

Kajian Efek Konfigurasi Geometri Vertical Expansion Loop Terhadap Nilai Tegangan Di Hot Brine Geothermal Power Plant

Mohamad Bayu Wicaksono^{1*}, Burniadi Moballa², Pekik Marhadhika³

Program Studi D4 Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia^{1*2*3}

Email: mohamad.bayu@ppns.ac.id; bmoballa@ppns.ac.id; pekikmahardhika@ppns.ac.id;

Abstract - The Geothermal FCRS and Power Plant projects focus on distributing steam and brine fluids resulting from geothermal separation processes. There is a potential for flashing in the brine fluid distribution within the vertical expansion loop area, which requires detailed evaluation of stress and displacement values due to its categorization as a critical line. This study employs computational fluid dynamics (CFD) to simulate fluid flow, based on various height and width configurations of the loop geometry, to assess the potential for flashing. The fluid simulation results are then used to compare the stress analysis of different loop geometries. The results indicate that flashing occurs in geometry 2 with a height of 9 meters. Furthermore, the stress analysis shows that the stress value in geometry 1 is below the allowable stress limit, effectively reducing displacement values caused by thermal expansion loads.

Keyword: Flashing, Vertical Expansion Loop, Critical Line

Nomenclature

W_{pipe}	Berat pipa (lb/ft)
W_{fluid}	Berat fluida (lb/ft)
W_{insul}	Berat insulasi (lb/ft)
W	Berat total (lb/ft)
ID	Inside diameter (in)
OD	Outside diameter (in)
ρ_{pipa}	massa jenis pipa (lb/in ³)
ρ_{fluida}	massa jenis fluida (lb/in ³)
ρ_{insul}	massa jenis insulasi (lb/in ³)
L_S	Limitation of stress (ft)
L_D	Limitation of deflection (ft)
Sh	Allowable stress at maximum temperature (lb/in ²)
S_C	Basic allowable stress at minimum temperature (lb/in ²)
Z	Section modulus (in ³)
Δ	Allowable deflection (in)
I	momen inersia (in ⁴)
P	pressure (lb/in ²)
A_i	Internal area of pipe (in ²)
A_m	Cross section area of pipe (in ²)
i_i	Inplane stress intensification factor
i_o	Outside stress intensification factor
M_i	Inplane bending moment (lb.in)
M_o	Outplane bending moment (lb.in)
S_L	Tegangan sustained load (lb/in ²)
S_E	Tegangan expansion load (lb/in ²)
S_O	Tegangan occasional load (lb/in ²)
S_A	Allowable displacement stress range (lb/in ²)

f Stress range reduction factor

1. PENDAHULUAN

Geothermal FCRS (Fluid Collecting and Reinjection System) dan Power Plant merupakan sistem perpipaan yang bertujuan untuk menyalurkan fluida steam hasil seprasi untuk digunakan memutar turbin pada area power plant, dan fluida brine menuju area reinjection system. Sistem perpipaan dalam semua sistem merupakan sistem perpipaan above ground dengan perbedaan elevasi tanah yang signifikan serta kondisi tekanan dan temperatur fluida yang beroperasi tinggi. Temperatur fluida yang beroperasi, dapat menyebabkan terjadinya stress pada pipa akibat adanya beban thermal yang menyebabkan pemuaiian pada pipa[1]. Tegangan yang terjadi akibat thermal expansion sering kali menimbulkan kegagalan akibat over stress. Penambahan expansion loop menjadi solusi alternatif yang dapat diaplikasikan untuk mengurangi over stress dan displacement yang diakibatkan akibat beban thermal [1]. Ketersediaan lahan dan kondisi lapangan yang kurang memungkinkan menjadi poin penting yang harus dipertimbangkan dalam penentuan jenis dan geometri expansion loop. Penambahan jenis horizontal expansion loop memerlukan ketersediaan lahan yang luas sedangkan penambahan jenis vertical expansion loop dapat meningkatkan pressure drop dalam fluida dan

dapat diaplikasikan pada area yang kurang memadai.

