

PERANCANGAN SISTEM MOORING PADA SPAR

DI SELAT MAKASSAR

Ikha Jaya Narendra¹ dan Krisnaldi Idris²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha no. 10, Bandung 40132

Ikhanarendra12@gmail.com¹ dan krisnaldi@ocean.itb.ac.id²

ABSTRAK

Kebutuhan Energi Migas di Indonesia makin bertambah tiap tahunnya, diperlukan eksplorasi dan eksploitasi cadangan migas di laut dalam Indonesia sebagai salah satu cara memenuhi kebutuhan tersebut. Salah satu sumur di laut dalam Indonesia adalah Cekungan Kutai, dengan kedalaman perairan >1000 m diperlukan struktur terapung untuk mengeksplorasi migas dari daerah tersebut. Salah satu jenis struktur terapung yang dapat digunakan adalah Spar.

Spar adalah sebuah struktur terapung yang berbentuk silinder panjang vertikal yang dibentuk dari beberapa silinder kecil yang disambungkan menjadi satu struktur yang besar. Diperairan lepas Spar akan mengalami pergerakan yang diakibatkan oleh gaya lingkungan seperti gelombang, angin, dan arus serta dipengaruhi oleh ukuran dari *hull*, sistem *mooring*, dan konfigurasi *riser*.

Dalam karya tulis ini akan dirancang ukuran *hull* Spar berupa diameter, panjang, draft serta ketebalan lambungnya untuk dianalisis keseimbangan dan kestabilannya. Akan dirancang juga sistem *mooring* dengan konfigurasi *catenary* sebanyak 12 *mooring line* yang ditambatkan ke dasar laut dan akan dikenakan gaya gelombang dari 12 arah sesuai dengan DNV-OS E301 menggunakan dua jenis gelombang yakni gelombang reguler dan gelombang acak (JONSWAP) akan dimodelkan pada sebuah perangkat lunak. Kemudian akan dilakukan analisis terhadap respon perpindahan Spar yang diatur dalam API RP 2SK sebesar 8% dari kedalaman perairan, dan gaya tarik pada *mooring* sesuai dengan API RP 2SK dengan aktor keamanan 50% dari MBL untuk analisis statik *intact*, 60% untuk analisis dinamik *intact*, 70% untuk analisis statik *damage*, dan 75% untuk analisis dinamik *damage*. Dengan hasil gaya tarik maksimal sebesar 48.3% dari MBL dan perpindahan maksimal sebesar 3.5% dari kedalaman perairan, dimana kedua parameter tersebut memenuhi standard API RP 2SK.

Kata Kunci : *Catenary Mooring*, Gaya Tarik, Respon Struktur, Spar

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi migas di Indonesia yang makin bertambah menuntut untuk diperlukannya eksploitasi cadangan migas di laut dalam Indonesia, salah satu lokasinya berada di Cekungan Kutai dengan kedalaman perairannya >1000 m Sehingga diperlukan sebuah struktur terapung untuk mengeksploitasi migas dari tempat tersebut secara efisien. Salah satu struktur terapung yang dapat digunakan adalah Spar.

Spar adalah struktur terapung yang memiliki lambung silinder vertikal. Spar di laut lepas akan bergerak dipengaruhi oleh gaya lingkungan seperti gelombang, angin, dan arus serta ukuran dari lambung Spar, sistem *mooring*, dan konfigurasi *riser*. Untuk itu pada karya tulis ini akan dirancang ukuran lambung Spar dan sistem *mooringnya* mengacu pada kriteria desain API RP 2SK dan DNV-OS E301.

