

PERANCANGAN STRUKTUR SINGLE POINT MOORING (SPM) DI LEPAS PANTAI LAMPUNG TIMUR

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

Oleh
Dimas Nabil Simamora
NIM 15516065



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

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir Sarjana

PERANCANGAN STRUKTUR SINGLE POINT MOORING (SPM) DI LEPAS PANTAI LAMPUNG TIMUR

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

Bandung, 28 September 2020

Penulis



Dimas Nabil Simamora

NIM 15516065



Bandung, 28 September 2020

Pembimbing

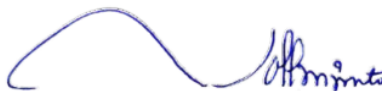


Krispaldi Idris, Ph.D.

NIP 19581220 198601 1 001

Mengetahui:

Program Studi Teknik Kelautan
Ketua,



Andojo Wurjanto, Ph.D.

NIP 19600330 198503 1 007

PERANCANGAN STRUKTUR SINGLE POINT MOORING (SPM) DI LEPAS PANTAI LAMPUNG TIMUR

Design of Single Point Mooring (SPM) Structure in Offshore East Lampung

Dimas Nabil Simamora¹ dan Ir. Krisnaldi Idris, Ph.D²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10 Bandung 40312

dimas.simamora@hotmail.com¹ dan krisnaldi2@gmail.com²

Abstrak

Dalam operasi penyimpanan dan penyaluran minyak bumi, FSO (*Floating Storage and Offloading*) dilengkapi oleh beberapa jenis komponen salah satunya adalah SPM (*Single Point Mooring*) yang merupakan struktur terapung. Pada Tugas Akhir ini dilakukan perancangan struktur SPM agar dapat beroperasi sesuai dengan kondisi lingkungan dimana SPM berada dan memastikan kurvatur maksimum dari *flexible hose* pada SPM memenuhi standar yang diberikan produsen *flexible hose*. Selain SPM dan *flexible hose*, terdapat komponen lain yang didesain seperti *catenary mooring*, *hawser mooring*, dan *float* untuk *flexible hose*. Dalam proses perancangan dilakukan perhitungan kestabilan SPM, konfigurasi *catenary mooring* pada SPM, *Minimum Breaking Load* (MBL) dari *mooring*, simpangan maksimum dari SPM, dan kurvatur maksimum *flexible hose* yang keseluruhannya disertai dengan proses iterasi. Pemodelan yang dilakukan adalah pemodelan struktur SPM, FSO, komponen-komponen SPM, dan beban lingkungan periode ulang 100 tahun. Beban lingkungan terdiri dari beban gelombang, beban arus (*wind induced current*), dan beban angin. Pemodelan beban lingkungan dilakukan untuk mengetahui apakah dengan nilai *effective tension mooring* dan *hawser*, nilai simpangan SPM, dan nilai kurvatur *flexible hose* yang diperoleh, SPM dan komponennya dapat beroperasi dengan baik sesuai kondisi lingkungan yang dimodelkan. Berdasarkan analisis nilai-nilai tersebut, diperoleh bahwa nilai-nilai tersebut memenuhi kondisi agar SPM dan komponennya dapat beroperasi dengan baik.

Kata Kunci: *SPM, Pemodelan, Beban Lingkungan, Effective Tension, Simpangan, Kurvatur*

Abstract

In petroleum storage and distribution operations, the FSO (Floating Storage and Offloading) is equipped with several types of components, one of those components is SPM (Single Point Mooring) which is a floating structure. In this final project, the SPM structure design is carried out so that it can operate in accordance with the environmental conditions where the SPM is located and ensures the maximum curvature of the flexible hose in the SPM meets the standards given by the flexible hose manufacturer. In addition to SPM and flexible hoses, there are other components designed such as catenary mooring, hawser mooring, and float for flexible hoses. In the design process, SPM stability is calculated, catenary mooring configuration of the SPM, Minimum Breaking Load (MBL) of the mooring, maximum offset of the SPM, and maximum curvature of flexible hose, all of which are accompanied by an iteration process. The modeling carried out is modeling the structure of the SPM, FSO, SPM components, and environmental loads for the 100 year return period. Environmental loads consist of wave loads, wind induced current, and wind loads. Environmental load modeling is carried

out to determine whether the value of effective mooring and hawser tension, SPM deviation value, and flexible hose curvature value obtained, SPM and its components can operate properly according to the environmental conditions being modeled. Based on the analysis of these values, it is found that these results meet the conditions so the SPM and its components can operate properly.

Keywords: SPM, Modeling, Environmental Load, Effective Tension, Offset, Curvature

PENDAHULUAN

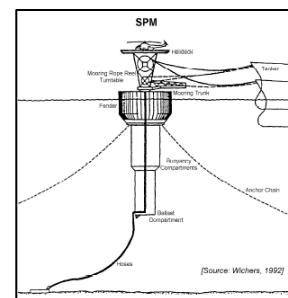
Dalam industri minyak bumi, terdapat tahapan penyimpanan dan penyaluran minyak bumi (*storage and offloading*) yang menggunakan fasilitas terapung salah satunya FSO (*Floating Storage and Offloading*). FSO digunakan dalam menyimpan dan menyalurkan hasil eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi di lepas pantai yang kemudian disalurkan ke fasilitas pengolahan di darat. Saat ini telah banyak anjungan lepas pantai di Indonesia yang fungsinya telah digantikan oleh FSO maupun FPSO (*Floating, Production, Storage, and Offloading*). Salah satu FSO yang ada di Indonesia tepatnya di Lepas Pantai Lampung.

Untuk menunjang kegiatan penyimpanan dan penyaluran hasil eksplorasi dan eksploitasi minyak, FSO dilengkapi oleh beberapa jenis komponen yang dalam kasus Tugas Akhir ini adalah SPM (*Single Point Mooring*). SPM akan dilengkapi *flexible hose* untuk menyalurkan minyak bumi dari PLEM (*Pipeline End Manifold*) ke FSO dan *mooring* untuk menjaga SPM berada pada posisi yang aman. Perancangan akan meliputi bagian-bagian dari SPM seperti *catenary mooring*, *flexible hose*, *floaters*, dan FSO yang tersambung pada SPM. Dalam Tugas Akhir ini, SPM dirancang dengan *mooring* tipe CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*) dan layout *flexible hose* tipe Lazy-S akan dirancang sedemikian rupa sehingga mampu menerima beban lingkungan yang bekerja pada SPM.

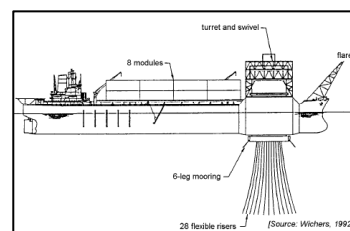
TEORI DAN METODOLOGI

Struktur Terapung

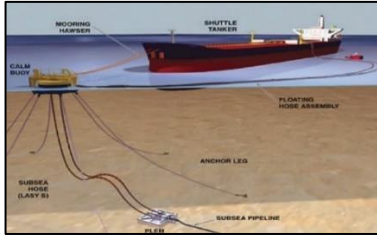
Struktur terapung adalah struktur yang dibangun dan beroperasi di perairan yang dapat bergerak maupun diam dalam posisi tertentu. Contoh dari struktur terapung diantaranya adalah SPM (*Single Point Mooring*), FPSO (*Floating, Production, Storage, and Offloading*), CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*), dan lain-lain. Berikut ilustrasi dari berbagai contoh struktur terapung pada **Gambar 1** sampai **Gambar 3**.