Penambahan *vertical expansion loop* menjadi permasalahan krusial yang harus diperhatikan dan perlu adanya pertimbangan secara mendalam untuk menentukan geometri *vertical expansion loop* untuk menghindari potensi terjadinya kegagalan. Pada penelitian ini dilakukan kajian efek konfigurasi geometri *vertical expansion loop* berdasarkan nilai *maximum allowable stress* pada pipa yang dapat diaplikasikan untuk mengurangi tegangan yang terjadi serta dapat mengantisipasi potensi terjadinya kegagalan.

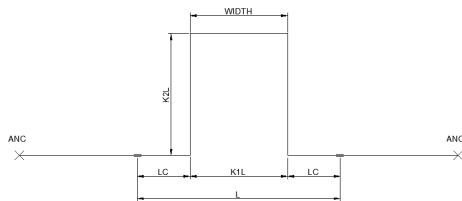
2. METODOLOGI .

2.1 Alur Penelitian

Dalam jurnal ini penulis melakukan kajian konfigurasi geometri *vertical expansion loop* terhadap nilai *maximum allowable stress*. Analisis tegangan pipa dilakukan mengacu pada perhitungan nilai minimum geometri *vertical expansion loop* dan *maximum allowable stress*. Analisis dilakukan dengan menggunakan *software pipe stress analysis* yang mengacu pada ASME B31.1 dengan pembebanan yang digunakan yaitu *thermal expansion load* [2].

2.2 Perhitungan Minimum Geometri Vertical Expansion Loop

Penentuan dimensi expansion loop dilakukan dengan metode MW. Kellog [1][3]. Berdasarkan Gambar 2.1 diketahui dengan beberapa variabel, yaitu L_c , $K1L$, $K2L$, dan L . Perhitungan dimulai dengan mengasumsikan nilai $K1L$ dan L_C pada Persamaan 2.1.



Gambar 2.1 Dimension Loop Calculation

$$L = K1L + 2L_C \tag{2.1}$$

Setelah selesai menentukan asumsi panjang,

dilanjutkan dengan menghitung $K1$ dan $\frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D}$.

Keterangan:

$K1L$: Lebar loop (ft)

$K2L$: Tinggi loop (ft)

L_C : Jarak antara *guide support* dengan loop(ft)

L : Jarak antara *guide support*(ft)

D : *Outside diameter* (in)

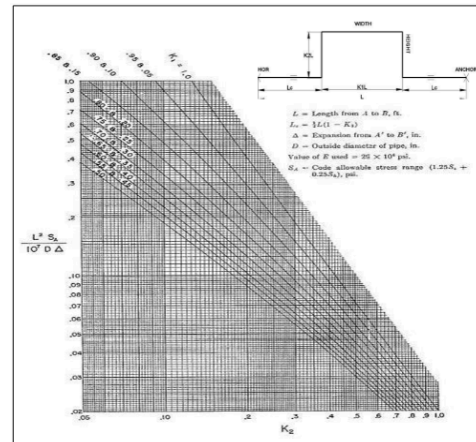
ΔL : *Thermal expansion* (ft)

S_A : *Maximum allowable material stress* (psi)

Setelah selesai menentukan nilai $K1$ dan $\frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D}$,

dilanjutkan dengan memasukkan nilai tersebut

kedalam grafik $K2 - \frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D}$ pada Gambar 2.2 untuk menentukan nilai $K2$.



