

PERENCANAAN *SPREAD MOORING* FSO BARAKUDA NATUNA

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

Oleh
Alexandra Ayurinaras Darminto
NIM 15516013



Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2020

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir Sarjana

**PERENCANAAN *SPREAD MOORING*
FSO BARAKUDA NATUNA**

Adalah benar dibuat oleh saya sendiri dan belum pernah dibuat dan diserahkan sebelumnya baik sebagian atau pun seluruhnya, baik oleh saya mau pun orang lain, baik di ITB maupun institusi pendidikan lainnya.

Bandung, Agustus 2020

Foto

Penulis



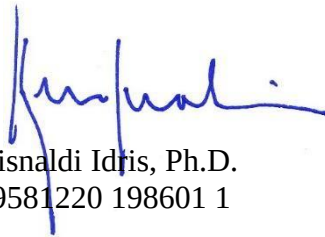
Alexandra Ayurinaras Darminto

NIM 15516013



Bandung, 30 September 2020

Pembimbing



Krisnaldi Idris, Ph.D.
NIP 19581220 198601 1
001

Mengetahui:

Program Studi Teknik
Kelautan Ketua,

Andojo Wurjanto, Ph.D. NIP
19600330 198503 1 007

PERENCANAAN *SPREAD MOORING* FSO BARAKUDA NATUNA

Spread Mooring Design FSO Brakuda Natuna

Alexandra Ayurinaras Darminto¹ dan Ir. Krisnaldi Idris, Ph.D.²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,

Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

alexandra.a.darminto@gmail.com¹ dan krisnaldi2@gmail.com²

Abstrak: FSO (*Floating Storage and Offloading*) merupakan sebuah struktur terapung yang dibangun untuk menampung *crude oil* yang didapatkan dari kegiatan penambangan minyak dan gas bumi di lepas pantai. Dalam proses pengiriman minyak dari platform, FSO diharapkan berada pada posisi yang stabil dengan pergerakan minimum akibat faktor-faktor lingkungan yang terjadi, maka dari itu diperlukan sistem penambatan FSO. Sistem penambatan menggunakan jangkar tidak menjadi opsi dikarenakan banyaknya pipa-pipa penyalur yang dibaringkan di sekitar platform dan FSO, sehingga *mooring* menjadi pilihan terbaik dalam kasus ini. Berdasarkan pengolahan data lingkungan di sekitar area Laut Natuna, diketahui bahwa terdapat arah angin, gelombang, dan arus dominan sehingga dipilih sistem *spread mooring* dengan arah *heading* FSO dari *northeast* dimana terjadi kombinasi angin, gelombang, dan arus yang terbesar. Adapun rantai *mooring* yang digunakan akan mengalami pengurangan diameter akibat korosi oleh air laut sehingga perlu dilakukan monitor secara rutin untuk menghindari putusannya rantai *mooring*. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis mengenai kekuatan *spread mooring* yang terjadi serta sisa ketebalan *mooring chain* yang diizinkan untuk menghindari putusannya tali *mooring*. Analisis pada kasus ini akan dilakukan pada kondisi *ballast* dan *full load* dan diawali dengan pemodelan struktur FSO pada perangkat lunak penghitung *response amplitude operator* (RAO), yang bertujuan untuk mengetahui respon struktur terhadap faktor alam yang bekerja. Kemudian keluaran dari pemodelan tersebut akan diuji ketepatannya sesuai dengan ketentuan dari AISC, 2013. Setelah ketepatan dari pemodelan tersebut teruji memenuhi standar, maka respon struktur dapat menjadi input untuk perangkat lunak pemodelan sistem *mooring*. Pemodelan ini dilakukan pada dua kondisi, *ultimate limit state* dan *accidental limit state*, untuk masing-masing kondisi, *ballast* dan *full load*. Kemudian hasil dari pemodelan pada perangkat lunak ini akan dievaluasi sesuai dengan standar minimum yang tercantum pada API-RP-2SK. Hasil akhir dari analisis respon struktur adalah struktur dapat mengalami resonansi pada gelombang dengan frekuensi rendah, dan respon struktur FSO terhadap faktor alam berpengaruh pada tension yang dihasilkan sepanjang tali *mooring*, seperti telah dimodelkan, diketahui bahwa tension terbesar yang terjadi adalah 2,098 kN yang terjadi pada *mooring line* 6 untuk kondisi *ballast* ketika ALS pada gelombang regular, sementara untuk gelombang acak adalah 4,971 kN yang terjadi pada *mooring line* 6 untuk kondisi *ballast* ketika ALS.

Kata Kunci: FSO, analisis mooring, mooring tension, time-domain simulation.

Abstract: FSO (Floating Storage and Offloading) is a floating structure built to accommodate crude oil obtained from offshore oil and gas mining activities. In the process of delivering oil from the platform, the FSO is expected to be in a stable position with minimum movement due to

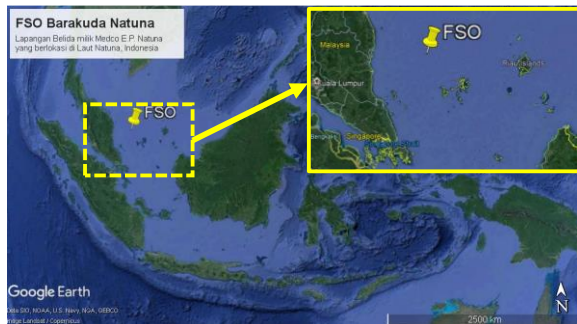
environmental factors, therefore an FSO mooring system is required. An anchor mooring system is not an option due to the large number of pipelines laid around the platform and the FSO, so mooring is the best option in this case. Based on the processing of environmental data around the Natuna Sea area, it is known that there are dominant wind, wave, and current directions, so a spread mooring system is chosen with the FSO heading to the northeast where the largest combination of wind, waves and currents occurs. The mooring chain used will experience a reduction in diameter due to corrosion by sea water so that it is necessary to monitor it regularly to avoid breaking the mooring chain. In this final project, an analysis will be carried out regarding the strength of the spread mooring that occurs and the allowed thickness of the mooring chain to avoid breaking the mooring rope. The analysis in this case will be carried out in ballast and full load conditions and begins with the modeling of the FSO structure in the operator response amplitude (RAO) software, which aims to determine the response of the structure to working natural factors. Then the output of the modeling will be tested for accuracy in accordance with the provisions of IACS. After the accuracy of the modeling has been tested to meet the standards, the structural response become an input for the mooring system modeling software. This modeling is carried out in two conditions, ultimate limit state and accidental limit state, for each condition, ballast and full load. Then the results of modeling in this software will be evaluated in accordance with the minimum standards listed in API-RP-2SK. The final result of the structural response analysis is that the structure can experience resonance at low frequency waves, and the response of the FSO structure to natural factors affects the tension generated along the mooring rope, as has been modeled, it is known that the greatest tension that occurs is 2,098 kN which occurs in mooring line 6 for ballast conditions when ALS is on regular waves, while for random waves it is 4,971 kN which occurs on mooring line 6 for ballast conditions when ALS.

Keywords: FSO, mooring analysis, mooring tension, time-domain simulation.

PENDAHULUAN

Eksplorasi minyak dan gas bumi telah berkembang sedemikian rupa, tidak hanya dilakukan pada laut dangkal namun telah merambah pula ke laut dalam. Hal ini melatarbelakangi pengembangan teknologi dari *fixed platform* menuju sebuah inovasi struktur terapung yang salah satunya adalah FSO (*Floating Storage and Offloading*). FSO memiliki fungsi sebagai struktur penampung *crude oil* yang dihasilkan dari kegiatan penambangan.

