



## **Analisis Perilaku *Conductor-Leg* Dari *Monopod Platform* Akibat Pembebanan Lateral Dan Aksial Dengan Metode Elemen Hingga**

Kunthi Ulfa Diatri Prabawani, Rudi Walujo Prastianto, Handayanu  
Departement of Ocean Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia  
[Kunthi.ulfa@gmail.com](mailto:Kunthi.ulfa@gmail.com)

### **Abstrak**

Platform minimalis merupakan platform dengan dek yang lebih kecil dan sederhana serta memiliki *equipment* pendukung yang lebih sedikit. Platform minimalis pada umumnya didesain untuk *field* dengan cadangan reservoir yang lebih kecil dan diharapkan memiliki nilai *cost* yang rendah dalam hal fabrikasi serta instalasi. Salah satu upaya dalam pengembangan platform minimalis yaitu dilakukan studi mengenai pipa *conductor* yang berfungsi sebagai sumur sekaligus menjadi kaki platformnya. Platform jenis ini sangat rentan terhadap defleksi akibat beban lateral maupun aksial yang mengenai struktur. Dalam penelitian ini telah dilakukan analisis terhadap pipa *conductor* sebagai *single pile* yang dikenai kombinasi beban lateral dan aksial untuk mengetahui tegangan serta defleksi yang terjadi pada *conductor leg*. Penelitian dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan software ABAQUS. Variasi kemiringan dilakukan untuk mengetahui kekuatan pada *conductor leg* ketika terjadi kemiringan struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan *conductor leg* meningkat seiring bertambahnya kemiringan. Tegangan maksimum terjadi pada saat kemiringan 1.5° yaitu 91.41 MPa untuk kondisi pembebanan lingkungan operasi dan 129.43 MPa untuk kondisi pembebanan lingkungan ekstrim. Tegangan tersebut masih dibawah tegangan yang diijinkan yaitu 213 MPa (0.6 yields)

### **Abstract**

A minimalist platform is a platform with a smaller and simpler deck and has less equipment. Minimalist platforms are generally designed for fields with lower reservoir reserves and are expected to have low costs in terms of fabrication and installation. One of the studies in developing a minimalist platform is about a conductor pipe that functions as a well and as the leg of the platform. This platform is susceptible to deflection under lateral and axial loads. In this research, an analysis will be carried out on the conductor pipe as a single pile which is subjected to a combination of lateral and axial loads to determine the stress and deflection that occurs in the conductor leg. This study was conducted using the finite element method with ABAQUS software. Inclination variations were carried out to determine the strength of the conductor leg when an inclination occurs. The result of this study was found that the conductor leg with an inclination of up to 1.5 degrees still had a stress below 0.6 yield. The result of this analysis shows that the conductor leg's stress increases with increasing inclination. The maximum stress occurs at 1.5° of inclination which is 91.41 MPa under operating conditions and 129.43 MPa under extreme conditions. This stress is still below the allowable stress of 213 MPa (0.6 yields).

**Keywords:** *Conductor Leg*, Platform Minimalis

## **1. PENDAHULUAN**

Dalam rangka meminimalis biaya produksi, industri minyak dan gas di Indonesia mulai dilakukan studi dan penelitian mengenai jenis platform minimalis. Platform minimalis merupakan platform dengan desain bentuk struktur yang lebih sederhana, beban dek yang lebih kecil dan dengan *cost* yang relatif lebih rendah pada tahap fabrikasi maupun instalasi. Jenis platform ini juga untuk meminimalkan dampak terhadap lingkungan, serta diharapkan dapat digunakan kembali. Platform minimalis sangat menguntungkan untuk diterapkan pada lapangan marginal dimana lapangan tersebut memiliki cadangan reservoir yang terbatas. Akan tetapi, platform minimalis memiliki konsekuensi diantaranya struktur dengan redundansi yang rendah sehingga jika



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

terdapat satu elemen struktur yang gagal akan sangat beresiko terhadap seluruh struktur, memiliki kehandalan yang kurang, dan rentan terhadap defleksi yang besar.

