

Analisis Perilaku FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) Terhadap *Internal Turret Mooring System* Berbasis Simulasi *Time Domain*

Rizki Amalia Prasiwi⁽¹⁾, Imam Rochani⁽²⁾, dan Joswan J. Soedjono⁽³⁾

⁽¹⁾Mahasiswa Teknik Kelautan ITS, ^{(2),(3)}Staff Pengajar Teknik Kelautan ITS

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

e-mail: imamr@oe.its.ac.id

Abstrak— FPSO (*Floating Storage Production and Offloading*) merupakan salah satu struktur terapung yang dapat digunakan sebagai tempat produksi, storasi/ penyimpanan maupun offloading minyak dan gas bumi lepas pantai. Oleh sebab itu, FPSO memiliki peranan penting dalam eksplorasi ladang minyak di perairan dalam. Pada tempatnya beroperasi, FPSO akan dikenai beban lingkungan yang dapat menyebabkan ia berperilaku dinamis. Untuk mengurangi gerakan dan menjaga supaya FPSO tetap berada pada tempatnya beroperasi, maka dibutuhkan suatu sistem tambat. Dalam Tugas Akhir ini, dilakukan analisis perilaku gerak FPSO pada saat terapung bebas maupun tertambat dengan *internal turret mooring* dalam 6 derajat kebebasan. FPSO beroperasi di Teluk Meksiko dengan kedalaman perairan 1865 m. Tugas Akhir ini juga menganalisis nilai *tension* maksimum pada tali tambat yang diprediksi berdasarkan simulasi *time-domain* untuk kondisi ULS (*all lines intact*) dan ALS (*one line damaged*). Dari hasil analisis perilaku gerak, FPSO diilustrasikan dalam 3 kondisi muatan (muatan penuh, muatan 25% dan muatan ballast). Dari ketiga muatan tersebut, dalam kondisi terapung bebas maupun tertambat didapatkan hasil bahwa kondisi muatan ballast lah yang memiliki gerakan paling besar. Pada kondisi terapung bebas kondisi muatan ballast dihasilkan RAO surge tertinggi sebesar 0.918 m/m (pada arah 0°), RAO sway tertinggi sebesar 0.962 m/m (pada arah 90°), RAO heave tertinggi sebesar 2.771 m/m (pada arah 45°), RAO roll tertinggi sebesar 7.78 deg/m (pada arah 90°), RAO pitch tertinggi sebesar 1.007 deg/m (pada arah 180°) dan RAO yaw tertinggi sebesar 0.415 deg/m (pada arah 45°). Apabila hasil RAO kondisi terapung bebas tersebut dibandingkan secara prosentase terhadap hasil RAO kondisi tertambat maka selisihnya adalah untuk surge sebesar -4.9%, sway sebesar 0.21%, heave sebesar 56.08%, roll sebesar 82.43%, pitch sebesar 49.65% dan yaw sebesar 40%. Maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan tali tambat untuk FPSO dalam analisis ini cukup signifikan pengaruhnya terhadap perilaku gerak. Untuk analisis *tension* dilakukan simulasi perhitungan *time-domain* selama 3jam. Pada kondisi ULS, SF yang diijinkan oleh API RP 2SK 2nd edition dapat dipenuhi dengan *tension* maksimum terjadi pada line 3 pada arah 45°, yakni sebesar 263632.6 N untuk fibre rope dan 640504.75 N untuk chain. Dan untuk kondisi ALS juga memenuhi SF yang diijinkan oleh API RP 2SK 2nd edition yakni dengan satu tali tambat diputus (line 2) menghasilkan *tension* maksimum yang terjadi pada line 3, yakni sebesar 255159.344 N untuk fibre rope dan 633727.75 N untuk chain.

Kata Kunci— FPSO, *internal turret mooring*, RAO, *tension*, simulasi *time-domain*

I. PENDAHULUAN

Pada beberapa tahun terakhir ini, kondisi harga minyak bumi terus melambung setiap barelnya. Konsumsi terhadap minyak bumi terus meningkat karena dampak berkembangnya populasi manusia. Dari kasus tersebut maka dibutuhkan sumber energi yang besar dimana sumber utamanya disuplai oleh pasokan minyak bumi. Dengan beralihnya produksi minyak dan gas bumi

ke laut dalam, maka diperlukan teknologi/konstruksi bangunan lepas pantai yang mampu mendukung eksplorasi migas pada kondisi tersebut. Salah satu jenis teknologi/ konstruksi yang bisa menjadi alternatif adalah bangunan laut terapung yakni FPSO.