Contoh wilayah Indonesia yang saat ini giat dalam melakukan eksplorasi minyak dan gas adalah Laut Natuna. Maka dari itu terdapat banyak kegiatan penambangan minyak dan gas bumi pada Laut Natuna, salah satunya adalah lapangan Minyak dan Gas Belida milik Medco E.P. Natuna, dengan lokasi seperti dapat dilihat pada Gambar 1. Pada kegiatan eksplorasi ini digunakan FSO yang berfungsi menampung minyak yang telah diolah dari lapangan Belida, yang kemudian disalurkan menggunakan pipa bawah laut dan *flexible riser* menuju FSO.



Gambar 1 Lokasi tambat FSO Barakuda Natuna

Saat ini dalam satu hari minyak yang mampu dihasilkan dari lapangan Belida berkisar 6,500 BOPD (*Barrel Oil Per Day*), sehingga dibutuhkan sekitar 93 hari atau setara 3 bulan untuk memenuhi *storage tank* FSO Barakuda Natuna yang memiliki

kapasitas 120,000 m³ atau setara 600,000 *barrel*. Oleh karenanya dibutuhkan suatu sistem tambat untuk menjaga kestabilan dari struktur FSO yang menggunakan *spread mooring* dengan 8 buah *mooring line*.

TEORI DAN METODOLOGI

Dalam pemodelan sistem mooring, digunakan perangkat lunak yang menerapkan teori-teori dari gelombang, linear, regular, dan acak.

Teori gelombang linear dikembangkan oleh banyak ahli, salah satunya adalah Airy (1845), dengan mengasumsikan fluida yang digunakan berupa fluida ideal, bersifat homogen dan tidak termampatkan serta bergerak irrotasional. Dengan asumsi-asumsi tersebut potensial kecepatan pada teori ini memenuhi persamaan kontinuitas yang menghasilkan persamaan Laplace sebagai berikut.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

Persamaan Laplace ini diharapkan memenuhi kondisi batas, yang ditunjukkan sebagai berikut.

- Kondisi batas dasar ($z=-d$)

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

- Kondisi batas permukaan bebas kinematic

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (3)$$

- Kondisi batas permukaan bebas dinamik

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

- Syarat batas lateral

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t) \quad (5)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T) \quad (6)$$

Teori gelombang regular merupakan sebuah konsep yang mendeskripsikan gelombang yang memiliki perioda dan tinggi gelombang yang tetap terhadap waktu. Lain halnya dengan teori gelombang acak yang mencoba menggambarkan gelombang yang terjadi di lapangan atau dalam kehidupan sehari-hari, dimana pada satu gelombang terdapat beberapa tinggi gelombang (H) dan periode gelombang (T).

Selain menggunakan teori gelombang, digunakan juga konsep mengenai perhitungan beban akibat faktor alam yang bekerja pada struktur sebagai berikut.

1. Beban angin

Angin memberikan pengaruh berupa beban pada berbagai struktur diatas muka air, sehingga besar beban angin dihitung sebagai berikut berdasarkan OCIMF (*Oil Companies International Marine Forum*) 1997.

a. Gaya angin longitudinal

$$F_{xw} = C_{xw} \left(\frac{\rho_w}{7600} \right) V_w^2 A_T \quad (7)$$

b. Gaya angin lateral

$$F_{yw} = C_{yw} \left(\frac{\rho_w}{7600} \right) V_w^2 A_L \quad (8)$$

2. Beban gelombang

Beban gelombang dapat dihitung dengan menggunakan beberapa teori yang salah satunya adalah teori difraksi. Teori ini umum digunakan untuk perhitungan beban gelombang pada struktur yang relative besar.

Superposisi gelombang yang terjadi.

$$\phi = \phi_{insiden} + \phi_{difraksi} \quad (9)$$

Perhitungan gaya gelombang terdifraksi.

$$F_{difraksi} = \int_{-d}^0 -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} n ds \quad (10)$$

$$F_{aif} = \int_{-d}^0 -\rho \frac{\partial (\phi_i + \phi_d)}{\partial t} n ds \quad (11)$$

3. Beban arus

Besar arus dapat memberikan pengaruh berupa beban pada berbagai struktur dibawah muka air, sehingga besar beban arus dihitung sebagai berikut berdasarkan OCIMF (*Oil Companies International Marine Forum*) 1997.

a. Gaya arus longitudinal

$$F_{xc} = C_{xc} \left(\frac{\rho_c}{7600} \right) V_c^2 T L_{BP} \quad (12)$$

b. Gaya arus lateral

$$F_{yc} = C_{yc} \left(\frac{\rho_c}{7600} \right) V_c^2 T L_{BP} \quad (13)$$

Setelah diketahui penerapan teori gelombang, diperlukan juga pemilihan sistem tambat yang digunakan pada pemodelan. Pada Tugas Akhir ini digunakan sistem *spread mooring*, dimana sistem ini umum diunakan pada kondisi lingkungan yang memiliki beban angin, gelombang, atau arus yang dominan dari arah tertentu.

Untuk tipe penambatan itu sendiri, dipilih tipe *catenary mooring* yang merupakan tipe penambatan struktur dimana tali tambat memiliki bagian yang terbaring pada *seabed* Pemilihan tipe ini dilatarbelakangi oleh pertimbangan beban jangkar yang hanya akan dikenakan beban horizontal serta penggunaan berat tali *mooring* sebagai gaya pengembali.

Setiap bangunan/struktur terapung yang bergerak di atas permukaan laut selalu mengalami enam mode gerakan bebas (*six degree of freedom*) yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu 3 mode gerakan translasional dan 3 mode gerakan rotasional dalam arah 3 sumbu. Berikut merupakan ke-

enam mode gerakan bangunan apung berdasarkan Bhattacharyya, 1978.

1. Mode gerak translasional

- Surge, gerakan transversal arah sumbu x
- Sway, gerakan transversal arah sumbu y
- Heave, gerakan transversal arah sumbu z

2. Mode gerak rotasional

- Roll, gerakan rotasional dengan sumbu putarnya sumbu x
- Pitch, gerakan rotasional dengan sumbu putarnya sumbu y
- Yaw, gerakan rotasional dengan sumbu putarnya sumbu z

Setelah mengetahui enam gerak bebas bangunan apung, maka diperlukan sebuah persamaan gerak yang digunakan untuk mengetahui gerak bangunan apung itu sendiri. Gerak bangunan apung yang terjadi di lapangan merupakan kombinasi dari beban akibat gaya eksitasi dan difraksi.

1. Gaya eksitasi

$$F_{FK} = \int_{-d}^0 P \times n_i \times dA \quad (14)$$

2. Massa tambahan

$$F_{ma} = m_{ai} \times \ddot{z}_i \quad (15)$$

3. Redaman

$$F_b = b_i \times \dot{z}_i \quad (16)$$

4. Kekakuan

$$F_c = c_i \times z_i \quad (17)$$

Maka bisa didapatkan persamaan gerak SDOF (*single degree of freedom*) sebagai berikut.

$$\sum F = F_{eksitasi} - F_{reaksi} \quad (18)$$

$$\sum F = F_{eks} - (F_a + F_b + F_c) \quad (19)$$

$$m_i \ddot{z}_i = F_{eks} - (a_i \ddot{z}_i + b_i \dot{z}_i + c_i z_i) \quad (20)$$

$$(m_i + a_i) \ddot{z}_i + b_i \dot{z}_i + c_i z_i = F_{eks} \quad (21)$$

Dari persamaan gerak tersebut, perangkat lunak akan mengolah menjadi sebuah nilai response amplitude operator (RAO). RAO adalah sebuah fungsi respon yang terjadi akibat gelombang mengenai struktur dalam rentang frekuensi tertentu dan menghasilkan sebuah respon gerakan dinamis struktur.