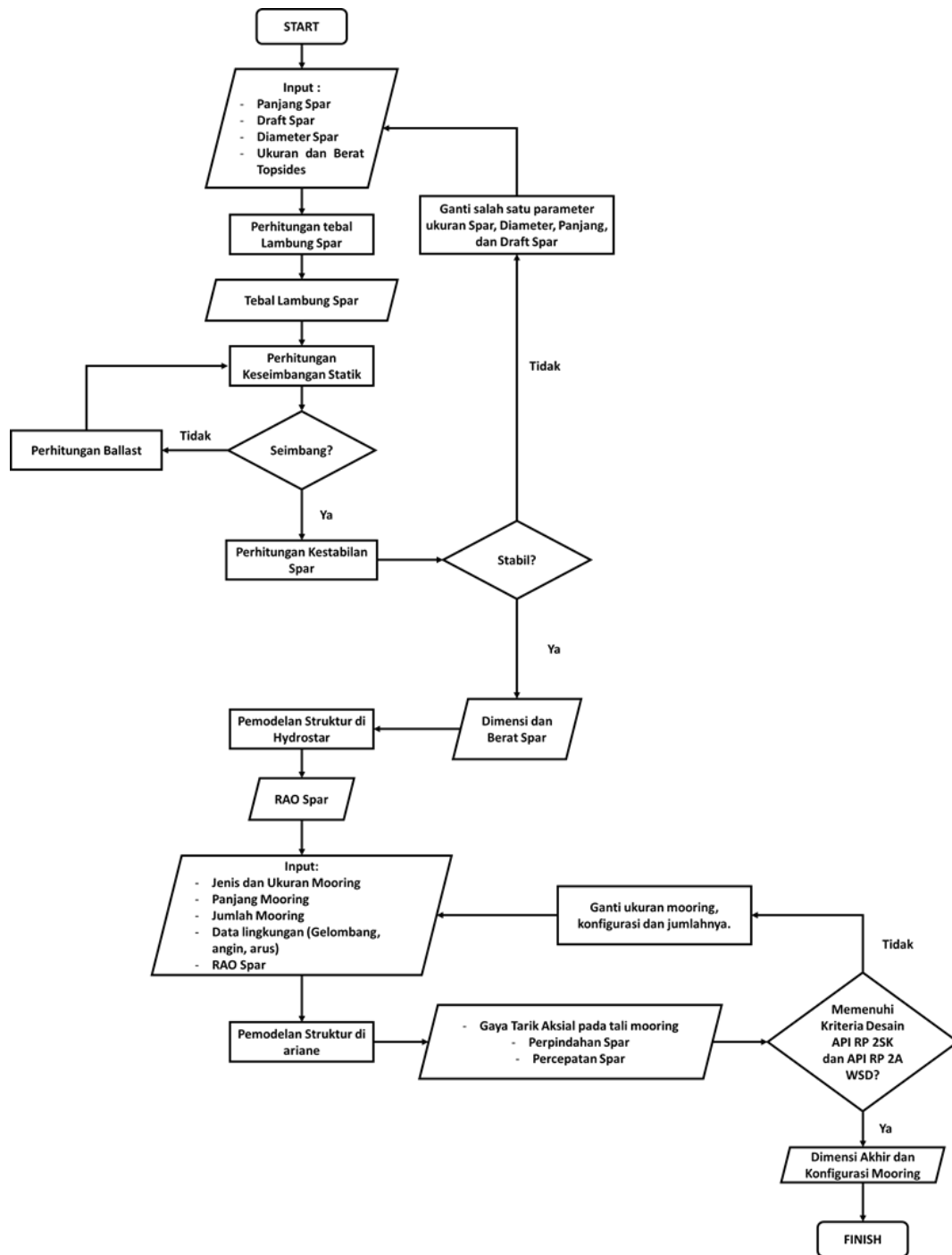
Tujuan dari Laporan Tugas Akhir ini adalah:

1. Menentukan dimensi lambung (*hull*) Spar berupa panjang, diameter dan ketebalan.
2. Menentukan sistem *mooring* yang sesuai untuk Spar. jenis, konfigurasi, material dan panjang *mooring*.

Ruang lingkup dalam karya tulis ini adalah perhitungan dimensi lambung, pengecekan keseimbangan dan kestabilan struktur. Pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak untuk mendapatkan fungsi transfernya. Pemodelan sistem *mooring* struktur menggunakan perangkat lunak dan analisis pada keluaran software yakni perpindahan dan gaya tarik pada tali *mooring*.

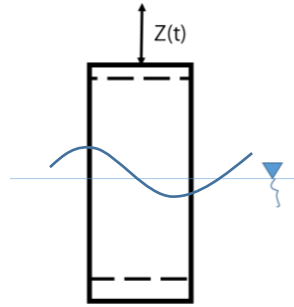
TEORI DAN METODOLOGI

Proses desain dimulai dengan studi literatur terlebih dahulu mengenai eksplorasi dan eksploitasi migas yang menggunakan struktur spar. Kemudian dilakukan perhitungan analitik meliputi penentuan tebal Spar, keseimbangan statik struktur, dan kestabilan Spar. Kemudian Spar akan dimodelkan menggunakan perangkat lunak *hydrostar* untuk mendapatkan nilai *respons amplitude operator* pada 6 arah derajat kebebasan. Kemudian sistem *mooring* Spar dimodelkan menggunakan perangkat lunak *ariane* untuk mendapatkan ukuran dan konfigurasi *mooring* pada Spar. Output dari perangkat lunak *ariane* akan dianalisis apakah memenuhi kriteria desain dari API RP 2SK dan API RP 2A WSD.



Gambar 1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

Sebuah struktur terapung yang diletakkan di laut lepas akan mengalami pergerakan pada 6 arah derajat kebebasan yang dimilikinya akibat gaya hidrodinamika yang bekerja pada struktur. 6 arah tersebut adalah *surge*, *sway*, *heave* untuk pergerakan translasi pada 3 sumbu utama dan *roll*, *pitch*, *yaw* untuk pergerakan rotasi pada 3 sumbu utamanya. Gaya hidrodinamik yang bekerja pada struktur dapat dikatakan sebagai superposisi dari pergerakan struktur pada perairan tenang yang menimbulkan gaya radiasi dan pergerakan air pada struktur yang diam karena gaya luar berupa gaya gelombang.



Gambar 2 Pergerakan Arah Vertikal Struktur Terapung

Pergerakan Struktur terapung pada Gambar 2 akan memenuhi hukum newton ii seperti pada persamaan 1 apabila struktur terkena gaya oleh gelombang.