Penelitian mengenai platform minimalis mulai dikembangkan, seperti yang telah dilakukan oleh Eik H. Lee (2013) yang meneliti mengenai salah satu jenis platform minimalis yaitu *tarpon monopod*. *Tarpon monopod* merupakan platform yang terdiri dari *caisson* utama yang dipegang dengan 3 set kabel yang berfungsi sebagai jangkar pile di dasar laut. Struktur dengan pile tunggal rentan terhadap defleksi, akumulasi defleksi pada *single pile* akibat beban siklis lateral dalam jangka panjang menyebabkan struktur secara keseluruhan miring dan dapat mempengaruhi keselamatan operasi (Leblanc, 2009). Achmus, M (2009) melakukan penelitian untuk mengestimasi deformasi progresif dari *monopile* yang tertanam di dasar laut berpasir di bawah beban lateral siklis jangka panjang dengan konsep model degradasi kekakuan.

Seiring berkembangnya studi mengenai platform minimalis khususnya *monopile*, kini mulai dilakukan studi mengenai *conductor leg platform* yaitu platform yang mana pipa konduktornya sekaligus berfungsi sebagai kaki platform. Platform jenis ini didesain untuk dioperasikan di perairan dangkal dengan umur operasi yang tidak lama. *Conductor leg* sangat rentan terhadap defleksi yang disebabkan beban aksial dari berat struktur itu sendiri, beban hidup, serta peralatan atau *equipment* yang berada di atas dek dan beban lateral dari kondisi lingkungan seperti angin, gelombang dan arus yang mengenai struktur tersebut. *Conductor leg platform* dapat didesain dengan *multi leg* atau *single leg*.

Dalam penelitian ini dilakukan analisis terhadap *conductor leg* yang berperilaku sebagai *single pile* pada *monopod platform*. Studi kasus yang dipakai untuk penelitian ini diambil dari salah satu platform yang diinstal di perairan dangkal Handil, Balikpapan yang memiliki kedalaman air 6.08 m. Platform yang memiliki tinggi 8 m dari *seabed* ini dipancangkan kedalam tanah hingga kedalaman 80.15 m.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Pemodelan Platform Monopod

*Conductor Leg* dalam penelitian ini diambil dari platform *monopod* yang diinstal di perairan dangkal Handil, Balikpapan. Platform *monopod* dimodelkan dengan satu *pile* yang juga berfungsi sebagai konduktor. Terdapat *main deck* pada El (+) 5.0 m yang memiliki ukuran 2.15 m × 3.90 m dan *utility deck* pada El (+) 7.5 m. Berat struktur platform *monopod* di *generate* sebagai *dead load*, sedangkan *live load* dan berat *equipment* (*piping, electrical* dan *intrument*) dimodelkan sebagai beban di atas dek. Validasi model dilakukan dengan membandingkan berat data yang ada dengan berat hasil pemodelan dan hasil *error* tidak melebihi 5%.

Analisis dilakukan dalam 2 kondisi pembebanan lingkungan yaitu pada saat kondisi operasi (data kala ulang 1 tahunan) dan kondisi badai (data kala ulang 10 tahunan). Beban lingkungan meliputi beban gelombang, arus dan angin dengan 8 arah pembebanan. Tabel 3 sampai dengan Tabel 5 adalah data gelombang, arus dan angin untuk wilayah Handil Balikpapan. Kedalaman air platform *monopod* adalah 6.08 m dari *seabed* dengan detail kedalaman air ditunjukkan pada Tabel 6.

Analisis yang dilakukan pada platform *monopod* merupakan analisis statis dengan interaksi *pile* dan tanah. Interaksi *pile* dan tanah dilakukan dengan metode *P-Y curve*.

Tabel 1. Data *Conductor Leg*

<i>Conductor-Leg</i>	
<i>Outside Diameter</i>	0.508 m
<i>Wall Thickness</i>	0.016 m
<i>Yield Strength</i>	355 MPa
<i>Material Density</i>	27.472 T/m <sup>3</sup>
<i>Penetration Depth</i>	80.15 m

Tabel 2. *Basic Load*

<i>Loads</i>	<b>F<sub>x</sub></b> (kN)	<b>F<sub>y</sub></b> (kN)	<b>F<sub>z</sub></b> (kN)
<i>Structure Dead Load</i>	0	0	-83.74
<i>Non Generated Dead Load</i>	0	0	-5.07
<i>Live Load</i>	0	0	-35.40
<i>Equipment Load</i>	0	0	-11.71