Gambar 1 *Single Point Mooring* (IHEE Delft 1992, Part 1: Introduction, Wichers, 1992)



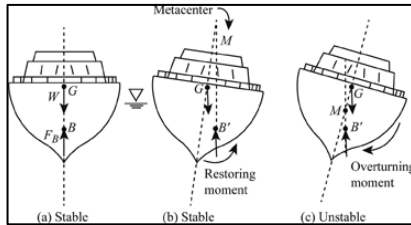
Gambar 2 *Floating, Production, Storage, and Offloading* (IHEE Delft 1992, Part 1: Introduction, Wichers, 1992)



Gambar 3 Catenary Anchor Leg Mooring
(<https://epcmholdings.com/>, 2020)

Stabilitas Struktur Terapung

Kondisi keseimbangan atau kondisi ekuilibrium terbagi menjadi 3 jenis yaitu keseimbangan stabil, keseimbangan netral, dan keseimbangan tidak stabil seperti yang disajikan pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Stabilitas Struktur Terapung
(chegg.com, 2020)

Untuk kondisi sudut putar yang kecil pada struktur terapung, besar jarak antara titik pusat gaya gravitasi dengan titik metasentris (GM) dan jarak antara titik pusat gaya apung dengan titik metasentris (BM) secara berturut-turut ditunjukkan pada persamaan (1) dan (2) (Journée & Massie, 2001: 54 & 57).

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (1)$$

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} \quad (2)$$

dimana:

$\overline{GM}$ = Jarak titik pusat gravitasi ke titik metasentris [m]

$\overline{KB}$ = Jarak dasar struktur (*keel*) ke titik metasentris [m]

$\overline{BM}$ = Jarak titik pusat gaya apung ke titik metasentris [m]

$\overline{KG}$ = Jarak dasar struktur (*keel*) ke titik pusat gravitasi [m]

I = Momen inersia dari bidang air [m⁴]

∇ = Volume struktur terapung yang terendam air laut [m³]

Gaya Gelombang (Teori Morison)

Persamaan Morison mengasumsikan bahwa gaya inersia dan gaya seret (*drag force*) diperhitungkan dalam perhitungan gaya gelombang. Dalam menentukan gaya inersia dan gaya seret, diperlukan koefisien inersia (C_I) untuk gaya inersia dan koefisien seret (C_D) untuk gaya seret yang keduanya ditentukan melalui eksperimen. Persamaan Morison ditunjukkan pada persamaan (3) untuk gaya gelombang per segmen dan persamaan (4) untuk gelombang total (Chakrabarti, 1987: 170-171).

$$df = \frac{1}{2} C_D \rho D |u| u ds + C_I \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\partial u}{\partial t} ds \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{2} C_D \rho A |u| u + C_I \rho \nabla \dot{u} \quad (4)$$

dimana:

df = Gaya gelombang per segmen [N/m]

df_D = Gaya seret per segmen [N/m]

df_I = Gaya inersia per segmen [N/m]

f = Gaya gelombang [N]

ρ = Massa jenis air laut [kg/m³]

C_D = Koefisien seret

D = Diameter struktur [m]

A = Luas proyeksi penampang struktur [m²]

u = Kecepatan partikel air [m/s]

C_I = Koefisien inersia

∇ = Volume struktur yang terendam air laut [m³]

$\dot{u}$ = Percepatan partikel air [m/s²]

ds = Elemen panjang dari struktur

Gaya seret (*drag force*) pada persamaan (4) masih berbentuk persamaan non-linear karena terdapat perkalian antara $|u|$ dan u . Untuk mengubah gaya seret menjadi persamaan linear, nilai koefisien seret (C_D) harus dilinearisasi dengan *Fourier series*. Sehingga koefisien seret (C_D) berubah menjadi koefisien seret linear (C_{DL}) seperti pada persamaan (5) dan persamaan gaya seret seperti pada persamaan (6) (Chakrabarti, 1987: 173-174).

$$C_{DL} = \frac{8}{3\pi} C_D u_{max} \quad (5)$$

$$f_{DL} = \frac{1}{2} C_{DL} \rho A u \quad (6)$$

Persamaan Vibrasi Mekanik

Gaya luar atau gaya eksitasi yang dihitung untuk menentukan respon struktur terapung merupakan gaya gelombang (sebagai gaya utama), gaya arus, dan gaya angin. Dalam analisis SDOF, diperlukan persamaan gerak seperti pada persamaan (7) (Chakrabarti, 1987: 332).

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_o \sin \omega t \quad (7)$$

dimana:

- m = Massa struktur terapung [kg]
- C = Redaman (*damping*) struktur terapung [kg/s]
- K = Kekakuan (*stiffness*) struktur terapung [kg/s²]
- $\ddot{x}$ = Percepatan struktur terapung [m/s²]
- $\dot{x}$ = Kecepatan struktur terapung [m/s]
- x = Perpindahan struktur terapung [m]
- F_o = Gaya eksitasi [N]
- ω = Frekuensi gaya eksitasi [rad/s]
- t = Seri waktu [s]

Setelah persamaan (7) dapat disusun, maka amplitudo dari respon gerak struktur terapung, beda fasa dari respon gerak struktur terapung, persamaan gerak harmonik dapat ditentukan

secara berturut-turut pada persamaan (8), persamaan (9), dan persamaan (10) (Chakrabarti, 1987: 336).

$$X = \frac{F_o}{\sqrt{(K - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2}} \quad (8)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{C\omega}{K - m\omega^2} \right) \quad (9)$$

$$x(t) = X \sin(\omega t - \beta) \quad (10)$$

dimana:

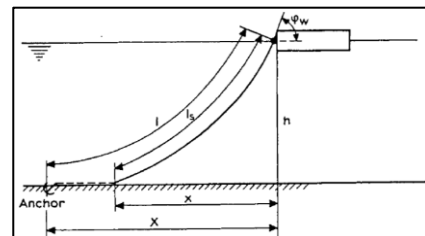
X = Amplitudo dari respon gerak struktur terapung [m]

β = Beda fasa sudut harmonik gaya eksitasi [rad]

$x(t)$ = Persamaan respon gerak harmonik struktur terapung [m]

