



Desain dan Analisa Kekuatan Pipa *Expansion Loops* dengan Variasi Ukuran *Loop* dan Bentuk *Loop*

Pujiyanto¹⁾, Hartono Yudoo¹⁾, Sarjito Joko Sisworo¹⁾

¹⁾Laboratorium Sistim Perpipaan dan Permesinan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*e-mail :pujiyanto@student.undip.ac.id

Abstrak

Sistem perpipaan akan mengalami ekspansi akibat suhu yang besarnya tergantung pada koefisien ekspansi material dari pipa yang dapat mengakibatkan kerusakan pada pipa. Kerusakan pada pipa akibat ekspansi termal ini dapat diatasi dengan menggunakan *expansion joint*, *Z bend loop*, dan *expansion loops*. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui *stress* yang terjadi pada masing-masing variasi *expansion loops* sehingga mendapatkan model *expansion loop* yang menghasilkan *stress* paling rendah karena adanya ekspansi termal pada pipa. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan software berbasis *Finite Element Analysis* dengan menggunakan beban perubahan *displacement* pada bagian *anchor* yang nilainya setengah dari total ekspansi pipa pada masing-masing *anchor*. Tegangan yang terjadi pada pipa lurus adalah 68.57 Ksi, 68.44 Ksi dan 68.29 Ksi. Tegangan yang terjadi pada *expansion loop* $W=H$ adalah 19.26 Ksi, 19.78 Ksi dan 19.68 Ksi. Tegangan yang terjadi pada *expansion loop* $W=0.5H$ adalah 16.83 Ksi, 16.70 Ksi dan 16.56 Ksi. Tegangan yang terjadi pada *expansion loop* $W=2H$ adalah 26.42 Ksi, 26.95 Ksi dan 26.70 Ksi. Tegangan yang terjadi pada *expansion loop* setengah lingkaran adalah 42.43 Ksi, 44.38 Ksi dan 44.79 Ksi. *Stress* yang terjadi pada pipa *expansion loop* akan semakin kecil apabila nilai W/H semakin kecil. *Expansion loop* $W=0.5H$ menunjukkan hasil *stress* paling rendah jika dibandingkan dengan *expansion loop* yang lain.

Kata Kunci : Pipa, Ekspansi Termal, *Expansion Loop*, *Pipe Stress Analysis*

1. PENDAHULUAN

Sistem perpipaan berfungsi untuk mengalirkan fluida dari satu tempat ke tempat yang lain. Fluida mengalir melalui pipa dengan berbagai tekanan dan suhu yang dapat menimbulkan tegangan tinggi pada pipa sehingga pada perencanaannya harus optimal untuk memperkecil kemungkinan terjadinya kerusakan pada pipa [1].

Sebagian besar material - material *engineering* pipa akan mengalami ekspansi yang disebabkan oleh adanya kenaikan suhu. Pipa memiliki lebih dari satu titik ekspansi sehingga mudah mengalami ekspansi kenaikan suhu sesuai dengan koefisien ekspansi dari material pipa yang digunakan [2]. Ekspansi termal pada pipa menjadi salah satu kendala dalam proyek perpipaan karena suhu tinggi dari fluida dalam pipa akan mengakibatkan pipa mengalami penambahan panjang yang mengakibatkan pipa mengalami tegangan yang tinggi. Kekuatan pada pipa

berbentuk persegi panjang akan berkurang dengan meningkatnya nilai perbandingan antara lebar pipa dengan tebal pipa dan meningkatnya nilai perbandingan antara lebar pipa dengan tinggi pipa [3].

Desain dari sistem perpipaan harus dirancang dan dianalisis untuk memastikan keamanan pada sistem perpipaan [4]. Kerusakan pada pipa akibat ekspansi termal dapat diatasi dengan meningkatkan fleksibilitas dari sistem perpipaan, yaitu dengan menggunakan *expansion joint*, *Z bend loop* dan *expansion loops*. Penggunaan *expansion loop* dalam sistem perpipaan dinilai lebih aman jika dibandingkan dengan penggunaan *expansion joint* [5]. Parameter yang harus diperhatikan dalam peningkatan fleksibilitas sistem perpipaan menggunakan *expansion loops* adalah *bend angle* karena dapat mempengaruhi *stress* yang terjadi pada pipa *expansion loops* [6].