<i>Sump tank Load</i>	0	0	-16.60
<i>Piping Load</i>	1.13	-0.64	-40.51

Tabel 3. Data Gelombang

<i>Return Period</i>	<i>1 Year</i>	<i>100 Years</i>
<i>Maximum Wave Height</i>	1.5 m	0
<i>Wave Period</i>	5.5 s	0

Tabel 4. Data Arus

<i>Return Period</i>	<i>1 Year</i>	<i>100 Years</i>
<i>Surface Current</i>	1.2 m/s	1.6 m/s
<i>Mid Depth Current</i>	0.9 m/s	1.4 m/s
<i>Seabed Current</i>	0.8 m/s	1.2 m/s

Tabel 5. Data Angin

<i>Return Period</i>	<i>1 Year</i>	<i>100 Years</i>
<i>Wind Speed</i>	16.1 m/s	26.3 m/s

Tabel 6. Kedalaman Air

<i>Description</i>	<i>Value</i>
<i>Chart Datum +/- 0.0 (m)</i>	3.00
<i>Highest Astronomical Tide (m)/LAT</i>	2.60
<i>Lowest Astronomical Tide (m)/CD</i>	0.48
<i>Mean Sea Level (m)/LAT</i>	1.10
<i>Max Water Depth (m)</i>	6.08
<i>Min Water Depth (m)</i>	3.48

## 2.2. Pemodelan Conductor Leg

Pemodelan geometri *conductor leg* dan tanah dalam penelitian ini dilakukan dengan bantuan software ABAQUS. Model dibagi menjadi 2 *part* meliputi domain *conductor leg* dan domain tanah. Domain *conductor leg* dimodelkan dengan diameter 0.508 m dan di *extrude* sepanjang 3 m diatas *seabed* dan tertanam di dalam tanah sepanjang 32.32 m. *Conductor leg* dimodelkan sebagai elemen *shell* dengan ketebalan 0.016 m. Properti material dari *conductor leg* disajikan pada Tabel 1.

Langkah selanjutnya yaitu pemodelan domain tanah dengan ukuran 20 m × 20 m dan di *extrude* sebagai kedalaman tanah sepanjang 43.00 m. Domain tanah dimodelkan sebagai elemen *solid* dan dibagi menjadi 12 *layer* dengan setiap layer memiliki nilai properti yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data Tanah

<i>Soil Layer</i>	<i>Depth (m)</i>	<i>Wet Density (kN/m3)</i>	<i>Dry Density (kN/m3)</i>	<i>Su (kN/m2)</i>	<i>E (kN/m2)</i>
Layer 1	6.40	1590	990	20580	1871800
Layer 2	10.98	1600	960	19600	1783600
Layer 3	17.07	1560	900	23520	2616600
Layer 4	20.12	1700	1150	20580	891800
Layer 5	23.17	1700	1130	21560	1352400
Layer 6	24.70	1670	1090	49000	6125000
Layer 7	27.74	1620	1040	46060	2303000
Layer 8	32.32	1690	1090	43120	2695000
Layer 9	35.37	1840	1380	35280	1538600
Layer 10	36.89	2000	1630	73500	3675000
Layer 11	38.41	1940	1620	119560	5693800
Layer 12	43.00	1690	1130	76440	9555000



### 2.3. Kondisi Batas

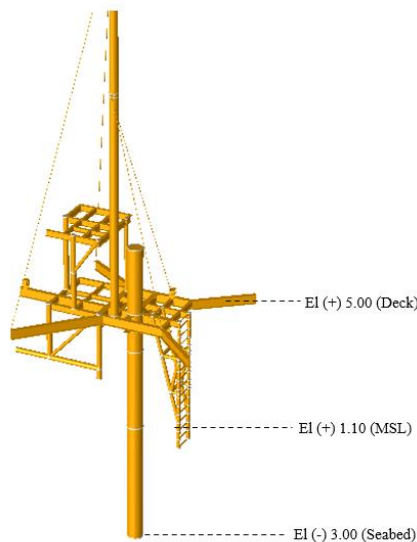
Pemodelan struktur untuk analisis metode elemen hingga hanya *conductor leg* tanpa dek dengan variasi kemiringan  $0^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$ , dan  $1.5^\circ$  yang direpresentasikan sebagai beban momen.

