



## **PENGARUH RADIUS MOORING LINE TERHADAP PENAMBATAN FPSO MENGGUNAKAN PENDEKATAN NUMERIK**

Adhitya Arya Prayudha Kurniawan  
Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Indonesia  
Email: yudhakurniawan78383@gmail.com

### **Abstrak**

*Floating Production Storage and Offloading (FPSO)* adalah fasilitas terapung berbentuk kapal yang digunakan untuk memproduksi sekaligus menjadi tempat penyimpanan sementara minyak bumi yang diambil ditengah lautan, dalam pengoperasiannya FPSO ditambat menggunakan tali tambat untuk membatasi gerak dari fasilitas tersebut. Sistem tambat ini diperlukan untuk meredam gerakan dinamis diakibatkan beban lingkungan yang diterima oleh FPSO. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa karakteristik gerakan FPSO yang telah ditambat menggunakan sistem tambat menyebar (*Spread Mooring System*) dengan radius tambat tertentu serta tegangan yang diterima oleh tiap tali tambat menggunakan pendekatan numerik berbasis *time domain*. Metode yang digunakan ialah studi literatur serta pendekatan numerik dengan *Boundary Element Method (BEM)*, disimpulkan bahwa semakin jauh radius tali tambat maka semakin kecil tegangan yang diterima oleh tiap tali tambat sehingga struktur menjadi lebih stabil.

**Kata Kunci** : *Floating Production Storage and Offloading (FPSO), Tali tambat, Tegangan.*

### **Abstract**

Floating Production Storage and Offloading (FPSO) is a floating facility in the form of a ship that is used to produce as well as a temporary storage of petroleum taken in the middle of the ocean, in its operation the FPSO is moored using mooring ropes to limit the motion of the facility. This mooring system is needed to reduce dynamic movements due to environmental loads received by the FPSO. This study was conducted to analyze the motion characteristics of FPSO that have been moored using a Spread Mooring System with a certain mooring radius and the stresses received by each mooring line using a time domain based numerical approach. The method used is a literature study and a numerical approach with the Boundary Element Method (BEM), it is concluded that the further the radius of the mooring line, the smaller the tension received by each mooring rope so that the structure becomes more stable.

**Kata Kunci** : *Floating Production Storage and Offloading (FPSO), Mooring Line, Tension*

## **1. PENDAHULUAN**

Dalam dunia eksplorasi minyak dan gas bumi di laut lepas, penggunaan Floating Production Storage and Offloading (FPSO) telah menjadi salah satu solusi utama untuk melakukan produksi dan penyimpanan sementara minyak bumi di tengah lautan. FPSO merupakan fasilitas terapung berbentuk kapal yang memegang peranan vital dalam industri ini, membutuhkan sistem penambatan yang efektif untuk mengurangi gerakan dinamis akibat beban lingkungan yang diterima.

Pentingnya penelitian mengenai pengaruh radius mooring line terhadap penambatan FPSO tidak dapat diabaikan. Dengan memahami bagaimana variasi radius mooring line memengaruhi tegangan pada tali tambat dan respons struktur FPSO terhadap lingkungan sekitar, kita dapat meningkatkan efisiensi, keamanan, dan stabilitas operasional FPSO di perairan lepas.



Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik gerakan FPSO yang telah ditambat menggunakan sistem penambatan spread mooring dengan variasi radius tertentu. Melalui pendekatan numerik berbasis Boundary Element Method (BEM), penelitian ini akan memberikan wawasan yang mendalam tentang bagaimana penentuan radius mooring line dapat mempengaruhi dinamika struktur FPSO yang ditambat serta tegangan yang diterima oleh tiap tali tambat. Dengan memperdalam pemahaman tentang pengaruh radius mooring line terhadap penambatan FPSO, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam pengembangan teknologi penambatan FPSO, meningkatkan keamanan operasional, serta memperluas pengetahuan dalam bidang ini. Dengan demikian, penelitian ini memiliki relevansi yang tinggi dalam mendukung kemajuan industri kelautan dan minyak bumi di masa depan.