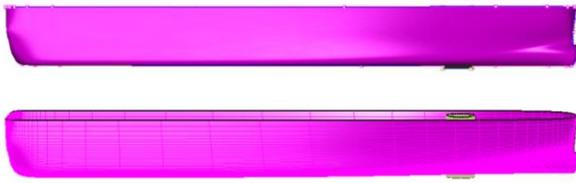
FPSO pada saat beroperasi memiliki gerakan (*motion*) yang sangat dipengaruhi oleh beban lingkungan (gelombang, angin dan arus) di sekitarnya. Pada Tugas Akhir ini, FPSO yang dianalisis beroperasi pada Teluk Meksiko dengan kedalaman perairan mencapai 1865 m. Teluk Meksiko ialah satu dari 10 perairan terdalam di dunia. Oleh sebab itu, analisis respon gerak dari FPSO menjadi sangatlah penting guna mengetahui karakteristik/ perilaku gerak saat ia beroperasi.

Untuk menjaga gerakan FPSO tersebut supaya tetap pada tempat ia beroperasi maka diperlukan adanya suatu sistem tambat. Salah satu sistem tambat yang banyak digunakan untuk FPSO adalah sistem tambat *turret* [1]. *Turret* digunakan untuk menjaga gerakan FPSO dari kondisi lingkungan yang ekstrim. Kegunaan yang paling penting dari *turret* adalah untuk *weathervaning* (kemampuan kapal untuk berputar sehingga didapatkan sebuah posisi dimana beban-beban lingkungan seperti arus, gelombang dan angin yang bekerja di sekitar tali tambat menjadi kecil).

Tugas Akhir ini akan menganalisis respon gerak yang dihasilkan oleh FPSO pada saat terapung bebas (*free floating*) maupun tertambat dengan *internal turret mooring* dalam gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Tugas Akhir ini juga akan menganalisis nilai *tension* maksimum yang dihasilkan oleh sistem tambat yakni untuk kondisi ULS (*all lines intact*) dan ALS (*one line damaged*) yang dialami. Dari *tension* maksimum tersebut akan dilakukan pengecekan terhadap *safety factor* berdasarkan API RP 2SK 2nd edition. Pengecekan tersebut dilakukan untuk memastikan bahwa nilai *tension* maksimum yang dihasilkan oleh tali tambat berada dalam batas aman. Apabila nilai *tension* tersebut sudah memenuhi batas aman, maka sistem tambat pada FPSO telah layak dan aman untuk beroperasi di ladang minyak yang diinginkan (dalam penelitian ini adalah Teluk Meksiko).

II. METODOLOGI PENELITIAN

Tugas Akhir ini dilakukan dengan memanfaatkan berbagai literatur, *text book* serta pengalaman penelitian yang telah dipublikasikan sebelumnya. Seperti untuk pemodelan dan perancangan awal FPSO yang memiliki dimensi utama 310 m x 47.2 m x 28 m (L x B x H) ini mengacu pada penelitian terdahulu [2]. Dari acuan tersebut, perancangan FPSO dibuat dengan melakukan validasi terhadap ukuran sebenarnya. Berikut merupakan gambar dan data ukuran dari rancangan FPSO yang akan digunakan untuk analisis.



Gambar 1. Model hull FPSO tampak 3D

Apabila FPSO rancangan telah selesai dimodelkan, dilakukan perhitungan hidrostatis untuk mendapatkan displasemen serta ukuran-ukuran lain dari FPSO. Ukuran-ukuran tersebut kemudian digunakan untuk kepentingan validasi. Perlu diketahui bahwa pemodelan FPSO pada penelitian ini dilakukan untuk 3 (tiga) macam kondisi muatan. Yang pertama, pemodelan untuk FPSO kondisi muatan penuh (*full load*) yang memiliki sarat air (T) = 18.9 m. Kemudian yang kedua adalah untuk FPSO kondisi muatan 25% yang memiliki sarat air (T) = 16.2 m. Dan yang ketiga adalah FPSO kondisi muatan kosong (*ballast load*) yang memiliki sarat air (T) = 15.3 m. Karena data utama yang digunakan pada penelitian merupakan data FPSO kondisi muatan penuh maka yang dilakukan validasi adalah hasil perhitungan hidrostatis pada FPSO muatan penuh juga. Berikut adalah hasil validasi tersebut.