Penelitian tentang *Z bend loop* untuk mengatasi adanya beban akibat ekspansi pada pipa

sebelumnya dilakukan dengan menggunakan menggunakan material pipa *phenolic foam*, *polyolefin* serta *polyisocyanurate foam* dengan ketebalan 55 mm, 70 mm dan 85 mm menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 4030.37 Psi. Penggunaan *Z bend loop* untuk mengatasi adanya ekspansi termal pada pipa diyakini masih aman dikarenakan nilai tegangan yang terjadi masih di bawah *allowable stress* [7].

Penelitian tentang *expansion loops* 3 dimensi dilakukan dengan menggunakan pipa ASTM A 106 Grade B *Schedule number* 40 berdiameter 6 inchi. Penelitian ini dilakukan dengan variasi perubahan nilai lebar loop dan ukuran 3D loop dengan menggunakan perbandingan 2:1 sedangkan nilai tinggi loop tetap pada 1.5 m menunjukkan hasil paling aman ketika lebar loop bernilai 4 m dan ukuran 3D loop bernilai 2 m [8]. Penelitian tentang *expansion loops* 2 dimensi dilakukan dengan menggunakan pipa berdiameter 609.6 mm, panjang 600 mm dan tebal 9.525mm dengan material ASTM 672 C60. Penelitian dilakukan dengan cara pengurangan tinggi kaki loop dari 8000 mm ke 2000 mm dengan lebar loop tetap pada 9255 mm, sistem mengalami kegagalan ketika tinggi kaki loop dibawah 3500 mm. Penelitian dengan cara pengurangan lebar loop dari 8000 mm ke 2000 mm dengan tinggi kaki loop tetap pada 9255 mm tidak banyak berpengaruh selama ekspansi selama *elbows* didukung dengan baik. Penelitian dengan cara pengurangan tinggi kaki loop dan lebar loop menunjukkan hasil yang optimal ketika tinggi kaki loop 4000 mm dan lebar loop 2000 mm [9].

Penelitian ini dilakukan pada temperatur kerja 400 °F berdasarkan spesifikasi *LDR Vertical Type Electrical Boiler* model LDR0.7-0.7 dengan nilai suhu uap yang dihasilkan oleh *boiler* sebesar 400 °F [10]. Material pipa yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa ASTM A 106 Grade A (*Seamless Carbon Steel Pipe for High Temperature Service*) [11].

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai *stress* yang terjadi pada setiap *expansion loops* karena adanya penambahan panjang pada pipa akibat adanya penambahan pipa pada temperatur kerja 400 °F sehingga didapatkan pertimbangan penggunaan model dan bentuk *expansion loop* yang dapat digunakan untuk mengatasi adanya ekspansi termal pada pipa berdasarkan tegangan (*stress*) yang terjadi pada pipa jika dibandingkan dengan *alloable stress* pipa berdasarkan *American Society of Mechanical Enginer* (ASME) dan mendapatkan model *expansion loop* yang menunjukkan hasil *stress* paling rendah dibandingkan *expansion loop* lain dalam penelitian ini.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada *expansion loops* 2 dimensi dengan bentuk simetris. Material pipa yang digunakan adalah ASTM A106 Grade A. Desain *expansion loops* disesuaikan dengan penambahan panjang yang terjadi pada pipa. Pertambahan panjang yang terjadi pada pipa tergantung pada koefisien ekspansi dari bahan pipa yang digunakan. Koefisien ekspansi pada pipa *carbon steel* dapat dilihat pada ASME B31.1 tentang *Power Piping ASME Code for Pressure Piping* [12].

Tabel 1. Total Ekspansi pada Pipa

N o	D/t	Span (ft)	Jarak Anchor (ft)	Total Ekspansi (in.)
1	64	35	105	2.940
2	80	39	117	3.276
3	96	42	126	3.528

2.2. Allowable Stress

Allowable stress pada pipa di dapatkan dari persamaan 1:

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h) \quad (1)$$

Dimana S_A adalah *allowable stress range* dalam Psi, f adalah *stress reduction* factor, S_c adalah *allowable stress* untuk material pada suhu minimal (Psi) dan S_h adalah *hot stress* (Psi).

