

# Karakteristik Respon FPSO Konversi Tanker Ukuran 310 M

## *Response Characteristics of FPSO Conversion of Tanker Size 310 M*

Luh Putri Adnyani<sup>1,\*</sup>, Rima Gusriana Harahap<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Teknik Kelautan, Jurusan Sains Teknologi Pangan dan Kemaritiman, Institut Teknologi Kalimantan, 76127, Indonesia

\* Corresponding author : luhputria@itk.ac.id  
Tel.: +62-812-1711-9059; fax.: +62-54-285-308-00  
Received: Jan 10, 2019; Accepted: Apr 27, 2019.  
DOI: 10.25299/saintis.2019.vol19(1).2524

### Abstrak

*Floating Production Storage and Offloading (FPSO)* sudah banyak beroperasi di seluruh dunia dan akan lebih banyak lagi yang akan dibangun untuk eksplorasi dan eksploitasi laut dalam. Penelitian ini menunjukkan respon dari FPSO dengan ukuran 310 m lpp dan membandingkan nilai respon yang didapat dengan experiment yang didapatkan oleh Kim. Penelitian dimulai dengan memodelkan FPSO sesuai dengan data yang ada dan melakukan analisa dengan menggunakan pemodelan numerik. Dari hasil analisa didapatkan bahwa respon dari FPSO sangat dipengaruhi oleh gerakan dari FPSO akibat gelombang dan bervariasi terhadap sudut. Respon gaya geser longitudinal maksimum pada sudut 120°. Respon gaya geser transversal maksimum pada sudut 90°. Respon gaya geser vertikal maksimum pada sudut 90°. Respon *roll moment* maksimum pada sudut 90°. Respon *pitch moment* maksimum pada sudut 120°. Respon *yaw moment* maksimum pada sudut 60°.

**Kata Kunci:** *Floating Production Storage and Offloading*, respon, gaya geser, moment

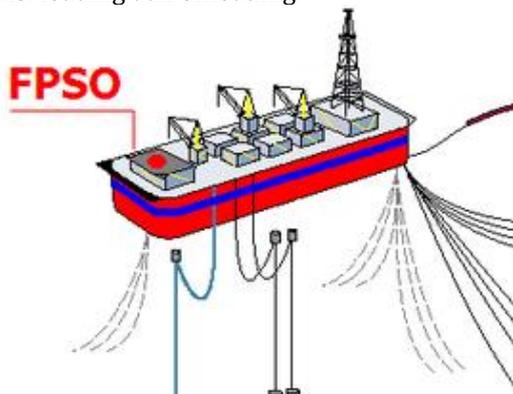
### Abstract

*Floating Production Storage and Offloading (FPSO)* has a lot of operating around the world and there will be more to be built for the exploration and exploitation of deep sea. This study shows the response of the 310 m LPP FPSO and compares the responses with experiment result by Kim [1]. The study begins by modeling the FPSO in accordance with the existing data and to analyze using numerical modeling. From the results found that the response of the FPSO is strongly influenced by the heading and motion of the FPSO. Maximum longitudinal shear force in 120°, maximum transverse shear force in 90°, maximum vertical shear force in 90°, maximum roll moment in 90°, maximum pitch moment in 120°, maximum yaw moment in 60°.

**Keywords :** *Floating Production Storage and Offloading*, respon, shear force, moment

## PENDAHULUAN

*Floating Production Storage and Offloading (FPSO)* sudah diinstal dengan sukses dan beroperasi di seluruh dunia selama 10 tahun terakhir, dan ke depan lebih banyak FPSO yang akan didesain dan diinstal. FPSO ditempatkan di daerah yang spesifik dengan pembebanan dinamis tertentu. FPSO harus didesain untuk memenuhi persyaratan di semua kondisi loading dan offloading.



**Gambar 1.** *Floating Production Storage and Offloading (FPSO)*, Sumber: Wikipedia

Beberapa penelitian sebelumnya mengamati karakteristik dinamis dari FPSO akibat angin, gelombang dan arus. Kim, dkk [1] mengamati respon FPSO dalam prediksi laut badai dengan program analisa dinamis couple kapal, mooring dan riser yang dibandingkan dengan pengukuran di wave tank. Tanker dan FPSO dihubungkan dengan system turret dan FPSO sendiri di mooring dengan 12 rantai-polyester-rantai di kedalaman 6000 ft. Hai Hong Sun dan Yong Bai [2] membuat penelitian tentang keandalan hull FPSO berdasarkan variasi waktu untuk mengembangkan kriteria desain dan perencanaan inspeksi yang rasional.

Dalam penelitian Amlashi dan Moan [3] dibahas tentang pengaruh kombinasi bending global dan double bottom, implikasi perhitungan pressure dengan menggunakan rule yang berbeda dan menganalisa distribusi tegangan nya. Dari beberapa penelitian sebelumnya, perlu dicari respon dari FPSO akibat beban gelombang dan mencari hubungan antara respon yang didapat pada FPSO ketika kondisi air tenang dan ketika dipengaruhi oleh gelombang.