Metode Perhitungan Gaya dan Konfigurasi Mooring

Dalam analisis mooring, perlu dihitung gaya-gaya yang bekerja pada *mooring* merupakan gaya tarik (*tension*). Selain itu, perlu juga perhitungan untuk panjang total kabel *mooring* (l), panjang kabel *mooring* yang melayang dalam air (l_s), jarak horizontal antara titik menempelnya *mooring* pada struktur ke jangkar (X), jarak horizontal antara titik menempelnya *mooring* pada struktur ke titik kontak *mooring* dengan dasar laut (x), dan jarak vertikal titik menempelnya *mooring* pada struktur ke dasar laut (h). Komponen-komponen tersebut dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Catenary Mooring (Sea Loads on Ships and Offshore Structure, Faltinsen, 1990)

Besar *tension* kabel arah horizontal (T_H) adalah konstan sepanjang kabel *mooring* dan nilainya disebut sebagai pra-tegang horizontal (*horizontal pre-tension*). Sementara, besar *tension* arah vertikal (T_Z) dan nilai maksimum dari *tension* kabel *mooring* (T_{max}) dihitung dengan persamaan (11) dan (12) (Faltinsen, 1990: 261).

$$T_Z = ws \quad (11)$$

$$T_{max} = T_H + wh \quad (12)$$

dimana:

T_Z = *Tension* kabel arah vertikal [N]

w = Berat kabel *mooring* per satuan panjang [N/m]

s = Panjang kabel *mooring* [m]

T_{max} = *Tension* maksimum dari kabel *mooring* [N]

h = Kedalaman laut dimana kabel *mooring* berada [m]

Lalu, untuk konfigurasi *mooring* dihitung dengan persamaan (13) sampai persamaan (16) (Faltinsen, 1990: 261-263).

$$s = \frac{T_H}{w} \sinh\left(\frac{w}{T_H} x\right) \quad (13)$$

$$h = \frac{T_H}{w} \left[\cosh\left(\frac{w}{T_H} x\right) - 1 \right] \quad (14)$$

$$l_{min} = h \left(\frac{2T_{max}}{wh} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$X = l - h \left(1 + \frac{2T_H}{wh} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{T_H}{w} \cosh^{-1} \left(1 + \frac{wh}{T_H} \right) \quad (16)$$

dimana:

s = Panjang kabel *mooring* [m]

T_H = *Tension* kabel arah horizontal [N]

w = Berat kabel *mooring* per satuan panjang [N/m]

h = Kedalaman laut dimana kabel *mooring* berada [m]

x = Jarak horizontal antara titik menempelnya *mooring* pada struktur ke titik kontak *mooring* dengan dasar laut [m]

l_{min} = Panjang minimum kabel *mooring* [m]

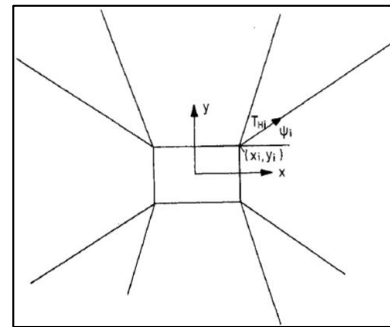
l = Panjang total kabel *mooring* [m]

X = Jarak horizontal antara titik menempelnya *mooring* pada struktur ke jangkar [m]

Untuk nilai kekakuan arah *surge* dari 1 kabel *mooring* (C_{11}) dihitung dengan persamaan (17) (Faltinsen, 1990: 264).

$$C_{11} = \frac{dT_H}{dX} = w \left[\frac{-2}{\left(1 + \frac{2T_H}{wh}\right)^{\frac{1}{2}}} + \cosh^{-1} \left(1 + \frac{wh}{T_H} \right) \right]^{-1} \quad (17)$$

Pada kasus sistem *spread mooring* seperti pada , nilai kekakuan total baik arah *surge* (C_{11}) dan arah *sway* (C_{22}) berturut-turut dihitung dengan persamaan (18) dan (19) (Faltinsen, 1990: 266).



Gambar 6 Ilustrasi Spread Mooring (Sea Loads on Ships and Offshore Structure, Faltinsen, 1990)

$$C_{11} = \sum_{i=1}^n k_i \times \cos^2 \psi_i \quad (18)$$

$$C_{22} = \sum_{i=1}^n k_i \times \sin^2 \psi_i \quad (19)$$

dimana:

C_{11} = Kekakuan total arah *surge* dari kabel *mooring* [kg/s²]

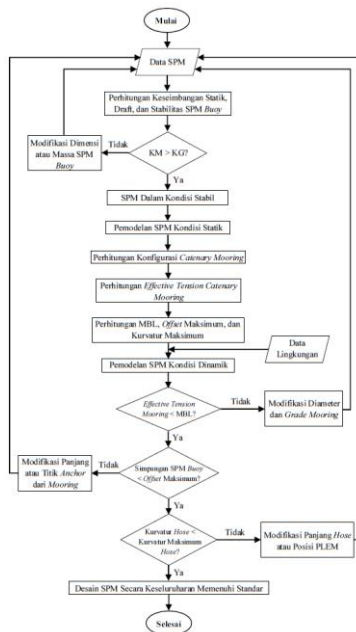
C_{22} = Kekakuan total arah sway dari kabel mooring [kg/s²]

k_i = Nilai kekakuan mooring ke- i

ψ_i = Sudut antara arah surge (sumbu-x) dengan arah mooring (°)

Metodologi

Metodologi yang digunakan pada Tugas Akhir ini digambarkan pada diagram alir (*flowchart*) yang disajikan pada **Gambar 7**.



Gambar 7 Diagram Alir Metodologi Tugas Akhir

HASIL DAN ANALISIS

Data Lingkungan

1. Data Angin

Data angin yang digunakan adalah data angin pada ketinggian 10 m diatas SWL dengan arah angin dari 8 arah mata angin. Berdasarkan data dari GL NOBLE DENTON, berikut data angin untuk periode ulang 100 yang disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Data Angin Periode Ulang 100 Tahun (Report Offshore Sumatera

Metocean Study, Report No. L25165 Rev.1, 2014)

Karakteristik Angin	U	TL	T	TG	S	BD	B	BL
Rata-Rata per Jam (m/s)	14	11	15	14	10	13	15	16
Rata-Rata 10 Menit (m/s)	16	12	16	15	11	14	16	17
Rata-Rata 1 Menit (m/s)	17	12	17	16	12	15	17	19
Gust Wind 3 Detik (m/s)	19	14	19	17	13	17	19	21
Squalls								
Rata-Rata 1 Menit (m/s)	34	34	34	34	34	34	34	34
Gust Wind 3 Detik (m/s)	44	44	44	44	44	44	44	44

2. Data Gelombang

Data gelombang yang digunakan adalah data Sea State berdurasi 3 jam dalam 8 arah mata angin. Pada data gelombang ini digunakan spektrum gelombang JONSWAP dengan nilai gamma 1,5. Berdasarkan data dari GL NOBLE DENTON, berikut data gelombang untuk periode ulang 100 tahun yang disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Data Gelombang Periode Ulang 100 Tahun (Report Offshore Sumatera Metocean Study, Report No. L25165 Rev.1, 2014)

