

PERANCANGAN SISTEM MOORING TURBIN PEMBANGKIT LISTRIK ARUS PASANG SURUT TIPE TERAPUNG SEBAGAI DASAR PEMBANGUNAN LADANG TURBIN DI SELAT LARANTUKA

DESIGN OF MOORING SYSTEM ON FLOATING TIDAL CURRENT TURBINE AS THE BASIS FOR DEVELOPMENT OF TURBINE FARM IN LARANTUKA STRAIT

Rizky Duanita Hermilia¹

Pembimbing : Krisnaldi Idris, Ph.D²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10 Bandung 40123

¹rizkyduanita@gmail.com dan ²krisnaldi@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Salah satu penelitian di bidang energi laut adalah perancangan sebuah alat pembangkit listrik tenaga pasang surut terapung. Pada suatu batasan area perairan, ladang area turbin perlu dipertimbangkan agar tidak terjadi kecelakaan atau mengganggu pergerakan turbin lainnya saat beroperasi. Pada tugas akhir ini akan dilakukan desain dan analisis terhadap sistem mooring turbin arus pasang surut tipe terapung dengan gelombang reguler. Analisis ini dilakukan pada dua kondisi yakni kondisi *intact* dan kondisi *damage* menggunakan *software* Orcaflex dan MOSES. Analisis yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan respon struktur saat dikenai beban lingkungan. Respon struktur tersebut berupa perpindahan maksimal struktur (*offset*), perpindahan tali *mooring* ketika bergerak, *tension* tali *mooring* terbesar sesuai kriteria dari API RP2SK. Dari respon perpindahan tersebut dapat diketahui jarak aman antar turbin satu dengan lainnya. Dengan adanya lokasi perairan yang telah direncanakan, dan hasil analisis respon perpindahan turbin, maka dapat diketahui jumlah turbin yang dapat dibangun untuk memaksimalkan perairan yang telah disediakan untuk ladang pembangunan turbin.

Kata Kunci: *mooring*, turbin arus pasang surut, terapung, ladang area.

Abstract: one of invention in marine energy field is the design of floating tidal current. In a boundary area of strait, turbine farm should be considered in order to prevent accident between turbines or disturbing turbine's movement while operating. This final year project will discuss about design and analysis of mooring system on floating tidal current by regular wave. Analysis will be performed by Orcaflex and MOSES in 2 conditions, intact and damage. This analysis is purpose to get structure respons due to environment load. The respons are structure's offset, mooring rope's offset, and maximum tension according to criterion from API RP2SK. From that result, the safety distance between one turbine to others can be concluded. With the planned location in strait, and the analysis result of displacement turbine, then it can be known the number of turbines that can be built to maximize the strait which provided to turbine farm development.

PENDAHULUAN

Penelitian mengenai studi potensi energi sudah banyak dilakukan seperti pengembangan teknologi turbin dengan berbagai macam konfigurasi turbin dan tipe penyangga turbin. Salah satu penelitian yang dilakukan adalah perancangan alat pembangkit listrik tenaga pasang surut dengan sistem penyangga terapung. Turbin ini menggunakan *blade* vertikal yang berputar terhadap batang poros. Diantara *blade* turbin tersebut, terdapat badan struktur yang berfungsi untuk memberikan gaya apung untuk turbin atau *floater*. Alat ini menggunakan *mooring* sebagai sistem pengembali gerakannya. Kelebihan struktur ini dapat lebih mudah dalam pemeliharaannya karena semua peralatan elektrik dipasang di atas permukaan air laut. Arus pasang surut akan lebih cepat apabila dekat dengan permukaan air laut. Namun diperlukan jarak yang besar jika ingin dibuat ladang turbin, sehingga mendesain area ladang turbin di suatu tempat perlu dilakukan analisis terhadap penyangga turbin sistem terapung. Sehingga pada suatu batasan area perairan, turbin arus dapat ditempatkan di beberapa lokasi dan tidak akan mengganggu pergerakan turbin lainnya untuk keamanan saat turbin beroperasi. Pada tugas akhir ini akan dilakukan desain dan analisis terhadap sistem mooring turbin arus pasang surut tipe terapung dengan gelombang reguler. Dari respon gerakan turbin tersebut dapat diketahui jarak aman yang diperlukan. Dengan dilakukannya analisis ini diharapkan dapat memudahkan perencanaan area ladang pembangkit listrik sistem terapung di Selat Larantuka.

TEORI DAN METODOLOGI

Gelombang adalah salah satu gaya yang besar pengaruhnya pada respon benda

terapung di laut lepas. Respon ini dianalisis menggunakan pendekatan hidrodinamika yang meliputi gaya apung, gaya eksitasi gelombang, dan gaya radiasi. Berdasarkan Faltinsen (1990), persamaan gerak struktur terapung oleh gaya gelombang reguler pada masing-masing mode gerakan dapat ditulis dalam persamaan berikut:

$$F_j = m_{kj} \ddot{z}_j$$

$$F_{wj} = (m_{kj} + M_{kj}) \ddot{z}_j + C_{kj} \dot{z}_j + K_{kj} z_j$$

Persamaan 1

Selain gelombang, arus juga menjadi gaya yang berpengaruh pada pergerakan *offset* struktur. Berdasarkan DNV-RP-C205 (Sec.6), pada umumnya kecepatan arus besarnya bervariasi terhadap kedalaman. Sehingga distribusi gaya yang terjadi pada struktur tidak seragam seiring dengan perubahan kedalaman.

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2$$

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_d A \int_{-z_s}^0 V^2 dz$$

Persamaan 2

Pada analisis tali mooring, gaya vertikal dan panjang tali tergantung dapat diketahui dari gaya tarik horizontal pada *fairlead* dan berat tali per satuan panjang, mengasumsikan berat tali homogen. Panjang tali tergantung pada sebuah gaya horizontal adalah:

$$s = \frac{T_H}{w} \sinh\left(\frac{w}{T_H} x\right)$$

Persamaan 3

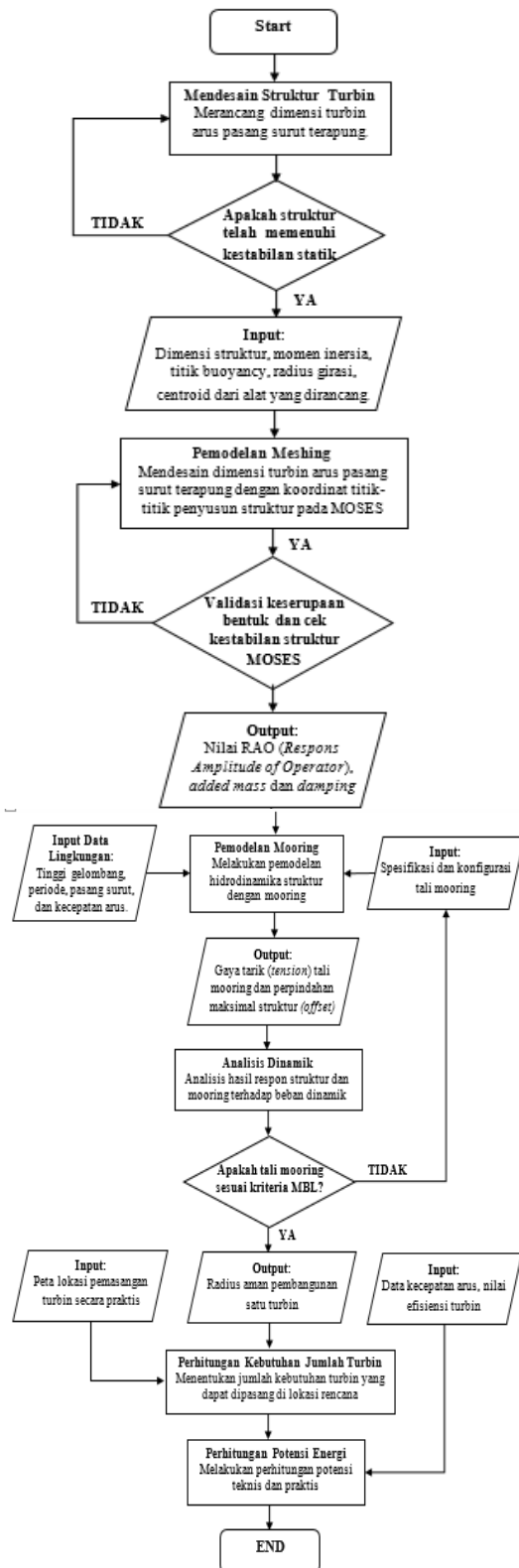
Sehingga gaya tarik vertikal dan gaya total pada sebuah segmen tali dihitung sebagaimana:

$$T_z = w$$

$$T = T_H + T_z + (w + \rho g A)z$$

Persamaan 4

Sistem mooring ini akan diuji menggunakan gaya lingkungan meliputi arus, pasang surut, dan gelombang dari 3 arah selat. Diagram alir pengerjaan sebagaimana **Gambar 1**:



Gambar 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Lokasi studi yang ditinjau pada tugas akhir ini adalah Perairan Selat Larantuka, yang berada diantara pulau Flores dan pulau Adonara. Keduanya terletak di provinsi Nusa Tenggara Timur. Pengambilan data arus didapat pada titik koordinat 123°7'44"681 E dan 8°15'7"27 S seperti pada **Gambar 2**



Gambar 2 Lokasi Rencana

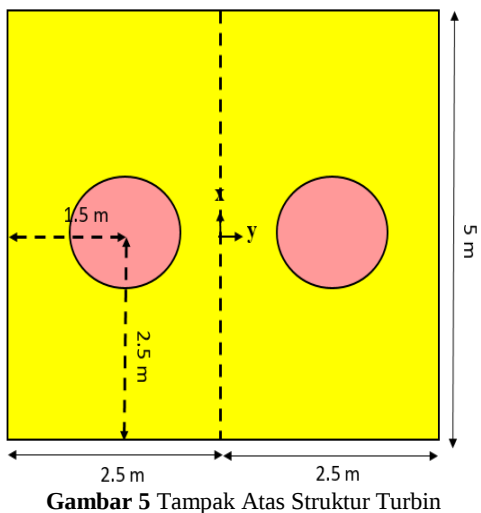
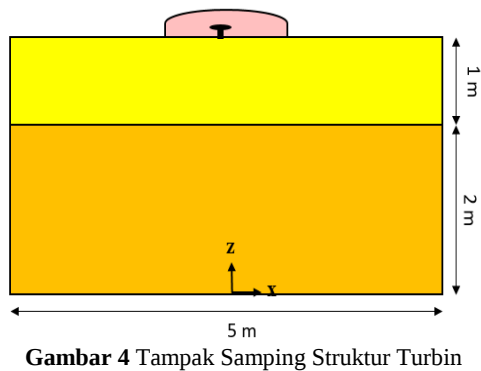
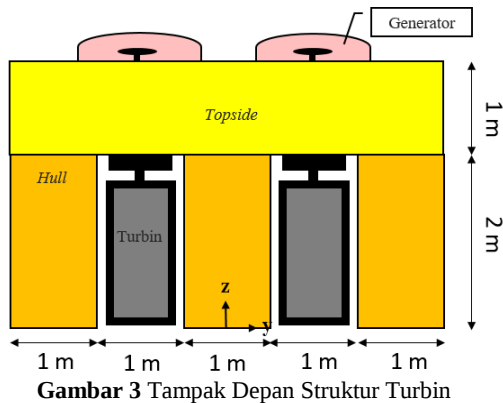
Data lingkungan seperti kedalaman perairan, tinggi pasang surut, gelombang dan kecepatan arus pasang surut di permukaan didapatkan dari suatu referensi (Harman Ajiwibowo dkk, 2017). Berdasarkan website BMKG pada tanggal 1 April 2018, tinggi gelombang signifikan yang terjadi di perairan selat Larantuka adalah 0.5 m dengan periode gelombang 5 s. Karakteristik gaya lingkungan yang digunakan dalam pemodelan Tugas Akhir ini dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Data Lingkungan

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Kedalaman Perairan	24	m	MSL
Kondisi Batimetri	-	-	Diasumsikan datar
Tinggi Pasang Surut	2.86	m	
Kecepatan Arus di Permukaan	2.556	m/s	

Pada Tugas Akhir ini turbin arus pasang surut dirancang dengan menggunakan 3 hull berbentuk balok dan bagian atas (*topside*) untuk meletakkan generator. Bagian hull berperan sebagai sebuah pelampung (*buoy*). Dimensi total struktur terapung ini adalah 5 m x 5 m x 3 m (panjang x lebar x tinggi). Pembangkit listrik arus pasang surut ini

terdiri dari 3 komponen, yakni pelampung (*buoy*), turbin, dan generator. Ilustrasi struktur turbin arus pasang surut yang digunakan dapat dilihat pada



1. Buoy

Material dari *buoy* ini terdiri dari 2 bagian yakni *Polyethylene Polymer* (PE) untuk *buoy hull* struktur dan *Polyurethane Light Foam* (PU) untuk bagian *buoy topside*. *Buoy* memiliki panjang 5 m dan lebar 1 m dengan

tinggi 2 m. Sedangkan *topside* memiliki sisi 5 m x 5 m.

Tabel 2 Massa Jenis Material *Buoy*

Bahan <i>Buoy</i>		
<i>Polyethylene</i> (PE)	937	kg/m ³
<i>Polyurethane</i> (PU)	14	kg/m ³

Tabel 3 Massa *Buoy Hull*

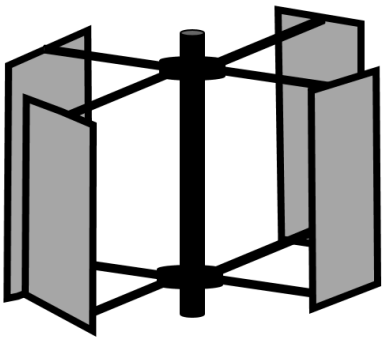
Massa <i>Buoy Hull</i>			
Massa jenis <i>Polyethylene</i>	Volume 1 <i>hull</i>	Massa 1 <i>hull</i>	Massa 3 <i>hull</i> (kg)
937 kg/m ³	10 m ³	9370 kg	28110

Tabel 4 Massa *Buoy Topside*

Massa <i>Buoy Topside</i>		
Massa jenis <i>Polyurethane</i>	Volume	Massa
14 kg/m ³	25 m ³	350 kg

2. Turbin

Turbin yang digunakan adalah turbin vertikal jenis **Darrieus**. Bilah turbin berbentuk pelat tipis dengan dimensi panjang x tinggi 0.6 m x 1.5 m dan tebal sebesar 10 mm. Turbin berputar mengelilingi sumbu-z pada sebuah batang poros. Pada bagian atas turbin diberikan rangka besi penyangga untuk menjaga kestabilan batang poros saat bilah-bilah turbin berputar seperti pada **Gambar 6**. Total massa turbin yang digunakan adalah **377 kg**.



Gambar 6 Turbin Vertikal Jenis Darrieus.

3. Generator

Berdasarkan katalog “*Marine Mase Generator 2016*” massa satu generator dipilih 80 kg. Sehingga total 2 generator yang digunakan adalah **160 kg**.

4. Perhitungan Titik Pusat

Titik berat (*centre of gravity*) atau letak pusat massa struktur terapung dalam semua arah, terdapat pada **Tabel 5**

Tabel 5 Titik Berat Gabungan Struktur

CG Gabungan	
Cgx	0
Cgy	0
Cgz	1.04

5. Perhitungan Momen Inersia

Struktur berputar terhadap titik pusat massa yakni (0; 0; 1.04), hasil momen inersia pada setiap arah sumbu terdapat pada **Tabel 6**

Tabel 6 Momen Inersia Struktur

Momen Inersia (T.m ²)	
Ixx	65.91
Iyy	118.87
Izz	99.27

6. Perhitungan Radius Girasi

Radius girasi merupakan *input* dari *Software* MOSES.

$$r = \sqrt{\frac{I}{M}}$$

Persamaan 5

Dengan mengetahui nilai momen inersia dan massa total struktur, maka hasil radius girasi tertulis pada **Tabel 7**:

Tabel 7 Radius Girasi

Radius Girasi (m)	
Rx	1.508
Ry	2.025
Rz	1.850

7. Desain Keseluruhan Struktur

Tabel 8 Desain Struktur

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang	5	m
Lebar	5	m
Tinggi <i>Topside</i>	1	m
Tinggi <i>Hull</i>	2	m
Draft	1.88	m
Freeboard	1.12	m
Massa Total	28.9	T

Tali *mooring* yang digunakan jenis tali kabel (6 x19 *wire rope with core*) sebanyak 4 buah dengan sistem konfigurasi *catenary*.

