

## DESAIN DAN ANALISIS TEGANGAN PADA SISTEM *OFFSHORE PIPELINE* AKIBAT PENGARUH BEBAN ARUS DAN GELOMBANG LAUT DI PT. PERTAMINA (PERSERO) UNIT PENGOLAHAN VI BALONGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

\*Felix Wahyu Utomo<sup>1</sup>, Djoeli Satrijo<sup>2</sup>, Toni Prahasto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: felix.w.utomo@gmail.com

### Abstrak

Perancangan sistem perpipaan bawah laut ini mengacu pada *code* ASME B31.4 Chapter IX. Sistem perpipaan ini dibagi menjadi 3 jalur, yaitu jalur pipa SPM (*Single Point Mooring*) ke tangki *ballast water*, jalur pipa tangki *black oil* menuju SPM, dan jalur pipa SPM menuju tangki *flushing oil*. Jalur pipa tangki *ballast water* menuju SPM memiliki tekanan operasi 980.665 KPa, temperatur 40°C, dan laju aliran 500 m<sup>3</sup>/hr. Jalur pipa tangki *black oil* menuju SPM memiliki tekanan operasi 196.133 KPa, temperatur 80°C, dan laju aliran 1000 m<sup>3</sup>/hr. Jalur pipa SPM menuju tangki *flushing oil* memiliki tekanan operasi 196.133 KPa, temperatur 60°C, dan laju aliran 500 m<sup>3</sup>/hr. Ketiga jalur perpipaan tersebut dimodelkan dengan gambar isometri menggunakan *software* PDMS dan dianalisa tegangannya menggunakan *software* Caesar II. Hasil analisa tegangan pada Caesar II didapatkan nilai tegangan tertinggi terdapat pada jalur *black oil* dengan besar 338995.2 KPa dan intensitas tegangan tertingginya 326198.5 KPa dengan tegangan ijinnya 358527.4 KPa. Ini terjadi pada pembebanan *operation* akibat berat, tekanan, temperatur pipa dan gelombang dan arus.

**Kata kunci:** ASME B31.4 Chapter IX, sistem perpipaan, tegangan

### Abstract

*The offshore pipeline systems design based on Code ASME B31.4 Chapter IX. These pipeline system is divided into 3 lanes, namely pipeline from SPM (Single Point Mooring) to ballast water tank, pipeline from black oil tank to SPM, and pipeline from SPM to flushing oil tank. Pipeline from SPM to ballast water tank has an operating pressure 980.665 KPa, temperature 40°C, and flow rate 500 m<sup>3</sup>/hr. pipeline from black oil tank to SPM has an operating pressure 196.133 KPa, temperature 80°C, and flow rate 1000 m<sup>3</sup>/hr. pipeline from SPM to flushing oil tank has an operating pressure 196.133 KPa, temperature 60°C, and flow rate 500 m<sup>3</sup>/hr. These 3 pipelines are modeled as isometric drawing using software PDMS and analyzed using software Caesar II. The result of stress analysis in software Caesar II show that maximum stress in black oil pipeline with value 338995.2 KPa and the maximum stress intensity 326198.5 KPa with allowable stress 358527.4 KPa. This occur on operation load caused weight, pressure, temparture and wave and current.*