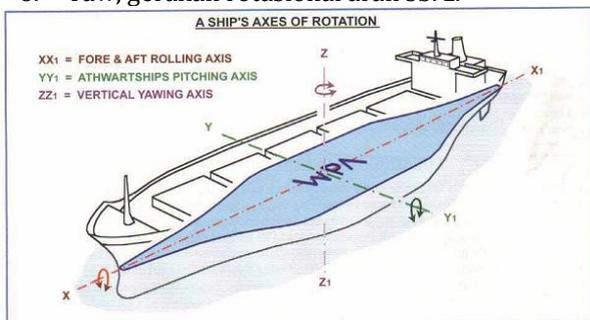
Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui respon FPSO pada kondisi air tenang dan membandingkan respon FPSO pada saat terdapat gelombang dengan variasi sudut datang gelombang dan perbedaannya terhadap hasil pada FPSO yang digunakan dalam jurnal Archandra Tahar dan M.H. Kim. 2003. *Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis and sensitivity study of a tanker-based FPSO*, diasumsikan sebagai struktur baru, dimodelkan sebagai rigid body, sehingga kekuatan dari FPSO tidak diperhitungkan; distribusi massa di atas FPSO dipertimbangkan dalam pemodelan melalui justifikasi peneliti; dan pembebanan untuk FPSO akan diambil dari beban lingkungan periode 100 tahun di Gulf Mexico.

## METODOLOGI

### Perilaku Gerak Struktur Terapung

Setiap struktur terapung yang bergerak di atas permukaan laut selalu mengalami gerakan osilasi. Gerakan osilasi ini terdiri dari 6 (enam) macam gerakan, yaitu 3 (tiga) macam gerakan lateral dan 3 (tiga) macam gerakan rotasional dalam 3 (tiga) arah sumbu yang ditunjukkan dalam Gambar 2. di bawah. Macam-macam gerakan itu meliputi:

1. Surge, gerakan transversal arah sb. x.
2. Sway, gerakan transversal arah sb. y.
3. Heave, gerakan transversal arah sb. z.
4. Roll, gerakan rotasional arah sb. x.
5. Pitch, gerakan rotasional arah sb. y.
6. Yaw, gerakan rotasional arah sb. z.



**Gambar 2.** Koordinat Gerakan Bangunan Apung  
Sumber dari Clark, I.C., [4]

Hanya 3 (tiga) macam gerakan, yaitu *heaving*, *rolling* dan *pitching*, yang merupakan gerakan osilasi murni karena gerakan ini bekerja dibawah gaya atau momen pengembali ketika struktur itu terganggu dari posisi kesetimbangannya. Pada kasus *surgings*, *heaving*, dan *yawing*, struktur tidak kembali pada posisi kesetimbangannya semula jika terganggu, kecuali jika ada gaya atau moment pengembali yang menyebabkannya bekerja dalam arah berlawanan.

### Bending Moment dan Shear Force

Gaya buoyancy diambil dari gaya hidrodinamis total pada bagian kapal, efek dari gerakan kapal pada tekanan hidrodinamis diabaikan[5]. Gaya buoyancy dihitung dengan mengkombinasikan dengan gaya gravitasi pada

bagian kapal untuk menghitung gaya resultan, yang diintegrasikan sepanjang kapal untuk menghasilkan gaya geser dan *bending moment*. Bending moment pada kapal dapat dibedakan menjadi 3 bagian, yaitu:

1. *Vertical bending moment*, menghasilkan defleksi pada sumbu y
2. *Horizontal bending moment*, menghasilkan defleksi pada sumbu z
3. *Transverse bending moment*, menghasilkan defleksi pada sumbu x

*Horizontal bending moment* dapat disebabkan oleh gerakan rolling dan arah datang gelombang yang menyudut atau puncak gelombang berada pada satu sisi dari kapal dalam suatu phase. Beberapa eksperimen menunjukkan bahwa horizontal *bending moment* dan *vertical bending moment* memiliki besaran yang sama. Kecuali untuk kapal catamaran, kombinasi gaya *hydrostatic* dan hidrodinamis tidak menghasilkan *bending moment* secara signifikan pada bidang transversal. Tegangan resultan maksimum pada beberapa titik untuk menghitung *vertical* dan *horizontal bending moment* diberikan dengan rumus:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{M_V z}{I_V}\right)^2 + \left(\frac{M_H y}{I_H}\right)^2} \quad (1)$$

Dimana,

$M_V$  = vertical bending moment

$M_H$  = horizontal bending moment

$y$  = jarak dari sumbu z (horizontal)

$z$  = jarak dari sumbu y (vertical)

$I_V$  = moment inersia dari apda sumbu y

$I_H$  = moment inersia pada sumbu z

Masing-masing bending moment tersebut juga dapat dihitung dengan menjumlahkan ketiga komponen, yaitu:

1. Yang disebabkan oleh perbedaan distribusi dari berat dan *buoyancy* ketika berada di kondisi air tenang
2. Yang disebabkan oleh gelombang yang mengenai kapal ketika air tenang
3. Yang dipengaruhi oleh gelombang ketika berada di bawah laut bergelombang.