Tabel 1. Validasi model

Hasil validasi model menunjukkan bahwa model yang

	Unit	Data	Hasil Pemodelan	Selisih (%)	Kriteria	
					ABS	Ket
Displ.	ton	240869	244022	-1.31	< 2%	OK
Draft	m	18.9	18.9	0	< 1%	OK
CB		0.85	0.849	0.12	< 1%	OK
Waterplane Coeff		0.9164	0.923	-0.72	< 1%	OK
Waterplane area	m	13400	13690.606	-2.17	< 1%	OK

dirancang tersebut sudah layak untuk digunakan dalam analisis karakteristik gerakannya. Hal ini karena selisih hasil perancangan dan data acuan sudah memenuhi kriteria yakni dibawah batas toleransi. Analisis karakteristik gerak pada FPSO dilakukan dalam *frequency domain* dengan menggunakan persamaan gerak sebagai berikut:

$$M_{(\omega)} \ddot{r} + C_{(\omega)} \dot{r} + K_{(\omega)} r = X e^{i\omega t} \tag{1}$$

Dengan:

$M_{(\omega)}$ = matrik massa fungsi frekuensi (ton)

$C_{(\omega)}$ = matrik damping fungsi frekuensi (ton/s)

$K_{(\omega)}$ = matrik kekakuan fungsi frekuensi (kN/m)

X = vektor beban kompleks memberikan informasi pada amplitudo beban dan fase pada semua derajat kebebasan. Pola $e^{i\omega t}$ menetapkan variasi harmonik dari contoh beban dengan frekuensi ω .

r = vektor *displacement* (m)

Nilai RAO (*Response Amplitude Operators*) kemudian dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \text{ (m/m)} \tag{2}$$

Dengan:

$\zeta_{k0}(\omega)$ = amplitudo struktur (m)

$\zeta_0(\omega)$ = amplitudo gelombang (m)

RAO memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut pada gelombang reguler. RAO disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu, ζ_{k0} , dengan amplitudo gelombang, ζ_0 [3].

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, *potential damping* dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. Respon struktur pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga pangkat kuadrat dari RAO dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung tersebut beroperasi. Persamaan respon struktur secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \tag{3}$$

Dengan :

S_R = spektrum respons (m2-sec)

Deskripsi	Satuan	Jumlah
Wave		
100 yrs hurricane (sea-state 8)		
Significant wave height, Hs	m	11.9
Peak periode, Tp	sec	14.2
10 yrs storm (sea-state 7)		
Significant wave height, Hs	m	7.3
Peak periode, Tp	sec	10.8
Wind		
Wind speed 10 m above the water surface (100 yrs), U_{wind}	m/s	44.1 @ 10 m
Current		
Surface current speed (10 yrs), U_{cur}	m/s	1.98

$S(\omega)$ = spektrum gelombang (m2-sec)

$RAO(\omega)$ = *transfer function*

ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

Pemilihan spektrum energi gelombang untuk memperoleh respon spektra suatu struktur didasarkan pada kondisi *real* laut yang ditinjau. Bila tidak ada, maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan.

Tabel 2. Data lingkungan [4]

Pada Tugas Akhir ini, dalam analisisnya akan digunakan spektrum gelombang JONSWAP yang merupakan proyek yang

dilakukan pada perairan *North Sea*. Formulasi spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari spektrum *Pierson-Moskowitz*. Spektrum JONSWAP mendeskripsikan angin yang membangkitkan gelombang dengan kondisi *sea state* yang ekstrim. Seperti halnya dalam penelitian ini, karena FPSO beroperasi di Teluk Meksiko yang memiliki H_s (100 yrs) pada *sea state* 8 (ekstrim) maka penggunaan spektrum JONSWAP dapat diaplikasikan, berikut persamaannya [5] :

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \quad (4)$$

Dengan:

$$A_\gamma = \text{normalizing factor} = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$$

$$\gamma = \text{peakedness parameter}$$

σ = spectral width parameter

$$= 0,07 \text{ jika } \omega \leq \omega_p$$

$$= 0,09 \text{ jika } \omega > \omega_p$$

ω_p = angular spectral peak frequency (rad/s)

$$= 2\pi / T_p$$

ω = wave frequency (rad/s)