Tabel 9 Spesifikasi Tali Mooring yang Digunakan

Parameter	Wire Rope
Panjang (m)	28
Diameter (mm)	16
Massa tali di dalam air (kg/m)	0.87
Massa tali di udara (kg/m)	1
<i>Minimum Breaking Load /MBL</i> (kN)	162

Untuk mendapatkan respon struktur, diperlukan dua perangkat lunak pemodelan hidrodinamika yakni MOSES dan Orcaflex. Pemodelan struktur terapung pada MOSES dilakukan untuk mendapatkan *Response Amplitude Operator* (RAO) dan *added mass and damping* yang akan digunakan sebagai input pemodelan *mooring* pada Orcaflex.

Pemodelan Meshing

Benda yang dimodelkan dalam MOSES adalah pelampung (*buoy*) yang terdiri dari pelat balok untuk bagian *hull* dan *topside*. Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menggambar struktur *buoy* dengan menggunakan titik-titik *mesh*. Selanjutnya input file database, draft, periode, dan arah gelombang yang diinginkan.

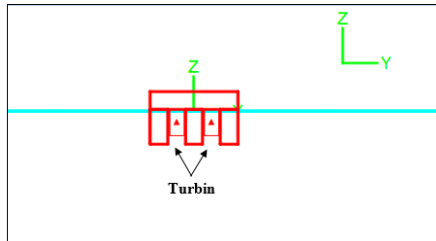
Pemodelan Mooring

RAO digunakan untuk mendeskripsikan gerakan struktur saat terjadi gelombang.

Pada pemodelan mooring terdapat beberapa hal yang perlu dimodelkan, yakni:

1. Pemodelan Turbin

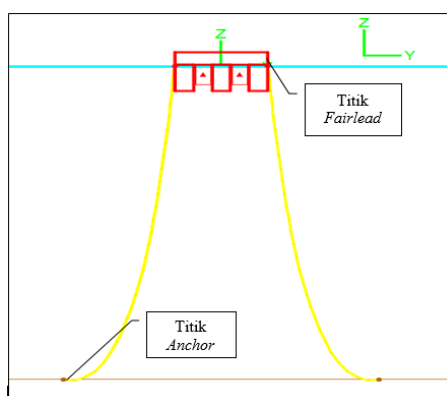
Turbin dimodelkan dengan sebuah bilah turbin menghadap tegak lurus arah datang gelombang dan arus pada masing-masing sisi kiri dan kanan dengan panjang 1.5 m, lebar 0.6 m.



Gambar 7 Pemodelan Turbin

2. Pemodelan Mooring

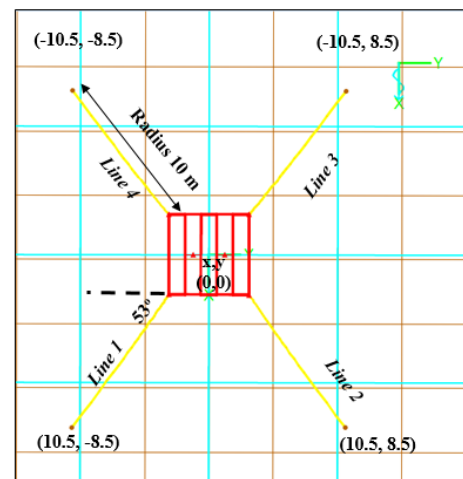
Tali *mooring* dalam perangkat ORCAFLEX dapat dilakukan dengan memilih menu *line*. Panjang tali mooring disesuaikan dengan keadaan perairan pasang, yakni 25.5 m dan radius *mooring* 10 m. Sehingga panjang tali yang didapatkan adalah 28 m. Pada Gambar 8 dan Gambar 9 diilustrasikan posisi anchor dan *fairlead* mooring pada struktur yang telah dituliskan pada Tabel 10.



Gambar 8 Titik Anchor dan Fairlead pada Struktur

Tabel 10 Koordinat Posisi Tali *Mooring*

Nama Tali <i>Mooring</i>	Posisi Ujung Tali <i>Mooring</i>	Koordinat	
		X	Y
Line 1	Fairlead	2.5	-2.5
	Anchor	10.5	-8.5
Line 2	Fairlead	2.5	2.5
	Anchor	10.5	8.5
Line 3	Fairlead	-2.5	2.5
	Anchor	-10.5	8.5
Line 4	Fairlead	-2.5	-2.5
	Anchor	-10.5	-8.5



Gambar 9 Tampak Atas Pemodelan *Mooring*

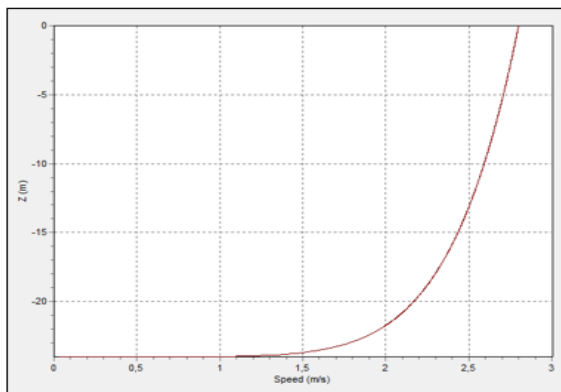
3. Pemodelan Lingkungan

Struktur terapung diperiksa ketika lokasi perairan mengalami pasang surut. Pada setiap kondisi pasang surut tersebut, struktur terapung dimodelkan untuk menerima arus dari berbagai arah di selat. Arah datang gelombang yang dimodelkan adalah 0° , 22.5° , dan 337.5° , sedangkan arah datang arus yang dimodelkan adalah 0° dan 180° . Jenis gelombang yang dimodelkan adalah gelombang reguler.



Gambar 10 Arah Datang Arus dan Gelombang pada Selat

Besar kecepatan arus yang terjadi akan mengecil seiring bertambahnya kedalaman. Pada kedalaman di permukaan (0 meter), kecepatan arus adalah 2.8 m/s, kemudian arus berkurang hingga dasar laut.



Gambar 11 Profil Kecepatan Arus

Kondisi pasang surut pada Orcaflex dimodelkan dengan mengubah kedalaman perairan. Diketahui *tidal range* Perairan Selat Larantuka adalah 3 m, maka pada pemodelan pasang surut ini dimodelkan kedalaman perairan sebesar 22,5 m untuk kondisi surut, 24 m untuk kondisi air rata-rata (MSL), dan 25.5 m untuk kondisi perairan pasang. Untuk gelombang, dimodelkan dengan tinggi 0.5 m dengan periode 5 s.

4. Run Statik dan Run Dinamik

Di dalam analisis statik beban yang dimasukkan dalam perhitungan adalah berat struktur dan semua benda yang terlekat

(*attached*) pada struktur seperti tali *mooring* (*line*) atau *buoy*. Sedangkan analisis dinamik adalah analisis model akibat beban dinamik yakni gelombang orde pertama, gaya arus dan *added mass and damping* dalam suatu waktu tertentu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

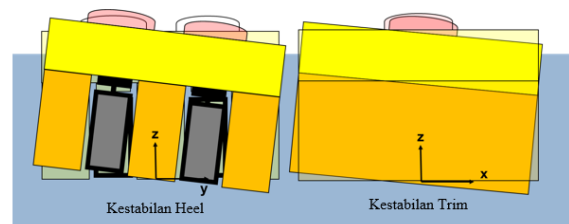
Kestabilan awal struktur terapung dianalisis berdasarkan posisi titik metasentrisnya. Posisi titik metasentris benda didapat berdasarkan posisi pusat gravitasi, pusat gaya apung, *displacement*, dan momen inersia struktur terapung. Struktur dikatakan stabil apabila jarak antara pusat gravitasi dan titik metasentrisnya diatas nol ($GM > 0$). Berdasarkan perhitungan analitik, nilai kestabilan *trim* dan *heel* struktur terapung terdapat pada Tabel 11 dan Tabel 12.