Ketiga komponen jika digabungkan bersama akan menghasilkan total bending moment, komponen kedua dan ketiga disebut *wave bending moment*.

### Spektrum Gelombang

Model matematik spektrum secara umum didasarkan pada satu atau lebih parameter, misalnya tinggi gelombang signifikan, periode gelombang, faktor permukaan, dan lain-lain. Spektrum parameter tunggal yang paling sering digunakan adalah model *Pierson-Moskowitz* yang berdasarkan pada tinggi gelombang signifikan atau kecepatan angin. Selain itu ada beberapa spektrum parameter ganda yang bisa digunakan adalah *Bretschneider* (1969), *Scott* (1965) dan *ITTC* (1964). Sedangkan spektrum *JONSWAP* merupakan spektrum yang menggunakan lima parameter, namun biasanya tiga diantaranya adalah konstan.

Spektrum *JONSWAP* didasarkan pada percobaan yang dilakukan di *North Sea*. Formula

atau persamaan untuk spektrum JONSWAP dapat ditulis dengan modifikasi dari persamaan spektrum *Pierson-Moskowitz*, yaitu:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[ -1,25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[ \frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2r^2 \omega^2} \right]} \quad (2)$$

Dimana:

$\gamma$  = parameter puncak (*peaked-ness parameter*), yang bernilai dalam range 2-3, atau dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\gamma = 5 \quad ; \text{ Untuk } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6$$

$$\gamma = \text{EXP} \left( 5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right); \text{ Untuk } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 3,6$$

$\tau$  = parameter bentuk (*shape parameter*), untuk  $\omega \leq \omega_0 = 0,07$  dan  $\omega \geq \omega_0 = 0,09$

$\alpha$  = Konstanta Philips, dengan rumus = 5,058

$$\left[ \frac{H_s}{(T_p)^2} \right]^2 (1 - 0,287 \ln \gamma), \quad (3)$$

namun dalam keadaan normal  $\alpha = 0,0081$

Dimana :

$T_p$  = periode dari *spectral peak*

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan

## Pengumpulan Data

### Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan adalah data yang bersumber dari jurnal yang akan dibahas yaitu "*Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis and sensitivity study of a tanker-based FPSO*" Archandra Tahar dan M.H. Kim [1].

### Data FPSO

Tabel 1. Ukuran Utama FPSO

| Description                     | Symbol | Unit           | Quantities |
|---------------------------------|--------|----------------|------------|
| vessel size                     |        | kDWT           | 200        |
| length between perpendicular    | Lpp    | m              | 310        |
| breadth                         | B      | m              | 47.17      |
| depth                           | H      | m              | 28.04      |
| production level                |        | bpd            | 120,000    |
| draft                           | T      | m              | 18.90      |
| length-beam ratio               | L/B    |                | 6.57       |
| beam-draft ratio                | B/T    |                | 2.50       |
| displacement                    |        | MT             | 240,869    |
| block coefficient               | Cb     |                | 0.85       |
| water plane area                | A      | m <sup>2</sup> | 13,400.00  |
| water plane coefficient         | Cw     |                | 0.92       |
| center of gravity above base    | KG     | m              | 13.32      |
| metacentric height transverse   | MGt    | m              | 5.78       |
| metacentric height longitudinal | MGI    | m              | 403.83     |
| Transverse radius of gyration   | KXX    | M              | 14.77      |
| Longitudinal radius of gyration | Kyy    | m              | 77.47      |
| Yaw radius of gyration          | Kzz    | m              | 79.30      |

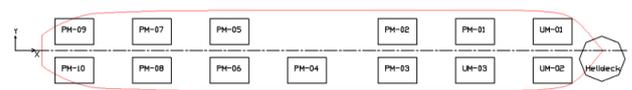
Sumber: Kim [1]