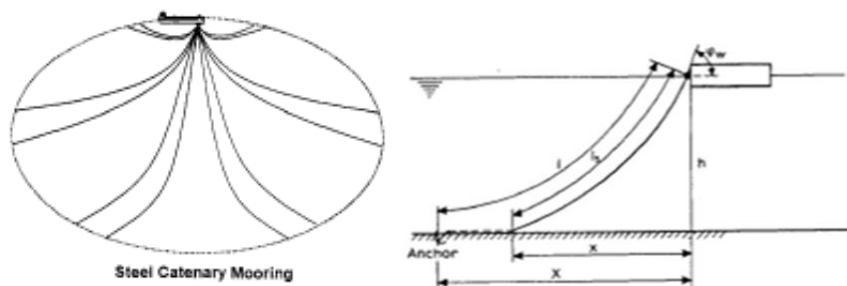
$$\sum F = m\ddot{z} \quad (1)$$

$$(m + a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F \quad (2)$$

Respon Amplitude Operator (RAO) adalah fungsi transfer yang menggambarkan respon gerak struktur terhadap gaya luar yang bekerja pada struktur. Untuk struktur terapung RAO merupakan perbandingan antara perpindahan terhadap tinggi gelombang pada frekuensi tertentu.

$$Respons(t) = RAO * \eta(t) \quad (3)$$

Sistem *mooring catenary* merupakan sistem *mooring* yang bergantung pada berat talinya untuk menahan pergerakan struktur. Karena berat *mooring* tidak sama dengan nol maka *mooring* akan membentuk kurva didalam perairan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3 Sistem Catenary (Chakrabarti S. K., 2005)

Dengan perhitungan analitik kondisi statik daripada konfigurasi *mooring* tersebut dapat diketahui nilai gaya tarik aksial dengan persamaan 4.

$$T = T_H + wh + (w + \rho gA)z \quad (4)$$

Sementara bentuk *mooring* didalam air dapat didekati dengan persamaan 5.

$$z = \frac{T_H}{w} \left[\cosh \left(\frac{w}{T_H} x \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Metode beda hingga digunakan untuk mendapatkan nilai kecepatan dan nilai percepatan dari data perpindahan yang telah didapat. Metode beda hingga berdasarkan pada deret taylor yang diambil hingga orde keduanya. Salah satu jenis metoda beda hingga adalah *forward difference* dengan nilai turunan pada suatu titik dapat diketahui dengan persamaan 6.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (6)$$

STUDI KASUS

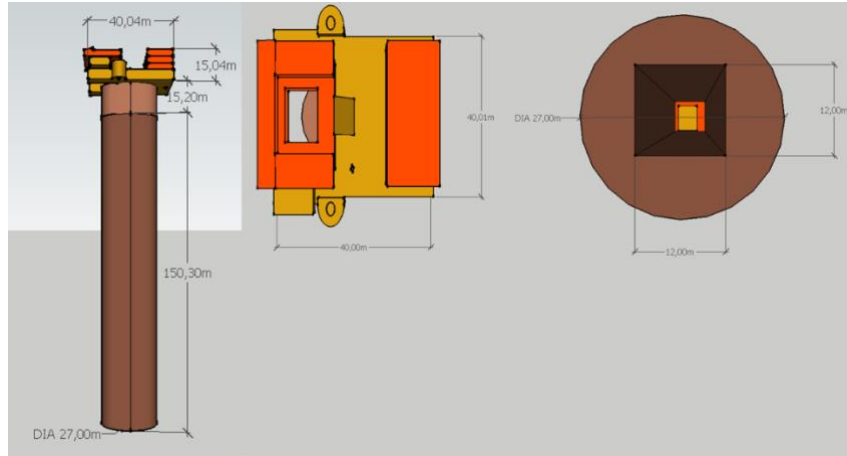
Spar akan diletakkan di Selat Makassar sejauh 80 km sebelah timur Kota Santan, Kalimantan Timur, untuk mengeksploitasi migas dari Sumur Gehem.

Tabel 1 Data Lingkungan Struktur

RETURN PERIOD	100 year
UNITS	(m, s, m/s)
Significant Wave Height (Hs)	3
Peak Spectral Period (Ts)	8.3
Spectrum Type	JONSWAP
Peak enhancement Factor	2.5
Wind Speed 1 hour	21.2
Surface Current Speed	1.11
Water Depth	1828.8

Mengacu pada DNV-OS E301 bahwa untuk kondisi desain maksimum diperlukan data lingkungan dengan periode ulang 100 tahun serta analisis dilakukan dengan 12 arah datang gelombang dan angin.

Kemudian desain awal ukuran struktur berupa ukuran diameter, panjang, draft dan lebar topside dapat dilihat pada Gambar 4. Massa topside diambil sebesar 4844 ton



Gambar 4 Data Struktur

	ANALISIS	KONDISI		SF
MAXIMUM DESIGN CONDITION	STATIK	INTACT		2
		DAMAGE		1.43
	DINAMIK	INTACT	REGULAR	1.67
			ACAK	1.67
		DAMAGE	REGULAR	1.25
			ACAK	1.25

Gambar 5 Kriteria Desain

Perhitungan tebal Spar menggunakan pendekatan tegangan hoop yang terjadi pada lambung Spar akibat tekanan hidrostatik air, secara konservatif diambil nilai tekanan hidrostatik terbesar yang dialami lambung di bagian keel. Dengan menyelesaikan persamaan 7 menggunakan *safety factor* 2, didapat tebal lambung Spar sebesar 0.2 m.

$$t \geq SF \times \frac{P_h D_o}{2\sigma_H} \quad (7)$$

Setelah didapat nilai tebalnya dapat dihitung keseimbangan berat arah vertikal antara berat struktur (*topside* dan *hull*) dengan gaya apung dengan menyelesaikan persamaan 8.

