

Analisis Tegangan pada Belokan Pipa Marine Boil Off Gas (MaBOG) Berbasis Metode Elemen Hingga

Rudi Kurniawan, Arhami, Rahmatsyah Maksu Ramsi

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7 Darussalam – Banda Aceh 23111, Indonesia
e-mail: rahmatsyahm@gmail.com

Abstract

This paper discusses the stress analysis of marine boil off gas pipe elbow. The piping system receives several loading conditions such as expansion load, occasional load, operation load, and sustain load, which are referred to as static loading conditions. As a result of the load conditions can be known stress distribution and examine the strength of the weld connection on the pipe elbow. The purpose of this research is to know the distribution of stress at the elbow of the pipe due to static loading conditions. The method used in this study using finite element analysis. The result of stress simulation in pipe elbow is 771 Pa and the result of calculation of stress in pipe elbow is 3,94 Pa. The result of piping system simulation shows the value of the pipe elbow due to the load operation of 23151,34 kPa, the sustain load is 24918,91 kPa, the occasional load is 59110,83 and the expansion load does not produce the stress value. From the results of the analysis, the stress due to operating, sustain, and expansion loads are categorized as safe because they do not exceed the allowable stress values of each loading condition.

Keywords : Stress Analysis, Pipe Elbow, Expansion Load, Finite Element Method, Occasional Load, Operation Load, and Sustain Load.

1. Pendahuluan

Saat ini Indonesia memiliki 2 buah kilang LNG (*Liquefied Natural Gas*) dengan 8 buah train terdapat di Bontang, Kalimantan dan 6 train terdapat di Lhokseumawe, Aceh. Akan tetapi, hanya 1 train yang beroperasi di PT. Perta Arun Gas, Lhokseumawe yaitu train 5. Dengan kondisi keterbatasan hasil gas alam yang di eksplorasi oleh pihak PT. Perta Arun Gas, jalur pipa *Marine Boil Off Gas (MaBOG)* dirancang bertujuan untuk pemanfaatan uap LNG *BERTH-2 Unit 68*.

Jaringan pipa *MaBOG* mengalirkan LNG dari *Loading BERTH-2 Menuju Boil Off Gas Compressor K-6801*. LNG merupakan salah satu energi alternatif yang memiliki prospek yang baik, hal ini disebabkan oleh hasil pembakaran LNG yang memiliki tingkat polusi yang rendah, efisiensi pembakaran yang cukup tinggi sehingga mudah untuk dikontrol. Gas merupakan suatu fluida yang mempunyai tekanan dan temperatur yang tinggi, maka karakteristik dari pipa yang digunakan harus memenuhi standarisasi pipa yang telah ditetapkan, seperti pada standarisasi ASME (*American Society Mechanical Engineering*) B31.3 yang mencakup standar proses perpipaan.

Pada saat ini jaringan pipa *MaBOG* sudah tidak beroperasi, akibat jaringan tersebut sering mengalami beberapa gangguan. Dari beberapa kasus gangguan yang terjadi pada jaringan pipa, penulis melakukan pengkajian tegangan pada belokan pipa tersebut. Dalam suatu sistem perpipaan analisis tegangan

wajib dilakukan, untuk mengetahui jalur-jalur kritis beban yang terjadi pada sistem perpipaan. Makalah ini membahas tentang analisis tegangan pada belokan pipa *marine boil off gas* menerima beberapa kondisi pembebanan akibat *expansion load*, *operation load*, dan *sustain load*, yang disebut sebagai kondisi pembebanan statik. Akibat dari kondisi pembebanan dapat diketahui distribusi tegangan pada belokan pipa.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Tegangan

Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya yang bekerja pada benda dengan luas penampang benda. Secara matematis dituliskan:

$$S = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dimana:

S = Tegangan/Stress (Pa)

F = Gaya (N)

A = Luas penampang (m^2)