## Distribusi Beban

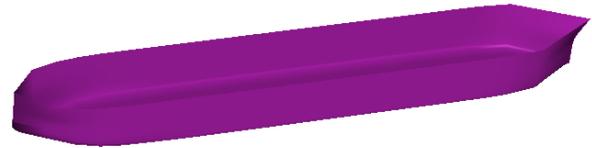
Tabel 2. Distribusi Beban FPSO

| Module Name  | Beban (ton) | X (m)  | Y (m)  | Z (m) |
|--------------|-------------|--------|--------|-------|
| Module PM-01 | 47.228051   | 221.53 | 19.846 | 43.28 |
| Module PM-02 | 55.099393   | 195.16 | 19.846 | 43.28 |
| Module PM-03 | 39.356709   | 175.98 | -19.85 | 43.28 |
| Module PM-04 | 47.228051   | 144.81 | -19.85 | 43.28 |
| Module PM-05 | 39.356709   | 108.85 | 19.846 | 43.28 |
| Module PM-06 | 47.228051   | 111.24 | -19.85 | 43.28 |
| Module PM-07 | 62.970735   | 82.47  | 19.846 | 43.28 |
| Module PM-08 | 47.228051   | 77.68  | -19.85 | 43.28 |
| Module PM-09 | 47.228051   | 44.11  | 19.846 | 33.53 |
| Module PM-10 | 47.228051   | 44.11  | -19.85 | 43.28 |
| Module UM-1  | 55.099393   | 257.49 | 19.846 | 43.28 |
| Module UM-2  | 55.099393   | 243.11 | -19.85 | 43.28 |
| Module UM-3  | 47.228051   | 207.14 | -19.85 | 43.28 |

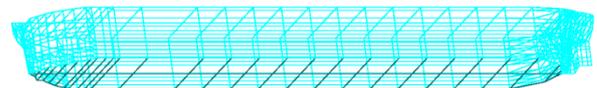
## Pemodelan



Gambar 3. Letak Module di Atas FPSO



Gambar 4. Pemodelan 3 Dimensi FPSO dalam Bentuk konseptual



Gambar 5. Pemodelan 3 Dimensi FPSO dalam Bentuk Wireframe

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Respon Kondisi Air Tenang

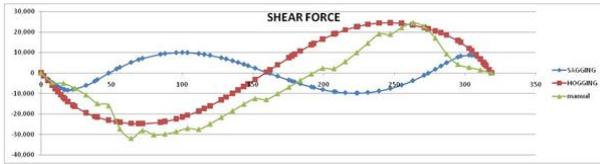
Besar respon struktur FPSO dihitung dengan menggunakan pemodelan numerik. Input nilai yang digunakan adalah tinggi gelombang ekstrim, yang diambil dengan menggunakan persamaan:

$$H_{ekstrim} = \frac{\lambda}{20} \quad (4)$$

Dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang, yang diasumsikan sama dengan panjang kapal, yaitu 318.9 m. Sehingga  $H_{ekstrim} = 15.945$  m. Keluaran dari pemodelan numeric ini adalah *shear force* dan *bending moment* pada kondisi *hogging* dan *sagging*.

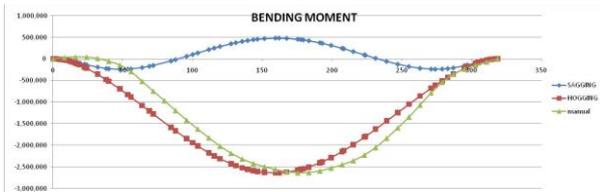
Kondisi *hogging* adalah kondisi dimana puncak gelombang berada di bagian tengah kapal serta kedua lembah gelombang berada di ujung-ujung kapal. Jika kapal disederhanakan sebagai sebuah balok panjang rata, maka balok tersebut ditumpu pada bagian tengahnya dan ditekan di kedua ujungnya. Kondisi *sagging* adalah kondisi puncak gelombang berada di kedua ujung kapal dan lembah gelombang berada di bagian tengah kapal. Pada kondisi *sagging* bagian tengah lambung melendut kebawah, struktur geladak mengalami beban tekan dan struktur dasar mengalami beban tarik.

Dari hasil pemodelan dan perhitungan, didapatkan nilai shear force dengan pemodelan numeric dan analitik seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Shear Force pada FPSO untuk Kondisi Hogging dan Sagging

Dari hasil pemodelan, didapatkan nilai bending moment dengan pemodelan numeric dan analitik seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Bending Moment pada FPSO untuk Kondisi Hogging dan Sagging

Shear force dan bending moment dari Pemodelan numeric merupakan fungsi kontinu yang disebabkan karena adanya perbedaan distribusi gaya buoyancy dan berat dari FPSO. Oleh karena itu, dilakukan koreksi dengan perhitungan manual yang menunjukkan bahwa setiap station sepanjang kapal terdapat nilai shear force dan bending momen tertentu.

Karakteristik respon akibat gelombang, spectrum gelombang dan arah datang gelombang tidak diperhitungkan ketika kondisi air tenang. Analisa dinamis FPSO perlu dilakukan untuk melihat pengaruh gelombang terhadap motion dari FPSO dan pengaruh motion terhadap respon.

Pada pemodelan FPSO, koordinat local berada di AP, maka gelombang buritan adalah gelombang datang dengan sudut 180°, dan gelombang haluan adalah gelombang datang sudut 0°. Gerakan surge merupakan salah satu pola gerakan horizontal untuk kapal atau bangunan lepas pantai. Karakteristik gerakan surge didominasi oleh gelombang buritan (sudut datang

gelombang 180°), kemudian gelombang haluan (sudut datang gelombang 0°). Sudut datang gelombang 150° dan 30° memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan gelombang perempat haluan. Sedangkan gelombang sisi (sudut datang gelombang 90°) memberikan efek yang paling kecil, dari grafik dapat dilihat bahwa nilainya hampir mendekati 0.

