

Analisis Dinamik Dermaga Terapung Sebagai Dasar Perancangan Dermaga Kapal Ikan pada Kawasan Jakarta Utara

Widianto

Dosen Pembimbing: Krisnaldi Idris, Ph.D

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No.10, Bandung 40132
Email: Widiantopurnomo@yahoo.com

Kata kunci: dermaga terapung, *mooring*, struktur terapung, gelombang acak, RAO

PENDAHULUAN

Dermaga berdasarkan jenis strukturnya ada beragam, salah satunya dermaga terapung (dibantu *mooring*). Untuk jenis dermaga terapung, kelebihanannya terletak pada biaya pembangunan dan instalasi yang relatif murah serta fleksibilitas karena posisinya yang dapat dipindahkan dibandingkan jenis struktur dermaga lainnya. Di sisi lain kekurangan dermaga terapung terletak pada pergerakan dermaga yang diakibatkan oleh beban yang diaplikasikan pada dermaga, sehingga penggunaannya sangat bergantung dengan kondisi lingkungan serta rencana penggunaan dermaga tersebut.

Di kawasan Jakarta Utara, dibutuhkan dermaga ikan sebagai tempat bertambat perahu-perahu ikan. Dermaga ikan memiliki dimensi yang beragam bergantung dari dimensi kapal ikan yang bertambat. Pada daerah Jakarta Utara, kapal ikan yang bertambat sebagian berukuran kecil, sehingga dermaga yang dibutuhkan dapat berukuran kecil (Gambar 1 (a)).



Gambar 1 Kapal Nelayan Kecil (a) Kawasan Jakarta Utara (b).

Sumber: <http://beritatrans.com/2017/03/11/pelabuhan-kalibaru-jakarta-utara-akan-dibangun-dengan-reklamasi/> (a)
Google Maps (b)

Jakarta Utara terletak pada bagian utara Pulau Jawa seperti pada Gambar 1 (b), sehingga tinggi gelombangnya relatif kecil dibandingkan dengan tinggi gelombang pada pantai bagian selatan Pulau Jawa. Dengan jenis kapal ikan kecil (dermaga kecil dapat digunakan), beban

lingkungan yang relatif kecil, dan adanya toleransi pergerakan dermaga (resiko relatif kecil), dicoba analisis dinamik dermaga terapung di kawasan Jakarta Utara.

Tujuan penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menentukan konfigurasi *mooring* yang dapat menjaga posisi dermaga terapung terhadap beban lingkungan.
2. Menganalisis kekuatan tali *mooring* dermaga terapung sesuai ketentuan API RP 2SK.
3. Menganalisis konfigurasi *mooring* yang memperhatikan kenyamanan pengguna dermaga ditinjau dari percepatan respons *heave*.
4. Memperkirakan *offset* maksimum respons dermaga terapung yang telah di-*mooring* akibat beban lingkungan.

Ruang lingkup penelitian ini adalah pemodelan dermaga terapung berukuran 10 x 4 x 1.6 meter secara dinamik, yang digunakan untuk tempat berlabuh kapal ikan berukuran kecil. Beban lingkungan yang diperhitungkan terdiri dari arus pasang-surut dan gelombang yang dibangkitkan oleh angin. Pemodelan *mooring* dilakukan pada kondisi gelombang reguler dan gelombang acak, gelombang operasional dan *storm*, serta kedalaman pasang dan surut. Pemodelan gelombang reguler dilakukan untuk memudahkan melihat hubungan antara gelombang dan respon gerak serta gaya tarik tali *mooring*.

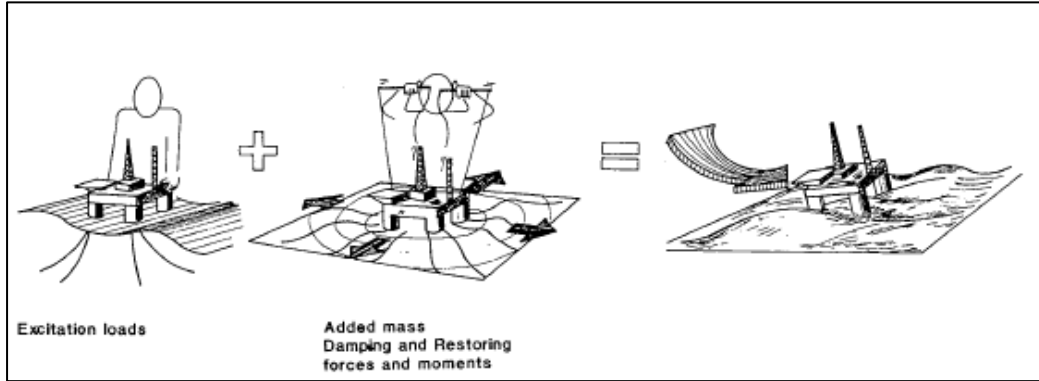
Analisis *mooring* dilakukan pada kondisi *intact* (utuh) dan kondisi *damaged* (1 tali *mooring* putus). Pada kondisi *intact* hal yang diperhatikan adalah respon percepatan *heave* dan gaya tarik tali, sedangkan pada kondisi *damaged*, hal yang diperhatikan hanya gaya tarik tali. Aturan pemodelan serta batas gaya tarik tali *mooring* maksimal mengacu pada API RP 2SK. Analisa percepatan *heave* dilakukan untuk memperhatikan kenyamanan pengguna dermaga (nelayan), agar respon dermaga tidak menyebabkan mabuk laut.

TEORI DAN METODOLOGI

Data kecepatan arus didapatkan menggunakan bantuan perangkat lunak Delft3D-Flow. Dengan perangkat lunak tersebut, dimodelkan arus yang terjadi akibat adanya pergerakan massa air akibat perbedaan elevasi pasang surut pada lokasi yang berbeda. Data pasang-surut pada perangkat lunak dibandingkan dengan data pasang-surut Dishidros di daerah yang sama untuk memverifikasi pemodelan.

Data gelombang didapatkan dengan melakukan peramalan gelombang di laut dalam akibat angin (*hindcasting*) sesuai metode *Shore Protection Manual*, 1984. Gelombang hasil peramalan tersebut kemudian ditransmisikan ke perairan dangkal lokasi dermaga terapung menggunakan bantuan perangkat lunak Delft3D-Wave.

Menurut Faltinsen, 1990, total gaya hidrodinamika yang bekerja pada struktur terapung merupakan resultan dari gaya apung dan gaya luar seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Superposisi Beban Eksitasi dan Beban Radiasi. Sumber: Faltinsen, 1990.

Gaya luar yang mempengaruhi respons struktur terapung akibat gelombang merupakan superposisi dari gaya eksitasi dan gaya radiasi. Persamaan gerak struktur terapung dapat dibentuk menjadi:

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

dimana:

F_{Wj} = Gaya eksitasi arah j

F_{Rj} = Gaya radiasi arah j

F_{Hsj} = Gaya apung arah j

m = Massa struktur terapung

$\ddot{X}_j$ = Percepatan struktur terapung arah j

Dengan memasukkan *added mass* dan *damping* pada Persamaan 1, masing-masing komponen gaya didapatkan persamaan berikut.

$$\sum_{k=1}^6 \{(m + A_{jk})\ddot{X}_k + B_{jk}\dot{X}_k + C_{jk}X_k\} = F_{wj}e^{i\omega t} \quad (2)$$

dengan:

A_{kj} = Koefisien *addedmass* pada derajat kebebasan k akibat beban dari arah j

B_{kj} = Koefisien *damping* pada derajat kebebasan k akibat beban dari arah j

C_{jk} = Koefisien kekakuan pada derajat kebebasan k akibat beban dari arah j

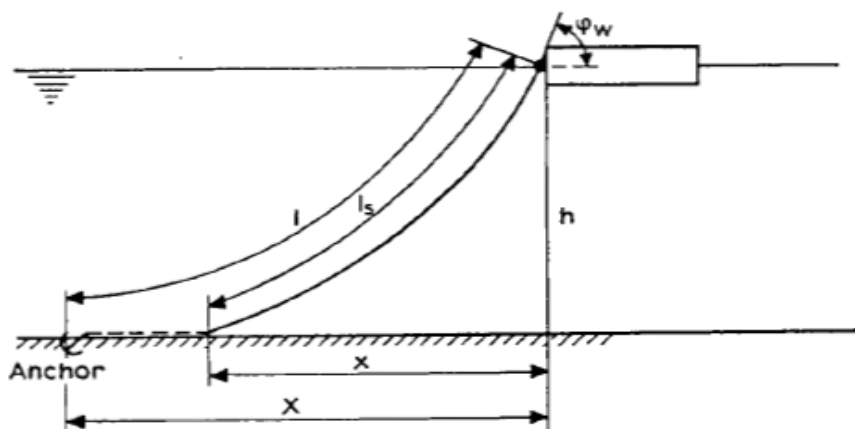
ω = Kecepatan sudut gelombang

Besarnya respon pergerakan struktur terapung akibat gelombang dapat dihitung menggunakan *Response Amplitude Operator* (RAO). RAO adalah fungsi transfer yang digunakan untuk menentukan amplitudo dan beda fasa dari respons struktur akibat beban lingkungan yang merupakan fungsi dari frekuensi gelombang. Nilai RAO berbeda untuk struktur terapung yang berbeda, dan pada tiap struktur terapung nilai amplitudo tersebut juga akan bervariasi terhadap *draft* struktur terapung, arah gelombang, kecepatan maju, periode atau frekuensi gelombang. Untuk sebuah sistem yang linear, fungsi RAO yang dikalikan dengan spektrum gelombang akan menghasilkan spektrum respon pada suatu frekuensi, sehingga dapat ditulis dengan persamaan berikut.

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

Pada penelitian ini, nilai RAO didapatkan dengan bantuan perangkat lunak Hydrostar, Bureau Veritas.

Mooring adalah suatu usaha untuk menjaga posisi struktur terapung atas beban lingkungan dan beban-beban lainnya menggunakan bantuan *mooring line* dan jangkar. Struktur yang hendak bergerak akibat beban lingkungan menyalurkan beban tersebut pada *mooring line* yang kemudian menyalurkan beban struktur pada jangkar yang tertanam pada dasar laut. Pada Penelitian ini, jenis *mooring* yang digunakan adalah *spread mooring*. *Mooring* dapat dibedakan menjadi 3 berdasarkan ketegangan talinya, urut dari yang paling tegang dan paling kendur, yaitu *taut*, *semi-taut*, dan *catenary*. Ilustrasi gaya tarik tali *mooring* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Gaya Pada Elemen *Mooring Line*.
Sumber: Falinsen, 1990.

