

Analisis Kekuatan Struktur Global *Buoy* pada *Single Point Mooring* FSO Arco Ardjuna

D.R.Mauliani⁽¹⁾, Handayanu⁽²⁾, M. Murtedjo⁽³⁾

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Kelautan, ^{2,3} Staf Pengajar Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
E-mail: handayanu@oe.its.ac.id

Abstrak— FSO Arco Ardjuna merupakan salah satu fasilitas lepas pantai yang beroperasi di Laut Jawa. Dalam beroperasi FSO Arco Ardjuna dilengkapi dengan sistem tambat yaitu *Single Point Mooring* (SPM) tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) *buoy*. *Buoy* merupakan bagian terpenting karena sangat berpengaruh besar terhadap kekuatan sistem tambat tersebut. Dengan memperhatikan geometri dan *displacement* dari struktur *buoy*, serta beban lingkungan maka akan menentukan kelayakan *buoy* tersebut untuk dioperasikan beberapa tahun kedepan dalam sistem tambat. Pada studi kasus ini, *buoy* pada sistem tambat FSO Arco Ardjuna telah memasuki umur operasi untuk mengestimasi diperlukan atau tidak diperlukannya modifikasi sehingga memerlukan adanya analisis ulang kekuatan global dari stuktur *buoy*. Dengan mengetahui gerakan dari FSO dan *single point mooring*, maka dapat diketahui besar *tension hawser* dan rantai jangkar, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap konstruksi *buoy* dan dianggap aman dalam beroperasi. Berdasarkan pemodelan yang dilakukan, diketahui bahwa gerak dominan pada saat *free floating* untuk SPM adalah *roll* sebesar 8.10° , untuk FSO gerak osilasi terbesar ialah *roll* pada *light conditon* sebesar 11.78° . Sedangkan gerakan dominan pada saat tertambat untuk SPM adalah *roll* sebesar 0.58° pada saat FSO kondisi *light load*, untuk untuk FSO gerak osilasi terbesar ialah *roll* pada *light conditon* sebesar 2.09° . Berdasarkan simulasi yang dilakukan untuk mendapatkan *tension* maksimum, didapatkan *tension* terbesar *hawser* pada kondisi FSO *light load* sebesar 2181.762 kN pada sudut pembebanan 180° . dengan *safety factor* 1.88. *Safety factor* tersebut lebih besar dari yang disyaratkan oleh ABS, yaitu 1.82. Dengan demikian, struktur ini dapat dikatakan masih aman beroperasi. Hasil *tension* terbesar yang didapatkan dari simulasi sebelumnya digunakan sebagai pembebanan pada pemodelan struktur global. Hasil *von Mises stress* terbesar ialah 178.61 MPa dengan deformasi maksimum sebesar 2.49 mm. Hasil tersebut masih lebih kecil dari tegangan ijin sebesar 225 MPa, sehingga struktur dinyatakan aman untuk beroperasi.

Kata Kunci: *buoy*, estimasi modifikasi, tegangan global, *von-Mises stress*

I. PENDAHULUAN

Berkembangnya teknologi saat ini seiring dengan peningkatan populasi mengakibatkan meningkatnya konsumsi akan hidrokarbon sebagai bahan baku penghasil energi. Karena eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon khususnya di daerah laut dangkal semakin rendah, maka eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon mengarah ke laut dalam. Dengan beralihnya eksplorasi dan eksploitasi dilaut dalam, maka diperlukan teknologi yang mampu untuk eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon pada kondisi laut dalam. Salah satu teknologi yang dikembangkan dan telah digunakan adalah struktur terapung (*floating structure*). Disamping kemampuan *floating structure* untuk eksplorasi hidrokarbon dilaut dalam, struktur tersebut dinilai lebih ekonomis daripada struktur terpancang karena tidak perlu membuat struktur baru dan dapat dimanfaatkannya kembali ketika telah selesai eksplorasi. Salah satu struktur terapung yang sering digunakan dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon di laut dalam adalah *Floating Storage and Offloading System* (FSO).

