

Analisis *Fatigue Top Side Support Structure Silindris Seastar Tension Leg Platform (TLP) Akibat Beban Lingkungan North Sea*

Mirba H. Dwi Sa'dyah, Eko B. Djatmiko, Murdjito

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ebdjtmiko@oe.its.ac.id

Abstrak— *Tension leg Platform* adalah bangunan lepas pantai semi terapung yang ditambah dengan tendon sampai dasar laut. Dalam operasinya, TLP akan mendapatkan beban-beban dinamis yang bekerja pada struktur secara periodik. Ini dapat menyebabkan kerusakan struktur baik struktur primer, sekunder maupun tersier yang akibatnya dapat mengganggu operasional struktur. Dalam penelitian ini bertujuan membahas *fatigue life pada top side support structure TLP*. Model yang digunakan mengacu pada TLP *Seastar Matterhorn* dengan *similarity parameter displacement*, sarat desain kondisi operasional dan instalasi pada TLP *A West Seno* dan bangunan beroperasi di *North Sea*. Dengan *dimensi support OD = 2* meter dengan ketebalan 20 mm dan brace dengan OD = 1 meter, ketebalan 10mm akan dilakukan analisis kelelahan. Meninjau dari *motion* struktur menunjukkan RAO maksimum gerakan *surge, sway, heave, roll, pitch* dan *yaw* berturut-turut adalah 0.884 m/m, 0.884 m/m, 0.39 m/m, 0.32 m/m, 0.34 m/m, dan 0.16 m/m. Periode natural struktur berada pada frekuensi 0.57 rad/s untuk gerakan *heave*, dan 0.63 untuk gerakan *roll* dan *pitch*. Hal ini berarti amplitudo respon akan selalu lebih kecil dari amplitudo gelombang yang datang. Dengan memperhitungkan *motion* yang terjadi dari rekaman data gelombang selama 34 tahun didapatkan umur kelelahan *top side support structure* dengan pendekatan Palmgren-miner adalah $1.54E+09$ tahun. Struktur masih dikatakan aman karena umur kelelahannya masih di atas umur desain yaitu 75 tahun.

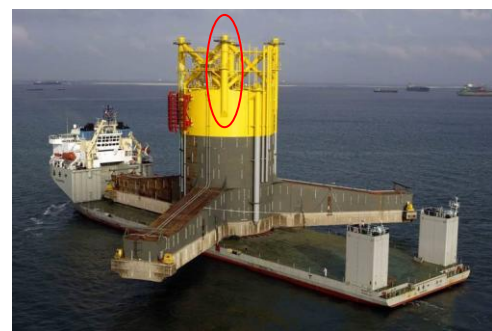
Kata Kunci—*Seastar TLP, motion* struktur, umur kelelahan.

I. PENDAHULUAN

KEBUTUHAN akan minyak dan gas yang semakin meningkat mendorong teknologi eksplorasi untuk melakukan inovasi. Pengeboran laut dangkal yang sudah mulai habis sehingga saat ini bergeser pada pengeboran laut dalam. Inovasi yang dikembangkan adalah perkembangan struktur lepas pantai yang digunakan. Berawal dari *fixed* struktur (struktur terpancang), kini berkembang adanya *floating structure* (struktur terapung). Salah satu bangunan lepas pantai yang digunakan untuk melakukan eksplorasi dan eksploitasi hidrokarbon di perairan laut dalam adalah *Tension Leg Platform (TLP)*. TLP *Tension Leg Platform* adalah salah satu anjungan lepas pantai dengan tipe *compliant structure* yang terdiri dari struktur hull, *column top frame, topside deck*, sistem tendon (*tendon System*) dan sistem pondasi (*foundation system*)[1]. TLP terdiri atas hull, *deck structure, platform, tendon, riser, well system* dan *template* pondasi [2]. TLP tidak boleh diikat kendor juga tidak boleh diikat terlalu kencang.

TLP mengikuti pasang surut air laut dan bisa bergerak bebas di permukaan air baik *surge, sway* atau pun *yaw*, namun gerak *heave, roll*, dan *pitch* dibatasi. TLP juga terkena gaya-gaya horizontal dan vertikal akibat beban lingkungan. Oleh karena itu TLP harus dirancang dan dibuat lebih berat dan lebih kuat terutama guna penyebaran tegangan [3].