Tegangan tali *mooring* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$h = \frac{T_h}{w} \left(\cosh \left(\frac{x}{T_h} w \right) - 1 \right) \quad (4)$$

$$T = T_h \cosh \left(\frac{x}{T_h} w \right) \quad (5)$$

$$X = l - h \left(1 + 2 \frac{T_h}{wh} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{T_h}{w} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{h}{T_h} w \right) \quad (6)$$

dimana:

h = Jarak vertikal

T = Gaya tarik aksial

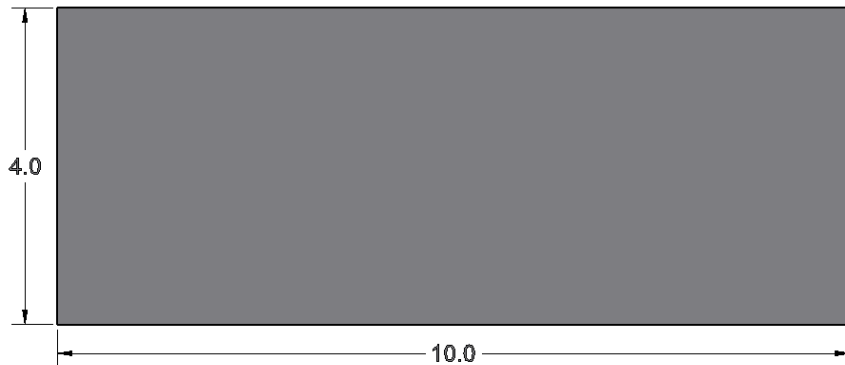
T_h = Gaya tarik komponen horizontal

w = Berat tali *mooring* dalam fluida

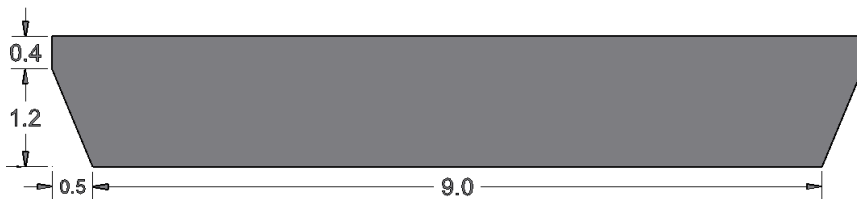
Perhitungan respon dermaga dan gaya tarik tali *mooring* dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *mooring* dinamik.

Kedalaman perairan saat surut sedalam 5 meter dan saat tunggang pasang sedalam 5.94 meter.

Layout dermaga terapung dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.

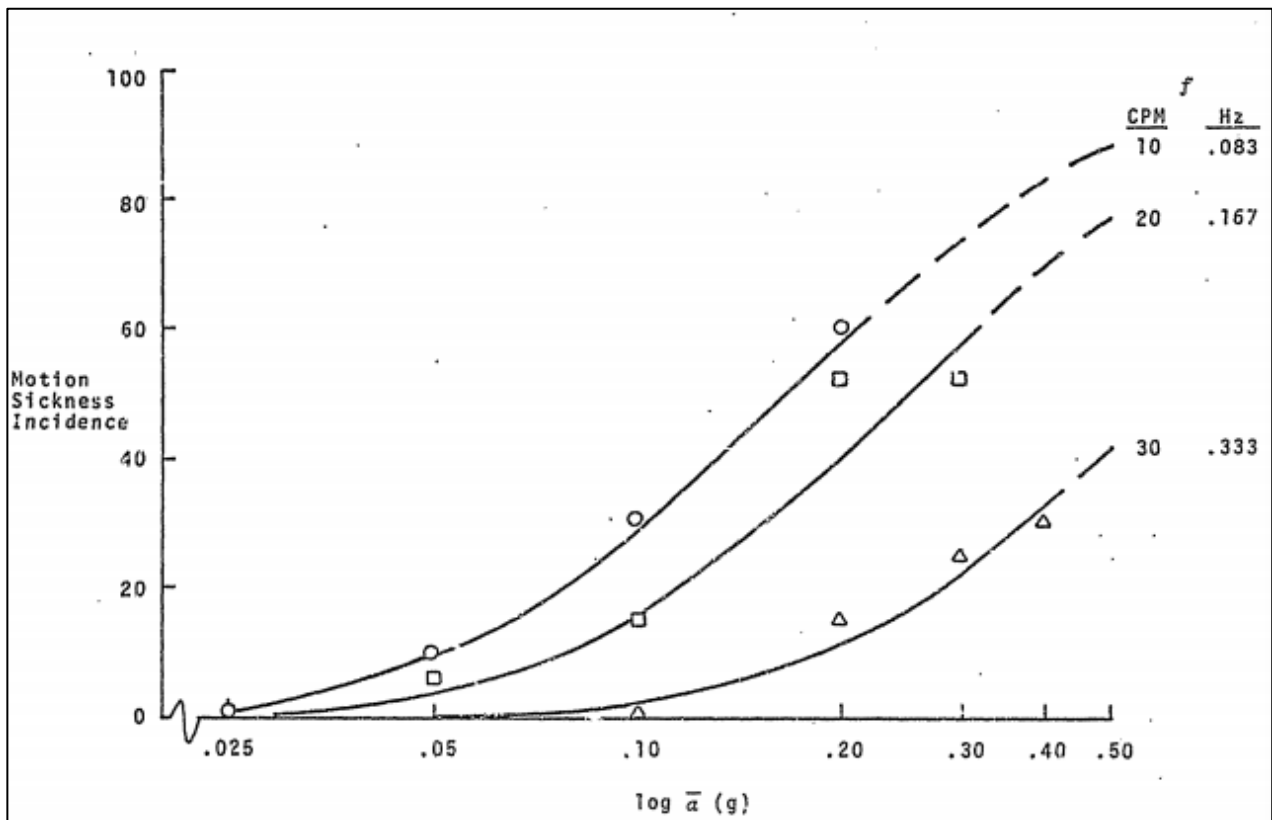


Gambar 4 Tampak Atas (Satuan Meter)



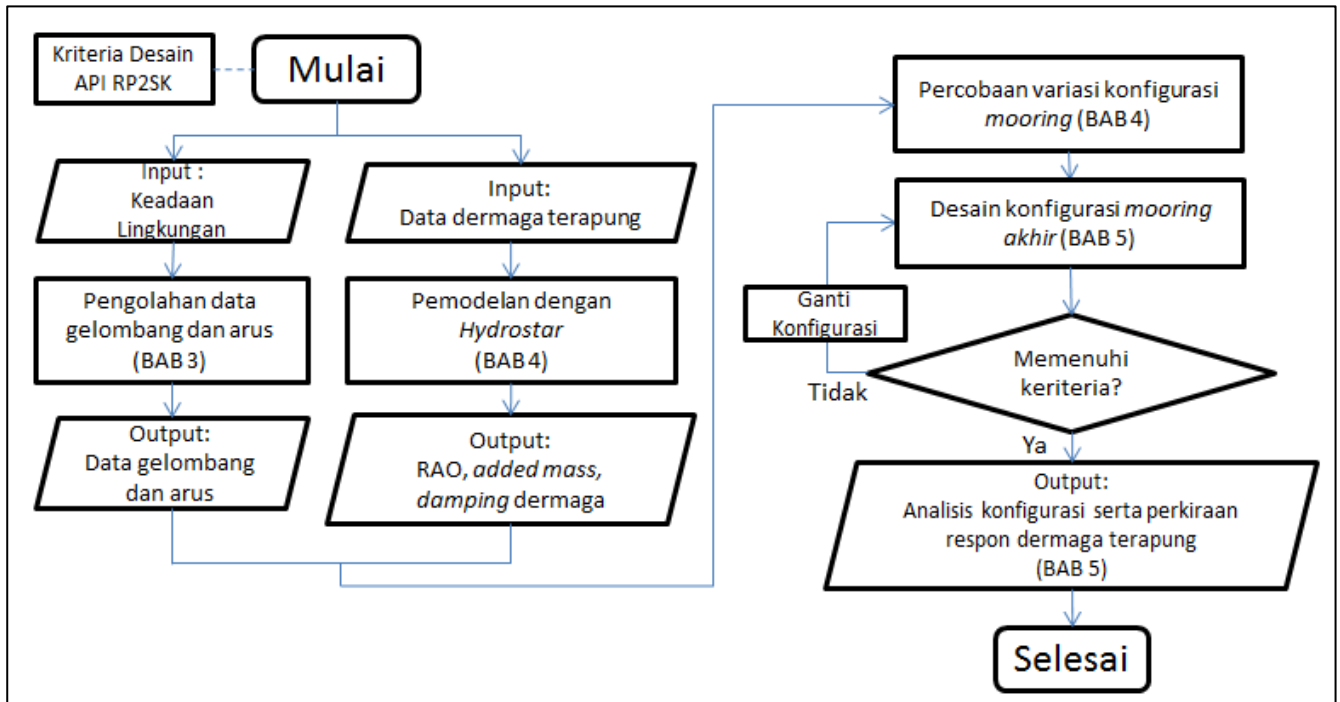
Gambar 5 Tampak Samping (Satuan Meter)

Batas gaya tarik tali *mooring* ditentukan oleh *Minimum Breaking Strength* (MBS) dimana sesuai rekomendasi API-RP-2SK gaya tarik maksimum pada kondisi *intact* sebesar 60% MBS dan pada kondisi *damaged* sebesar 80%. Acuan batas percepatan yang digunakan merupakan hasil penelitian dari Defence Research and Development Canada, 2006 dan National Technical Information Service (NTIS), 1973 yang mengemukakan bahwa pada *vessel* atau dalam kasus ini dermaga terapung, faktor dominan yang mengakibatkan mabuk laut adalah pergerakan *heave*, khususnya frekuensi dan percepatannya. Berikut Gambar 6 yang menjelaskan hubungan antara frekuensi *heave*, percepatan *heave*, dan persentase insiden mabuk laut pada subjek dari penelitian tersebut.



Gambar 6 Hubungan Frekuensi *Heave*, Percepatan *Heave*, dan Persentase Insiden Mabuk Laut.
Sumber: NTIS, 1973

Secara ringkas, diagram alir metodologi penelitian ditunjukkan pada Gambar 5:



Gambar 7 Diagram Alir Metodologi Penelitian

HASIL DAN ANALISIS

Data Lingkungan

Proses peramalan gelombang (*hindcasting*) di laut dalam dilakukan menggunakan data angin dari ECMWF selama 20 tahun. Tabel 1 menunjukkan hasil peramalan gelombang selama 20 tahun yang berupa tinggi gelombang signifikan maksimum selama 20 tahun di laut dalam. Data tinggi gelombang signifikan ini kemudian diolah menggunakan analisis ekstrim 3 metode, yaitu Metode Gumbel, Metode Normal, dan Metode Log Normal. Analisis ekstrim dilakukan untuk mendapatkan tinggi gelombang signifikan dengan periode ulang 2 dan 50 tahun (sesuai rekomendasi Carl. A. Thoresen, 2003). Dari Tabel 1 didapatkan metode analisis ekstrim yang memiliki error terkecil adalah Metode Normal sebesar 2.38%. Selanjutnya, tinggi gelombang signifikan dengan periode ulang 2 dan 50 tahun tersebut ditransmisikan ke laut dangkal menggunakan bantuan perangkat lunak Delft3D-Wave.