**Keywords:** ASME B31.4 Chapter IX, pipeline system, stress

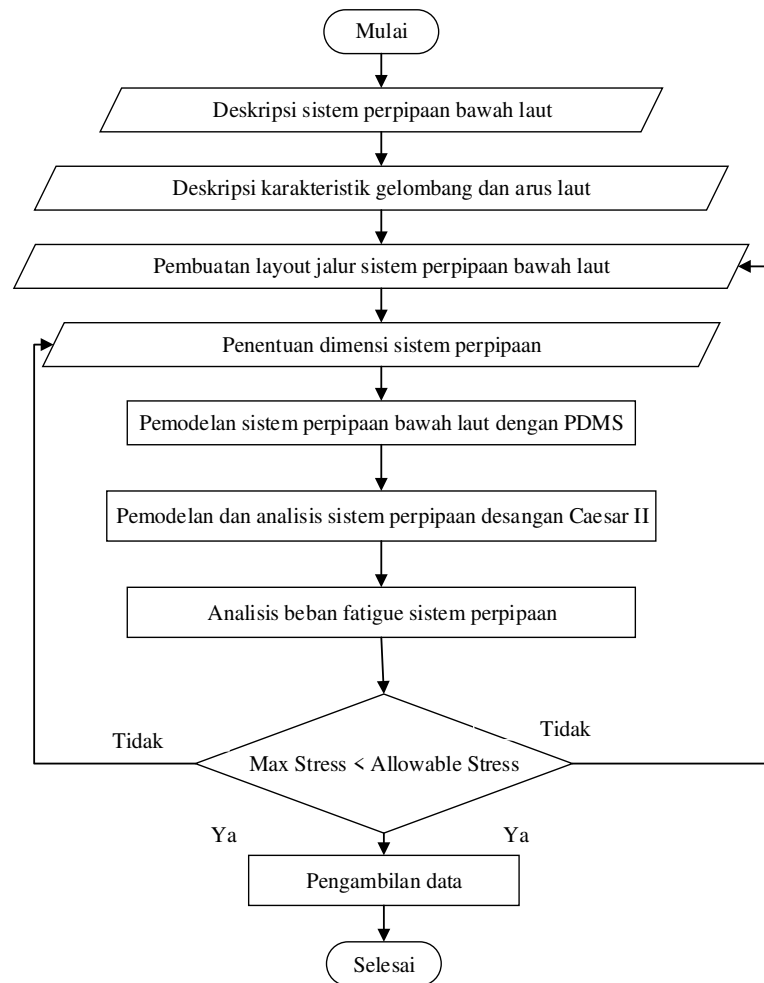
## 1. Pendahuluan

Perancangan sistem perpipaan bawah laut sangat tergantung pada kedalaman, kondisi gelombang dan arus air laut sendiri. Pada saat kegiatan perancangan dan pemasangan pipa ini juga harus memperhatikan kondisi tegangan yang akan terjadi. Oleh karena itu, analisa tegangan pada pipa bawah laut ini sangat penting untuk menghindari tegangan berlebih yang melampaui batasan yang telah ditetapkan oleh kode dan standar internasional (ASME, ANSI, API, dan lain-lain). Jenis beban yang sering terjadi pada sistem perpipaan bawah laut adalah jenis beban dinamik akibat dari pengaruh arus dan gelombang laut yang bisa berubah-ubah setiap waktu. Arus laut dalam konteks ini akan berpengaruh pada konstruksi pipa yang terbenam di dalam air, sedangkan gelombang laut akan berpengaruh pada konstruksi riser pada pipa tersebut. Setelah pipa ini dipasang dan diletakkan di dasar laut, akan mendapatkan risiko yang akan menimbulkan kerusakan akibat gelombang dan arus laut pada daerah tersebut. Perancangan pipa bawah laut juga harus memperhatikan faktor-faktor seperti beban yang harus ditanggung pipa, efek tekanan dan ekspansi panas di sekitar pipa, dan temperatur pipa. Maka, proses analisa tegangan juga akan melibatkan faktor-faktor di atas agar perancangan pipa sesuai standar yang telah ditetapkan dan mencegah terjadinya kegagalan [1]. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis nilai tegangan yang terjadi pada sistem perpipaan sesuai standar ASME B31.4 *chapter* IX akibat beban *sustain*, *occasional* (gelombang/arus), *operation* dan *expansion*.