Permasalahan yang selalu ada pada bangunan lepas pantai adalah kerusakan yang dapat menyebabkan struktur tersebut gagal. Kerusakan bangunan laut terutama terjadi akibat kelelahan (*fatigue*), baik pada komponen struktur utama maupun struktur sekunder dan tersier [4]. Bangunan lepas pantai cenderung mengalami kelelahan karena beban lingkungan yang bekerja didominasi oleh gelombang yang bersifat siklis, sehingga kelelahan adalah penyebab utama kerusakan pada bangunan lepas pantai, dimana struktur merespon secara dinamis gelombang acak serta beban angin [5]. Di samping itu faktor-faktor operasi lain pada tingkat tertentu juga dapat menambah beban siklis, sehingga keadaan struktur bertambah kritis [4]. Oleh karenanya analisis *fatigue* sangat penting dalam serangkaian pembangunan suatu struktur lepas pantai. Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai analisis *fatigue* pada *top side support structure silindris seastar TLP* guna mengetahui umur kelelahan pada struktur tersebut. Dalam analisis ini beban yang digunakan adalah beban gelombang dan berat struktur *top side*. Model yang digunakan mengacu pada TLP *Seastar Matterhorn* milik SBM Atlantia Inc [6] dengan *similarity parameter displacement*, sarat desain kondisi operasional dan instalasi pada TLP *A West Seno* dan bangunan beroperasi di *North Sea*.



Gambar 1. TLP SeastarMatterhorn [6]

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan studi literatur dan pengumpulan data struktur maupun lingkungan terlebih dahulu. Kemudian

dilakukan pemodelan struktur TLP yang mengacu *similarity parameter* yang sama. Selanjutnya dilakukan analisis RAO pada kondisi *free floating* dan *tertehered* untuk mengetahui efektivitas tendon yang dipasang dan juga mengetahui percepatan pada masing-masing *support*. Percepatan ini digunakan untuk perhitungan gaya inersia dan momen gaya yang bekerja pada masing-masing *top side support structure*. Hasil perhitungan gaya dan momen gaya nantinya akan dijadikan input untuk analisa tegangan *von-Mises* dengan menggunakan metode *finite element method software*. Dan selanjutnya dari data tegangan yang didapatkan akan digunakan untuk perhitungan umur kelelahan pada *top side support structure*. Berikut data yang digunakan dalam analisis:

Tabel 1. Data struktur TLP yang telah disimilarity

Item	TLP A West Seno	Silindris Seastar TLP
Column	bentuk	Kotak
	Geometri	9,6 m x 9,6 m
	Jumlah	4
Pontoon	bentuk	Kotak
	Geometri	9,6 m x 9,6 m
	Jumlah	4
Sarat desain	28,95 m	28,95 m

Tabel 2. Data gelombang North sea

H _{1/10}	SPECTRAL PEAK PERIOD																			SUM
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	
0.4	21	179	529	859	977	889	701	503	337	217	135	82	49	29	17	10	6	4	5	
1.2	5	141	959	2762	4683	5644	5411	4430	3245	2193	1399	855	507	294	167	94	53	29	36	
2.3	0	9	168	956	2604	4359	5230	4964	3980	2819	1822	1099	629	346	185	97	50	25	25	
2.4	0	0	9	127	634	1629	2633	3053	2777	2109	1398	835	461	239	118	56	26	12	9	
4.5	0	0	0	8	88	397	955	1460	1593	1349	941	566	303	148	67	29	12	5	3	
5.6	0	0	0	0	7	66	268	594	838	836	639	397	210	97	41	16	6	2	1	
6.7	0	0	0	0	0	6	49	177	352	445	393	263	141	63	25	9	3	1	0	
7.8	0	0	0	0	0	0	5	36	111	192	209	159	90	40	15	5	1	0	0	
8.9	0	0	0	0	0	0	0	5	25	64	93	85	54	25	9	3	1	0	0	
9.10	0	0	0	0	0	0	0	0	4	16	33	39	29	15	6	2	0	0	0	
10.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9	15	14	8	3	1	0	0	0	
11.12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	6	4	2	1	0	0	0	
12.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	0	0	0	0	
13.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
14.15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SUM	25	329	1667	4712	8993	12991	15255	15222	12626	8243	7075	4403	2495	1312	657	322	158	78	81	

Tabel 3. Properti material

Seastar TLP	Nilai	Satuan
jumlah kolom	1	buah
jumlah pontoon	3	buah
Berat Platform	12773	ton
jumlah Top side support structure	4	buah
Yield strength	248	MPa
Modulus Young	2.06E+05	
Poison's ratio	0.3	Ksi/in

Setelah itu dapat dilakukan perhitungan menggunakan teori 3D Difraksi untuk menghitung RAO dengan arah pembebanan yang digunakan adalah 8 arah pembebanan yaitu 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315. Analisis ini dilakukan pada kondisi *free floating* dan *tethered condition*. Hal ini dimaksudkan untuk menganalisis efektivitas tendon dengan melihat perbandingan RAO *free floating* dan *tethered condition*. Analisis efektivitas tendon dimaksudkan untuk mengetahui efektivitas tendon apakah mampu mereduksi *motion* dari TLP atau tidak. Dimana RAO merupakan Fungsi Transfer yaitu fungsi respon struktur per meter amplitudo gelombang dalam rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk

mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur. persamaan RAO dapat dicari dengan rumus [7]:

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

Dimana :

- X_p(ω) = amplitudo struktur
- η(ω) = amplitudo gelombang

Selanjutnya dilakukan perhitungan percepatan masing-masing *top side support structure*. Dimana percepatan tersebut akan digunakan untuk perhitungan gaya inersia dan momen gaya yang bekerja pada *support* tersebut. Perhitungan gaya inersia

$$Fa = -a\ddot{z} \dots\dots\dots(2)$$

Dengan: a adalah massa struktur dan *added mass*, dan \ddot{z} adalah percepatan vertikal.

Sedangkan perhitungan momen gaya sebagai berikut:

$$Momen\ Gaya = I\alpha^2 \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

- α = Percepatan putar (rad/s²)
- I = momen inersia (kg.m²)

Dan momen inersia dapat diperoleh dengan :

$$I = mr^2 \dots\dots\dots(4)$$

Dimana :

- m = massa struktur (kg)
- r = jari-jari girasi (m)

Spektrum JONSWAP yang digunakan sebagai berikut :

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \gamma \exp \left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2 \tau^2 \omega_0^2} \right] \dots\dots(5)$$

dimana:

- S(ω) = spektrum gelombang
- γ = parameter puncak (peakedness parameter) bervariasi antara 1,0 s.d. 7,0
- τ = parameter bentuk (shape parameter) untuk ω ≤ ω₀ = 0,07 dan ω ≥ ω₀ = 0,9
- α = 0,0076 (X₀) -0,22, untuk X₀ tidak diketahui α = 0,0081

Sedang nilai dari parameter puncak (γ) dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\gamma = EXP \left[3,4843 \left(1 - 0,1975 \left(0,036 - 0,0056 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \frac{T_p^4}{H_s^2} \right) \right] \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

- T_p = periode puncak spektra
- H_s = tinggi gelombang signifikan

Spektrum yang terjadi merupakan perkalian antara spektrum gelombang dengan RAO kuadrat, atau dengan persamaan berikut:

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \dots\dots\dots(7)$$

dengan :

- S_R(ω) = Respon spektrum (m²-sec)
- S(ω) = Spektrum gelombang (m²-sec)
- RAO = Response Amplitude Operator
- ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

Selanjutnya dilakukan analisis tegangan pada struktur yang ditinjau. Pada elemen tiga dimensi, bekerja tegangan-tegangan searah sumbu x, y, dan z. Pada tiap-tiap sumbu dapat diketahui tegangan utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) yang dihitung dalam komponen tegangan dengan persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(8)$$

Dimana :

- σ_0 = tegangan utama yang bekerja pada sumbu
- σ_x = tegangan arah sumbu x
- σ_y = tegangan arah sumbu y
- σ_z = tegangan arah sumbu z
- σ_{xy} = tegangan arah sumbu xy
- σ_{xz} = tegangan arah sumbu xz
- σ_{yz} = tegangan arah sumbu yz

Penggabungan tegangan-tegangan utama pada suatu elemen merupakan suatu cara untuk mengetahui nilai tegangan *Von-Mises* yang terjadi pada node tersebut. Salah satu cara mendapatkan tegangan gabungan adalah menggunakan formula tegangan *von-mises* [8], yaitu :

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{0.5} \dots(6)$$

Dimana :

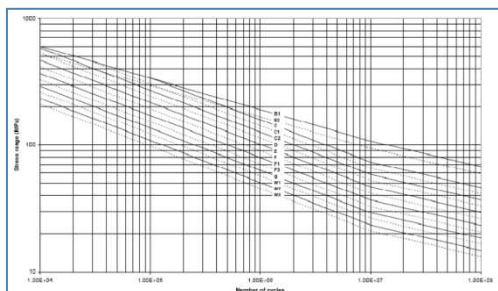
- σ_e = tegangan *Von-Mises*
- σ_1 = tegangan utama 1
- σ_2 = tegangan utama 2
- σ_3 = tegangan utama 3

Berikutnya dilakukan analisis kelelahan dengan menggunakan persamaan Palmgren-Miner :

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \dots\dots\dots(8)$$

Dimana :

- n_i = Jumlah cycle kolom interval rentang tegangan i dengan harga S_i yang sebenarnya terjadi, dari rentang distribusi tegangan jangka panjang akibat beban eksternal.
- N_i = Jumlah cycle rentang tegangan dengan harga S_i yang menyebabkan kegagalan. Harga besaran ini dapat diperoleh dari kurva S-N
- m = Total (Σ) dari interval-interval rentang tegangan



D = Rasio Kerusakan komulatif akibat beban yang diterima

Harga S_i yang dapat menyebabkan kegagalan sambungan dapat diperoleh dengan menggunakan kurva S-N pada gambar 3 dengan jenis sambungan yang sesuai.