Tegangan yang diizinkan dalam perancangan dan analisa tegangan pada sistem perpipaan diartikan sebagai batasan tegangan maksimal yang diizinkan

oleh standar dan kode pada ASME B31.3. Tegangan yang diizinkan dapat diterapkan pada beberapa kasus pembebanan pada sistem perpipaan tersebut yaitu tegangan pada beban tetap (*sustain load*), tegangan karena beban termal (*expansion load*), tegangan karena beban okasional (*occasional load*). Ini berarti bahwa nilai tegangan akibat pembebanan tersebut tidak boleh melebihi nilai tegangan izin. [4]

2.1.1 Tegangan akibat beban ekspansi (*expansion load*).

Perubahan temperatur pada pipa yang menyebabkan tegangan *bending* S_b dan torsional S_t pada sistem perpipaan tiga dimensi. Tegangan maksimum akibat perubahan termal semata disebut dengan perluasan tegangan S_{exp} . Tegangan ini harus berada dibawah tegangan yang diizinkan S_A . Persamaan yang digunakan dalam perhitungan tegangan akibat beban ekspansi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [6] ;

$$S_{exp} = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} \leq S_A \quad (2)$$

$$S_b = \frac{iM_b}{Z} \quad (3)$$

$$S_t = \frac{Mt}{2Z} \quad (4)$$

Dimana :

S_{exp} = Tegangan ekspansi (kPa)

S_t = Tegangan torsional (kPa)

S_b = Tegangan *bending* (kPa)

i = Faktor intensifikasi (SIF)

Z = Modulus penampang pipa

M_b = Resultan momen bending (kg.m)

M_t = Resultan momen torsional (kg.m)

Persamaan S_A adalah sebagai berikut;

$$S_A = f \sqrt{(1,25 S_c + 0,25 S_h)} \quad (5)$$

Dimana :

f = *Stress range* faktor

S_c = Tegangan yang diizinkan pada temperatur operasi (kPa)

S_h = Tegangan yang diizinkan pada temperatur desain (kPa)

S_A = Nilai tegangan yang diizinkan (kPa)

2.1.2 Tegangan akibat beban sustansi (*sustain load*).

Tegangan karena beban tetap pada pipa disebabkan oleh bobot berat dan tekanan. Untuk perhitungan tegangan akibat beban sustansi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [6] ;

$$S_{sus} = \frac{F_{ax}}{A_m} + \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z} + \frac{PD}{4t} \leq S_h \quad (6)$$

Dimana :

S_{sus} = Tegangan sustansi (kPa)

F_{ax} = Gaya aksial karena beban tetap (kg)

A_m = *Metal Area of Cross Section* (mm²)

M_i = Momen lendutan dalam bidang (*in-plane*) karena beban tetap (kg.m)

M_o = Momen lendutan luar bidang (*out-plane*) karena beban tetap (kg.m)

i_i = Faktor insentifikasi (SIF) dalam bidang.

i_o = Faktor insentifikasi (SIF) luar bidang.

P = Tekanan desain pipa (kPa)

D = Diameter luar pipa (mm)

T = Ketebalan pipa (mm)

2.1.3 Tegangan akibat beban okasional (*occasional load*).

Tegangan ini adalah tegangan yang dikarenakan oleh beban perpindahan tumpuan, misalnya karena gempa bumi dan sebagainya. untuk perhitungan tegangan beban okasional. dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [6] ;

$$S_{sus} + S_{occ} \leq 1,33 S_h \quad (7)$$

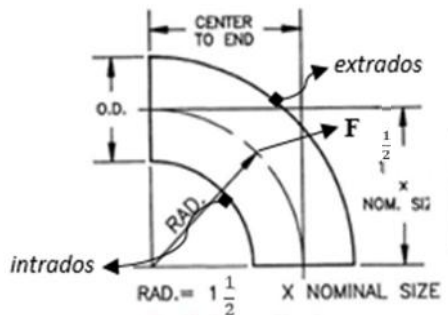
Dimana :

S_{occ} = Tegangan okasional (kPa)