Domain tanah diasumsikan *fixed* pada seluruh permukaan tanah dan dimodelkan dengan model *Mohr Coulomb*. Ukuran tanah  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  dianggap sudah sangat besar dibanding dengan dimensi diameter *conductor leg* ( $20 \times D$ ), sehingga kondisi batas pada domain tanah dianggap sudah tidak akan mempengaruhi perilaku *conductor leg*.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Analisis Global Platform *Monopod*

Pemodelan platform *monopod* dilakukan dengan software SACS. Pemodelan dilakukan sesuai data yang ada dan dilakukan validasi terhadap berat struktur dengan membandingkan dengan berat pada data. Tabel 8 merupakan hasil validasi berat struktur dengan hasil *error* kurang dari 5%.



Gambar 1. Model Monopod Platform

Analisis global dilakukan untuk menentukan kelayakan struktur beroperasi dengan beban gravitasi, beban *equipment*, *live loads* dan beban lingkungan pada saat kondisi operasi maupun badai. Analisis statis pada struktur akan didapatkan *member unity check* yaitu perbandingan tegangan yang terjadi pada struktur dengan tegangan *yield* pada material struktur. Struktur dikatakan aman apabila *member unity check* tidak melebihi 1 (API RP 2A WSD). Hasil *member UC* maksimum pada struktur *conductor leg* disajikan pada Tabel 9.

Table 8. Validasi Berat Struktur

Berat Struktur (kN)		Error (%)
Data	Model SACS	
193.03	199.8	3.51

Table 9. Member Unity Check

Properties	Load Condition	Max. UC
	50.9 cm OD x 1.60 cm WT	Operating
Storm		0.35



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

Gaya dan momen maksimum yang bekerja pada *conductor leg* diambil untuk dijadikan pembebanan pada analisis dengan metode elemen hingga. Tabel 9 menyajikan gaya dan momen maksimum yang terjadi pada *conductor leg*.

Tabel 9. Gaya dan Momen Maksimum Member *Conductor Leg*

Load Condition	Force			Moment		
	<i>F<sub>x</sub></i> (kN)	<i>F<sub>y</sub></i> (kN)	<i>F<sub>z</sub></i> (kN)	<i>M<sub>x</sub></i> (kN.m)	<i>M<sub>y</sub></i> (kN.m)	<i>M<sub>z</sub></i> (kN.m)
Operating	-195.93	7.18	-7.77	-2.56	84.53	-147.62
Storm	-196.06	16.86	-17.47	-1.06	135.58	-196.93

### 3.2. Analisis *Conductor Leg* dengan Metode Elemen Hingga

Analisis elemen hingga dilakukan dengan memodelkan 2 domain komputasi yaitu tanah dan *conductor leg*. Domain *conductor leg* dimodelkan sebagai elemen *shell* dan domain tanah dimodelkan sebagai elemen *solid*. *Conductor leg* dengan material disajikan dalam Tabel 1. dimodelkan ditengah domain tanah dengan kedalaman penetrasi 32.32 m. Domain tanah dimodelkan dengan ukuran 20 m x 20 m dan di *extrude* hingga 43 m sebagai kedalaman tanah. Domain tanah dibagi menjadi 12 layer dengan masing-masing layer memiliki nilai properti disajikan pada Tabel 7. Kondisi batas domain tanah *fixed* untuk seluruh permukaan tanah. Model tanah disimulasikan dengan model *Mohr-Coulomb*. Menurut Chen & Mizuno (1990) dapat diformulasikan sebagai berikut:

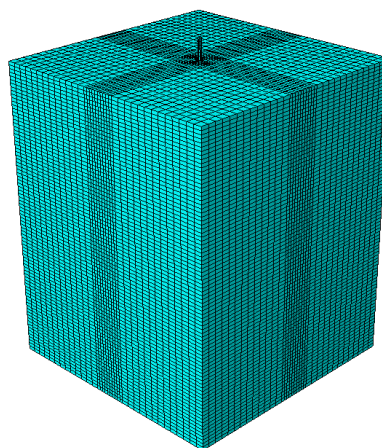
$$|\tau| + \sigma \tan \varphi - c = 0 \tag{1}$$