**Respon Kondisi Bergelombang**

Dari hasil pemodelan, didapatkan nilai respon untuk 6 gerakan FPSO, antara lain: vertical, longitudinal, dan transversal force yang merupakan respon dari gerakan translasi, serta *roll*, *pitch* dan *yaw moment* yang merupakan respon dari gerakan rotasi.

Sumbu-x pada grafik masing-masing respon adalah frekuensi (rad/s), sedangkan sumbu-y adalah non-dimensional sesuai dengan persamaan: Untuk gaya geser:

$$V_j' = \frac{\zeta_{Vj} \times L}{\zeta_0 g \Delta} \tag{5}$$

Untuk momen:

$$M_j' = \frac{M_j}{\zeta_0 g \Delta} \tag{6}$$

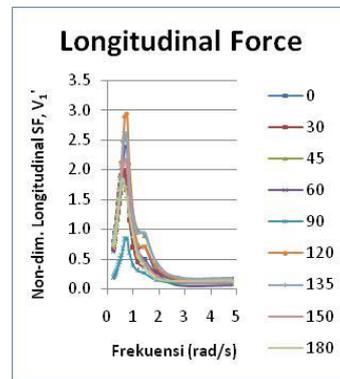
Dimana:

- $V_j'$  = Non-dimensional gaya geser
- $\zeta_{Vj}$  = Nilai respon gaya geser (KN)
- $L$  = Panjang keseluruhan kapal (m)
- $\zeta_0$  = Tinggi gelombang signifikan (m)
- $g$  = Gara gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $\Delta$  = displacement kapal (ton)
- $M_j'$  = Non-dimensional momen
- $M_j$  = Nilai respon momen (KN-m)

**Longitudinal Force**

Tabel 3 Nilai Respon Longitudinal Force pada H 15.945 m

| NILAI MAKSIMUM RESPON DENGAN H = 15.945 m |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sudut Heading                             | 0     | 30    | 45    | 60    | 90    | 120   | 135   | 180   |       |
| Long For                                  | 1.969 | 1.989 | 2.558 | 2.380 | 1.969 | 2.931 | 2.625 | 2.179 | 1.845 |
| Frekuensi (rad/s)                         | 0.610 | 0.676 | 0.676 | 0.676 | 0.757 | 0.757 | 0.676 | 0.676 | 0.610 |



Gambar 8. Longitudinal Force pada H 15.945 m Analisa respon gaya geser longitudinal pada FPSO pada H maksimum berdasarkan panjang

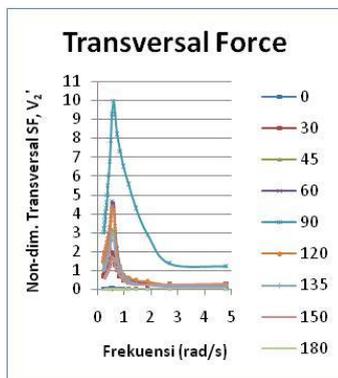
kapal, menunjukkan nilai maksimum pada sudut 120°. Gaya geser longitudinal dipengaruhi oleh gerakan *surge*, *roll*, *sway* dan *yaw*.

Gerakan *surge* dan *sway* memiliki karakteristik grafik yang hampir sama, dimana nilai maksimum berada pada frekuensi kecil/rendah. Frekuensi rendah atau frekuensi nol menunjukkan periode gelombang yang tidak terhingga atau dalam kondisi air tenang.

**Transversal Force**

**Tabel 4.** Nilai Respon *Transversal Force* pada H 15.945 m

| NILAI MAKSIMUM RESPON DENGAN H = 15.945 m |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sudut Heading                             | 0     | 30    | 45    | 60    | 90    | 120   | 135   | 150   | 180   |
| Tran For                                  | 0.032 | 1.921 | 3.156 | 4.644 | 9.922 | 4.318 | 3.014 | 1.721 | 0.029 |
| Frekuensi (rad/s)                         | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.610 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 |



**Gambar 9.** *Transversal Force* pada H 15.945 m

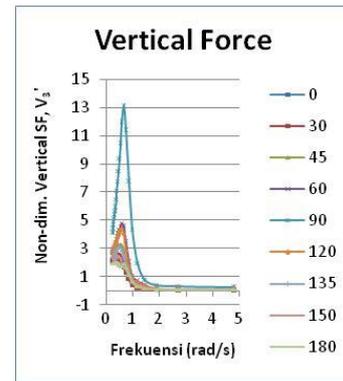
Analisa respon gaya geser transversal pada FPSO untuk H maksimum berdasarkan panjang kapal, menunjukkan nilai maksimum pada sudut 90°. Gaya geser transversal dipengaruhi oleh gerakan *sway*.