**Gambar 1.** FPSO Armada Perkasa.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode studi literatur serta menggunakan pendekatan numerik menggunakan software Boundary Element Method (BEM). Analisis ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana respon mooring line serta gerak kapal FPSO terhadap radius mooring system. Pada dasarnya, struktur terapung memiliki enam derajat kebebasan yang dibagi menjadi dua kelompok, yakni gerak translasi (surge: arah melintang sumbu X, sway: arah transversal sumbu Y, dan heave: arah sumbu Z) serta gerak rotasi (roll: rotasi sumbu X, pitch: rotasi sumbu Y, dan yaw: rotasi sumbu Z). Pada penelitian ini digunakan 3 variasi radius mooring yang digunakan dalam penelitian ini yakni 2000 meter, 2200 meter dan 2400 meter. Pada pemodelan ini menggunakan 4 tali tambat dengan radius tertentu. Adapun batas toleransi yang diberikan terhadap gerak struktur terapung adalah sebagai berikut:

**Tabel 1.** Kriteria Toleransi gerak struktur terapung.

| Criteria                                 | Well Production  |
|--|------------------|
| Mean Heel Angle (deg)                    | 2                |
| Max Pitch (deg)                          | 6                |
| Lateral Acceleration (m/s <sup>2</sup> ) | 0.20 x g = 1.962 |
| Raser Stroke                             | +15              |
|  | -10              |

Dimensi kapal yang digunakan adalah kapal Armada Perkasa yang berjenis FPSO dengan dimensi :

| Main Dimension |          |
|----------------|----------|
| LOA            | : 300 m  |
| B              | : 46.2 m |
| H              | : 26.2 m |
| T              | : 16.5 m |

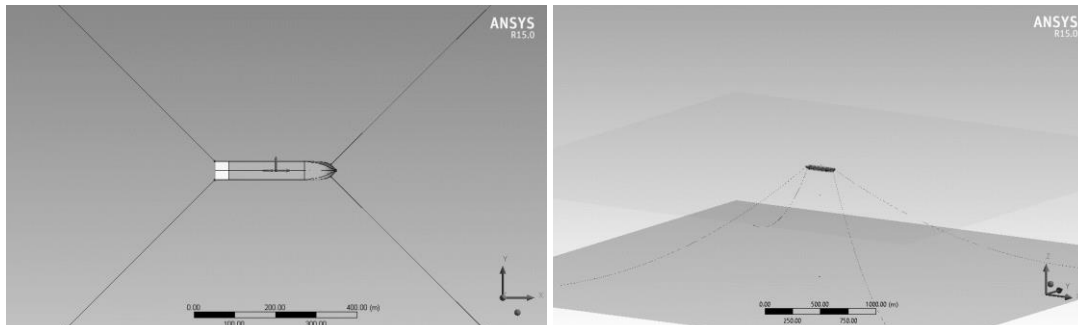


Data karakteristik laut yang digunakan yakni data lingkungan dari Blok Masela, yakni:

| Data Lingkungan Blok Masela |             |
|-----------------------------|-------------|
| Angin                       | : 16.91 m/s |
| Arus                        | : 0.5 m/s   |
| Gelombang                   | : 2.5 m     |

Adapun mooring line yang digunakan pada 3 variasi radius yakni :

| #1 Mooring Data Radius 2000 m |                |
|-------------------------------|----------------|
| Mass / Unit Length            | : 264.5 kg/m   |
| Equivalent Diameter           | : 0.115 m      |
| Section Length                | : 2100 m       |
| Stiffness                     | : 1060000000 N |
| Maximum Tension               | : 10300000     |
| #2 Mooring Data Radius 220 m  |                |
| Mass / Unit Length            | : 264.5 kg/m   |
| Equivalent Diameter           | : 0.115 m      |
| Section Length                | : 2300 m       |
| Stiffness                     | : 1060000000 N |
| Maximum Tension               | : 10300000     |
| #3 Mooring Data Radius 240 m  |                |
| Mass / Unit Length            | : 264.5 kg/m   |
| Equivalent Diameter           | : 0.115 m      |
| Section Length                | : 2500 m       |
| Stiffness                     | : 1060000000 N |
| Maximum Tension               | : 10300000     |



Gambar 2. Konfigurasi mooring line pada FPSO.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari data yang diperoleh diatas diperlukan pengolahan data menggunakan software Ansys AQWA berbasis Boundary Element Method (BEM) untuk dapat mengetahui bagaimana respon struktur terhadap beban lingkungan serta respon tiap tali tambat pada beberapa variasi radius yang telah ditentukan sebelumnya. Adapun yang akan dianalisis yakni respon FPSO yang telah ditambat terhadap beban luar serta tegangan dan tegangan tiap tali tambat pada beberapa variasi.

## Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) adalah fungsi yang digunakan untuk mengetahui respon yang akan dialami oleh struktur terapung akibat gaya gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai lambung struktur. RAO juga dapat diartikan sebagai hubungan antara amplitudo respon struktur terhadap amplitudo gelombang. Adapun bentuk umum persamaan RAO dalam fungsi frekuensi antara lain:

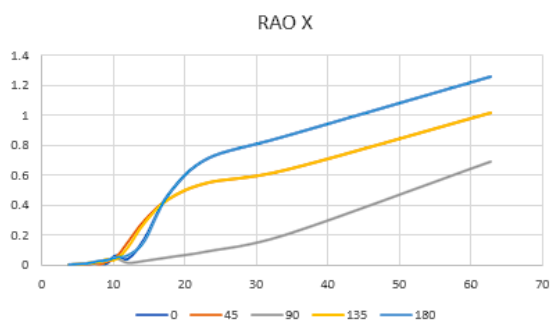
$$RAO = \left( \frac{\text{amplitudo respon gerakan}}{\text{amplitudo gelombang}} \right)^2 = \left( \frac{\Phi_a}{S_\zeta} \right)^2$$

Dimana :

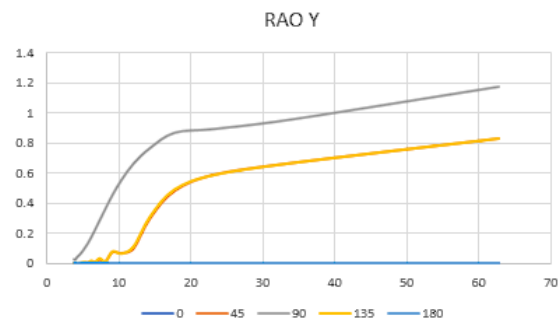
$\Phi_a$  : Amplitudo respon gerakan [m] atau [deg]

$S_\zeta$  : Amplitudo gelombang [m]

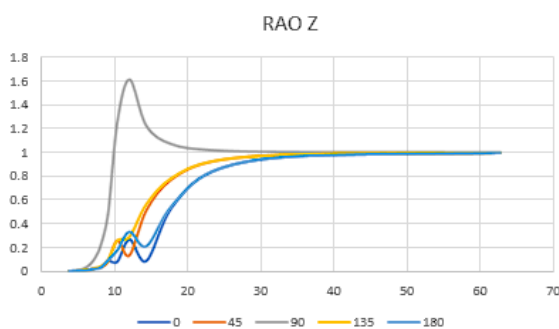
Berikut adalah nilai Response Amplitude Operator yang diperoleh dari software Ansys AQWA dengan arah pembebanan pada sudut 0 derajat, 45 derajat, 90 derajat, 135 derajat, dan 180 derajat, terhadap enam derajat kebebasan (Six Degrees of Freedom) meliputi Surge (X), Sway (Y), Heave (Z), Roll (RX), Pitch (RY), dan Yaw (RZ).



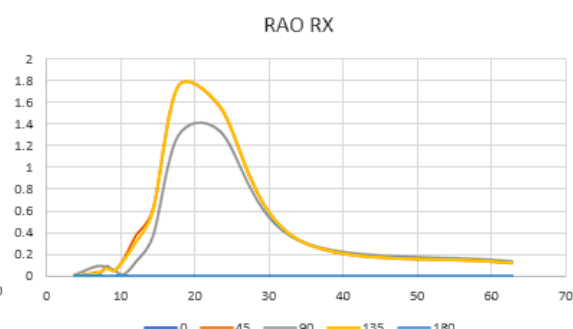
Gambar 3. RAO Terhadap Sumbu X (Surge).



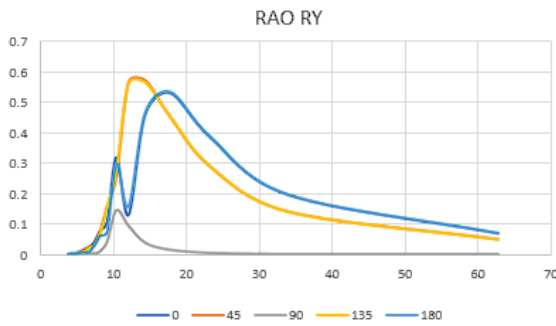
Gambar 4. RAO Terhadap Sumbu Y (Sway).