Allowable stress pada pipa ASTM A 106 Grade A berdasarkan persamaan 1 adalah 2.055×10^4 Psi.

2.3. Panjang Loop

Panjang *loop* yang dibutuhkan akibat adanya ekspansi yang terjadi pada pipa dapat dihitung dengan persamaan 2:

$$L_2 = \sqrt{\frac{3ED\Delta}{144 S_A}} \quad (2)$$

Dimana L_2 adalah panjang *loop* yang dibutuhkan (ft), E adalah modulus elastisitas pipa (psi), D adalah diameter luar pipa (in.), Δ adalah total ekspansi yang terjadi pada pipa (in.), dan S_A adalah *allowable stress* pipa (psi).

Panjang *loop* untuk *expansion loops* bentuk U dapat dihitung dengan persamaan 3:

$$L_2 = W + 2H \quad (3)$$

Dimana L_2 adalah panjang *loop* yang dibutuhkan (ft), W adalah lebar *loop* (ft), dan H adalah tinggi kaki *loop* (ft).

Radius *loop* untuk *expansion loop* bentuk setengah lingkaran dapat dihitung dengan persamaan 4:

$$R = \frac{L_2}{\pi} \quad (4)$$

Dimana R adalah radius *loop* (ft), L_2 adalah panjang *loop* yang dibutuhkan (ft), dan π bernilai 3.14.

Tabel 2. Panjang *Loop*

No	D/t	Panjang Loops yang Dibutuhkan (ft)
1	64	38
2	80	44
3	96	50

Tabel 2 menunjukkan Panjang *loop* yang dibutuhkan untuk mengatasi terhadinya ekspansi pipa pada yang ditunjukkan pada Tabel 1 dengan menggunakan persamaan 2.

2.4. Variabel Penelitian

Penelitian dilakukan pada pipa *expansion loops* dengan material ASTM A106 Grade A pada temperatur kerja 400 °F. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan variasi-variasi yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

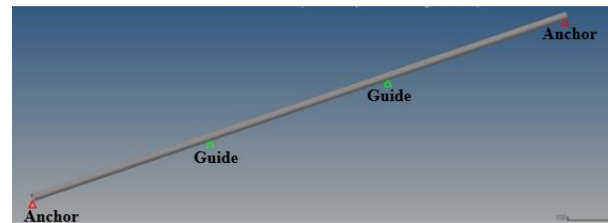
Tabel 3. Perbandingan Nilai W dan H

No	D/t	$W = H$ (ft)		$W = 0.5H$ (ft)		$W = 2H$ (ft)	
		W	H	W	H	W	H
1	64	12.7	12.7	7.6	15.2	19	9.5
2	80	14.7	14.7	8.8	17.6	22	11
3	96	16.7	16.7	10	20	25	12.5

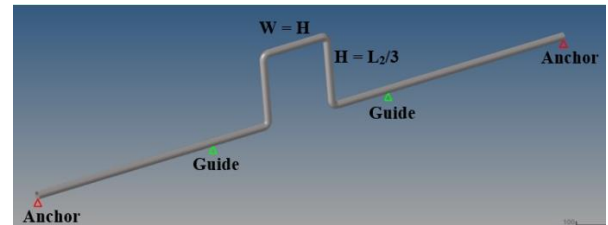
Tabel 4. Loop $\frac{1}{2}$ Lingkaran

No	D/t	Radius Loop $\frac{1}{2}$ Lingkaran (ft)
1	64	12
2	80	14
3	96	16

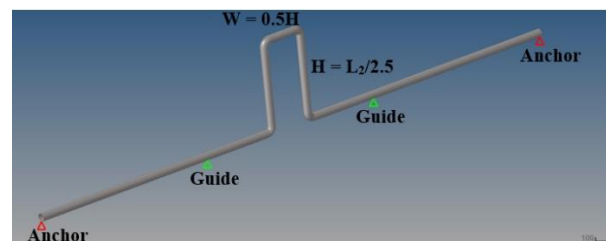
Model yang akan dianalisa berdasarkan dengan variasi yang sudah ditentukan dapat dilihat pada Gambar 1 untuk pipa lurus, Gambar 2 untuk *expansion loop* $W=H$, Gambar 3 untuk *expansion loop* $W=0.5H$, Gambar 4 untuk *expansion loop* $W=2H$ dan Gambar 5 untuk *expansion loop* setengah lingkaran.