## 2. Pemodelan Sistem Perpipaan

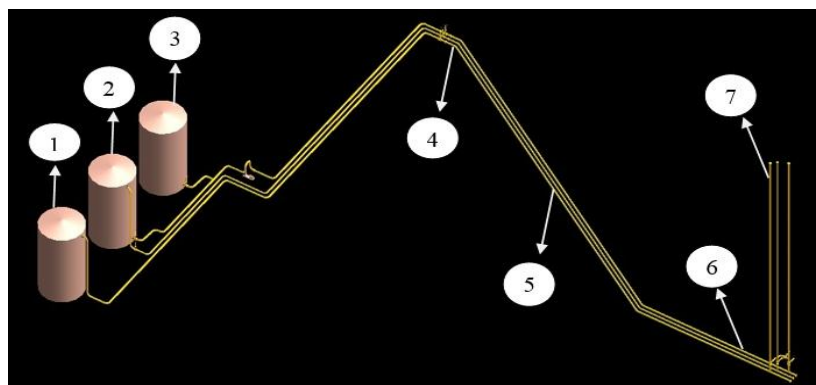
### 2.1 Diagram Alir

Tahapan awal untuk melakukan penelitian ini adalah mencari data lapangan yang akan dijadikan parameter masukan pada *software* Caesar II. Setelah data terkumpul, kemudian peneliti membuat desain keseluruhan menggunakan *software* Plant Design Management System (PDMS). Hasil isometrik dari PDMS tersebut kemudian dimodelkan dalam *software* Caesar II untuk dianalisa tegangan output dari sistem perpipaan ini [2].



**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

## 2.2 Pemodelan *Plant Design Management System* (PDMS)

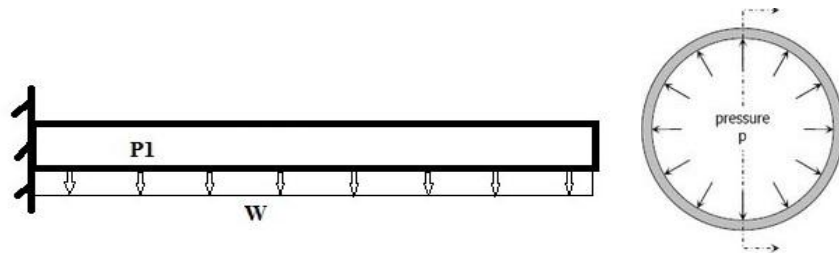


**Gambar 2.** Jalur sistem perpipaan dari *onshore* menuju *offshore*

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. Tangki <i>ballast water</i>              | 5. <i>Buried pipeline</i>   |
| 2. Tangki <i>flushing oil</i>               | 6. <i>Unburied pipeline</i> |
| 3. Tangki <i>black oil loading</i>          | 7. <i>Flexible hose</i>     |
| 4. Jalur perbatasan <i>onshore-offshore</i> |                             |

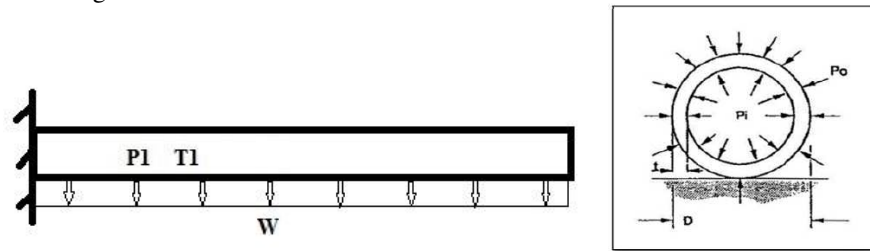
Dalam proses simulasi di *software* Caesar II, sistem perpipaan akan diberikan berbagai variasi pembebanan yang meliputi:

- a. Pembebanan *sustain* dimana memperhitungkan beban yang dihasilkan dari berat pipa dan tekanan internal dari pipa.