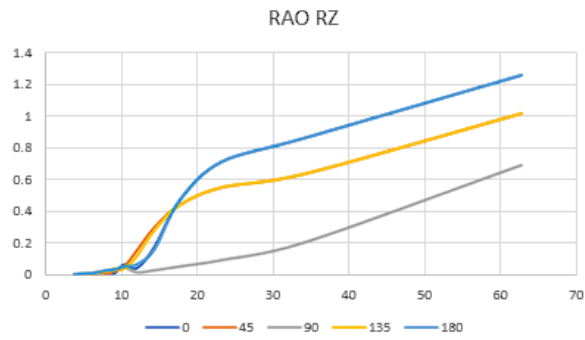
Gambar 6. RAO Terhadap Sumbu Z (Heave).



Gambar 7. RAO Terhadap Sumbu RX (Roll).



Gambar 6. RAO Terhadap Sumbu RY (Pitch).



Gambar 7. RAO Terhadap Sumbu RZ (Yaw).

Grafik diatas adalah nilai dari Response Amplitude Operator (RAO) pada tiap 6 derajat kebebasan yang diperoleh menggunakan software Ansys AQWA. Dari grafik diatas dapat kita ketahui bagaimana respon gerak struktur terhadap beban lingkungan yang ada di Blok Masela berbagai sumbu derajat kebebasan dengan arah pembebanan yang berasal dari sudut 0 derajat, 45 derajat, 90, derajat, 135 derajat, serta 180 derajat.

### Hydrostatic Data

Hydrostatic data adalah nilai yang memperlihatkan bagaimana karakteristik struktur terapung yang tercelup didalam air. Adapun hasil perhitungan yang diperoleh dari software Ansys AQWA adalah sebagai berikut.

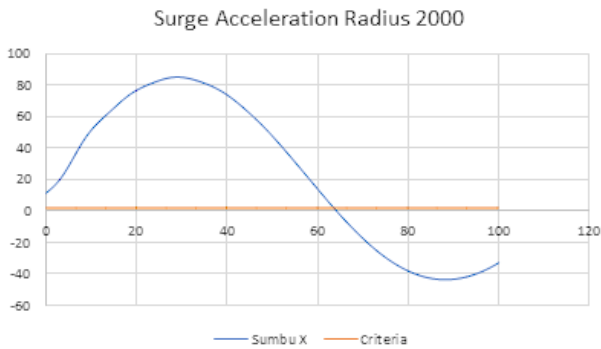
| Aqwa Hydrostatic Results                    |            |                             |                            |
|---|------------|-----------------------------|----------------------------|
| Structure                                   |            | Armada F                    |                            |
| Hydrostatic Stiffness                       |            |                             |                            |
| Centre of Gravity Position:                 |            | X: 0. m                     | Y: 0. m                    |
|   |            | Z: 0. m                     |                            |
|   | Heave(Z):  | 1.31018e8 N/m               | RX                         |
|   | Roll(RX):  | 11.25415 N.m/m              | 0.196422 N/°               |
|   | Pitch(RY): | 1.08788e9 N.m/m             | 1.15766e8 N.m/°            |
|   |            |                             | -58.272079 N.m/°           |
|   |            |                             | 18987020 N/°               |
|   |            |                             | -58.272079 N.m/°           |
|   |            |                             | 1.5289e10 N.m/°            |
| Hydrostatic Displacement Properties         |            |                             |                            |
| Actual Volumetric Displacement:             |            | 197494.48 m <sup>3</sup>    |                            |
| Equivalent Volumetric Displacement:         |            | 197502.44 m <sup>3</sup>    |                            |
| Centre of Buoyancy Position:                |            | X: -4.9606085 m             | Y: -7.1377e-4 m            |
|   |            | Z: -7.9015245 m             |                            |
| Out of Balance Forces/Weight:               |            | FX: -1.1873e-3              | FY: 5.13e-8                |
|   |            | FZ: -3.6686e-5              |                            |
| Out of Balance Moments/Weight:              |            | MX: -7.0264e-4 m            | MY: 4.9629145 m            |
|   |            | MZ: -7.6161e-7 m            |                            |
| Cut Water Plane Properties                  |            |                             |                            |
| Cut Water Plane Area:                       |            | 13034.291 m <sup>2</sup>    |                            |
| Centre of Flootation:                       |            | X: -8.3032379 m             | Y: 8.5898e-8 m             |
| Principal 2nd Moment of Area:               |            | X: 2220377.8 m <sup>4</sup> | Y: 87808336 m <sup>4</sup> |
| Angle Principal Axis makes with X(FRA):     |            | -1.3097e-5 °                |                            |
| Small Angle Stability Parameters            |            |                             |                            |
| C.O.G. to C.O.B.(BG):                       |            | 7.9015245 m                 |                            |
| Metacentric Heights (GMX/GMY):              |            | 3.3412085 m                 | 436.71005 m                |
| COB to Metacentre (BMX/BMY):                |            | 11.242733 m                 | 444.61157 m                |
| Restoring Moments/Degree Rotations (MX/MY): |            | 2020495.3 N.m/°             | 2.64087e8 N.m/°            |

