

# ANALISA KEKUATAN STRUKTUR FPSO SEVAN MARINE DENGAN FEM DI PERAIRAN LEPAS PANTAI UTARA NATUNA-INDONESIA

Galang Choirun Amal<sup>1</sup>, Ahmad Fauzan Zakki<sup>1</sup>, Muhammad Iqbal<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Program Studi S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Email : [galangchoirun@rocketmail.com](mailto:galangchoirun@rocketmail.com)

## Abstrak

FPSO 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. FPSO bukan hanya berbentuk kapal tetapi kini ada juga berbentuk yang silinder yang merupakan hak paten dari *Sevan Marine*. Penelitian ini menganalisa kekuatan struktur FPSO yang diberikan tekanan hidrostatis dan hidrodinamik sesuai dengan distribusi yang terdapat dalam *Common Structural Rules* menggunakan FEM. Dalam proses analisa menggunakan *software Msc. Nastran Patran* didapatkan hasil tegangan maksimum untuk FPSO yang terkena tekanan hidrostatis sebesar  $133 \text{ N/mm}^2$  dan deformasi 5,73 cm. Untuk tekanan hidrodinamik H1 dan H2 mendapatkan tegangan sebesar  $11,8 \text{ N/mm}^2$  dan deformasi 0,392 cm. Untuk tekanan hidrodinamik F1 dan F2 mendapatkan tegangan sebesar  $41,3 \text{ N/mm}^2$  dan deformasi 1,16 cm. Untuk tekanan hidrodinamik R1 dan R2 mendapatkan tegangan sebesar  $113 \text{ N/mm}^2$  dan deformasi 4,39 cm. Untuk tekanan hidrodinamik P1 dan P2 mendapatkan tegangan sebesar  $40,4 \text{ N/mm}^2$  dan deformasi 1,72 cm. Dari hasil analisa kekuatan dinyatakan bahwa FPSO tersebut masih memenuhi *safety factor* BKI.

Kata kunci : FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), *Common Structural Rules*, Analisa Kekuatan, FEM, Hidrostatis, Hidrodinamik

## Abstract

The FPSO is floating building which's operated in the field of oil and offshore that to receive, process, keep and distribute the hydrocarbons that're permanently moored in which they operate and can be moved from one to another place. FPSO's not only shape like ship but also cylindrical which's being patent of *Sevan Marine*. This research contains the analysis strength structure of FPSO that was given by hydrostatic and hydrodynamic pressure in according to distribution contained *Common Structural Rules* by FEM. In the process of analysis using software *Msc. Nastran Patran*, we've found the result of ultimate strength for FPSO that're exposed by hydrostatic pressure of  $133 \text{ N/mm}^2$  and deformation 5,73 cm. For hydrodynamic pressure of H1 and H2 the ultimate strength is  $11,8 \text{ N/mm}^2$  and deformation 0,392 cm. For hydrodynamic pressure of F1 and F2 the ultimate strength is  $41,3 \text{ N/mm}^2$  and deformation 1,16 cm. For hydrodynamic pressure of R1 and R2 the ultimate strength is  $113 \text{ N/mm}^2$  and deformation 4,39 cm. For hydrodynamic pressure of P1 and P2 the ultimate strength is  $40,4 \text{ N/mm}^2$  and deformation 1,72 cm. From this result of the strength analysis is revealed that the FPSO still included into safety factor BKI.

Keyword : FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), *Common Structural Rules*, *Strength Analysis*, FEM, Hydrostatic, Hydrodinamik

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menjelaskan, Indonesia dikaruniai sumber daya alam melimpah. Sumber daya minyak dan gas yang diperkirakan mencapai

87,22 miliar barel dan 594,43 TSCF tersebar di Indonesia. Salah satu cadangan hidrokarbon yang sedang dieksplor adalah lepas pantai Utara Natuna. [8]

Untuk mengeksplor cadangan hidrokarbon yang tersebar dibanyak titik,

maka FPSO menjadi salah satu alternatif pilihan karena FPSO bersifat mobile dan dapat melakukan proses produksi. Revolusi teknologi dibidang FPSO sudah berkembang pesat, kini FPSO tidak hanya berbentuk kapal tapi juga berbentuk silinder. FPSO berbentuk silinder tersebut merupakan hak paten dari Sevan Marine yang beroperasi pada tahun 2007 dilepas pantai Brazil dengan desain operasi di perairan ultra-dalam, mulai 1000 m – 1600 m. Kemudian disusul dengan pembangunan FPSO lainnya antara lain: FPSO Hummingbird, FPSO Voyageur dan FPSO Golliath [1].

Kapal yang dibangun terlalu kuat akan menjadi sangat berat, lamban dan membutuhkan biaya yang lebih besar sedangkan kapal yang dibangun dan dirancang terlalu lemah akan sangat beresiko tinggi mengalami kegagalan struktur karena struktur tidak mampu menahan beban atau load yang bervariasi bila kapal berlayar, baik beban dari dalam maupun dari luar kapal, sehingga hal terburuk yang mungkin terjadi adalah tenggelamnya kapal. Konstruksi teknik, bagian – bagian pelengkap suatu bangunan atau struktur harus diberi ukuran – ukuran fisik tertentu. Bagian – bagian tersebut harus diukur dengan tepat untuk dapat menahan gaya – gaya yang sesungguhnya atau yang mungkin akan dibebankan. Demikian pula, bagian – bagian suatu struktur komposit harus cukup tegar hingga tidak akan melentur atau melengkung secara berlebihan jika bekerja dibawah beban yang diberikan [13].