Gambar 2. Grafik kurva S-N [9]

Sedangkan untuk mengetahui jenis sambungan dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 4. Tipe sambungan [9]

S-N curve	log $\bar{\sigma}$ For all cycles $m=3.0$	Thickness exponent k
B1	12.436	0
B2	12.262	0
C	12.115	0.15
C1	11.976	0.15
C2	11.824	0.15
D	11.687	0.20
E	11.533	0.20
F	11.378	0.25
F1	11.222	0.25
F3	11.068	0.25
G	10.921	0.25
W1	10.784	0.25
W2	10.630	0.25
W3	10.493	0.25
T	11.687	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0

Sedangkan untuk menghitung umur kelelahan adalah dengan menggunakan formula :

$$\text{Umur kelelahan} = 1/D \dots\dots\dots(9)$$

Dimana :

D = Rasio Kerusakan komulatif akibat beban yang diterima

Berikutnya dilakukan pengecekan hasil umur kelelahan:

Tabel 5. *Design fatigue Factor* [10]

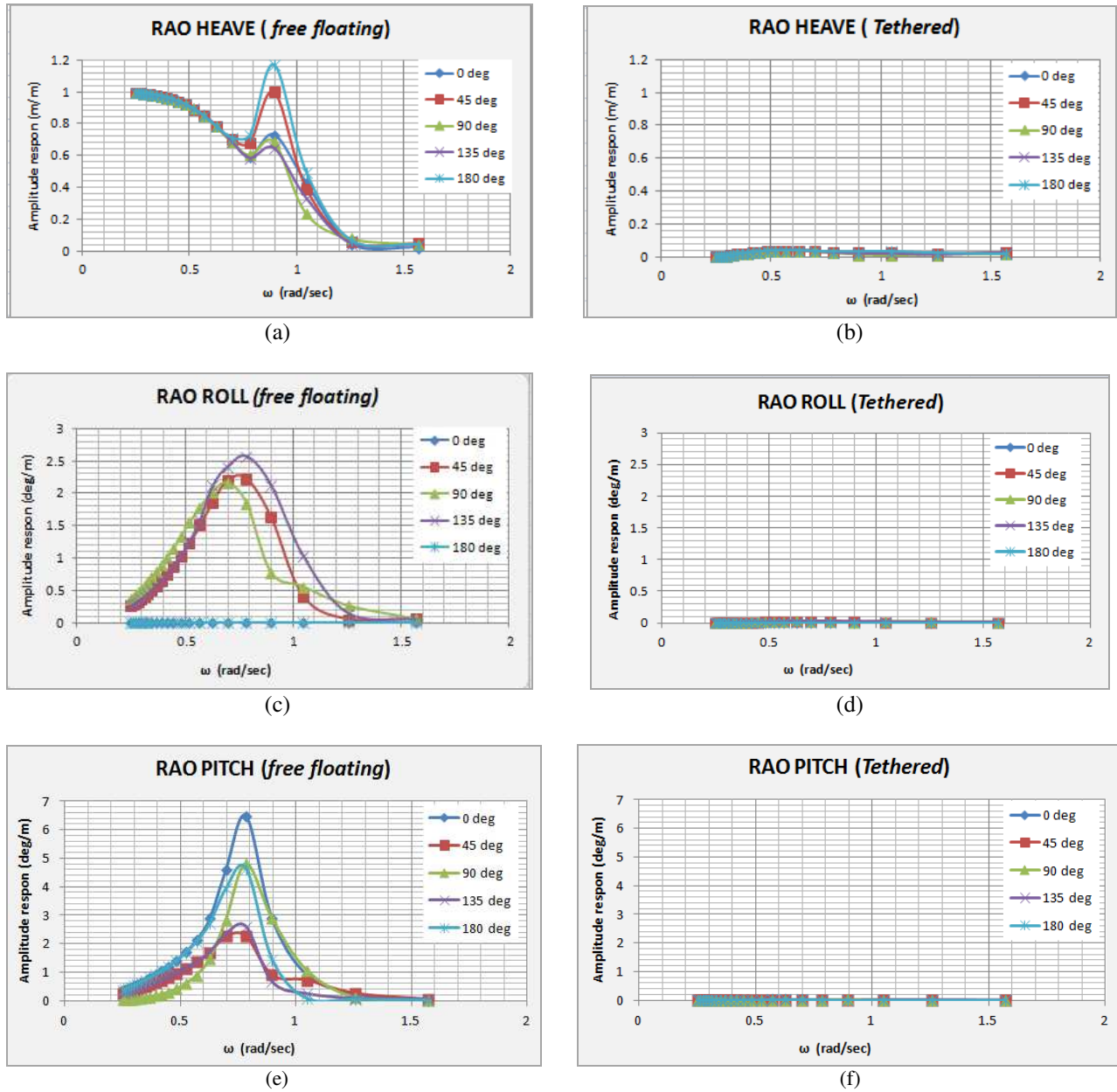
DFF Structural Element	
2	<i>Internal structure, accessible and not welded directly to the submerged part</i>
2	<i>External structure, accessible for regular inspection and repair in dry and clean condition</i>
3	<i>Internal structure, accessible and welded directly to the submerged part</i>
3	<i>External structure, not accessible for regular inspection and repair in dry and clean condition</i>
10	<i>Non-accessible areas, areas not planned to be accessible for inspection and repair during operation</i>

