 kN. Analisa *tension* maksimum yang didapat diambil pada komponen *fairlead* kapal ketika *mooring line* mengalami tegangan akibat kondisi beban lingkungan dan sarat penuh.

3.5. Mooring Line Tension

Hasil tensin terbesar tiap desain *spread mooring* akan divalidasi sesuai kriteria API RP 2SK untuk kondisi *tension* maksimum. hasil validasi *mooring line* sebagai berikut

Tabel 13. Hasil validasi *line tension* pada model pertama.

Case	Intact	Damage
Storm (100 year RP)	4095,42	5787,96
Operating (10 year RP)	3004,10	4671,08
Max	4095,42	5787,96
Safety Factor (SF)	1,91	1,35

Hasil validasi *safety factor* (SF) pada model pertama dengan nilai *tension* maksimum didapat pada kondisi *damage* sebesar 1,35 dan kondisi *intact* sebesar 1,91.

Tabel 14. Hasil validasi *line tension* pada model kedua.

Case	Intact	Damage
Storm (100 year RP)	1997,90	2783,90
Operating (10 year RP)	1957,69	2445,53
Max	1997,90	2783,90
Safety Factor (SF)	1,84	1,34

Hasil validasi *safety factor* (SF) pada model pertama dengan nilai *tension* maksimum didapat pada kondisi *damage* sebesar 1,84 dan kondisi *intact* sebesar 1,34.

Tabel 15. Hasil validasi *line tension* pada model ketiga.

Case	Intact(kN)	Damage(kN)
Storm (100 year RP)	4084,55	4648,54
Operating (10 year RP)	3009,98	4046,82
max	4084,55	4648,54
Safety Factor	1,61	1,41

Hasil validasi *safety factor* (SF) pada model pertama dengan nilai *tension* maksimum didapat pada kondisi *damage* sebesar 1,61 dan kondisi *intact* sebesar 1,41.

Dari hasil validasi *mooring tension* dari ketiga desain, model ketiga pada kondisi *intact tension* maksimum tidak memenuhi kriteria dan untuk model pertama dan kedua semua jenis material yang digunakan memenuhi kriteria API RP 2SK.

3.6. Anchor Holding Capacity

Hasil analisis *anchor tension* diambil dari *line* yang mengalami *tension* terbesar sebagai validasi dengan desain kriteria menurut API RP 2SK

Tabel 16. Hasil validasi *anchor holding* pada model pertama.

Case	Intact(kN)	Damage(kN)
Storm (100 year RP)	3939,24	5659,90
Operating (10 year RP)	2757,95	4529,07
Max	3939,24	5659,90
Safety Factor (MK617 mt)	1,69	1,18

Hasil validasi *safety factor* (SF) pada model pertama dengan nilai *achor holding* maksimum didapat pada kondisi *damage* sebesar 1,18 dan kondisi *intact* sebesar 1,69.

Tabel 17. Hasil validasi *anchor holding* pada model kedua.

Case	Intact(kN)	Damage(kN)
Storm (100 year RP)	2121,52	2791,40
Operating (10 year RP)	1964,64	2436,90
Max	2121,52	2791,40
Safety Factor (MK617 mt)	3,14	2,39

Hasil validasi *safety factor* (SF) pada model pertama dengan nilai *achor holding* maksimum didapat pada kondisi *damage* sebesar 2,39 dan kondisi *intact* sebesar 3,14.

Tabel 18. Hasil validasi *anchor holding* pada model ketiga.

Case	Intact(kN)	Damage(kN)
Storm (100 year RP)	3902,75	4554,06
Operating (10 year RP)	3579,43	3954,93
Max	3902,75	4554,06
Safety Factor (MK617 mt)	1,71	1,46

Hasil validasi *safety factor* (SF) pada model pertama dengan nilai *achor holding* maksimum

didapat pada kondisi *damage* sebesar 1,46 dan kondisi *intact* sebesar 1,71.

Dari hasil validasi *anchor holding* dari ketiga model dan jenis material yang digunakan semuanya memenuhi kriteria API RP 2SK.

3.7. Excursion

Excursion atau *offset* adalah perpindahan posisi pada FPSO dengan jarak sejauh x dan y meter setelah terkena gelombang dan merupakan salah satu bentuk respon dari FSO pada saat mendapat beban lingkungan. Nilai *excursion* yang diizinkan yakni 20% dari kedalaman perairan.