Tabel 11 Stabilitas *Trim* Struktur *Free-Floating*

CEK KESTABILAN TRIM: $GM = KB + BM - KG$					
Volume Terendam (m^3)	Inersia ($kg.m^4$)	KB (m)	KG (m)	BM (m)	GM (m)
26.325	31.25	0.94	1.04	1.108	1.01

Tabel 12 Stabilitas *Heel* Struktur *Free-Floating*

CEK KESTABILAN TRIM Heel: $GM = KB + BM - KG$					
Volume Terendam (m^3)	Inersia ($kg.m^4$)	KB (m)	KG (m)	BM (m)	GM (m)
26.325	41.25	0.98	1.04	1.462	1.36



Gambar 12 Ilustrasi Kestabilan Statik Struktur Terapung

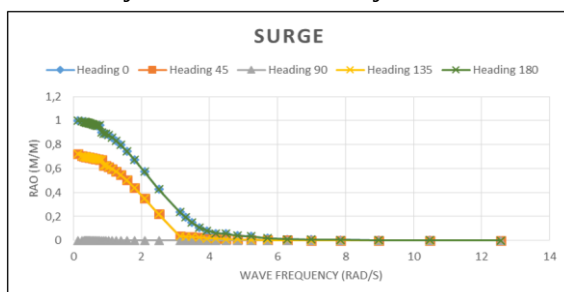
Moses dapat melakukan perhitungan kestabilan struktur. Apabila nilai kestabilan struktur hasil keluaran Moses telah menyerupai nilai kestabilan hasil perhitungan, artinya pemodelan hidrodinamika sudah sesuai.

Draft =	1.88	Roll Angle =	0.00	Pitch Angle =	0.00
Wet Radii Of Gyration About CG					
K-X =	1.51	K-Y =	2.02	K-Z =	1.85
GMT = 1.36 GML = 1.01					

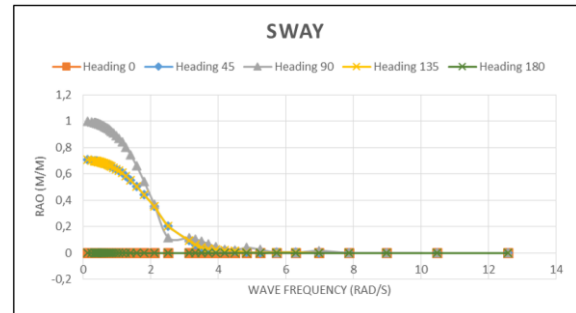
Gambar 13 Output Nilai Kestabilan Struktur oleh Moses

Pada **Gambar 13** nilai kestabilan struktur yang dikeluarkan oleh Moses adalah 1.36 untuk GM transversal (*trim*) dan 1.01 untuk GM longitudinal (*heel*). Nilai tersebut serupa dengan nilai GM hasil perhitungan analitik.

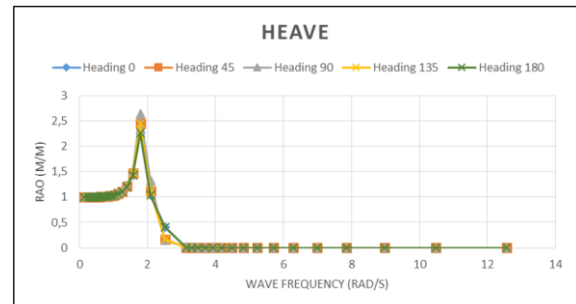
RAO struktur terdiri dari 6 derajat kebebasan dari 5 arah datang gelombang yang berbeda, yakni 0,45, 90, 135, 180. RAO struktur telah memenuhi struktur pada umumnya, RAO *heave* 1 ketika frekuensi kecil, lalu nilai *heave* akan kongruen menuju 0 ketika nilai frekuensi besar. Nilai RAO terbesar pada 6 derajat kebebasan adalah *Surge* 0.997 m saat gelombang datang dari arah 0° frekuensi 0.1257 rad/s. Pada *Sway* dicapai nilai maksimal 0.997 m saat gelombang datang dari arah 90° frekuensi 0.1257 rad/s. *Heave* 2.637 m saat gelombang datang dari arah 90° frekuensi 1.79 rad/s. Nilai *Roll* maksimal adalah 35° saat gelombang datang dari arah 90° frekuensi 2 rad/s. *Pitch* 28.871° saat gelombang datang dari 0° frekuensi 0.897 rad/s. *Yaw* maksimal sebesar 2.251° saat gelombang datang dari arah 45° dan 135° frekuensi 2.5 rad/s. **Gambar 14** sampai **Gambar 19** menunjukkan RAO 6 derajat kebebasan.



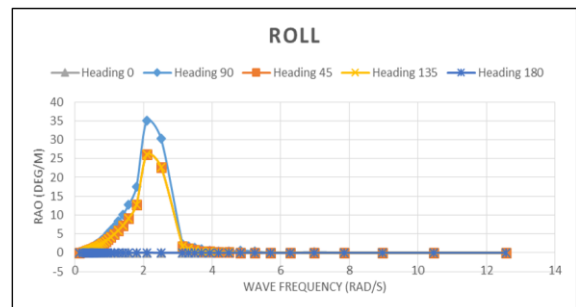
Gambar 14 Grafik RAO *Surge* Struktur Terapung



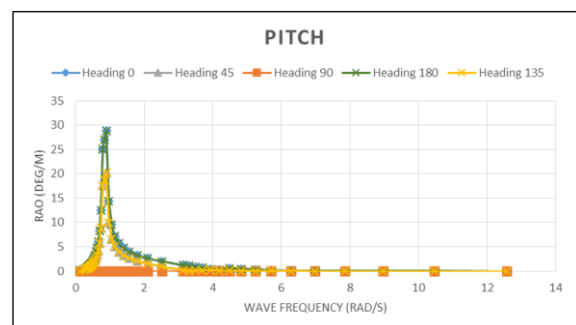
Gambar 15 Grafik RAO *Sway* Struktur Terapung



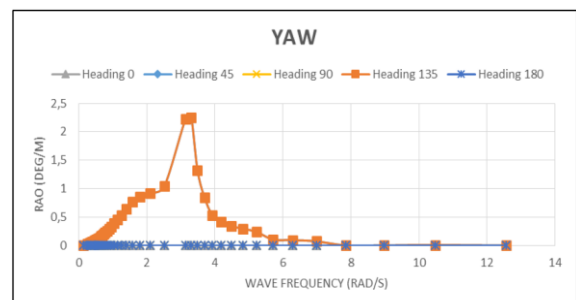
Gambar 16 Grafik RAO *Heave* Struktur Terapung



Gambar 17 Grafik RAO *Roll* Struktur Terapung



Gambar 18 Grafik RAO *Pitch* Struktur Terapung

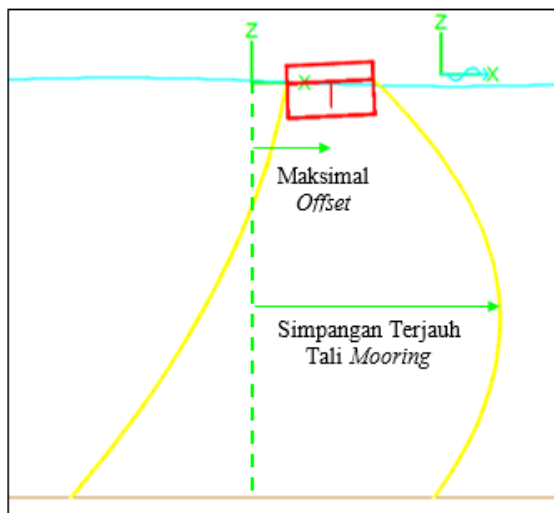


Gambar 19 Grafik RAO *Yaw* Struktur Terapung

Pemodelan struktur mooring dilakukan dengan memeriksa 4 kondisi yakni; kondisi *intact* dan *damage* ketika 2 turbin dikondisikan macet, dan kondisi *intact* dan *damage* ketika 1 turbin dikondisikan macet.

1. Kondisi *Intact* 2 Turbin Macet

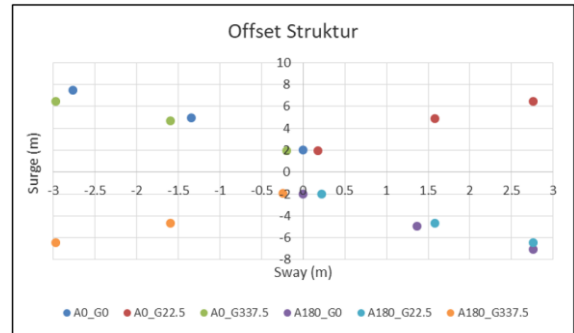
Perpindahan suatu struktur (*offset*) perlu diketahui untuk menjadi pertimbangan luasan area pembangunan turbin. Selain *offset*, untuk mengetahui radius aman pemasangan turbin perlu juga diketahui simpangan terjauh tali *mooring* bergerak dan titik *anchor* seperti pada Gambar 20.