$$\Sigma F_z = 0 \quad (8)$$

$$B - W = 0 \quad (9)$$

$$647,677 - 383,184 = 264,493 \text{ MN} \quad (10)$$

Dari persamaan 10 didapat sisa berat sebesar 264.493 MN sehingga diperlukan tambahan pemberat berupa bijih besi yang diletakkan di dasar lambung Spar dengan ketinggian yang didapat setelah menyelesaikan persamaan 11 sebesar 12.46 m.

$$h = \frac{W_b}{\rho_{\text{bijih besi}} g A} \quad (11)$$

$$h = \frac{264493163.08}{5046 \times 9.81 \times \left(\frac{\pi 27^2}{4} - 12^2 \right)} \quad (12)$$

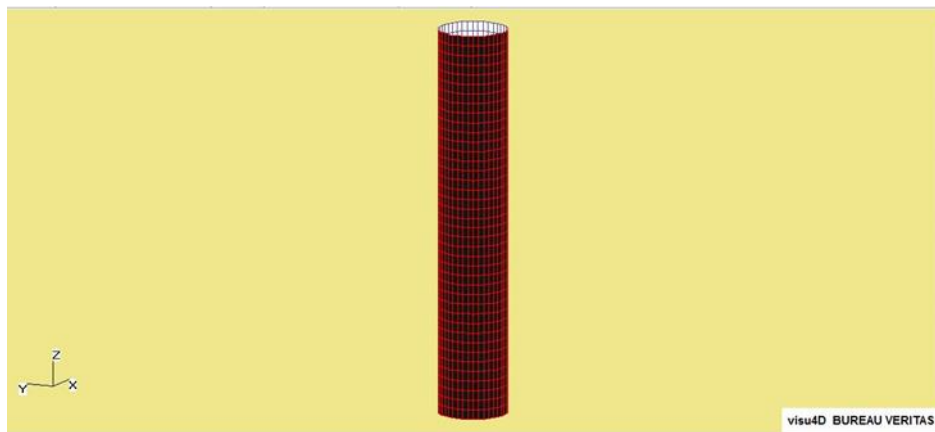
$$h = 12.46 \text{ m} \quad (13)$$

Kemudian diperlukan pengecekan kestabilan struktur dengan mencari letak titik berat, apung dan metasentrisnya. Kemudian untuk menentukan kestabilannya dilakukan dengan cara menyelesaikan persamaan 14.

$$BM + KB - KG > 0 \quad (14)$$

$$0.378 + 75.15 - 58.2 = 17.322 > 0, \text{Stabil} \quad (15)$$

Karena struktur sudah seimbang secara vertikal dan stabil maka nilai parameter struktur berupa panjang, diameter dan draft digunakan sebagai input pemodelan menggunakan *hydrostar*. Didapat mesh seperti pada Gambar 6.

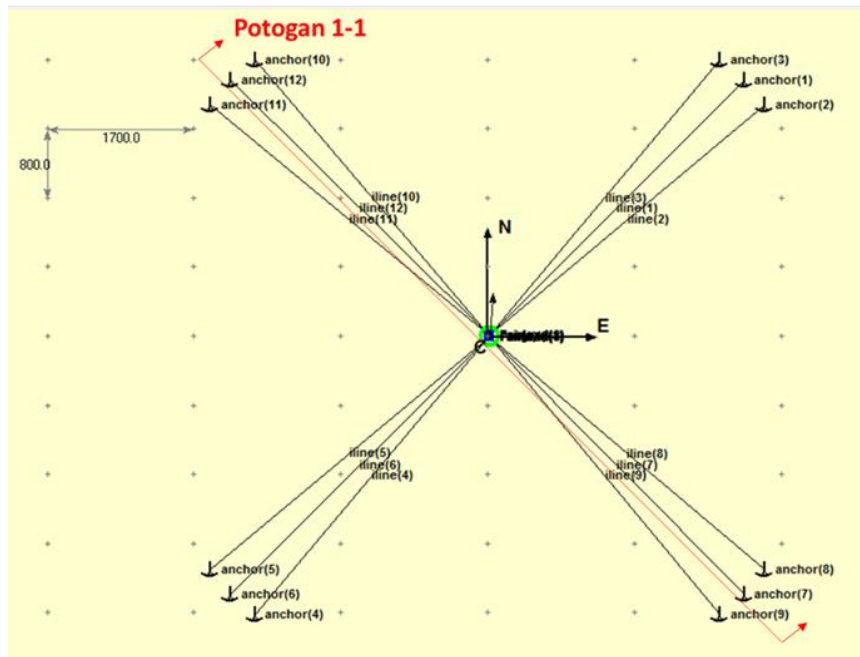


Gambar 6 Mesh Spar pada Hydrostar

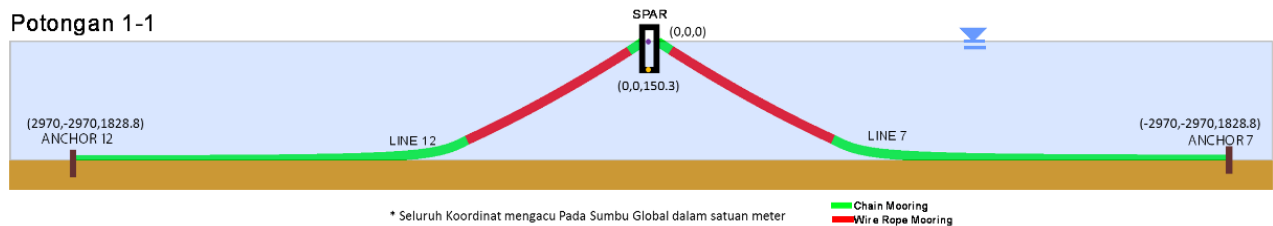
Langkah terakhir adalah memodelkan sistem *mooring* Spar menggunakan perangkat lunak ariane. Input yang diperlukan adalah struktur spar, ukuran dan konfigurasi *mooring* dan data lingkungan. Analisis akan dilakukan merujuk pada Tabel 3. Dengan kondisi *intact* adalah ketika seluruh tali *mooring* terpasang dan kondisi *damage* ketika salah satu tali *mooring* putus.

