

ANALISA KEKUATAN *SPREAD MOORING* PADA SISTEM TAMBAT FDPSO BERBENTUK SILINDER DI PERAIRAN LEPAS PANTAI BARAT NATUNA-INDONESIA MENGGUNAKAN FEM

Ahmad Fauzan¹⁾, Hartono Yudo¹⁾, Muhammad Iqbal¹⁾

¹⁾Program Studi S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Email : ahmdfauzan94@gmail.com

ABSTRAK

FDPSO didesain untuk melakukan proses produksi migas dan sekaligus menyimpannya di dalam tangki-tangki pada lambungnya sebelum produk tersebut ditransfer ke kapal-kapal tanker untuk didistribusikan ke pasaran. Namun dalam proses pengoperasiannya FDPSO memerlukan suatu system tambat (*mooring system*) yang bertujuan untuk mengikat FDPSO agar tetap diam pada posisi awalnya. Penelitian ini menganalisa kekuatan *hooke* yang menghubungkan antara badan kapal dan *mooring system* dengan 3 variasi jumlah *hooke* yaitu 15 *hooke* dengan diameter 0,137 m, 15 *hooke* dengan diameter 0,0274 m, dan 3 *hooke* dengan diameter 0,685 m sehingga didapatkan nilai tegangan yang terjadi pada *hooke* tersebut dengan bantuan program *Finite Element Method (FEM)*. Dalam proses analisa menggunakan *software Msc. Nastran Patran*, kami mendapatkan hasil tegangan dari ketiga permodelan tersebut. Untuk model yang menggunakan 15 *mooring* dengan ukuran yang sesuai perhitungan, nilai tegangannya sebesar $6,32 \times 10^8$ Pa dengan deformasi sebesar 0,102 cm dari arah selatan. Untuk model yang menggunakan 15 *mooring* dengan ukuran lima kali lebih kecil dari perhitungan, nilai tegangannya sebesar $1,32 \times 10^9$ Pa dengan deformasi sebesar 0,217 cm dari arah selatan. Sedangkan untuk model yang menggunakan 3 *mooring*, nilai tegangannya sebesar $1,28 \times 10^8$ Pa dengan deformasi sebesar 0,0491 cm dari arah utara.

Kata kunci : FDPSO, Sistem Tambat, Analisa Kekuatan, FEM

ABSTRACT

The FDPSO is designed to make the process of oil and gas production and also store it in tanks in the side before the product is transferred to tankers for distribution to the market. But in the process of operation are requires a mooring system to remain stationary at its initial position. This analysis focus to look for strengths of the hooke that connects between the hull and mooring system with three variations in the amount of hooke, that are 15 hooke with a diameter of 0,137 m, 15 hooke with a diameter of 0,0274 m, and 3 hooke with a diameter of 0,685 m to obtain the stress value of the model with Finite Element Method (FEM). In the process of analysis using software Msc. Nastran Patran, we get the stress value of the third modeling. For models that use 15 mooring with appropriate size calculations, the stress value is $6,32 \times 10^8$ Pa with a deformation is 0,102 cm from the south direction. For models that use 15 mooring with a size five times smaller than the calculation, the stress value is $1,32 \times 10^9$ Pa with a deformation is 0,217 cm from the south direction. As for the models using 3 mooring, the stress value is $1,28 \times 10^8$ Pa with a deformation is 0,0491 cm from the north direction.

Keyword : FDPSO, *Mooring System*, *Strength Analysis*, FEM

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kepulauan Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan di Dunia. Natuna memiliki cadangan

gas alam sebesar 222 triliun kaki kubik (TCT) yang terletak 225 kilometer (km) sebelah utara Natuna. [1]

Untuk mengeksplor cadangan hidrokarbon yang tersebar dibanyak titik,

maka FPSO menjadi salah satu alternatif pilihan karena FPSO bersifat mobile dan dapat melakukan proses produksi. [2]

Gerakan yang terjadi pada FPSO saat beroperasi disebabkan oleh beban lingkungan (arus, gelombang, dan angin). Untuk menjaga FPSO agar tetap pada posisinya, maka dibutuhkan sistem tambat (*mooring system*) yang berguna sebagai pengikat FPSO. [3]

Gerak dari FPSO menyebabkan adanya gaya yang bekerja (*tension force*, *restoring force*, dan *damping*) pada *mooring system*. Gaya-gaya yang terjadi pada *mooring system* sangatlah bergantung pada karakteristik *motion* FPSO, begitu pula sebaliknya. Hal inilah yang menjadi suatu alasan mengapa analisa *mooring system* perlu dilakukan sehingga operabilitas dan keselamatan sistem dapat tetap terjaga. Salah satu cara untuk melakukan analisa kekuatan pada *mooring system* ini dengan menganalisa respon struktur untuk desain data lingkungan misalnya gelombang signifikan 100 tahun, kecepatan angin 100 tahun, dan arus 100 tahun.

1.2 Tujuan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan besarnya tegangan yang terjadi pada *hooke* akibat beban yang didapat dari lingkungan.
2. Mendapatkan besarnya tegangan yang terjadi antara sambungan *hooke* dengan lambung akibat adanya beban dari lingkungan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah digunakan sebagai arahan serta acuan dalam penulisan tugas akhir sehingga sesuai dengan permasalahan serta tujuan yang diharapkan. Adapun batasan permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Pembuatan desain dan analisa menggunakan *software Nastran Patran*.

2. Hanya melakukan pengujian besarnya tegangan yang terjadi pada *mooring system*.
3. Model kapal yang digunakan adalah FDPSO Sevan Marine berbentuk silinder yang juga berfungsi untuk *drilling*.
4. Model kapal tidak termasuk bagian atas atau *platform*.
5. *Mooring system* yang digunakan adalah sistem *spread mooring*.
6. Data *spread mooring* merupakan hasil modifikasi menggunakan rumus dari BKI tentang *equipment*, dan bukan dari hasil data yang ada.
7. Menggunakan kondisi lingkungan perairan lepas pantai barat Natuna-Indonesia, yaitu gelombang, arus, dan angin.
8. Beban lingkungan diberikan secara searah, yakni dari utara, timur, selatan, dan barat.
9. Analisa yang digunakan merupakan analisa *statis*, dimana beban yang diambil merupakan beban ekstrim dari masing-masing kondisi lingkungan yang ada.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gambaran Potensi Wilayah Natuna

Kepulauan Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik bahkan di Dunia. Natuna memiliki cadangan gas alam terbesar di kawasan Asia Pasifik. Hal ini merujuk pada salah satu ladang gas yang terletak 225 kilometer (km) sebelah utara Natuna. Kurang lebih tersimpan cadangan gas alam dengan volume sebesar 222 triliun kaki kubik (TCT).

