

ANALISIS SISTEM MOORING PIPE LAYING BARGE PADA PENGGANTIAN SECTION PIPA BAWAH LAUT

Andini Putri Dwi Lestari

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesa no. 10, Bandung 40132

Email: andiniputridl@gmail.com

Kata kunci: sistem mooring, respon gerak, gaya tarik, struktur terapung, Response Amplitude Operator (RAO)

PENDAHULUAN

Di abad 21 ini kebutuhan manusia akan konsumsi energi semakin meningkat terutama minyak dan gas bumi. Dalam kegiatan eksploitasi minyak dan gas bumi dibangunlah suatu struktur lepas pantai yang umumnya di Indonesia berupa tipe *jacket*. Dari lepas pantai, hasil minyak dan gas bumi disalurkan ke darat melalui pipa bawah laut. Struktur terapung pun dibutuhkan dalam proses instalasi suatu struktur lepas pantai maupun pipa bawah laut.

Pada tahun 2009, melalui *In-Line Inspection* (ILI) ditemukan kerusakan pada pipa di jalur pipa KLA-LPRO 3Phase berupa *dent* serta *metal loss* di KP 1.2 dan KP 16.0-17.0 sehingga perlu dilakukan perbaikan pada pipa bawah laut di lokasi tersebut. Dalam kegiatan perbaikan pipa tersebut digunakan sebuah *pipe laying barge* yang beroperasi dengan dilengkapi sistem *mooring* atau sistem tambat untuk dapat membatasi pergerakan akibat terkena gangguan gaya luar baik gelombang, arus maupun angin serta untuk mempertahankan posisinya. Dengan adanya sistem *mooring* tersebut sebuah struktur

terapung dapat melaksanakan kegiatan di laut dengan lebih stabil.

Maka dari itu dalam Tugas Akhir ini, dilakukan analisis sistem *mooring* pada *pipe laying barge* saat kegiatan penggantian *section* pipa bawah laut dengan pedoman yang digunakan yaitu API RP 2SK.

Tujuan dari penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kestabilan *pipe laying barge*
2. Menganalisis respon gerak *pipe laying barge* saat kegiatan penggantian *section* pipa
3. Menganalisis gaya tarik efektif tali *mooring pipe laying barge* saat kegiatan penggantian *section* pipa

Ruang lingkup dalam Tugas Akhir ini adalah melakukan pemodelan sistem *mooring* pada *pipe laying barge* saat kegiatan penggantian *section* pipa bawah laut. Pemodelan yang dilakukan antara lain pemodelan *pipe laying barge* dengan tetap mempertahankan dimensi sebenarnya, serta pemodelan sistem *mooring* yang ditambahkan. Pemodelan sistem *mooring*

pada *barge* dilakukan pada dua kedalaman perairan yang berbeda dengan dua kondisi gelombang yaitu gelombang reguler dan gelombang irreguler. Analisis pada sistem *mooring* dilakukan pada dua kondisi, kondisi *intact* yaitu kondisi seluruh tali *mooring* terpasang dan kondisi *damaged* yaitu kondisi dimana salah satu dari delapan tali *mooring* putus. Analisis yang dilakukan mencakup respon perpindahan *pipe laying barge* dan gaya tarik pada tali *mooring* dengan nilai batas yang diizinkan berdasarkan pedoman API RP 2SK.

TEORI DAN METODOLOGI

Sebuah struktur lepas pantai yang terkena gelombang akan memberikan respon gerakan yang dapat dianalisa berdasarkan sudut pandang hidrodinamika. Faltinsen, 1990 menyatakan bahwa total gaya hidrodinamika yang bekerja pada struktur terapung merupakan resultan dari gaya apung dan gaya luar. Gaya luar terdiri dari gaya eksitasi dan gaya radiasi. Sehingga persamaan gerak struktur terapung dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$F_{Wj} + F_{Rj} + F_{Hsj} = M\ddot{X} \quad (1)$$