Tabel 2 Input Ukuran *Mooring*

Mooring	diameter (mm)	MBL (kN)
Surface Chain Mooring	205	22740.90
Wire Rope Mooring	153	20837.77
Bottom Chain Mooring	205	22740.90



Gambar 7 Konfigurasi Mooring

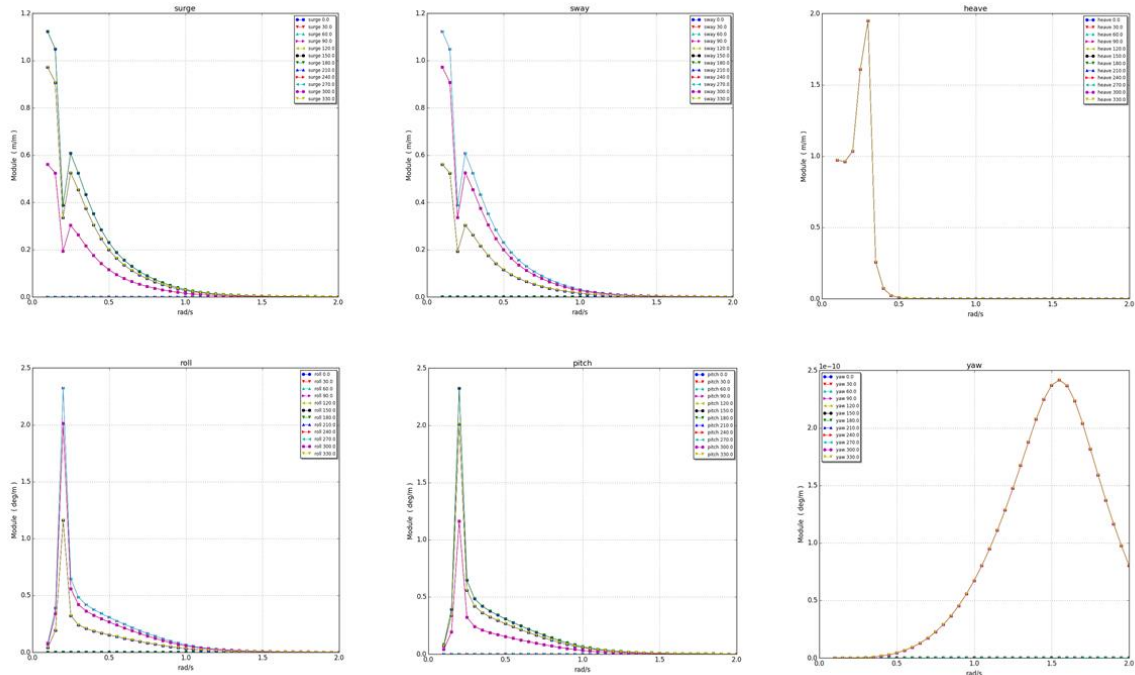


Gambar 8 Tampak Potongan 1-1

Tabel 3 Rangkuman Kasus Pemodelan

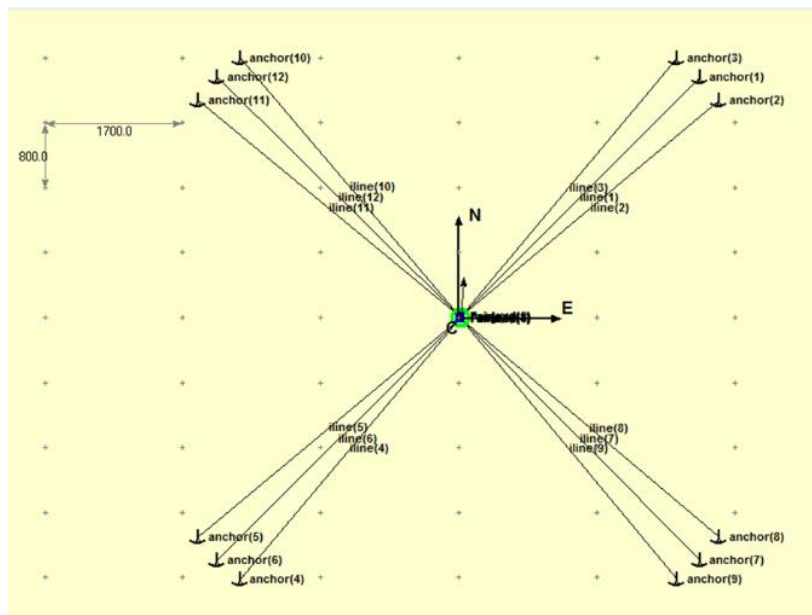
MAXIMUM DESIGN CONDITION	ANALISIS	KONDISI		ALLOWABLE TENSION (%MBL)	ALLOWABLE OFFSET (%WATER DEPTH)
	STATIK	INTACT		50	8
		DAMAGE		70	8
	DINAMIK	INTACT	REGULAR	60	8
			ACAK	60	8
		DAMAGE	REGULAR	75	8
			ACAK	75	8