FSO (*Floating Storage and Offloading System*) adalah salah satu struktur terapung yang berfungsi menyimpan dan menyalurkan minyak dan gas bumi ke *shuttle tanker*. Pergerakan struktur terapung sangat dipengaruhi oleh beban lingkungannya. Beban lingkungan yang bekerja diantaranya adalah beban gelombang, beban angin dan beban arus. Perlu adanya analisis dan perhitungan mengenai pergerakan FSO agar FSO dapat beroperasi dan berfungsi dengan aman,. Salah satunya adalah dengan melakukan analisis terhadap kinerja sistem tambat pada bangunan apung FSO itu sendiri. Konfigurasi sistem tambat dapat berupa *spread mooring* atau *single point mooring*. Jenis *single point mooring* adalah tipe sistem tambat yang bersifat *weathervaning* yaitu mampu bergerak bebas mengikuti kondisi lingkungan. Jadi saat beroperasi, FSO atau struktur terapung lainnya dapat bergerak mengikuti arah gelombang namun tetap tertambat pada *mooring*. *Single point mooring* memiliki beberapa tipe salah satunya yang sering digunakan dalam sistem tambat FSO adalah tipe CALM (*Catenary Anchored Leg Mooring*) *buoy*. Salah satu komponen penting dalam sistem tambat CALM *buoy* adalah *buoy*. Hal ini dikarenakan *buoy* yang digunakan dalam sistem tambat juga sangat berpengaruh besar terhadap kekuatan sistem tambat tersebut. Secara geometri, ukuran *buoy* yang digunakan dalam menambat FSO harus sesuai dengan ukuran FSO yang digunakan. Sehingga pada saat beroperasi SPM benar-benar bisa

berfungsi untuk menahan gerakan FSO. Dengan memperhatikan geometri, *displasmen* dan tegangan maksimum global dari struktur *buoy* maka akan membantu mempermudah untuk mengetahui kelayakan *buoy* tersebut untuk dioperasikan dalam sistem tambat.

Pada studi kasus ini, sistem tambat FSO Arco Ardjuna akan ada penambahan umur operasi karena telah beroperasi selama 40 tahun lebih. Selain itu, sistem tambat FSO Arco Ardjuna telah memasuki batas masa klasifikasi regulasi yang ada sehingga memerlukan adanya analisis ulang kekuatan global dari stuktur *buoy* apakah masih layak digunakan untuk digunakan dalam sistem tambat. Dengan mengetahui gerakan dari FSO dan *single point mooring*, maka dapat diketahui besar *tension hawser* yang menghubungkan antara FSO dan SPM dan *tension* rantai jangkar yang menghubungkan SPM dengan jangkar, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap konstruksi *buoy* dan dianggap aman dalam beroperasi. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis kekuatan struktur global *buoy mooring* pada *single point mooring* FSO Arco Arjuna.



Gambar 1. FSO Arco Ardjuna tertambat SPM (Sumber: PT. Citra Mas, 2014)

II. URAIAN PENELITIAN

Tugas akhir ini dalam pengerjaannya diawali dengan pengumpulan data dan literatur mengenai FSO Arco Ardjuna dan *single point mooring*. Setelah didapatkan data, dilakukan pemodelan awal dan divalidasi sesuai dengan data yang ada, agar sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Langkah selanjutnya ialah mencari RAO struktur pada kondisi *full* dan *light* untuk FSO. Kemudian dilakukan simulasi sistem SPM dan FSO pada kondisi tertambat sesuai data lingkungan yang ada untuk mengetahui RAO struktur dan *tension* terbesar pada *hawser* dan rantai jangkar. Hasil simulasi sistem pada kondisi tertambat menghasilkan *tension* terbesar yang akan digunakan sebagai pembebanan untuk analisis lokal struktur. Hasil *tension hawser* dan *equivalent stress* kemudian dianalisis sesuai *code* yang digunakan, yaitu *American Bureau of Shipping*.