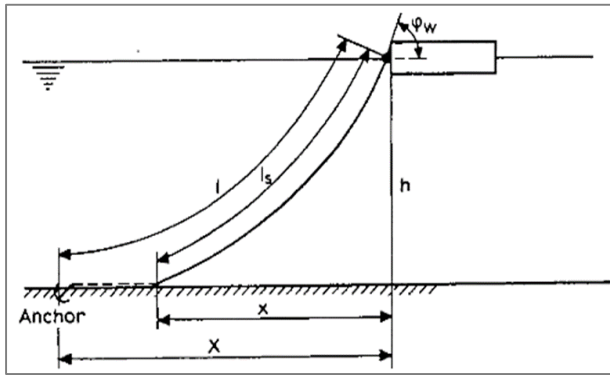
Dengan menjabarkan gaya radiasi yang terdiri dari koefisien *added mass* dan koefisien *damping*, maka persamaan (1) dapat ditulis menjadi:

$$\sum_{k=1}^{\theta} \{(M_{jk} + A_{jk})\ddot{X}_k + B_{jk}\dot{X}_k + C_{jk}X_k\} = F_j e^{i\omega t} \quad (2)$$

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan fungsi transfer yang digunakan untuk menentukan efek dari kondisi laut terhadap pergerakan struktur terapung, dimana pada gelombang reguler, RAO merupakan rasio dari pergerakan struktur terhadap amplitudo gelombang yang menyebabkan pergerakan. Untuk sebuah sistem yang linear, fungsi RAO merupakan sebuah fungsi pangkat dan frekuensinya akan dikalikan dengan spektrum gelombang untuk menghasilkan spektrum respon pada sebuah frekuensi, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$S_{xx}(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (3)$$

Sistem *mooring* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah *catenary mooring*. Pada sistem *catenary mooring* ini gaya tarik yang terjadi pada tali *mooring* dipengaruhi oleh berat terendam dari tali *mooring*. Selain itu berat terendam dari garis *mooring* tidak sama dengan nol sehingga *mooring* tidak memiliki garis lurus melainkan berbentuk garis melengkung (*catenary*). Ilustrasi gaya tarik yang terjadi pada tali *mooring* dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Ilustrasi Mooring

Bentuk *mooring* dapat dihitung dengan mendapatkan jarak vertikal tali *mooring* di posisi x , dinyatakan dalam persamaan;

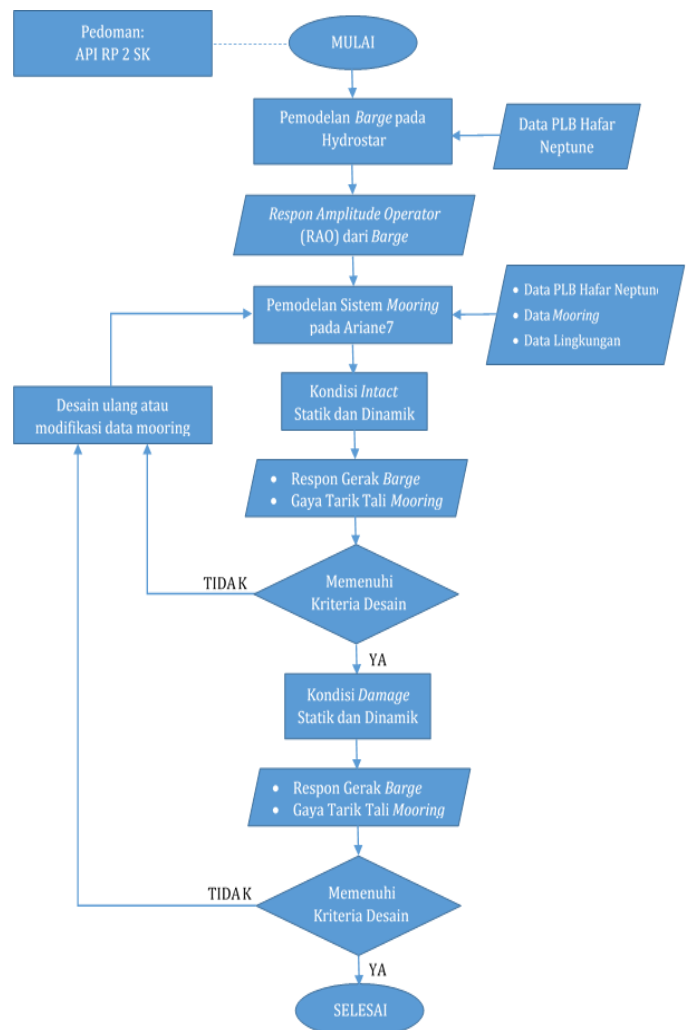
$$h = a \left[\cosh \left(\frac{x}{a} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Sedangkan gaya tarik efektif untuk x dapat dihitung dengan persamaan:

$$T = T_H \cosh \left(\frac{x}{a} \right) \quad (5)$$

Penelitian seluruhnya menggunakan pemodelan pada perangkat lunak di komputer. Pemodelan dilakukan dua tahap, tahap pertama dilakukan pemodelan *pipe laying barge* menggunakan Hydrostar untuk mendapatkan properti hidrodinamika *barge*. Tahap kedua adalah pemodelan sistem *mooring* menggunakan Ariane7 dalam kondisi statik dan dinamik. Kondisi statik dilakukan untuk mendapatkan kondisi *equilibrium* dari *barge* sebelum simulasi kondisi dinamik. Kondisi dinamik merupakan simulasi secara seri waktu dengan memperhitungkan pengaruh beban lingkungan akibat gelombang reguler dan gelombang irreguler. Hasil dari tahap kedua ini berupa gaya

tarik pada tali *mooring* dan respon dinamik dari *barge*. Apabila di tengah-tengah pemodelan didapat hasil yang melebihi nilai batas yang diizinkan tersebut maka pemodelan perlu diulang dari tahap paling awal pemodelan sistem *mooring* yaitu statik kondisi *intact* dengan mendesain atau memodifikasi data *mooring*. Dilakukan metode *trial and error* hingga seluruh pemodelan yang dilakukan memenuhi ketentuan API RP 2SK. Berikut diagram alir pengerjaan dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Dasar desain yang digunakan berupa data kapal, data *mooring*, dan lingkungan ditunjukkan pada **Tabel 1** sampai **Tabel 7** berikut ini:

Tabel 1 Data PLB Hafar Neptune

Properti	Nilai	Unit
Panjang Barge (LOA)	85.344	m
Lebar Barge (Beam)	24.384	m
Tinggi Barge (Depth)	5.4864	m
Draft	3.1	m
Displacement	6612.5	T
Jumlah Tensioner	2	-
Kapasitas Tensioner	@30	T

Tabel 2 Posisi Fairlead PLB Hafar Neptune

Nama Fairlead	X (meter)	Y (meter)	Z (meter)
P1	42.67	-9.75	5.50
S2	42.67	9.75	5.50
P3	41.92	-12.19	5.50
S4	41.92	12.19	5.50
P5	-41.92	-11.38	5.50
S6	-40.41	11.38	5.50
P7	-42.67	-9.75	5.50
S8	-42.67	12.19	5.50

Tabel 3 Data Sistem Mooring

Tipe Mooring	Steel Wire Rope
Diameter	42 mm
Length Max	1500 m
Weight per unit length in air	7.206 kg/m
Minimum Breaking Load (MBL)	127 T (1245.87 kN)

Tabel 4 Data Kedalaman Perairan

Lokasi	Kedalaman
KP 15.94	23.5 m
KP 17.05	27.5 m

Tabel 5 Data Mooring

Tali Mooring	Kedalaman Perairan	
	23.5 m	27.5 m
P1	950	750
P3	750	600
P5	640	500
P7	750	500
S2	750	500
S4	650	500
S6	600	500
S8	600	500

Berdasarkan API RP 2SK dalam memodelkan kondisi instalasi digunakan data lingkungan dengan periode ulang 1 tahun.

Tabel 6 Data Gelombang

Deskripsi	1 Tahun
Tinggi Gelombang Signifikan	1.8 m
Periode Gelombang Signifikan	6.3 s
Tinggi Gelombang Maksimum	3.2 m
Periode Gelombang Maksimum	6.6 s

Tabel 7 Data Arus

Periode Ulang	Kecepatan Arus
1 Tahun	0.52 m/s

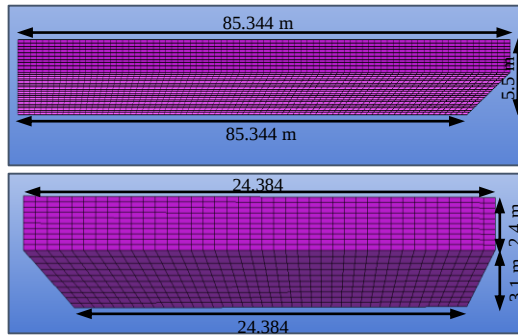
Mengacu pada pedoman API RP 2SK, maka dalam analisis ini besar gaya tarik tali *mooring* dan *vessel excursion* yang diizinkan terjadi tercantum dalam **Tabel 8** dibawah ini.