Gambar 20 Kriteria Perhitungan Radius Aman Pemasangan Turbin

Pada kondisi statik, posisi struktur tidak mengalami *offset* karena posisi *anchor* yang simetris dan keempat tali *mooring* identik. Kondisi dinamik (beban lingkungan arus dan gelombang telah dimasukkan), hasil *offset* struktur dan pergerakan tali *mooring* disemua kondisi pasang surut, arah datang gelombang dan arus dapat dilihat pada Gambar 21 dan Gambar 22

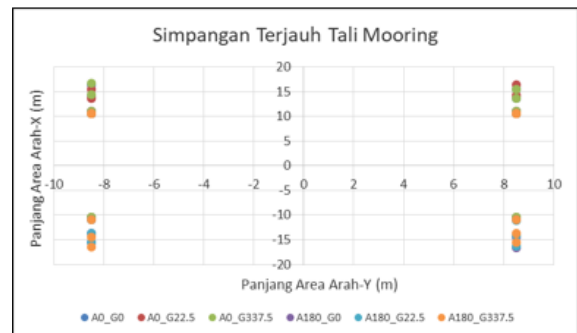
Nilai maksimal *offset* struktur yang dicapai adalah 7.45 m arah *surge* di kondisi surut ketika arah arus 0° dan gelombang 0° sedangkan nilai maksimal *offset* arah *sway* yang dicapai adalah -2.97 m di kondisi surut ketika arah arus 0° dan gelombang 337.5° .



Gambar 21 Grafik *Offset* Struktur pada Berbagai Kondisi Arus dan Gelombang

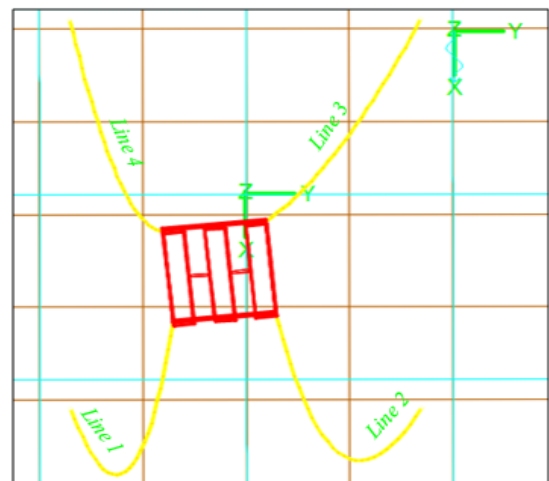
*)Keterangan: A0_G0 = Arah arus 0° dan gelombang 0°

Panjang maksimal area yang dapat dicapai ketika tali *mooring* bergerak adalah 16.75 m untuk arah-X dan 8.5 m untuk arah-Y. Simpangan terjauh tali *mooring* untuk arah-Y menggunakan koordinat titik *anchor*, karena pada semua kondisi arus dan gelombang struktur tidak mengalami pergerakan ke arah-Y secara signifikan.

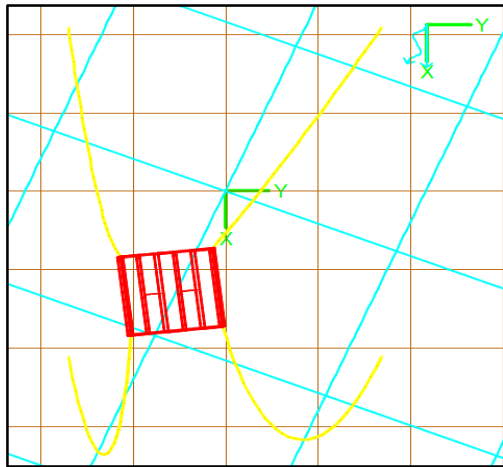


Gambar 22 Grafik Simpang Terjauh Tali *Mooring*

Gambar 23 dan Gambar 24 menunjukkan kondisi *surge* dan *sway* maksimal struktur.



Gambar 23 Tampak Atas Struktur Saat Dikenai Gelombang dan Arus 0°



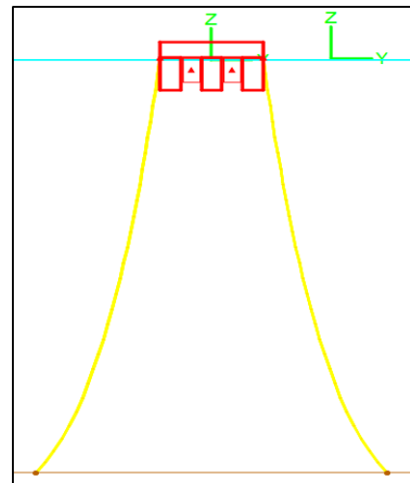
Gambar 24 Tampak Atas Struktur Saat Dikenai Gelombang 337.5° Arus 0°

Pengaruh besar gaya tarik tali *mooring* pada kondisi statik bergantung pada seberapa panjang tali *mooring* yang menggantung. Untuk melihat rangkuman gaya tarik *mooring* kondisi statik lihat Tabel 13.

Tabel 13 Gaya Tarik Kondisi Statik

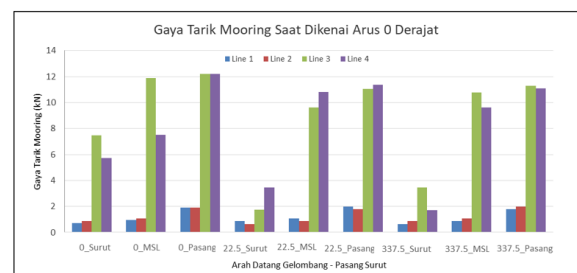
Tali <i>Mooring</i>	Gaya Tarik di <i>Fairlead</i> (kN)		
	Surut	MSL	Pasang
<i>Line 1</i>	0.22	0.24	0.29
<i>Line 2</i>	0.22	0.24	0.29
<i>Line 3</i>	0.22	0.24	0.29
<i>Line 4</i>	0.22	0.24	0.29

Dari semua kondisi pasang surut, maka didapatkan gaya tarik maksimum terjadi pada kondisi pasang dengan letak tali *mooring* di *Fairlead* yakni 0.29 kN. Hal itu terjadi karena ketika muka air naik (pasang), maka terjadi kenaikan struktur sehingga lebih banyak panjang tali *mooring* yang tidak menyentuh dasar perairan. Pada saat arus datang dari arah 0°, dua tali sejajar di bagian depan dalam hal ini *line 1* dan *line 2* akan mengendur. Sebaliknya terjadi pada *line 3* dan *line 4*, kedua tali tersebut akan memiliki gaya tarik lebih besar.

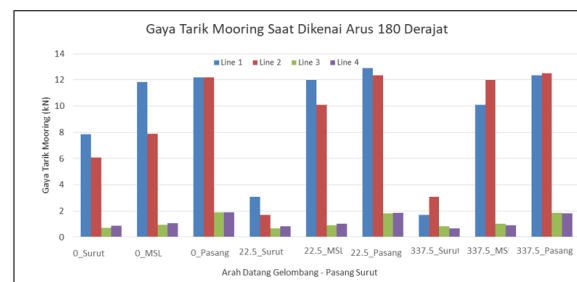


Gambar 25 Tali Mooring Statik Kondisi Perairan Pasang

Hasil gaya tarik pada kondisi dinamik di beberapa kondisi pasang surut dapat dilihat pada Gambar 26 dan Gambar 27



Gambar 26 Grafik Gaya Tarik *Mooring* Saat Dikenai Arus 0°



Gambar 27 Grafik Gaya Tarik *Mooring* Saat Dikenai Arus 180°

Gaya tarik *Fairlead* paling besar adalah *line 1* 12.9 kN, gaya tarik tersebut terjadi pada saat kondisi arus mengenai struktur dari arah arus 180° dan gelombang 22.5°.

2. Kondisi *Damage* 2 Turbin Macet

Pada kondisi *damage* salah satu tali *mooring* mengalami kegagalan sehingga hanya tersisa 3 tali yang berfungsi untuk menahan gaya gaya yang bekerja pada struktur.