Dalam pembahasan kali ini lebih difokuskan pada analisa kekuatan struktur dari FPSO *sevan marine* yang *outputnya* berupa hasil tegangan maksimum yang diperoleh akibat dari bentuk pemasangan konstruksi yang diberikan beban. Bagian – bagian suatu struktur harus diukur secara tepat sehingga dapat menahan beban yang diberikan dan harus cukup tegar sehingga tidak mudah melentur atau terdeformasi secara berlebihan.

## 1.2 Rumusan Masalah

FPU (*Floating Production Unit*) *Sevan Marine* ini beroperasi di wilayah Natuna-

Indonesia berbentuk silinder. Adapun *Principle Dimension* dari FPU-ICE FPSO berbentuk silinder *Sevan Marine* adalah sebagai berikut[5] :

<i>Water diameter-open water</i>	: 87,00 m
<i>Water diameter-ice condition</i>	: 103,00 m
<i>Draft-open water</i>	: 15,00 m
<i>Draft-ice condition</i>	: 26,00 m
<i>Main Deck El.</i>	: 30,00 m
<i>Hull El.</i>	: 11,00 m

Dari penjelasan di atas, dapat dirumuskan masalah yang dihadapi adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana menentukan permodelan bentuk konstruksi yang tepat FPSO *Sevan Marine* dari *Principle Dimension* beserta ukuran plat dan gading menggunakan *software* MSC. Patran?
2. Bagaimana kekuatan tegangan maksimum dari FPU-ICE FPSO *Sevan Marine* yang diteliti saat diberikan beban hidrostatik?
3. Bagaimana hasil kekuatan tegangan maksimum FPU-ICE FPSO *Sevan Marine* yang diteliti saat diberikan beban hidrodinamik?

## 1.3 Tujuan Masalah

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui permodelan bentuk konstruksi yang tepat FPSO *Sevan Marine* dari *Principle Dimension* beserta ukuran plat dan gading menggunakan *software* MSC. Patran?
2. getahui kekuatan tegangan maksimum dari FPU-ICE FPSO *Sevan Marine* yang diteliti saat diberikan beban hidrostatik.
3. Mengetahui hasil kekuatan tegangan maksimum FPU-ICE FPSO *Sevan Marine* yang diteliti saat diberikan beban hidrodinamik.

## 1.4 Batasan Masalah

Dalam penyusunan laporan tugas akhir ini permasalahan akan dibatasi sebagai berikut :

1. FPSO yang digunakan sebagai data berbentuk silinder yaitu FPSO FPU-ICE dari perusahaan *Sevan Marine*.
2. Menggunakan *software* MSC. Nastran Patran untuk permodelan dan analisa.

3. Analisa kekuatan yang digunakan menggunakan beban hidrostatis dan hidrodinamik.
4. Beban hidrostatis yang digunakan pada kondisi sarat penuh.
5. Beban hidrodinamik yang digunakan pada saat kondisi sarat penuh dengan persamaan EDWs sebagai berikut:
  - a. H1 dan H2 (*Head Sea*)
  - b. F1 dan F2 (*Following Sea*)
  - c. P1 dan P2 (*Pressure Maximum*)
  - d. R1 dan R2 (*Roll Motion*)
6. Proses permodelan tidak mencakup bangunan atas FPSO (hanya *main deck, hull* dan *bottom*).
7. Tidak menganalisa kekuatan struktur mooring FPSO.
8. Analisa hasil tegangan mengacu pada *rules* BKI untuk *safety factor*.
9. Analisa dilakukan hanya untuk mengetahui tegangan maksimum (*Ultimate Strength*) pada struktur FPSO jika diberikan beban.
10. FPSO ini beroperasi di Perairan Lepas Pantai Utara Natuna-Indonesia.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 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). Selain itu, gas hidrokarbon yang bisa ditambang mencapai 46 TCT [7].

### 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 [6].

## 2.3 Beban (*Load*)

### 2.3.1. *Hydrostatic Pressure* (Tekanan Hidrostatis)

Perhitungan besar tekanan eksternal (tekanan hidrostatis air laut) dan tekanan internal (muatan) diperlukan untuk menentukan pembebanan pada permodelan kapal yang telah dibuat [2]. Distribusi *pressure* hidrostatis dapat dilihat pada gambar 1.

- a. Tekanan Hidrostatis Air Laut

$$P = \rho g h_{\text{air}} \quad (1)$$

$\rho$  = massa jenis air laut (1025 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = percepatan gravitasi (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$h$  = kedalaman permukaan (m)

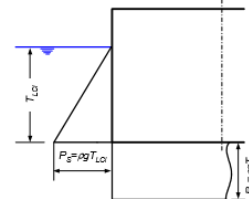
- b. Tekanan Muatan/Ballast

$$P = \rho g h$$

$\rho$  = massa jenis muatan/ballast (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  = percepatan gravitasi (9,8 m/s<sup>2</sup>)

$h$  = kedalaman permukaan (m)



Gambar 1. Pembebanan untuk *pressure* hidrostatis

### 2.3.2. *Hydrodynamic Pressure* (Tekanan Hidrodinamik)

Tekanan hidrodinamik menggunakan gelombang regular yang menghasilkan respon setara dengan nilai respon panjang dari sebuah komponen beban yang dianggap menjadi dominan dengan anggota struktur ditetapkan oleh *Equivalent Design Waves* (EDWs) yang terdiri sebagai berikut:

- a. H1 H2 (*Head Sea*) dan F1 F2 (*Following Sea*)

Tekana Hidrodinamik PH dan PF untuk *load cases* H1,H2,F1 dan F2 disegala titik pada *hull* di bawah *waterline* diperoleh dengan satuan kN/m<sup>2</sup> dari table 1. Distribusi *pressure* P<sub>12</sub> dapat dilihat pada gambar 2 [2].