Tabel 1 Tinggi Gelombang Signifikan Maksimum 20 Tahun

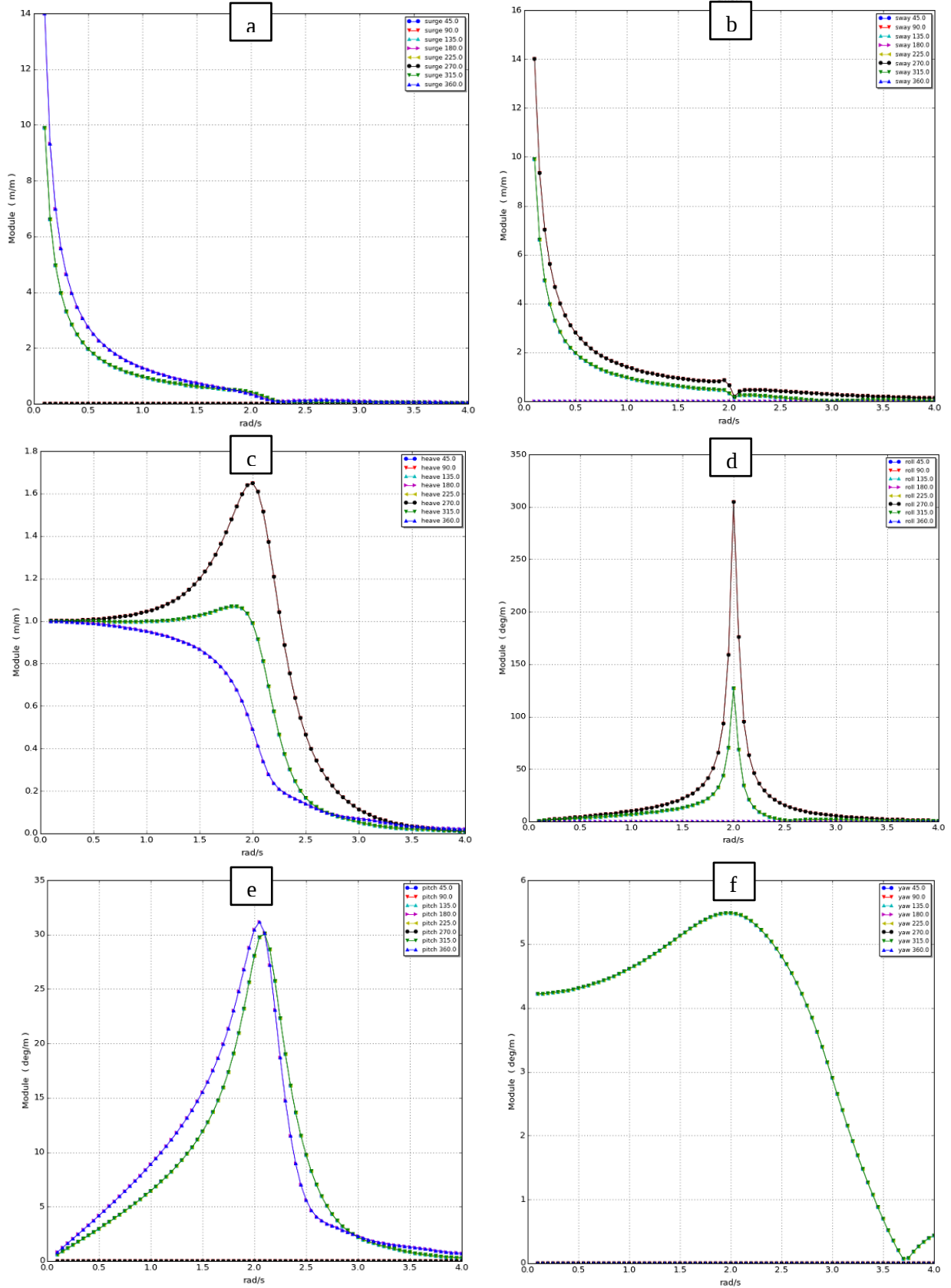
Plot Position	Tinggi Gelombang (m)						
	Aktual	Gumbel	Error Gumbel	Normal	Error Normal	Log Normal	Error Log Normal
0.05	2.63	2.77	5.37	2.64	0.35	2.73	3.93
0.10	2.94	2.90	1.09	2.85	2.91	2.90	1.41
0.14	2.98	3.00	0.87	3.00	0.57	3.01	1.11
0.19	3.06	3.09	1.13	3.11	1.82	3.11	1.73
0.24	3.09	3.17	2.61	3.21	3.99	3.19	3.46
0.29	3.10	3.24	4.47	3.30	6.36	3.27	5.49
0.33	3.16	3.31	4.65	3.38	6.86	3.34	5.76
0.38	3.33	3.38	1.48	3.45	3.81	3.41	2.60
0.43	3.62	3.45	4.71	3.53	2.44	3.48	3.68
0.48	3.67	3.52	4.10	3.60	1.82	3.55	3.12
0.52	3.68	3.59	2.47	3.67	0.24	3.62	1.57
0.57	3.72	3.67	1.44	3.74	0.64	3.69	0.67
0.62	3.77	3.75	0.50	3.82	1.33	3.77	0.07
0.67	3.90	3.84	1.60	3.89	0.15	3.85	1.29
0.71	3.94	3.94	0.09	3.98	0.90	3.94	0.10
0.76	4.10	4.05	1.34	4.06	1.00	4.03	1.77
0.81	4.35	4.18	3.90	4.16	4.41	4.14	4.87
0.86	4.41	4.35	1.27	4.28	2.96	4.27	3.03
0.90	4.45	4.58	2.97	4.42	0.60	4.45	0.05
0.95	4.85	4.96	2.37	4.64	4.33	4.72	2.71
Rata-rata error (%)		2.42		2.38		2.42	

Hasil pemodelan transmisi gelombang dan arus adalah sebagai berikut:

- Pada kondisi operasional, $H_s = 0.8417$ m, $T_s = 9.193$ s, dan $T_p = 9.677$ s, teori gelombang yang cocok adalah Teori Stream Function orde 7.
- Pada kondisi *storm*, $H_s = 1.084$ m, $T_s = 10.61$ s, dan $T_p = 11.168$ s, teori gelombang yang cocok adalah Teori Stream Function orde 5.
- Kecepatan arus = 0.021 m/s.

Pemodelan Dermaga Terapung

Kedua, dilakukan pemodelan parameter hidrodinamik dermaga terapung, salah satunya RAO. RAO yang dihasilkan dari perangkat lunak diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8 RAO Surge (a), Sway (b), Heave (c), Roll (d), Pitch (e), dan Yaw (f)

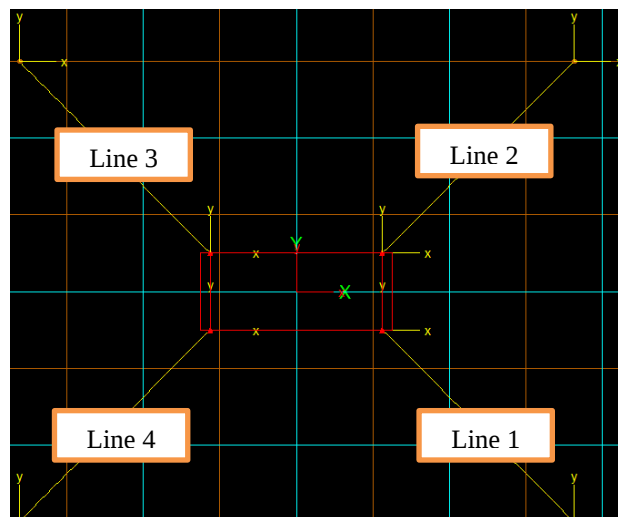
Pemodelan Dinamik Dermaga Terapung

Selanjutnya dilakukan pemodelan *mooring* dinamik. Sebelum menentukan konfigurasi, pertama dilakukan iterasi variasi konfigurasi *mooring* yang akan digunakan sebagai dasar penentuan konfigurasi akhir. Tahap iterasi yang dilakukan disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Langkah Iterasi Variasi Konfigurasi

Tahap	Kategori	Variabel	Keterangan
1	Jenis <i>Mooring</i>	Catenary	Posisi jangkar sama, panjang bentangan rantai divariasikan
		Taut	
		Semi-taut	
2	Diameter Bar Rantai (D)	D = 1.4 cm (hasil tahap sebelumnya)	
		D = 0.7 cm	
3	<i>Sinker/Clump</i> (Pemberat)	Tanpa (hasil tahap sebelumnya)	
		<i>Clump</i> posisi A	Posisi <i>clump</i> pada 2.5m bentangan rantai
		<i>Clump</i> posisi B	Posisi <i>clump</i> pada 6m bentangan rantai

Variasi konfigurasi tersebut diaplikasikan pada konfigurasi awal seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Tampak Atas Konfigurasi Awal.

Sumber: perangkat lunak *mooring*

Pemodelan variasi konfigurasi dilakukan terhadap gelombang *storm* ($H_s = 1.084$ m, $T_s = 10.61$ s, jenis gelombang stream function orde 7) dan arus ($V = 0.021$ m/s) dengan arah rambat 180° (dari kanan ke kiri, sejajar sumbu longitudinal dermaga). Pemodelan dilakukan dari $t = -21.22$ s (2

periode gelombang sebagai *build up*) hingga $t = 42.44$ s (4 periode gelombang). Hasil dari proses iterasi variasi konfigurasi adalah sebagai berikut.

- Jenis *mooring* yang cocok digunakan untuk dermaga terapung di perairan dangkal adalah jenis *semi-taut*, dimana jenis *semi-taut* menghasilkan gaya tarik tali maksimum terkecil.
- Pengecilan diameter bar rantai menyebabkan turunnya gaya tarik tali maksimum, namun *offset* dermaga meningkat.
- Penambahan pemberat/*sinker/clump* meningkatkan gaya tarik tali maksimum, namun *offset* dan percepatan *heave* dermaga berkurang. Posisi pemberat yang mendekati jangkar lebih optimal dalam mengurangi *offset* dan percepatan *heave* tersebut.

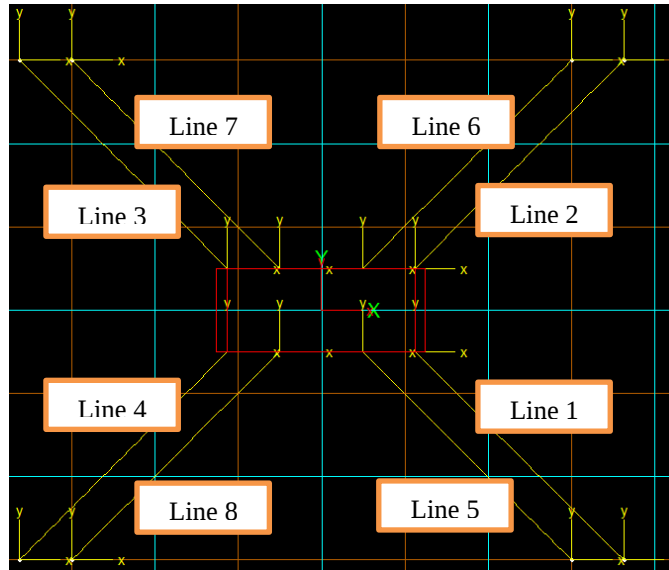
Hasil tahap akhir iterasi variasi *mooring* dapat dilihat dalam Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Iterasi Variasi Mooring

Parameter	Statik	Minimum	Maksimum	Rata-rata
Posisi X (m)	0.00	-0.41	0.40	0.05
Posisi Z (m)	-0.410	-0.95	0.13	-0.44
Gaya Tarik Line 1 (kN)	6.8	0.01	63.05	15.76
Gaya Tarik Line 4 (kN)	6.8	0.001	34.98	15.59
Percepatan (m/s^2)	-	-0.52	0.35	0.00

Dari percobaan iterasi sebelumnya didapatkan konfigurasi terbaik dengan jenis *semi-taut*, diameter bar rantai kecil, dan menggunakan pemberat yang posisinya mendekati jangkar. Namun, hasil konfigurasi terbaik dari proses iterasi memiliki percepatan *heave* maksimum sebesar $0.52 m/s^2$ (batas percepatan $0.245 m/s^2$). Oleh karena itu, perlu dirancang konfigurasi *mooring* akhir, yang dirancang menggunakan proses iterasi yang telah dilakukan sebagai dasar.

Pada konfigurasi akhir, diameter bar rantai diperbesar menjadi sebesar 1.53 cm untuk meningkatkan *Minimum Breaking Strength* (MBS) rantai menjadi 274.368 kN (R4). Pemberat yang digunakan berbahan besir cor berdimensi 55x55x40 cm dan bermassa 0.944 ton (lebih ringan dari pemberat pada proses iterasi, untuk memperkecil gaya tarik pada tali namun memperbesar *offset* dermaga dan memperbesar percepatan *heave*). Jarak antara *fairlead* dan jangkar diperjauh untuk mengurangi tegangan tarik tali pada saat kedalaman pasang, selain itu digunakan 8 tali *mooring* untuk memperkecil gaya tarik tali pada masing-masing tali. Posisi letak tali *mooring* pada konfigurasi akhir dapat dilihat pada Gambar 10.