Alternatif lain yang dapat digunakan dengan menggunakan *time domain*, *frekuensi domain*, kombinasi keduanya atau *model testing*. Mean *offset* yang diizinkan adalah 2% sampai 4% dari kedalaman perairan sedangkan untuk maximum *offset* dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kedalaman perairan, lingkungan dan sistem riser.[10]

Tabel 19. Hasil *excursion* terbesar pada model pertama

Case	Intact (m)		Damage (m)	
	X	Y	X	Y
Storm (100 year RP)	9,0	7,49	9,71	13,45
Operating (10 year RP)	6,2	6,12	9,61	10,38

Hasil analisa pada model pertama dengan nilai *excursion* yang terjadi pada *tension* terbesar didapat pada kondisi *damage* dengan nilai x=9,71 m dan y=13,45 m dan kondisi *intact* sebesar x=9 m dan y=7,49m.

Tabel 20. Hasil *excursion* terbesar pada model kedua.

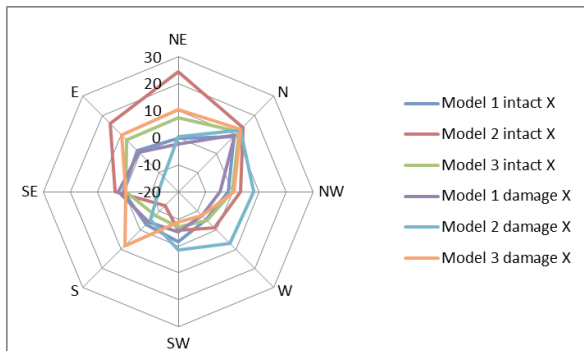
Case	Intact (m)		Damage (m)	
	X	Y	X	Y
Storm (100 year RP)	24,37	0,518	25,42	0,55
Operating (10 year RP)	24,08	0,506	25,66	0,25

Hasil analisa pada model kedua dengan nilai *excursion* yang terjadi pada *tension* terbesar didapat pada kondisi *damage* dengan nilai x=25,42 m dan y=0,55 m dan kondisi *intact* sebesar x=24,37 m dan y=0,518m. untuk nilai *offset* yang didapat pada model 2 tidak memenuhi kriteria operasi yakni 20% kedalaman perairan.

Tabel 21. Hasil *Excursion* terbesar pada model ketiga.

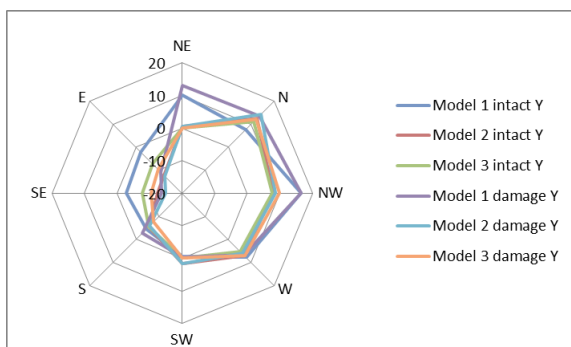
Case	Intact (m)		Damage (m)	
	X	Y	X	Y
Storm (100 year RP)	11,64	10,99	12,59	12,07
Operating (10 year RP)	10,61	11,29	11,12	12,32

Hasil analisa pada model ketiga dengan nilai *excursion* yang terjadi pada tension terbesar didapat pada kondisi *damage* dengan nilai $x=12,59$ m dan $y=12,07$ m dan kondisi *intact* sebesar $x=11,64$ m dan $y=10,99$ m.



Gambar 18. Grafik *offset* pada arah X (m)

Hasil perbandingan nilai *offset* dari tension terbesar untuk setiap delapan arah *heading* pada arah X dengan nilai terbesar *offset* terjadi pada model 2 kondisi *damage*.



Gambar 19. Grafik *offset* pada arah Y (m)

Hasil perbandingan nilai *offset* dari tension terbesar untuk setiap delapan arah *heading* pada arah Y dengan nilai terbesar *offset* terjadi pada model 1 kondisi *damage*.