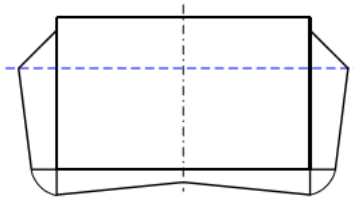
Tabel 1 Tekanan hidrodinamik untuk *load cases* H1, H2, F1 dan F2

Load Cases	Tekanan Hidrodinamik dalam kN/m <sup>2</sup>
H1	$P_{H1} = -k_l k_p P_{HF}$
H2	$P_{H2} = k_l k_p P_{HF}$
F1	$P_{F1} = -P_{HF}$
F2	$P_{F2} = P_{HF}$

Dengan persamaan sebagai berikut (CSR For Bulk Carriers Chp 4 Sec 5) :

$$P_{HF} = 3 f_p f_{nl} C \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}} \left( \frac{z}{TLCi} + \frac{l_{2y1}}{B} + 1 \right)$$

dengan  $\frac{l_{2y1}}{B} \leq 1$  dan  $z$  diambil tidak lebih dari TLCi (2)



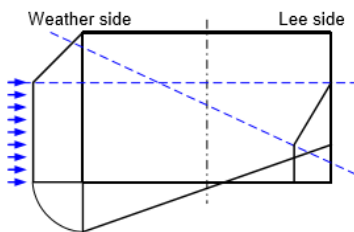
Gambar 2 Distribusi *pressure*  $P_{F2}$  pada *midship*

b. R1 dan R2 (*Rolling Motion*)

R terjadi pada saat gelombang regular ketika gerakan roll menjadi maksimum (EDW “R”). Tekana Hidrodinamik  $P_R$  untuk *load cases* R1 dan R2 disegala titik pada *hull* di bawah *waterline* diperoleh dengan satuan kN/m<sup>2</sup>. Distribusi *pressure*  $P_{R1}$  dapat dilihat pada gambar 3 dengan persamaan di bawah ini (CSR For Bulk Carriers Chp 4 Sec 5) [2] :

$$P_{R1} = f_{nl} \left( 10 y \sin \theta + 0,88 f_p C \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}} \left( \frac{l_{2y1}}{B} + 1 \right) \right)$$

$$P_{R2} = -P_{R1} \quad (3)$$



Gambar 3 Distribusi *pressure*  $P_{R1}$  pada *midship*

c. P1 dan P2 (*Pressure Maximum*)

Tekana Hidrodinamik  $P_p$  untuk *load cases* P1 dan P2 disegala titik pada *hull* di bawah *waterline* diperoleh dengan satuan kN/m<sup>2</sup> dari table 2, dari rumus dibawah ini. Distribusi *pressure*  $P_{p1}$  dapat dilihat pada

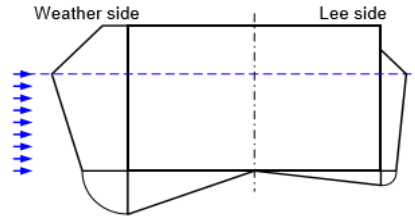
gambar 4 [2].

Tabel 2 Tekanan hidrodinamik untuk *load cases* P1 dan P2

Load Cases	Tekanan Hidrodinamik dalam kN/m <sup>2</sup>	
	Weather Side	Lee Side
P1	$P_{p1} = P_p$	$P_{p1} = P_p/3$
P2	$P_{p2} = -P_p$	$P_{p2} = -P_p/3$

Dengan persamaan sebagai berikut (CSR For Bulk Carriers Chp 4 Sec 5) :

$$P_p = 4,5 f_p f_{nl} C \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}} \left( 2 \frac{l_{z1}}{TLCi} + 3 \frac{l_{2y1}}{B} \right) \quad (4)$$



Gambar 4 Distribusi *pressure*  $P_{p1}$  pada *midship*

2.4 FEM (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga (*finite element method*) bias dipandang sebagai perluasan dari metode perpindahan ke masalah continuum berdimensi dua dan tiga seperti plat, struktur selaput (*shell*) dan benda pejal. Dalam metode ini, kontinum sebenarnya diganti dengan sebuah struktur ideal ekuivalen yang terdiri dari elemen-elemen unik (*discrete element*). Elemen ini disebut elemen berhingga dan dihubungkan bersama-sama di sejumlah titik simpul [3].

2.5 Prosedur Elemen Hingga

Penyelesaian dari metode elemen hingga umumnya menggunakan metode matriks. Notasi matriks, matriks gaya dinyatakan dalam  $\{F\} = \underline{F}$  dan matriks *displacement* dalam  $\{d\} = \underline{d}$

Matriks kekakuan elemen dinyatakan dalam  $[k]$  dan amtriks kekakuan global sistem struktur dinyatakan dalam  $[K]$ .

Persamaan dari kesetimbangan sistem struktur dinyatakan dalam:

$$\underline{F} = \underline{K} \underline{d} \quad (5)$$

Persamaan elemen yang dihasilkan secara umum adalah sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dots \\ d_n \end{Bmatrix}$$

Atau  $\{f\} = [k] \{d\}$  (6)

Dimana:

$\{f\}$  = matriks gaya

$[k]$  = matriks kekakuan

$\{d\}$  = matriks deformasi [4]

## 2.6 Jenis – Jenis Elemen

### 2.6.1 Elemen Skalar

Elemen skalar adalah akibat dari generalisasi secara linier pegas elastik yang menghubungkan 2 node. Pada prinsipnya, beberapa jumlah dari perpindahan komponen pada nodal bisa dikopel berdasarkan pada perpindahan komponen pada nodal yang lain.