2.2 FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*)

FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) adalah sebuah fasilitas di atas bangunan terapung yang dioperasikan di suatu ladang minyak dan gas bumi lepas pantai yang berfungsi untuk menerima, memproses, menyimpan dan menyalurkan

hidrokarbon yang secara permanen ditambatkan di tempatnya beroperasi dan dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain. Ditinjau dari bentuk bangunannya, FPSO terbagi menjadi dua yaitu berbentuk kapal dan berbentuk silinder. [4]

2.3 Mooring System

Fungsi mooring pada prinsipnya adalah untuk “mengamankan” posisi kapal agar tetap pada tempatnya. Secara umum, mooring system yang digunakan untuk FSO/FPSO (Floating Production Storage and Offloading) adalah Spread Mooring, Turret Mooring, Tower Mooring, dan Buoy Mooring. [5]

2.4 Perlengkapan Mooring

Pemilihan perlengkapan kapal seperti jangkar, rantai jangkar dan alat alat tambat lainnya tergantung dari angka penunjuk (*equipment number*) yang diatur oleh beberapa klasifikasi. [6]

Menurut BKI 2015 Volume II Section 18 B.1

$$Z = D^{\frac{2}{3}} + 2hB + \frac{A}{10} \quad (1)$$

dimana :

Z = Modulus (m³)

D = Displacement (ton)

B = Lebar Kapal (m)

h = Free Board + Tinggi Superstructure

A = Luas bidang lateral dari badan dan bangunan atas yang berada di atas garis air (m²)

2.5 Beban Lingkungan

Beban lingkungan sangat mempengaruhi gerakan FPSO saat beroperasi (*storage* maupun *offloading*), sehingga dari karakteristik gerakan FPSO tersebut dapat menimbulkan gaya yang terjadi pada *mooring system*. Secara umum beban lingkungan yang mempengaruhi gerakan atau *motion* dari FPSO yang selanjutnya menyebabkan adanya gaya pada *mooring*

system adalah beban gelombang, angin, dan arus. [7]

2.5.1. Beban Gelombang

Gaya gelombang yang berpengaruh pada struktur bangunan lepas pantai dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *Morison*. Persamaan *Morison* menyatakan gaya yang timbul persatuan panjang dari tiang yang terletak atau terendam pada suatu aliran fluida yang bergerak. Persamaan *Morison* dapat ditulis dalam :

$$F = F_D + F_I \quad (2)$$

dimana F_D merupakan gaya gesek dan F_I merupakan gaya inerti yang bekerja pada struktur tersebut. Untuk perhitungan gaya gesek tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_d D |u|u \quad (3)$$

Sedangkan untuk perhitungan gaya inerti dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$F_I = \rho C_i \frac{\pi D^2}{4} a_x \quad (4)$$

dimana :

ρ = massa jenis fluida (1025 kg/m³).

Cd = coefficient drag (0,6 – 1,0).

Ci = coefficient inerti (1,5 – 2,0).

D = diameter struktur (m).

u = kecepatan horizontal partikel air (m/s).

$$= \frac{\omega H}{2} \frac{\cosh ky}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t)$$

a_x = percepatan horizontal partikel air (m/s²).

$$= \frac{\omega^2 H}{2} \frac{\cosh ky}{\sinh kh} \sin(kx - \omega t)$$

ω = frekuensi gelombang (hz).

ω = $2\pi/T$

T = puncak gelombang rata-rata (sec).

H = ketinggian gelombang (m).

k = nilai gelombang.

k	$= 2\pi/\lambda$
λ	$=$ panjang gelombang (m).
λ_0	$= \frac{gT^2}{2\pi}$
λ	$= \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda_0}\right)$
h	$=$ kedalaman perairan (m).
y	$=$ panjang vertical bagian struktur yang terkena gelombang (m).
h'	$= h' + \eta$ $=$ panjang vertical bagian struktur yang berada di dalam air (m).
η	$=$ bentuk permukaan gelombang. $= H/2 \cos(kx - \omega t)$
x	$=$ panjang horizontal bagian struktur yang terkena gelombang (m).
t	$=$ periode gelombang maksimum (sec).

2.5.2. Beban Angin

Gaya angin yang bekerja pada sebuah struktur bangunan lepas pantai merupakan penjumlahan gaya-gaya yang diterima oleh masing-masing komponen struktur. Gaya angin tersebut timbul akibat adanya hambatan kekentalan udara dan adanya perbedaan distribusi tekanan di sisi komponen yang menghadap ke arah angin dan sisi-sisi komponen lainnya. Besarnya gaya angin tergantung pada kecepatan hembusan angin dan ukuran serta bentuk dari struktur. [8]

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 A_w C_{dw}$$

(5)

dimana :

F_w = gaya angin (N).

C_{dw} = koefisien bentuk.

ρ_a = massa jenis udara (1,29 kg/m³).

A_w = luas area *vertical* yang terkena angin (m²).

V_w = kecepatan angin (m/s).

Obyek	Koefisien Gaya Angin (C_w)
Balok	1,50
Silinder	0,50
Sisi-sisi Bangunan	1,50
Proyeksi Area Platform	1,00

Sumber : API RP2A 1980

2.5.3. Beban Arus

Beban arus pada umumnya disebabkan oleh adanya gaya hambat, gaya gesek, dan propeller. Namun, gaya yang paling mempengaruhi besarnya beban arus adalah gaya gesek. Sehingga dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 A_c C_{dc}$$

(6)

dimana :

F_c = gaya arus (N).

C_{dc} = koefisien bentuk.

ρ_w = massa jenis air (1025 kg/m³).

A_c = luas area *vertical* yang terkena arus (m²).

V_c = kecepatan arus (m/s).