Tabel 8 Kriteria Desain

Kriteria		Allowable
Minimum Breaking Load	Intact Quasi Static	622.94 kN
	Intact Dynamic	746.03 kN
	Damaged Quasi Static	871.24 kN
	Damaged Dynamic	996.7 kN
Vessel Excursion	Min. Water Depth	2.35 m
	Max. Water Depth	2.75 m

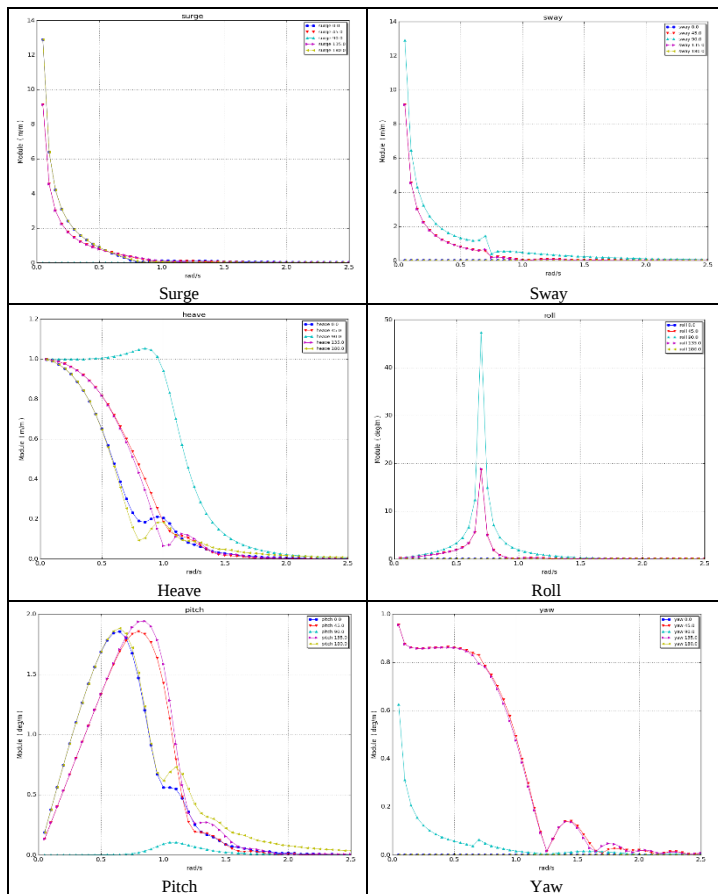
HASIL DAN ANALISIS

Pemodelan struktur *pipe laying barge* yang dilakukan pada tahap pertama ditunjukkan pada **Gambar 3**.