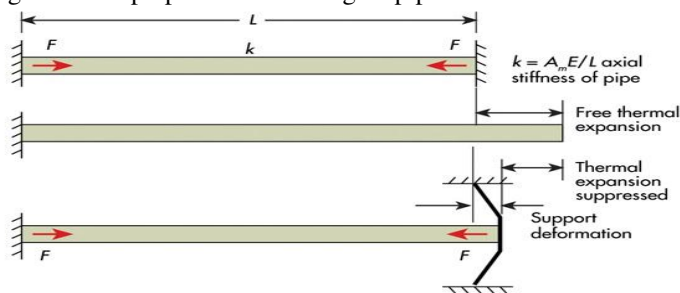
Gambar 3. Skematik pembebanan *sustain*

- b. Pembebanan *operation* perlu diperhatikan karena pembebanan ini merupakan pembebanan sesungguhnya saat sistem perpipaan tersebut beroperasi. Kombinasi dari pembebanan ini karena berat, temperatur, tekanan internal, dan gelombang serta arus laut.



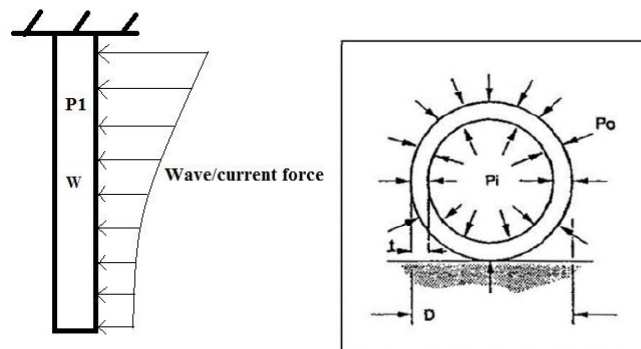
Gambar 4. Skematik pembebanan *Operation*

- c. Pembebanan *expansion* dimana analisisnya memperhitungkan beban yang dihasilkan dari temperatur sehingga menimbulkan tegangan karena perpindahan dari bagian pipa.



Gambar 5. Skematik pembebanan *expansion*

- d. Pembebanan *occasional* dimana analisisnya memperhitungkan beban yang dihasilkan dari berat pipa, tekanan internal dan gelombang serta arus laut [3].



Gambar 6. Skematik pembebanan *occasional*

### 2.3 Fatigue Lifetime Sistem Perpipaan

Software Caesar menampilkan tegangan tertinggi dan terendah yang terjadi pada sistem perpipaan ini. Hasilnya tegangan tertinggi berada pada pembebanan operasi karena adanya gelombang dan arus laut. Tegangan akibat gelombang ini akan menyebabkan fenomena *fatigue* pada sistem perpipaan. Oleh karena itu, dari tegangan tertinggi yang muncul dapat dihitung siklus kegagalan akibat *fatigue* pada sistem perpipaan ini. Perhitungan didasarkan pada kurva S-N menggunakan persamaan Goodman sebagai berikut [4]:

$S_u = \text{ultimate stress of material}$

$$S_{1000} = 0.9 \times S_u \quad (1)$$

Endurance limit

$$S_e = 0.5 S_u \quad (2)$$

Alternating Stress

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

Mean stress

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4)$$

Perhitungan tegangan siklik ( $S_N$ ) persamaan Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{S_N} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (5)$$

Persamaan S-N:

$$S = 1.62 S_u N^{-0.085} \quad (6)$$

Perhitungan Jumlah Tahun:

$$T = \frac{N}{f \times \text{time}_{\text{off}} \times 52 \text{ minggu}} \quad (7)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

Analisa tegangan sistem *offshore pipeline* pada *software* Caesar II berdasarkan pada pembebanan *expansion*, *operation*, *sustain*, dan *occasional*. Hasil dari keempat pembebanan tersebut dijelaskan pada subbab di bawah ini:

#### 3.1 Pembebanan *Sustain*

Hasil tegangan pembebanan *sustain* pada *software* Caesar II ditunjukkan pada tabel 1.