2.2. Belokan Pipa

Belokan dalam pipa menghasilkan kerugian *head* yang lebih besar daripada pipa yang lurus. Kerugian disebabkan daerah yang terpisah dari aliran dekat bagian dalam belokan (terutama jika tikungan tajam) dan aliran sekunder berputar yang terjadi karena adanya ketidakseimbangan gaya sentripetal yang membuat benda untuk bergerak melingkar akibat kelengkungan garis tengah pipa. Efek-efek dan nilai-nilai terkait untuk besaran

Reynold Numbers yang mengalir melalui sebuah belokan. Jenis belokan pipa *long radius* banyak digunakan dengan besar radius $1\frac{1}{2}$ Nominal Size nya [5].



Gambar 1. Long Radius Elbow

Pada belokan pipa bekerja gaya yang disebabkan oleh aliran fluida yang berbelok meliputi berat pipa, berat fluida dan kecepatan fluida. Jika letak belokan adalah seperti Gambar 1. Maka gaya yang ditimbulkan oleh aliran fluida yang berbelok dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [4]:

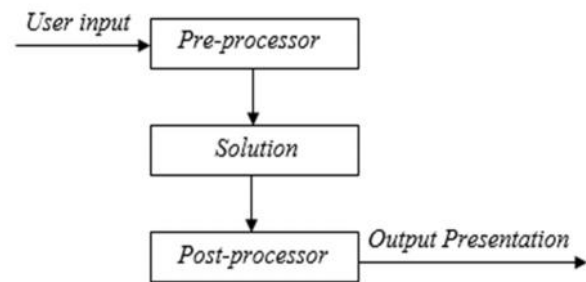
$$F = 2\frac{\gamma}{g} Q v \sin \theta \quad (8)$$

Dimana :

- F = Gaya aliran fluida (kgf)
- γ = Densitas fluida (kgf/m³)
- g = Gaya gravitasi (m/s²)
- Q = Kapasitas aliran (m³/s)
- v = Laju aliran fluida (m/s)
- θ = Sudut belokan pipa

2.3 Metode Elemen Hingga

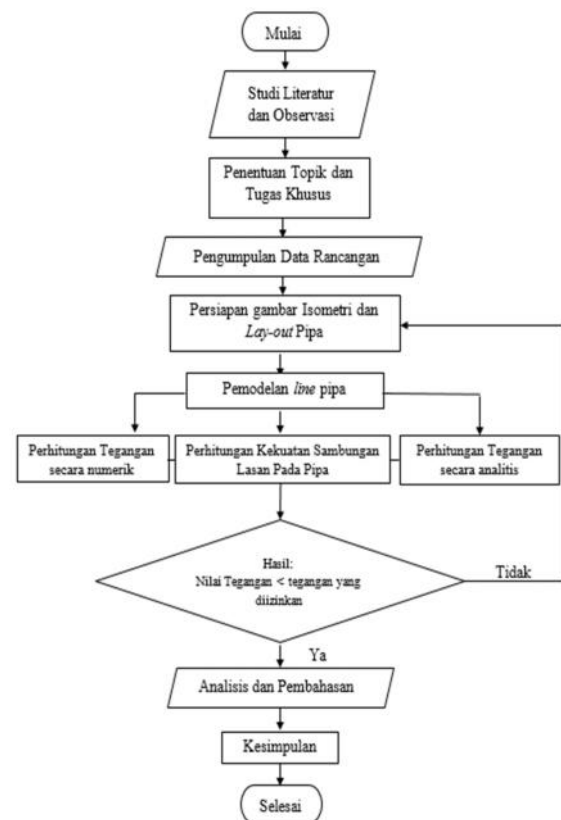
Pada aplikasi metode elemen hingga, terdapat tiga urutan proses seperti pada Gambar 2 yang sering digunakan dalam penyelesaiannya. *Pre-processor* adalah proses persiapan geometris, pemilihan elemen, area diskritisasi, pemilihan bahan, aplikasi pembebanan, dan spesifikasi kondisi batas. Berdasarkan proses *pre-processor*, aplikasi secara internal akan mengatur persamaan kesetimbangan yang harus dipecahkan melalui proses *Solution* untuk menghasilkan nilai area nodal (perpindahan, suhu, dan lain-lain). *Post Processor* adalah proses untuk mewakili parameter analisis yang dibutuhkan. Dengan proses ini, pengguna (*user*) dapat mengevaluasi distribusi tegangan yang terjadi, perpindahan struktural, distribusi tekanan, atau distribusi fluks panas [10].