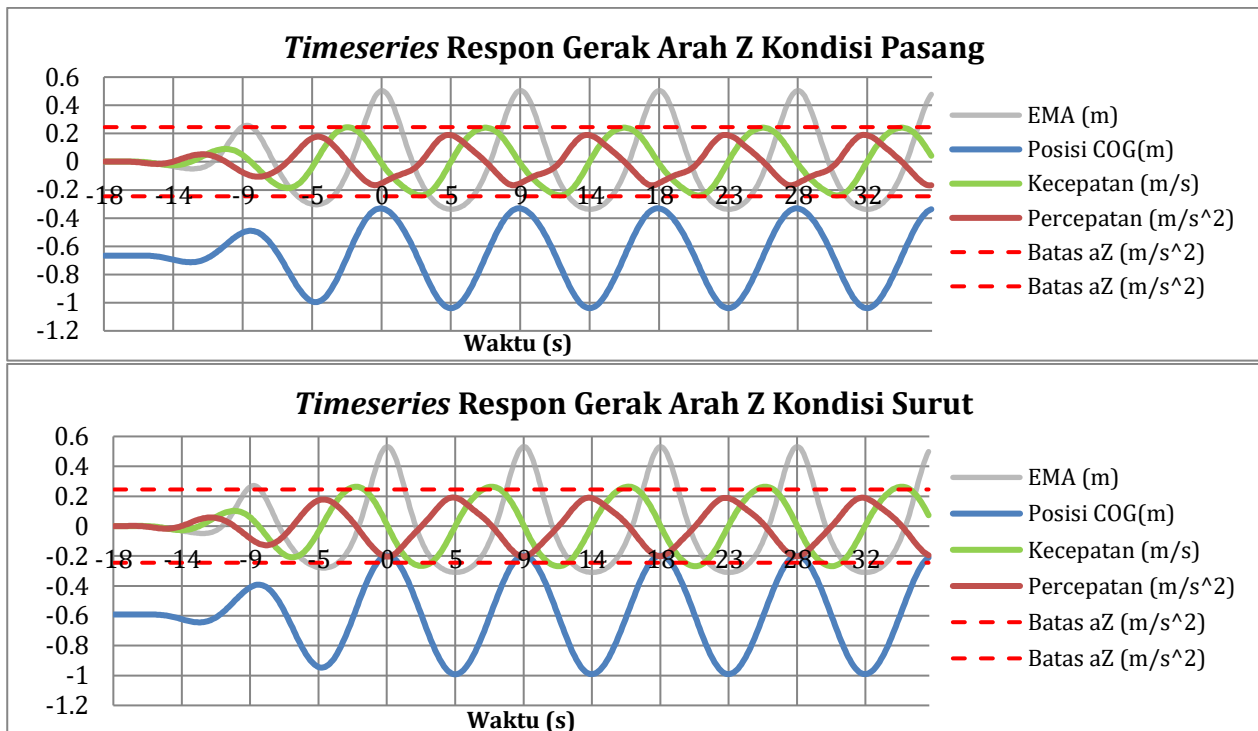
Gambar 10 Posisi Tali *Mooring* pada Konfigurasi Akhir

Konfigurasi pada Gambar 10 dimodelkan pada 12 kondisi pembebanan (*loadcase*) dengan variasi kedalaman pasang dan surut, gelombang operasional dan *storm*, serta arah beban lingkungan dari sejajar longitudinal dermaga (180^0), tegak lurus longitudinal dermaga (270^0), serta sejajar tali *mooring* (225^0).

Tabel 4 Kondisi Pembebanan (*Loadcase*)

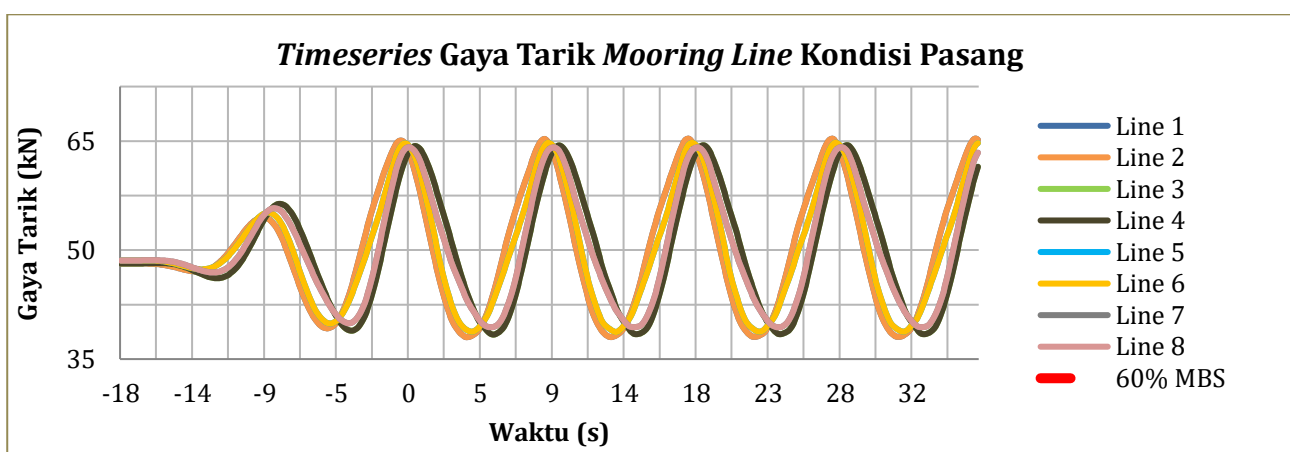
<i>Load Case</i>	Jenis Gelombang	Kondisi Kedalaman	Arah Beban Lingkungan
1	Operasional	Pasang	180^0
2	Operasional	Pasang	225^0
3	Operasional	Pasang	270^0
4	Operasional	Surut	180^0
5	Operasional	Surut	225^0
6	Operasional	Surut	270^0
7	<i>Storm</i>	Pasang	180^0
8	<i>Storm</i>	Pasang	225^0
9	<i>Storm</i>	Pasang	270^0
10	<i>Storm</i>	Surut	180^0
11	<i>Storm</i>	Surut	225^0
12	<i>Storm</i>	Surut	270^0

Seluruh 12 *loadcase* pada Tabel 4 juga dimodelkan dengan gelombang reguler dan acak dan dianalisis terpisah. Pemodelan dengan gelombang reguler dilakukan untuk melihat hubungan gelombang dan respon dermaga. Dari pemodelan 12 *loadcase* gelombang reguler, didapatkan hubungan-hubungan antara keadaan pasang dan surut.

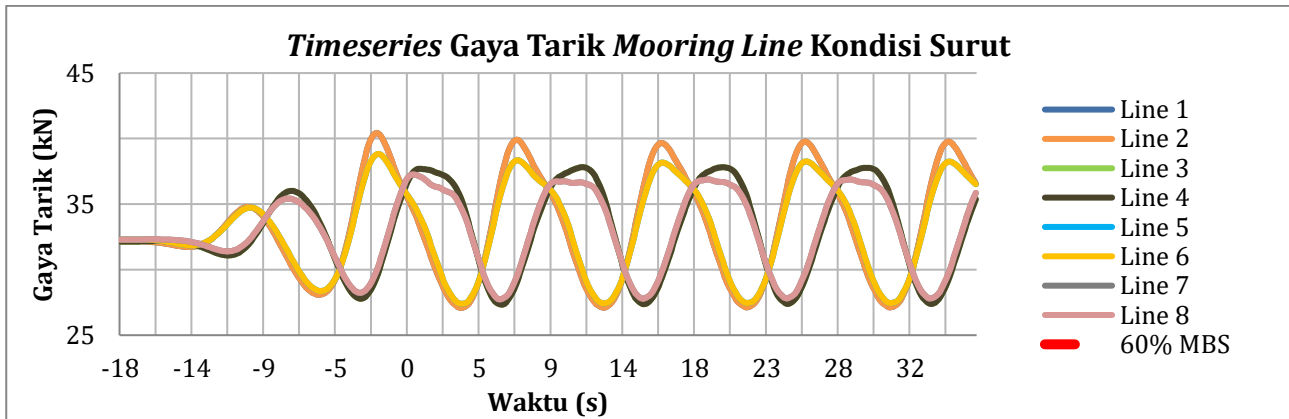


Gambar 11 Timeseries Respon Gerak Arah Z Kondisi Pasang dan Surut

Dari Gambar 11 dapat dilihat posisi COG arah Z (garis biru) saat kondisi statik ($t = 18$ s) pada kondisi pasang sebesar -0.66 m sedangkan saat surut sebesar -0.6 m. Artinya, *draft* kapal saat pasang lebih besar dari saat surut. Hal ini dikarenakan profil tali *mooring* saat pasang dan surut berbeda. Saat pasang, dermaga terapung tertarik ke bawah, seperti terlihat pada Gambar 12 dan Gambar 13, dimana gaya tarik tali pada kondisi statik saat pasang lebih besar dari gaya tarik tali saat surut.

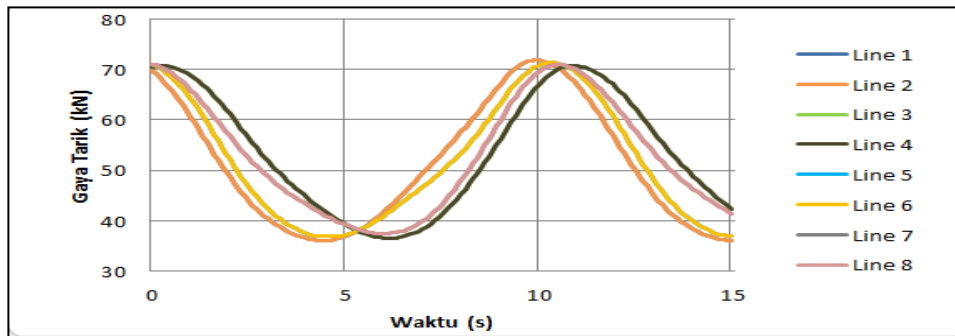


Gambar 12 Timeseries Gaya Tarik Tali Saat Pasang

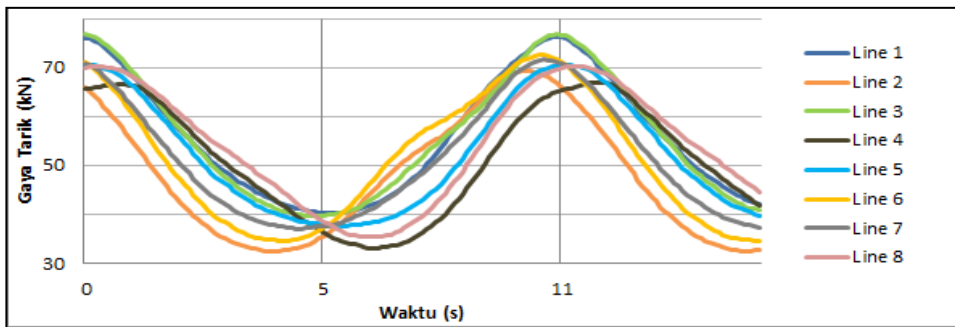


Gambar 13 Timeseries Gaya Tarik Tali Saat Surut

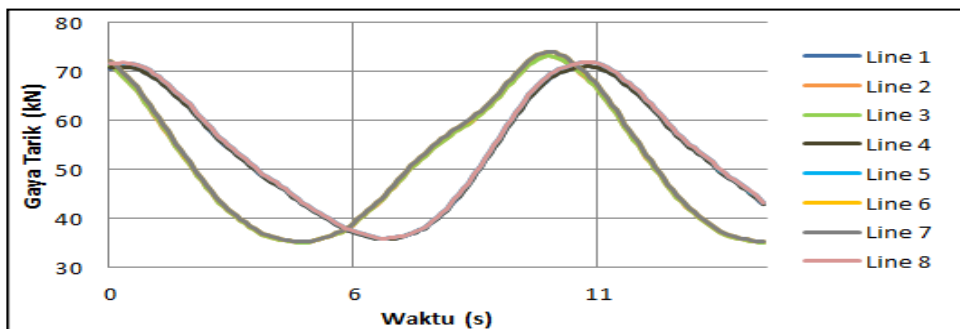
Selain pasang surut, didapatkan juga hubungan antara gaya tarik tali dan arah beban lingkungan seperti terlihat pada Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16.