### 2.6.2 Elemen Garis

Elemen garis yaitu idealisasi satu dimensi dari solid elastis dimana semua sifat elastis berhubungan (misal : *extensional*, *torsional* dan *bending stiffness*) dan dihubungkan dengan perpindahan seperti ditunjukkan sebagai fungsi dari koordinat tunggal.

### 2.6.3 Elemen Luas

Elemen luas meliputi semua idealisasi *plate* dan *shell*. Misal, elemen *shell triangular* atau *quadrilateral* yang memiliki tiga dan empat nodal secara berturut turut dengan 6 derajat kebebasan per nodal.

### 2.6.4 Elemen Volume

Elemen ini merupakan idealisasi dari variasi bentuk penampang tiga dimensi, dimana dasar bentuk elemen tiga dimensi salah satunya yaitu *tetrahedral* atau *hexahedral*.

## 2.7 Metode Kekakuan (*Stiffness / Displacement Method*)

Metode kekakuan ini adalah prinsip dasar dalam sebuah analisis struktur, salah satunya adalah analisis struktur dengan metode elemen hingga linear. Dalam sebuah analisis struktur, terdapat koefisien-koefisien yang mempengaruhi kekakuan dan defleksi. Kompleksitas geometri struktur, maupun kompleksitas perakitan dari banyak komponen pada sebuah struktur

mengakibatkan teknik *differential* menjadi problem yang terlalu kompleks. Oleh karena itu formulasi matematis dalam memecahkan problem struktur dibentuk dalam persamaan aljabar daripada persamaan differensial. Penggunaan koefisien-koefisien ini, khususnya yang menyatakan hubungan antara gaya dan displasemen, sangatlah diperlukan dalam formulasi persamaan aljabar. [10]

## 2.8 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 [9] :

$$FS = \frac{\sigma_{Ultimate}}{\sigma_{ijin}} \quad (7)$$

## III. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Materi Penelitian

Materi penelitian yang dimaksud dalam penelitian ini meliputi data- data yang akan di proses dalam penelitian antara lain :

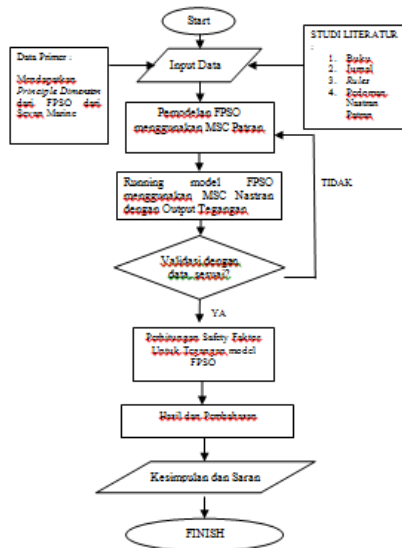
a. *Principle Dimension* dari FPU-ICE FPSO *Sevan Marine* adalah sebagai berikut [5] :

<i>Water diameter-open water</i>	: 87,00 m
<i>Water diameter-ice condition</i>	: 103,0 m
<i>Draft-open water</i>	: 15,00 m
<i>Draft-ice condition</i>	: 26,00 m
<i>Main Deck El.</i>	: 30,00 m
<i>Hull El.</i>	: 11,00 m

b. Beban yang dalam analisa tugas akhir ini adalah beban hidrostatis air laut, beban muatan dan beban hidrodinamik air laut.

### 3.2 Diagram Alir

Metodologi penelitian adalah kerangka dasar dari tahapan penyelesaian tugas akhir. Metodologi tersebut mencakup semua kegiatan yang akan dilaksanakan untuk memecahkan masalah proses analisa terhadap permasalahan tugas akhir ini. Tahapannya digambarkan dalam flowchart berikut (gambar 5):



Gambar 5. Diagram alir penelitian

#### IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Pembuatan Model

Sevan FPU-ICE FPSO dimodelkan berdasarkan metode elemen hingga sehingga menjadi sebuah sistem *multi degree of freedom* dan dibuat pemodelannya dalam program bantu Msc Patran kemudian disimulasikan analisa hasil menggunakan program bantu Msc Nastran yang berbasis metode elemen hingga. Permodelan dibuat adalah bagian FPSO dari *bottom* sampai *main deck* tanpa bangunan atas dimaksudkan untuk melihat tegangan maksimal struktur dari FPSO tersebut .

##### 4.2. Perhitungan Tekanan

Perhitungan besar tekanan eksternal (tekanan hidrostatis/hidrodinamik air laut) dan tekanan internal (muatan) diperlukan untuk menentukan pembebanan pada permodelan kapal yang telah dibuat.

###### 1. Tekanan Hidrostatis Air Laut

$$P = \rho g h$$

$\rho$  = massa jenis air laut ( $1025 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$h$  = kedalaman permukaan (15 m)

$$P = 1025 \times 9,8 \times 15 \\ = 150675 \text{ Pa}$$

###### 2. Tekanan Muatan

$$P = \rho g h$$

$\rho$  = massa jenis *diesel oil* ( $870 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$h$  = kedalaman permukaan (11 m)

$$P = 870 \times 9,8 \times 11 \\ = 93786 \text{ Pa}$$

##### 3. Tekanan Hidrodinamik

###### a. H1, H2, F1 dan F2 (*Head dan Follow*)

###### • H1 dan H2

$$P_{H1} = 16,059 \text{ kPa} = 16059 \text{ Pa}$$

$$P_{H1} = 10,706 \text{ kPa} = 10706 \text{ Pa}$$

$$P_{H1} = 5,353 \text{ kPa} = 5353 \text{ Pa}$$

$$P_{H2} = -16,059 \text{ kPa} = -16059 \text{ Pa}$$

$$P_{H2} = -10,706 \text{ kPa} = -10706 \text{ Pa}$$

$$P_{H2} = -5,353 \text{ kPa} = -5353 \text{ Pa}$$

Tinggi Gelombang /  $H_w$  :