### Surge Acceleration

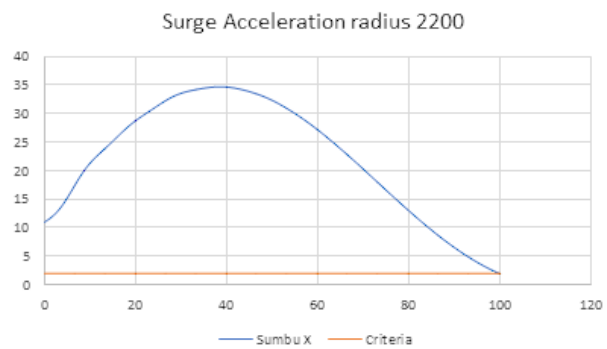


copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

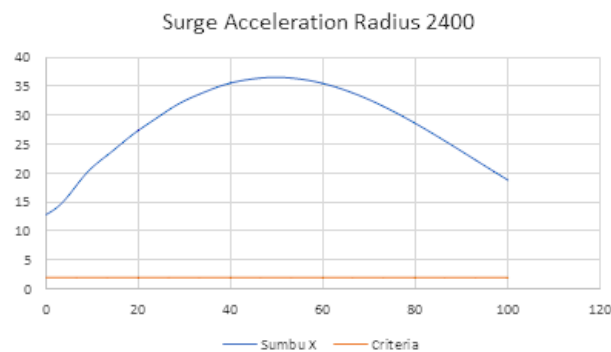
Surge acceleration adalah gerak struktur terapung terhadap sumbu x dikarenakan adanya beban lingkungan, adapun kriteria yang telah ditentukan pada surge acceleration ialah  $0.2 \times 9.81 = 1.962 \text{ m/s}^2$ . Sehingga diperoleh grafik pada 3 variasi radius tambat, yakni: radius 2000m, radius 2200m, dan 2400m selama 100 s



**Gambar 8.** Surge pada radius tambat 2000m.



**Gambar 9.** Surge pada radius tambat 2200m.

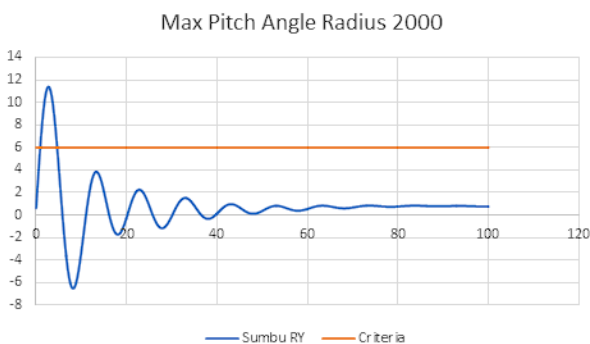


**Gambar 10.** Surge pada radius tambat 2400m.

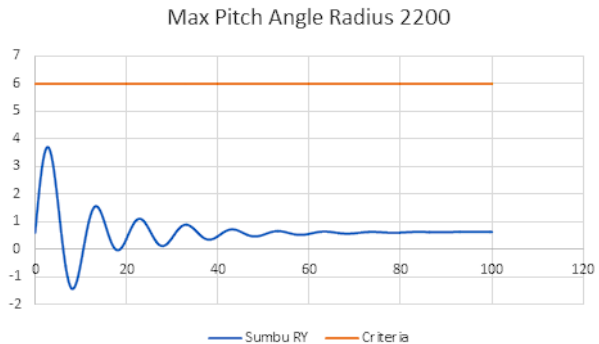
Berdasarkan hasil yang diperoleh diatas dapat diketahui bagaimana pergerakan kapal FPSO terhadap sumbu X setelah ditambat dengan berbagai variasi radius mooring line.