Gambar 14 Timeseries Gaya Tarik Tali Beban Lingkungan 180 Derajat



Gambar 15 Timeseries Gaya Tarik Tali Beban Lingkungan 225 Derajat



Gambar 16 Timeseries Gaya Tarik Tali Beban Lingkungan 270 Derajat

Dari Gambar 14, gaya tarik tali seolah terbagi menjadi 4 kelompok. Hal ini disebabkan oleh gerak *pitch* (akibat beban gelombang 180^0) yang mengakibatkan perpindahan arah vertikal yang berbeda pada berbagai posisi *fairlead*. Selain efek *pitch*, keempat kelompok gaya tarik tali memiliki beda fasa akibat perbedaan posisi *fairlead* pada sumbu X, yaitu kelompok paling kanan (Line 1 dan 2), kanan tengah (Line 5 dan 6), kiri tengah (Line 3 dan 4), dan paling kiri (Line 7 dan 8).

Dari Gambar 15, gaya tarik tali terpisah menjadi banyak kelompok akibat beban lingkungan arah 225^0 yang mengakibatkan dermaga terapung mengalami *yaw*. Efek *yaw* ini membuat beberapa *fairlead* berpindah menjadui jangkar, dan ada juga yang mendekati jangkar.

Dari Gambar 16, gaya tarik tali seolah terbagi menjadi 2 kelompok. Hal ini disebabkan oleh posisi *fairlead* yang terbagi menjadi 2 kelompok berdasarkan sumbu Y, yaitu kelompok posisi atas (Line 2, 3, 6, dan 7) dan kelompok posisi bawah (Line 1, 4, 5, dan 8) sehingga gelombang dari arah 270^0 melewati kedua kelompok *fairlead* pada waktu yang berbeda.

Gaya tarik maksimum dan percepatan *heave* pada masing-masing *loadcase* disajikan pada Tabel 5. Percepatan *heave* maksimum terjadi pada *loadcase* 6 (gelombang operasional, kedalaman surut, dan beban lingkungan 270^0) sebesar 0.243 m/s^2 dimana nilai ini masih di bawah batas percepatan untuk periode 10.61 detik (0.094 Hz) sebesar 0.245 m/s^2 . Gaya tarik maksimum terjadi pada *loadcase* 8 tepatnya pada Line 3 sebesar 76.81 kN, dimana nilai ini masih dibawah batas 60% MBS yaitu 164.62 kN.

Tabel 5 Gaya Tarik Maksimum Tiap *Loadcase* Gelombang Reguler

Loadcase	Gaya Tarik (kN)			Percepatan (m/s^2)	
	Tali	Max	Batas	Max	Batas
1	L1 & L2	65.34	164.62	0.19	0.245
2	L3	68.49	164.62	0.197	0.245
3	L7	66.6	164.62	0.202	0.245
4	L1 & L2	40.42	164.62	0.204	0.245
5	L6	49.35	164.62	0.213	0.245
6	L7	46.83	164.62	0.243	0.245
7	L1 & L2	71.96	164.62	0.173	0.245
8	L3	76.81	164.62	0.176	0.245
9	L7	73.97	164.62	0.181	0.245
10	L1 & L2	40.76	164.62	0.191	0.245
11	L6	48.99	164.62	0.198	0.245
12	L7	45.4	164.62	0.215	0.245

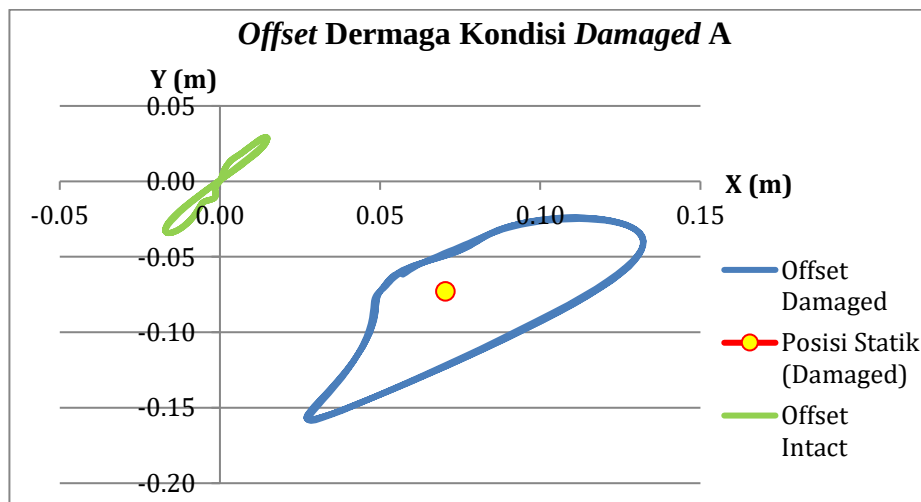
Offset maksimum merupakan respons perpindahan maksimum dermaga terapung akibat adanya beban lingkungan. Data *Offset* maksimum pada Tabel 6 dapat digunakan sebagai dasar

perancangan *gangway*/jalur akses serta penentuan *clearance* untuk dermaga terapung pada penelitian selanjutnya. Kedua *offset* maksimum (arah sumbu X dan Y global) terjadi pada kondisi kedalaman surut dan gelombang *storm*. Hal ini dikarenakan pada kondisi tersebut, dermaga terapung mengalami kedalaman perairan terdangkal, sehingga tali *mooring* berada pada kondisi terkendur yang menyebabkan dermaga terapung dapat bergerak lebih bebas.

Tabel 6 *Offset* Maksimum Gelombang Regular

Sumbu <i>Offset</i>	Panjang (m)	<i>Loadcase</i>
X	0.115	10 (Surut, <i>Storm</i> , 180°)
Y	0.183	12 (Surut, <i>Storm</i> , 270°)

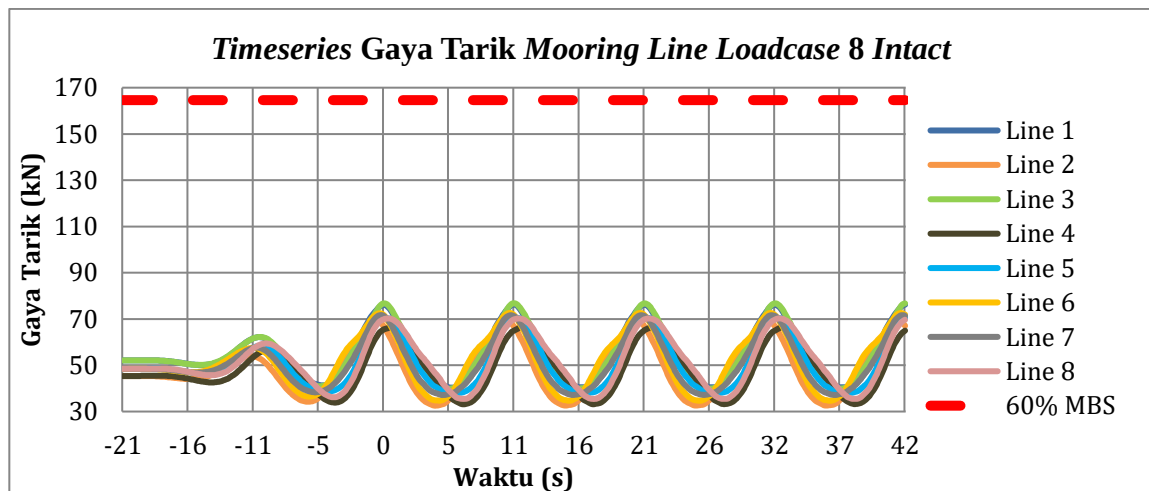
Pada kondisi *damaged*, berdasarkan tali yang putus pemodelan dibagi menjadi 2 kondisi, yaitu *damaged A* dan *damaged B*. Kondisi *damaged A* adalah kondisi ketika tali yang mengalami gaya tarik maksimum putus, kondisi *damaged B* adalah kondisi ketika tali yang putus menyebabkan gaya tarik tambahan terbesar untuk tali yang memiliki gaya tarik terbesar saat kondisi *intact*. Dari Tabel 5 gaya tarik maksimum terjadi pada *loadcase* 8 Line 3, sehingga pada kondisi *damaged A* Line 3 putus, sedangkan pada kondisi *damaged B* Line 7 putus. Berikut respon pergerakan dermaga akibat beban lingkungan *loadcase* 8 setelah Line 3 terputus (kondisi A).



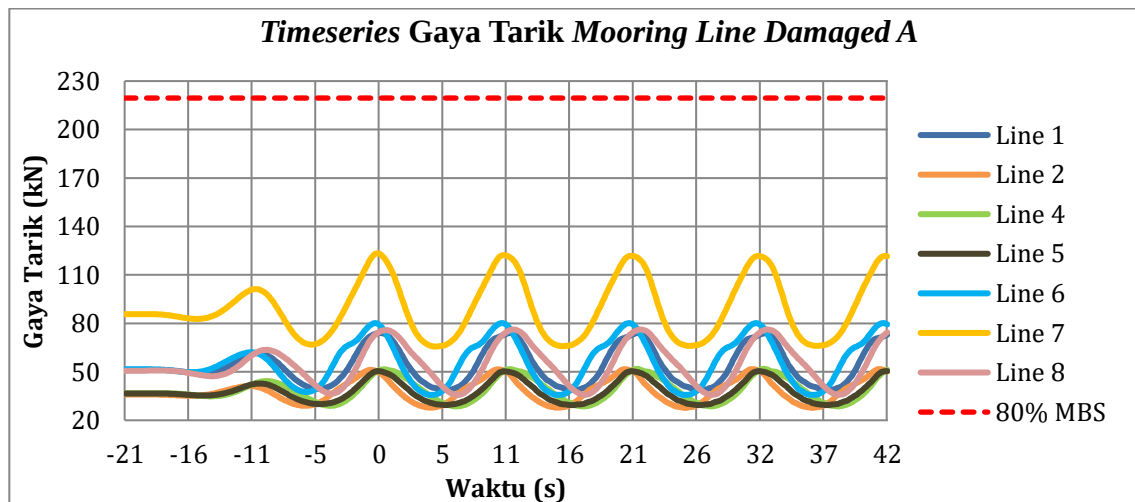
Gambar 17 Pergerakan Dermaga kondisi Damaged A

Sesuai dugaan, setelah ada tali yang putus *offset* dermaga bertambah seperti terlihat pada Gambar 17. Posisi dermaga setelah Line 3 terputus cenderung mengarah ke kanan bawah karena kekuatan menahan *mooring line* dari kiri atas (letak Line 3 dan Line 7 saat belum terputus) berkurang. Selain itu, pergerakan dermaga cenderung ke arah kanan atas dan kiri

bawah akibat beban lingkungan arah 225° . Jika dibandingkan pergerakan dermaga ke arah kanan bawah dan ke arah kanan atas, terlihat bahwa pergerakan ke arah kanan bawah lebih jauh, hal ini diduga akibat kekakuan aksial rantai kumulatif dari Line 3 dan Line 7 kini hanya ditopang Line 7. Kekakuan aksial yang mengecil ini mengakibatkan defleksi aksial rantai yang lebih besar dan mengakibatkan pergerakan ke arah kanan bawah yang lebih besar.