$P_w, W_L$  = Tekanan yang berada pada sarat *loading condition*

$$H_w = \frac{P_w, W_L}{\rho g} = \frac{16059}{1025 \times 9,8} = 1,597 \text{ m}$$

###### • F1 dan F2

$$P_{F1} = -57,357 \text{ kPa} = -57356 \text{ Pa}$$

$$P_{F1} = -38,238 \text{ kPa} = -38238 \text{ Pa}$$

$$P_{F1} = -19,119 \text{ kPa} = -19119 \text{ Pa}$$

$$P_{F2} = 57,357 \text{ kPa} = 57356 \text{ Pa}$$

$$P_{F2} = 38,238 \text{ kPa} = 38238 \text{ Pa}$$

$$P_{F2} = 19,119 \text{ kPa} = 19119 \text{ Pa}$$

Tinggi Gelombang /  $H_w$  :

$P_w, W_L$  = Tekanan yang berada pada sarat *loading condition*

$$H_w = \frac{P_w, W_L}{\rho g} = \frac{57356}{1025 \times 9,8} = 5,704 \text{ m}$$

###### b. R1 dan R2 (*Rolling Motion*)

$$P_{R1} = 108,190 \text{ kPa} = 108190 \text{ Pa}$$

$$P_{R2} = - P_{R1} = - 108,190 \text{ kPa} = -108190 \text{ Pa}$$

$$P_{R1} = 16,110 \text{ kPa} = 16110 \text{ Pa}$$

$$P_{R2} = - P_{R1} = - 16,110 \text{ kPa} = -16110 \text{ Pa}$$

$$P_{R1} = 0$$

$$P_{R2} = - P_{R1} = 0$$

$$P_{R1} = 91,950 \text{ kPa} = 91950 \text{ Pa}$$

$$P_{R2} = - P_{R1} = - 91,950 \text{ kPa} = -91950 \text{ Pa}$$



- a. Tinggi Gelombang /  $H_w$  (*Weather Side*) :

$P_w, W_L$  = Tekanan yang berada pada sarat *loading condition*

$$H_w = \frac{P_w, W_L}{\rho g} = \frac{108190}{1025 \cdot 9,8} = 10,771 \text{ m}$$

- b. Tinggi Gelombang /  $H_w$  (*Lee Side*) :

$P_w, W_L$  = Tekanan yang berada pada sarat *loading condition*

$$H_w = \frac{P_w, W_L}{\rho g} = \frac{91950}{1025 \cdot 9,8} = 9,15 \text{ m}$$

- c. **P1 dan P2 (Pressure Maximum)**

Tabel 3 Hasil Perhitungan Untuk *Load Cases* P1 dan P2

Load Cases	Tekanan Hidrodinamik	
	Weather Side	Lee Side
P1	$P_{p1} = P_p = 72,593 \text{ kPa} = 72593 \text{ Pa}$	$P_{p1} = P_p/3 = 72,593 \text{ kPa}/3 = 24,198 \text{ kPa} = 24198 \text{ Pa}$
	$P_{p1} = P_p = 43,556 \text{ kPa} = 43556 \text{ Pa}$	$P_{p1} = P_p/3 = 43,556 \text{ kPa}/3 = 14,516 \text{ kPa} = 14516 \text{ Pa}$
	$P_{p1} = P_p = 0$	$P_{p1} = P_p/3 = 0$
P2	$P_{p2} = -P_p = -72,593 \text{ kPa} = -72593 \text{ Pa}$	$P_{p2} = -P_p/3 = -72,593 \text{ kPa}/3 = -24,198 \text{ kPa} = -24198 \text{ Pa}$
	$P_{p2} = -P_p = -43,556 \text{ kPa} = -43556 \text{ Pa}$	$P_{p2} = -P_p/3 = -43,556 \text{ kPa}/3 = -14,516 \text{ kPa} = -14516 \text{ Pa}$
	$P_{p2} = -P_p = 0$	$P_{p2} = -P_p/3 = 0$

- a. Tinggi Gelombang /  $H_w$  (*Weather Side*) :

$P_w, W_L$  = Tekanan yang berada pada sarat *loading condition*

$$H_w = \frac{P_w, W_L}{\rho g} = \frac{72593}{1025 \cdot 9,8} = 7,227 \text{ m}$$

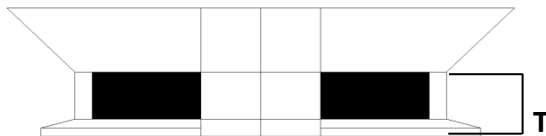
- b. Tinggi Gelombang /  $H_w$  (*Lee Side*) :

$P_w, W_L$  = Tekanan yang berada pada sarat *loading condition*

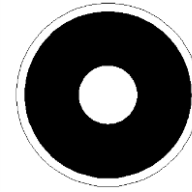
$$H_w = \frac{P_w, W_L}{\rho g} = \frac{24198}{1025 \cdot 9,8} = 2,409 \text{ m}$$

### 4.3 Kondisi Pembebanan

Kondisi pembebanan yang diambil sebagai input model berdasarkan dengan regulasi BKI 2014 Vol II Sect.24.B.2.2 ada 4 macam kondisi. Kondisi pembebanan yang akan dilakukan penulis dalam kondisi sarat penuh dan muatan penuh (lihat gambar 6).