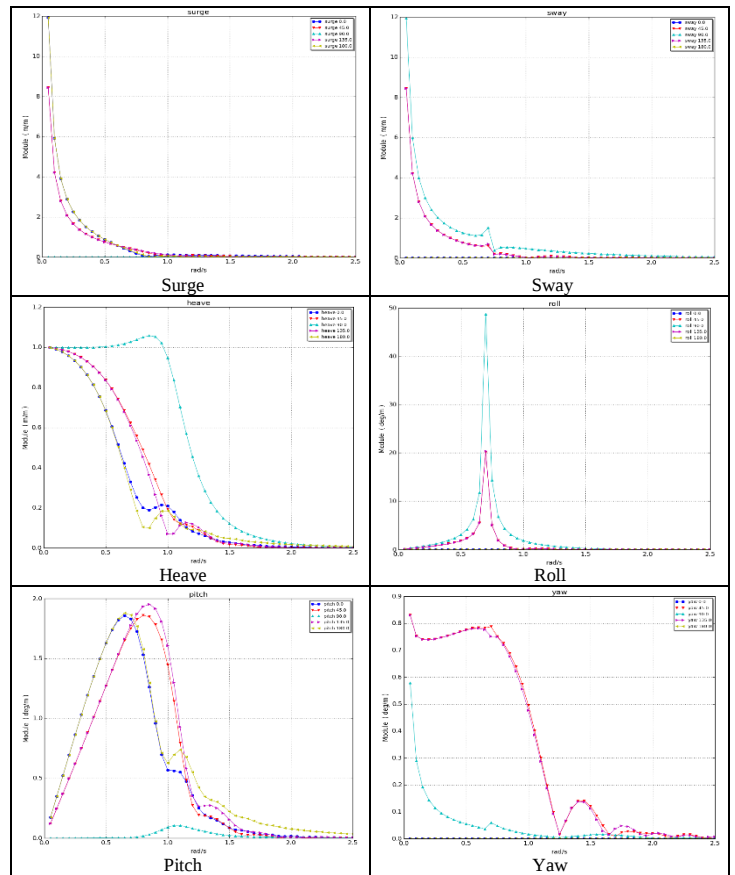


Gambar 3 Pemodelan *Pipe Laying Barge*

Didapatkan hasil properti hidrodinamika *barge* berupa RAO yang dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Gambar 5** dibawah ini.



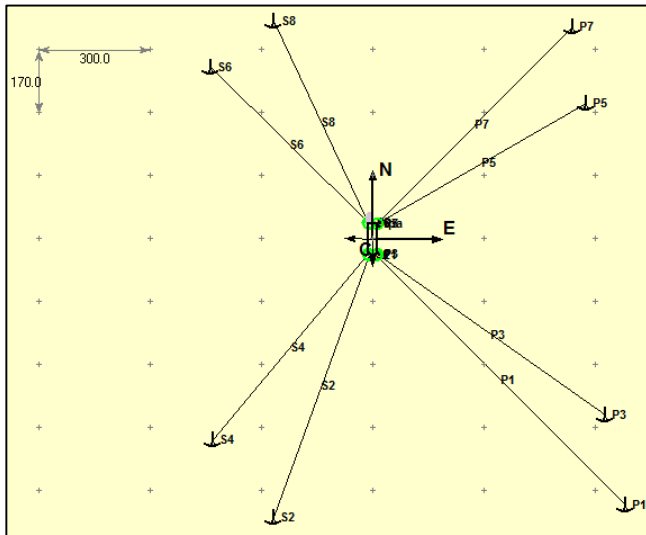
Gambar 4 RAO Kedalaman 23.5 m



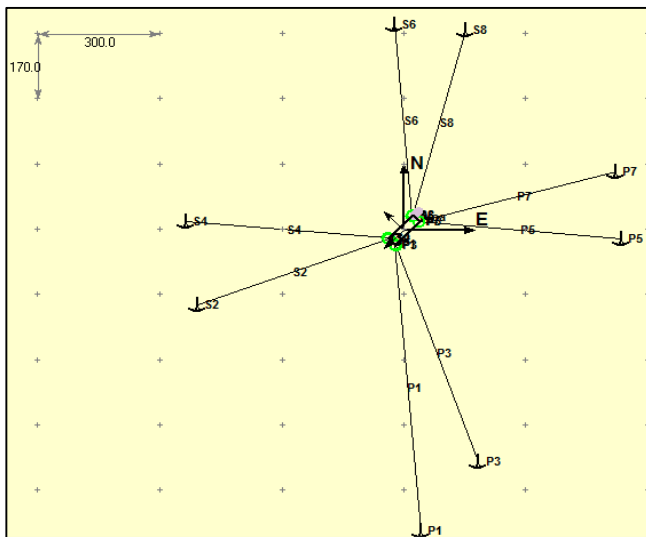
Gambar 5 RAO Kedalaman 27.5 m

Dari **Gambar 4** dan **Gambar 5** diketahui bahwa gelombang dari arah 0° dan 180° memberikan respon gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch*. Dengan respon gerakan *surge* yang dihasilkan bernilai maksimum. Gelombang dari arah 45° dan 135° memberikan respon gerakan ke seluruh arah baik itu gerakan translasi maupun rotasi. Dengan respon gerakan *pitch* dan *yaw* yang dihasilkan bernilai maksimum. Gelombang dari 90° memberikan respon gerakan *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Dengan respon gerakan *sway*, *heave*, dan *roll* yang dihasilkan bernilai maksimum.

Pada tahap kedua dilakukan pemodelan sistem *mooring* dengan konfigurasi *mooring* yang dapat dilihat pada **Gambar 6** dan **Gambar 7** berikut.