Sea State (3 jam)	U	TL	T	TG	S	BD	B	BL
Hmax (m)	5	3,3	5,7	4,3	2,9	4,6	5,2	5,6
Tmax (s)	6,6	5,6	7	6,3	5,3	6,4	6,7	6,9
Hs (m)	2,5	1,6	2,9	2,2	1,4	2,3	2,6	2,8
Ts (s)	5,4	4,3	5,9	4,9	4	5	5,5	5,8
Tp (s)	7,2	6,1	7,6	6,8	5,8	7	7,3	7,5

3. Data Arus

Data arus yang digunakan adalah data arus per kedalaman dengan arah angin dari 8 arah mata angin. Berdasarkan data dari GL NOBLE DENTON, berikut data arus untuk periode ulang 100 tahun yang disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Data Arus Periode Ulang 100 Tahun (Report Offshore Sumatera Metocean Study, Report No. L25165 Rev.1, 2014)

Kecepatan Arus	U	TL	T	TG	S	BD	B	BL
Total Arus Permukaan (m/s)	1	0,6	0,7	0,9	1	0,7	0,7	1
Arus Kedalaman 5 m (m/s)	0,8	0,5	0,5	0,8	0,8	0,6	0,6	0,9
Arus Kedalaman 10 m (m/s)	0,7	0,4	0,4	0,7	0,7	0,5	0,5	0,7
Arus Kedalaman 20 m (m/s)	0,6	0,3	0,3	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6
Arus 1 m di atas seabed (m/s)	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5

Data SPM dan Komponennya

1. Data Vessel (FSO)

Berikut data dimensi dari FSO Federal II yang disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Data Dimensi FSO Federal II (Permanent Mooring Analysis, SSB-CAL-1114-010-R04, 2014)

Dimensi	Kondisi Draft FSO	
	Fully Loaded	Ballasted Loaded
Length Over All (LOA)	232,04 (m)	232,04 (m)
Length Between Perpendiculars (LPP)	222,064 (m)	222,064 (m)
Breadth Moulded / Lebar Kapal (B)	42 (m)	42 (m)
Depth Moulded / Tinggi Kapal (H)	20,3 (m)	20,3 (m)
Draft Rata-Rata	14,01 (m)	5,36 (m)
Draft Haluan	14,01 (m)	5,36 (m)
Draft Buritan	14,01 (m)	5,36 (m)
Displacement	110.031,2 (ton)	38.588,5 (ton)
KG (dari Keel)	10,65 (m)	9,82 (m)

2. Data SPM Buoy

Data SPM buoy yang didesain pada Tugas Akhir ini ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Data Single Point Mooring Buoy (SPM 1146 MOORING CHAIN ASSESMENT, No. 0436-BMC/M032-K12/P6/05-17, 2014)

Data SPM Buoy		
Besaran	Ukuran	Satuan
Massa CALM (m_{buoy})	303	ton
Diameter CALM (D_{buoy})	15	m
Tinggi CALM (h_{buoy})	4,8	m
Volume CALM (Vol_{buoy})	848,23	m ³

3. Data Hose

Data Hose yang didesain pada Tugas Akhir ini disajikan pada **Tabel 6**.

Tabel 6 Data Flexible Hose

Data Flexible Hose		
Besaran	Ukuran	Satuan
Massa Kosong Hose H3006 (m_{H3006})	2,043	ton
Massa Kosong Hose H3030 (m_{H3030})	1,843	ton
Diameter Dalam Hose H3006 ($D_{in, H3006}$)	0,49	m
Diameter Dalam Hose H3030 ($D_{in, H3030}$)	0,49	m
Panjang Hose H3006 (l_{H3006})	9,144	m
Panjang Hose H3030 (l_{H3030})	9,144	m
Panjang Hose H3006 Total ($l_{H3006, Total}$)	18,288	m
Panjang Hose H3030 Total ($l_{H3030, Total}$)	36,576	m
Panjang Hose Total ($l_{Hose, Total}$)	54,864	m
Volume Rongga Hose H3006 (Vol_{H3006})	3,449	m ³
Volume Rongga Hose H3030 (Vol_{H3030})	6,897	m ³
Massa Jenis Fluida Hose (ρ_{fluida})	862	kg/m ³
Massa Fluida Dalam H3006 (m_{H3006})	2,973	ton
Massa Fluida Dalam H3030 (m_{H3030})	5,945	ton
Massa Total H3006 ($m_{Total, H3006}$)	7,059	ton
Massa Total H3030 ($m_{Total, H3030}$)	13,317	ton
Berat Per Satuan Panjang H3006 (W_{H3006})	3,785	kN/m
Berat Per Satuan Panjang H3030 (W_{H3030})	3,571	kN/m
Buoyancy Per Satuan Panjang H3006 ($W_{buoyancy, H3006}$)	3,668	kN/m
Buoyancy Per Satuan Panjang H3030 ($W_{buoyancy, H3030}$)	3,398	kN/m

4. Data Float

Hasil dari pengolahan data float untuk 1 set flexible hose ditunjukkan pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Data Float Untuk 1 Set Flexible Hose

Data Float Untuk 1 Set Flexible Hose			
Besaran	Ukuran	Satuan	Letak Float
Berat End Float di Udara ($W_{end, float}$)	1,158	kN	-
Berat Body Float di Udara ($W_{body, float}$)	0,814	kN	-
Buoyancy End Float di Air ($W_{buoyancy, end, float}$)	2,276	kN	-
Buoyancy Body Float di Air ($W_{buoyancy, body, float}$)	2,06	kN	-
Jumlah End Float	4	unit	-
Jumlah Body Float	10	unit	-
Posisi End Float 1	7,864	z+ dari PLEM	H3006
Posisi End Float 2	9,864	z+ dari PLEM	H3030
Posisi End Float 3	15,864	z+ dari PLEM	H3030
Posisi End Float 4	17,864	z+ dari PLEM	H3030
Posisi Body Float 1	2,864	z+ dari PLEM	H3006
Posisi Body Float 2	3,864	z+ dari PLEM	H3006
Posisi Body Float 3	4,864	z+ dari PLEM	H3006
Posisi Body Float 4	5,864	z+ dari PLEM	H3006
Posisi Body Float 5	6,864	z+ dari PLEM	H3006
Posisi Body Float 6	10,864	z+ dari PLEM	H3030
Posisi Body Float 7	11,864	z+ dari PLEM	H3030
Posisi Body Float 8	12,864	z+ dari PLEM	H3030
Posisi Body Float 9	13,864	z+ dari PLEM	H3030
Posisi Body Float 10	14,864	z+ dari PLEM	H3030

5. Data Mooring

Data mooring yang didesain pada Tugas Akhir ini ditunjukkan pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Data Mooring Chain