III. HASIL DAN DISKUSI

Berikut adalah hasil yang didapatkan dari analisa yang dilakukan. Hasil berupa RAO Seastar TLP kondisi *free floating* dan *Seastar TLP* kondisi *tethered*. RAO pada 5 arah pembebanan (0, 45, 90, 135, 180). Untuk arah pembebanan 215, 275 dan 315 merupakan arah yang simetri dengan (45, 90, 180) dan hasil analisis menunjukkan hasil yang identik. Oleh karenanya lima arah pembebanan sudah dapat mewakili analisis efektivitas tendon. Grafik RAO dapat dilihat pada Gambar 4. Grafik RAO menunjukkan adanya perubahan nilai amplitudo respon gerakan dari kondisi *free floating* dengan kondisi *tethered*. Ini membuktikan tendon berfungsi dengan baik sehingga dapat mereduksi *motion* struktur.

Pada kondisi *tethered* karakteristik gerakan *Seastar TLP* adalah baik karena nilai RAO maksimum tidak melebihi 1.0. Hal ini berarti amplitudo respon gerakan selalu lebih kecil dari amplitudo gerakan yang datang.. Berikut disajikan

perbandingan RAO maksimum untuk kondisi *free floating* dan



Gambar 3. Perbandingan RAO *free floating* dan *tethered* ; (a) *heave free floating*; (b) *heave tethered*; (c) *roll free floating*; (d) *roll tethered*; (e) *pitch free floating*; (f) *pitch tethered*.

tethered untuk 6 DOF dan 5 heading.

Tabel 6. Nilai maksimum RAO dan Frekuensi natural

Moda gerakan	Kondisi	RAO maksimum					Frekuensi natural (rad/s)
		0 deg	45 deg	90 deg	135 deg	180 deg	
Surge	<i>free floating</i>	0.95	0.671	0.644	0.671	1.007	-
	<i>tethered</i>	0.884	0.625	0.049	0.625	0.884	-
Sway	<i>free floating</i>	0	0.691	0.949	0.672	0	-
	<i>tethered</i>	0	0.625	0.884	0.625	0	-
Heave	<i>free floating</i>	0.994	1	0.994	0.994	1.17	0.8976
	<i>tethered</i>	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.5712
Roll	<i>free floating</i>	0.002	2.222	2.15	2.567	0.003	0.7854
	<i>tethered</i>	0	0.028	0.32	0.027	0	0.6283
Pitch	<i>free floating</i>	6.471	2.268	4.803	2.595	4.647	0.7854
	<i>tethered</i>	0.034	0.023	0.027	0.022	0.034	0.6283
Yaw	<i>free floating</i>	0	0.491	0.692	0.526	0	-
	<i>tethered</i>	0	0.113	0.16	0.113	0	-

Hasil perhitungan percepatan dapat dilihat pada tabel 6. Hasil analisis menunjukkan percepatan untuk *top side support structure* satu dengan lainnya menunjukkan nilai yang identik oleh karenanya untuk analisis ini dapat dilakukan dengan menganalisis satu *support* untuk mewakili *support* lainnya dengan mengambil percepatan terbesar yang terjadi.

Selanjutnya dilakukan perhitungan gaya inersia dan momen gaya pada struktur yang terjadi menggunakan persamaan (2) dan (3). Berikut hasil perhitungan *inersia force* dan momen gaya.