Tampak Depan



Tampak Atas

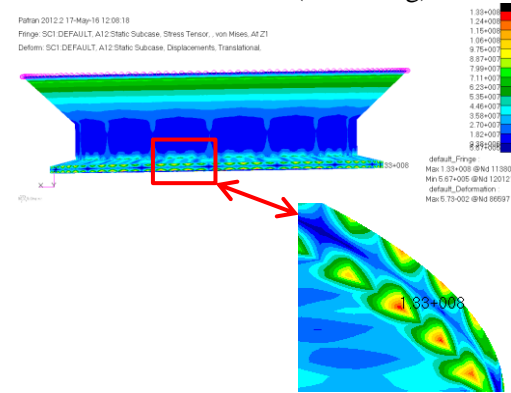
Gambar 6 *Loading condition* yang direncanakan

### 4.4 Analisa Kekuatan

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

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

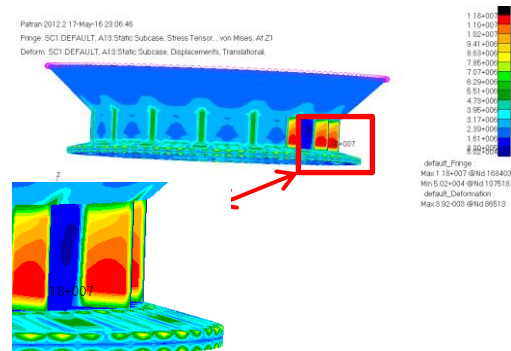
- a. *Pressure* Hidrostatik (air tenang)



Gambar 7 Hasil *running* tegangan maksimal pada struktur keseluruhan FPSO

Pada kondisi ini tegangan maksimal yang terjadi adalah sebesar  $1,33 \times 10^8$  Pa pada *node* @11380 dan nilai deformasi maksimal sebesar 5,73 cm terjadi pada *node* @86597. Tegangan maksimal terjadi pada pertemuan *web frame* pada plat di bagian *bottom* dengan *web transverse* pada *bottom* yang mendapat tekanan besar dari air laut.

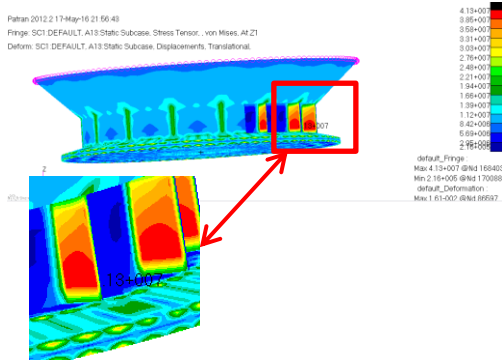
- b. H1 dan H2



Gambar 8 Hasil *running* tegangan maksimal pada struktur keseluruhan FPSO pada kondisi H1

Pada kondisi ini tegangan maksimal yang terjadi adalah sebesar  $1,18 \times 10^7$  Pa pada *node* @168403 dan nilai deformasi maksimal sebesar 0,392 cm terjadi pada *node* @86513. Tegangan maksimal terjadi pada sekat pada bagian *hull structure* yang mendapat tekanan hidrodinamik air laut.. Kondisi H1 menyebabkan FPSO mengalami Hogging sedangkan H2 mengalami sagging.

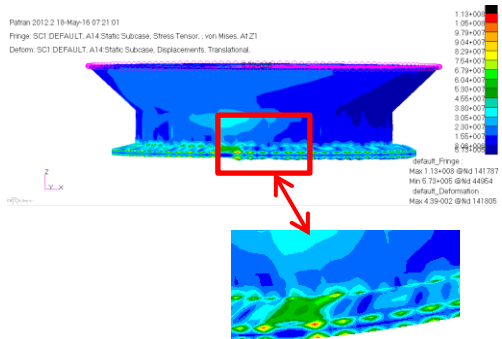
c. F1 dan F2



Gambar 9 Hasil *running* tegangan maksimal pada struktur keseluruhan FPSO pada kondisi F2

Pada kondisi ini tegangan maksimal yang terjadi adalah sebesar  $4,13 \times 10^7$  Pa pada *node* @168403 dan nilai deformasi maksimal sebesar 1,61 cm terjadi pada *node* @86597. Tegangan maksimal terjadi pada sekat pada bagian *hull structure* yang mendapat tekanan hidrodinamik air laut.. Kondisi F2 menyebabkan FPSO mengalami Hogging sedangkan F1 mengalami sagging.

d. R1 dan R2

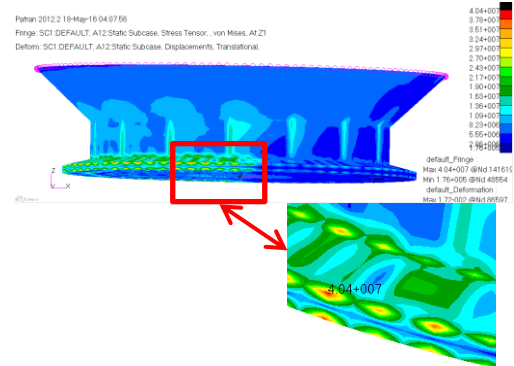


Gambar 10 Hasil *running* tegangan maksimal pada struktur keseluruhan FPSO pada kondisi R1

Pada kondisi ini tegangan maksimal yang terjadi adalah sebesar  $1,13 \times 10^8$  Pa pada *node* @141787 dan nilai deformasi

maksimal sebesar 4,39 cm terjadi pada *node* @141805. Tegangan maksimal terjadi pada pertemuan *web frame* pada plat di bagian *bottom* dengan *web transverse* pada *bottom* dan berada pada titik tengah sumbu FPSO saat terjadi *rolling* karena mendapat tekanan hidrodinamik air laut. Kondisi R1 menyebabkan FPSO *rolling* ke kanan (*weather side up, lee side down*). Kondisi R2 menyebabkan FPSO *rolling* ke kiri (*weather side down, lee side up*).