### Max Pitch Angle

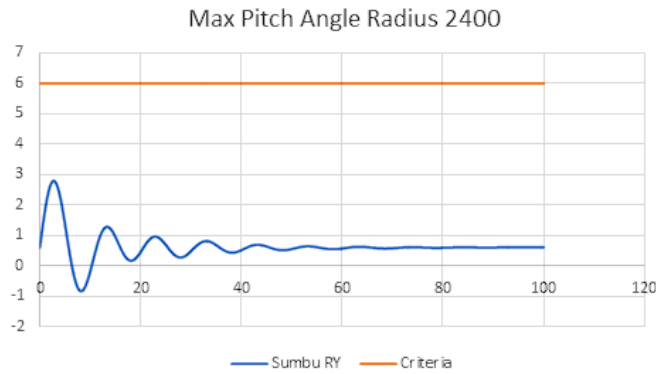
Max pitch angle adalah gerak struktur terapung terhadap sumbu RY dikarenakan gaya-gaya luar, adapun kriteria yang telah ditetapkan ialah 6 derajat. Berikut adalah grafik yang diperoleh dari pemodelan Ansys AQWA terhadap 3 variasi radius mooring selama 100 s.



**Gambar 11.** Max Pitch pada radius tambat 2000m.



**Gambar 12.** Max Pitch pada radius tambat 2200m

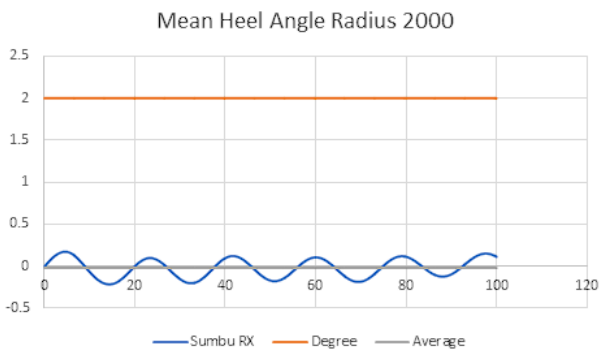


**Gambar 13.** Max Pitch pada radius tambat 2400m.

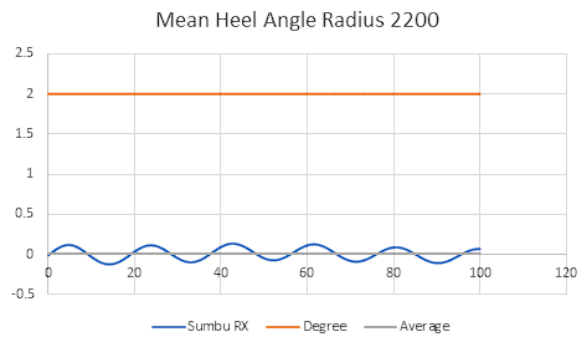
Berdasarkan hasil yang diperoleh diatas dapat diketahui bagaimana respon gerak strutur terapung terhadap sumbu RY setelah ditambat dengan berbagai variasi radius mooring line.

### Mean Heel Angle

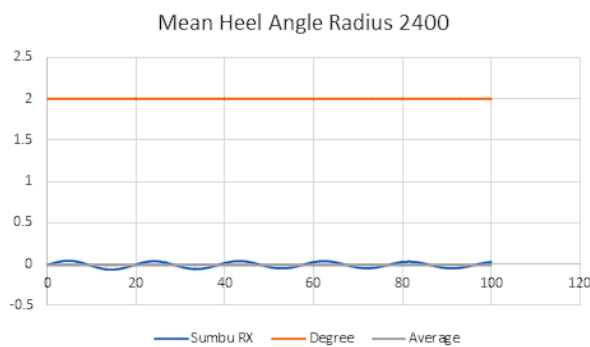
Mean Heel angle adalah gerak struktur terapung terhadap sumbu RX (gerak roll) yang diakibatkan beban lingkungan, adapun kriteria yang telah ditetapkan ialah 2 derajat. Berikut adalah grafik yang diperoleh terhadap 3 variasi radius mooring selama 100 s.