Data Mooring		
Besaran	Ukuran	Satuan
Type Catenary Mooring	Studlink	-
Type Hawser Mooring	Studlink	-
Grade Catenary Mooring	RQ3-API	-
Grade Hawser Mooring	RQ3-API	-
Diameter Mooring (d)	152	mm
Berat Per Satuan Panjang Mooring di Udara ($W_{mooring}$)	4,962	kN/m
Buoyancy Per Satuan Panjang Mooring ($W_{buoyancy, mooring}$)	0,652	kN/m
Panjang Catenary Mooring ($l_{catenary}$)	75	m
Panjang Hawser Mooring (l_{hawser})	42	m
Panjang Catenary Mooring yang terbentang di air (s)	72,5	m
Jumlah Catenary Mooring	6	unit
Jumlah Hawser Mooring	2	unit
Arah Catenary Mooring 1 (True North Clockwise)	45	deg
Arah Catenary Mooring 2 (True North Clockwise)	135	deg
Arah Catenary Mooring 3 (True North Clockwise)	180	deg
Arah Catenary Mooring 4 (True North Clockwise)	225	deg
Arah Catenary Mooring 5 (True North Clockwise)	315	deg
Arah Catenary Mooring 6 (True North Clockwise)	0	deg
Arah Hawser Mooring 1 (True North Clockwise)	289,5	deg
Arah Hawser Mooring 2 (True North Clockwise)	301,5	deg
Breaking Load Catenary Mooring (RQ3-API)	15.552	kN
Breaking Load Hawser Mooring (RQ3-API)	15.552	kN

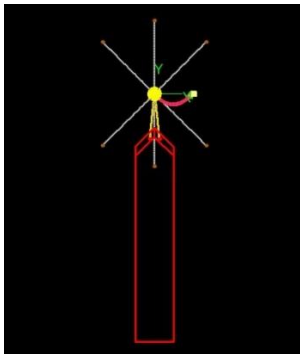
Model SPM Dengan FSO

Kasus pemodelan struktur SPM dan FSO yang dilakukan dalam Tugas Akhir disajikan pada Tabel 9.

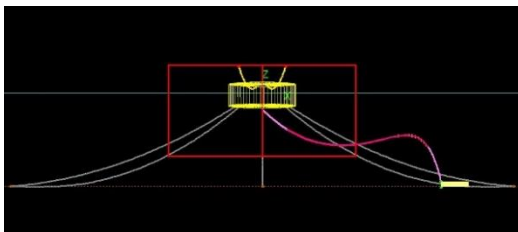
Tabel 9 Kasus Pemodelan Struktur SPM

Kasus Pemodelan Struktur SPM						
Kondisi	Tipe Gelombang	Arah Beban Gelombang	Arah Beban Arus	Arah Beban Angin	Durasi Pemodelan (s)	H (m) T (s)
All Intact	Reguler	Utara	Utara	Utara	80	2,5 7,2
All Intact	Reguler	Timur	Timur	Timur	80	2,9 7,6
All Intact	Reguler	Barat Daya	Barat Daya	Barat Daya	80	2,3 7
Damage	Reguler	Utara	Utara	Utara	80	2,5 7,2
Damage	Reguler	Timur	Timur	Timur	80	2,9 7,6
Damage	Reguler	Barat Daya	Barat Daya	Barat Daya	80	2,3 7
All Intact	Acak	Utara	Utara	Utara	270	2,5 5,4
All Intact	Acak	Timur	Timur	Timur	292	2,9 5,9
All Intact	Acak	Barat Daya	Barat Daya	Barat Daya	252	2,3 5
Damage	Acak	Utara	Utara	Utara	270	2,5 5,4
Damage	Acak	Timur	Timur	Timur	292	2,9 5,9
Damage	Acak	Barat Daya	Barat Daya	Barat Daya	252	2,3 5

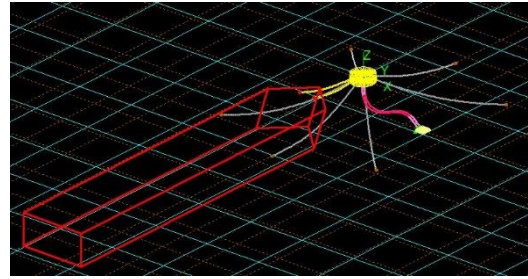
SPM dengan FSO didesain secara *weathervaning* sehingga arah kapal (FSO) bergantung pada arah beban lingkungan. Bentuk pemodelan dari SPM dengan FSO dalam kondisi statik *all intact* untuk arah beban lingkungan dari utara ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 10.



Gambar 8 Tampak Atas Model SPM dengan FSO Arah Utara

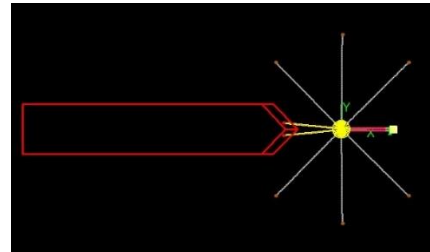


Gambar 9 Tampak Samping Model SPM dengan FSO Arah Utara

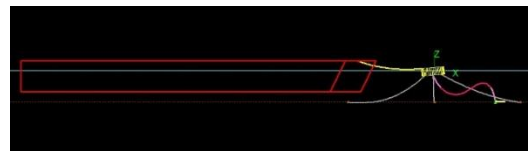


Gambar 10 Tampak Isometrik Model SPM dengan FSO Arah Utara

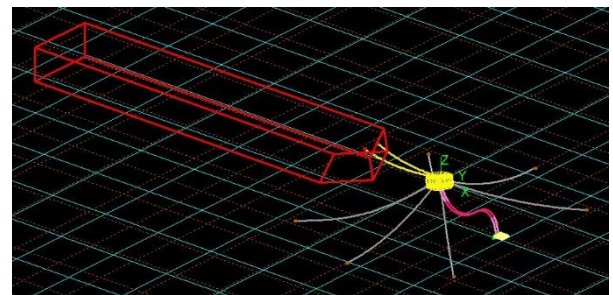
Bentuk pemodelan dari SPM dengan FSO dalam kondisi statik *all intact* untuk arah beban lingkungan dari timur ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 13.



Gambar 11 Tampak Atas Model SPM dengan FSO Arah Timur

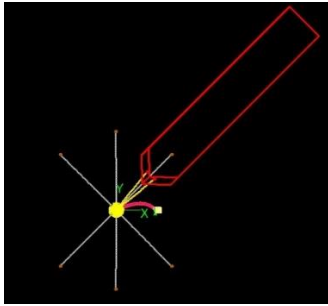


Gambar 12 Tampak Samping Model SPM dengan FSO Arah Timur

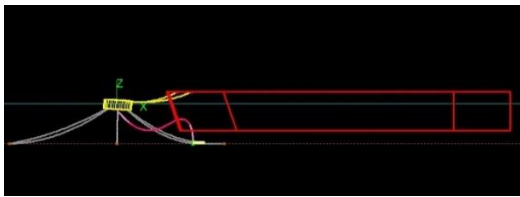


Gambar 13 Tampak Isometrik Model SPM dengan FSO Arah Timur

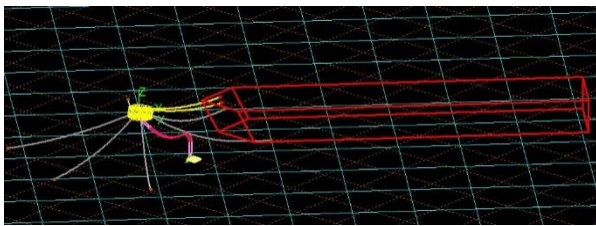
Bentuk pemodelan dari SPM dengan FSO dalam kondisi statik *all intact* untuk arah beban lingkungan dari barat daya ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 16.