A. Data

Data yang digunakan dalam analisis ini dapat dilihat pada Tabel 1-5 sebagai berikut:

- FSO Arco Ardjuna:

Tabel 1. *Principle dimension* FSO Arco Ardjuna

Designation	Units	Minimum Operating Draft	Maximum Operating Draft
Length, LBP	m	142.6	
Breadth, B	m	48.2	
Depth, D	m	26.5	
Draft, T	m	2.5	24
Displacement	t	15529	153202
LCG	m	1.29	2.17
KG (VCG)	m	14.04	13.44
Yaw Radius of Gyration	m	34.5	34.5

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

- *Single Mooring*

Tabel 2. *Main dimension CALM buoy*

Designation	Unit	Data
Shell Outer Diameter	M	12
Centre Well Diameter	M	3.57
Skirt Outer Diameter	M	16.26
Buoy Body Height	M	5.3
Skirt Thickness	Mm	12
Skirt Height/ Baseline	M	1
Buoy Installed Draft	M	2.38
Centre of Gravity (KG)	M	3.42

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

- *Mooring Hawasers*

Tabel 3. Karakteristik *mooring hawser*

Designation	Data
Number of Lines	Twin Line
Material	Nylon
Length	220 ft
Design Mooring Force	400 tonnes
New Dry Breaking Strength per Hawser	4094 kN

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

- *Anchor Legs and Pattern Definition*

Tabel 4. Karakteristik *anchor legs*

Designation	Data
Number of Legs	6
Anchoring pattern	Even Spacing (60°)
Paid Out Length	350 m
Pretension	262.17 kN
Pretension angle	45.26°
Number of segment	1
Chain diameter	102 mm
Chain type	R3
Minimum breaking load	8315 kN
Minimum breaking load after corrosion	7051 kN
Unit Weight in Air	210.16 kg/m
Unit weight in Water	182.72 kg/m
Stiffness EA	868 MN
Anchoring radius	337.5 m

(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

- Data Lingkungan Perairan Laut Jawa

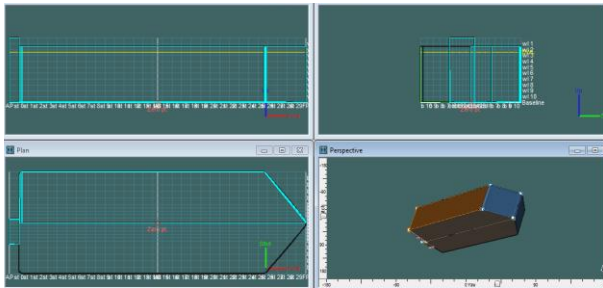
Tabel 5. Data lingkungan

Parameter	100-years return period
Kedalaman	45 m
Tinggi Gelombang Maksimum/Hm	6.4 m
Periode Gelombang Maksimum /Tm	9.4 s
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	3.6 m
Periode Gelombang Signifikan/Ts	8.3 s
Periode Puncak Gelombang (Tp)	9 s
Spektrum	Jonswap

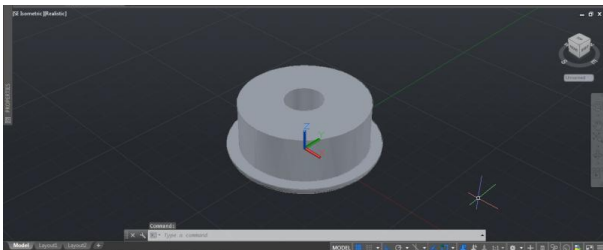
(Sumber: PT. Citra Mas, 2013)

B. Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur untuk FSO Arco Ardjuna dan divalidasi berdasarkan kondisi muatan, yaitu *light load condition* dan *full load condition* agar sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Selain itu juga dilakukan pemodelan struktur SPM.