Gerakan *sway* merupakan salah satu pola gerakan horizontal untuk kapal atau bangunan lepas pantai. Karakteristik gerakan *sway* didominasi oleh gelombang sisi (sudut datang gelombang 90°). Pada gelombang perempat haluan intensitas respon sedikit menurun. Gerakan *sway* secara teoritis tidak akan terjadi pada gelombang buritan ataupun haluan, sudut datang gelombang 0° dan sudut datang gelombang 180° memiliki grafik yang menempel di sumbu-x grafik dan memiliki nilai respon 0.

**Vertical Force**

**Tabel 5** Nilai Respon *Vertical Force* pada H 15.945 m

| NILAI MAKSIMUM RESPON DENGAN H = 15.945 m |       |       |       |       |        |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Sudut Heading                             | 0     | 30    | 45    | 60    | 90     | 120   | 135   | 150   | 180   |
| Vert For                                  | 2.095 | 2.489 | 3.267 | 4.742 | 13.088 | 4.391 | 3.089 | 2.469 | 2.027 |
| Frekuensi (rad/s)                         | 0.676 | 0.439 | 0.556 | 0.610 | 0.676  | 0.610 | 0.511 | 0.439 | 0.411 |



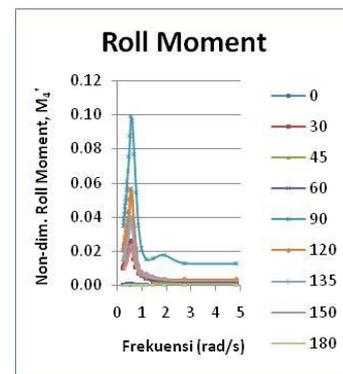
**Gambar 10.** *Vertical Force* pada H 15.945 m

Analisa respon gaya geser vertikal pada FPSO H maksimum berdasarkan panjang kapal, menunjukkan nilai maksimum pada sudut 90°. Gaya geser vertikal dipengaruhi oleh gerakan *heave*. Gerakan *heave* merupakan salah satu pola gerakan vertikal untuk kapal atau bangunan lepas pantai. Semakin kecil frekuensi maka nilai respon akan mendekati 1 atau lebih kecil dari 1, yang berarti respon struktur akibat adanya gelombang hamper tidak ada dan bahkan mengecil. Frekuensi rendah atau frekuensi nol menunjukkan periode gelombang yang tidak terhingga atau dalam kondisi air tenang. Kemudian grafik secara bertahap naik sampai mencapai puncak dan menurun lagi sampai mendekati 0.

**Roll Moment**

**Tabel 6.** Nilai Respon *Roll Moment* pada H 15.945 m

| NILAI MAKSIMUM RESPON DENGAN H = 15.945 m |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sudut Heading                             | 0     | 30    | 45    | 60    | 90    | 120   | 135   | 150   | 180   |
| Roll Mom                                  | 0.000 | 0.026 | 0.040 | 0.056 | 0.099 | 0.056 | 0.040 | 0.024 | 0.000 |
| Frekuensi (rad/s)                         | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 | 0.556 |



**Gambar 11.** *Roll Moment* pada H 15.945 m

Analisa respon *roll moment* pada FPSO untuk H maksimum berdasarkan panjang kapal, menunjukkan nilai maksimum pada sudut 90°. *Roll moment* dipengaruhi oleh gerakan *sway*, gerakan *heave* dan gerakan *roll* sendiri.

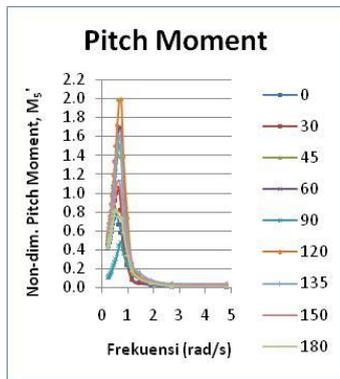
Gerakan *roll* merupakan mode gerakan vertikal untuk kapal atau bangunan lepas pantai. Pola perubahan respon gerakan relative sama dengan respon *heave*. Pada daerah sub-kritis

respons merepresentasikan nilai yang kecil, kemudian naik tajam pada daerah resonansi, dan menurun secara signifikan pada daerah super kritis. Karakteristik gerakan *roll* akan didominasi oleh gelombang sisi (sudut datang gelombang 90°), kemudian gelombang yang memiliki sudut sebesar 120° dan 60°.