Gambar 2. Rangkaian proses metode elemen hingga [10].

3. Metodologi

Penelitian untuk mengetahui distribusi tegangan dari sistem pepipaian serta mengetahui tegangan belokan pipa *marine boil off gas*. Adapun metode penelitian yang dapat diilustrasikan dalam sebuah *flowchart* seperti pada Gambar 3, sebagai berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian.

A. Studi Literatur dan Observasi

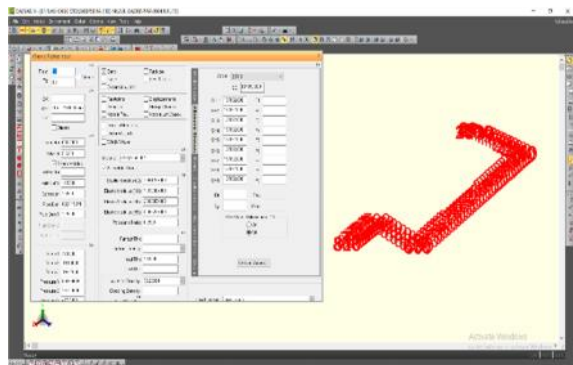
Penelitian ini diawali dengan melakukan observasi lapangan. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan literatur berupa buku serta jurnal yang dapat mendukung penelitian tugas akhir ini. Selain itu juga dilakukan pengumpulan data spesifikasi pipa dari beberapa katalog serta *data sheet* terkait belokan pipa yang dianalisis.

Tabel 1. Spesifikasi Belokan Pipa *Marine Boil Off Gas*. [8]

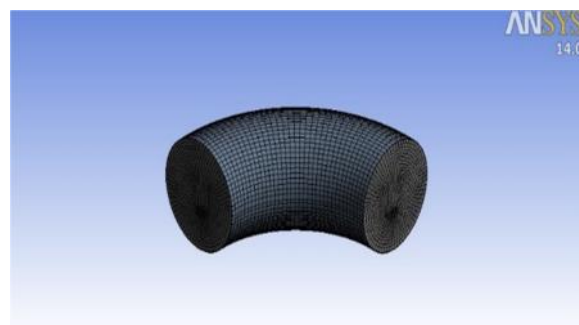
DESIGN FEATURE	
Service	ReGas
Standar material spesifikasi	ASTM A.358-304
Grade	B
Manufacturing Method	Seamless
Lenghts Elbow	2,4 m
Pipe diameter	32 inch (812,8 mm)
Cross-sectional Elbow	586,69 m ²
Radius Elbow	1219 mm
Type Elbow	90° Long Radius
Weight Elbow	390 kg
Wall Thickness	Sch. STD
Design Temperature	-159 °C
Design Pressure	20,45 kg/cm ²
INSPECTION AND TEST	
Flushing Fluid	Gas
Testing Fluid (Purging/Blandked)	Nitrogen/ N
Fluid Density	1,25 kg/m ³
Fluid Velocity	42,75 m/s
Flow rate capacity	77880 m ³ /jam
Radiograph Test	Yes 100%
INSULATION	
Insulation Type	Cold Insulation
Insulation Material	100 mm Polyurethane

B. Pemodelan Line dan Belokan Pipa

Dalam pembuatan model pipa yang akan di analisa, model langsung dibuat menggunakan *software Caesar-II*. Pertama buka *software Caesar-II*, klik menu *file* selanjutnya pilih *new*, pilihlah satuan yang akan digunakan, selanjutnya *input* parameter-parameter seperti panjang pipa, diameter pipa, *schedule* atau ketebalan yang digunakan. Pemodelan *Line* pipa bertujuan untuk mendapatkan pusat massa pada sistem perpipaan sehingga bisa dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode grafis untuk mendapatkan gaya aksial, momen, dan torsi. Berikut tampilan menu *input data Caesar-II* yang di tunjukkan pada Gambar 4.