Gambar 18 Timeseries Gaya Tarik Kondisi Intact pada Loadcase 8

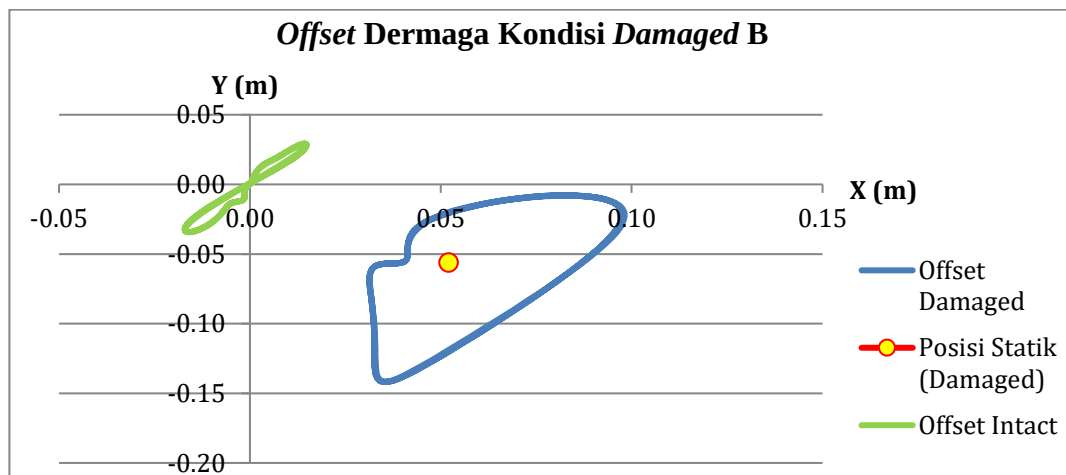


Gambar 19 Timeseries Gaya Tarik Kondisi Damaged A

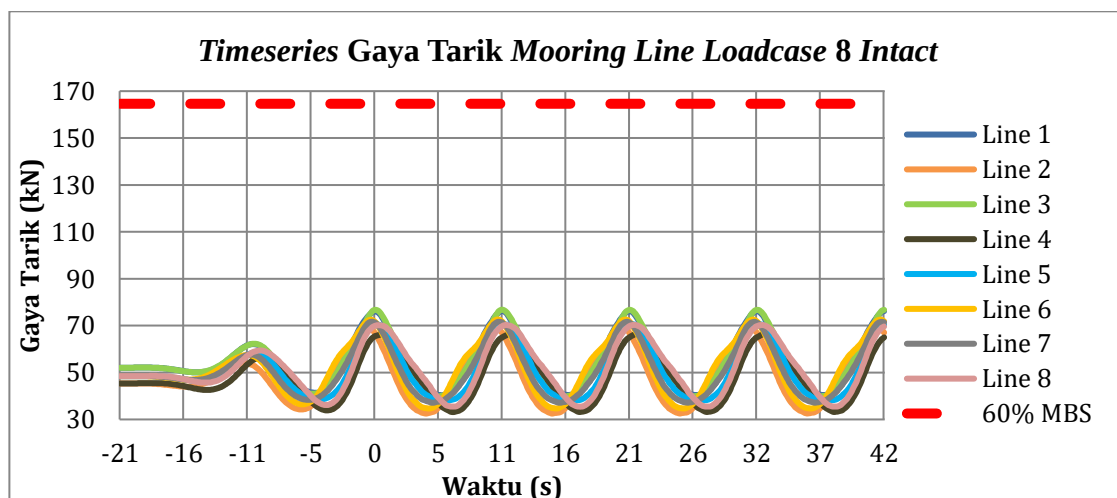
Dari Gambar 18 dan Gambar 19 diatas terlihat bahwa beban yang seharusnya dipikul Line 3 berpindah ke Line 7, beban pada Line 1 dan Line 5 berkurang. Hal ini diduga berhubungan dengan pergerakan dermaga dimana ketidakseimbangan kekakuan aksial dan beban gelombang dari arah 225° membuat Line 3 menjadi lebih tegang sedangkan disebaliknya, Line 1 dan Line 5, menjadi lebih kendur. Akibatnya gaya tarik pada Line 1 dan Line 5 berkurang. Gaya tarik maksimum kondisi *damaged A* sebesar 122.69 kN pada Line 7. Besarnya

gaya tarik maksimum ini masih berada dibawah batas 80% MBS (219.494 kN) sehingga kondisi *damaged* A dikatakan aman.

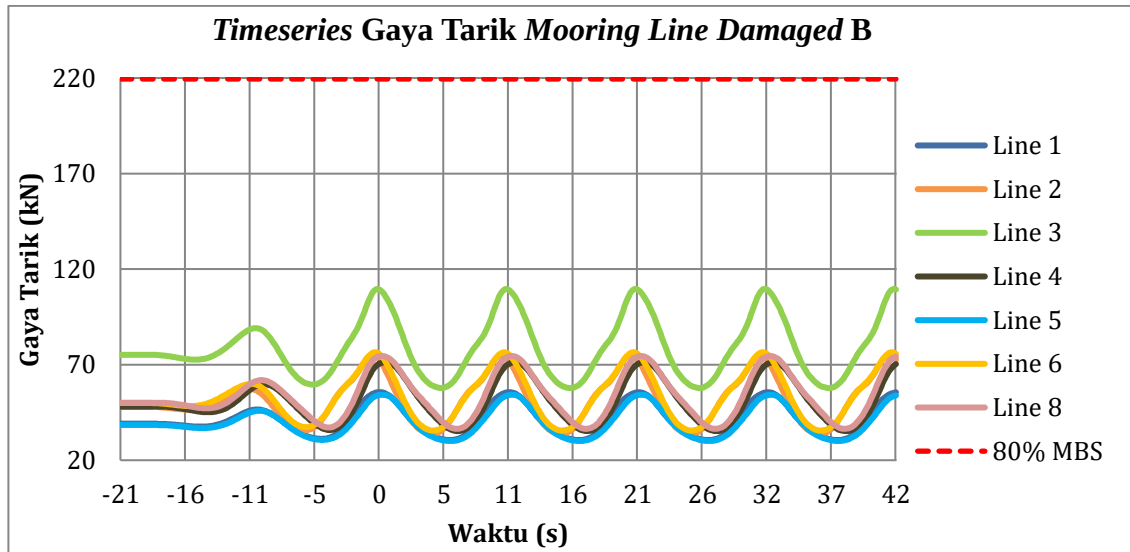
Berikut Gambar 20 respon pergerakan dermaga akibat beban lingkungan *loadcase* 8 setelah Line 7 terputus (kondisi B). Sama seperti kondisi *Damaged A*, posisi dermaga setelah Line 7 terputus cenderung mengarah ke kanan bawah karena kekuatan menahan yaitu *mooring line* dari kiri atas (letak Line 3 dan Line 7 saat belum terputus) berkurang. Selain itu, pergerakan osilasi dermaga juga lebih jauh ke arah kanan bawah daripada ke arah kiri atas, hal ini diduga akibat kekakuan aksial rantai kumulatif dari Line 3 dan Line 7 kini hanya ditopang Line 3. Kekakuan aksial yang mengecil ini mengakibatkan defleksi aksial rantai yang lebih besar dari *mooring line* di posisi lain dan mengakibatkan pergerakan ke arah kanan bawah yang lebih besar.



Gambar 20 Pergerakan Dermaga kondisi Damaged B



Gambar 21 Timeseries Gaya Tarik Kondisi Intact pada Loadcase 8



Gambar 22 Timeseries Gaya Tarik Kondisi Damaged B

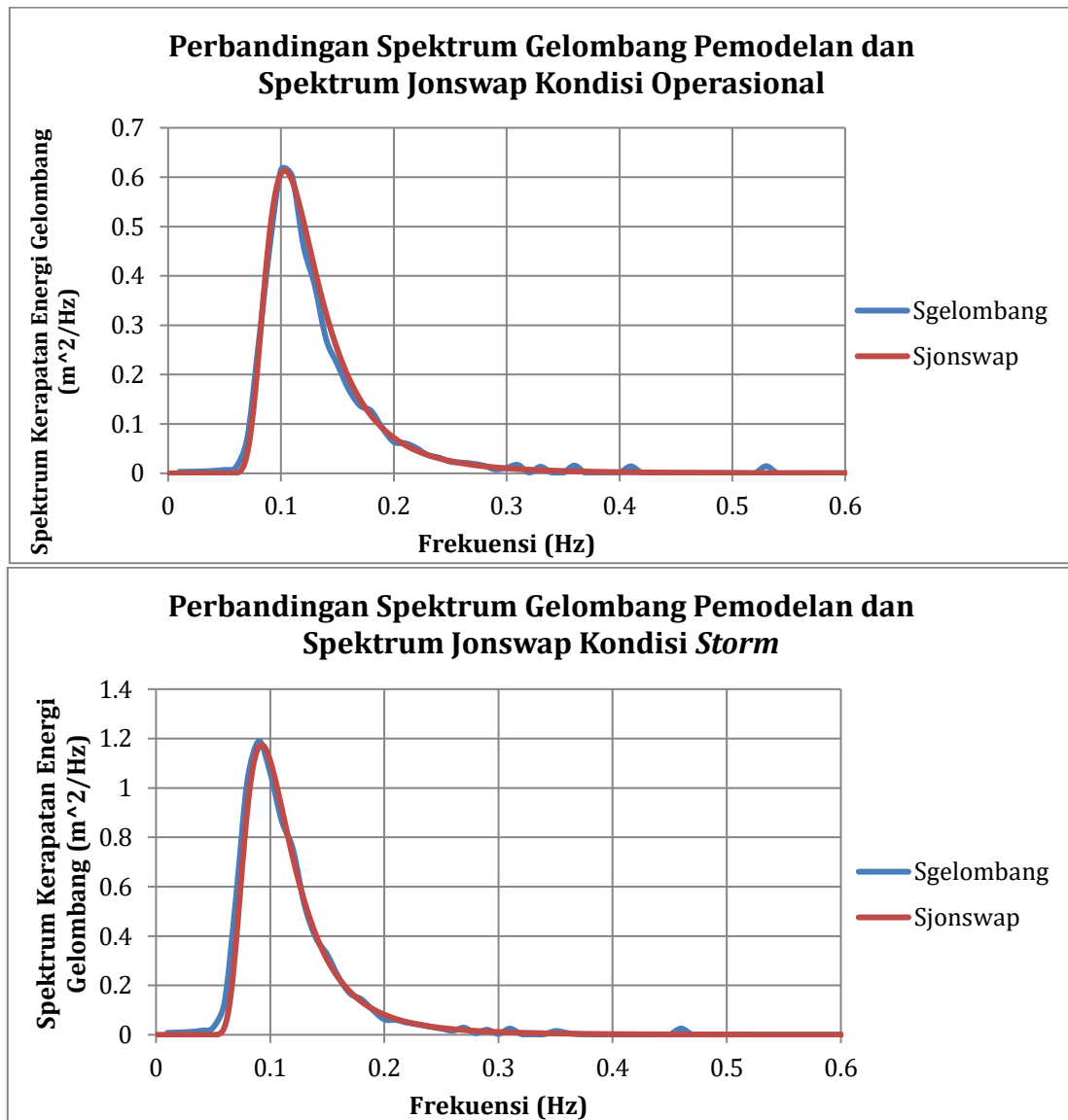
Dari Gambar 21 dan Gambar 22 diatas terlihat bahwa beban yang seharusnya dipikul Line 7 berpindah ke Line 3, beban pada Line 1 dan Line 5 berkurang. Hal ini diduga berhubungan dengan pergerakan dermaga dimana ketidakseimbangan kekakuan aksial dan beban gelombang dari arah 225° membuat Line 3 menjadi lebih tegang sedangkan disebaliknya, Line 1 dan Line 5, menjadi lebih kendur. Akibatnya gaya tarik pada Line 1 dan Line 5 berkurang.