Hasil *vessel offset* diambil dari keadaan titik *origin* kapal ke posisi setelah *running model* mengalami perpindahan yang cukup signifikan pada *heading* 45^0 (*quartering seas*) untuk model pertama dan ketiga, sedangkan untuk model kedua terjadi pada *heading* 0^0 (*head seas*). Hal ini dikarenakan desain sudut masuk *mooring* sangat

berpengaruh pada *offset* dan *tension* kapal saat terkena beban lingkungan. Besar nya *offset* yang dialami kapal pada saat beroperasi akan berpengaruh pada proses *offloading*, dimana *riser* akan mengalami pergerakan signifikan yang menyebabkan terjadinya momen dan gaya yang berdampak pada konstruksi *riser*.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pada bagian pembahasan, ini penulis mengambil berapa kesimpulan diantaranya: 1) Model *spread mooring* dengan konfigurasi model pertama memiliki nilai *tension* terbesar yakni sebesar 5787,96 kN pada kondisi *damage* dan 4095,42 kN pada kondisi *intact* dan nilai *offset* terbesar yakni $x = 9,71$ m dan $y = 13,45$ m pada kondisi *damage* dan $x = 9,0$ m dan $y = 7,49$ m pada kondisi *intact*. Model *spread mooring* dengan konfigurasi model kedua merupakan pengembangan desain dari jenis *spread mooring* yakni *convensional bouy mooring* (CBM) yang memiliki nilai *tension* terbesar yakni sebesar 2791,40 kN pada kondisi *damage* dan 2121,52 kN pada kondisi *intact* dan nilai *offset* terbesar yakni $x = 25,42$ m dan $y = 0,55$ m pada kondisi *damage* dan $x = 24,37$ m dan $y = 0,518$ m pada kondisi *intact*. Model *spread mooring* dengan konfigurasi model ketiga merupakan kombinasi *wire* dengan *chain* dimana nilai *tension* terbesar yakni sebesar 4648,54 kN pada kondisi *damage* dan 4084,55 kN pada kondisi *intact* dan nilai *offset* terbesar yakni $x = 12,59$ m dan $y = 12,07$ m pada kondisi *damage* dan $x = 11,64$ m dan $y = 10,99$ m pada kondisi *intact*. 2) Pada model ketiga, untuk nilai *tension* terbesar kondisi *intact* tidak memenuhi disain kriteria dan variasi dasain *spread mooring* pertama dan kedua pada setiap kondisi kapal memenuhi kriteria API RP 2SK. 3) *Offset* terbesar terjadi pada model kedua kondisi *heading* 0^0 sebesar $x = 25,42$ m dan $y = 0,55$ m, dari hasil *offset* tersebut tidak memenuhi dari persyaratan fungsional yang harus dipenuhi kapal FSO Barakuda dalam melakukan operasi yakni 20% kedalaman perairan. 4) Dari ketiga desain *spread mooring* yang dianalisa, desain pertama merupakan desain yang optimal jika dipandang dari segi probabilitas operasi karena pergerakan kapal yang tidak signifikan saat terkena beban lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Fauzan, Ahmad. Analisa Kekuatan Spread mooring Pada Sistem Tambat FDPSO Berbentuk Silinder Di Perairan Lepas

- Pantai Barat Natuna-Indonesia Menggunakan FEM. *Teknik Perkapalan* Vol 4, No 3 (2016)
- [2] Lewis, W. E. *Principles of Naval Architecture (Second Revision), Volume III - Motions in Waves and Controllability*. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1998.
- [3] Rozak, Abdul. *Analisa Kekuatan Rantai Spread Mooring Akibat Motion Pada FPSO Berbasis Time Domain*, *Ocean engineering*, 2017
- [4] Hidayat, Jamhari. *Analisis Tegangan Lokal Maksimum Struktur Chain Stopper Pada Hexagonal Single Buoy Mooring Terhadap FSO Saat Sistem Offloading*, *Ocean engineering*, 2017.
- [5] Medco E&P Natuna. *Spread mooring Analysis Report Belida FSO Project*. Jakarta, 2016
- [6] *Naval facilities engineering command. Fleet Moorings Basic Criteria Planning Guidelines*. Virginia, 1985
- [7] *API Recommended Practice 2SK. Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. Washington D.C: American Petroleum Institute, 1997
- [8] DNV. *DNV OS E301 - Position Mooring*. Norway: Det Norske Veritas. DNV, 2004.
- [9] B.V. *Classification of Mooring System for Permanent and Mobile Offshore Units*, France: Bureau Veritas, 2015
- [10] Hakim, Luqman Hadi. *Analisa Perilaku Dinamis FPSO Dengan System Internal Turret Mooring*, *Teknik Kelautan*, 2018