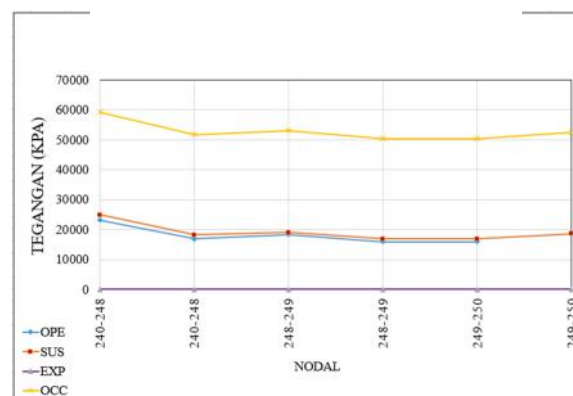
Gambar 4. Tampilan Menu input data *Caesar-II*

Analisis dengan metode elemen hingga dilakukan dengan *software ANSYS* dengan urutan proses perhitungan: pemodelan (*elbow*), *meshing*, pemberian beban dan syarat batas, penyelesaian dan interpretasi hasil. Untuk perhitungan dan analisis tegangan dalam belokan pipa dilakukan pemodelan dengan model tiga dimensi.

Gambar 5. Pemodelan Mesh Belokan pipa *Marine Boil Off Gas*.

4. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil perhitungan metode elemen hingga dengan menggunakan *software Caesar-II*, hasil perhitungan tegangan dari sistem perpipaan dengan mengambil nilai tegangan yang terjadi pada belokan berdasarkan rumusan pembebanan seperti disajikan dalam rumus tegangan yang diizinkan, hasil simulasi distribusi tegangan pada belokan ditunjukkan dalam grafik Gambar 6.



Gambar 6. Grafik distribusi tegangan sistem perpipaan.

Berikut merupakan tabel nilai hasil perhitungan tegangan pada belokan menggunakan *software Caesar-II* berdasarkan kondisi pembebanan ;

Tabel 2. Hasil Tegangan Operation Load

Nilai tegangan tertinggi pada belokan pipa dengan kondisi pembebanan operating	Type	Stress (kPa)	Node	Allowable Stress (kPa)
	Maximum Stress	23151.34	240	137892
	Bending	7660.54	248	137892
	Torsional	229.67	249	137892

Tabel 3. Hasil Tegangan *Expansion Load*

Nilai tegangan tertinggi pada belokan pipa dengan kondisi pembebanan <i>expansion</i>	Type	Stress (kPa)	Node	Allowable Stress (kPa)
	Maximum Stress	0.0000	240	294302.01
	Bending	0.0000	240	294302.01
	Torsional	0.0000	249	294302.01

Tabel 4. Hasil Tegangan *Sustain Load*

Nilai tegangan tertinggi pada belokan pipa dengan kondisi pembebanan <i>sustain</i>	Type	Stress (kPa)	Node	Allowable Stress (kPa)
	Maximum Stress	24918.91	240	137892
	Bending	2452.63	240	137892
	Torsional	177.54	249	137892

Tabel 5. Hasil Tegangan *Occasional Load*

Nilai tegangan tertinggi pada belokan pipa dengan kondisi pembebanan <i>occasional</i>	Type	Stress (kPa)	Node	Allowable Stress (kPa)
	Maximum Stress	59110.83	240	183396.4
	Bending	8895.52	240	183396.4
	Torsional	49.01	249	183396.4