Tabel 14 Skenario Pemilihan *Failed Line*

Arah Arus (derajat)	Arah Gelombang (derajat)	Pasang Surut	Tension di Fairlead (kN)			
			Line1	Line2	Line3	Line4
0	0	Surut (22.5 m)	0.72	0.86	7.46	5.74
		MSL (24 m)	0.97	1.08	11.87	7.5
		Pasang (25.5 m)	1.91	1.91	12.1	12.1
	22.5	Surut (22.5 m)	0.85	0.64	1.73	3.47
		MSL (24 m)	1.08	0.86	9.61	10.81
		Pasang (25.5 m)	1.97	1.79	11.07	11.36
	337.5	Surut (22.5 m)	0.63	0.86	3.45	1.71
		MSL (24 m)	0.86	1.08	10.78	9.61
		Pasang (25.5 m)	1.78	1.97	11.3	11.09
180	0	Surut (22.5 m)	7.85	6.07	0.71	0.85
		MSL (24 m)	11.82	7.9	0.95	1.05
		Pasang (25.5 m)	12.2	12.2	1.88	1.88
	22.5	Surut (22.5 m)	3.07	1.68	0.67	0.83
		MSL (24 m)	12	10.1	0.91	1.03
		Pasang (25.5 m)	12.9	12.37	1.8	1.84
	337.5	Surut (22.5 m)	1.68	3.08	0.83	0.67
		MSL (24 m)	10.1	12	1.03	0.9
		Pasang (25.5 m)	12.35	12.52	1.84	1.81

Berdasarkan Tabel 14, *load case* yang mengakibatkan gaya tarik maksimal pada tali *mooring* adalah arah arus 180° gelombang 22.5° kondisi pasang *line 1* mengalami *damage*. Nilai *offset* struktur pada kondisi statik dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15 *Offset* Struktur Kondisi *Damage* Statik

Kondisi <i>Damage</i>	Surge (m)			Sway (m)		
	Surut	MSL	Pasang	Surut	MSL	Pasang
Line 1	-1.83	-1.55	-1.35	1.65	1.55	1.51

Kondisi tali *mooring* putus satu ini menyebabkan struktur mengalami rotasi yaw lebih besar dari kondisi *intact*. Berdasarkan Tabel 16 gerakan yaw dan *offset* paling besar terjadi pada kondisi perairan surut sebesar -16.238° dan *offset surge* sebesar -7.635 m. Berdasarkan Tabel 17 simpangan terjauh tali *mooring* pada *load case* ini adalah -16.542 m ke arah X untuk *line 4*.

Tabel 16 *Offset* Struktur Dinamik Kondisi *Damage*

Arah Arus (derajat)	Arah Gelombang (derajat)	Pasang Surut	Offset Maksimal (m)		Rotasi Maksimal (derajat)
			Surge	Sway	
180	22.5	Surut (22.5 m)	-7.635	-2.77	-16.238
		MSL (24 m)	-4.976	-1.523	-9.037
		Pasang (25.5 m)	-2.73	-0.624	-7.68

Tabel 17 Simpangan Terjauh Tali *Mooring*

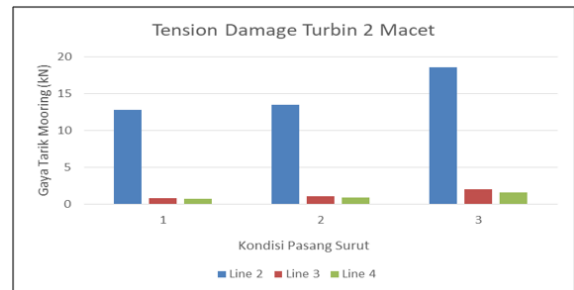
Arah Arus (derajat)	Arah Gelombang (derajat)	Simpangan Terjauh Tali <i>Mooring</i> (m)					
		Surge			Sway		
		Line2	Line3	Line4	Line2	Line3	Line4
180	22.5	10.5	15.564	-16.542	8.5	8.5	-8.5
		10.5	13.827	-14.44	8.5	8.5	-8.5
		10.5	-11.01	-11.69	8.5	8.5	-8.5

Pada kondisi *damage* tali *mooring* menjadi tidak simetris, hal ini mengakibatkan perbedaan gaya tarik pada setiap tali *mooring*. *Tension mooring* pada kondisi *damage* statik dapat dilihat pada Tabel 18

Tabel 18 *Tension Mooring* Kondisi *Damage* Statik

Kondisi <i>Damage</i>	Pasang Surut	Tali <i>Mooring</i>			
		Line 1	Line 2	Line 3	Line 4
Line 1	Surut		0.218	0.206	0.215
	MSL		0.243	0.224	0.238
	Pasang		0.306	0.247	0.291

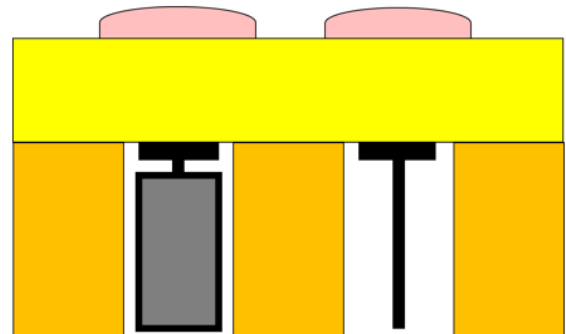
Hasil gaya tarik tali *mooring* pada kondisi *damage* dinamik di setiap *load case*, terdapat pada Gambar 28. Berdasarkan grafik tersebut, gaya tarik maksimal *mooring* adalah 18.52 kN atau 11.43% MBL.



Gambar 28 *Tension Mooring* Kondisi *Damage* Dinamik

3. Kondisi *Intact* 1 Turbin Macet

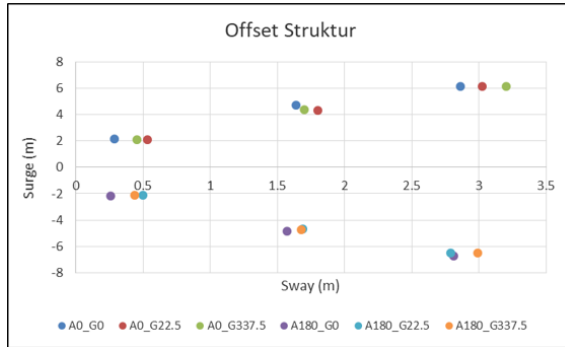
Pada pemodelan ini, 1 turbin dimodelkan dalam keadaan macet dan turbin lainnya berputar. Ilustrasi pemodelan 1 turbin macet dapat dilihat pada Gambar 29 di bawah ini:



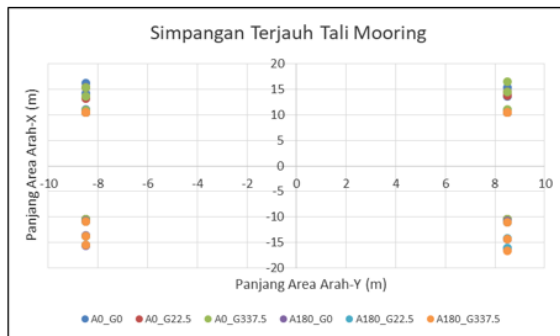
Gambar 29 Ilustrasi 1 Turbin Macet

Analisis statik pada kedalaman perairan surut, MSL, dan pasang tidak membuat struktur mengalami *offset surge* maupun

sway saat kondisi statik. Untuk hasil *offset* struktur dan pergerakan tali *mooring* disemua kondisi pasang surut, arah datang gelombang dan arus pada kondisi *intact* 1 turbin macet lihat **Gambar 30** dan **Gambar 31**.