**Pitch Moment**

**Tabel 7.** Nilai Respon *Pitch Moment* pada H 15.945 m

| NILAI MAKSIMUM RESPON DENGAN H = 15.945 m |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sudut Heading                             | 0     | 30    | 45    | 60    | 90    | 120   | 135   | 150   | 180   |
| Pitch Mom                                 | 0.792 | 1.049 | 1.510 | 1.696 | 0.479 | 1.981 | 1.607 | 1.134 | 0.832 |
| Frekuensi (rad/s)                         | 0.556 | 0.610 | 0.676 | 0.676 | 0.757 | 0.757 | 0.676 | 0.676 | 0.556 |



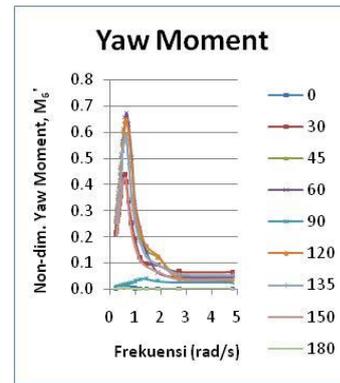
**Gambar 12.** *Pitch Moment* pada H 15.945 m

Analisa respon *pitch moment* pada FPSO untuk H maksimum berdasarkan panjang kapal, menunjukkan nilai maksimum pada sudut 120°. *Pitch moment* dipengaruhi oleh gerakan *heave* dan gerakan *pitch* sendiri. Gerakan *pitch* merupakan salah satu mode gerakan vertikal untuk kapal atau bangunan lepas pantai. Karakteristik gerakan *pitch* jika dilihat dari respon memiliki grafik yang hampir sama dengan gerakan *roll*, yang sama-sama merupakan mode gerakan rotasi. Karakteristik gerakan *pitch* akan didominasi oleh gelombang dengan sudut 120°, diikuti oleh gelombang dengan sudut 60°. Kemudian gelombang perempat buritan (sudut datang gelombang 135° diikuti oleh sudut datang gelombang 45°), kemudian sudut datang gelombang 150° dan 30° memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan gelombang buritan (sudut datang gelombang 180°) dan gelombang haluan (sudut datang gelombang 0°).

**Yaw Moment**

**Tabel 8** Nilai Respon *Yaw Moment* pada H 15.945 m

| NILAI MAKSIMUM RESPON DENGAN H = 15.945 m |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sudut Heading                             | 0     | 30    | 45    | 60    | 90    | 120   | 135   | 150   | 180   |
| Yaw Mom                                   | 0.006 | 0.438 | 0.591 | 0.671 | 0.040 | 0.646 | 0.586 | 0.425 | 0.006 |
| Frekuensi (rad/s)                         | 0.610 | 0.610 | 0.610 | 0.676 | 1.461 | 0.676 | 0.610 | 0.610 | 0.610 |



**Gambar 13.** *Yaw Moment* pada H 15.945 m

Analisa respon *yaw moment* pada FPSO untuk H maksimum berdasarkan panjang kapal, menunjukkan nilai maksimum pada sudut 60°. *Yaw moment* dipengaruhi oleh gerakan *sway* dan gerakan *yaw*. Gerakan *yaw* merupakan salah satu pola gerakan horizontal untuk kapal atau bangunan lepas pantai. Karakteristik gerakan *surge* akan didominasi oleh gelombang perempat haluan (sudut datang gelombang 45°) dan gelombang perempat buritan (sudut datang gelombang 135°). Kemudian sudut datang gelombang 60° dan 120°, diikuti sudut datang gelombang 30° dan 150°. Gelombang haluan dan buritan tidak memberikan pengaruh terhadap gerakan *yaw*.

Jika dibandingkan dengan hasil dari eksperimen dan pemodelan numerik yang dilakukan oleh Kim, dkk., dapat dilihat bahwa nilai force untuk masing-masing gerakan tidak terlalu jauh perbedaannya dibandingkan dengan hasil pada penelitian ini. Gerakan *surge* dominan mempengaruhi *longitudinal force*, gerakan *sway* dominan mempengaruhi *transversal force*, gerakan *heave* dominan mempengaruhi *vertical force*. Gerakan rotational pada FPSO menyebabkan terjadinya moment, sehingga terdapat *roll moment*, *pitch moment* dan *yaw moment*.