2.6 Teori Elastisitas

Menurut Szilard (1989), Teori Elastisitas merupakan cabang dari fisika matematis yang mengkaji hubungan gaya, perpindahan, tegangan, regangan, dan beda elastis. Bila suatu pejal di bebani gaya dari luar, benda tersebut akan berubah bentuk / berdeformasi, sehingga timbul tegangan dan regangan dalam. Perubahan bentuk ini tergantung pada konfigurasi geometris benda tersebut dan mekanis bahannya. Teori Elastisitas menganggap bahan bersifat *homogen* dan *Isotropik*, dengan demikian sifat mekanis bahan sama dalam segala arah.

2.6.1. Tegangan

Menurut Popov (1984), pada umumnya tegangan adalah gaya dalam yang bekerja pada luasan yang kecil tak hingga pada sebuah potongan dan terdiri dari bermacam-macam besaran dan arah. Suatu tegangan tertentu yang dianggap benar-benar bertitik tangkap pada sebuah titik, secara matematis didefinisikan sebagai :

Tabel 1. Nilai koefisien gaya angina

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

(7)

Dimana F adalah gaya dan A adalah luas penampang. [9]

2.6.2. Regangan

Menurut Popov (1984), perpanjangan per satuan luas disebut regangan (*strain*). Ia adalah besaran yang tidak berdimensi, tetapi lebih baik kita memberinya memiliki dimensi meter per meter atau m/m. Kadang-kadang regangan diberikan dalam bentuk persen. Secara matematis dapat didefinisikan sebagai :

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L}$$

(8)

dimana Δ adalah panjang total dan L adalah panjang awal.

2.7 Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan adalah faktor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan teknik dari beban luar, yaitu beban tekan maupun tarik. Gaya yang diperlukan agar terjadi tingkat optimal bahan di dalam menahan beban dari luar sampai akhirnya menjadi pecah disebut dengan beban *ultimat* (*ultimate load*). Faktor keamanan dapat dirumuskan menjadi :

$$FS = \frac{\sigma_{Ultimate}}{\sigma_{ijin}}$$

(9)

III. METODOLOGI

3.1 Data Primer

Data primer merupakan data terpenting yang dibutuhkan dalam proses analisa tugas akhir ini.

3.1.1. Data ukuran utama kapal FPSO Sevan Marine. [10]

Hull diameter	: 93.00 m
Bilge box diameter	: 124.00 m
Bilge box plate diameter	: 138.00 m
Main deck diameter	: 103.00 m
Process deck diameter	: 109.00 m
Main deck EL. (hull depth)	: 42.00 m

Process deck EL.	: 48.00 m
Draft ballast	: 22.00 m
Draft loaded	: 31.00 m
Constant draft drilling	: 27.00 m
Freeboard to MD, ballast	: 20.00 m
Freeboard to MD, loaded	: 11.00 m

3.1.2. Data ekstrim kondisi beban lingkungan selama 1 tahun terakhir di perairan lepas pantai barat Natuna dari Balanak Field Development. [11]

Kedalaman perairan	: 90 m
Kecepatan angin	: 19,6 m/s
Tinggi gelombang significant	: 2,9 m
Periode puncak gelombang rata-rata	: 9,1 s
Periode puncak maksimal	: 7,5 s
Periode puncak minimal	: 15,5 s
Tinggi gelombang maksimum	: 5,6 m
Periode gelombang maksimum	: 8,3 m
Kecepatan arus	: 0,7 m/s

IV. PEMBAHASAN

4.1. Pembuatan Model

Data ukuran utama FPSO dimodelkan dengan bantuan *software Msc.Patran*. Permodelan kapal dibuat berdasarkan data ukuran utama kapal *Sevan Marine* FDPSO, sedangkan untuk permodelan *hooke* diambil dari perhitungan perlengkapan kapal yang diatur oleh BKI 2015 Volume II Section 18 B.1 dengan rumus sebagai berikut :

$$Z = D^{\frac{2}{3}} + 2hB + \frac{A}{10}$$

dimana :

D = 156489,84 ton

B = 93 m

h = 17 m

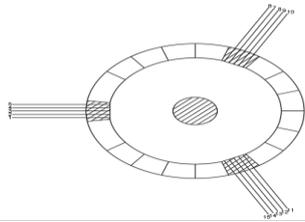
A = 18543,27 m²

Z = 8038,41 m³

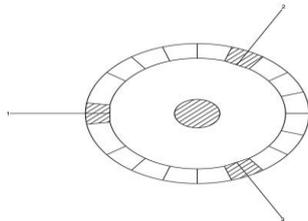
dengan melihat table 18.2 pada BKI volume II section 18, maka didapat ukuran *hooke* dengan diameter 0,137 m, panjang 0,822 m, dan berat 248 kg.

Permodelan dibuat menjadi tiga model dengan variasi jumlah *hooke*, dengan pertimbangan jumlah mooring. Untuk *mooring* yang berjumlah 15 dibuat menjadi

dua model yaitu permodelan dengan ukuran yang telah disesuaikan dengan perhitungan yang memiliki diameter 0,137 m dan permodelan dengan ukuran yang lima kali lebih kecil dari perhitungan yang memiliki diameter 0,0274 m, sedangkan yang berjumlah 3 *mooring* ukurannya lima kali lebih besar dari perhitungan yang memiliki diameter 0,685 m.



Gambar 1. Permodelan 2D FPSO dengan 15 *Mooring*



Gambar 2. Permodelan 2D FPSO dengan 3 *Mooring*

4.2 Perhitungan Gaya

Perhitungan besar gaya eksternal (gaya hidrostatis air laut dan gaya dari lingkungan) dan gaya internal (muatan dan ballast) diperlukan untuk menentukan pembebanan pada permodelan kapal yang telah dibuat.