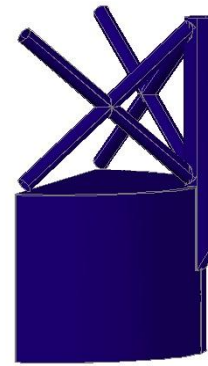
Tabel 7. Output Maximum single amplitude acceleration

Hs	T	Heading	Maximum Single Amplitude Acceleration					
			Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
			m/s ²					
1.5	3	45	0.040	0.055	0.062	0.022	0.047	0.038
1.5	3	90	0.011	0.078	0.047	0.051	0.021	0.045
1.5	3	135	0.059	0.058	0.057	0.024	0.045	0.039
3.5	5	45	0.230	0.253	0.076	0.049	0.047	0.200
3.5	5	90	0.057	0.397	0.057	0.053	0.044	0.282
3.5	5	135	0.331	0.322	0.074	0.049	0.046	0.200
5.5	8	45	0.578	0.595	0.080	0.050	0.049	0.211
5.5	8	90	0.089	0.872	0.071	0.058	0.047	0.296
5.5	8	135	0.656	0.653	0.078	0.051	0.048	0.210
7.5	10	45	0.739	0.757	0.080	0.056	0.049	0.210
7.5	10	90	0.094	1.089	0.074	0.061	0.048	0.297
7.5	10	135	0.803	0.798	0.081	0.052	0.048	0.211
9.5	12	45	0.825	0.842	0.080	0.052	0.054	0.219
9.5	12	90	0.095	1.204	0.074	0.061	0.053	0.306
9.5	12	135	0.878	0.873	0.082	0.055	0.053	0.220
10.5	13	45	0.851	0.854	0.080	0.052	0.055	0.221
10.5	13	90	0.095	1.262	0.075	0.063	0.054	0.311
10.5	13	135	0.900	0.897	0.083	0.055	0.055	0.226
12.5	14	45	0.944	0.959	0.080	0.052	0.058	0.229
12.5	14	90	0.096	1.368	0.076	0.067	0.057	0.322
12.5	14	135	0.992	0.987	0.086	0.056	0.056	0.229
13.5	15	45	0.951	0.965	0.086	0.059	0.068	0.242
13.5	15	90	0.098	1.375	0.079	0.070	0.071	0.340
13.5	15	135	0.995	0.990	0.087	0.059	0.062	0.242

Tabel 8. Gaya inersia dan momen gaya Seastar TLP

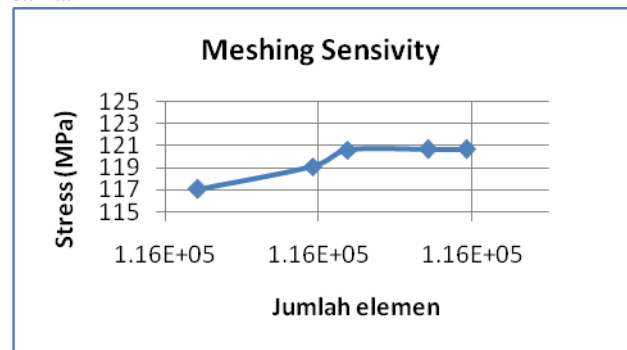
Hs	T	Gaya Inersia (Fi)			Momen gaya (τ)		
		Surge	Sway	heave	Roll	Pitch	Yaw
		kN			kN.m.rad		
1.5	3	127.730	175.629	501.340	116968.748	249887.779	202036.928
1.5	3	35.126	249.074	434.282	271154.824	111651.986	239254.256
1.5	3	188.402	185.209	555.626	127602.270	239254.256	207353.689
3.5	5	734.448	807.892	1785.027	260521.301	249887.779	1063352.250
3.5	5	182.015	1267.720	1631.751	281788.346	233937.495	1499326.673
3.5	5	1056.966	1028.227	2321.493	260521.301	244571.018	1063352.250
5.5	8	1845.699	1899.984	4001.142	265838.063	260521.301	1121836.624
5.5	8	284.199	2784.514	3295.434	308372.153	249887.779	1573761.330
5.5	8	2094.772	2085.192	4429.038	271154.824	255204.540	1116519.863
7.5	10	2359.812	2417.290	5032.562	297738.630	260521.301	1116519.863
7.5	10	300.166	3477.449	4013.915	324322.436	255204.540	1579078.091
7.5	10	2564.180	2548.214	5371.047	276471.585	255204.540	1121836.624
9.5	12	2634.431	2688.717	5578.608	276471.585	287105.108	1164370.714
9.5	12	303.359	3844.673	4384.332	324322.436	281788.346	1626928.943
9.5	12	2803.674	2787.707	5853.227	292421.869	281788.346	1169687.475
10.5	13	2717.456	2727.036	5699.951	276471.585	292421.869	1175004.236
10.5	13	303.359	4029.882	4572.734	334955.959	287105.108	1653512.749
10.5	13	2873.925	2864.345	6003.310	292421.869	292421.869	1201588.043
12.5	14	3014.428	3062.327	6332.215	276471.585	308372.153	1217538.326
12.5	14	306.552	4368.366	4917.605	356223.004	303055.391	1711997.123
12.5	14	3167.704	3151.738	6594.061	297738.630	297738.630	1217538.326
13.5	15	3036.781	3081.486	6392.887	313688.914	361539.765	1286656.223
13.5	15	312.939	4390.719	4955.924	372173.288	377490.049	1807698.825
13.5	15	3177.284	3161.318	6616.414	313688.914	329639.198	1286656.223