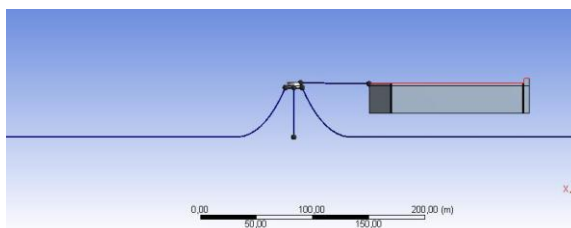
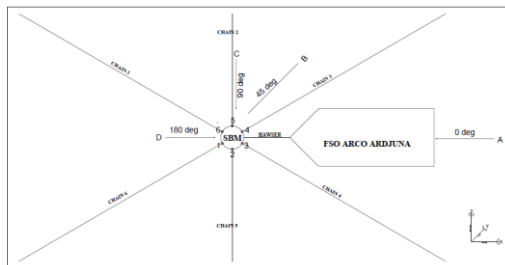


Gambar 2. Pemodelan FSO Arco Ardjuna



Gambar 3. Pemodelan Body Surface Single Point Mooring

Untuk pemodelan struktur tertambat ialah FSO ditambatkan dengan SPM menggunakan dua *hawser* dan SPM ditambatkan dengan enam jangkar menggunakan rantai jangkar dengan konfigurasi sudut tali 60°. Berikut konfigurasi tali tambat yang dapat dilihat pada Gambar 4:



Gambar 4. Konfigurasi Tali Tambat

C. Analisis Gerakan Struktur di Gelombang Regular

Pada pengerjaan tugas akhir ini, dilakukan analisis gerakan struktur FSO Arco Ardjuna dan SPM pada kondisi terapung bebas dan tertambat dengan arah pembebanan 0°, 45°, 90° dan 180°. Selain itu, analisis ini dilakukan dengan skenario variasi muatan FSO, yaitu *light load condition* dan *full load condition*. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus:

$$RAO(\omega) = \frac{Z_p(\omega)}{\eta(\omega)} \dots\dots\dots(1)$$

Zp(ω) = Amplitudo struktur

η(ω) = Amplitudo gelombang

Dari hasil analisis yang dilakukan, RAO yang didapatkan digunakan untuk menghitung amplitudo struktur dengan cara mengalikan RAO dan amplitudo gelombang. Maka, didapatkan amplitudo struktur yang terlihat pada Tabel 6-7 sebagai berikut:

Tabel 6. Nilai amplitudo struktur tertinggi untuk kedua kondisi muatan FSO dan SPM kondisi terapung bebas (*free floating*)

Heading (deg)	Kondisi Muatan	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (deg)	Pitch (deg)	Yaw (deg)
FSO							
0	<i>Full Load</i>	0,35	0,03	1,19	0,65	8,03	0,01
45		0,16	0,58	1,42	2,72	0,77	0,03
90		0,08	1,15	2,83	5,44	0,38	0,07
180		0,31	0,02	1,45	0,61	7,80	0,01
0	<i>Light Load</i>	0,92	0,01	0,86	0,10	2,04	0,01
45		0,06	0,86	0,86	5,89	0,18	0,06
90		0,03	1,72	1,71	11,78	0,09	0,12
180		0,92	0,00	0,87	0,04	2,05	0,00
SPM							
0		2,15	0,00	4,25	0,33	8,07	0,05
45		1,52	1,52	4,27	5,74	5,72	1,43
90		0,01	2,15	4,29	8,10	0,51	0,08
180		2,15	0,00	4,30	0,33	8,07	0,00

Tabel 7. Resume nilai amplitudo struktur tertinggi untuk kedua kondisi muatan FSO dan SPM kondisi tertambat