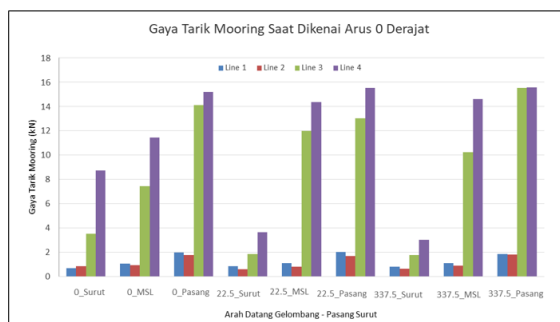
Gambar 30 Offset Struktur Kondisi 1 Turbin Macet



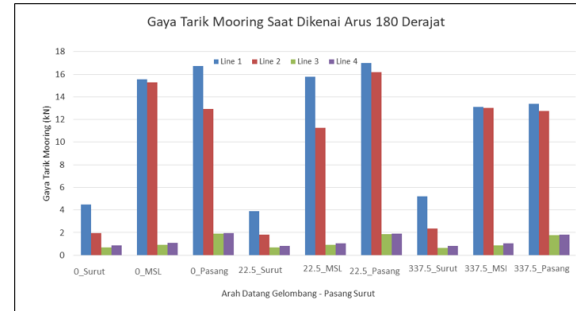
Gambar 31 Simpangan Terjauh Tali *Mooring* Kondisi 1 Turbin Macet

Offset maksimal struktur *surge* adalah -6.75 m, sedangkan maksimal *offset* sway adalah 3.16 m. Simpangan terjauh tali *mooring* yang dicapai adalah -16.57 m untuk arah-X dan 8.5 m untuk arah-Y yang merupakan titik *anchor*.

Tension statik pada pemodelan kondisi *intact* 1 turbin macet memiliki nilai yang sama dengan pemodelan *intact* 2 turbin macet.



Gambar 32 Gaya Tarik *Mooring* Saat Dikenai Arus 0°



Gambar 33 Gaya Tarik *Mooring* Saat Dikenai Arus 180°

Berdasarkan **Gambar 32** dan **Gambar 33** gaya tarik *Fairlead* maksimal adalah 17 kN atau 10.48% MBL, gaya tarik tersebut terjadi pada saat kondisi arus mengenai struktur dari arah arus 180° dan gelombang 22.5° *line 1*.

4. Kondisi *Damage* 1 Turbin Macet

Berdasarkan **Tabel 19**, *load case* yang mengakibatkan gaya tarik maksimal pada tali *mooring* adalah arah arus 180° gelombang 22.5° kondisi pasang *line 1* mengalami *damage*.

Tabel 19 Skenario Pemilihan *Failed Line* untuk Kondisi 1 Turbin Macet

Arah Arus (deg)	Arah Gelombang (deg)	Pasang Surut	Failed Line	%MBL	Max. Tension (kN)
0	0	Surut (22.5 m)	Line 4	3.54	5.739
		MSL (24 m)	Line 4	7.07	11.453
		Pasang (25.5 m)	Line 4	9.38	15.2
	22.5	Surut (22.5 m)	Line 4	7.41	12
		MSL (24 m)	Line 4	8.87	14.375
		Pasang (25.5 m)	Line 4	9.59	15.539
	337.5	Surut (22.5 m)	Line 4	1.87	3.031
		MSL (24 m)	Line 4	9.59	15.531
		Pasang (25.5 m)	Line 4	9.62	15.58
180	0	Surut (22.5 m)	Line 1	9.43	15.28
		MSL (24 m)	Line 1	9.59	15.534
		Pasang (25.5 m)	Line 1	9.71	15.729
	22.5	Surut (22.5 m)	Line 1	9.73	15.761
		MSL (24 m)	Line 1	9.99	16.19
		Pasang (25.5 m)	Line 1	10.48	17
	337.5	Surut (22.5 m)	Line 1	8.05	13.033
		MSL (24 m)	Line 1	8.09	13.108
		Pasang (25.5 m)	Line 1	8.26	13.374

Nilai *offset* statik pada kondisi *damage* 1 turbin macet bernilai sama dengan *offset* statik pada kondisi *damage* pemodelan *mooring* 2 turbin macet. Untuk kondisi dinamik *offset* dan pergerakan area tali maksimal seperti **Tabel 20** dan **Tabel 21**.

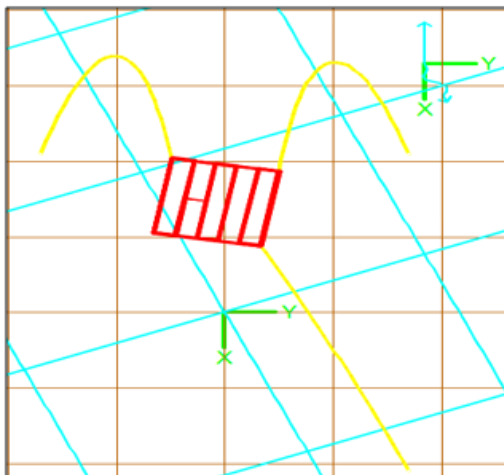
Tabel 20 Offset Struktur Dinamik Kondisi *Damage* 1 Turbin Macet

Arah Arus (derajat)	Arah Gelombang (derajat)	Pasang Surut	Offset Maksimal (m)		Maksimal Rotasi (derajat)
			Surge	Sway	
180	22.5	Surut (22.5 m)	-7.6	-2.766	-17.1
		MSL (24 m)	-5.4	-0.8	-8.35
		Pasang (25.5 m)	-3.17	-0.18	-8.22

Tabel 21 Simpangan Terjauh Tali Mooring

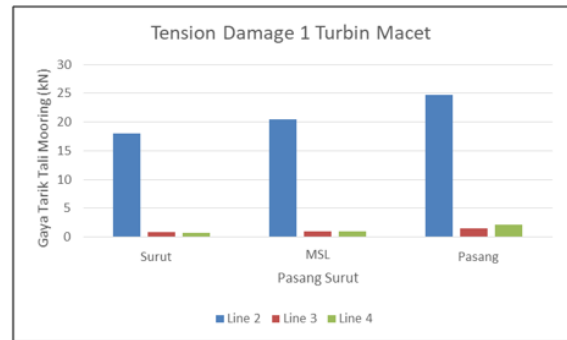
Arah Arus (derajat)	Arah Gelombang (derajat)	Simpangan Terjauh Tali Mooring (m)					
		Surge			Sway		
		Line2	Line3	Line4	Line2	Line3	Line4
180	22.5	10.5	-16.08	-17.27	8.5	8.5	-8.5
		10.5	-15.14	-15.52	8.5	8.5	-8.5
		10.5	-11.75	-11.162	8.5	8.5	-8.5

Offset surge maksimal struktur adalah -7.6 m pada kondisi perairan surut, offset sway maksimal yang dicapai adalah -2.766, dan yaw maksimal adalah -17.1°. Gambar 34 menunjukkan ilustrasi struktur *damage* 1 turbin macet.



Gambar 34 Struktur Dikenai Gelombang 22.5° - Arus 180° *Damage* 1 Turbin Macet.

Nilai *Tension* statik pada kondisi *damage* 1 turbin macet bernilai sama dengan *Tension* statik pada kondisi *damage* pemodelan *mooring intact* 2 turbin macet. Disimpulkan bahwa ketika kondisi loadcase arus 180° dan gelombang 22.5° gaya tarik maksimal terjadi pada *line 2* saat kondisi perairan pasang, yakni sebesar 24.662 kN atau 15.22% MBL.



Gambar 35 Gaya Tarik Dinamik pada *Mooring* Kondisi *Damage* 1 Turbin Macet

Dari Tabel 22 sampai Tabel 24 dapat disimpulkan bahwa kondisi paling kritis terjadi ketika kondisi 1 turbin macet dan tali *mooring* putus (*damage*) secara bersamaan.