**Tabel 1.** Tabel Tegangan akibat beban *sustain*

Parameter	Jalur <i>Ballast Water</i>	Rasio (%)	Jalur <i>Black Oil</i> dan <i>Flushing Oil</i>	Rasio (%)
Tegangan <i>sustain</i> W+P1 (KPa)	195691.8	54.6	184157.6	51.4

Tegangan yang terjadi pada pembebanan *sustain* tergolong dalam kondisi aman karena rasio tegangannya masih di bawah 100 %. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa rasio terbesar pada jalur *ballast water* sebesar 54.6 %.

#### 3.2 Pembebanan *Operation*

Hasil tegangan pembebanan *operation* pada *software* Caesar II ditunjukkan pada tabel 2.

**Tabel 2.** Tegangan akibat beban *operation*

Parameter	Jalur <i>Ballast Water</i>	Rasio (%)	Jalur <i>Black Oil</i> dan <i>Flushing Oil</i>	Rasio (%)
Tegangan <i>operation</i> W+T1+P1 (KPa)	210518.3	58.7	320397.9	89.4
Tegangan <i>operation</i> W+T1+P1 +Wave (KPa)	224065.8	62.5	338995.2	94.6

Tegangan yang terjadi pada pembebanan *operation* masih tergolong dalam kondisi aman karena rasio tegangannya masih di bawah 100%. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa rasio terbesar pada jalur *black oil* dan *flushing oil* sebesar 94.6 %.

#### 3.3 Pembebanan *expansion*

Hasil tegangan pembebanan *expansion* pada *software* Caesar II ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Tegangan akibat beban *expansion*

Parameter	Jalur <i>Ballast Water</i>	Rasio (%)	Jalur <i>Black Oil</i> dan <i>Flushing Oil</i>	Rasio (%)
Tegangan <i>Expansion</i> (KPa)	114127.5	31.8	143790.8	40.1

Tegangan yang terjadi pada pembebanan *expansion* masih tergolong dalam kondisi aman karena rasio tegangannya masih di bawah 100%. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa rasio terbesar pada jalur *black oil* dan *flushing oil* sebesar 40.1 %.

#### 3.4 Pembebanan *Occasional*

Hasil tegangan pembebanan *occasional* pada *software* Caesar II ditunjukkan pada tabel 4.

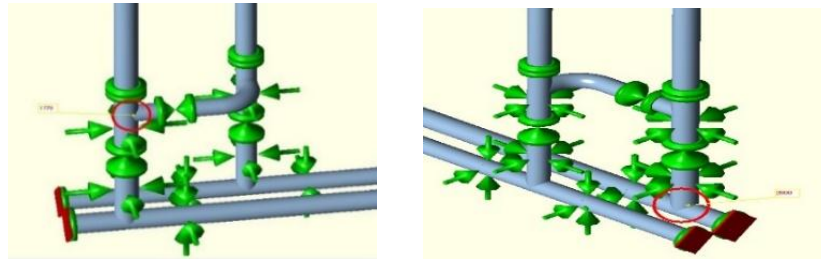
**Tabel 4.** Tegangan akibat beban *occasional*

Parameter	Jalur <i>Ballast Water</i>	Rasio (%)	Jalur <i>Black Oil dan Flushing Oil</i>	Rasio (%)
Tegangan <i>occasional</i> W+P1+Wave (KPa)	201447.5	56.2	202749.3	56.6

Tegangan yang terjadi pada pembebanan *occasional* masih tergolong dalam kondisi aman karena rasio tegangannya masih di bawah 100%. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa rasio terbesar pada jalur *black oil* dan *flushing oil* sebesar 56.6 %.