4.2.1. Gaya Hidrostatis Air Laut

Diameter bagian atas

$$P = \rho g h$$

$$F = P \times A$$

$$P = 1025 \times 9,8 \times 20 \\ = 200900 \text{ Pa}$$

$$F = 200900 \times 4082 \\ = 820073800 \text{ N}$$

Diameter bagian tengah

$$P = \rho g h$$

$$F = P \times A$$

$$P = 1025 \times 9,8 \times 7 \\ = 70315 \text{ Pa}$$

$$F = 70315 \times 1769,39 \\ = 124414657,85 \text{ N}$$

Diameter bagian bawah

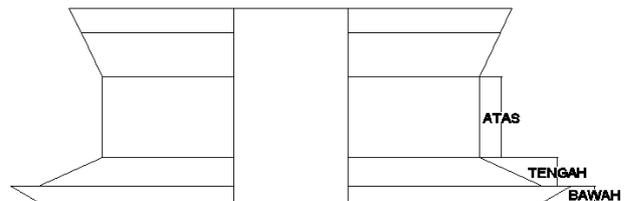
$$P = \rho g h$$

$$F = P \times A$$

$$P = 1025 \times 9,8 \times 4 \\ = 40180 \text{ Pa}$$

$$F = 40180 \times 1293,68 \\ = 51980062,40 \text{ N}$$

Gaya total yang didapat dari perhitungan gaya hidrostatis air laut sebesar 996468520,25 N



Gambar 3. Pembagian Gaya Hidrostatis Air Laut

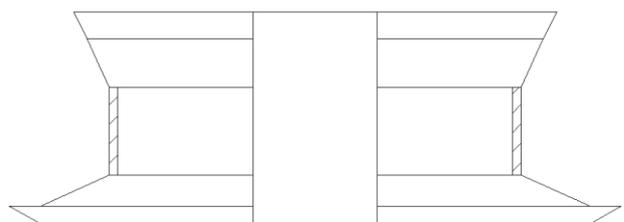
4.2.2. Gaya Air Ballast

$$P = \rho g h$$

$$F = P \times A$$

$$P = 1025 \times 9,8 \times 20 \\ = 200900 \text{ Pa}$$

$$F = 200900 \times 251,2 \\ = 50466080 \text{ N}$$



Gambar 4. Luas Permukaan Gaya Air Ballast

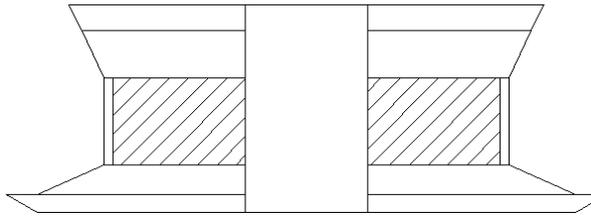
4.2.3. Gaya Muatan

$$P = \rho g h$$

$$F = P \times A$$

$$P = 800 \times 9,8 \times 20 \\ = 156800 \text{ Pa}$$

$$F = 156800 \times 3830,8 \\ = 600669440 \text{ N}$$



Gambar 5. Luas Permukaan Gaya Muatan

4.2.4. Gaya Gelombang

$$F = F_D + F_I$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_d D |u|u$$

$$F_I = \rho C_i \frac{\pi D^2}{4} a x$$

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$C_d = 1,0$$

$$C_i = 2,0$$

$$D = 93 \text{ m}$$

$$\omega = 0,69 \text{ hz}$$

$$T = 9,1 \text{ s}$$

$$H = 2,9 \text{ m}$$

$$h = 90 \text{ m}$$

$$\lambda_0 = 129,23 \text{ m}$$

$$\lambda = 129,18 \text{ m}$$

$$k = 0,05$$

$$h' = 31 \text{ m}$$

$$\eta = 1,45$$

$$y = 32,45 \text{ m}$$

$$x = 93 \text{ m}$$

$$t = 8,3 \text{ sec}$$

$$u = 0,06 \text{ m/s}$$

$$a_x = 0,04 \text{ m/s}^2$$

$$F_D = 192,82 \text{ N}$$

$$F_I = 610931,18 \text{ N}$$

$$F = 611123,99 \text{ N}$$

4.2.5. Gaya Angin

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 A_w C_{dw}$$

$$C_{dw} = 0,5$$

$$\rho_a = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

$$A_w = 5391,38 \text{ m}^2$$

$$V_w = 19,6 \text{ m/s}$$

$$F_w = 667946,69 \text{ N}$$



Gambar 6. Luas Permukaan Gaya Angin

4.2.6. Gaya Arus

Diameter bagian atas

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 A_c C_{dc}$$

$$C_{dc} = 0,5$$

$$\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$A_c = 5840,40 \text{ m}^2$$

$$V_c = 0,7 \text{ m/s}$$

$$F_c = 733335,23 \text{ N}$$

Diameter bagian tengah

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 A_c C_{dc}$$

$$C_{dc} = 0,5$$

$$\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$A_c = 2384,83 \text{ m}^2$$

$$V_c = 0,7 \text{ m/s}$$

$$F_c = 299445,22 \text{ N}$$

Diameter bagian bawah

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 A_c C_{dc}$$

$$C_{dc} = 0,5$$

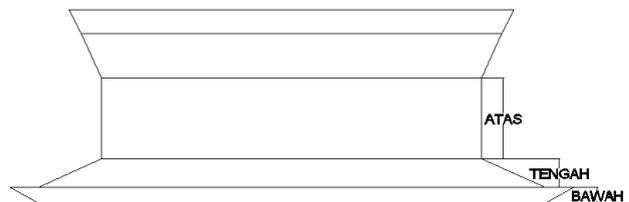
$$\rho_w = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$A_c = 1645,36 \text{ m}^2$$

$$V_c = 0,7 \text{ m/s}$$

$$F_c = 206595,52 \text{ N}$$

Gaya total yang didapat dari perhitungan gaya arus sebesar 1239375,96 N



Gambar 7. Luas Permukaan Gaya Arus

4.3 Kondisi Pembebanan

Kondisi pembebanan yang akan dilakukan penulis berjumlah satu kondisi

yakni kondisi beban ekstrim dari masing-masing gaya yang sudah direncanakan.