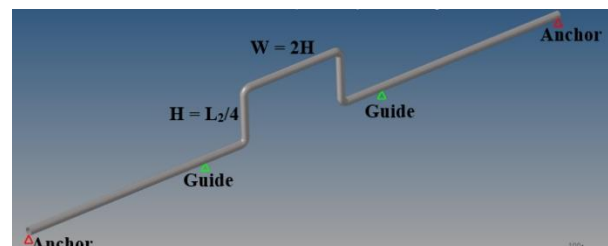
Gambar 1. Pipa Lurus



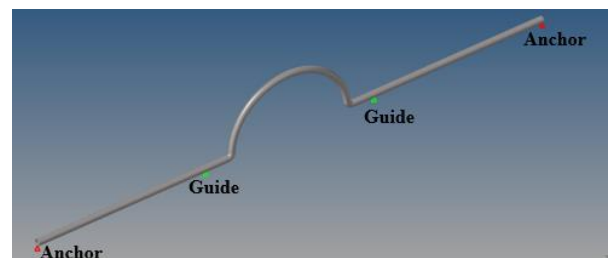
Gambar 2. *Expansion Loop* $W=H$



Gambar 3. *Expansion Loop* $W=0,5H$



Gambar 4. *Expansion Loop* $W=2H$



Gambar 5. *Expansion Loop* Setengah Lingkaran

2.5. Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* berbasis *Finite Element Analysis (FEA)*. *Finite Element Analysis* dikembangkan sebagai metode numerik untuk menganalisa tegangan. *Finite Element Analysis* sekarang telah diperluas sebagai metode umum untuk menyelesaikan permasalahan dalam masalah teknik dan ilmu fisika yang kompleks. Dalam metode *Finite Element Analysis*, semua kompleksitas masalah

seperti bentuk yang bervariasi, kondisi batas, dan beban dipertahankan sebagaimana adanya [13].

Proses simulasi *FEM* pada software dimulai dengan *import component's* dari geometri CAD. *Meshing* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *solid mesh* (3D). *Constrain* ditambahkan pada bagian *anchor* dengan derajat kebebasan (dof) 1 = 0, dof 2 = 0 dan dof 3 = 0. *Constrain* ditambahkan pada bagian *guide* dengan dof 2 = 0 dan dof 3 = 0. *Constrain* ditambahkan pada bagian tengah loop dengan dof 1 = 0. Beban yang digunakan dalam penelitian ini adalah beban perubahan *displacement* akibat adanya ekspansi yang terjadi pada pipa dan terbagi pada dua *anchor* yang berbeda dengan nilai setengah dari total ekspansi yang terjadi dan ditambahkan pada masing-masing *anchor*.

2.6. Alat dan Bahan Penelitian

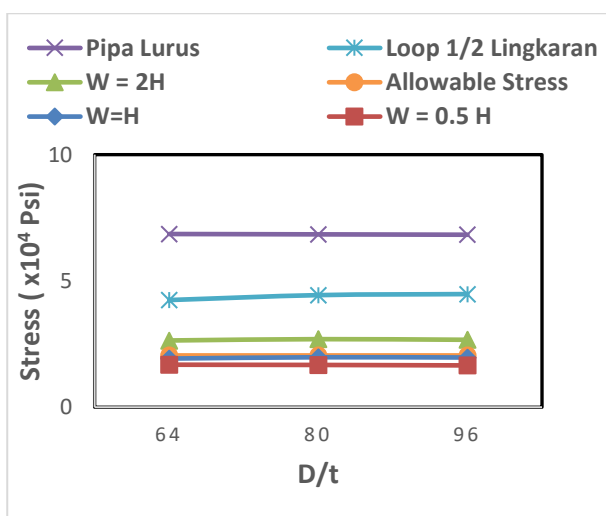
Penelitian ini dikerjakan dengan menggunakan laptop yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Processor : AMD A 12-9700P RADEON R7, 10 COMPUTE CORES 4C+6G (4CPUs), ~2.5GHz
2. RAM : 8 GB
3. Memory : 1 TB
4. VGA : AMD Radeon™ R7 Graphics