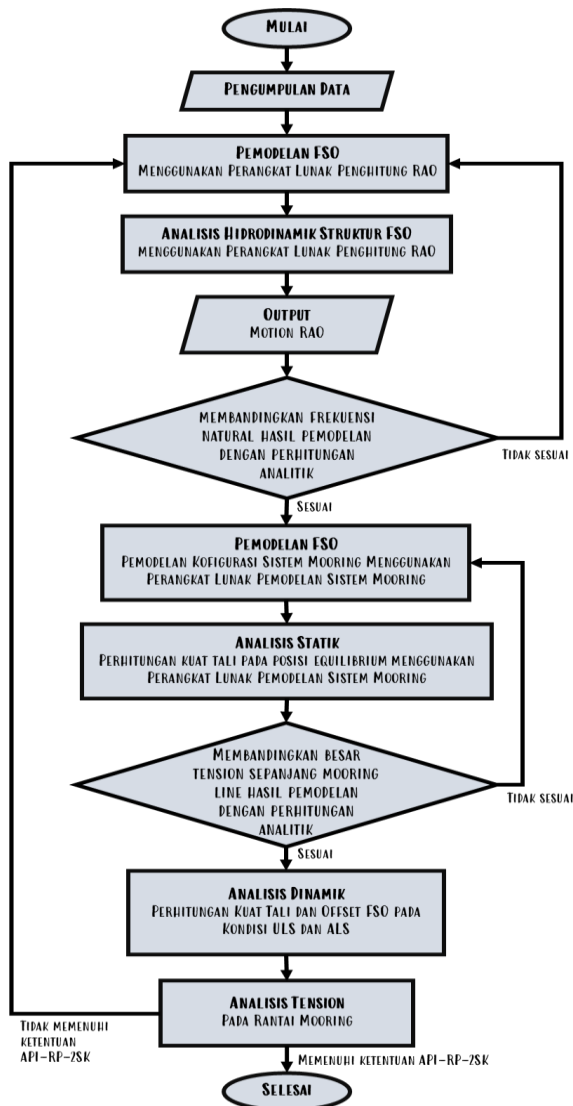
$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{ko}(\omega)}{\zeta_o(\omega)} \quad (22)$$

Dimana,

- ζ_{ko} = amplitudo respon struktur (m)
- ζ_o = amplitudo gelombang (m)
- ω = kecepatan sudut gelombang (rad/s)

Pada pengerjaan Tugas Akhir ini, digunakan sebuah perangkat lunak yang mengadopsi *strip theory* yang pada dasarnya menganggap sebuah kapal terdiri dari irisan dua dimensi melintang yang terbatas, yang terhubung secara kaku satu sama lain. Teori ini dapat ditentukan dengan menggunakan hasil dari koefisien hidrodinamik dua dimensi dan beban gelombang eksitasi. Nilai-nilai ini yang akan diintegrasikan di sepanjang panjang kapal secara numerik. Kemudian, persamaan diferensial akan diselesaikan menjadi persamaan geraknya.

Dalam Tugas Akhir ini, dilakukan desain sistem *spread mooring* dengan Metodologi yang dapat dilihat pada Gambar 2.

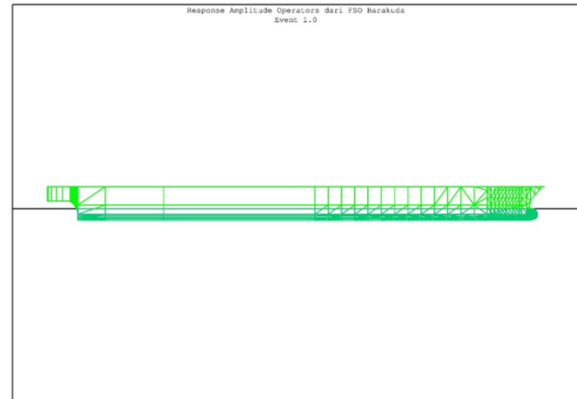


Gambar 2 Metodologi pengerjaan Tugas Akhir

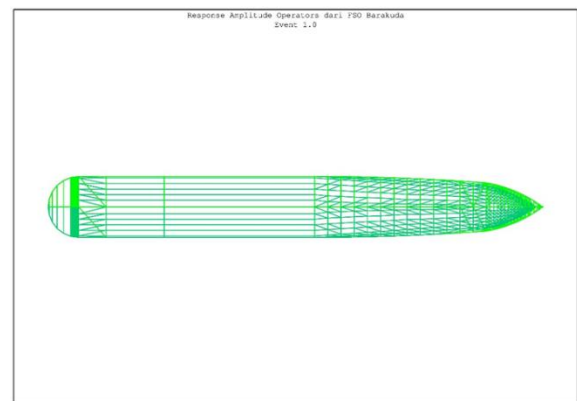
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pemodelan Struktur FSO

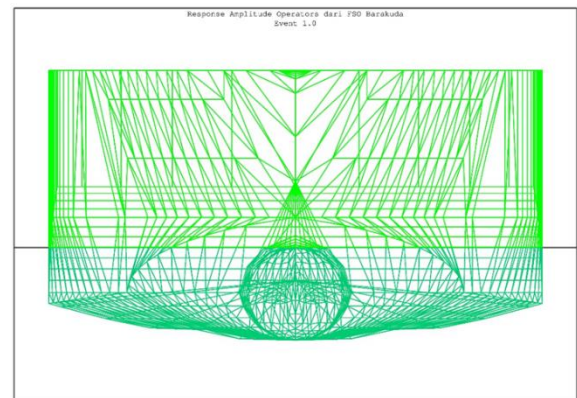
Pemodelan dilakukan pada perangkat lunak penghitung RAO dengan hasil pemodelan sebagai berikut. Dimana garis hijau tua menunjukkan bagian struktur yang berada dibawah muka air, sementara hijau muda untuk struktur yang ada diatas muka air.