Gaya hidrostatis air laut : 996468520,25 N

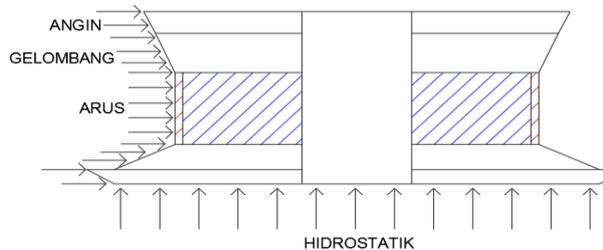
Gaya air ballast : 50466080 N

Gaya muatan : 600669440 N

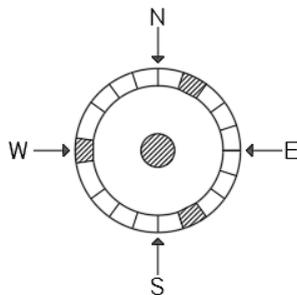
Gaya gelombang : 611123,99 N

Gaya angin : 667946,69 N

Gaya arus : 1239375,96 N

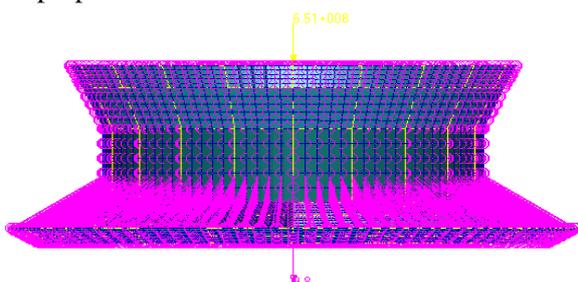


Gambar 8. Kondisi Pembebanan



Gambar 9. Arah Kondisi Pembebanan

Model diberikan enam jenis gaya, yaitu hidrostatis air laut, ballast, muatan, gelombang, angin, dan arus. Beban lingkungan diberikan empat macam variasi, yaitu dari arah utara, timur, selatan, dan barat. Bagian model yang menerima gaya adalah bagian seluruh kapal yang telah di MPC menjadi satu titik terpusat yang terletak dibagian atas. Hal tersebut bertujuan untuk melihat besarnya gaya pada kapal secara keseluruhan agar kapal mengalami perpindahan.



Gambar 10. Pemberian Pembebanan yang Akan Dianalisa

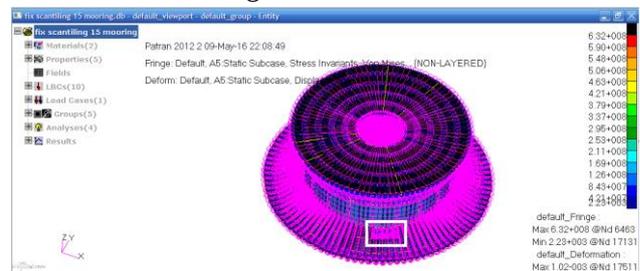
4.4 Analisa Kekuatan

Tahap ini dilakukan untuk menghitung nilai *stress* tertinggi pada material pada saat pembebanan dilakukan. Dengan dasar rumus :

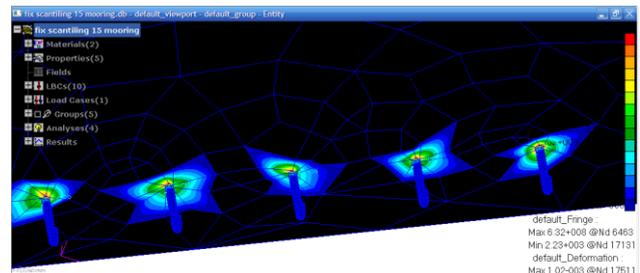
$$\text{tegangannya} = \frac{\text{gaya}}{\text{satuan luas}}$$

Pada setiap pembebanan akan dilakukan dua analisa yaitu analisa pada FDPSO dengan 15 *mooring* dan FDPSO dengan 3 *mooring*.

4.4.1. Analisa Pada FPSO dengan 15 *Mooring*

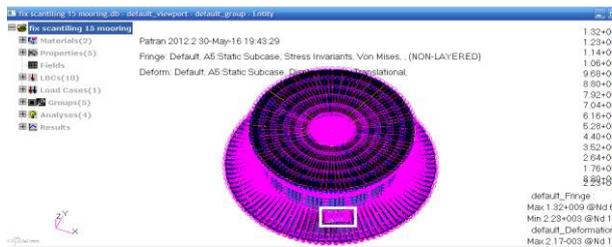


Gambar 11. Hasil *Running* Tegangan Maksimal pada FPSO dengan 15 *Mooring* dengan Diameter 0,137 m

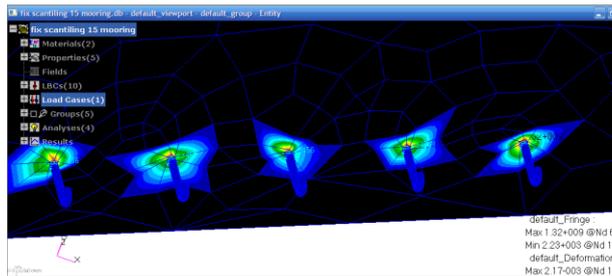


Gambar 12. Respon yang Terjadi di *Hooke* pada FPSO 15 *Mooring* dengan Diameter 0,137 m

Pada kondisi FPSO dengan 15 *mooring Linear Static* tegangan terbesar terjadi saat beban lingkungan datang dari arah selatan dengan nilai $6,32 \times 10^8$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 0,102 cm. Tegangan maksimal terjadi pada sambungan antara lambung kapal dengan *hooke*.



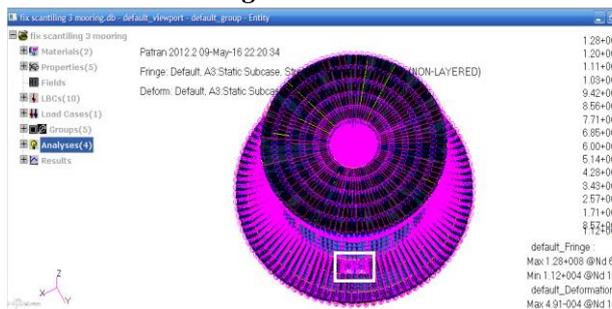
Gambar 13. Hasil *Running* Tegangan Maksimal pada FPSO dengan 15 *Moorings* dengan Diameter 0,0274 m



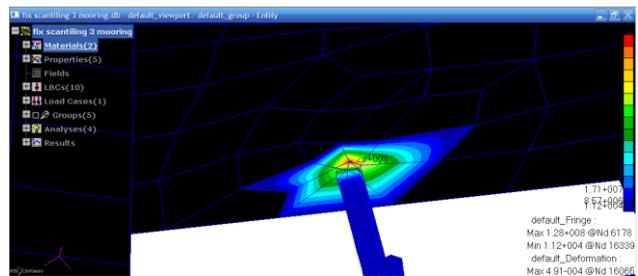
Gambar 14. Respon yang Terjadi di *Hooke* pada FPSO dengan 15 *Moorings* dengan Diameter 0,0274 m

Pada kondisi FPSO dengan 15 *mooring Linear Static* tegangan terbesar terjadi saat beban lingkungan datang dari arah selatan dengan nilai $1,32 \times 10^9$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 0,217 cm. Tegangan maksimal terjadi pada sambungan antara lambung kapal dengan *hooke*.