Dimana,

- $\tau$       *shear strength*
- $\sigma$      *normal stress*
- $\varphi$      *angle of internal friction*
- $c$        *cohesion*

### 3.3. Sensitivity Meshing

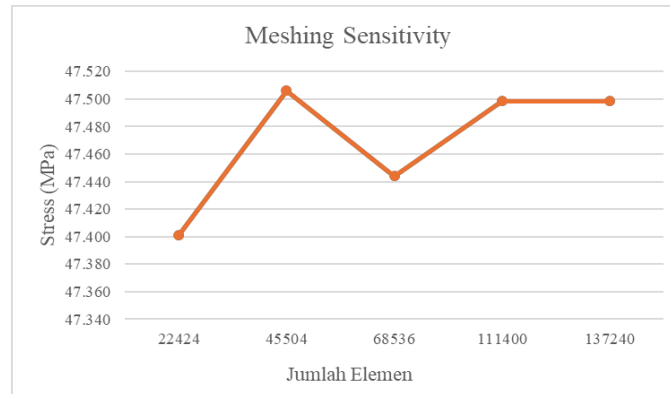
Pengaturan *mesh* dilakukan guna untuk mendapatkan diskritisasi yang bagus pada pemodelan serta mendapatkan hasil simulasi yang optimum. Dalam memperoleh konfigurasi *meshing* yang sesuai perlu dilakukan beberapa kali simulasi dengan variasi ukuran *mesh* hingga didapatkan nilai *output* yang konvergen. Tabel 10 dan Gambar 3 menunjukkan grafik hasil sensitivitas *meshing*, didapatkan jumlah elemen domain tanah 110752 elemen dan domain *conductor leg* 648 elemen dengan bentuk *hexahedral* elemen. Gambar 2 merupakan hasil *meshing* dengan penggabungan model domain *conductor leg* dan tanah.



Gambar 2. Model *Mesh*

Tabel 10. Sensitivitas *Meshing*

<i>Element Size (m)</i>	<i>Element Total</i>	<i>Stress (MPa)</i>	<i>Difference (%)</i>
1.00	22424	47.401	0.000
0.70	45504	47.506	0.220
0.65	68536	47.444	0.131
0.50	111400	47.499	0.115
0.40	137240	47.499	0.000

Gambar 3. Grafik Sensitivitas *Meshing*

### 3.4. Analisis Lokal *Conductor Leg*

Tegangan (*stress*) yang terjadi pada member *conductor leg* dianalisis dengan variasi kemiringan. Tegangan diharapkan masih dalam batas aman apabila terjadi kemiringan di lapangan dimana platform *monopod* rentan terhadap kemiringan. Variasi kemiringan yang dianalisis dalam penelitian ini adalah  $0^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $1.0^\circ$  dan  $1.5^\circ$ .

Validasi model dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil *von mises stress* maksimum pada *conductor leg* dengan hasil *von mises stress* pada saat analisis global. Nilai *error* tidak kurang dari 5% seperti ditunjukkan pada Tabel 11.

Table 11. Validasi Model Lokal

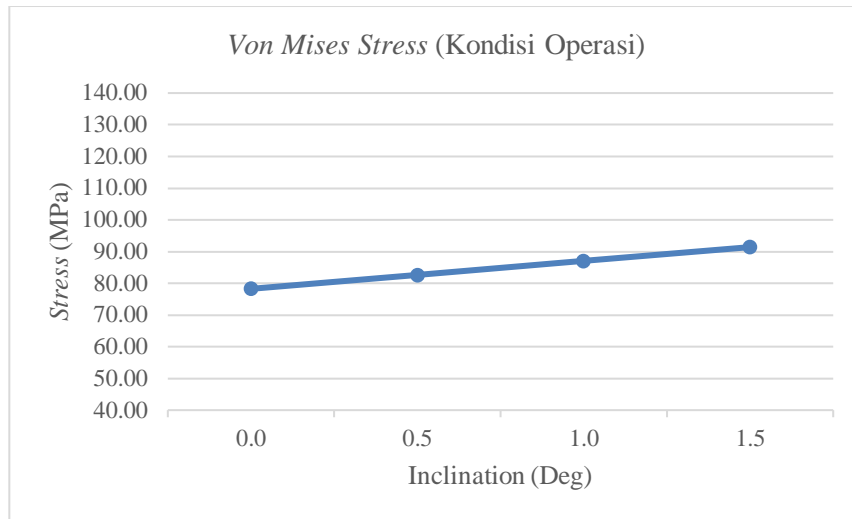
<i>Von Misses Stress (Mpa)</i>		<i>Error (%)</i>
SACS	ABAQUS	
79.13	78.26	1.10