Gambar 2.2 Grafik $K2 - \frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D}$

2.3 Maximum Allowable Pipe Span

Pipe span berfungsi untuk mencegah defleksi pada pipa *supporting* yang baik perlu mempertimbangkan jarak antar tumpuan atau *pipe span*. Dalam menentukan *span*, formulasi dan persamaan yang digunakan tergantung terhadap titik akhir jalur pipa. Berikut merupakan rumus yang digunakan dalam menentukan *allowable pipe span* berdasarkan *limitation of deflection* dan *limitation of stress* dapat dilihat pada persamaan 2.2 sampai 2.7 [4][5].

$$W_{pipe} = \frac{\pi(OD^2 - ID^2) \times \rho \times pipe}{4} \tag{2.2}$$

$$W_{fluid} = \frac{\pi(ID^2) \times \rho \times fluida}{4} \tag{2.3}$$

$$W_{ins} = \frac{\pi(D_{ins}^2 - ID^2) \times \rho \times insulation}{4} \tag{2.4}$$

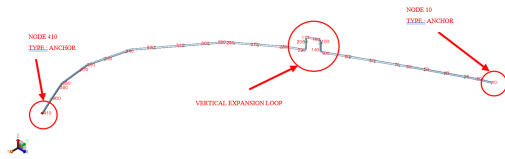
$$W_{total} = W_{pipe} + W_{fluid} + W_{ins} \tag{2.5}$$

$$L = \sqrt{\frac{0,4zS_h}{w}} \text{ limitation of stress} \tag{2.6}$$

$$L = \sqrt{\frac{\Delta EI}{13,5w}} \text{ limitation of deflection} \tag{2.7}$$

2.4 Pemodelan dan Penentuan Load Case Menggunakan Software Stress Analysis

Pemodelan dilakukan dengan memasukkan data koordinat dan elevasi pipa berdasarkan data *allignment sheet drawing*, serta memasukkan nilai NPS pipa, tebal pipa, temperature fluida, tekanan fluida, *density* fluida, jenis dan tebal insulasi, material pipa, dan jenis pembebanan pada pipa serta parameter lainnya. Pemodelan dan *load case* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan Tabel 2.1.



Gambar 2.3 Model Jalur Perpipaan

2.5 Analisis Data

Setelah permodelan, kemudian dilakukan analisis dengan membandingkan nilai tegangan yang terjadi akibat beban *sustain*, *thermal expansion* dan *occasional* dengan *Allowable stress* berdasarkan ASME B31.1 dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 sampai 2.10. [2]. Analisis dilakukan berdasarkan *loadcase* yang digunakan pada *software Caesar II* dapat dilihat pada Table 2.1.

$$S_L = \sqrt{\left[I_a \left| \frac{P D_o}{4 t_n} + \frac{F_b}{A_p} \right| + \frac{\sqrt{(i_o M_{iA})^2 + (i_o M_{oA})^2}}{z} \right]^2} + \left(\dots \right) \tag{2.8}$$

$$S_E = \sqrt{\left[\left| \frac{i_a F_c}{A_p} \right| + \frac{\sqrt{(i_o M_{ic})^2 + (i_o M_{oc})^2}}{z} \right]^2} + \left(\frac{i_o M_{ic}}{z} \right)^2 \leq \tag{2.9}$$

$$S_O = \sqrt{\left[I_a \left| \frac{P_o D_o}{4 t_n} + \frac{F_b}{A_p} \right| + \frac{\sqrt{(i_o M_{iB})^2 + (i_o M_{oB})^2}}{z} \right]^2} + \left(\dots \right) \tag{2.10}$$

Keterangan:

S_L : stresses due to pressure, weight, and other sustained loads.

S_E : Stresses due to thermal expansion

S_O : Stresses due to pressure, weight, sustained loads, and occasional loads.

Tabel 2.1: Load Case Combination

No.	Load Combination	Description
1	(SUS) W+P1	Sustained Load Case
2	(EXP) L8=L2-L7	Expansion Load Case
3	(OCC) L9=L3-L2	Occasional Load Case 1
4	(OCC)L10=L4-L2	Occasional Load Case 2
5	(OCC)L11=L5-L2	Occasional Load Case 3
6	(OCC)L12=L6-L2	Occasional Load Case 4