$S_{PM}(\omega)$ = spektrum *Pierson-Moskowitz*

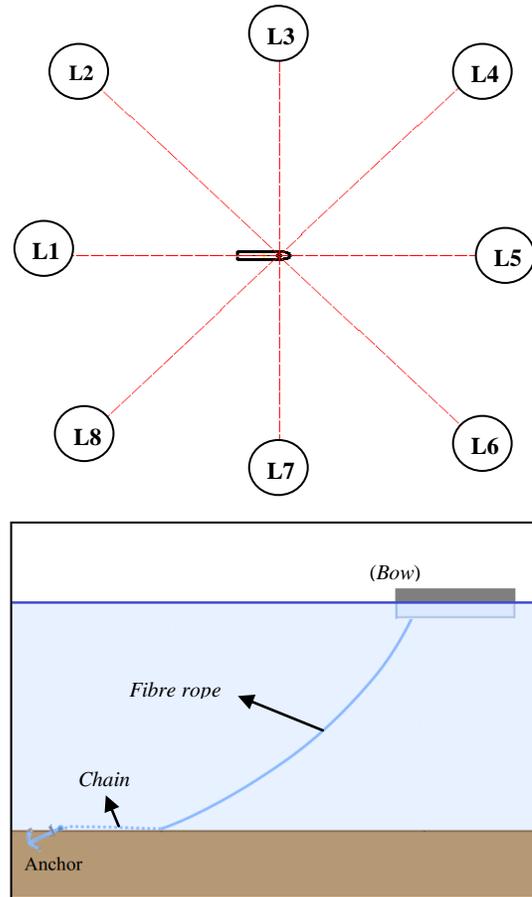
$$= S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \cdot \omega_p^2 \cdot \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right)$$

Karakteristik dan respon gerak struktur FPSO pada Tugas Akhir ini dianalisis dalam kondisi terapung bebas (*free floating*) dan juga tertambat dengan *internal turret mooring*. Berikut adalah data sistem tambat yang akan digunakan dalam penelitian:

Tabel 3. Spesifikasi sistem tambat

Deskripsi	Satuan	Jumlah
Tali Tambat		
Banyak tali tambat		8
Sudut antara tali tambat	deg	45
Fibre Rope, type: polyester (8 strand multiplait)		
Diameter	m	0.2
Berat di udara	kN/m	0.313
Berat di air	kN/m	0.079
Stiffness, AE	kN	43600
Minimum Breaking Load (MBL)	kN	6818.667
Chain		
Diameter	m	0.095
Berat di udara	kN/m	1.771
Berat di air	kN/m	1.538
Stiffness, AE	kN	774800
Minimum Breaking Load (MBL)	kN	6469.173
Anchor, Weight & Type : 8 x 4MT Stevpris MK5		

Sistem tambat *internal turret* pada FPSO didesain sebanyak 8 buah dengan posisi dan panjang yang simetris. Berikut adalah gambar konfigurasi sistem tambat pada FPSO.



Gambar 2. Konfigurasi sistem tambat pada FPSO

Konfigurasi tali tambat yang dipasang pada FPSO didesain memiliki panjang yang sama. Dimana tali tambat yang digunakan merupakan tipe gabungan antara *fibre rope* dan *chain*. Hal ini supaya berat tali tambat tidak banyak mempengaruhi berat struktur FPSO (karena lebih ringan bila didesain gabungan). Perhitungan panjang tali (*line*) didasarkan sebuah penelitian oleh ahli [6]. Dari perhitungan yang dilakukan, maka didapatkan hasil panjang tali tambat total 3985.36 m (*Fibre rope*, tipe: *polyester* = 3365.36 m dan *chain* = 620 m).

Analisis *mooring* (sistem tambat) yang dilakukan pada Tugas Akhir ini adalah menghitung nilai *tension* pada setiap tali tambat yang digunakan pada FPSO. Kemudian dari nilai *tension* masing-masing tali tambat tersebut akan didapatkan nilai *tension* maksimum yang nantinya akan digunakan untuk pengecekan apakah aman atau tidak. Pengecekan ini didasarkan pada nilai *safety factor* yang mengacu pada API RP 2SK 2nd edition.

Analisis sistem tambat dilakukan untuk pembebanan kondisi *all lines intact* atau ULS (*Ultimate Limit State*) dan *one line damage* atau ALS (*Accidental Limit State*). Pada kondisi ALS, analisis hanya dilakukan untuk satu arah pembebanan saja, yakni pada arah pembebanan yang menghasilkan efek signifikan ketika dilakukan analisis ULS.