e. P1 dan P2



Gambar 11 Hasil *running* tegangan maksimal pada struktur keseluruhan FPSO pada kondisi P1

Pada kondisi ini tegangan maksimal yang terjadi adalah sebesar  $4,04 \times 10^7$  Pa pada *node* @141619 dan nilai deformasi maksimal sebesar 1,72 cm terjadi pada *node* @86597. Tegangan maksimal terjadi pada pertemuan *web frame* pada plat di bagian *bottom* dengan *web transverse* pada *bottom* bagian *weather side (starboard)* yang mendapat tekanan hidrodinamik air laut lebih besar dibandingkan dengan bagian *lee side (portside)*. Kondisi P1 menyebabkan bagian FPSO *weather side up, lee side up*. Kondisi P2 menyebabkan bagian FPSO *weather side down, lee side down*.

4.5 Hasil Analisa Linear Statis

Setelah dilakukan analisa linear statis pada kondisi sarat penuh dengan beban hidrostatik dan hidrodinamik maka didapatkan hasil seperti berikut.



Tabel 4 Rekap hasil analisa keseluruhan struktur

LOAD CASE	Keseluruhan Struktur			
	Tegangan (N/mm <sup>2</sup> )	Node	Deformasi (cm)	Node
HIDROSTATIK	133	11380	5.73	86597
H1 dan H2	11.8	168403	0.392	86513
F1 dan F2	41.3	168403	1.16	86597
R1 dan R2	113	141787	4.39	141805
P1 dan P2	40.4	141619	1.72	86597

Tabel 5 Rekap hasil analisa *bottom structure*

LOAD CASE	Bottom			
	Tegangan (N/mm <sup>2</sup> )	Node	Deformasi (cm)	Node
HIDROSTATIK	133	11380	5.2	86513
H1 dan H2	9.67	142795	0.389	87437
F1 dan F2	34.7	144139	1.47	86513
R1 dan R2	113	141787	4.39	141805
P1 dan P2	40.4	141619	1.56	86513

Tabel 6 Rekap hasil analisa *hull structure*

LOAD CASE	Hull			
	Tegangan (N/mm <sup>2</sup> )	Node	Deformasi (cm)	Node
HIDROSTATIK	114	15547	3.01	15498
H1 dan H2	11.8	168403	0.187	70892
F1 dan F2	41.3	168403	0.71	116382
R1 dan R2	51	698	1.21	7752
P1 dan P2	30.9	168163	0.563	7752

Tabel 7 Rekap hasil analisa *main deck structure*

LOAD CASE	Main Deck			
	Tegangan (N/mm <sup>2</sup> )	Node	Deformasi (cm)	Node
HIDROSTATIK	80.6	42247	0.649	13886
H1 dan H2	6.07	5003	0.185	26284
F1 dan F2	23	5003	0.705	26284
R1 dan R2	49.7	106964	0.954	18589
P1 dan P2	18	175598	0.519	26284

Tabel 8 Rekap hasil analisa plat bagian luar

LOAD CASE	Plat Bagian Luar			
	Tegangan (N/mm <sup>2</sup> )	Node	Deformasi (cm)	Node
HIDROSTATIK	133	11380	5.2	86513
H1 dan H2	9.67	144139	0.392	86513
F1 dan F2	34.7	144139	1.47	86513
R1 dan R2	113	141787	4.39	141805
P1 dan P2	40.4	141619	1.56	86513

#### 4.6 Safety Factor

Faktor keamanan adalah faktor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan teknik dari beban luar, yaitu beban tekan maupun tarik.

Sebelum menghitung *safety factor*, dicari terlebih dahulu nilai tegangan ijin sesuai dengan ketentuan **BKI Bab 5, D.1.2**.

##### a. Keseluruhan Struktur

Tabel 9 Perhitungan *safety factor* menurut tegangan ijin BKI untuk keseluruhan struktur

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	133	190	1.428571429	ok
H1 dan H2	11.8	190	16.10169492	ok
F1 dan F2	41.3	190	4.600484262	ok
R1 dan R2	113	190	1.681415929	ok
P1 dan P2	40.4	190	4.702970297	ok

Tabel 10 Perhitungan *safety factor* menurut kriteria bahan BKI untuk keseluruhan struktur

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	133	400	3.007518797	ok
H1 dan H2	11.8	400	33.89830508	ok
F1 dan F2	41.3	400	9.685230024	ok
R1 dan R2	113	400	3.539823009	ok
P1 dan P2	40.4	400	9.900990099	ok

##### b. Bottom Structure

Tabel 11 Perhitungan *safety factor* menurut tegangan ijin BKI untuk *bottom structure*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	133	190	1.428571429	ok
H1 dan H2	9.67	190	19.6483971	ok
F1 dan F2	34.7	190	5.475504323	ok
R1 dan R2	113	190	1.681415929	ok
P1 dan P2	40.4	190	4.702970297	ok

Tabel 12 Perhitungan *safety factor* menurut kriteria bahan BKI untuk *bottom structure*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	133	400	3.007518797	ok
H1 dan H2	9.67	400	41.36504654	ok
F1 dan F2	34.7	400	11.52737752	ok
R1 dan R2	113	400	3.539823009	ok
P1 dan P2	40.4	400	9.900990099	ok

##### c. Hull

Tabel 13 Perhitungan *safety factor* menurut tegangan ijin BKI untuk *hull*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	114	190	1.666666667	ok
H1 dan H2	11.8	190	16.10169492	ok
F1 dan F2	41.3	190	4.600484262	ok
R1 dan R2	51	190	3.725490196	ok
P1 dan P2	30.9	190	6.148867314	ok