HASIL DAN ANALISIS



Gambar 9 Grafik RAO dari kiri ke kanan *surge*, *sway*, *heave* (atas) dan *roll*, *pitch*, *yaw* (bawah)

Dari Gambar 9 diketahui pada 5 arah derajat kebebasan (*surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*) nilai frekuensi natural Spar berada pada frekuensi rendah yakni dibawah 0.5 rad/s, pada gerak *heave* seluruh arah datang gelombang memberikan amplitudo yang sama karena bentuk struktur yang simetris. Sementara pada gerak *yaw* tidak terjadi pergerakan karena bentuk struktur yang simetris.

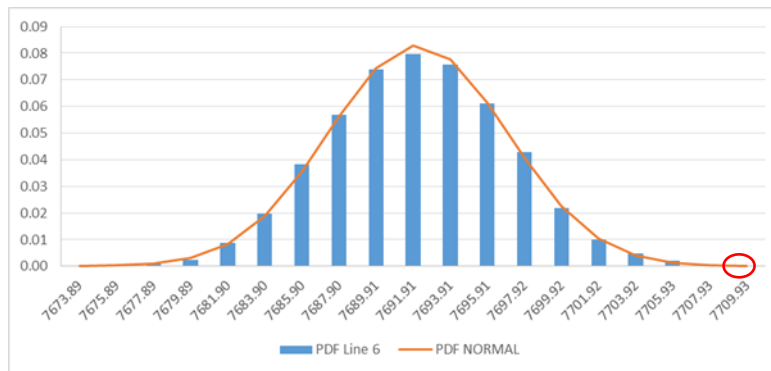


Gambar 10 Konfigurasi *Mooring* Kondisi Intact

Tabel 4 Output Nilai Maksimal Pemodelan Ariane

MAXIMUM DESIGN CONDITION	ANALISIS	KONDISI	ALLOWABLE TENSION (%MBL)	ALLOWABLE OFFSET (%WATER DEPTH)	MAX TENSION (kN)	MAX TENSION (%MBL)	MAX OFFSET (m)	MAX OFFSET (%WATER DEPTH)
	STATIK	INTACT	50	8	9377.4	41.0	0	0
		DAMAGE	70	8	9405.0	41.3	45.25	2.4
	DINAMIK	INTACT	REGULAR	60	9795.0	43.0	14.11	0.7
			ACAK	60	9855.0	43.3	14.88	0.7
		DAMAGE	REGULAR	75	10992.0	48.3	56.56	3.0
			ACAK	75	9980.0	43.8	63.63	3.5

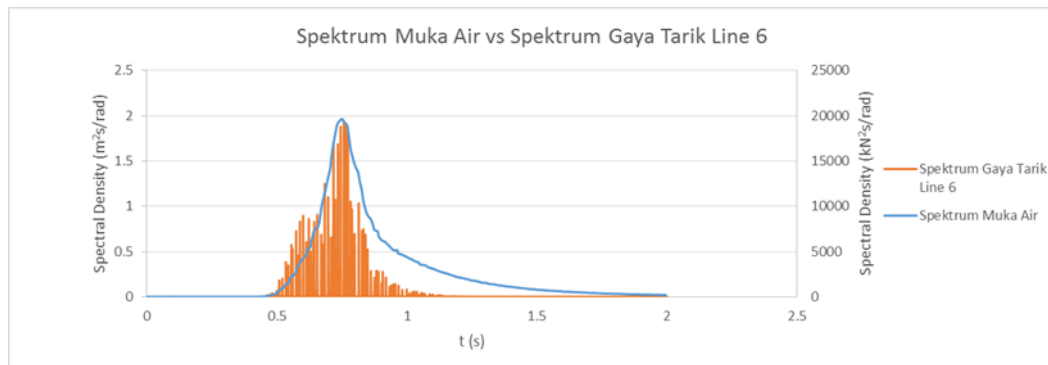
Dari Tabel 4 diketahui bahwa nilai gaya tarik maksimal untuk setiap analisis kondisi *intact* maupun *damage* tidak ada yang melebihi batas izinnya, dengan nilai maksimum terjadi pada analisis dinamik kondisi *damage* akibat gelombang regular sebesar 48.3% dari MBL. Untuk perpindahan struktur pada setiap analisis kondisi *intact* maupun *damage* tidak ada yang melebihi batas izin dengan perpindahan terbesar terjadi ketika analisis dinamik kondisi *damage* akibat gelombang acak. Nilai maksimal tersebut didapat ketika arah datang gaya lingkungan (arus, angin, dan gelombang) datang dari arah yang sama yakni utara.



Gambar 11 Perbandingan PDF Data Gaya Tarik *Line 6* dengan Distribusi Normal

Dari Gambar 11 dapat ditinjau kecenderungan bahwa distribusi data mengikuti distribusi normal. Dari data statistik hasil $\mu + 3\sigma$ akan memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai maksimum gaya tarik tali (bagian ditandai dengan lingkaran merah) dan berlaku untuk semua distribusi hasil respon gerak dan gaya tali lainnya.