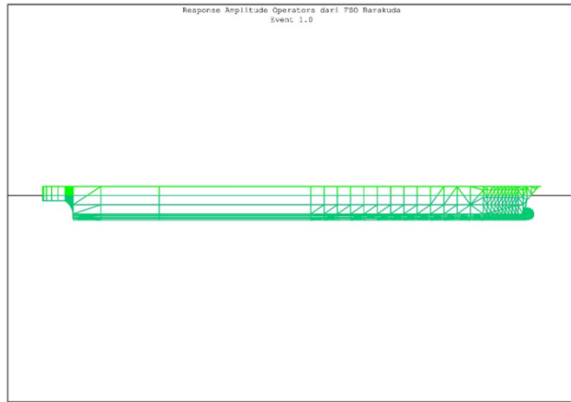
Gambar 3 Tampak samping pemodelan FSO untuk kondisi ballast



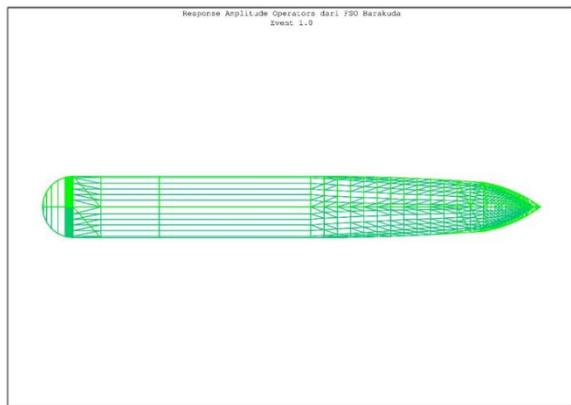
Gambar 4 Tampak atas pemodelan FSO untuk kondisi ballast



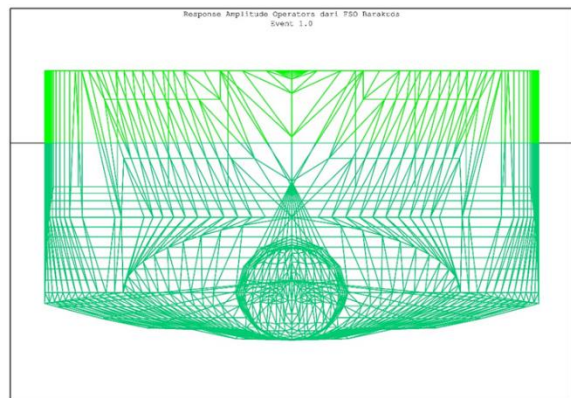
Gambar 5 Tampak depan pemodelan FSO untuk kondisi ballast



Gambar 6 Tampak samping pemodelan FSO untuk kondisi full load



Gambar 7 Tampak atas pemodelan FSO untuk kondisi full load

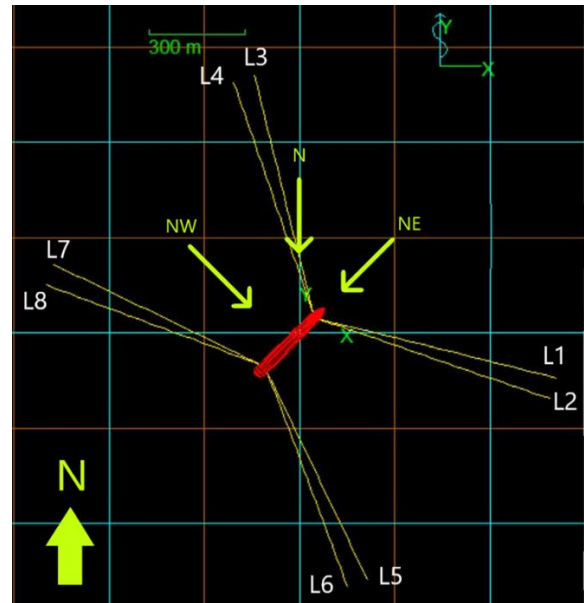


Gambar 8 Tampak depan pemodelan FSO untuk kondisi full load

2. Pemodelan Sistem Spread Mooring pada Gelombang Regular

Setelah mengetahui karakteristik dari struktur FSO, maka pemodelan dilanjutkan untuk sistem *spread mooring*, seperti ditunjukkan pada Gambar 9, dimana terdapat

8 *mooring line* dengan heading struktur mengarah pada NE. Oleh karena itu dilakukan uji pemebanan dari 3 variasi arah pembebanan.



Gambar 9 Pemodelan sistem spread mooring pada perangkat lunak

Berdasarkan API-RP-2SK pemodelan harus dilakukan pada dua kondisi, yaitu pada ultimate limit state (ULS) dan accident limit state (ALS).

Perhitungan *maximum tension* untuk kondisi ULS/intact seperti berikut.

$$\begin{aligned} \text{Max. Tension} &= \frac{MBL}{\text{Safety Factor}} \\ &= \frac{8,167.4}{1.67} = 4,900.44 \text{ kN} \end{aligned}$$

Perhitungan *maximum tension* untuk kondisi ALS/damage seperti berikut.

$$\begin{aligned} \text{Max. Tension} &= \frac{MBL}{\text{Safety Factor}} \\ &= \frac{8,167.4}{1.25} = 6,533.92 \text{ kN} \end{aligned}$$

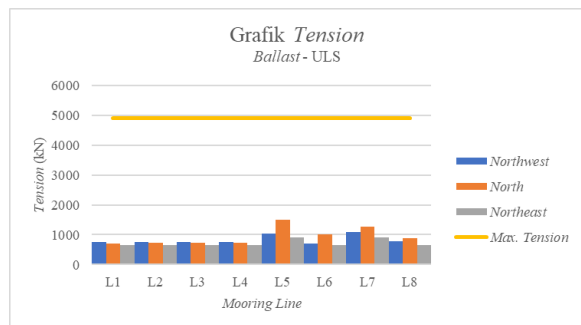
Setelah mengetahui tension maksimum yang diizinkan oleh standar desain, maka dapat diketahui apakah tension yang terjadi pada setiap mooring line memenuhi kriteria atau tidak.

Berikut merupakan tabel yang menunjukkan *tension* yang terjadi pada setiap *mooring line* dengan FSO dalam kondisi *ballast* dan diuji pada gelombang regular pada kondisi *intact*.

Tabel 1 Tension pada gelombang regular kondisi ballast - intact

Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
Tension (kN)	L1	745	710	644
	L2	746	722	645
	L3	760	720	644
	L4	764	726	645
	L5	1027	1493	911
	L6	707	1025	659
	L7	1078	1271	911
	L8	773	890	659

Seperti dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa pada pemodelan di kondisi *ballast* pada gelombang regular untuk kondisi *intact*, tidak ada *mooring line* yang melebihi *tension* izin.



Gambar 10 Grafik tension pada gelombang regular kondisi ballast - intact

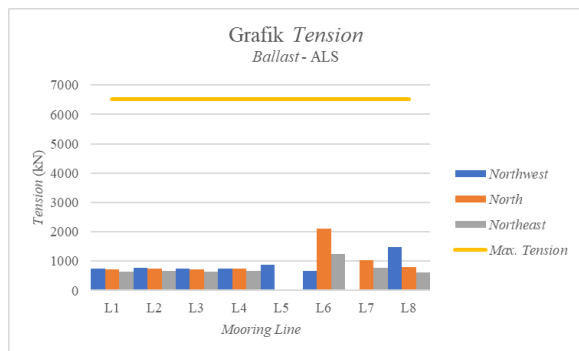
Berikut merupakan tabel yang menunjukkan *tension* yang terjadi pada setiap *mooring line* dengan FSO dalam kondisi *ballast* dan diuji pada gelombang regular pada kondisi *damage*.

Tabel 2 Tension pada gelombang regular kondisi ballast - damage

Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
Tension (kN)	L1	756	724	641
	L2	765	746	664

	L3	744	725	637
	L4	752	753	654
	L5	878		
	L6	661	2098	1244
	L7		1031	776
	L8	1473	790	606

Seperti dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa pada pemodelan di kondisi *ballast* pada gelombang regular untuk kondisi *damage*, tidak ada *mooring line* yang melebihi *tension* izin.