Analisis *tension* pada sistem tambat dilakukan *time domain*. Yang artinya bahwa analisis akan menghasilkan besaran *tension* yang terjadi pada *mooring line* (tali tambat) dalam fungsi waktu. Simulasi *time domain* dilakukan selama 3 jam (10800 s).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melalui tahap perancangan dan pengolahan data maka akan diperoleh hasil serta pembahasannya. Berikut adalah hasil dan pembahasan dari penelitian ini:

A. Analisis Perilaku Gerak FPSO Pada Kondisi Terapung Bebas (*Free Floating*)

Analisis perilaku gerak FPSO pada gelombang reguler akan menghasilkan RAO untuk arah pembebanan yang ditinjau, yakni 0° , 45° , 90° , 135° dan 180° . RAO tersebut dijabarkan dalam gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Data RAO ini menunjukkan karakteristik perilaku gerak FPSO saat terapung bebas (*free floating*) pada gelombang reguler. RAO dihitung untuk ketiga kondisi muatan FPSO. Berikut adalah hasil resume nilai RAO analisis perilaku gerak FPSO pada gelombang reguler untuk kondisi terapung bebas (*free floating*):

Tabel 4. Resume nilai RAO tertinggi untuk ketiga kondisi muatan FPSO kondisi terapung bebas (*free floating*)

	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
Kondisi Muatan Penuh 100% (<i>full load</i>)						
Arah 0	0.943	0.000	0.983	0.000	0.997	0.000
Arah 45	0.675	0.673	0.993	1.450	0.707	0.368
Arah 90	0.114	0.958	1.493	7.922	0.281	0.116
Arah 135	0.664	0.671	0.994	1.513	0.725	0.374
Arah 180	0.932	0.000	0.985	0.000	1.012	0.000
Kondisi Muatan 25%						
Arah 0	0.916	0.000	0.984	0.000	1.003	0.000
Arah 45	0.653	0.675	0.993	0.758	0.713	0.412
Arah 90	0.044	0.960	1.456	7.678	0.189	0.018
Arah 135	0.661	0.673	0.992	0.793	0.714	0.412
Arah 180	0.924	0.000	0.983	0.000	1.003	0.000
Kondisi Muatan 0% (<i>ballast load</i>)						
Arah 0	0.918	0.000	2.742	0.000	1.006	0.000
Arah 45	0.706	0.674	2.771	0.788	0.716	0.415
Arah 90	0.746	0.962	2.753	7.780	0.629	0.029
Arah 135	0.726	0.674	2.758	0.789	0.718	0.413
Arah 180	0.918	0.000	2.757	0.000	1.007	0.000

Dari perhitungan RAO di gelombang reguler pada kondisi terapung bebas tersebut maka selanjutnya dilakukan perhitungan respon struktur FPSO di gelombang acak. Dari hasil perhitungan, didapatkan bahwa nilai respon struktur tertinggi untuk kondisi terapung bebas adalah pada gerakan *heave* dan *roll*.

B. Analisis Perilaku Gerak FPSO Pada Kondisi Tertambat

Selain menganalisis perilaku gerak pada kondisi terapung bebas, penelitian ini juga menganalisis perilaku gerak FPSO pada saat tertambat dengan *internal turret*. Analisis perilaku gerak FPSO kondisi tertambat ini juga akan menghasilkan RAO untuk

arah pembebanan 0° , 45° , 90° , 135° dan 180° . RAO tersebut dijabarkan dalam gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw*. Data RAO ini menunjukkan karakteristik perilaku gerak FPSO saat tertambat pada gelombang reguler. RAO dihitung untuk ketiga kondisi muatan FPSO. Berikut adalah hasil resume nilai RAO analisis perilaku gerak FPSO pada gelombang reguler untuk kondisi tertambat dengan *internal turret*.