### 3.5 Tegangan Pada Percabangan

*Software* Caesar II juga memberikan *output* berupa tegangan akibat pembebanan yang terjadi pada percabangan sistem perpipaan. Berikut hasil tegangan yang terjadi pada percabangan di setiap jalur perpipaan bawah laut ini:



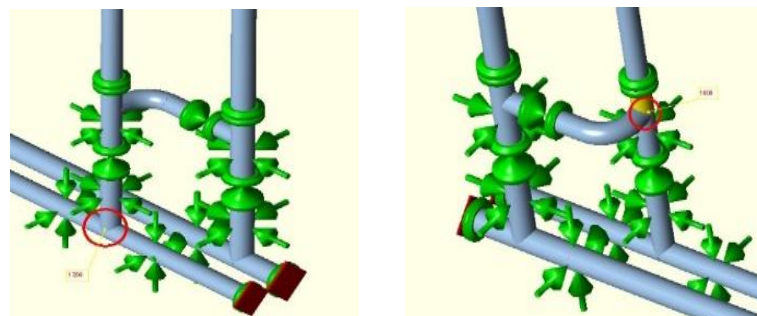
**Gambar 7.** Percabangan *node* 2000 dan *node* 1770 jalur *black oil*

**Tabel 5.** Tegangan percabangan *node* 2000 jalur *black oil*

Jalur	Pembebanan	Tegangan (KPa)	Tegangan ijin (KPa)	Rasio (%)
<i>Black oil</i>	<i>Operation</i> (W+T1+P1)	162781.7	358527.4	45.4
	<i>Operation</i> (W+T1+P1+Wave)	165251.4		46.1
	<i>Sustain</i> (W+P)	19445.9		5.4
	<i>Occasional</i> (W+P1+Wave)	21939.8		6.1
	<i>Expansion</i> (T)	143790.8		40.1

**Tabel 6.** Tegangan percabangan *node* 1770 jalur *black oil*

Jalur	Pembebanan	Tegangan (KPa)	Tegangan ijin (KPa)	Rasio (%)
<i>Black oil</i>	<i>Operation</i> (W+T1+P1)	27645.2	358527.4	7.7
	<i>Operation</i> (W+T1+P1+Wave)	45093.7		12.2
	<i>Sustain</i> (W+P)	12290.5		3.4
	<i>Occasional</i> (W+P1+Wave)	33771.2		9.4
	<i>Expansion</i> (T)	17889.1		4.9



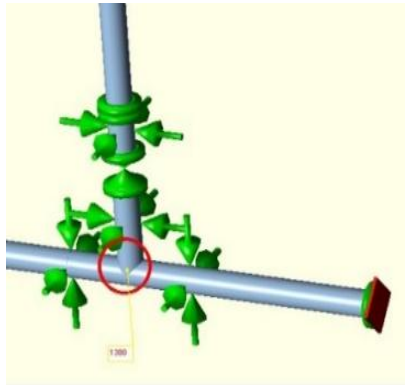
**Gambar 8.** Percabangan *node* 1200 dan *node* 1600 jalur *flushing oil*

**Tabel 7.** Tegangan percabangan *node* 1200 jalur *flushing oil*

Jalur	Pembebanan	Tegangan (KPa)	Tegangan ijin (KPa)	Rasio (%)
<i>Black oil</i>	<i>Operation</i> (W+T1+P1)	113513.2	358527.4	31.7
	<i>Operation</i> (W+T1+P1+Wave)	110116.8		30.7
	<i>Sustain</i> (W+P)	23651		6.6
	<i>Occasional</i> (W+P1+Wave)	19520.4		5.4
	<i>Expansion</i> (T)	97783.5		27.7

**Tabel 8.** Tegangan percabangan *node 1600* jalur *flushing oil*

Jalur	Pembebanan	Tegangan (KPa)	Tegangan ijin (KPa)	Rasio (%)
<i>Black oil</i>	<i>Operation (W+T1+P1)</i>	20209.9	358527.4	5.6
	<i>Operation (W+T1+P1+Wave)</i>	38768.5		11
	<i>Sustain (W+P)</i>	9849.8		2.7
	<i>Occasional (W+P1+Wave)</i>	38750		10.8
	<i>Expansion (T)</i>	15302.2		4.2