3.HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan Allowable Pipe Span

Perhitungan di bawah ini merupakan perhitungan manual untuk menentukan nilai *allowable pipe span* pada jalur perpipaan *hot brine line*. Perhitungan ini mengacu pada *standard ASME B31.1(2022)*. Berikut merupakan data yang dibutuhkan untuk

menghitung *allowable pipe span* meliputi perhitungan berat total pipa, perhitungan maksimum jarak yang diizinkan antara penyangga pipa, dan perhitungan maksimum tegangan tekuk dan defleksi. Perhitungan berat total pada pipa yang terdiri dari berat pipa, berat fluida dan berat insulasi. Berikut merupakan langkah perhitungan berat total pipa.

a. Berat pipa kosong

$$w_p = \frac{1}{4} \times \pi \times (26^2 - 24,5^2) \times 0,284 \times 12 = 202,755 \frac{lb}{ft}$$

b. Berat fluida dalam pipa

$$w_f = \frac{1}{4} \times \pi \times (26^2) \times 0,0322 \times 12 = 182,163 \frac{lb}{ft}$$

c. Berat insulasi

$$w_{ins} = \frac{1}{4} \times \pi \times (29,937^2 - 26^2) \times 0,00664 \times 12 = 13,782 \frac{lb}{ft}$$

d. Berat total

$$w_{total} = 202,755 + 182,163 + 13,782 = 399,792 \frac{lb}{ft}$$

Setelah mengetahui berat total pipa, langkah selanjutnya yaitu menghitung *allowable pipe span*. Berikut merupakan data yang dibutuhkan untuk menghitung *allowable pipe span* dapat dilihat pada Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Data Perhitungan Allowable Pipe Span

DATA PERHITUNGAN ALLOWABLE PIPE SPAN				
Fluida		Brine		
No	Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
1	Berat Total Pipa	w	399,792	lb/ft
2	Moment of Inertia	I	4745,569	in ⁴
3	Modulus of Section	Z	365,044	in ³
4	Allowable Stress	S _i	15400	psi
5	Allowable Deflection	Δ	0,625	in
6	Modulus of Elasticity	E	28300000	psi

Berikut merupakan perhitungan *allowable pipe span*.

1. Based on limitation of stress

$$L = \sqrt{\frac{0,4 \times 365,044 \times 15400}{399,792}} = 74,997 \text{ ft} = 22,859 \text{ m}$$

2. Based on limitation of deflection

$$L = \sqrt[4]{\frac{0,625 \times 28300000 \times 4745,569}{13,5 \times 399,792}} = 62,798 \text{ ft} = 19,141 \text{ m}$$

Berdasarkan perhitungan manual di atas, diketahui nilai perhitungan *maximum allowable pipe span* dipengaruhi oleh *limitation of stress* dan *limitation of deflection*. Dari kedua perhitungan tersebut dibandingkan dengan nilai terkecil yang diambil untuk dijadikan acuan sebagai *maximum allowable pipe span*, sehingga

nilai acuan *maximum allowable pipe span* yang digunakan yaitu sebesar 62,798 ft atau 19,141 meter.

3.2 Minimum Dimensi Expansion Loop

Berdasarkan kondisi desain awal ukuran *expansion loop* memiliki lebar 6 meter dengan jarak antar sisi *loop* dengan *guide support* adalah 2 meter dan jarak minimal antar *guide support* adalah 10 meter dan jarak ini masih masuk dalam kategori nilai *maximum allowable pipe span*, serta jarak antar *support anchor* adalah 590 ft atau 180 meter maka dimensi *expansin loop* dapat dihitung sebagai berikut:

$$K1L = 6\text{ m}$$

$$K1L = 19,685\text{ ft}$$

$$L = 10\text{ m}$$

$$L = 32,808\text{ ft}$$

$$L_C = 2\text{ m}$$

$$L_C = 6,562\text{ m}$$

Dari data di atas dapat dicari nilai K1 sebagai berikut.

$$K1 = \frac{L - 2L_C}{L}$$

$$K1 = \frac{32,808 - 2 \times 6,562}{32,808}$$

$$K1 = 0,6$$

Setelah mendapatkan nilai K1, dilanjutkan mencari nilai $\frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D}$ sebagai berikut.