4.4.2. Analisa Pada FPSO dengan 3 *Moorings*



Gambar 15. Hasil *Running* Tegangan Maksimal pada FPSO dengan 3 *Moorings* dengan Diameter 0,685 m



Gambar 16. Respon yang Terjadi di *Hooke* pada FPSO 3 *Moorings* dengan Diameter 0,685 m

Pada kondisi FPSO dengan 3 *mooring Linear Static* tegangan terbesar terjadi saat beban lingkungan datang dari arah utara dengan nilai $1,28 \times 10^8$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 0,0491 cm.

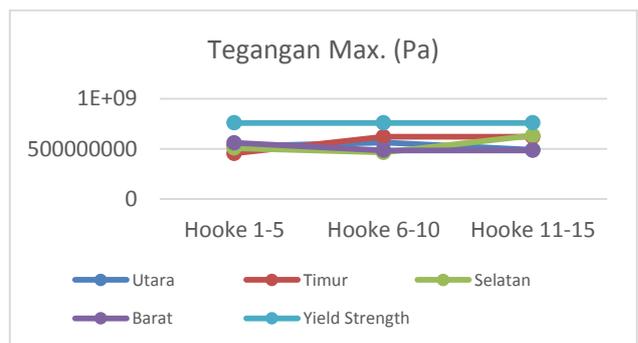
Tegangan maksimal terjadi pada sambungan antara lambung kapal dengan *hooke*, hal ini terjadi karena *mooring* harus menahan kapal yang menerima beban internal maupun eksternal agar tetap berada pada posisi awalnya, sehingga memberikan beban yang besar kepada *hooke*.

4.5 Perbandingan Hasil Antara Kedua Model

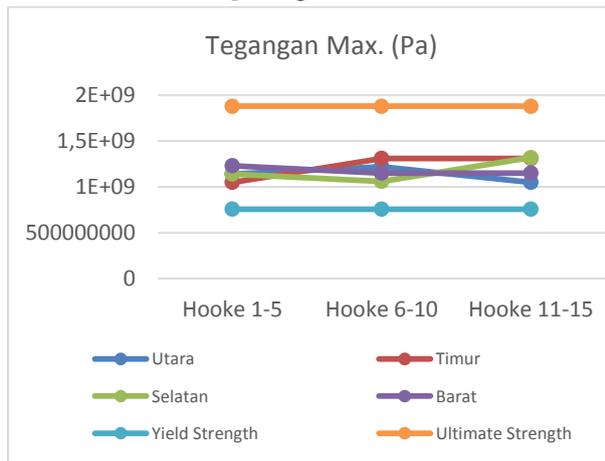
Setelah dilakukan analisa linear pada kedua model dengan semua kondisi pembebanan yang ada, didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 2. Rekap Hasil Analisa

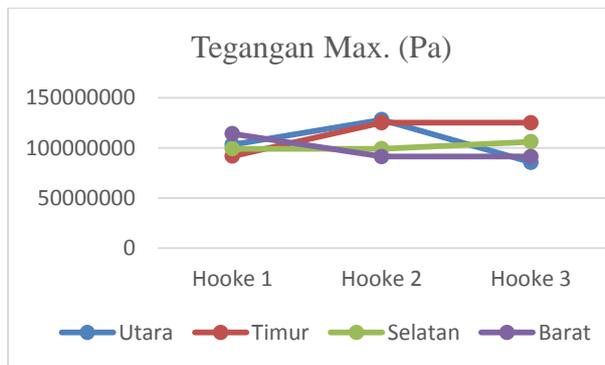
Arah Beban	Teganga Max. (Pa)		
	15 Mooring Ukuran Sesuai	15 Mooring 5X Lebih Kecil	3 Mooring
Utara	$5,63 \times 10^8$	$1,22 \times 10^9$	$1,28 \times 10^8$
Timur	$6,19 \times 10^8$	$1,31 \times 10^9$	$1,25 \times 10^8$
Selatan	$6,32 \times 10^8$	$1,32 \times 10^9$	$1,06 \times 10^8$
Barat	$5,58 \times 10^8$	$1,23 \times 10^9$	$1,14 \times 10^8$



Gambar 17. Grafik Perbandingan Nilai Tegangan untuk 15 Mooring dengan Diameter 0,0274 m



Gambar 18. Grafik Perbandingan Nilai Tegangan untuk 15 Mooring dengan Diameter 0,0274 m



Gambar 19. Grafik Perbandingan Nilai Tegangan untuk 3 Mooring dengan Diameter 0,685 m

Dari hasil tegangan *Von Mises* yang telah didapat, maka bisa dilihat perbedaan nilai dari analisa tegangan dengan metode elemen hingga untuk permodelan FDPSO dengan 15 mooring ukuran sesuai perhitungan, 15 mooring ukuran lima kali lebih kecil dari perhitungan, dan FDPSO dengan 3 mooring. Analisa tegangan pada permodelan FDPSO dengan 15 mooring memiliki nilai tegangan yang lebih besar dibandingkan FDPSO dengan 3 mooring. Jika dilihat dari dimensi untuk permodelan hooke nya, maka yang menyebabkan nilai tegangan pada FDPSO dengan 3 mooring memiliki nilai yang lebih kecil karena disebabkan oleh dimensinya yang lima kali lebih besar dibandingkan FDPSO dengan 15

mooring ukuran sesuai perhitungan. Hal itu menunjukkan bahwa besar kecilnya tegangan berbanding terbalik dengan luasan benda.

4.6 Perhitungan Safety Factor dan Tegangan Izin

Faktor keamanan adalah factor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan teknik terhadap beban luar, yaitu beban tekan maupun tarik. Gaya yang diperlukan agar terjadi tingkat optimal bahan dalam menahan beban dari luar sampai akhirnya menjadi pecah disebut dengan beban *ultimate* (*ultimate load*).