Gambar 4 dan 5 menunjukkan grafik tegangan *von mises* maksimum yang terjadi pada *conductor leg* pada saat kondisi pembebanan lingkungan operasi dan badai/ekstrim. Tegangan meningkat seiring dengan meningkatnya kemiringan. Maksimum tegangan yang terjadi pada pembebanan lingkungan operasi adalah 91.41 MPa pada saat kemiringan 1.5 dan 129.43 MPa dibawah pembebanan lingkungan badai/ekstrim. Tegangan maksimum masih dibawah tegangan yang diijinkan yaitu 0.6 *yields* ( $0.6 \times 355 \text{ Mpa} = 213 \text{ Mpa}$ ). Distribusi tegangan pada *conductor leg* dapat dilihat pada Gambar 6. Warna merah menunjukkan tegangan semakin besar sedangkan warna biru menunjukkan tegangan semakin kecil. Tegangan maksimum untuk kondisi operasi dan badai terjadi pada elemen 144 dan 297 yang terletak pada El. (-) 3.00 m sampai dengan El. (-) 3.50 m dimana *seabed* memiliki El. (-) 3.00.

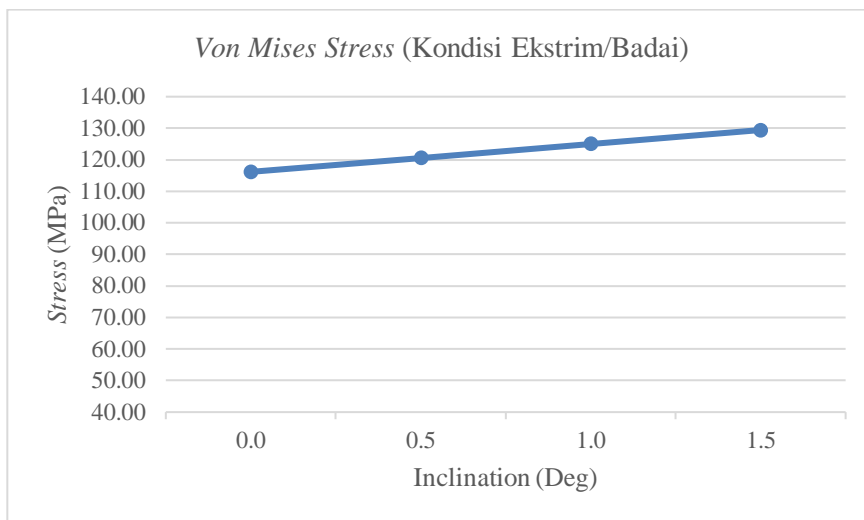
Gambar 7 dan 8 menunjukkan grafik defleksi maksimum *conductor leg* dengan variasi kemiringan. Maksimum defleksi pada kondisi operasi sebesar 14.09 cm dan pada saat kondisi badai sebesar 22.02 cm. Defleksi tersebut telah melebihi defleksi yang diijinkan yaitu 8 cm ( $H/100$ ). Oleh karena itu diperlukan verifikasi terhadap *equipment* diatas dek apakah masih aman dengan defleksi struktur sebesar hasil tersebut.