Gambar 6 Konfigurasi Mooring Kedalaman 23.5 m



Gambar 7 Konfigurasi Mooring Kedalaman 27.5 m

Dari pemodelan statik *intact* didapatkan hasil maksimum yang ditunjukkan pada **Tabel 9** berikut.

Tabel 9 Hasil Maksimum *Intact*

Kedalaman 23.5 m			
	Paid Out Length (m)	Uplift Angle (deg)	T Fairlead (kN)
S2	749.06	0	494.57
Kedalaman 27.5 m			
	Paid Out Length (m)	Uplift Angle (deg)	T Fairlead (kN)
S2	500.19	0	479.76

Simulasi dinamik dilakukan dengan memberikan gaya lingkungan dalam lima arah yaitu Utara, Barat Laut, Barat, Barat Daya, dan Selatan selama 10800 detik. Dari pemodelan dinamik kondisi *intact* akibat gelombang reguler didapatkan hasil maksimum yang dapat dilihat pada **Tabel 10** dibawah ini.

Tabel 10 Hasil Maksimum Dinamik *Intact*

Kedalaman 23.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat	0.597 m	S2	552.227 kN
Kedalaman 27.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat Laut	0.593 m	S2	596.278 kN

Pemodelan statik *damage* dilakukan dengan memutus satu tali *mooring* diantara 8 tali *mooring* yang menyebabkan gaya tarik maksimum pada tali *mooring* lainnya. Dipilihlah tali *mooring* S4 yang dilepas, dengan hasil maksimum dapat dilihat pada **Tabel 11** berikut ini.

Tabel 11 Hasil Maksimum Statik Damage

Kedalaman 23.5 m			
	Paid Out Length (m)	Uplift Angle (deg)	T Fairlead (kN)
S2	747.67	0	740.38
Kedalaman 27.5 m			
	Paid Out Length (m)	Uplift Angle (deg)	T Fairlead (kN)
S2	498.78	0	802.76

Simulasi dinamik *damage* dilakukan dalam 2 kondisi, kondisi pertama salah satu tali *mooring* putus dari awal dan kondisi kedua salah satu tali *mooring* putus saat ditengah-tengah pemodelan berlangsung. Berikut hasil maksimum dari pemodelan dinamik *damage* akibat gelombang reguler terjadi saat kondisi 2 dapat dilihat pada **Tabel 12** dibawah ini.

Tabel 12 Hasil Maksimum Dinamik Damage

Kedalaman 23.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat	1.696 m	S2	834.380 kN
Kedalaman 27.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat Laut	1.238 m	S2	928.056 kN

Dari pemodelan dinamik kondisi *intact* akibat gelombang irreguler dengan spektrum JONSWAP didapatkan hasil maksimum yang dapat dilihat pada **Tabel 13** berikut ini.

Tabel 13 Hasil Maksimum Dinamik Intact Acak

Kedalaman 23.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat	0.962 m	S2	553.896 kN
Kedalaman 27.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat Laut	1.027 m	S2	605.521 kN

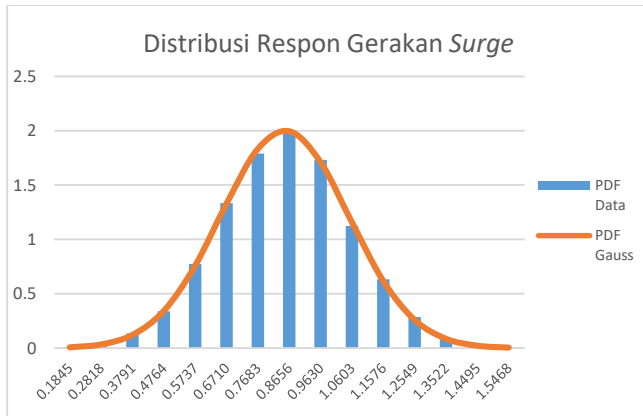
Berikut hasil maksimum dari pemodelan dinamik *damage* akibat gelombang irreguler terjadi saat kondisi 1 untuk gaya tarik dan kondisi 2 untuk *vessel excursion* ditunjukkan pada **Tabel 14**.