Sebelum mencari *safety factor*, dicari terlebih dahulu nilai tegangan izin sesuai kekuatan luluh (*yield strength*) dari material yang digunakan. Pada permodelan hooke pada penelitian ini menggunakan material *carbon steel* dengan nilai *yield strength* sebesar $7,58 \times 10^8$ Pa dan *ultimate strength* sebesar $1,88 \times 10^9$ Pa.

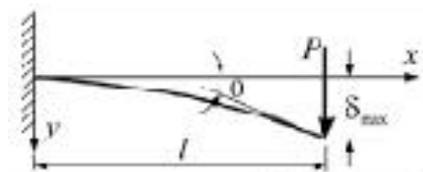
Perhitungan *safety factor* disesuaikan dengan kriteria bahan, yaitu *carbon steel* :

Tabel 3. Perhitungan Safety Factor Menurut Tegangan Izin

Arah Beban	Tegangan Max. (Pa)			Yield Strength (Pa)	SF			Ket.
	15 Mooring Diameter 0,137 m	15 Mooring Diameter 0,0274 m	3 Mooring Diameter 0,685 m		15 Mooring Diameter 0,137 m	15 Mooring Diameter 0,0274 m	3 Mooring Diameter 0,685 m	
Utara	$5,63 \times 10^8$	$1,22 \times 10^9$	$1,28 \times 10^8$	$7,58 \times 10^8$	1,35	0,62	5,92	Pass - No - Pass
Timur	$6,19 \times 10^8$	$1,31 \times 10^9$	$1,25 \times 10^8$	$7,58 \times 10^8$	1,22	0,58	6,06	Pass - No - Pass
Selatan	$6,32 \times 10^8$	$1,32 \times 10^9$	$1,06 \times 10^8$	$7,58 \times 10^8$	1,20	0,57	7,15	Pass - No - Pass
Barat	$5,58 \times 10^8$	$1,23 \times 10^9$	$1,14 \times 10^8$	$7,58 \times 10^8$	1,36	0,62	6,65	Pass - No - Pass

4.7 Validasi Model

Sebelum diaplikasikan pada kondisi yang sebenarnya, model harus divalidasi dengan perhitungan mekanika teknik agar tidak terjadi kesalahan pada saat permodelan.



Gambar 20. Defleksi Balok pada Mekanika Teknik

Untuk validasinya sendiri menggunakan perhitungan defleksi balok dengan rumus sebagai berikut :

$$v = \frac{PL^3}{3EI}$$

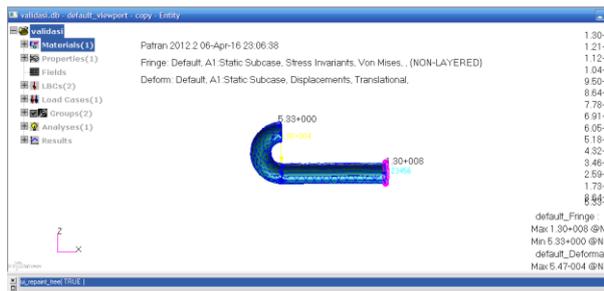
dimana :

- v = defleksi (m)
- P = gaya (N)
- L = panjang benda (m)
- E = modulus elastisitas bahan (Pa)
- I = momen inertiya benda
= momen inertiya lingkaran
= $\pi R^4/4$ (m⁴)

4.7.1. Validasi untuk Ukuran 15 Mooring dengan Diameter 0,137 m

dimana :

- P = 10000 N
- L = 0,822 m
- E = $1,9 \times 10^{11}$ Pa
- I = $3,14 \times (0,0685)^4 / 4$
= $1,7 \times 10^{-5}$ m⁴
- v = $5,73 \times 10^{-4}$ m



Gambar 21. Validasi Ukuran 15 Mooring dengan Diameter 0,137 m

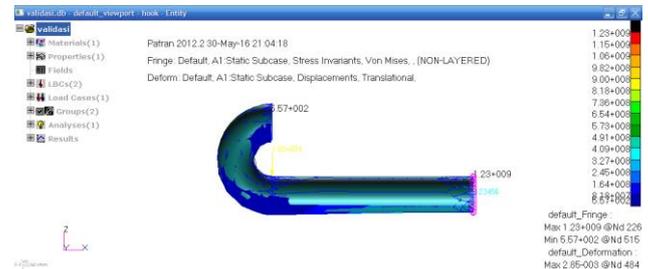
Nilai defleksi benda yang dianalisa menggunakan *software* sebesar $5,47 \times 10^{-4}$ m pada node 1987, sedangkan nilai defleksi benda yang dihitung menggunakan rumus defleksi balok sebesar $5,73 \times 10^{-4}$ m. Jadi selisih antara hasil *software* dengan perhitungan manual sebesar 4,5 %.

4.7.2. Validasi untuk Ukuran 15 Mooring dengan Diameter 0,0274 m

dimana :

- P = 10000 N
- L = 0,1644 m

- E = $1,9 \times 10^{11}$ Pa
- I = $3,14 \times (0,0137)^4 / 4$
= 3×10^{-8} m⁴
- v = $2,60 \times 10^{-3}$ m



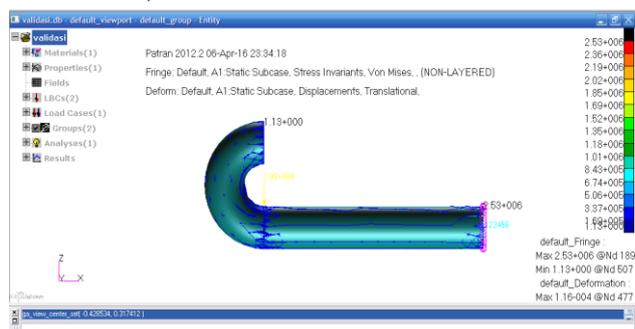
Gambar 22. Validasi Ukuran 15 Mooring dengan Diameter 0,0274 m

Nilai defleksi benda yang dianalisa menggunakan *software* sebesar $2,85 \times 10^{-3}$ m pada node 484, sedangkan nilai defleksi benda yang dihitung menggunakan rumus defleksi balok sebesar $2,60 \times 10^{-3}$ m. Jadi selisih antara hasil *software* dengan perhitungan manual sebesar 8,7 %.