Tabel 14 Perhitungan *safety factor* menurut kriteria bahan BKI untuk *hull*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	114	400	3.50877193	ok
H1 dan H2	11.8	400	33.89830508	ok
F1 dan F2	41.3	400	9.685230024	ok
R1 dan R2	51	400	7.843137255	ok
P1 dan P2	30.9	400	12.94498382	ok

d. *Main Deck Structure*

Tabel 15 Perhitungan *safety factor* menurut tegangan ijin BKI untuk *main deck structure*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	80.6	190	2.357320099	ok
H1 dan H2	6.07	190	31.3014827	ok
F1 dan F2	23	190	8.260869565	ok
R1 dan R2	49.7	190	3.822937626	ok
P1 dan P2	18	190	10.55555556	ok

Tabel 16 Perhitungan *safety factor* menurut kriteria bahan BKI untuk *main deck structure*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	80.6	400	4.962779156	ok
H1 dan H2	6.07	400	65.89785832	ok
F1 dan F2	23	400	17.39130435	ok
R1 dan R2	49.7	400	8.048289738	ok
P1 dan P2	18	400	22.22222222	ok

e. *Plat Bagian Luar*

Tabel 17 Perhitungan *safety factor* menurut tegangan ijin BKI untuk *plat bagian luar*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	133	190	1.428571429	ok
H1 dan H2	9.67	190	19.6483971	ok
F1 dan F2	34.7	190	5.475504323	ok
R1 dan R2	113	190	1.681415929	ok
P1 dan P2	40.4	190	4.702970297	ok

Tabel 18 Perhitungan *safety factor* menurut kriteria bahan BKI untuk *plat bagian luar*

LOAD CASE	Tegangan Max (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (N/mm <sup>2</sup> )	Safety Factor	Keterangan
HIDROSTATIK	133	400	3.007518797	ok
H1 dan H2	9.67	400	41.36504654	ok
F1 dan F2	34.7	400	11.52737752	ok
R1 dan R2	113	400	3.539823009	ok
P1 dan P2	40.4	400	9.900990099	ok

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari permodelan konstruksi untuk ukuran plat dan profil dan analisa struktur konstruksi lambung FPU-ICE FPSO *Sevan Marine* dengan menggunakan program Msc Patran dan Msc Nastran dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. FPSO yang diberikan beban hidrostatis memiliki tegangan maksimum sebesar 133 N/mm<sup>2</sup> dan terjadi pada daerah *bottom* FPSO. Tegangan maksimal tersebut masih berada pada kondisi yang aman.
2. FPSO yang diberikan beban hidrodinamik memiliki nilai tegangan maksimum masing-masing :
  - H1 dan H2 sebesar 11,8 N/mm<sup>2</sup>
  - F1 dan F2 sebesar 41,3 N/mm<sup>2</sup>
  - R1 dan R2 sebesar 113 N/mm<sup>2</sup>
  - P1 dan P2 sebesar 40,4 N/mm<sup>2</sup>
 Tegangan maksimal tersebut masih berada pada kondisi yang aman.
3. FPSO yang diberikan beban hidrodinamik didapatkan bahwa kondisi R1 maupun R2 memiliki tegangan maksimum paling besar yaitu sebesar 113 N/mm<sup>2</sup> dibandingkan pada saat kondisi H1,H2,F1,F2,P1 dan P2.
4. Sedangkan untuk FPSO yang diberikan beban hidrodinamik kondisi H1 ataupun H2 memiliki tegangan maksimum paling yaitu 11,8 N/mm<sup>2</sup> dibandingkan pada saat kondisi F1,F2,R1,R2,P1 dan P2.

### 5.2 Saran

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 dilakukan analisa tubrukan antara kapal dengan FPSO tersebut.
3. Perlu dilakukan kajian kekuatan dan *fatigue* untuk sistem *mooring* dan tambat dari FPU-ICE FPSO *Sevan Marine*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ardiana, Mita. 2015, “ Analisa Bentuk Variasi *Bottom* Terhadap Nilai *Heave* dan *Pitch* FPSO Berbentuk Silinder di Perairan Lepas Pantai Utara Natuna-Indonesia”, Universitas Diponegoro, Semarang.
- [2] *Common Structural Rules For Bulk Carriers Chapter 4*, Juli 2012.
- [3] Ghali, A., Neville, A.M. 1985. *Analisa Struktur Edisi Kedua*, Jakarta: Penerbit Erlangga
- [4] Handayanu.2012.*Metode Elemen Hingga*, Surabaya: Institute Teknologi Sepuluh November
- [5] He, Zhengmin. 2014. *Analysis and Design of SEVAN FPSO agaist Extreme Ice Actions*. Norwegian University of Science and Technology. Norwegia
- [6] Komalasari, Rani. 2014. Studi Perbandingan Performa *Hullform* FPSO Berbentuk Silinder dan FPSO Berbentuk Kapal di perairan Lepas Pantai Utara Natuna - Indonesia. Universitas Diponegoro, Semarang
- [7] Web Pemerintah Kabupaten Natuna, 2014, “ Kondisi Geografis Kabupaten Natuna”. <http://www.natunakab.go.id/kondisi-geografis.html>
- [8] 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>
- [9] Zulfikar, Akhmad Syarif. 2015. Analisa Kekuatan Konstruksi Ruang Muat Kapal *Self Propeller Oil Barge* Salra 115 Menggunakan Metode Elemen Hingga Linier dan Non Linier, Universitas Diponegoro, Semarang.
- [10] Zaki, Ahmad Fauzan. 2014. *Buku Ajar Metode Elemen Hingga*, Semarang: Universitas Diponegoro