Gambar 11 Grafik tension pada gelombang regular kondisi ballast - damage

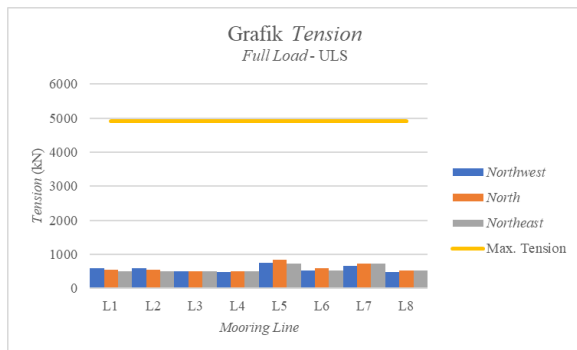
Berikut merupakan tabel yang menunjukkan *tension* yang terjadi pada setiap *mooring line* dengan FSO dalam kondisi *full load* dan diuji pada gelombang regular pada kondisi *intact*.

Tabel 3 Tension pada gelombang regular kondisi full load - intact

Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
Tension (kN)	L1	600	542	503
	L2	601	544	505
	L3	494	514	503
	L4	489	514	505
	L5	759	849	732
	L6	533	589	528
	L7	664	728	732
	L8	488	517	528

Seperti dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa pada pemodelan di kondisi *full load* pada gelombang regular untuk kondisi *intact*,

tidak ada *mooring line* yang melebihi *tension* izin.



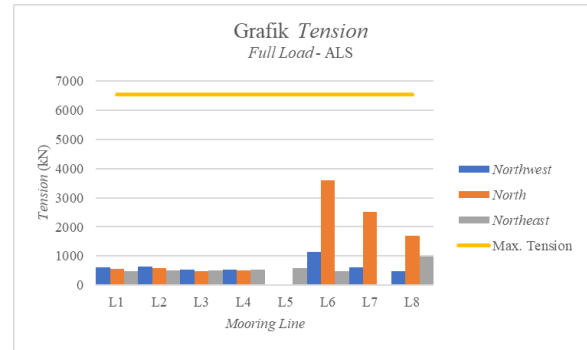
Gambar 12 Grafik tension pada gelombang regular kondisi full load - intact

Berikut merupakan tabel yang menunjukkan *tension* yang terjadi pada setiap *mooring line* dengan FSO dalam kondisi *full load* dan diuji pada gelombang regular pada kondisi *damage*.

Tabel 4 Tension pada gelombang regular kondisi full load - damage

Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
Tension (kN)	L1	623	563	485
	L2	637	574	496
	L3	525	492	517
	L4	526	509	525
	L5			597
	L6	1132	3608	474
	L7	623	2510	
	L8	479	1690	990

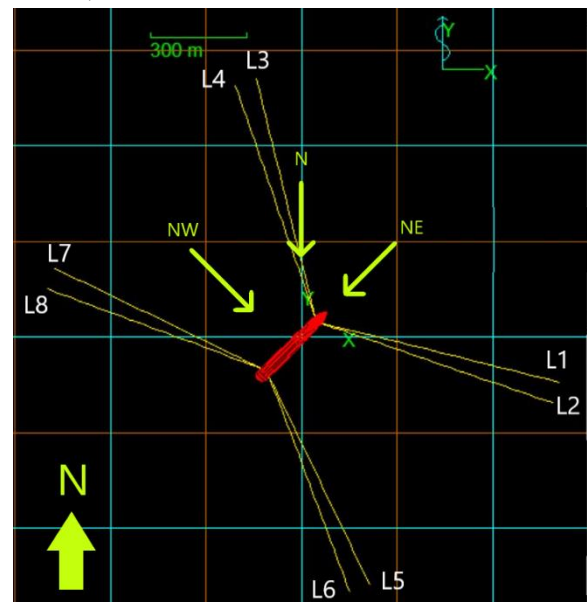
Seperti dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa pada pemodelan di kondisi *full load* pada gelombang regular untuk kondisi *damage*, tidak ada *mooring line* yang melebihi *tension* izin.



Gambar 13 Grafik tension pada gelombang regular kondisi full load - damage

3. Pemodelan Sistem Spread Mooring pada Gelombang Acak

Setelah melakukan pemodelan pada gelombang regular, maka dilanjutkan dengan pemodelan pada gelombang acak yang dilakukan pada perangkat lunak pemodelan sistem *mooring* seperti dapat dilihat pada Gambar 14, dimana pemodelan sistem tambat dengan 8 *mooring line* dilakukan dengan pembebanan dari 3 arah dengan faktor lingkungan dominan yaitu, *Northwest*, *North*, dan *Northeast*.

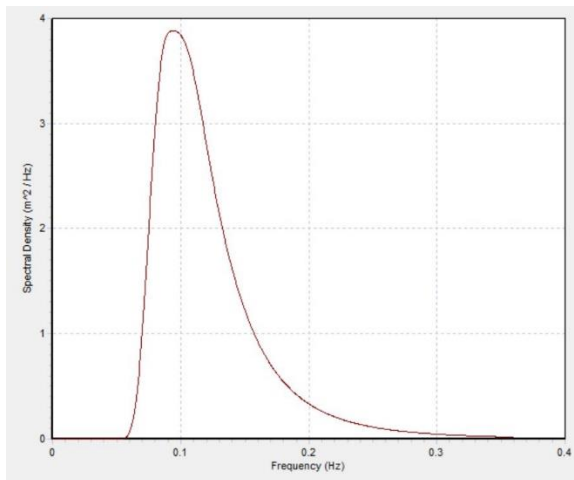


Gambar 14 Pemodelan sistem spread mooring pada gelombang acak

Pemodelan pada gelombang acak ini menggunakan spektrum JONSWAP,

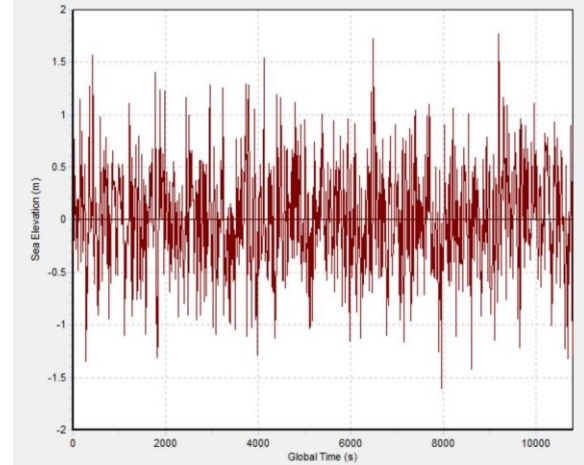
sehingga *time-series* muka air yang dihasilkan akibat beban gelombang dari setiap arah berbeda karena memiliki tinggi dan perioda gelombang yang berbeda.

Pembebanan dari arah *Northwest* memiliki besar tinggi gelombang signifikan setinggi 2.10 meter dengan periode rata-rata zero up-crossing sebesar 7.45 sekon. Oleh karena itu didapatkan spektrum JONSWAP dari perangkat lunak seperti ditunjukkan pada Gambar 15, dimana puncak spektrum mencapai 3.9 m²/Hz pada frekuensi 0.9 Hz.



Gambar 15 Spektrum JONSWAP untuk pembebanan arah Northwest

Berdasarkan grafik spektrum JONSWAP, maka bisa didapatkan *time-series* untuk tinggi muka air pada pembebanan arah *Northwest* dapat dilihat pada Gambar 16.