**Tabel 9.** Hasil Respon dari Perhitungan dalam Jurnal Kim, dkk.

|             |      | Surge (N)               | Sway (N)                | Heave (N)              | Roll (N-m)              | PITCH (N-m)             | YAW (N-m)               |
|-------------|------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Diffraction | Mean | -1.05 × 10 <sup>6</sup> | -8.69 × 10 <sup>5</sup> | 2.63 × 10 <sup>6</sup> | 2.03 × 10 <sup>7</sup>  | 6.49 × 10 <sup>8</sup>  | 7.40 × 10 <sup>7</sup>  |
|             | Std  | 1.89 × 10 <sup>7</sup>  | 1.38 × 10 <sup>7</sup>  | 4.81 × 10 <sup>7</sup> | 5.00 × 10 <sup>7</sup>  | 8.86 × 10 <sup>8</sup>  | 2.97 × 10 <sup>9</sup>  |
| Wind        | Mean | -2.26 × 10 <sup>6</sup> | 2.83 × 10 <sup>6</sup>  | 0.00 × 10 <sup>6</sup> | -2.15 × 10 <sup>7</sup> | -1.70 × 10 <sup>7</sup> | -2.36 × 10 <sup>8</sup> |
|             | Std  | 6.48 × 10 <sup>5</sup>  | 8.40 × 10 <sup>5</sup>  | 0.00 × 10 <sup>6</sup> | 6.73 × 10 <sup>6</sup>  | 4.86 × 10 <sup>6</sup>  | 9.59 × 10 <sup>7</sup>  |
| Current     | Mean | -4.33 × 10 <sup>5</sup> | -1.99 × 10 <sup>6</sup> | 9.06 × 10 <sup>5</sup> | -1.55 × 10 <sup>7</sup> | 5.44 × 10 <sup>6</sup>  | 1.58 × 10 <sup>8</sup>  |
|             | Std  | 2.70 × 10 <sup>5</sup>  | 8.24 × 10 <sup>5</sup>  | 3.90 × 10 <sup>4</sup> | 8.23 × 10 <sup>6</sup>  | 8.01 × 10 <sup>6</sup>  | 1.77 × 10 <sup>8</sup>  |
| Radiation   | Mean | 1.02 × 10 <sup>3</sup>  | -4.23 × 10 <sup>3</sup> | 8.78 × 10 <sup>3</sup> | 2.16 × 10 <sup>3</sup>  | -3.71 × 10 <sup>3</sup> | 6.76 × 10 <sup>3</sup>  |
|             | Std  | 9.61 × 10 <sup>6</sup>  | 6.34 × 10 <sup>6</sup>  | 2.83 × 10 <sup>7</sup> | 1.31 × 10 <sup>7</sup>  | 5.91 × 10 <sup>9</sup>  | 1.12 × 10 <sup>9</sup>  |

|                        | Longitudinal Force (N) | Transversal Force (N) | Vertical Force (N) | Roll Moment (N-m) | Pitch Moment (N-m) | Yaw Moment (N-m) |
|------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| Jurnal Kim, dkk (mean) | 1.03e+6                | 8.69e+05              | 2.69e+06           | 2.03e+07          | 6.49e+08           | 7.40e+07         |
| Hasil pemodelan (Max)  | 3.53e+05               | 1.20e+06              | 1.58e+06           | 3.79e+06          | 7.61e+07           | 2.58e+07         |

Dari table diatas, dapat dilihat terdapat perbedaan antara hasil eksperimen dan pemodelan numeric dari segi force untuk gerakan translasi dan rotasi.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

1. Hasil respon FPSO pada kondisi air tenang adalah pada kondisi *hogging* dan *sagging*. Terdapat perbedaan hasil antara pemodelan numerik dan perhitungan manual.
2. Respon FPSO pada saat terdapat gelombang bervariasi terhadap variasi sudut datang gelombang. Terdapat perbedaan antara hasil eksperimen dari Kim dan dari analisa numerik yang telah dilakukan.

### Saran

1. Perlu dilakukan analisa motion dan respon dari FPSO based tanker dengan memperhatikan external *turret mooring*, dan juga membandingkan dengan *system mooring* lainnya
2. Perlu dilakukan pengecekan untuk distribusi pembebanan terhadap *shear force* dan *bending moment* pada pemodelan numerik
3. Perlu dilakukan optimasi kombinasi pembebanan untuk mendapatkan pembebanan maksimum yang memungkinkan dari FPSO based tanker

## ACKNOWLEDGMENT

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian tugas akhir ini baik secara langsung maupun tidak langsung.

## REFERENSI

- [1] M. H. Kim, B. J. Koo, R. M. Mercier, and E. G. Ward, "Vessel/mooring/riser coupled dynamic analysis of a turret-moored FPSO compared with OTRC experiment," *Ocean Engineering*, vol. 32, no. 14, pp. 1780-1802, 2005/10/01/2005.
- [2] H.-H. Sun and Y. Bai, "Time-variant reliability assessment of FPSO hull girders," *Marine Structures*, vol. 16, no. 3, pp. 219-253, 2003/05/01/2003.
- [3] H. K. K. Amlashi and T. Moan, "Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition, Part 2: Stress distribution in the double bottom and simplified approaches," *Marine Structures*, vol. 22, no. 3, pp. 522-544, 2009/07/01/2009.
- [4] I. C. Clark and N. Institute, *The Management of Merchant Ship Stability, Trim and Strength*. Nautical Institute, 2002.
- [5] R. Bhattacharyya, *Dynamics of marine vehicles*. Wiley, 1978.



This is an open access article which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution.

Jurnal Saintis allows the author(s) to hold the copyright without restriction. The copyright in the text of individual articles (including research articles, opinion articles, and abstracts) is the property of their respective authors distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium. Users are allowed to read, download, copy, distribute, search, or link to full-text articles in this journal without asking by giving appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made.

This page is intentionally blank