**Gambar 14.** Mean Heel pada radius tambat 2000m.



**Gambar 15.** Mean Heel pada radius tambat 2200m.

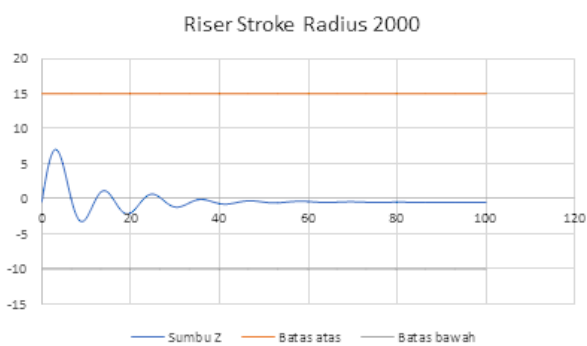


**Gambar 16.** Mean Heel pada radius tambat 2400m

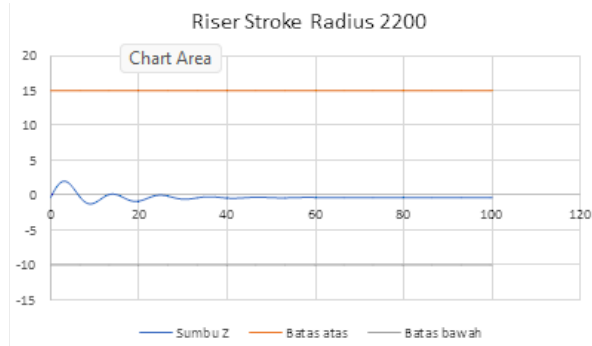
Berdasarkan hasil yang diperoleh diatas dapat diketahui bagaimana respon gerak strutur terhadap sumbu RX (gerak roll) setelah ditambat dengan 3 variasi radius mooring line.

## Riser Stroke

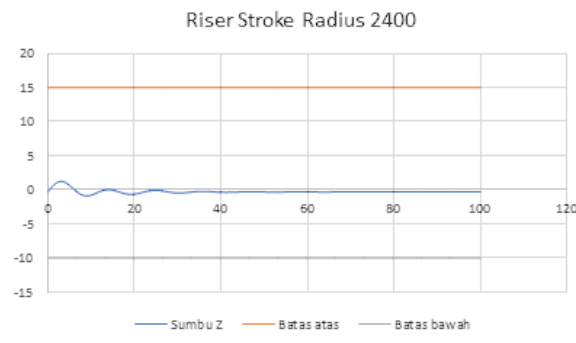
Riser stroke adalah gerak struktur terapung terhadap sumbu z (gerak heave) dikarenakan adanya beban lingkungan, adapun kriteria yang telah ditentukan pada riser stroke ialah batas atas 15 dan batas bawah -10. Adapun grafik yang diperoleh terhadap 3 variasi radius mooring selama 100s sebagai berikut.



**Gambar 17.** Riser Stroke pada radius tambat 2000m.



**Gambar 18.** Riser Stroke pada radius tambat 2200m.



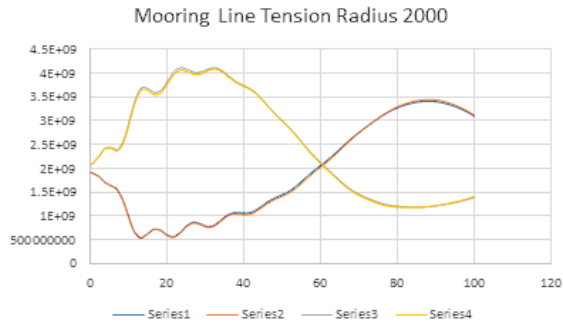
**Gambar 19.** Riser Stroke pada radius tambat 2400m.

Berdasarkan hasil yang diperoleh diatas dapat diketahui bagaimana pergerakan kapal FPSO terhadap sumbu Z setelah ditambat dengan berbagai variasi radius mooring line.

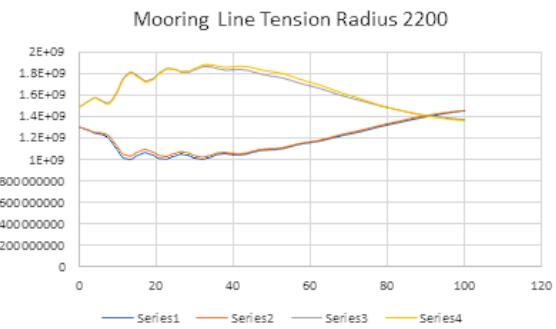
## Mooring Line Tension

Mooring line tension atau tegangan tali tambat adalah hal yang sangat penting untuk mengetahui besaran tekanan yang diterima oleh tiap tali tambat, dengan mengetahui tension dari tiap mooring line kita dapat mengetahui seberapa lama tali tambat itu dapat bertahan sehingga kita lebih dapat memaksimalkan umur dari teknologi tambat tersebut. Berikut adalah tension mooring line yang diperoleh pada tiap variasi radius mooring line dengan rentang waktu 100s menggunakan software Ansys AQWA.