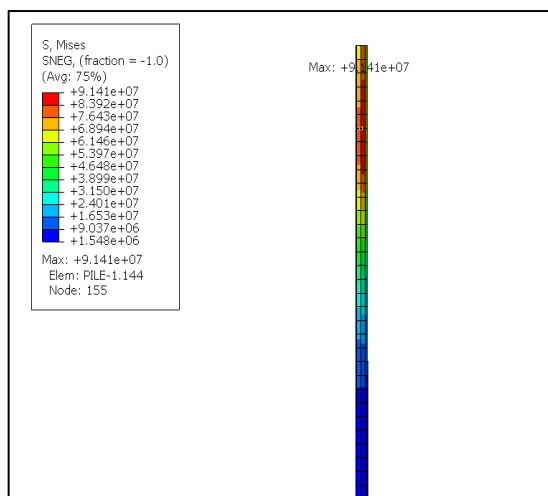
copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



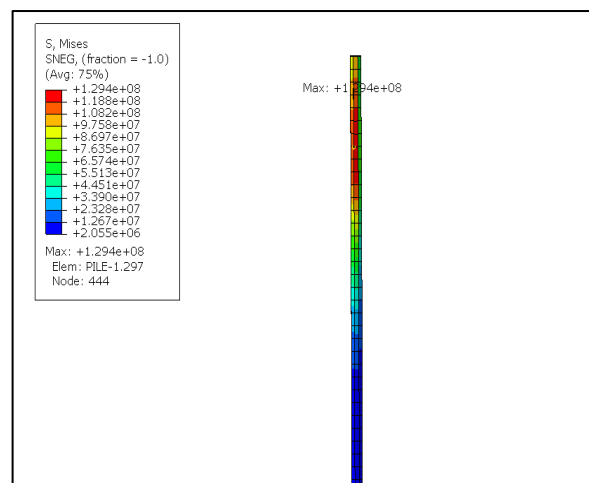
Gambar 4. Von Mises Stress Kondisi Operasi



Gambar 5. Von Mises Stress Kondisi Badai/Ekstrim



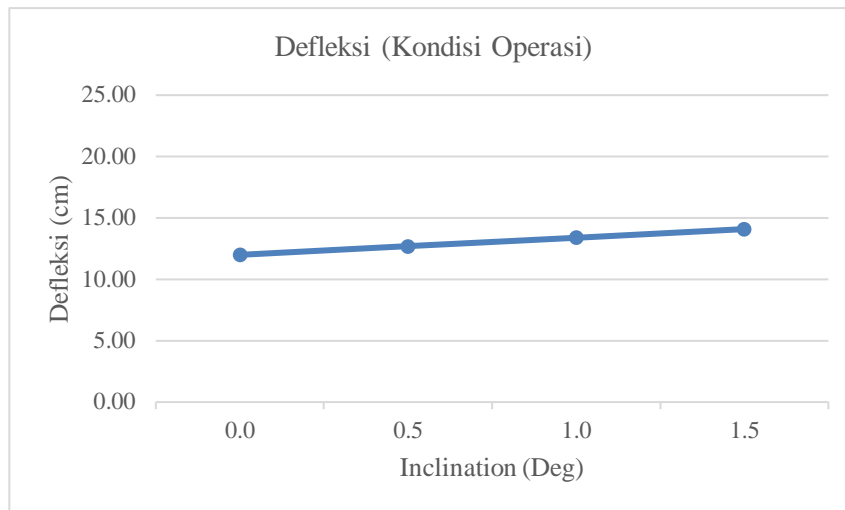
(a)



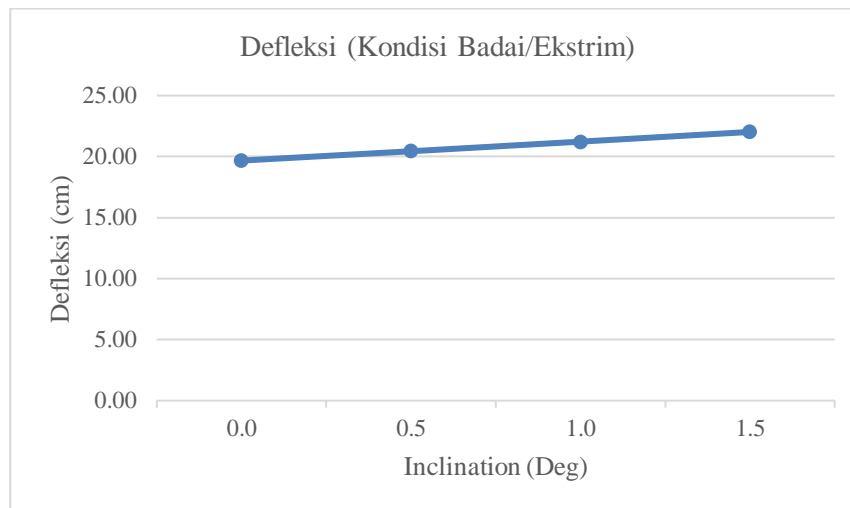
(b)