Heading (deg)	Kondisi Muatan	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (deg)	Pitch (deg)	Yaw (deg)
FSO							
0	<i>Full Load</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
90		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0	<i>Light Load</i>	0,26	0,00	0,28	0,02	2,07	0,01
45		0,18	0,19	0,15	0,77	0,77	0,03
90		0,02	0,32	0,42	2,09	0,01	0,03
180		0,33	0,00	0,31	0,02	1,90	0,01
SPM							
0	<i>FSO Full Load</i>	0,07	0,00	0,03	0,00	0,31	0,00
45		0,05	0,03	0,02	0,38	0,39	0,01
90		0,03	0,04	0,01	0,52	0,25	0,01
180		0,08	0,00	0,02	0,00	0,56	0,00
0	<i>FSO Light Load</i>	0,06	0,00	0,02	0,01	0,45	0,00
45		0,11	0,03	0,01	0,39	0,45	0,01
90		0,05	0,04	0,02	0,58	0,19	0,01
180		0,14	0,00	0,01	0,00	0,56	0,00

Berdasarkan hasil yang ada dapat disimpulkan bahwa untuk FSO pada kondisi *light load* lebih dominan daripada kondisi *full load*, Hal ini dikarenakan pada kondisi *full load* badan FSO yang tercepup air lebih banyak daripada dalam kondisi *light load* sehingga FSO lebih stabil. Nilai maksimum amplitudo struktur FSO kondisi *light load* pada saat terapung bebas terjadi pada saat gerakan osilasi rotasional *roll* sebesar 11.78° untuk arah pembebanan 90° . Nilai maksimum amplitudo struktur SPM pada saat terapung bebas terjadi pada gerakan osilasi rotasional *roll* sebesar 8.10° untuk arah pembebanan 90° . Nilai maksimum amplitudo struktur FSO kondisi *light load* pada saat tertambat terjadi pada saat gerakan osilasi rotasional *roll* sebesar 2.09° untuk arah pembebanan 90° . Nilai maksimum amplitudo struktur SPM kondisi FSO *light load* pada saat tertambat terjadi pada gerakan osilasi rotasional *roll* sebesar 0.58° untuk arah pembebanan 90° .

D. Analisis Tension pada Hawser dan Rantai Jangkar

Pada pengerjaan tugas akhir ini, dilakukan analisis *tension hawser* yang menghubungkan FSO dengan SPM dan *tension rantai jangkar* yang menghubungkan SPM dengan jangkar. Data gelombang yang digunakan ialah data geombang kurun waktu 100 tahunan dengan arah pembebanan pada empat arah yaitu $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ dan 180° . Simulasi dilakukan selama 10800 detik dengan kondisi FSO *light load* dan *full load*. Hasil *tension* tertinggi pada setiap *mooring* dan *hawser* kemudian dihitung *safety factornya* dan dibandingkan dengan *safety factor* yang harus dipenuhi berdasarkan standar *American Bureau of Shipping (ABS)*[3]. *Safety factor* didapatkan dengan membagi *Minimum Breaking Load* dengan *tension* yang didapatkan dari hasil simulasi. Hasil perbandingan tersebut harus lebih besar dari ketentuan ABS, yaitu 1.67 untuk rantai jangkar dan 1.82 untuk *hawser*. Berikut merupakan tabel hasil simulasi sistem tambat yang dapat dilihat pada tabel 8:

Tabel 8. Hasil Analisis *Tension* berdasarkan Arah Pembebanan dan *Safety Factor*

Full Load								
MBL chain = 7051 kN					MBL hawser = 4094 kN			
Heading (deg)	Chain 1 (kN)	Chain 2 (kN)	Chain 3 (kN)	Chain 4 (kN)	Chain 5 (kN)	Chain 6 (kN)	Hawser 1 (kN)	Hawser 2 (kN)
0	408,12	843,63	1928,73	2205,89	448,13	243,61	1893,61	1889,66
45	310,02	905,74	1791,84	348,65	159,87	190,38	1154,86	1659,71
90	1012,68	1532,66	771,85	151,06	176,35	199,10	987,71	1488,05
180	1440,46	184,30	180,66	180,77	248,20	1498,00	1974,13	1884,85
Max	1440,46	1532,66	1928,73	2205,89	448,13	1498,00	1974,13	1889,66
SF	4,89	4,60	3,66	3,20	15,73	4,71	2,07	2,17