2.7. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Sistem Perpipaan dan Pemesinan Kapal Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 6. Stress pada Pipa Expansion Loops

Tegangan (*Stress*) yang terjadi pada pipa lurus akibat ekspansi pipa pada suhu 400 °F berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan software ditunjukkan pada Gambar 6. Tegangan yang terjadi pada pipa lurus mengalami penurunan setiap adanya kenaikan nilai D/t yang digunakan. Tegangan yang terjadi pada D/t 64 adalah 6.857×10^4 Psi, tegangan yang terjadi pada D/t 80 adalah 6.844×10^4 Psi dan tegangan yang terjadi pada D/t 96 adalah 6.829×10^4 Psi. Tegangan yang terjadi pada pipa lurus setiap variasi D/t melebihi nilai *allowable stress* pada pipa sehingga pipa lurus tidak dapat digunakan pada suhu kerja 400 °F.

Tegangan (*Stress*) yang terjadi pada *expansion loop* dengan nilai $W = H$ akibat ekspansi pipa pada suhu 400 °F berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan software ditunjukkan pada Gambar 6. Tegangan yang terjadi pada D/t 64 adalah 1.926×10^4 Psi, tegangan yang terjadi pada D/t 80 adalah 1.978×10^4 Psi dan tegangan yang terjadi pada D/t 96 adalah 1.968×10^4 Psi. Tegangan yang terjadi pada pipa *expansion loop* dengan nilai $W = H$ setiap variasi D/t lebih kecil jika dibandingkan dengan *allowable stress* pada pipa sehingga pipa *expansion loop* dengan nilai $W = H$ dapat digunakan pada suhu kerja 400 °F.

Tegangan (*Stress*) yang terjadi pada *expansion loop* $W = 0.5H$ akibat ekspansi pipa pada suhu 400 °F berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan software ditunjukkan pada Gambar 6. Tegangan yang terjadi pada D/t 64 adalah 1.683×10^4 Psi, tegangan yang terjadi pada D/t 80 adalah 1.670×10^4 Psi dan tegangan yang terjadi pada D/t 96 adalah 1.656×10^4 Psi. Tegangan yang terjadi pada pipa *expansion loop* $W = 0.5H$ setiap variasi D/t lebih kecil jika dibandingkan dengan *allowable stress* pada pipa sehingga pipa *expansion loop* $W = 0.5H$ dapat digunakan pada suhu kerja 400 °F.

Tegangan (*Stress*) yang terjadi pada *expansion loop* $W = 2H$ akibat ekspansi pipa pada suhu 400 °F berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan software ditunjukkan pada Gambar 6. Tegangan yang terjadi pada D/t 64 adalah 2.642×10^4 Psi, tegangan yang terjadi pada D/t 80 adalah 2.695×10^4 Psi dan tegangan yang terjadi pada D/t 96 adalah 2.670×10^4 Psi. Tegangan yang terjadi pada pipa *expansion loop* $W = 2H$ setiap variasi D/t melebihi *allowable stress* pada pipa sehingga pipa *expansion loop* $W = 2H$ tidak dapat digunakan pada suhu kerja 400 °F.