Gambar 6. (a) Plot Von Mises Stress Kondisi Operasi, (b) Plot Von Mises Stress Kondisi Baadai





Gambar 7. Defleksi Maksimum *Conductor Leg* Kondisi Operasi



Gambar 8. Defleksi Maksimum *Conductor Leg* Kondisi Badai/Ekstrim

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini yaitu analisis kekuatan *conductor leg* dengan variasi kemiringan dapat ditarik kesimpulan bahwa penambahan kemiringan *conductor leg* dapat meningkatkan tegangan pada struktur dimana tegangan maksimum atau tegangan paling kritis terjadi pada elevasi yang sama dengan *seabed*. Hasil tegangan dan defleksi maksimum diuraikan sebagai berikut:

1. Tegangan maksimum pada *conductor leg* yaitu sebesar 91.41 MPa pada saat pembebanan lingkungan operasi dan 129.43 MPa pada saat kondisi pembebanan badai/ekstrim, keduanya terjadi pada saat kondisi kemiringan 1.5°. Nilai tegangan tersebut masih dibawah tegangan *allowable* yaitu 213 MPa (0.6 *yields*).
2. Defleski maksimum yang terjadi pada *conductor leg* adalah 14.09 cm pada kondisi lingkungan operasi dan 22.02 cm pada kondisi badai/ekstrim dengan kemiringan 1.5°. Defleksi tersebut telah melebihi defleksi maksimum yang diijinkan sehingga diperlukan verifikasi terhadap *equipment* diatas dek apakah masih aman apabila terjadi defleksi struktur dengan nilai tersebut.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chakrabarti. 2005A. "*Handbook of Offshore Engineering Vol.1*". British Library. Great Britain.
- [2] Chakrabarti. 2005B. "*Handbook of Offshore Engineering Vol.2*". British Library. Great Britain.



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



- [3] Achmus, M., Kuo, Y., Rahman, K., (2009), “Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, pp. 725-735
- [4] Baqi, Y., Khan, J. A., Ahmad, S., Sadique M. R., (2022) “Numerical analysis of hollow steel pile subjected to a combination of horizontal and vertical loads”, *Materials Today : Proceedings*, Vol. 65, pp. 609-614
- [5] Dinku, B. 2017. “*Soil Pile Interaction of Pile In Deep Layered Soil under Seismic Excitation*”. Addis Ababa Science and Technology University.
- [6] Eik, L. 2013. “*Redefining the design of Tarpon Monopods for Marginal Fields*”. Bandar Seri Iskandar: Universiti Teknologi PETRONAS.
- [7] Hussim, N. 2014. “*Tarpon Monopod Marginal Field Structure Subjected to Seismic Ground Acceleration*. Bandar Seri Iskandar: Universiti Teknologi PETRONAS.
- [8] Ronalds, B. F., Cosson, D. G., Pinna, R., Cole, G. K., (2007) “Towards Monopod Design Criteria for Uniform Reliability, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 57, pp. 8-15
- [9] Su, D., Li, J.H., (2013) “Three-dimensional finite element study of single pile response to multidirectional lateral loadings incorporating the simplified state-dependent dilatancy model”, *Computers and Geotechnics*, Vol. 50, pp. 129-142
- [10] Wang, L., Ishihara, T., (2022) “A semi-analytical one-dimensional model for offshore pile foundations considering effects of pile diameter and aspect ratio”, *Ocean Engineering*, Vol. 250, pp. 110874
- [11] Yang, Y., Sun, Y., Xu C., Iqbal, K., DU Xiuli (2022), “Predicting accumulated deformation of offshore large-diameter monopile using hollow cylinder apparatus”, *Ocean Engineering*, Vol. 251, pp. 111984
- [12] API RP 2A. “*Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*”
- [13] Chen, W.F, Mizuno, E., (1990) “*Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*”.. Amsterdam. Netherlands.