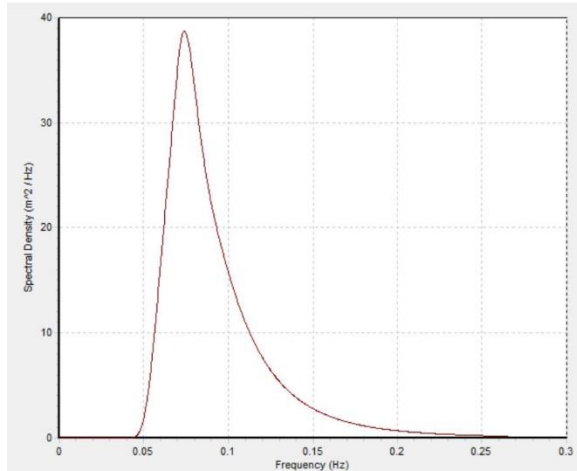
Gambar 16 Time-series muka air untuk pembebanan arah Northwest

Dari *time-series* elevasi muka air, diketahui informasi-informasi penting seperti *largest rise*, *largest fall*, *highest crest*, dan *lowest trough* yang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Parameter time-series muka air arah Northwest

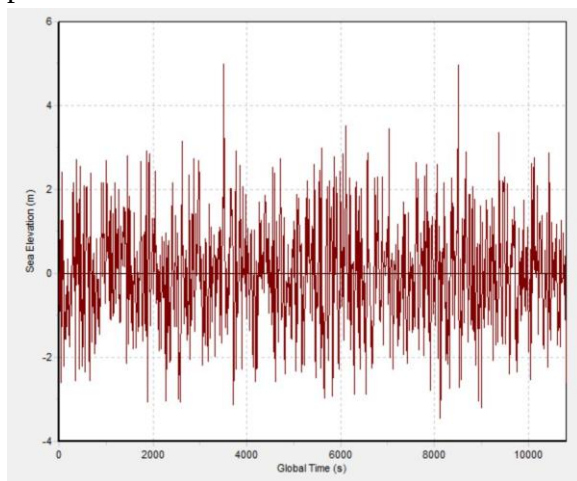
Event	Value (m)	Global Time (s)
Largest Rise	3.419954	9939.12
Largest Fall	3.70553	7152.7
Highest Crest	1.792336	9199.84
Lowest Trough	-2.0782	7158.6

Sementara untuk pembebanan dari arah *North* besar tinggi gelombang signifikan yang digunakan adalah 5.15 meter dengan periode rata-rata zero up-crossing sebesar 9.79 sekon. Oleh karena itu didapatkan spektrum JONSWAP dari perangkat lunak seperti ditunjukkan pada Gambar 17, dimana puncak spektrum mencapai 38 m²/Hz pada frekuensi 0.07 Hz.



Gambar 17 Spektrum JONSWAP untuk pembebanan arah North

Berdasarkan grafik spektrum JONSWAP, maka bisa didapatkan *time-series* untuk tinggi muka air pada pembebanan arah Northwest dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Time-series muka air untuk pembebanan arah North

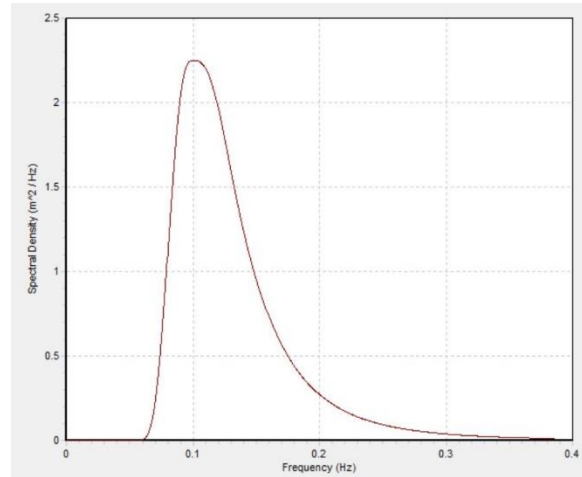
Dari *time-series* elevasi muka air, diketahui informasi-informasi penting seperti *largest rise*, *largest fall*, *highest crest*, dan *lowest trough* yang disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Parameter *time-series* muka air arah North

Event	Value (m)	Global Time (s)
Largest Rise	8.766884	3507.97
Largest Fall	8.806774	3513.11

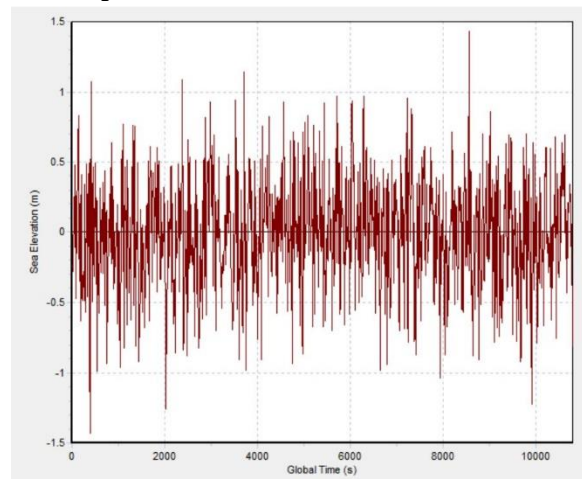
Highest Crest	5.117285	3513.11
Lowest Trough	-4.30081	6436.66

Sementara untuk pembebanan dari arah Northeast besar tinggi gelombang signifikan yang digunakan adalah 1.66 meter dengan periode rata-rata zero up-crossing sebesar 6.94 sekon. Oleh karena itu didapatkan spektrum JONSWAP dari perangkat lunak seperti ditunjukkan pada Gambar 19, dimana puncak spektrum mencapai 2.25 m²/Hz pada frekuensi 0.1 Hz.



Gambar 19 Spektrum JONSWAP untuk pembebanan arah Northeast

Time-series untuk tinggi muka air pada pembebanan arah Northwest dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20 Time-series muka air untuk pembebanan arah Northeast

Dari *time-series* elevasi muka air, diketahui informasi-informasi penting seperti *largest rise*, *largest fall*, *highest crest*, dan *lowest trough* yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Parameter *time-series* muka air arah Northeast

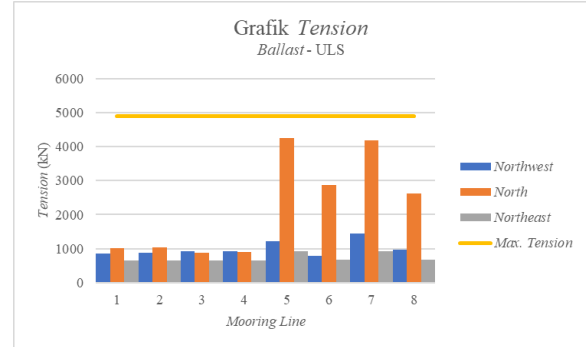
Event	Value (m)	Global Time (s)
Largest Rise	2.692853	2862.4
Largest Fall	2.597183	8562.08
Highest Crest	1.49924	2867.1
Lowest Trough	-1.5535	4815.93

Setelah diketahui kisaran waktu untuk terjadinya *tension* maksimum yang mungkin terjadi selama 10800 detik dan 3 jam pada masing-masing arah pembebanan, maka dilakukan *running* perangkat lunak untuk 500 sekon sebelum dan sesudah kisaran waktu tersebut.