Tabel 5. Resume nilai RAO tertinggi untuk ketiga kondisi muatan FPSO kondisi tertambat dengan *internal turret*

	Surge (m/m)	Sway (m/m)	Heave (m/m)	Roll (deg/m)	Pitch (deg/m)	Yaw (deg/m)
Kondisi Muatan Penuh 100% (<i>full load</i>)						
Arah 0	0.934	0.000	0.953	0.000	0.483	0.000
Arah 45	0.661	0.654	0.962	2.960	0.519	0.251
Arah 90	0.018	0.934	1.324	3.685	0.233	0.052
Arah 135	0.660	0.652	0.960	2.959	0.548	0.250
Arah 180	0.927	0.000	0.953	0.000	0.489	0.000
Kondisi Muatan 25%						
Arah 0	0.904	0.000	0.952	0.000	0.461	0.000
Arah 45	0.621	0.658	0.958	0.825	0.481	0.251
Arah 90	0.018	0.942	1.320	1.396	0.192	0.052
Arah 135	0.618	0.656	0.956	0.823	0.507	0.250
Arah 180	0.910	0.000	0.950	0.000	0.489	0.000
Kondisi Muatan 0% (<i>ballast load</i>)						
Arah 0	0.965	0.000	0.942	0.000	0.461	0.000
Arah 45	0.687	0.652	0.953	0.844	0.481	0.249
Arah 90	0.015	0.960	1.217	1.367	0.192	0.047
Arah 135	0.687	0.652	0.951	0.7843	0.507	0.247
Arah 180	0.963	0.000	0.941	0.000	0.467	0.000

Dari perhitungan RAO di gelombang reguler pada kondisi tertambat tersebut maka selanjutnya dilakukan perhitungan respon struktur FPSO di gelombang acak. Dari hasil perhitungan, didapatkan bahwa nilai respon struktur pada kondisi tertambat memiliki nilai yang lebih rendah. Hal ini berarti bahwa keberadaan sistem tambat adalah penting untuk meredam/mengurangi gerakan FPSO pada Teluk Meksiko.

C. Analisis Tension Sistem Tambat pada Kondisi ULS dan ALS

Tali tambat yang menerima *tension* maksimum memiliki *safety factor* minimal. Besar *tension* yang didapatkan pada analisis ini akan dikoreksi dengan suatu kriteria *safety factor* berdasarkan API RP 2SK 2nd edition. Perlu diketahui bahwa semakin besar nilai *tension* yang terjadi dibandingkan dengan nilai batas kapasitas tegangan (*breaking strength*) tali tambat yang diterima, maka akan semakin rentan tali tersebut untuk putus. Oleh sebab itu sebelum menganalisis *tension* pada tali tambat terlebih dahulu dilakukan perhitungan secara mendetail tentang desain panjang tali tambat.

Dengan berbasis *time-domain*, analisis dilakukan selama 3 jam. Kondisi ULS adalah pembebanan yang terjadi pada kondisi operasi, dimana tali tambat yang bekerja sebagai *mooring system* pada FPSO bekerja optimum, utuh tanpa ada tali tambat dari yang diputus. Sedangkan ALS adalah pembebanan dengan kondisi yang sama dengan ULS, akan tetapi terdapat tali tambat dari *mooring system* yang diputus secara bebas. Berikut adalah hasil

analisis *tension* tali tambat pada FPSO untuk kedua kondisi tersebut.

- Analisis *tension* tali tambat untuk FPSO pada kondisi ULS

Nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh API RP 2SK 2nd edition pada kondisi ULS adalah sebagai berikut:

Untuk *fibre rope*,

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.67 = \frac{6818667 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 4083034.132 \text{ N}$$

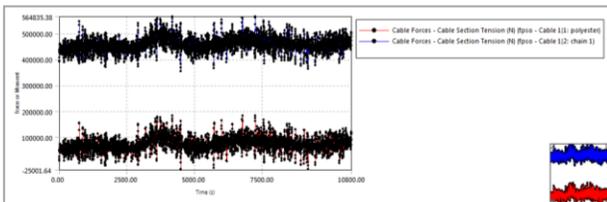
Untuk *chain*,

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

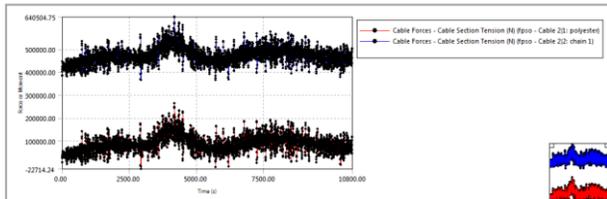
$$1.67 = \frac{6469173 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 3873756.28 \text{ N}$$

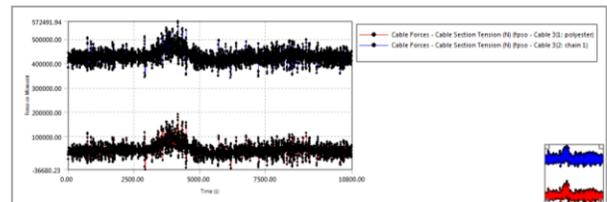
Karena pada kondisi ULS nilai *tension* maksimum yang dihasilkan adalah terdapat pada *line 3*, maka gambar yang ditampilkan cukup pada *line 3* saja. Alasannya adalah apabila *line 3* sudah aman, maka *line* atau tali tambat lainnya pasti dalam kondisi aman.