Gaya tarik maksimum kondisi *damaged B* sebesar 109.66 kN pada Line 3 lebih kecil dari kondisi *damaged A* yaitu 122.69 kN pada Line 7. Hal ini diduga karena perbedaan lokasi antara Line 3 dan Line 7 sehingga mempengaruhi pemodelan statik dimana *offset* statik kondisi *damaged A* lebih besar dari kondisi *damaged B* yang kemudian mempengaruhi pemodelan dinamik. Besarnya gaya tarik maksimum ini masih berada dibawah batas 80% MBS (219.494 kN). Gaya tarik maksimum kondisi *damaged A* dan *B* berada dibawah batas, sehingga konfigurasi *mooring* dermaga terapung ini dapat dikatakan aman.

Spektrum gelombang yang digunakan untuk memodelkan gelombang acak adalah Spektrum Jonswap dengan *peakedness* 1 (sama dengan Spektrum Pierson-Moskovitz). Berdasarkan aturan pada DNV-OS-E301 tentang *Mooring Position*, pemodelan *mooring* dinamik dengan gelombang acak dilakukan dengan durasi pemodelan 10800 detik. Namun, untuk mengurangi beban komputasi, gelombang acak dilakukan dengan durasi 2000 detik.

Pengambilan sampel selama 2000 detik tersebut harus mengandung gelombang *worst case*, yaitu gelombang dengan tinggi puncak tertinggi, tinggi lembah terendah, kenaikan muka air tertinggi, serta penurunan muka air terendah. Spektrum kerapatan energi gelombang dari sampel waktu 2000 detik ini kemudian dibandingkan dengan spektrum kerapatan energi *input* gelombang

(Gambar 23). Dari kedua gambar tersebut, spektrum kerapatan gelombang untuk keadaan perasional dan *storm* memiliki bentuk yang hampir mirip dengan spektrum *input*-nya.



Gambar 23 Perbandingan Spektrum Gelombang Pemodelan dan Spektrum *Input* (Jonswap)

Baik *offset*, gaya tarik, dan percepatan *heave*, kondisi gelombang acak memiliki nilai maksimum yang lebih besar dari gelombang reguler. Pada pemodelan 12 *loadcase* dengan gelombang acak, respon dermaga dianalisis secara statistik. Pada analisis gaya tarik, PDF (*Probability Density Function*) data dibandingkan dengan distribusi Gauss untuk membandingkan gaya tarik maksimal pemodelan dengan gaya tarik rata-rata + 3 x St.Dev distribusi Gauss. Perbandingan gaya tarik disajikan pada Tabel 7, dimana gaya tarik tali maksimum kondisi *intact* terjadi pada gaya tarik dari pemodelan di kondisi pasang, gelombang acak *storm*, dan arah beban

lingkungan sejajar tali *mooring* (225^0) sebesar 134.37 kN pada Line 3 (dibawah batas 60% MBS yaitu 164.62kN).

Tabel 7 Gaya Tarik Pemodelan Kondisi *Intact* Gelombang Acak

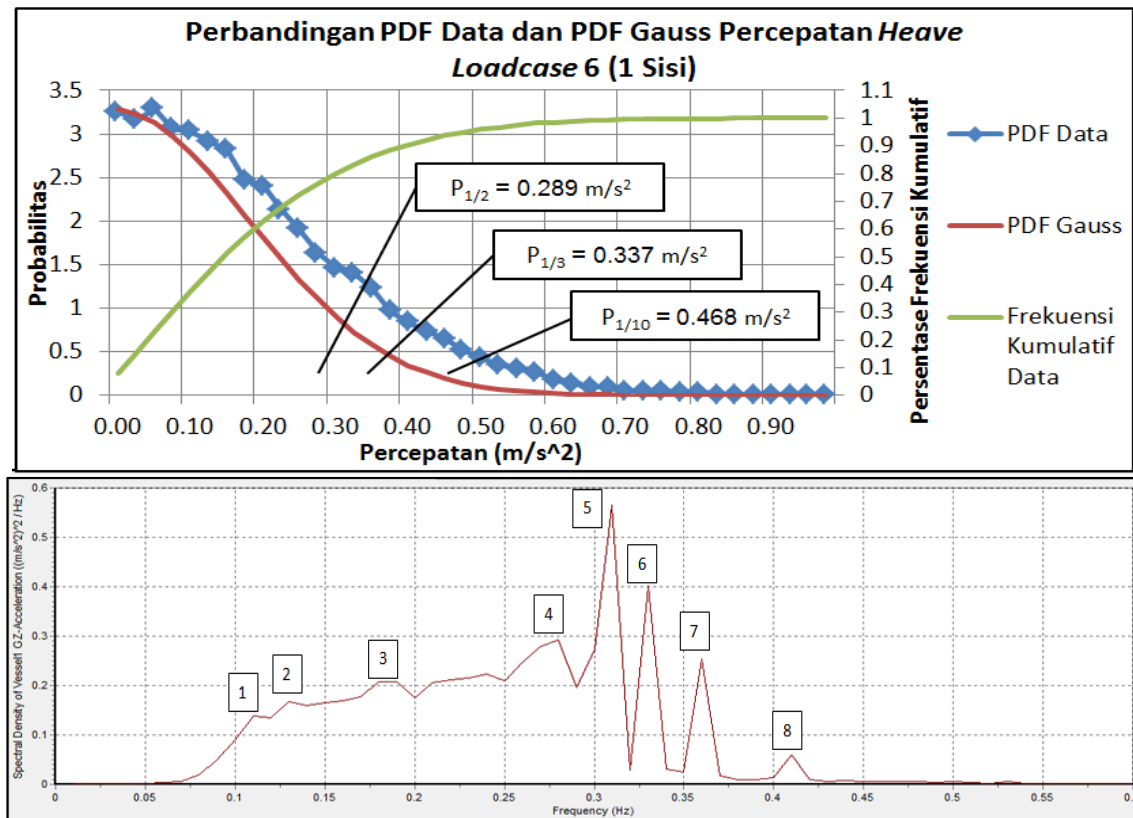
<i>Loadcase</i>	Tali dengan Gaya Tarik Tertinggi	Gaya Tarik Maks (kN)	Rata-rata (kN)	St. Dev (kN)	Rata-rata + 3x St. Dev (kN)	60% MBS (kN)
1	L1 & L2	88.84	49.93	6.96	70.81	164.62
2	L3	107.56	51.26	8.33	76.25	164.62
3	L7	98.14	50.47	8.50	75.97	164.62
4	L1 & L2	63.27	33.42	4.63	47.31	164.62
5	L6	87.24	34.83	8.02	58.89	164.62
6	L7	79.73	34.60	7.31	56.53	164.62
7	L1 & L2	108.87	50.85	9.66	79.83	164.62
8	L3	134.37	52.81	11.20	86.41	164.62
9	L7	119.02	51.32	10.98	84.26	164.62
10	L1 & L2	69.26	33.72	5.63	50.61	164.62
11	L3	88.17	35.58	7.24	57.30	164.62
12	L7	87.03	34.80	8.31	59.73	164.62

Pada analisis kondisi *damaged*, sama seperti analisis gelombang reguler, digunakan *loadcase* 8 sebagai kondisi pembebanan yang menghasilkan gaya tarik maksimum. Berdasarkan letak putusnya tali, terdapat 2 kondisi pemodelan *damaged*. Pertama kondisi *damaged* A dimana tali dengan gaya tarik tali maksimum putus (Line 3) dan kedua kondisi *damaged* B dimana tali yang putus (Line 7) membuat tali yang memiliki gaya tarik maksimum (Line 3) menerima tambahan gaya tarik terbesar. Untuk kondisi *damaged* (Tabel 8), gaya tarik tali maksimum terjadi pada gaya tarik dari pemodelan di kondisi pasang, gelombang acak *storm*, arah beban lingkungan sejajar tali *mooring*, dan Line 3 putus yaitu sebesar 194.11 kN pada Line 7 (dibawah batas 80% MBS yaitu 219.5 kN).

Tabel 8 Gaya Tarik Pemodelan Kondisi *Damaged* Gelombang Acak

<i>Loadcase</i>	Tali dengan Gaya Tarik Tertinggi	Gaya Tarik Maks (kN)	Rata-rata (kN)	St. Dev (kN)	Rata-rata + 3x St. Dev (kN)	80% MBS (kN)
A	Line 7	194.11	86.17	16.89	136.84	219.50
B	Line 3	180.07	76.39	15.08	121.63	219.50

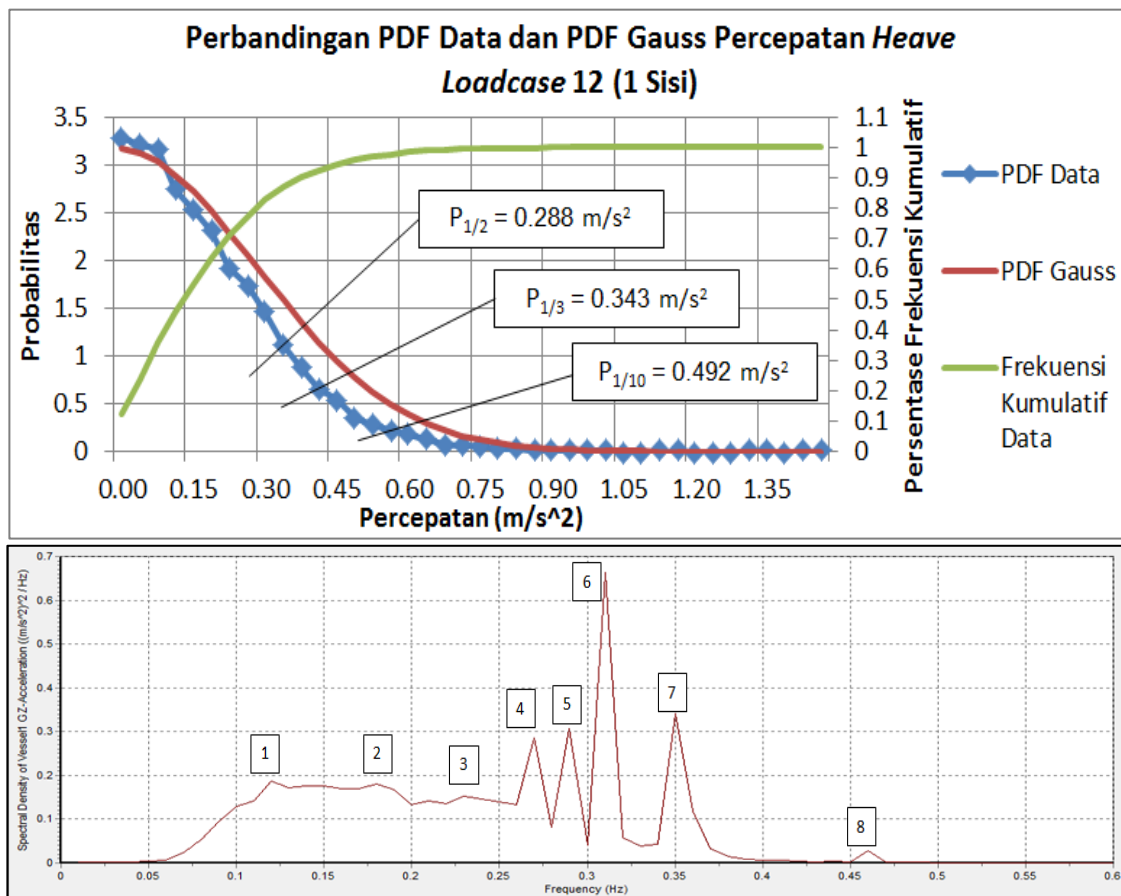
Pada analisis percepatan *heave*, kriteria batas beragam berdasarkan frekuensi. Oleh karena itu, dilakukan analisis spektrum kerapatan energi percepatan *heave* untuk melihat puncak-puncak frekuensi sebagai kriteria batas, yang dibandingkan dengan nilai percepatan $P_{1/2}$, $P_{1/3}$, dan $P_{1/10}$ dari distribusi Gauss. Pada pemodelan gelombang acak 12 *loadcase*, dilakukan analisis percepatan *heave* pada 2 kondisi yaitu operasional dan *storm*, sehingga dianalisis *loadcase* dengan nilai percepatan *heave* maksimum pada masing-masing operasional dan *storm*, yaitu *loadcase* 6 (Gambar 24) dan 12 (Gambar 25).