Light Load								
MBL chain = 7051 kN					MBL hawser = 4094 kN			
Heading (deg)	Chain 1 (kN)	Chain 2 (kN)	Chain 3 (kN)	Chain 4 (kN)	Chain 5 (kN)	Chain 6 (kN)	Hawser 1 (kN)	Hawser 2 (kN)
0	474,26	920,42	1977,89	2266,49	447,29	212,74	2093,19	2004,74
45	332,13	614,44	1418,77	849,44	160,14	242,67	1024,42	1033,06
90	1338,44	1212,07	642,84	181,18	203,87	267,98	1599,80	2181,76
180	1506,59	261,09	229,82	241,37	247,35	1467,13	2173,70	1999,94
Max	1506,59	1212,07	1977,89	2266,49	447,29	1467,13	2173,70	2181,76
SF	4,68	5,82	3,56	3,11	15,76	4,81	1,88	1,88

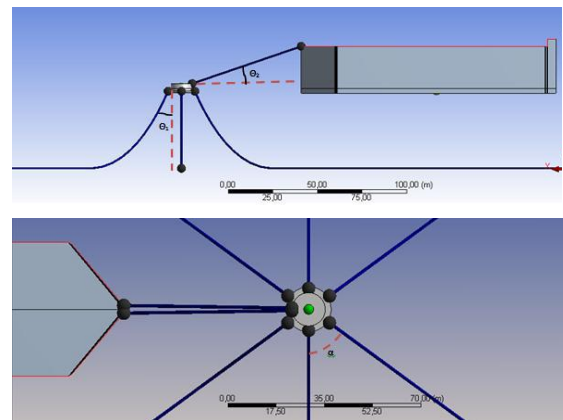
Berdasarkan tabel berikut ini dapat diketahui bahwa dua *hawser* yang menghubungkan antara SPM dengan FSO Arco Ardjuna memiliki *safety factor* 1.88 dan 6 rantai jangkar

yang menghubungkan SPM dengan jangkar memiliki *safety faktor* 3.11 yang berarti lebih besar dari *safety factor* yang dianjurkan oleh ABS. Hal ini menunjukkan bahwa *hawser* dan rantai jangkar masih aman untuk beroperasi.

E. Analisis Tegangan Global Konstruksi SPM

Pada tugas akhir ini, konstruksi SPM menggunakan jenis material baja ASTM 36 dengan *yield strength* sebesar 250 MPA. Konstruksi SPM secara keseluruhan dimodelkan, tetapi untuk turntable dimodelkan secara sederhana dan mekanismenya tidak dimodelkan. Untuk pengait rantai jangkar dimodelkan dengan batang sederhana.

Distribusi tegangan pada pemodelan struktur global konstruksi SPM ini dihasilkan oleh berat struktur SPM sendiri, *tension* pada rantai jangkar maupun *hawser*, percepatan struktur dan gaya hidrostatis. Pada analisis ini, pemberian gaya hanya pada bagian di SPM yang dianggap paling kritis. Jadi pada kondisi muatan FSO *light* memiliki bagian kritis yang sama tetapi nilai beban yang berbeda. *Tension* yang didapatkan dari simulasi merupakan gaya dengan sudut tertentu, maka perlu diperhitungkan sudut yang dibentuk untuk melakukan pembebanan pada konstruksi bolder. Konfigurasi beban tersebut dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 5.



Gambar 5. Konfigurasi beban pada pemodelan global

Pada Gambar 5, tinggi FSO adalah 24 m dan panjang jarak FSO ke SPM adalah 67.056 m. Berdasarkan perhitungan, didapatkan θ_1 sebesar 7.61° , θ_2 sebesar 19.69° dan α sebesar 60° . setelah diketahui kedua sudut tersebut, maka dapat dihitung gaya yang akan digunakan sebagai *input* beban pada pemodelan global konstruksi SPM. Hasil perhitungan dari gaya pada konstruksi SPM ialah terdapat pada Tabel 9 untuk kondisi muatan FSO *light* dengan arah pembebanan 0° .