**Gambar 9.** Percabangan *node 1300* jalur *ballast water*

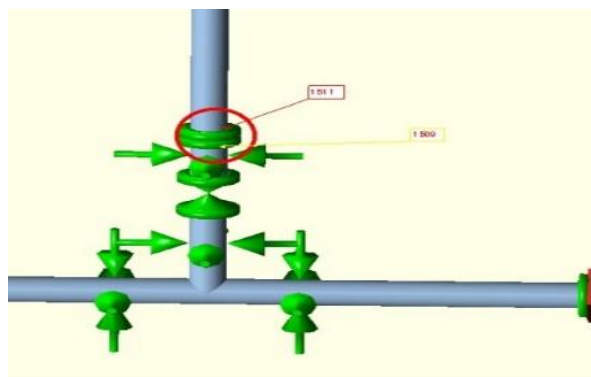
**Tabel 9.** Tegangan percabangan *node 1300* jalur *ballast water*

Jalur	Pembebanan	Tegangan (KPa)	Tegangan ijin (KPa)	Rasio (%)
<i>Black oil</i>	<i>Operation (W+T1+P1)</i>	69055.1	358527.4	17.1
	<i>Operation (W+T1+P1+Wave)</i>	66943.2		16.6
	<i>Sustain (W+P)</i>	24612.2		6.9
	<i>Occasional (W+P1+Wave)</i>	24635.6		7
	<i>Expansion (T)</i>	43699.6		12

Hasil analisa tegangan tertinggi pada percabangan masing-masing jalur perpipaan terjadi pada saat pembebanan operasi akibat berat, temperatur dan tekanan pada pipa serta gelombang dan arus laut. Dari ketiga jalur perpipaan ini, tegangan operasi percabangan *node 2000* pada jalur *flushing oil* memiliki tegangan paling besar, yaitu 165251.4 KPa.

### 3.6 Tegangan pada Sambungan *Hose* Dan Pipa

Pada sistem perpipaan bawah laut ini terdapat *hose* (selang) yang menghubungkan masing-masing jalur perpipaan menuju SPM. *Hose* ini mengalami eksitasi gaya akibat gelombang laut dan mengakibatkan beban *fatigue* pada pipa yang terhubung langsung dengan *hose*. Beban *fatigue* ini bisa perlu dipertimbangkan karena memungkinkan terjadinya kegagalan pada pipa. Berikut ini adalah tegangan yang muncul pada titik dimana pipa terhubung langsung dengan *hose* tersebut.

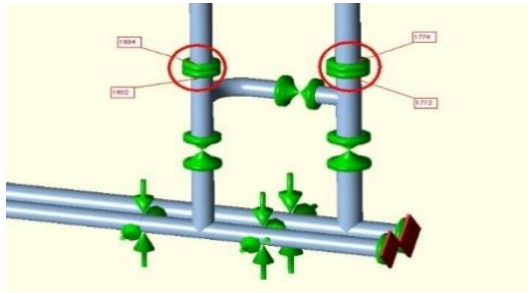


**Gambar 10.** Sambungan *hose* dan pipa pada jalur *ballast water*

**Tabel 10.** Tegangan akibat beban *fatigue* pada jalur *ballast water*

Jalur	Node	Tegangan (KPa)	Tegangan ijin (KPa)	Rasio (%)
<i>Ballast water</i>	1509	37119.9	358527.4	10.3
	1511	36360.1		10.1