Gambar 14 Tampak Atas Model SPM dengan FSO Arah Barat Daya



Gambar 15 Tampak Samping Model SPM dengan FSO Arah Barat Daya

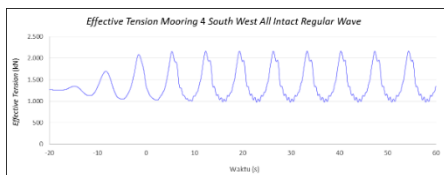


Gambar 16 Tampak Isometrik Model SPM dengan FSO Arah Barat Daya

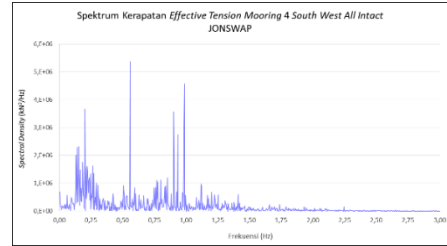
Analisis *Effective Tension Mooring* Acak

1. *Effective Tension Mooring All Intact*

Seri waktu dari salah satu *catenary mooring* yaitu *catenary mooring 4 south west* kondisi *all intact* acak dan spektrum kerapatan *effective tension catenary mooring 4 south west* kondisi *all intact* acak yang berturut-turut ditunjukkan pada **Gambar 17** dan **Gambar 18**.

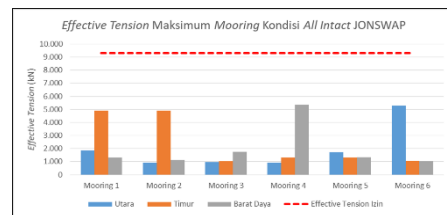


Gambar 17 Seri Waktu *Effective Tension Mooring All Intact* Acak



Gambar 18 Spektrum *Effective Tension Mooring 4 All Intact* Acak

Pada **Gambar 17**, terlihat bahwa pengaruh gaya gelombang lebih dominan dibanding dengan pengaruh gaya arus karena nilai *effective tension* saat kondisi awal ($t = 0$) yang diakibatkan gaya arus lebih kecil dibandingkan dengan amplitudo seri waktu *effective tension* yang diakibatkan gaya gelombang. Berdasarkan **Gambar 18**, terdapat beberapa frekuensi yang terjadi selain frekuensi gelombang ($f = 0,143$ Hz) dan hal tersebut menunjukkan bahwa perhitungan *effective tension catenary mooring 4 south west* kondisi *all intact* acak bersifat non-linear.

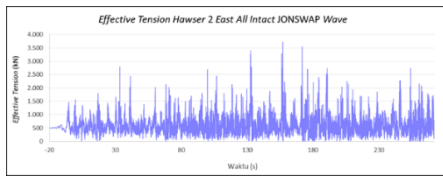


Gambar 19 Nilai Maksimum *Effective Tension Mooring All Intact* Acak

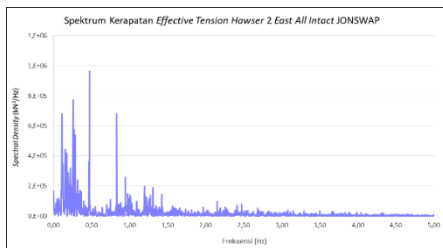
Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 19**, *effective tension* dari 6 *catenary mooring* tidak melebihi *Minimum Breaking Load* dari *catenary mooring* yaitu 9.294,6 kN, sehingga 6 *mooring* memenuhi syarat keamanan.

2. *Effective Tension Hawser All Intact*

Seri waktu dari salah satu *catenary mooring* yaitu *hawser mooring 2 east* kondisi *all intact* acak dan spektrum kerapatan *effective tension hawser mooring 2 east* kondisi *all intact* acak yang berturut-turut ditunjukkan pada **Gambar 20** dan **Gambar 21**.

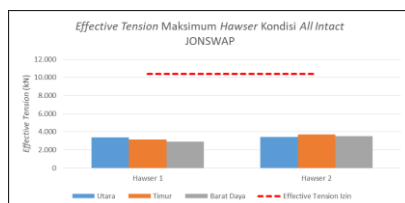


Gambar 20 Seri Waktu *Effective Tension* Hawser All Intact Acak



Gambar 21 Spektrum *Effective Tension* Hawser 2 All Intact Acak

Pada **Gambar 20**, terlihat bahwa pengaruh gaya gelombang lebih dominan dibanding dengan pengaruh gaya arus karena nilai *effective tension* saat kondisi awal ($t = 0$) yang diakibatkan gaya arus lebih kecil dibandingkan dengan amplitudo seri waktu *effective tension* yang diakibatkan gaya gelombang. Berdasarkan **Gambar 21**, terdapat beberapa frekuensi yang terjadi selain frekuensi gelombang ($f = 0,132$ Hz) dan hal tersebut menunjukkan bahwa perhitungan *effective tension* hawser mooring 2 east kondisi *all intact* acak bersifat non-linear.

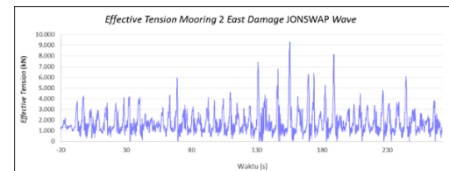


Gambar 22 Nilai Maksimum *Effective Tension* Hawser All Intact Acak

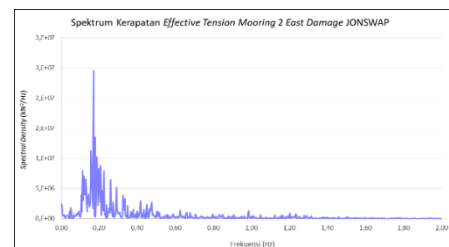
Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 22**, *effective tension* dari 2 hawser mooring tidak melebihi Minimum Breaking Load dari hawser mooring yaitu 10.368 kN, sehingga 2 hawser memenuhi syarat keamanan.

3. *Effective Tension Mooring Damage*

Seri waktu dari salah satu *catenary mooring* yaitu *catenary mooring 2 east* kondisi *damage* acak dan spektrum kerapatan *effective tension* *catenary mooring 2 east* kondisi *damage* acak yang berturut-turut ditunjukkan pada **Gambar 23** dan **Gambar 24**.