Dari data seri waktu yang diperoleh dapat dibentuk spektrum dalam domain frekuensinya seperti pada Gambar 12.



Gambar 12 Perbandingan Spektrum Muka Air dengan Spektrum Gaya Tarik

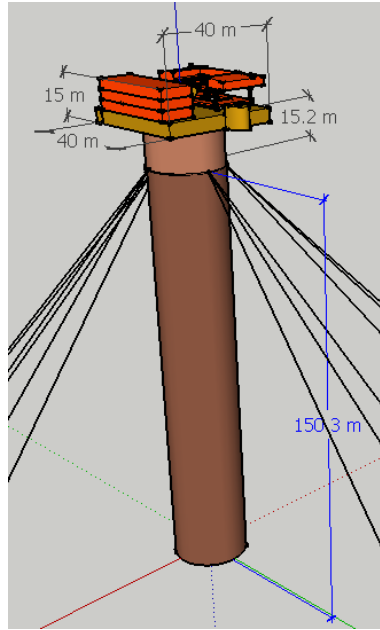
Dari Gambar 12 dapat diketahui bahwa puncak respon gaya tarik berada di frekuensi 0.75 rad/s sama dengan frekuensi puncak gelombang. Berarti gaya tarik yang terjadi lebih dipengaruhi oleh gelombang yang terjadi.

SIMPULAN

1. Sesuai dengan kriteria desain API RP 2A WSD, *hull* Spar akan memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 5.

Tabel 5 Spesifikasi *Hull* Spar

Panjang Hull	165.5 m
Draft Hull	150.3 m
Free board	15.2 m
Diameter Hull	27 m
Ukuran Wellbay	12x12 m
Jumlah Section	15 buah
Panjang Tiap Section	11.03 m
Tebal dinding Hull	20 cm
Tinggi Ballast Besi	12.46 m
Massa Topside	4844 Ton
Ukuran Topside	40 x 40 m
Tinggi Topside	15 m
Massa SPAR	66022.152 Ton

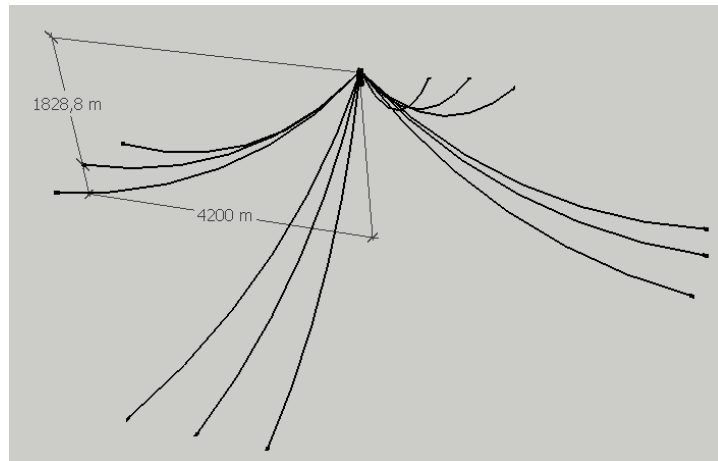


Gambar 13 Model Spar

2. Sesuai dengan API RP 2SK, konfigurasi *mooring* Spar akan memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 6.

Tabel 6 Spesifikasi *Mooring*

Jenis Sistem Mooring	Catenary	
Konfigurasi Mooring	12 Line mooring dengan kombinasi Studlink Steel chain dan Spiral Strand Wire Rope	
Diameter Mooring	Studlink Chain	205 mm
	Spiral Strand Wire Rope	153 mm
Massa Mooring	Studlink Chain	906.5 kg/m
	Spiral Strand Wire Rope	122.14 kg/m
Paid Out Length	5000 m	
Panjang Chain Mooring	Area Sea bed	60% Paid Out Length
	Area Free Surface	37% Paid Out Length
Panjang Spiral Strand Wire rope	5% Paid Out Length	
MBL Mooring	Studlink Chain	22740.90 kN
	Spiral Strand Wire Rope	20837.77 kN



Gambar 5. 1 Konfigurasi *Mooring* Pada Spar

3. Dari hasil analisis menggunakan perangkat lunak *hydrostar* didapat nilai RAO terbesar pada enam arah derajat kebebasan. Untuk simpangan *surge* nilai terbesar terjadi pada frekuensi 0.1 rad/s akibat gelombang dari arah barat dan timur ($90^0, 270^0$) sebesar 1.12 m per amplitudo gelombang. Untuk simpangan *sway* nilai terbesar terjadi pada frekuensi 0.1 rad/s akibat gelombang dari arah utara dan selatan ($0^0, 180^0$) sebesar 1.12 m per amplitudo gelombang. Untuk simpangan *heave* nilai terbesar terjadi pada frekuensi 0.3 rad/s sebesar 1.95 m per amplitudo gelombang akibat gelombang dari semua arah karena bentuknya yang simetri. Untuk simpangan *roll* nilai terbesar terjadi pada frekuensi 0.2 rad/s akibat gelombang dari arah barat dan timur ($90^0, 270^0$)) sebesar 2.5^0 per amplitudo gelombang. Untuk simpangan *pitch* nilai terbesar terjadi pada frekuensi 0.2 rad/s akibat gelombang dari arah utara dan selatan ($0^0, 180^0$) sebesar 2.5^0 per amplitudo gelombang. Untuk simpangan *yaw* nilai terbesar terjadi pada frekuensi 1.55 rad/s akibat gelombang dari semua arah karena bentuknya yang simetri dengan amplitudo yang sangat kecil.