Gambar 11. Sambungan *hose* dan pipa pada jalur *black oil* dan *flushing oil*

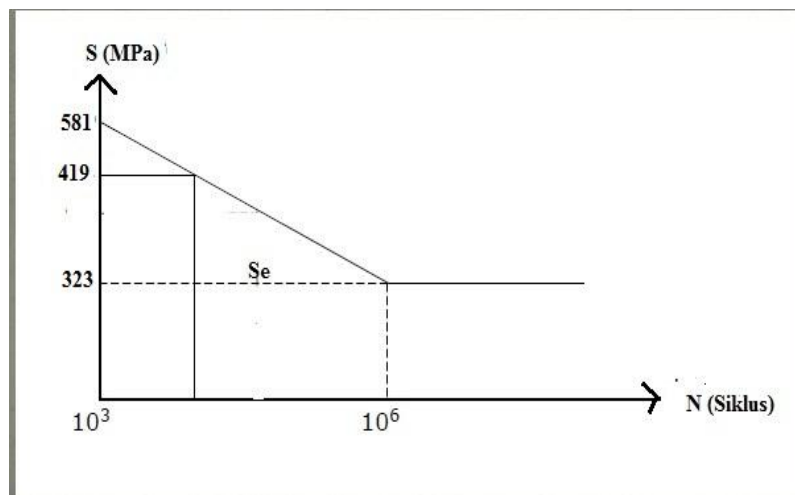
Tabel 17. Tegangan akibat beban *fatigue* pada jalur *black oil* dan *flushing oil*

Jalur	Node	Tegangan (KPa)	Tegangan ijin (KPa)	Rasio (%)
<i>Flushing oil</i>	1602	31820.6	358527.4	8.9
	1604	30862.3		8.6
<i>Black oil</i>	1772	28016.8		7.8
	1774	27201.1		7.6

Tegangan yang terjadi pada sambungan *hose* masih dalam kondisi aman, karena rasio tegangan yang ada tidak melebihi 100 % dan rasio tegangan tersebut masih tergolong kecil sehingga jauh terhindar dari kegagalan *fatigue*.

### 3.7 Penentuan *Lifetime* Sistem Perpipaan

Hasil perhitungan *lifetime* yang didapatkan menggunakan persamaan Goodman dan jumlah siklusnya didapatkan menggunakan kurva S-N di bawah ini.



Gambar 12. Kurva S-N [5]

Dari hasil perhitungan didapatkan jumlah siklus sebesar 46660 siklus sebelum terjadinya *fatigue*. Dalam prosesnya, waktu bongkar muat kapal tanker dilakukan seminggu satu kali dan waktu total pompa melakukan *on/off* sebesar 1-2 detik dengan frekuensi *node* pertama, yaitu 6 Hz. Oleh karena itu, *lifetime* dari sistem perpipaan ini, yaitu 37 tahun.

## 4. Kesimpulan

Hasil tegangan tertinggi terdapat pada jalur *black oil* dengan besar 338995.2 KPa dan intensitas tegangan tertingginya 326195.1 KPa. Ini terjadi pada pembebanan *operation* akibat berat, tekanan, temperatur pipa dan gelombang/ arus. Dari ketiga jalur perpipaan ini, tegangan operasi percabangan *node* 2000 pada jalur *black oil* memiliki tegangan paling tinggi, yaitu 165251.4 KPa dengan rasio 46.1 %. Hasil analisa tegangan tertinggi ini terjadi saat pembebanan operasi akibat berat, temperatur, tekanan pada pipa dan beban gelombang/ arus. Tegangan tertinggi akibat beban *fatigue* pada pipa yang tersambung langsung dengan *hose* terletak pada jalur pipa *ballast water* sebesar 37119.9 KPa. Tegangan ini masih dalam kondisi aman karena besarnya masih di bawah tegangan ijin dengan rasio 10.3 %. Jumlah siklus yang mungkin terjadi sebelum terjadinya *fatigue* sebesar 46660 siklus dan dengan waktu bongkar muat kapal tanker seminggu satu kali, maka didapatkan *lifetime* sistem perpipaan 37 tahun.

## 5. Daftar Pustaka

- [1] Guo, B., 2005, "*Offshore Pipelines*," Elsevier, USA.
- [2] Peng, L.C., Peng, T. L., 2009, "*Pipe Stress Engineering*," American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [3] Det Norske Veritas, 2012, "DNV-OS-F101: Submarine Pipeline Systems," Det Norske Veritas, Oslo.
- [4] Det Norske Veritas, 1981, "*Rules For Submarine Pipeline Systems 1981*," Det Norske Veritas, Oslo.
- [5] Onate, E., 2009, "Structural Analysis with the Finite Element Method Linear Static," Springer, Barcelona.