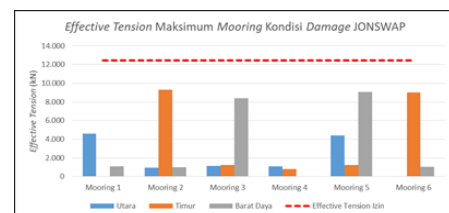


Gambar 23 Seri Waktu *Effective Tension* Mooring Damage Acak



Gambar 24 Spektrum *Effective Tension* Mooring 2 Damage Acak

Pada **Gambar 23**, terlihat bahwa pengaruh gaya gelombang lebih dominan dibanding dengan pengaruh gaya arus karena nilai *effective tension* saat kondisi awal ($t = 0$) yang diakibatkan gaya arus lebih kecil dibandingkan dengan amplitudo seri waktu *effective tension* yang diakibatkan gaya gelombang. Berdasarkan **Gambar 24**, terdapat beberapa frekuensi yang terjadi selain frekuensi gelombang ($f = 0,132$ Hz) dan hal tersebut menunjukkan bahwa perhitungan *effective tension* *catenary mooring 2 east* kondisi *damage* acak bersifat non-linear.

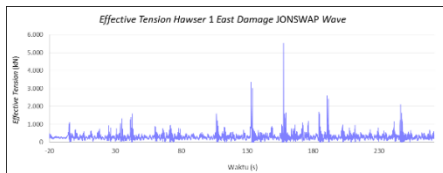


Gambar 25 Nilai Maksimum *Effective Tension* Mooring Damage Acak

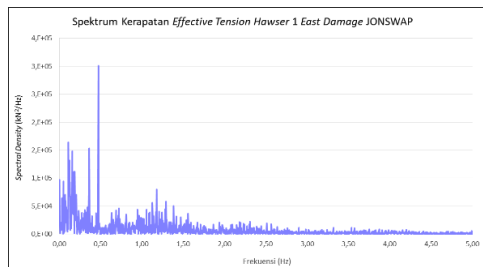
Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 25**, *effective tension* dari 6 *catenary mooring* tidak melebihi *Minimum Breaking Load* dari *catenary mooring* yaitu 12.417,6 kN, sehingga 6 *mooring* memenuhi syarat keamanan.

4. *Effective Tension Hawser Damage*

Seri waktu dari salah satu *catenary mooring* yaitu *hawser mooring 1 east* kondisi *damage* acak dan spektrum kerapatan *effective tension hawser mooring 1 east* kondisi *damage* acak yang berturut-turut ditunjukkan pada **Gambar 26** dan **Gambar 27**.

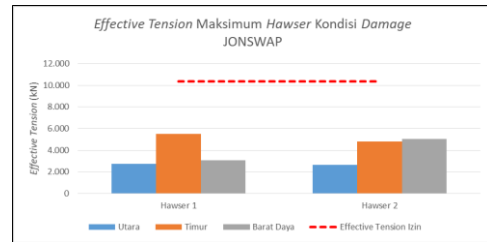


Gambar 26 Seri Waktu *Effective Tension Hawser Damage* Acak



Gambar 27 Spektrum *Effective Tension Hawser 2 Damage* Acak

Pada **Gambar 26**, terlihat bahwa pengaruh gaya gelombang lebih dominan dibanding dengan pengaruh gaya arus karena nilai *effective tension* saat kondisi awal ($t = 0$) yang diakibatkan gaya arus lebih kecil dibandingkan dengan amplitudo seri waktu *effective tension* yang diakibatkan gaya gelombang. Berdasarkan **Gambar 27**, terdapat beberapa frekuensi yang terjadi selain frekuensi gelombang ($f = 0,132$ Hz) dan hal tersebut menunjukkan bahwa perhitungan *effective tension hawser mooring 1 east* kondisi *damage* acak bersifat non-linear.



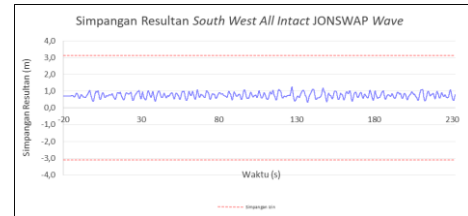
Gambar 28 Nilai Maksimum *Effective Tension Hawser Damage* Acak

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 28**, *effective tension* dari 2 *hawser mooring* tidak melebihi *Minimum Breaking Load* dari *hawser mooring* yaitu 10.368 kN, sehingga 2 *hawser mooring* memenuhi syarat keamanan.

Analisis Simpangan SPM Buoy Acak

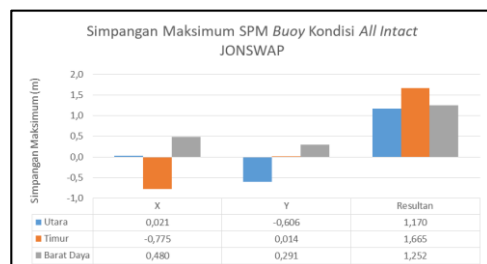
1. Simpangan SPM Buoy All Intact

Salah satu seri waktu dari simpangan yaitu simpangan resultan *south west* kondisi *all intact* acak ditunjukkan pada **Gambar 29**.



Gambar 29 Seri Waktu Simpangan Resultan *All Intact* Acak

Nilai maksimum dari simpangan SPM *buoy* dengan arah beban lingkungan dari utara, timur, dan barat daya disajikan pada **Gambar 30**.

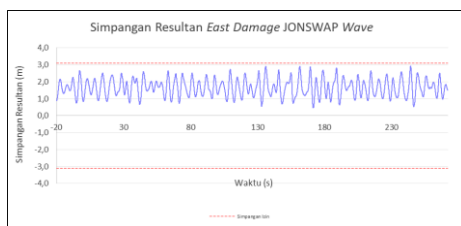


Gambar 30 Nilai Simpangan Maksimum SPM Buoy *All Intact* Acak

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 30**, simpangan maksimum dari SPM buoy kondisi *all intact* dengan beban acak tidak melebihi simpangan izin dari SPM buoy yaitu 3,11 m sehingga simpangan SPM buoy telah memenuhi syarat keamanan.

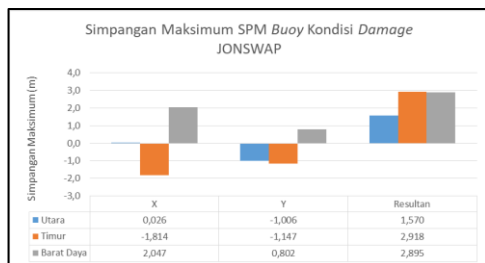
2. Simpangan SPM Buoy Damage

Salah satu seri waktu dari simpangan yaitu simpangan resultan *east* kondisi *damage* acak ditunjukkan pada **Gambar 31**.



Gambar 31 Seri Waktu Simpangan Resultan Damage Acak

Nilai maksimum dari simpangan SPM buoy dalam kondisi *damage* dengan arah beban lingkungan dari utara, timur, dan barat daya disajikan pada **Gambar 32**.



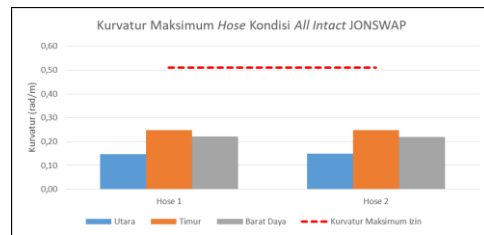
Gambar 32 Nilai Simpangan Maksimum SPM Buoy Damage Acak

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 32**, simpangan maksimum dari SPM buoy kondisi *damage* dengan beban acak tidak melebihi simpangan izin dari SPM buoy yaitu 3,11 m sehingga simpangan SPM buoy telah memenuhi syarat keamanan.