Berikut pada Tabel 8 dan Gambar 21 diketahui bahwa nilai *tension* yang terjadi pada masing-masing *mooring line* tidak melebihi *tension* izin.

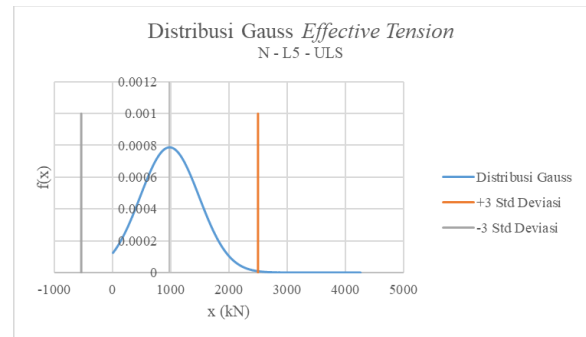
Tabel 8 *Tension* pada gelombang acak kondisi ballast - intact

Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
<i>Tension</i> (kN)	L1	861	1007	648
	L2	876	1039	649
	L3	927	874	648
	L4	929	893	649
	L5	1217	4259	917
	L6	795	2875	663
	L7	1433	4178	917
	L8	969	2625	663



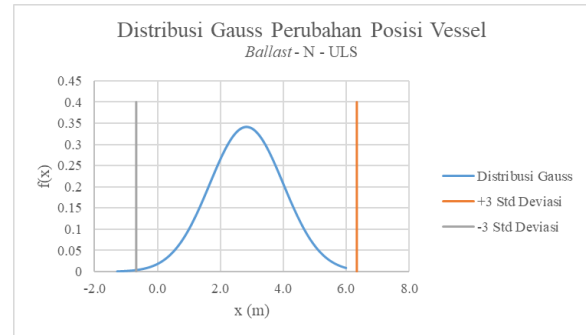
Gambar 21 Grafik *tension* pada gelombang acak kondisi ballast - intact

Setelah mengetahui besar *tension* yang terjadi, maka dilakukan pemeriksaan sebaran nilai *tension* dengan menggunakan distribusi Gauss, yang ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22 Distribusi Gauss untuk *tension* mooring line 5 – N - ULS

Selain pemeriksaan sebaran nilai *tension*, dilakukan pula pemeriksaan sebaran nilai simpangan *mooring* yang terjadi, seperti ditunjukkan pada Gambar 23.



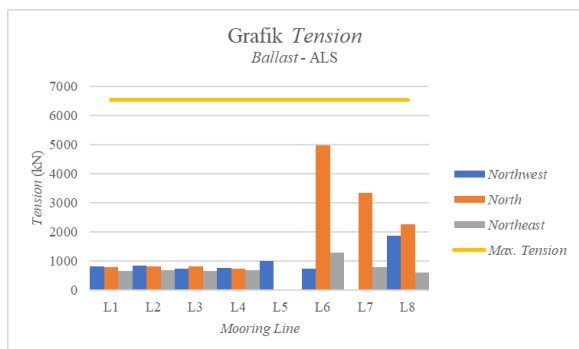
Gambar 23 Distribusi Gauss untuk posisi vessel (ballast - N – ULS)

Diketahui dari kedua pemeriksaan untuk kondisi *ballast - intact* sebaran bahwa nilai +3 standar deviasi tidak melebihi nilai izin yang ditetapkan oleh standar desain.

Berikut pada Tabel 9 dan Gambar 24 diketahui bahwa nilai *tension* yang terjadi pada masing-masing *mooring line* tidak melebihi *tension* izin.

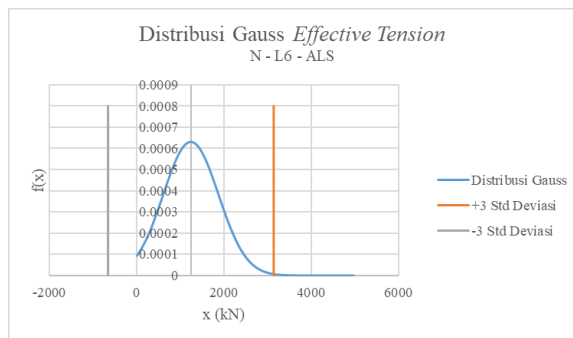
Tabel 9 Tension pada gelombang acak kondisi ballast - damage

Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
Tension (kN)	L1	816	783	656
	L2	841	793	677
	L3	733	795	654
	L4	765	719	669
	L5	980		
	L6	723	4971	1276
	L7		3318	781
	L8	1866	2243	608



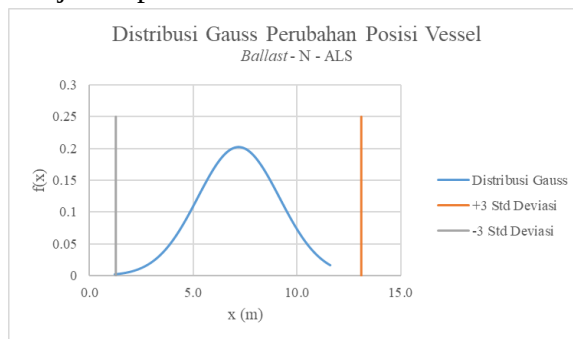
Gambar 24 Grafik tension pada gelombang acak kondisi ballast -damage

Setelah mengetahui besar *tension* yang terjadi, maka dilakukan pemeriksaan sebaran nilai *tension* dengan menggunakan distribusi Gauss, yang ditunjukkan pada Gambar 25.



Gambar 25 Distribusi Gauss untuk tension mooring line 6 – N - ALS

Selain pemeriksaan sebaran nilai *tension*, dilakukan pula pemeriksaan sebaran nilai simpangan *mooring* yang terjadi, seperti ditunjukkan pada Gambar 26.



Gambar 26 Distribusi Gauss untuk posisi vessel (ballast - N – ALS)

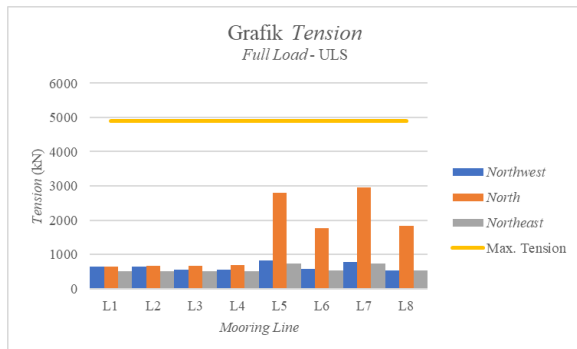
Diketahui dari kedua pemeriksaan untuk kondisi *ballast - damage* sebaran bahwa nilai +3 standar deviasi tidak melebihi nilai izin yang ditetapkan oleh standar desain.

Berikut pada Tabel 10 dan Gambar 27 diketahui bahwa nilai *tension* yang terjadi pada masing-masing *mooring line* tidak melebihi *tension* izin.