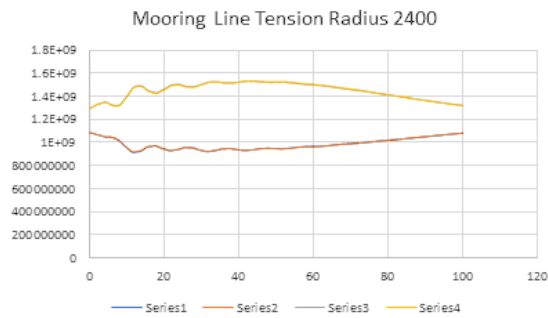




**Gambar 20.** Tension pada radius tambat 2000m.



**Gambar 21.** Tension pada radius tambat 2200m.



**Gambar 22.** Tension pada radius tambat 2400m.

Dari grafik yang dihasilkan diatas menggunakan software Ansys AQWA, kita dapat mengetahui bagaimana tekanan yang diterima oleh tiap mooring line pada beberapa variasi radius yang berbeda, sehingga kita dapat mengetahui karakteristik yang diterima oleh mooring line pada setiap radius yang berbeda.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan menggunakan pendekatan numerik dengan software berbasis Boundary Element Method (BEM) terhadap 3 variasi radius mooring yang berbeda, kita dapat mengambil kesimpulan bahwa penentuan radius mooring line dapat mempengaruhi dinamika struktur bangunan terapung yang ditambat serta berpengaruh pula terhadap tegangan tiap tali tambat. Dari beberapa grafik yang telah diperoleh kita dapat melihat bahwa semakin jauh radius mooring yang kita gunakan maka semakin stabil pergerakan struktur bangunan terapung, begitu pula dengan tension atau tegangan yang diterima tiap tali tambat semakin jauh radius tambatnya maka tekanan yang diterima tiap mooring line akan semakin kecil sehingga dapat memperpanjang umur dari teknologi tambat tersebut, sehingga kita dapat merencanakan radius yang sesuai dengan struktur terapung yang hendak dioperasikan sesuai dengan karakteristik dari lokasi penginstalannya.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh radius mooring line terhadap penambatan FPSO menggunakan pendekatan numerik, beberapa kesimpulan dapat diambil:

1. Penentuan radius mooring line mempengaruhi dinamika struktur bangunan terapung yang ditambat serta tegangan tiap tali tambat. Semakin jauh radius mooring line, tegangan yang diterima oleh tiap tali tambat cenderung lebih rendah, sehingga struktur menjadi lebih stabil.
2. Analisis numerik dengan pendekatan Boundary Element Method (BEM) memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang respon mooring line dan gerak kapal FPSO terhadap radius mooring system.
3. Grafik hasil analisis menunjukkan bahwa semakin jauh radius mooring yang digunakan, semakin stabil pergerakan struktur bangunan terapung. Tekanan yang diterima oleh tiap mooring line juga cenderung lebih rendah, memperpanjang umur dari teknologi tambat tersebut.

4. Kesimpulan ini memberikan wawasan penting bagi perencanaan pengoperasian struktur terapung, di mana pemilihan radius mooring line yang sesuai dapat meningkatkan stabilitas struktur dan meminimalkan tegangan yang diterima oleh tali tambat.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. H. Fajar, D. Chrismianto, dan E. S. Hadi, “Studi Analisa Slamming & Deck Wetness Akibat Gerakan Heaving – Pitching Coupling & Gerakan Non-Linier Rolling (Studi Kasus Kapal MT. Pandan),” *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 5, Universitas Diponegoro, 2017.
- [2] B. Hariyanto, “Analisis Tegangan Mooring Line Pada Single Point Mooring Calm Bouy Cilacap,” Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2018
- [3] F. M. Assidiq, D. Paroka, M. Z. M. Alie, dan Syerly Klara, “Fatigue Analysis Of Catenary Mooring System due to Harsh Environment in Head Seas,” *EPI int. Journal of Engineering*, Vol.1, 2018.
- [4] M. I. Afdhal, B. Untung dan I. P. Mulyatno, “Optimasi Disain Spread Mooring Dengan Konfigurasi Variasi Line Terhadap Six Degrees Of Freedom (DOF) Olah Gerak Pada Kapal Floating Storage And Offloading (FSO),” *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 7, Universitas Diponegoro, 2019.