Tabel 14 Hasil Maksimum Dinamik Damage Acak

Kedalaman 23.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat	1.574 m	S2	810.622 kN
Kedalaman 27.5 m			
Arah	Vessel Excursion	Mooring Line	Max Tension
Barat Laut	1.307 m	S2	951.97 kN

Setiap simulasi dinamik, pada kedalaman 23.5 m nilai maksimum didapat ketika gelombang datang dari arah Barat dan dipengaruhi dengan arus yang juga menuju ke Timur sehingga gaya lingkungan yang diterima semakin besar. Sedangkan pada kedalaman 27.5 m nilai maksimum didapat ketika gelombang datang dari arah Barat Laut serta dipengaruhi oleh posisi *heading* kapal sehingga gaya lingkungan yang diterima bernilai besar.

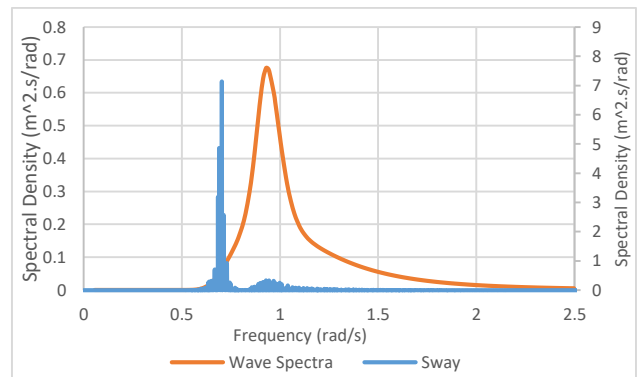
Selanjutnya ditinjau distribusi respon gerakan sway akibat gelombang irregular arah Barat Laut. Berikut perbandingan fungsi kerapatan data dengan distribusi normal Gauss teoritis dalam bentuk grafik ditunjukkan pada **Gambar 8** dibawah ini.



Gambar 8 PDF Data VS PDF Gauss

Dari **Gambar 5** diatas dapat ditinjau kecenderungan distribusi data respon gerakan sway akibat gelombang acak mengikuti distribusi normal Gauss. Oleh karena itu berlaku karakteristik distribusi normal. Dari parameter statistik yang didapat, hasil $\mu + 3\sigma$ akan memiliki nilai yang lebih kecil daripada nilai maksimum respon gerakan sway yang terjadi. Hal ini disebabkan karena pemodelan yang dilakukan berada pada rentang terjadinya tinggi gelombang maksimum. Berlaku hal yang sama untuk sebaran data seluruh respon gerakan dan gaya tarik pada tali *mooring*.

Dari data seri waktu yang diperoleh dapat dibentuk spektrum respon untuk dianalisis.



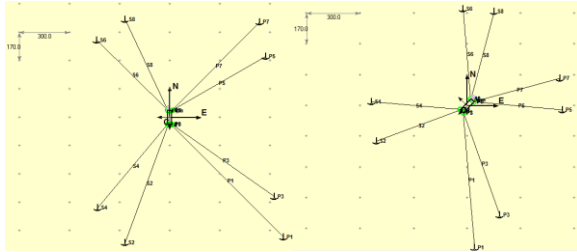
Gambar 9 Sway VS Wave Spectra

Pada gambar diatas puncak spektrum gelombang berada pada frekuensi 0.94 rad/s. Sementara untuk spektrum respon sway, terdapat 2 puncak dengan puncak spektrum tertinggi berada pada frekuensi 0.7 rad/s dan puncak spektrum tertinggi kedua berada pada frekuensi 0.94 rad/s. Frekuensi puncak spektrum tertinggi sama seperti hasil RAO sway yang frekuensi naturalnya berada pada frekuensi 0.7 rad/s. Hal ini berarti bahwa respon sway lebih besar dipengaruhi oleh frekuensi natural struktur dibandingkan dengan beban gelombang.

KESIMPULAN

1. Gelombang dari arah 0° dan 180° memberikan respon gerakan surge, heave, dan pitch. Gelombang dari arah 45° dan 135° memberikan respon gerakan ke seluruh arah baik itu gerakan translasi maupun rotasi. Gelombang dari 90° memberikan respon gerakan sway, heave, roll, pitch, dan yaw.