Berikut merupakan perhitungan analitis gaya yang ditimbulkan oleh aliran fluida yang berbelok :

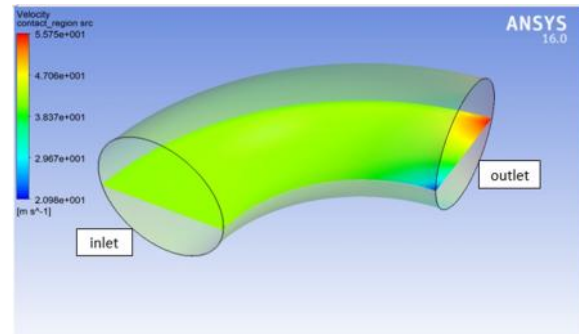
$$\begin{aligned}
 F &= 2 \frac{\gamma}{g} Q v \sin \theta \quad (8) \\
 &= 2 \cdot \frac{1,25 \text{ kg/m}^3}{9,8 \text{ m/s}^2} \cdot 21,63 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 42,75 \text{ m/s} \cdot \sin 90^\circ \\
 &= 235,92 \text{ kg} \\
 &= 2314,42 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan gaya aliran fluida yang diterima oleh belokan pipa kita dapat melakukan perhitungan tegangan yang terjadi pada belokan pipa:

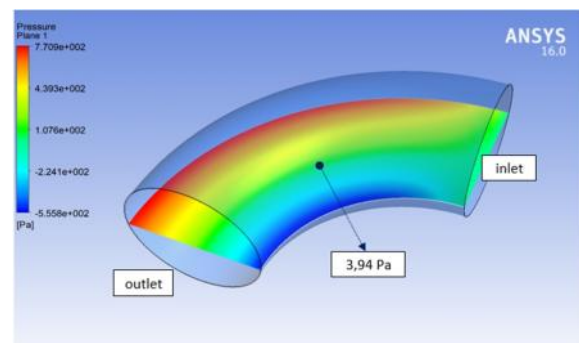
$$\begin{aligned}
 S &= \frac{F}{A} \quad (1) \\
 &= \frac{2314,42 \text{ N}}{586,69 \text{ m}^2} \\
 &= 3,94 \text{ N/m}^2 \\
 &= 3,94 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan *software ANSYS* analisis dapat dilihat pada kondisi distribusi tekanan, temperatur, dan laju aliran dari belokan pipa guna menunjukkan tegangan lokal pada sisi luar dan dalam dari sistem pemipaan secara tiga dimensi. Jenis metode *mesh* yang digunakan dalam pemodelan belokan pipa menggunakan *triangle surface mesher*. Hasil simulasi kondisi laju aliran fluida di belokan

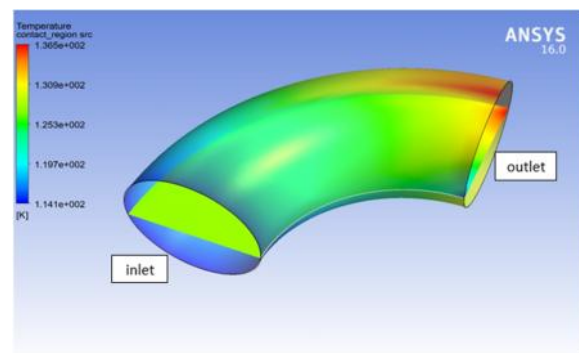
pipa pada Gambar 7 menunjukkan daerah kritis maksimum terjadi pada akhir bagian *extrados* belokan pipa dengan nilai 55,7 m/s. Hasil simulasi kondisi tekanan fluida di belokan pipa pada Gambar 8 menunjukkan daerah kritis maksimum terjadi pada awal bagian *extrados* belokan pipa dengan nilai 771 Pa. Hasil simulasi kondisi temperatur fluida di belokan pipa pada Gambar 9 menunjukkan daerah kritis maksimum terjadi pada akhir bagian *intrados* belokan pipa dengan nilai 136,2 K.