Tabel 9. Hasil perhitungan beban pada konstruksi SPM

Keterangan	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Detik(s)	Hydro Force (kN)	Percepatan Struktur (m/s ²)		
						x	y	z
Chain 1	7,58	4,38	65,56	2840,75	5278,18	-1,30	0,973	1,776
Chain 2	12,45	0	93,25					
Chain 3	64,03	36,97	553,72					
Chain 4	259,79	149,99	2246,55					
Chain 5	399,33	0	299,06					
Chain 6	527,99	30,48	456,59					
Hawser 1	0	565,96	1581,3					
Hawser 2	0	128,05	357,76					

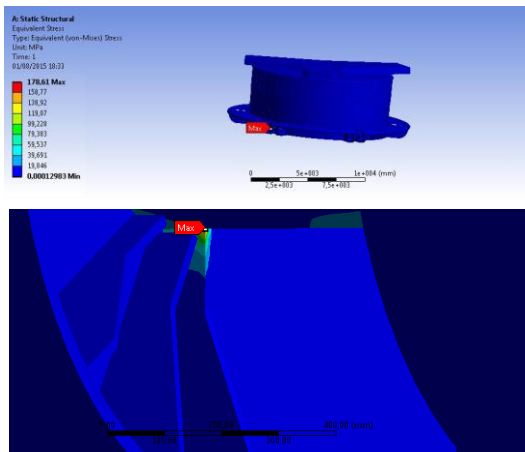
Setelah dilakukan pemodelan dan pembebanan, maka hasilnya ialah tegangan ekuivalen atau *Von Mises Stress*. Persamaan *Von Mises Stress* (Popov,1996) diberikan sebagai berikut:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \dots(2)$$

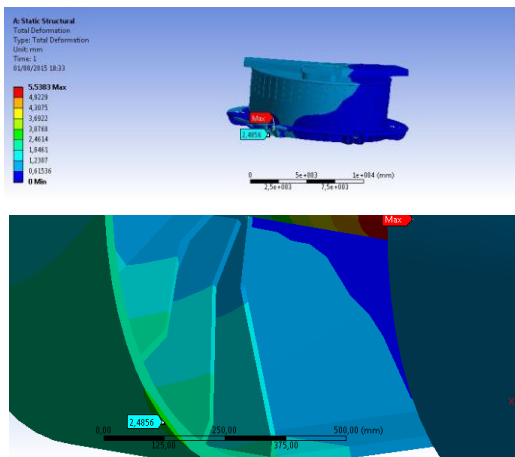
dengan:

- σ_{eq} = tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (Pa)
- σ_x = tegangan normal sumbu x (Pa)
- σ_y = tegangan normal sumbu y (Pa)
- σ_z = tegangan normal sumbu z (Pa)
- τ_{xy} = tegangan geser bidang yz (Pa)
- τ_{yz} = tegangan geser bidang zx (Pa)
- τ_{zx} = tegangan geser bidang xy (Pa)

Hasil yang didapatkan dari analisis ialah besar tegangan terbesar ialah 178.61 MPa. Hasil ini masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang disyaratkan ABS [4], yaitu 90% dari *yield strength*, 225 MPa. Dengan demikian, maka struktur ini dapat dinyatakan masih aman beroperasi dan tidak memerlukan modifikasi. Letak tegangan terbesar pada konstruksi global berada pada penegar pengait rantai jangkar. Deformasi terbesar yang terjadi ialah 2.49 mm. Mengacu pada ABS[5] yang mensyaratkan deformasi maksimum yang boleh terjadi ialah 8mm, maka struktur ini dinyatakan aman beroperasi. Tegangan maksimum dan deformasi SPM dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Tegangan maksimum pada konstruksi SPM



Gambar 7. Deformasi maksimum pada konstruksi SPM

III. KESIMPULAN/RINGKASAN

Kesimpulan yang dapat dibuat berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah :

- a. Respon struktur FSO Arco Ardjuna dan SPM akibat beban gelombang pada saat *free floating* dan tertambat, adalah sebagai berikut :
 - Amplitudo struktur FSO Arco Ardjuna pada kondisi *free floating*, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.92 m, *sway* terbesar 1.72 m, *heave* terbesar 2.83 m, *roll* terbesar 11.7°, *pitch* terbesar 8.10°, *yaw* terbesar 0.12°.
 - Amplitudo struktur SPM pada kondisi *free floating*, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 2.15 m, *sway* terbesar 2.15 m, *heave* terbesar 4.30 m, *roll* terbesar 8.10°, *pitch* terbesar 8.07°, *yaw* terbesar 1.43°.
 - Amplitudo struktur FSO Arco Ardjuna pada kondisi tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.33 m, *sway* terbesar 0.32 m, *heave* terbesar 0.42 m, *roll* terbesar 2.09°, *pitch* terbesar 2.07°, *yaw* terbesar 0.03°.
 - Amplitudo struktur SPM pada kondisi tertambat, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.14 m, *sway* terbesar 0.04 m, *heave* terbesar 0.03 m, *roll* terbesar 0.58°, *pitch* terbesar 0.56°, *yaw* terbesar 0.01°.
- b. Hasil *tension hawser* terbesar yang menghubungkan antara FSO Arco Ardjuna dengan SPM sebesar 2181.76 kN dengan kondisi muatan FSO *light* dan sudut pembebanan 900. *Hawser* memiliki *Minimum Breaking Load* sebesar 4094 kN sehingga dengan *tension* yang didapatkan dari hasil simulasi, memiliki *safety factor* 1.88. *Safety factor* ini lebih dari 1.82 yang dianjurkan oleh *American Bureau of Shipping*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa *hawser* dalam kondisi aman selama proses operasi dengan beban lingkungan 100 tahunan.
- c. Hasil *tension* rantai jangkar terbesar yang menghubungkan antara FSO Arco Ardjuna dengan SPM sebesar 2266.49 kN dengan kondisi muatan FSO *light* dan sudut pembebanan 00. *Hawser* memiliki *Minimum Breaking Load* sebesar 7051 kN sehingga dengan *tension* yang didapatkan dari hasil simulasi, memiliki *safety factor* 3.11. *Safety factor* ini lebih dari 1.67 yang dianjurkan oleh *American Bureau of Shipping*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa rantai jangkar dalam kondisi aman selama proses operasi dengan beban lingkungan 100 tahunan.
- d. Berdasarkan hasil pemodelan struktur global konstruksi SPM dengan pembebanan sesuai *tension hawser* dan rantai jangkar terbesar hasil simulasi sebelumnya, tekanan hidrostatik, percepatan struktur dan berat struktur sendiri, maka didapatkan tegangan maksimum konstruksi SPM sebesar 178.61 MPa dengan deformasi 2.49 mm. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang dianjurkan oleh ABS "*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*" sebesar 225 MPa. Dan Nilai deformasi yang dihasilkan juga masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum

yang tercantum dalam ABS “*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*” yaitu 8 mm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa konstruksi SPM masih aman untuk beroperasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Citra Mas yang telah menyediakan seluruh data yang penulis butuhkan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Ditjen Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan Indonesia yang telah memberikan beasiswa dan dukungan finansial melalui Beasiswa Bidik Misi selama 2011-2015.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chakrabarti, S.K., 1987, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, USA: Computational Mechanics Publications Southampton.
- [2] Popov, E. P., 1996, *Mekanika Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- [3] ABS, 2004, *Guide for Building and Classing Floating Production Installations*, USA: American Bureau of Shipping. C. J. Kaufman, Rocky Mountain Research Lab., Boulder, CO, komunikasi pribadi, (1995, May).
- [4] ABS, 2001, ‘*Safehull-Dynamic Loading Approach*’ for Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Installations, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- [5] ABS, 2001, ‘*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*’, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.