4.7.3. Validasi untuk Ukuran 3 Mooring dengan Diameter 0,685 m

dimana :

- P = 10000 N
- L = 4,11 m
- E = $1,9 \times 10^{11}$ Pa
- I = $3,14 \times (0,3425)^4 / 4$
= $0,01$ m⁴
- v = $1,22 \times 10^{-4}$ m



Gambar 23. Validasi Ukuran 3 Mooring dengan Diameter 0,685 m

Nilai defleksi benda yang dianalisa menggunakan *software* sebesar $1,16 \times 10^{-4}$ m pada node 477, sedangkan nilai defleksi benda yang dihitung menggunakan rumus defleksi balok sebesar $1,22 \times 10^{-4}$ m. Jadi

selisih antara hasil *software* dengan perhitungan manual sebesar 4,9 %.

V. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan percobaan dan simulasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dari ketiga permodelan yang telah dianalisa, hasil tegangan *Von Mises* yang terbesar terjadi pada sambungan antara lambung kapal dengan *hooke*. Dimana untuk FDPSO dengan 15 *mooring* ukuran sesuai perhitungan memiliki nilai tegangan sebesar $6,32 \times 10^8$ Pa pada *node* 6463, untuk FDPSO dengan 15 *mooring* ukuran lima kali lebih kecil dari perhitungan memiliki nilai tegangan sebesar $1,32 \times 10^9$ Pa pada *node* 6463, sedangkan untuk FDPSO dengan 3 *mooring* nilai tegangannya sebesar $1,28 \times 10^8$ Pa pada *node* 6178. Tegangan maksimal untuk FDPSO dengan 15 *mooring* ukuran sesuai perhitungan dan FDPSO dengan 3 *mooring* masih berada dibawah *yield strength* dari material yang digunakan sebesar $7,58 \times 10^8$ Pa, oleh karena itu dapat dikatakan struktur konstruksi dari *hooke* yang digunakan sebagai sistem tambat pada kapal FDPSO berada pada kondisi yang aman. Sedangkan untuk FDPSO dengan 15 *mooring* ukuran lima kali lebih kecil dari perhitungan nilai tegangan maksimumnya diatas nilai *yield strength* namun masih dibawah dari nilai *ultimate strength*, oleh karena itu dapat dikatakan bahwa struktur konstruksi dari *hooke* akan mengalami deformasi plastis.
2. Nilai tegangan *Von Mises* yang terkecil terjadi pada bagian *hooke* yang tidak berhubungan dengan lambung kapal. Dimana untuk FDPSO dengan 15 *mooring* ukuran sesuai perhitungan memiliki nilai tegangan sebesar $2,23 \times 10^3$ Pa pada *node* 17131, untuk FDPSO dengan 15 *mooring* ukuran lima kali

lebih kecil dari perhitungan nilai tegangannya sebesar $2,23 \times 10^3$ Pa pada *node* 17131, sedangkan untuk FDPSO dengan 3 *mooring* nilai tegangannya sebesar $1,12 \times 10^4$ Pa pada *node* 16339.

3. Analisa tegangan pada permodelan FPSO dengan 15 *mooring* memiliki nilai tegangan yang lebih besar dibandingkan FPSO dengan 3 *mooring*, demikian juga untuk hasil deformasinya. Jika dilihat dari dimensi untuk permodelan *hooke* nya, maka yang menyebabkan nilai tegangan dan deformasi pada FPSO dengan 3 *mooring* memiliki nilai yang lebih kecil karena disebabkan oleh dimensinya yang lima kali lebih besar dibandingkan FPSO dengan 15 *mooring*. Hal ini menunjukkan bahwa besar kecilnya tegangan berbanding terbalik dengan luasan benda.

5.2 Saran

Hasil penelitian yang dilakukan penulis masih banyak yang dapat dilanjutkan. Sehingga saran penulis untuk penelitian lebih lanjut (*future research*) antara lain :

1. Pemodelan dengan menggunakan metode Elemen hingga sangat bergantung kepada jumlah elemen yang dipergunakan dan kesesuaian pemberian *constraint* dan *load* sesuai tempatnya pada suatu model. Sehingga untuk mendapatkan hasil pemodelan yang lebih baik hendaknya pembuatan model dilakukan dengan pembagian *mesh* yang lebih banyak lagi, terutama pada daerah yang menjadi mengalami pemusatan tegangan. Dengan demikian hasil yang akan didapat mendekati kondisi sesungguhnya.
2. Perlu adanya pengkajian ulang pada perhitungan beban agar tidak terjadi beban yang berlebihan.
3. Perlu dilakukan pengkajian analisa pada saat kapal dalam keadaan kosong.

4. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, perlu dilakukan analisa dinamis karena struktur menerima beban yang kompleks.
 5. Perlu dilakukan kajian *fatigue* dari struktur *hooke* yang digunakan sebagai sistem tambat untuk FPSO Sevan Marine.
- [10] Sevan FDPSO (Floating Drilling Production Storage and Offloading). Sevan Marine
 - [11] FPSO Flexible Risers and Subsea Cables. "Field Site Data and Metocean Design Basis". Balanak Field Development.

Daftar Pustaka

- [1] Web Kementrian ESDM, 2014, "Peluang Investasi Migas di Indonesia"
<http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4586-peluang-investasi-migas-di-indonesia.html>
- [2] Web Pemerintah Kabupaten Natuna, 2014, "Kondisi Geografis Kabupaten Natuna"
<http://www.natunakab.go.id/kondisi-geografis.html>
- [3] Rozak, Abdul dkk. "*Analisa Kekuatan Rantai Spread Mooring Akibat Motion Pada FPSO Berbasis Time Domain*". Surabaya : ITS
- [4] Helmidadang, 2012. "FPSO (Floating Production Storage and Offloading)"
<http://helmidadang.wordpress.com/2012/12/29/floating-production-storage-dan-offloading-fpso/>
- [5] "Mooring System Pada Kapal"
<http://belajarkapal.blogspot.co.id/2010/02/mooring-system-pada-kapal.html>
- [6] Volume II. 2015. "Rules For The Classification and Construction of Seagoing Steel Ships". Biro Klasifikasi Indonesia. Indonesia
- [7] Dason, Thomas H. 1984. "Offshore Structural Engineering". Department of Naval System Engineering. United States Naval Academy
- [8] Fleet Mooring. 1985. "Basic Criteria and Planning Guidelines". Naval Facilities Engineering Command. Virginia
- [9] Popov, E P. 1996. "Mekanika Teknik". Erlangga. Indonesia