Tabel 10 Tension pada gelombang acak kondisi full load - intact

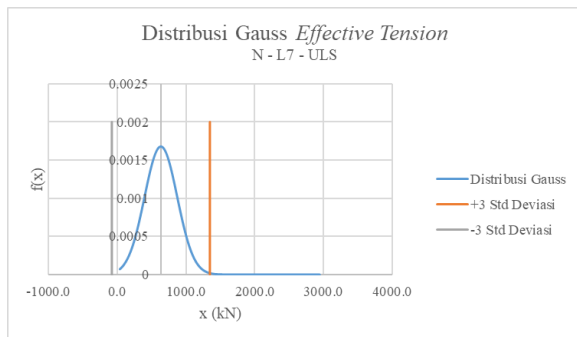
Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
Tension (kN)	L1	639	647	507
	L2	639	662	509
	L3	559	672	507
	L4	559	681	509
	L5	827	2805	721

	L6	575	1769	520
	L7	769	2947	721
	L8	539	1823	520



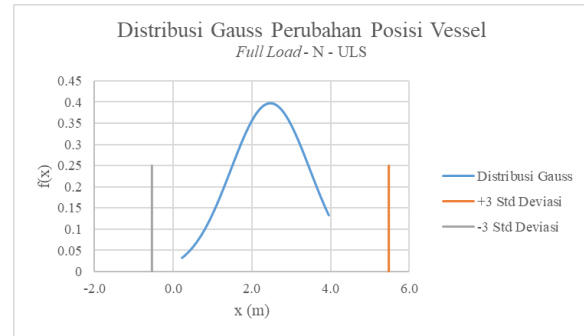
Gambar 27 Grafik tension pada gelombang acak kondisi full load -intact

Setelah mengetahui besar *tension* yang terjadi, maka dilakukan pemeriksaan sebaran nilai *tension* dengan menggunakan distribusi Gauss, yang ditunjukkan pada Gambar 28.



Gambar 28 Distribusi Gauss untuk tension mooring line 7 – N - ULS

Selain pemeriksaan sebaran nilai *tension*, dilakukan pula pemeriksaan sebaran nilai simpangan *mooring* yang terjadi, seperti ditunjukkan pada Gambar 29.



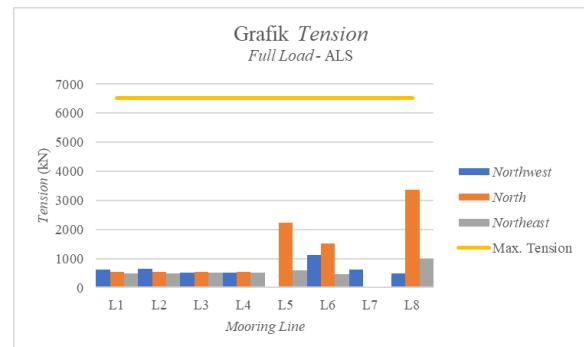
Gambar 29 Distribusi Gauss untuk posisi vessel (full load - N – ULS)

Diketahui dari kedua pemeriksaan untuk kondisi *full load - intact* sebaran bahwa nilai +3 standar deviasi tidak melebihi nilai izin yang ditetapkan oleh standar desain.

Berikut pada Tabel 11 dan Gambar 30 diketahui bahwa nilai *tension* yang terjadi pada masing-masing *mooring line* tidak melebihi *tension* izin.

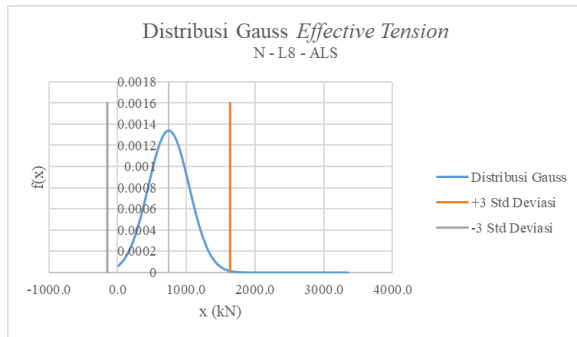
Tabel 11 Tension pada gelombang acak kondisi full load - damage

Deskripsi		Arah		
		NW	N	NE
Tension (kN)	L1	623	532	485
	L2	637	548	496
	L3	525	538	517
	L4	526	553	525
	L5		2222	597
	L6	1132	1510	474
	L7	623		
	L8	479	3354	990



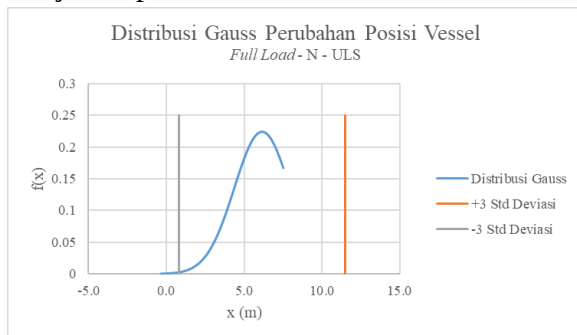
Gambar 30 Grafik tension pada gelombang acak kondisi full load -damage

Setelah mengetahui besar *tension* yang terjadi, maka dilakukan pemeriksaan sebaran nilai *tension* dengan menggunakan distribusi Gauss, yang ditunjukkan pada Gambar 31.



Gambar 31 Distribusi Gauss untuk *tension mooring line 8* – N - ALS

Selain pemeriksaan sebaran nilai *tension*, dilakukan pula pemeriksaan sebaran nilai simpangan *mooring* yang terjadi, seperti ditunjukkan pada Gambar 32.



Gambar 32 Distribusi Gauss untuk posisi vessel (*full load* - N - ALS)

Diketahui dari kedua pemeriksaan untuk kondisi *full load* - *damage* sebaran bahwa nilai +3 standar deviasi tidak melebihi nilai izin yang ditetapkan oleh standar desain.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berikut ini adalah kesimpulan yang dapat dirangkum dari penelitian ini.

- Nilai *effective tension* pada *catenary mooring* yang terbesar terjadi pada

mooring line 6 sebesar 4971 kN pada muatan *ballast* untuk kondisi *intact* dengan arah pembebanan *North*.

- Nilai simpangan terbesar terjadi sebesar 12.026 meter pada muatan *ballast* untuk kondisi *damage* dengan arah pembebanan *North*.
- Perancangan sistem *spread mooring* dengan 8 *mooring line* dan diameter rantai 94 mm memenuhi kriteria desain dalam faktor *tension* maupun simpangan yang terjadi.

2. Saran

Saran yang dapat diberikan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini dirangkum sebagai berikut.

- Melakukan pemodelan sesuai dengan standar desain API-RP-2SK, yaitu 10,800 sekon atau 3 jam, dengan tujuan memperoleh hasil pemodelan yang lebih representatif.
- Melakukan pemodelan untuk ke 8 arah mata angin, agar kemungkinan kejadian dengan faktor pembebanan dari seluruh arah dapat dianalisa secara lengkap, sehingga hasil analisa akan lebih representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Andersson, E. (2018). *Application of the open source code Nemoh for modelling of added mass and damping in ship motion simulations*. Stockholm.
- Babicz, J. (2015). *Wärtsilä encyclopedia of ship technology*. Helsinki: Wärtsilä Corporation.
- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of offshore engineering*. Amsterdam: Elsevier.

- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Singapore: World Scientific.
- Gaythwaite, J. W. (2014). *Mooring of ships to piers and wharves*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Goda, Y. (2010). *Random seas and design of maritime structures*. Hackensack, NJ: World Scientific.
- Ma, K.-T., Luo, Y., Kwan, C.-T. T., & Wu, Y. (2019). *Mooring system engineering for offshore structures*. Cambridge, MA: Gulf Professional Publishing, an imprint of Elsevier.
- Mooring equipment guidelines: (MEG3)*. (2008). Livingston: Witherby Seamanship International.
- Metocean Survey at West Natuna Sea Area* (Rep. No. CS70-10233). (2002).