2. Konfigurasi *mooring* yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 10** dibawah ini:



Gambar 10 Konfigurasi *Mooring*

3. Gaya tarik maksimum statik kondisi *intact* kedalaman 23.5 m dan 27.5 m, terjadi pada S2 sebesar 494.57 kN dan 479.76 kN masih berada di bawah *allowable* MBL sebesar 622.94 kN. Sedangkan untuk statik kondisi *damage* kedalaman 23.5 m dan 27.5 m, terjadi pada S2 sebesar 740.38 kN dan 802.76 kN berada di bawah *allowable* MBL sebesar 871.24 kN.
4. Gaya tarik maksimum akibat gelombang reguler kondisi *intact* kedalaman 23.5 m dan 27.5 m, terjadi pada S2 sebesar 552.227 kN dan 596.278 kN masih berada di bawah *allowable* MBL sebesar 746.03 kN. Sementara *vessel excursion* maksimum kedalaman 23.5 m sebesar 0.597 m dan kedalaman 27.5 m sebesar 0.593 m tidak melebihi 10% dari kedalaman perairan.
5. Gaya tarik maksimum akibat gelombang reguler kondisi *damage* kedalaman 23.5 m dan 27.5, terjadi saat kondisi 2 pada S2 sebesar 834.380 kN dan 928.056 kN berada di bawah *allowable* MBL sebesar 996.7 kN. Sementara *vessel excursion* maksimum kedalaman 23.5 m sebesar 1.696 m dan kedalaman 27.5 m sebesar 1.238 m tidak melebihi 10% dari kedalaman perairan.
6. Gaya tarik maksimum akibat gelombang irreguler kondisi *intact* kedalaman 23.5 m dan 27.5 m, terjadi pada S2 sebesar 553.896 kN dan 605.521 kN berada di bawah *allowable* MBL sebesar 746.03 kN. Sementara *vessel excursion* maksimum kedalaman 23.5 m sebesar 0.962 m dan kedalaman 27.5 m sebesar 1.027 m tidak melebihi 10% dari kedalaman perairan.
7. Gaya tarik maksimum akibat gelombang irreguler kondisi *damage* kedalaman 23.5 m dan 27.5 m, terjadi saat kondisi 1 pada S2 sebesar 810.622 kN dan 951.973 kN berada di bawah *allowable* MBL sebesar 996.7 kN. Sementara *vessel excursion* maksimum kedalaman 23.5 m dan 27.5 m terjadi saat kondisi 2, sebesar 1.574 m dan 1.307 m tidak melebihi 10% dari kedalaman perairan.
8. Gaya tarik maksimum dan *vessel excursion* saat kegiatan penggantian *section* pipa pada kedalaman 23.5 dan kedalaman 27.5

m di seluruh kondisi memenuhi syarat pedoman API RP 2SK.

9. Persebaran data respon gerak dan gaya tarik akibat gelombang irreguler mendekati distribusi normal Gauss.
10. Analisis domain frekuensi menunjukkan bahwa respon gerak sway dan roll lebih besar dipengaruhi oleh natural frekuensinya. Sedangkan untuk respon gerak heave dipengaruhi oleh natural frekuensi dan beban gelombang. Dan untuk respon gaya tarik lebih besar dipengaruhi oleh beban gelombang.

SARAN

Berikut adalah hal-hal yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya:

1. Menganalisis sistem *mooring* dengan menyertakan beban angin.
2. Menganalisis sistem *mooring* dengan pemodelan instalasi pipa yang lebih merepresentasikan kondisi sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

American Petroleum Institute. 2005. *API RP 2SK: Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. Washington D.C. : American Petroleum Institute

Research Department Bureau Veritas. 2011. *Ariane 7 User Guide*. Veristar Offshore.

Research Department Bureau Veritas. 2014. *Hydrostar fo Experts User Manual*. Veristar Offshore

Dean, Robert G. dan Robert A. Dalrymple. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist*. Singapura: World Scientific

Faltinsen, O.M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structure*. Oxford: Elsevier Science & Technology

McCormick, Michael E. 2010. *Ocean Engineering Mechanics with Applications*. Cambridge: Cambridge University Press

Chakrabarti, Subrata K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Plainfield: Computational Mechanics Publications

Wahid, Grendilaxrama S. 2015. *Analisis Mooring Pipelay Barge Di 2 Posisi Tanpa Mengangkat Jangkar Pada Instalasi Pipa Bawah Laut*. Laporan Tugas Akhir Tidak Diterbitkan. Bandung: Institut Teknologi Bandung

Dharma, Wisnu Setia. 2015. *Analisis Penggantian Mooring Struktur Terapung*. Laporan Tugas Akhir Tidak Diterbitkan. Bandung: Institut Teknologi Bandung