Gaya inersia dan momen gaya ini akan digunakan untuk mencari tegangan Von-Mises dengan menggunakan metode *finite element method software*. Analisis dilakukan dengan pemodelan lokal dengan menggunakan metode *finite element method software*. Pemodelan 1 support yang dilengkapi x-brace sebagai distribusi beban yang diterima *support*. Dimensi *support* OD = 2 meter dengan ketebalan 20 mm dan brace dengan OD = 1 meter, ketebalan 10mm.



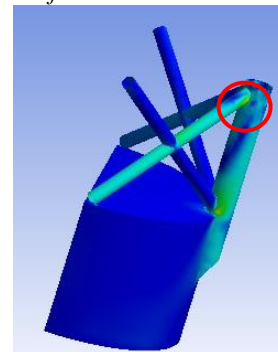
Gambar 4. Pemodelan lokal topside support structure

Selanjutnya dilakukan *meshing sensitivity*, yaitu iterasi untuk memperoleh tegangan yang bernilai konstan dengan variasi ukuran *meshing*. Pada pemodelan menggunakan metode *finite element method software*, model dapat digunakan dalam analisis selanjutnya dengan syarat menggunakan ukuran minimal *meshing* saat tegangan telah mendekati konstan. Berikut gambar grafik *meshingsensitivity* dengan berbagai ukuran *meshing* dengan pembebanan yang sama.



Gambar 6. Grafik meshing sensitivity

Dari grafik di atas dapat dilihat semakin kecil ukuran *meshing* maka semakin mendekati konstan tegangan yang dihasilkan. Maka model dapat dilakukan analisis selanjutnya dengan jumlah elemen 116385 elemen. Dengan demikian dapat dilakukan analisis untuk menghitung tegangan Von mises dengan metode *finite element method software*.



Gambar 5. Letak tegangan Von-mises terbesar

Analisis menggunakan metode *finite element method software* dilakukan berulang kali sejumlah banyaknya tinggi gelombang dan arah datang gelombang. Setelah tegangan von-

mises didapatkan maka dapat dihitung umur kelelahan struktur *top side support structure* dengan persamaan (8), dimana harga *Si* yang menyebabkan kegagalan sambungan dapat diperoleh dengan menggunakan kurva S-N (gambar 3) dengan jenis sambungan yang sesuai. Dari tabel 5 dapat diketahui jenis sambungan adalah tipe sambungan B1, maka nilai Log A adalah 12.436 dan nilai m adalah 3. Dimana variable A merupakan intersepsi sumbu log, sedangkan m adalah kemiringan sumbu S-N. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 10. Dari tabel 10 dapat diketahui rasio kerusakan kumulatif akibat beban gelombang adalah sebesar 2.21E-08. Dimana formulasi umur kelelahan dari suatu struktur dapat dihitung dengan membagi lama perekaman data beban yaitu 34 tahun dengan D. Maka umur kelelahan *top side support structure* adalah $34/2.21E-08 = 1.54E+09$ tahun.

Dengan demikian kelelahan struktur sudah memenuhi kriteria umur kelelahan [2] yaitu :