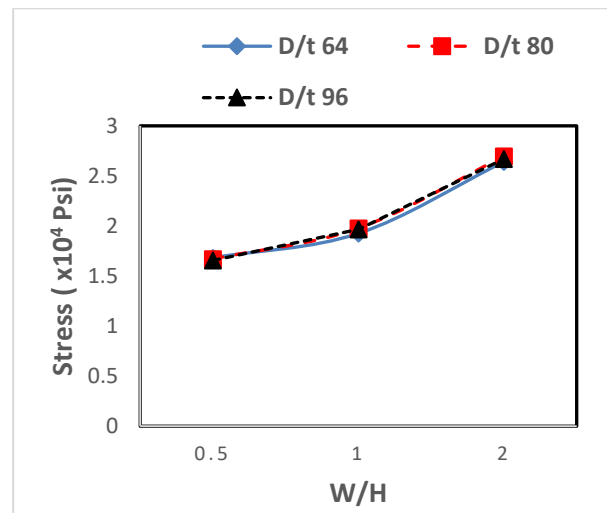
Tegangan (*Stress*) yang terjadi pada *expansion loop* setengah lingkaran akibat ekspansi pipa pada suhu 400 °F berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan software ditunjukkan pada Gambar 6. Tegangan yang terjadi pada D/t 64 adalah 4.243×10^4 Psi, tegangan yang terjadi pada D/t 80 adalah 4.438×10^4 Psi dan tegangan yang

terjadi pada D/t 96 adalah 4.479×10^4 Psi. Tegangan yang terjadi pada pipa *expansion loop* Setengah lingkaran setiap variasi D/t melebihi *allowable stress* pada pipa sehingga pipa *expansion loop* setengah lingkaran tidak dapat digunakan pada suhu kerja 400 °F.

Tegangan yang terjadi pada pipa lurus akibat adanya ekspansi termal pada pipa berdasarkan hasil analisa menggunakan *software* menunjukkan nilai tertinggi bila dibandingkan dengan pipa yang menggunakan *expansion loops* sehingga dapat dibuktikan bahwa *expansion loops* bisa digunakan untuk mengurangi tegangan yang terjadi pada pipa akibat adanya ekspansi termal pada pipa dengan temperatur kerja 400 °F. *Expansion loop* setengah lingkaran dan *expansion loop* $W = 2H$ dinilai kurang efektif dalam mengatasi adanya ekspansi termal pada pipa karena tegangan yang terjadi masih di atas *allowable stress* pipa seperti yang terlihat pada gambar 6.

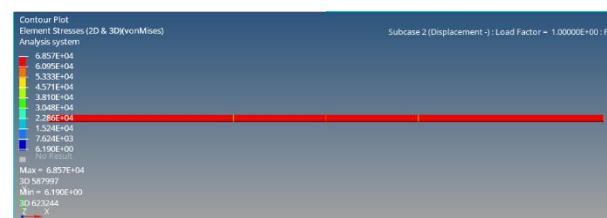
Bagian *pipe bend* pada *expansion loops* merupakan salah satu bentuk pipa melengkung. *Stress* yang terjadi pada pipa melengkung akan semakin besar apabila momen yang terjadi semakin besar dan semakin kecil apabila momen yang terjadi semakin kecil. Momen yang terjadi pada pipa melengkung dapat diperkecil dengan cara memperkecil nilai perbandingan antara radius kurvatur pipa melengkung dengan diameter pipa [14]. *Pipe bend* pada *expansion loops* di desain dengan menggunakan *short radius bend* sehingga nilai perbandingan antara radius kurvatur pada pipa melengkung sama dengan diameter pipa sehingga *stress* yang terjadi pada *expansion loops* $W = 0.5H$, $W = H$ dan $W = 2H$ menunjukkan hasil yang hampir sama pada D/t 64, 80 dan 96.

Stress yang terjadi pada *expansion loop* setengah lingkaran berdasarkan gambar 6 menunjukkan kenaikan pada setiap kenaikan nilai D/t pipa. Pipa pada *expansion loop* setengah lingkaran dilengkungkan menjadi bentuk *pipe bend* dengan menggunakan nilai radius bending sama dengan diameter pipa dan dilengkungkan lagi untuk pembuatan *loop* dengan radius *loop* 12 feet untuk D/t 64, 14 feet untuk D/t 80 dan 16 feet untuk D/t 96 sehingga sudut *bend* yang awalnya bernilai 90° pada bagian *pipe bend* akan mengalami penurunan. Sudut *pipe bend* akan semakin kecil apabila diameter pipa akan semakin besar. *Stress* yang terjadi pada *pipe bend* akan semakin besar apabila penurunan sudut pada *pipe bend* terjadi semakin besar [6].