Tabel 22 Kesimpulan Hasil Pemodelan Kondisi Surut

Hasil Pemodelan di Kedalaman Perairan Surut	Intact		Damage	
	2 Turbin Macet	1 Turbin Macet	2 Turbin Macet	1 Turbin Macet
Gaya Tarik Maksimal (kN)	7.462	8.739	15.8	16
Persentase dari MBL (%)	4.6	5.39	9.7	9.8
Offset Surge Maksimal (m)	7.45	-6.75	-7.635	-7.6
Offset Sway Maksimal (m)	-2.97	3.16	-2.75	-2.766
Yaw Maksimal (deg)	7.39	-11.38	-16.638	-17.1
Simpangan Maks. Tali Mooring Arah X (m)	16.75	16.57	-16.542	-17.27
Simpangan Maks. Tali Mooring Arah Y (m)	8.5	8.5	8.5	8.5

Tabel 23 Kesimpulan Hasil Pemodelan Kondisi MSL

Hasil Pemodelan di Kedalaman Perairan MSL	Intact		Damage	
	2 Turbin Macet	1 Turbin Macet	2 Turbin Macet	1 Turbin Macet
Gaya Tarik Maksimal (kN)	11.86	15.761	13.465	20.43
Persentase dari MBL (%)	7.32	9.72	8.31	12.34
Offset Surge Maksimal (m)	5	4.737	-4.976	-5.4
Offset Sway Maksimal (m)	1.59	1.7	-1.523	-0.8
Yaw Maksimal (deg)	5.4	9	-9.037	-8.35
Simpangan Maks. Tali Mooring Arah X (m)	14.44	14.53	13.465	-15.52
Simpangan Maks. Tali Mooring Arah Y (m)	8.5	8.5	8.5	8.5

Tabel 24 Kesimpulan Hasil Pemodelan Kondisi Pasang

Hasil Pemodelan di Kedalaman Perairan Pasang	Intact		Damage	
	2 Turbin Macet	1 Turbin Macet	2 Turbin Macet	1 Turbin Macet
Gaya Tarik Maksimal (kN)	12.9	17	18.5	24.662
Persentase dari MBL (%)	7.96	10.84	11.43	15.22
Offset Surge Maksimal (m)	2.2	2.15	-2.73	-3.17
Offset Sway Maksimal (m)	0.24	0.286	-0.624	-0.18
Yaw Maksimal (deg)	0.71	3.13	-7.68	-8.22
Simpangan Maks. Tali Mooring Arah X (m)	11.03	11.04	-11.69	-11.75
Simpangan Maks. Tali Mooring Arah Y (m)	8.5	8.5	8.5	8.5

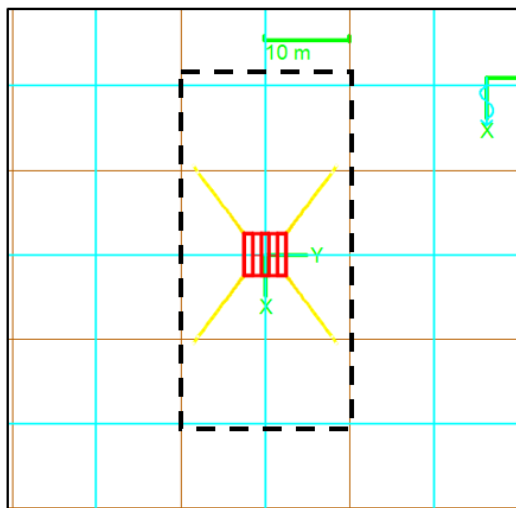
Kondisi 1 turbin macet menyebabkan kondisi struktur tidak seimbang antara kedua sisi kira dan kanan. Hal itu menyebabkan rotasi

yaw pada struktur 1 turbin macet lebih besar dari 2 turbin macet. Rotasi yaw ini menyebabkan pergerakan struktur ke arah y (sway) area tali *mooring* yang dibutuhkan lebih besar. *Tension* maksimal pada kondisi *damage* terjadi saat *load case* arus 180° gelombang 22.5° perairan pasang yakni 24.662 kN (15.22 % MBL) kondisi 1 turbin macet. *Surge* maksimal terjadi pada *load case* arus 0° gelombang 0° perairan surut yakni 7.35 m. Yaw maksimal terdapat pada *load case* arus 0° gelombang 337.5° perairan surut yakni -17.1°. Pada *load case* yang sama terjadi gerak sway maksimal adalah 3.203 m untuk kondisi *intact* 1 turbin macet. Jika daerah instalasi satu turbin dinyatakan dalam bentuk persegi panjang maka radius area dihitung dari titik global adalah

$$x = 17.27 \text{ m} + \text{safety factor (20\%)} \approx 21 \text{ m}$$

$$y = 8.5 \text{ m} + \text{safety factor (20\%)} \approx 10 \text{ m}$$

Sehingga luas area pemasangan suatu turbin adalah 42 m x 20 m = 840 m², dan jarak aman pemasangan 2 turbin adalah 42 m untuk arah X dan 20 m untuk arah Y.



Gambar 36 Radius Aman Pemasangan Turbin

Jumlah turbin yang dapat dibangun adalah:

$$P = \frac{657}{42} = 15 \quad \text{Baris arah X}$$

$$L = \frac{347}{20} = 17 \quad \text{Baris arah Y}$$

Sehingga banyaknya turbin yang dapat dibangun adalah 255 turbin. Luas efektif turbin yang digunakan adalah 1 x 1.88 sejumlah 2 buah. *Cut in speed* yang digunakan adalah syarat batas turbin yaitu 0.5 m/s (H.Syahputra, 2014). Turbin diasumsikan memiliki nilai efisiensi 30% (diadaptasi dari jenis *Marine Current Turbine Sea Gen*) Sehingga potensi daya teknis dari turbin arus pasang surut terapung di perairan Selat Larantuka adalah:

$$P = 0.5 \times \eta \times \rho \times A \times V^3$$

$$P = 0.5 \times 0.3 \times 1025 \times (1 \times 1.88 \times 2) \times \sum V^3$$

$$P = 36.15 \text{ MWh/turbin dalam 1 tahun}$$

Jika memaksimalkan area yang direncanakan, maka potensi praktis yang dapat dihasilkan dari pembangunan 255 turbin dalam 1 tahun adalah 36.15 MWh x 255 turbin atau setara dengan **9.218 GWh/tahun**. Maka produksi listrik turbin arus pasang surut terapung ini hanya berkontribusi 1% dari produksi listrik oleh PLN di Provinsi Nusa Tenggara Timur.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil desain, pemodelan dan analisis yang dilakukan, beberapa hal yang dapat disimpulkan diantaranya:

1. Dimensi turbin arus pasut memenuhi syarat kestabilan statik ($GM > 0$).
2. RAO struktur turbin arus pasang surut telah memenuhi struktur pada umumnya, yakni *heave* senilai 1 ketika frekuensi kecil, nilai *heave* akan kongruen menuju 0 ketika nilai frekuensi gelombang besar.
3. Dari keempat pemodelan yang dilakukan, kondisi paling kritis terjadi ketika kondisi turbin mengalami 1 turbin macet dan 1 tali *mooring* putus (*damage*).
4. Jarak aman pemasangan antar turbin arah X adalah 42 m, dan 20 m arah Y.

Adapun saran Tugas Akhir ini untuk mendapatkan hasil yang lebih komprehensif adalah sebagai berikut:

1. Bentuk *floater* didesain lebih *streamline* untuk mengurangi gaya *drag* pada struktur.
2. Melakukan analisis jangkar untuk *mooring*.
3. Melakukan pemodelan dengan menambahkan beban lainnya, seperti kabel penyalur listrik ke daratan agar dapat disesuaikan dengan keadaan aktual.

DAFTAR PUSTAKA

Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook Of Offshore Engineer*. Amsterdam: Elsevier.Ltd.

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics For Engineer And Scientist*. Danvers: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Faltinsen, O. (1999). *Sea Loads On Ships And Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.

Gerwick Jr., Ben C. 2007. *Construction of Marine and Offshore Structures*. San Fransisco: CRC Press

Ajiwibowo, H., Kanisius, S., Munawir, B.P., Wurjanto, A. (2017): Identifcarion of Potentioal Sites for Harvesting Tidal Current Power in Kelian Cape, Kelabat Bay, and Lrantuka Strait, *International Journal of GEOMATE*, **14**, 103-111.

Kreyzig, Erwin. 2006. *Advanced Engineering Mathematics*. Singapura: John Wiley & Sons

DNV-GL. (2015). *DNVGL-OS-E403 Offshore Loading Buoys*. Oslo: DNVGL.

DNV-GL. (2015). *DNVGL-OS-E301 Position Mooring*. Oslo: DNVGL.

DNV-GL. (2010). *DNVGL-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads*. Oslo: DNVGL

Syahputra, H. (2014): Kajian Potensi Arus Laut Sebagai Energi Pembangkit Listrik di Selat Lrantuka Flores Timur, NTT, Buletin Oseanografi, 3, 1-8

OCIMF *Mooring Equipment Guidelines* (Second Edition – 1997). London: WITHERBY & CO. LTD

Centrum ITB. 2013. *Water Current Turbine*. Laporan tidak dipublikasikan. Bandung: Centrum ITB

Orcina, Manual Orcaflex Version 10.1a. Daltongate: Orcina Ltd.

Ultramarine, inc. 2013. *Reference Manual for MOSES*.