$$Service\ life < design\ life < fatigue\ life$$

$$25\ tahun < 3 \times Service\ Life < 1.54E+09\ tahun$$

Tabel 9. Perhitungan *fatigue*

Hs	T	Heading	Si	ni	Ni	ni/Ni	Averg ni/Ni
			Mpa				
1.5	3	45	66.345	3.49E-03	9.34E+06	3.73E-10	9.95766E-10
1.5	3	90	57.702	3.49E-03	1.42E+07	8.93E-10	
1.5	3	135	64.188	3.49E-03	1.03E+07	1.72E-09	
3.5	5	45	107.991	1.27E-02	2.17E+06	5.86E-09	5.85011E-09
3.5	5	90	111.831	1.27E-02	1.95E+06	6.50E-09	
3.5	5	135	103.720	1.27E-02	2.45E+06	5.19E-09	
5.5	8	45	114.671	1.78E-02	1.81E+06	9.81E-09	9.77641E-09
5.5	8	90	112.990	1.78E-02	1.89E+06	9.39E-09	
5.5	8	135	115.900	1.78E-02	1.75E+06	1.01E-08	
7.5	10	45	116.930	6.81E-03	1.71E+06	3.99E-09	3.84217E-09
7.5	10	90	114.220	6.81E-03	1.83E+06	3.72E-09	
7.5	10	135	115.250	6.81E-03	1.78E+06	3.82E-09	
9.5	12	45	117.650	2.07E-03	1.68E+06	1.24E-09	1.21718E-09
9.5	12	90	117.920	2.07E-03	1.66E+06	1.25E-09	
9.5	12	135	115.340	2.07E-03	1.78E+06	1.17E-09	
10.5	13	45	117.967	2.12E-04	1.66E+06	1.27E-10	1.28129E-10
10.5	13	90	118.238	2.12E-04	1.65E+06	1.28E-10	
10.5	13	135	118.513	2.12E-04	1.64E+06	1.29E-10	
12.5	14	45	118.870	4.03E-04	1.62E+06	2.48E-10	2.46938E-10
12.5	14	90	118.530	4.03E-04	1.64E+06	2.46E-10	
12.5	14	135	118.710	4.03E-04	1.63E+06	2.47E-10	
13.5	15	45	119.030	4.03E-05	1.62E+06	2.49E-11	2.22949E-11
13.5	15	90	102.840	4.03E-05	2.51E+06	1.61E-11	
13.5	15	135	120.650	4.03E-05	1.55E+06	2.59E-11	
						D	2.2079E-08

IV. KESIMPULAN / RINGKASAN

Dari analisis yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa karakteristik gerak *Seastar TLP* yang dirancang dengan similarity parameter TLP A West Seno yang mengacu pada *Seastar Matterhorn TLP* adalah baik karena mempunyai nilai RAO maksimum kurang dari 1.0. Hal ini berarti amplitudo respon akan selalu lebih kecil dari amplitudo gelombang yang datang. RAO maksimum gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw* berturut-turut adalah 0.884 m/m, 0.884 m/m, 0.39 m/m, 0.32 m/m, 0.34 m/m, dan 0.16 m/m. Periode natural struktur berada pada frekuensi 0.57 rad/s untuk gerakan *heave*, dan 0.63 untuk gerakan *roll* dan *pitch*. Desain *top side support structure* yang sesuai adalah dengan dimensi OD= 2 meter dengan ketebalan 20 mm dan ada penambahan X brace

untuk distribusi beban vertical maupun horizontal yang diterima *top side support structure*. Dengan desain support yang sesuai dan pembebanan yang diperhitungkan selama 34 tahun maka diperoleh umur kelelahan (*fatigue life*) *top side support structure* adalah 1.54E+09 tahun. Sehingga dengan *service life* 25 tahun telah memenuhi kriteria *safety factor* yang disyaratkan DnV, yaitu 3 (tiga).

Untuk penelitian selanjutnya disarankan melakukan analisis *fatigue* dengan memperhatikan detail beban *platform*, beban angin, beban *accidental load* yang mungkin terjadi dan keandalan dari *top side support structure* terhadap beban kelelahan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Floating Production Installations*, American Bureau of Shipping, Houston (2003)
- [2] API RP 2T, "Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Tension Leg Platforms," American Petroleum Institute (1977).
- [3] Soegiono, *Teknologi Produksi dan Perawatan Bangunan Laut*, Surabaya: Airlangga University Press (2004).
- [4] E. B. Djatmiko, 2003, "Analisis Kelelahan Struktur Bangunan Laut," Kursus singkat Offshore Structure Design and Modelling, Surabaya (2003).
- [5] P. H. Wirsching dan Y. N. Chen, *Consideration for marine Structure*, New York: SNAME (1988).
- [6] SBMATlantia (2011). Matterhorn Seastar TLP [Online]. Available: <http://www.sbmatlantia.com/products/floating-solution/tlps/seastar/matterhorn>.
- [7] S. K. Chakrabarti, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Boston : Computational Mechanics Publications Southampton (1987).
- [8] Paul Indiyono, *Hidrodinamika Bangunan Lepas Pantai*, Surabaya: Penerbit Surabaya Intelektual Club (2004).
- [9] *Recommended Practice DNV-RP-C203: Fatigue Design Of Offshore Steel Structures*, Det Norske Veritas, Norway (2010, Apr.).
- [10] *Recommended Practice DNV-RP-C206: Fatigue Methodology of Offshore Ship*, Det Norske Veritas, Norway (2010, Okt.).