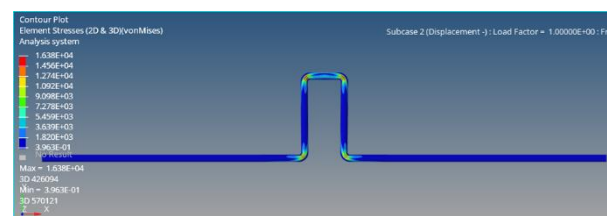


Gambar 7. Hubungan antara *Stress* pada Pipa dan W/H untuk *Expansion Loop* Bentuk U

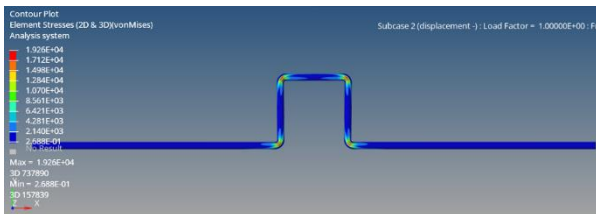
Gambar 7 menunjukkan hubungan antara perbandingan nilai W/H pada *expansion loops* dengan *stress* yang terjadi pada *expansion loops* akibat adanya ekspansi termal dengan temperatur kerja 400 °F pada D/t 64, 80 dan 96. *Stress* yang terjadi pada *expansion loops* pada D/t 64, 80 dan 96 akan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya nilai W/H pada *expansion loops*. Nilai W/H pada *expansion loop* sangat berpengaruh dalam meningkatkan fleksibilitas pipa *expansion loops* sehingga semakin besar nilai H dan semakin kecil nilai W pada *expansion loops* maka *stress* yang terjadi akan semakin kecil.



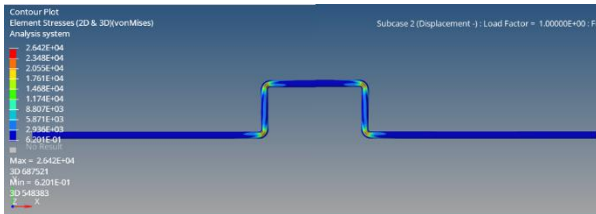
Gambar 8. *Stress* pada Pipa Lurus D/t 64



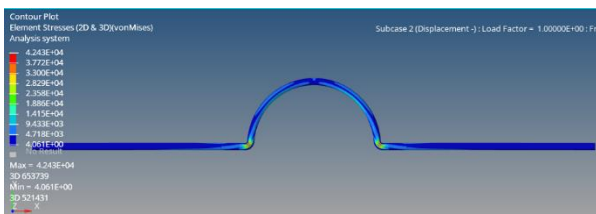
Gambar 9. *Stress* pada *Expansion Loops* $W = 0.5H$ D/t 64



Gambar 10. *Stress* pada *Expansion Loops* $W = H$
 D/t 64



Gambar 11. *Stress* pada *Expansion Loops* $W = 2H$
 D/t 64



Gambar 12. *Stress* pada *Expansion Loops*
Setengah Lingkaran D/t 64

Gambar 8 menunjukkan bahwa *stress* yang terjadi pada pipa lurus tersebar pada semua bagian pipa karena pipa tidak memiliki sistem fleksibilitas yang baik sehingga semua bagian pipa akan mengalami perubahan *displacement* yang terjadi akibat adanya ekspansi termal pada pipa. Gambar 9 menunjukkan bahwa *stress* maksimal yang terjadi pada *Expansion loop* $W = 0.5H$ terjadi pada empat bagian *pipe bend*. Gambar 10 menunjukkan bahwa *stress* maksimal yang terjadi pada *Expansion loop* $W = H$ terjadi pada empat bagian *pipe bend*. Gambar 11 menunjukkan bahwa *stress* maksimal yang terjadi pada *Expansion loop* $W = 2H$ terjadi pada empat bagian *pipe bend*. Gambar 12 menunjukkan bahwa *stress* maksimal yang terjadi pada *Expansion loop* bentuk setengah lingkaran terjadi pada dua bagian *pipe bend*.