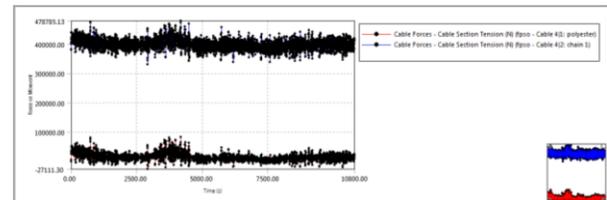
Gambar 3. *Tension* pada *line 3* arah 0°



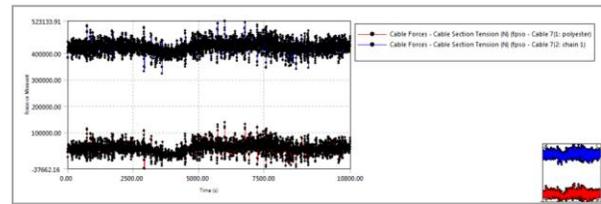
Gambar 4. *Tension* pada *line 3* arah 45°



Gambar 5. *Tension* pada *line 3* arah 90°



Gambar 6. *Tension* pada *line 3* arah 135°



Gambar 7. *Tension* pada *line 3* arah 0°

Tabel 6. Nilai *tension* maksimum pada *line 3* kondisi ULS untuk semua arah pembebanan

Arah Pembebanan	Nilai <i>tension</i> maksimum pada <i>line 3</i>	
	<i>Fibre Rope</i> (tipe: polyester)	<i>Chain</i>
0°	184185.281 N	466323.188 N
45°	263632.6 N	640504.75 N
90°	190992.469 N	572491.938 N
135°	82162.813 N	478785.125 N
180°	137668.734 N	523133.906 N

Pada Tabel 6 dinyatakan bahwa nilai *tension* maksimum pada *line 3* kondisi ULS terbesar adalah terjadi pada arah pembebanan (*heading*) 45°. Arah pembebanan ini yang akan digunakan untuk analisis kondisi ALS. Karena dari hasil analisis ULS diketahui bahwa *tension* maksimum pada *line 3* memiliki nilai yang signifikan dan layak untuk digunakan dalam analisis ALS.

- Analisis *Tension* Tali Tambat Untuk FPSO Pada Kondisi ALS

Nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh API RP 2SK 2nd edition pada kondisi ULS adalah sebagai berikut:

Untuk *fibre rope*,

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.25 = \frac{6818667 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 5454933.6 \text{ N}$$

Untuk *chain*,

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.25 = \frac{6469173 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$\text{Maximum Tension} = 5175338.4 \text{ N}$$

Pada kondisi ALS ini, analisis dilakukan untuk arah yang memiliki nilai signifikan pada kondisi ULS. Seperti yang sudah diketahui bahwa analisis ALS dilakukan untuk arah 45° saja. Dan setelah melakukan analisis dihasilkan nilai *tension* maksimum terbesar adalah pada saat *line 2* diputus. Maka gambar yang ditampilkan cukup pada kondisi *line2* diputus saja. Alasannya adalah apabila kondisi tersebut sudah aman maka pada tali tambat yang lain juga aman.

Tabel 7. Nilai *tension* maksimum kondisi ALS
aat *line 2* diputus

Heading	Line yang di putus	Line yang di analisis	Nilai <i>tension</i> maksimum	
			Fibre Rope (tipe: polyester)	Chain
45°	L2	L1	236640.906 N	617187.313 N
45°	L2	L2	-	-
45°	L2	L3	255159.344 N	633727.75 N
45°	L2	L4	142039.344 N	534248.375 N
45°	L2	L5	61076.439 N	457701.719 N
45°	L2	L6	70065.461 N	466304.74 N
45°	L2	L7	103466.219 N	495341.063 N
45°	L2	L8	157600.281 N	537976.625 N