Gambar 24 Analisis Statistik dan Spektrum Respon *Heave* Loadcase 6

Tabel 9 Analisis Percepatan *Heave* Loadcase 6

No	Frekuensi (Hz)	Percepatan (m/s ²)			
		Batas	$P_{1/2}$	$P_{1/3}$	$P_{1/10}$
1	0.11	0.264	0.289	0.337	0.468
2	0.13	0.278	0.289	0.337	0.468
3	0.18	0.319	0.289	0.337	0.468
4	0.28	0.431	0.289	0.337	0.468
5	0.31	0.465	0.289	0.337	0.468
6	0.33	0.487	0.289	0.337	0.468
7	0.36	0.491	0.289	0.337	0.468
8	0.41	0.491	0.289	0.337	0.468



Gambar 25 Analisis Statistik dan Spektrum Respon *Heave* Loadcase 12

Tabel 10 Analisis Percepatan *Heave* Loadcase 12

No	Frekuensi (Hz)	Percepatan (m/s^2)			
		Batas	$P_{1/2}$	$P_{1/3}$	$P_{1/10}$
1	0.12	0.271	0.288	0.343	0.492
2	0.18	0.319	0.288	0.343	0.492
3	0.24	0.386	0.288	0.343	0.492
4	0.27	0.420	0.288	0.343	0.492
5	0.29	0.442	0.288	0.343	0.492
6	0.31	0.465	0.288	0.343	0.492
7	0.35	0.491	0.288	0.343	0.492
8	0.46	0.491	0.288	0.343	0.492

Pada pemodelan gelombang acak, ada beberapa percepatan melebihi batas pada Tabel 9 dan Tabel 10, hal ini dianggap aman karena pengambilan batas percepatan *heave* sangat konservatif, dimana penelitian batas percepatan *heave* dilakukan dengan menempatkan subjek orang biasa (bukan nelayan) pada ruangan yang bergerak vertikal secara sinusoidal selama 2 jam dan perpindahan sejauh 2.8 meter. Sedangkan pada Penelitian ini dermaga terapung dirancang untuk

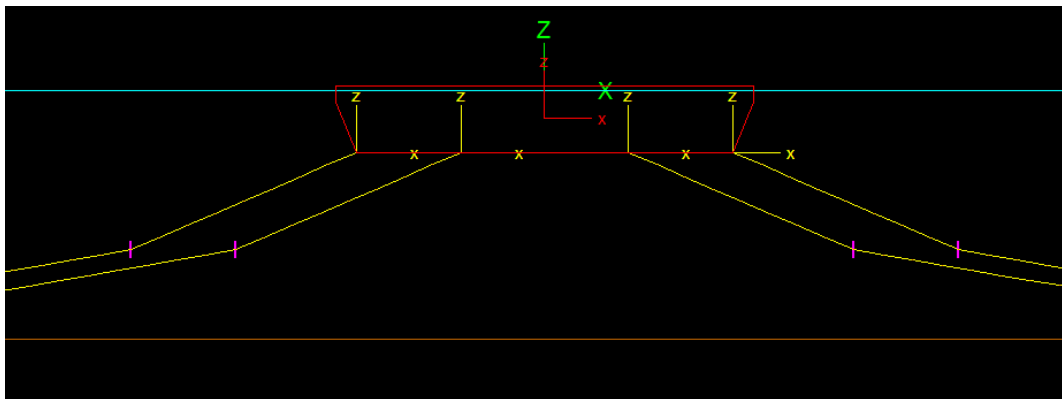
nelayan, dan karena dermaganya kecil, kemungkinan tidak ada nelayan yang berada diatas dermaga terapung selama 2 jam.

Sama seperti analisis gaya tarik, analisis *offset* maksimum dari pemodelan dibandingkan dengan distribusi gauss. *Offset* maksimum arah X terjadi pada kondisi surut, gelombang *storm*, dan arah beban lingkungan sejajar longitudinal dermaga dengan *offset* sebesar 0.313 meter. Sedangkan *Offset* maksimum arah Y terjadi pada kondisi surut, gelombang operasional, dan arah beban lingkungan tegak lurus longitudinal dermaga dengan *offset* sebesar 0.409 meter. Kedua *loadcase* dianalisis untuk dibandingkan dengan distribusi Gauss seperti terlihat pada Tabel 11.

Tabel 11 Analisis *Offset* Pemodelan Acak

<i>Offset</i>	Maksimum Pemodelan (m)	Rata-rata (Absolut) (m)	St. Dev (Absolut) (m)	Rata-rata + 3xSt.Dev(m)
X	0.313	0.080	0.058	0.252
Y	0.409	0.121	0.081	0.364

Kekurangan dari desain konfigurasi akhir yang menggunakan jenis *mooring semi-taut* ini terletak pada resiko tenggelamnya sebagian dermaga pada kondisi kedalaman pasang (Gambar 26). Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah ditinggikannya *freeboard* dermaga.



Gambar 26 Tampak Samping Dermaga Terapung Saat Pasang

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Berikut kesimpulan yang berdasarkan hasil pemodelan dan analisis yang dilakukan:

1. Berdasarkan percobaan variasi konfigurasi *mooring* terhadap gelombang reguler, jenis *mooring* semi-taut cocok digunakan sebagai *mooring* dermaga terapung di perairan dangkal karena memiliki gaya tarik tali maksimum terkecil.

2. Berdasarkan percobaan variasi konfigurasi *mooring* terhadap gelombang reguler, penambahan beban/*clump/sinker* dapat mengurangi *offset* serta percepatan *heave*, namun penambahan beban mengakibatkan bertambahnya gaya tarik pada tali.
3. Pada analisis gelombang reguler, gaya tarik tali terbesar terjadi pada kondisi pasang, gelombang *storm*, dan beban lingkungan dari arah 225° , tepatnya pada Line 3 sebesar 76.81 kN. Hal ini disebabkan oleh pergerakan rotasi *yaw* yang menyebabkan *fairlead* Line 3 menjauhi jangkar, ditambah lagi dengan pergerakan translasi akibat beban lingkungan tersebut.
4. Sama seperti analisis gelombang reguler, pada analisis gelombang acak gaya tarik tali terbesar terjadi pada kondisi pasang, gelombang *storm*, dan beban lingkungan dari arah 225° , tepatnya pada Line 3 sebesar 134.37 kN. Gaya tarik tali maksimum pada gelombang acak lebih besar karena pada analisis gelombang reguler, tinggi gelombang yang digunakan adalah tinggi gelombang signifikan sebesar 1.084 m (amplitudo 0.542 m), sedangkan pada analisis gelombang acak, terdapat gelombang *worst case* dengan amplitudo gelombang setinggi 1.082 m (hampir 2 kali lipat amplitudo gelombang signifikan reguler).
5. Percepatan *heave* terbesar terjadi pada saat kondisi beban lingkungan dari arah 270° . Hal ini disebabkan oleh pergerakan *heave* maksimum terjadi pada saat arah beban lingkungan tersebut seperti yang ditunjukkan RAO *heave*.
6. Konfigurasi *mooring* akhir memenuhi kriteria batas gaya tarik tali API RP 2A (134.37 kN dari batas 164.62 kN untuk *intact*, dan 194.11 kN dari batas 219.5 kN untuk *damaged*) dan respon percepatan *heave*-nya dianggap aman.
7. *Offset* maksimum dermaga terapung sebesar 0.313 meter arah X dan 0.409 meter arah Y.
8. Pada kasus ini, penggunaan *mooring* jenis *semi-taut* dapat menambah *draft* dermaga saat kedalaman perairan bertambah. Hal ini menyebabkan timbulnya resiko dermaga terapung tenggelam saat pasang. Solusi yang dapat dilakukan adalah menambahkan tinggi *freeboard* dermaga terapung atau penambahan panjang bentangan tali *mooring* dengan kekurangan bertambahnya *offset* dan bertambahnya percepatan *heave* dermaga terapung. Perlu dilakukan analisis ulang jika salah satu dari kedua solusi tersebut diterapkan.

SARAN

Berikut ini merupakan saran yang dapat dilakukan untuk penelitian yang serupa selanjutnya:

1. Dalam penggunaan jenis *mooring semi-taut*, perlu diperhatikan efek pasang-surut terhadap *draft* dermaga terapung untuk menghindari resiko tenggelamnya dermaga terapung saat pasang.
2. Untuk hasil yang lebih akurat, data lingkungan seperti gelombang, arus, pasang-surut, serta kontur dasar laut perlu didapatkan dengan survey secara langsung di lokasi rencana dermaga terapung.
3. Pemodelan gelombang dilakukan dengan karakteristik gelombang yang berbeda sesuai dengan arah datang gelombang.
4. Melakukan analisis beban tambahan akibat perahu yang bertambat di berbagai lokasi dan jumlah perahu yang beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute. 2007. *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform-Working Stress Design*. SAI GLOBAL.
- American Petroleum Institute. 2005. *Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. API Publishing Services.
- Bureau Veritas. 2016. *Hydrostar for Experts User Manual*. Bureau Veritas.
- Defence Research and Development Canada. 2006. *A review on Effects of Frequency of Oscillation on Motion Sickness*. Canada.
- DNV. 2010. *DNV-OS-E301 Position Mooring*. Det Norske Veritas.
- Faltinsen, O.M. 1990. *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Melbourne. Cambridge University Press.
- National Technical Information Service (NTIS). 1973. *Motion Sickness Incidence as a Function of The Frequency and Acceleration of Vertical Sinusoidal Motion*. US Department of Commerce.
- Thoresen, Carl A. 2003. *Port Designer's Handbook: Recommendations and Guidelines*. Thomas Telford Publishing.
- U.S. Army Corps of Engineer. 1984. *Shore Protection Manual*. Washington, DC. U.S. Government Printing Office.