4. Dari hasil analisis menggunakan perangkat lunak *ariane* didapat pergerakan translasi struktur lebih dipengaruhi oleh gaya arus dan angin. Sementara pergerakan osilasi struktur pada titik setimbang dipengaruhi oleh gelombang. Dengan perpindahan terbesar pada arah *surge* dan *sway* terjadi ketika arah datang arus, gelombang dan angin berasal dari arah yang sama (utara). Resultan perpindahan maksimal untuk kondisi *intact* sejauh 14.14 m kearah barat daya, sementara pada kondisi *damage* sejauh 56.56 m kearah barat daya akibat gelombang reguler. Resultan perpindahan maksimal untuk kondisi *intact* sejauh 14.88 m kearah barat daya, sementara pada kondisi *damage* sejauh 63.63 m kearah barat daya akibat gelombang acak. Nilai perpindahan maksimal masih memenuhi batas izin yang berlaku menurut API RP 2SK.

5. Nilai perpindahan struktur dipengaruhi oleh RAO dan gaya lingkungan terutama gelombang pada osilasi strukturnya. Pada analisis dinamik akibat gelombang reguler perioda simpangan struktur pada ke enam derajat sesuai dengan perioda gelombang. Sementara pada kondisi *intact* perpindahan terbesar pada tiap arah derajat kebebasannya memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi puncak gelombang.
6. Percepatan terbesar pada arah *surge* terjadi akibat arah datang gelombang, angin, dan arus dari arah yang sama (utara) pada kondisi *intact* akibat gelombang acak sebesar 0.21 m/s^2 . Nilai percepatan maksimal masih memenuhi batas izin yang berlaku menurut API RP 2A.
7. Pada kondisi *intact* akibat gelombang reguler gaya tarik terbesar terjadi ketika arah datang gelombang, angin, dan arus dari arah yang sama (utara) dialami oleh tali nomor 1 sebesar 9795 kN karena struktur bergerak menuju arah selatan dan barat. Pada kondisi *damage* gaya tarik terbesar dialami oleh *line* 2 sebesar 10992 kN akibat putusnya tali nomor1 sehingga Spar berpindah lebih jauh ke arah barat daya. Nilai gaya tarik maksimal masih memenuhi batas izin yang berlaku menurut API RP 2SK.
8. Pada kondisi *intact* akibat gelombang acak gaya tarik terbesar terjadi ketika arah datang gelombang, angin, dan arus dari arah yang sama (utara) dialami oleh tali nomor 1 sebesar 9855 kN karena struktur bergerak menuju arah selatan dan barat. Pada kondisi *damage* gaya tarik terbesar dialami oleh *line* 2 sebesar 9979 kN akibat putusnya tali nomor1 sehingga Spar berpindah lebih jauh ke arah barat daya. Nilai gaya tarik maksimal masih memenuhi batas izin yang berlaku menurut API RP 2SK.
9. Dari seluruh analisis dan kondisi didapat nilai perpindahan terbesar sejauh 44.6 meter ke arah barat dan selatan pada kondisi *damage* akibat gelombang acak (2,4% dari kedalaman), percepatan maksimum struktur sebesar 0.21 m/s^2 pada kondisi *intact* akibat gelombang acak (2% dari percepatan gravitasi), dan gaya tarik tali *mooring* terbesar senilai 10992 kN pada kondisi *damage* akibat gelombang reguler (48% dari MBL). Dari ketiga parameter tersebut tidak ada nilai yang melebihi batas izin menurut API RP 2A dan API RP 2SK.

SARAN

1. Pemodelan akan lebih baik apabila memperhatikan kondisi lingkungan sekitar area rencana seperti kontur dari *seabed* dan jalur pipa atau kabel *existing* sehingga konfigurasi *mooring* dapat disesuaikan dengan keadaan aktual.
2. Analisis tambahan berupa analisis *fatigue* tali *mooring* dapat dilakukan untuk mengetahui kekuatan *mooring* terhadap beban yang berulang pada waktu yang panjang.

3. Proses desain lambung Spar dapat dilanjutkan ketahapan yang lebih detail, seperti desain struktur Spar.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute. (2005). *API RP 2SK Design And Analysis Of Stationkeeping System For Floating Structures*. Washington: API.
- American Petroleum Institute. (2007). *API RP 2A WSD Recommended Practice For Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform-Working Stress Design*. Washington: API.
- Bramasta, A. (2014). *Analisis Respon Dinamik Tension Leg Platform*. Bandung: ITB.
- BRIDON. (2015). *Oil & Gas Catalogue*. South Yorkshire: BRIDON.
- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook Of Offshore Engineer*. Amsterdam: Elsevier.Ltd.
- DNV-GL. (2015). *DNVGL-OS-E301 Position Mooring*. Oslo: DNVGL.
- Technip. (2017, 5 21). *Technip*. Diambil kembali dari Technip: www.technip.com
- Vicinay Cadenas , S.A. (2015). *The Future Of Mooring*. Bilbao: Vicinay Cadenas.