Dari Tabel 7 dinyatakan bahwa nilai *tension* maksimum yang terbesar saat *line 2* diputus adalah terjadi pada *line 3* dengan nilai seperti yang tertera di atas. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk kondisi ALS, seluruh nilai *tension* maksimum berada pada batas aman sesuai kriteria API RP 2SK 2nd edition.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dari perhitungan dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yang juga akan menjawab permasalahan yang ada pada penelitian Tugas Akhir. Berikut ini adalah kesimpulan yang dapat dirangkum dari penelitian ini:

1. Besar respon gerak pada ketiga kondisi muatan FPSO saat terapung bebas (*free floating*) yang memiliki nilai tertinggi atau dominan adalah untuk gerakan *heave*, *roll* dan *pitch*. Dimana ketiga gerakan tersebut merupakan gerakan vertikal bangunan apung. Dari analisis respon gerak ketiga kondisi muatan, yang memiliki nilai paling stabil adalah kondisi muatan penuh, sedangkan yang memiliki nilai respon sangat besar adalah saat kondisi muatan *ballast*. Hal ini disebabkan karena pada saat kondisi muatan *ballast*, FPSO mengalami draft terendahnya (15.3 m) sehingga apabila ia dikenai gelombang dari berbagai arah akan mengalami respon gerak yang tidak stabil. Dari sinilah dapat diambil kesimpulan bahwa suatu sistem tambat sangat diperlukan untuk meredam/mengurangi gerakan FPSO tersebut sata beroperasi
2. Besar respon gerak FPSO pada ketiga kondisi muatan saat ia tertambat dengan *internal turret* memiliki nilai yang lebih kecil dibanding dengan respon gerak saat ia terapung bebas. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 dimana dalam tabel tersebut telah ditampilkan resume nilai RAO untuk kondisi terapung bebas dan tertambat. Dari kedua tabel resume tersebut maka dapat disimpulkan bahwa nilai respon gerak untuk kedua kondisi tersebut memiliki selisih yang cukup signifikan. Hal ini berarti menunjukkan bahwa sistem tambat *internal turret* memberi efek yang sangat penting untuk pengoperasian FPSO di Teluk Meksiko.

3. Hasil untuk *tension* maksimum tali tambat dibagi menjadi dua yaitu pada kondisi ULS dan ALS. Berikut ini adalah hasil yang diperoleh:

- Hasil analisis kondisi ULS, *tension* maksimum terbesar adalah terjadi pada *line 3* dari arah pembebanan 45°, yakni dengan sebesar 263632.6 N untuk *fibre rope* dan 640504.75 N untuk *chain*. Nilai *tension* maksimum yang dihasilkan tersebut telah memenuhi batas aman kriteria *safety factor* sesuai API RP 2SK 2nd edition.
- Analisis untuk kondisi ALS hanya dilakukan pada arah pembebanan yang menghasilkan *tension* maksimum terbesar ketika analisis kondisi ULS yaitu arah 45°. Dari arah pembebanan tersebut dihasilkan nilai *tension* tali tambat maksimum saat *line 2* diputus pada *line 3* sebesar 255159.344 N untuk *fibre rope* dan 633727.75 N untuk *chain*. Nilai *tension* maksimum pada kondisi ALS tersebut telah memenuhi batas aman kriteria *safety factor* sesuai API RP 2SK 2nd edition.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kepada seluruh pihak yang telah membantu, baik secara materi, ilmu, motivasi, semangat dan doa sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cho, S.K., Sung, H.G., Hong, S.Y., Yun Ho dan Kim, 2013, “*Study of the Stability of Turret moored Floating Body*”, Proc. Int. 13th of Ship Stability Workshop, Seoul National University.
- [2] Kim, M.H. dan Tahar Archandra, 2003, “*Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis and sensitivity study of a tanker-based FPSO*”, Ocean Engineering Program, Civil Engineering Department, Texas A&M University.
- [3] Chakrabarti, S.K., 1987, “*Hydrodynamics of Offshore Structures*”, Computational Mechanics Publications Southampton, Boston, USA.
- [4] DNV OS E301, 2004, “*Position Mooring*”, Det Norske Veritas, Norway.
- [5] DNV RP C205, 2010, “*Environmental Conditions and Environmental Loads*”, Det Norske Veritas, Norway.
- [6] Faltinsen, O.M., 1990, “*Sea Loads On Ships And Offshore Structures*”, United Kingdom : Cambridge University Press.