4. KESIMPULAN

Stress yang terjadi pada pipa lurus, *expansion loop* setengah lingkaran dan *expansion loop* $W = 2H$ melebihi nilai *allowable stress* pada pipa sehingga model ini tidak bisa digunakan untuk mengatasi adanya ekspansi pada pipa akibat temperatur kerja 400 °F. *Stress* yang terjadi pada pipa lurus, *expansion loop* $W = H$ dan *expansion loop* $W = 0.5H$ lebih kecil dari nilai *allowable stress* pada pipa sehingga model ini bisa digunakan

untuk mengatasi adanya ekspansi pipa pada temperatur kerja 400 °F. *Stress* pada pipa akan semakin kecil jika nilai W/H semakin kecil. *Expansion loop* yang menunjukkan hasil *stress* paling rendah pada penelitian dalam mengatasi adanya ekspansi pipa pada temperatur kerja 400 °F adalah *expansion loop* $W = 0.5H$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada Allah SWT, dosen pembimbing 1, dosen pembimbing 2, orang tua dan semua pihak yang turut membantu dalam proses penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Department of Training and Workforce Development, *Pipe Fabrication: Materials, Drawing and Fabrication Methods*, vol. 1965. Western Australia: Departemen of Training and Workforce Development, 2006.
- [2] J. Wiley, *Design of Piping System*, 2nd ed. United States of America: The M. W. Kellogg Company, 1956.
- [3] H. Yudo, W. Amiruddin, and S. J. Sisworo, "The Effect of Geometric on Buckling Strength of Rectangular Hollow Pipe Under Pure Bending," *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 11, pp. 228–235, 2017.
- [4] American Society of Mechanical Engineers, *ASME B31.3 Process Piping-ASME Code for Pressure Piping*, United States of America: American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [5] S. Kannappan, *Introduction to Pipe Stress Analysis*, Canada: John Wiley & Sons, 1986.
- [6] D. Abdulhameed, M. Martens, J. R. Cheng, and S. Adeb, "Investigation of Smooth Pipe Bends Under the Effect of In-Plane Bending," *Proc. ASME 2017 Press. Vessel. Pip. Conf* no. 1, pp. 1–8, 2017.
- [7] B. Lazuardi, G. E. Kusuma, and N. A. Novitrie, "Desain Insulasi dan Expansion loop pada Penggantian Jalur Pipa Transfer Ammonia (NH₃) Diameter 8 inch (Studi Kasus di PT. Petrokimia Gresik)," *Proc. Conf. Pip. Eng. Its Appl.*, p. 10, 2017.
- [8] K. S. S. Sankar and S. S. Kumaran, "Optimization of Piping Expansion Loop in Process Plant," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 49, pp. 574-578, 2015.
- [9] B. Shehadeh, S. I. Ranganathan, and F. H. Abed, "Optimization of Piping Expansion Loops Using ASME B31.3," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 230,

no. 1, pp. 56-64, 2016,
DOI:10.1177/0954408914532808.

- [10] Henan Province Sitong Boiler Co., "Products High Efficiency, Energy Saving, Enviromental Protection, Spesific Desain Individually," 2014. <http://www.sitong-boiler.com/product/electric-boiler/ldr-vertical-electric-boiler.html#>. (accessed Aug. 29, 2019).
- [11] P. Smith, *Piping Materials Guide*, vol. 111, no. 479. United States of America: Elsevier Inc, 2005.
- [12] American Society of Mechanical Engineers, *ASME B31.1 Power Piping-ASME Code for Pressure Piping*, United States of America: American Society of Mechanical Engineers, 2014.
- [13] S. S. Bhavikatti, *Finite Element Analysis*, New Delhi: New Age International Publishers, 2003.
- [14] H. Yudo and T. Yoshikawa, "Buckling Phenomenon for Straight and Curved pipe Under Pure Bending," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 1, pp. 94–103, 2015, DOI: 10.1007/s00773-014-0254-5.