Analisis Kurvatur Maksimum Hose Acak

1. Kurvatur Maksimum Hose All Intact

Nilai kurvatur maksimum yang diperoleh pada kondisi *all intact* ditunjukkan pada **Gambar 33**.

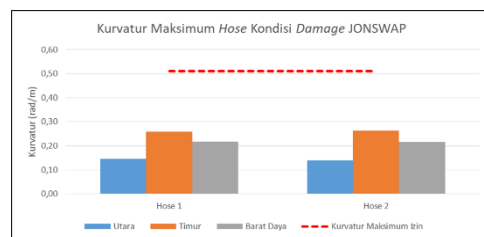


Gambar 33 Nilai Kurvatur Maksimum Dari Hose All Intact Acak

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 33**, kurvatur maksimum dari hose tidak melebihi batas kurvatur maksimum dari hose yaitu 0,51 rad/m.

2. Kurvatur Maksimum Hose Damage

Nilai kurvatur maksimum yang diperoleh pada kondisi *damage* ditunjukkan pada **Gambar 34**.



Gambar 34 Nilai Kurvatur Maksimum Dari Hose Damage Acak

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada **Gambar 34**, kurvatur maksimum dari hose tidak melebihi batas kurvatur maksimum dari hose yaitu 0,51 rad/m.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Terdapat beberapa kesimpulan yang diperoleh dari Tugas Akhir ini:

1. Nilai *effective tension* terbesar untuk *catenary mooring* terjadi pada *mooring 2* yaitu 9.318,33 kN, dengan arah beban acak dari timur dalam kondisi *damage*.

2. Nilai *effective tension* terbesar untuk *hawser mooring* terjadi pada *hawser 1* yaitu 5.525,6 kN, dengan arah beban acak dari timur dalam kondisi *damage*.
3. Nilai simpangan SPM *buoy* yang terbesar yaitu 2,918 m yang terjadi pada arah beban acak dari timur dalam kondisi *damage*.
4. Nilai kurvatur *hose* yang terbesar terjadi pada *hose 2* yaitu 0,262 rad/m, dengan arah beban acak dari timur dalam kondisi *damage*.
5. Nilai *effective tension* dari *catenary mooring* maupun *hawser mooring* pada kondisi beban reguler lebih dipengaruhi gaya arus dibandingkan gelombang kecuali pada *catenary mooring* kondisi *damage* yang lebih dipengaruhi gaya gelombang dibandingkan gaya arus.
6. Nilai *effective tension* dari *catenary mooring* maupun *hawser mooring* pada kondisi beban acak lebih dipengaruhi gaya arus dibandingkan gelombang.
7. *Single Point Mooring* yang dirancang dengan 6 *catenary mooring*, 2 *hose*, 2 *hawser mooring*, dan sebuah FSO telah memenuhi standar keamanan yang berlaku baik untuk syarat keamanan *effective tension* maupun syarat keamanan simpangan SPM *buoy*, karena tidak ada *effective tension* dari *catenary mooring* maupun *hawser mooring* yang melampaui *Minimum Breaking Load* dan simpangan SPM *buoy* yang terjadi tidak melampaui simpangan izin dari SPM *buoy*.
8. Radius kurvatur dari *flexible hose* telah memenuhi syarat keamanan dari produsen *flexible hose* karena radius kurvatur yang terjadi lebih besar dari syarat minimum yang ditetapkan.

Saran

Berikut beberapa saran yang dapat diberikan untuk Akhir ini:

1. Mempersiapkan data pendukung Tugas Akhir yang lebih lengkap dan sesuai dengan topik Tugas Akhir agar tidak terjadi kebingungan dan kesalahan proses desain maupun input data.
2. Melakukan pemodelan gelombang untuk kenaikan dan penurunan muka air terbesar selain puncak dan lembah terbesar sehingga hasil analisis diperoleh dapat lebih lengkap.
3. Melakukan pemodelan kondisi *weathervaning* dari FSO untuk 8 arah mata angin agar memperoleh hasil analisis yang lebih mendalam.
4. Melakukan pemodelan beban acak selama 10800 detik atau 3 jam untuk memperoleh hasil pemodelan yang representatif dengan kondisi di lapangan apabila perangkat komputer mampu dan cukup cepat melakukannya.

REFERENSI

- American Petroleum Institute (1993): Design, Analysis, and Maintenance of Moorings for Floating Production Systems (API RP 2FP1 1st Edition), API, Washington D.C..
- American Petroleum Institute (2005): Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures (API RP 2SK 3rd Edition), API Publishing Services, Washington D.C..
- Balmoral Marine (2004): Marine equipment handbook, Balmoral Marine, Aberdeen.
- Chakrabarti, Subrata K. (1987): Hydrodynamics of Offshore Structure, Computational Mechanics Publications, Southampton, 45-244.
- Choosing Between SPM CALM and CBM Mooring. (2020). Diakses pada 15 Juli 2020, dari <https://epcmholdings.com/spm-vs-cbm/>
- Dean, Robert G. dan Dalrymple, Robert A. (1991): Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists – Volume 2, World Scientific Publishing, Singapore, 2 – 53.

- Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (2015): Offshore Loading Buoys (DNV GL-OS-E403), Det Norske Veritas Holding AS, Oslo.
- Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (2015): Position Mooring (DNV GL-OS-E301), Det Norske Veritas Holding AS, Oslo.
- Faltinsein, O.M. (1990): Sea Loads on Ships and Offshore Structure, Cambridge University Press, Cambridge, 3-264.
- Journée, J.M.J. dan Massie, W.W. (2001): Offshore Hydromechanics 1st Edition, Delft University of Technology, Delft, 23 – 57.
- Keeping containers on schedule. (2019, September 23). Diakses pada 28 Mei 2020, dari <https://www.marinetraffic.com/blog/keeping-containers-on-schedule/>
- Manuli Rubber Industries (2014): Poseidon Marine Hoses, Manuli Rubber Industries S.p.A., Vimodrone.
- NOAA's National Weather Service – Glossary. Diakses pada 23 Mei 2020, dari <https://forecast.weather.gov/glossary.php?word=squall>
- Oil Companies International Marine Forum (1994): Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs, Witherby & Co. Ltd., London.
- Oil Companies International Marine Forum (2010): Estimating The Environmental Loads On Anchoring Systems, Oil Companies International Marine Forum, London.
- Stability Of Submerged And Floating Bodies. (2020). Diakses pada 15 Agustus 2020, dari <https://www.chegg.com/homework-help/definitions/stability-of-submerged-and-floating-bodies-5>
- The Yokohama Rubber (2018): Seaflex Offshore Loading & Discharge Hose, The Yokohama Rubber Co. Ltd., Tokyo.