Gambar 7. Kondisi laju aliran fluida pada belokan pipa.



Gambar 8. Kondisi tekanan fluida pada belokan pipa.



Gambar 9. Kondisi temperatur fluida pada belokan pipa

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan simulasi tegangan sistem perpipaan *Marine Boil Off Gas* dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari hasil simulasi tegangan *software Caesar-II*, Tegangan yang terjadi akibat kondisi beban

- pada belokan pipa masih berada pada batas aman yang diizinkan. Akibat *operation load* di belokan pipa pada nodal 240 sebesar 23151,34 kPa dengan nilai *Allowable Stress* sebesar 137892 kPa, Tegangan yang terjadi akibat *sustain load* di belokan pipa pada nodal 240 sebesar 24918,81 kPa dengan nilai *Allowable Stress* sebesar 137892 kPa, Tegangan yang terjadi akibat *occasional load* di belokan pipa pada nodal 240 sebesar 59110,83 kPa dengan nilai *Allowable Stress* sebesar 183396,4 kPa.
2. Dari hasil simulasi tegangan pada belokan pipa *Marine Boil Off Gas* menggunakan *software Caesar-II*, tidak ditemukannya tegangan yang terjadi akibat kondisi *expansion load*. Hal ini disebabkan oleh isolasi pipa yang mampu menahan tegangan dengan baik agar temperatur fluida nitrogen yang mengalir di dalam pipa tidak mengalami ekspansi termal.
 3. Dari hasil simulasi dengan *software ANSYS* kondisi tekanan fluida pada belokan pipa memiliki nilai tekanan 771 Pa yang merupakan nilai daerah kritis tegangan yang terjadi pada awal bagian *extrados* belokan pipa, berdasarkan perhitungan analitis tegangan pada belokan pipa didapatkan hasil tegangan senilai 3,94 Pa.

- [6] Phillip Ellenberger, J., 2014, *Piping and Pipeline Calculations Manual*, Ed 2nd, Elsevier, UK.
- [7] PT. Arun, 2012, *Operating Manual book*, Unit 60 and 68, Lhokseumawe, ACEH.
- [8] Siyanagaraju, Krugon, Venkanteswararao, 2015, Stress Analysis of Process Pipe Line System (ASME B31.3) in a Plant Using Caesar-II, *IJEDR*, Issue 3, volume 3, ISSN: 2321-9939.
- [9] Sularso & Haruo Tahara, 2000, *Pompa dan kompresor*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- [10] Wahyu Kuntjoro, 2005. "The Introduction to the Finite Element Method", McGraw-Hill.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini antara lain adalah;

1. Dalam melakukan Pemodelan pipa diperlukan data aktual desain dan data kondisi di lapangan, agar pengaruh nilai tegangan dapat dibuktikan terhadap gangguan yang terjadi pada jalur pipa *Marine Boil Off Gas*.
2. Kondisi jarak tumpuan pipa dalam perencanaan sistem perpipaan sangatlah berpengaruh terhadap tegangan yang terjadi pada sistem perpipaan, untuk itu diperlukan pengkajian ulang terhadap konstruksi tumpuan yang digunakan pada jalur pipa *Marine Boil off Gas* yang mengalami pergeseran.

Daftar Pustaka

- [1] ANSYS (FLUENT), Ajei Gopal (January 2017) Pennsylvania, US.
- [2] Caesar-II, *Pipe Stress Analysis Software*, 2016. USA.
- [3] Harsono W, 1985, *Teknologi Pengelasan Logam*, P.T. Pradnya Paramita, Jakarta.
- [4] ITT GRINNELL. 2012, *ASME B31.3 Process Piping*, The American Society of Mechanical Engineers, USA.
- [5] Munson, Bruce R., Young, Donald F., 2014, *Mekanika Fluida*, Jilid 2, Erlangga, Jakarta