$$\Delta = 0,000007 \frac{\text{in}}{\text{in.F}} \times 590\text{ ft} (338\text{ F} - 70\text{ F})$$

$$\Delta = 13,28208\text{ in}$$

$$S_A = 1(1,25 \times 15400\text{ psi} + 0,25 \times 15400\text{ psi})$$

$$S_A = 23100\text{ psi}$$

$$\frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D} = \frac{32,808^2 \times 23100}{10^7 \times 13,28208 \times 26}$$

$$\frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D} = 0,0072$$

Setelah nilai K1 dan $\frac{L^2 S_A}{10^7 \Delta D}$ diketahui,

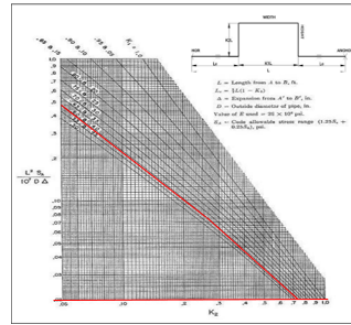
selanjutnya nilai tersebut dimasukkan kedalam grafik untuk mencari nilai K2, ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan diperoleh nilai K2 adalah 0,74, sehingga nilai K2L dapat dicari sebagai berikut:

$$K2L = 0,74 \times 32,808\text{ ft}$$

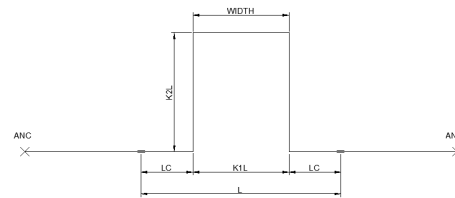
$$K2L = 24,28\text{ ft}$$

$$K2L = 7,4\text{ m}$$

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa dimensi minimum *expansion loop* yang digunakan berdasarkan metode M.W. Kellogg ditunjukkan seperti pada Gambar 3.2



Gambar 3.1 Tabel K2



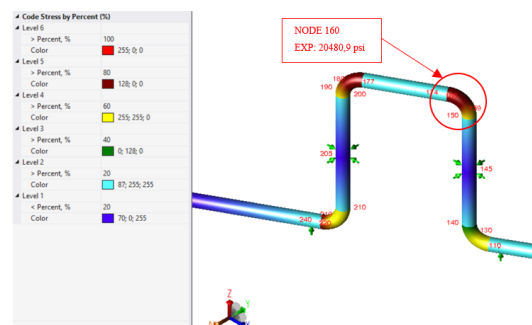
Tabel 3.2 Dimensi Vertical Expansion Loop

3.3 Nilai Stress pada masing-masing geometri

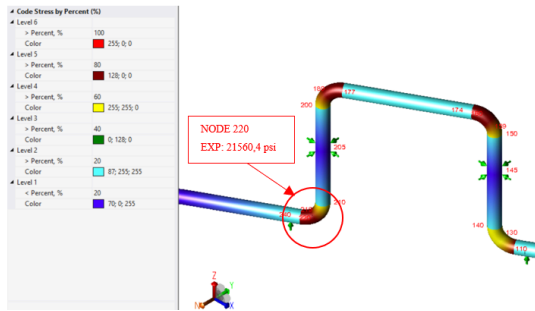
Perbandingan nilai tegangan dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan tertinggi dan terendah dari masing-masing geometri, seperti yang terlihat pada Tabel 3.2. Tegangan tertinggi pada pembebanan *thermal expansion* yang terdapat pada batasan *code* PE10 sampai dengan *code* PE14 diantara model geometri 1, geometri 3 dan geometri 4 terletak pada *code* EL4 dari geometri 4 pada *node* 220 dengan nilai tegangan 21687,4 psi, sedangkan nilai tegangan terendah pada masing-masing geometri tersebut terletak pada *code* EL2 dari geometri 1 pada *node* 160 dengan nilai tegangan 20480,9 psi.

Tabel 3.2 Hasil Simulasi Akibat Beban Thermal

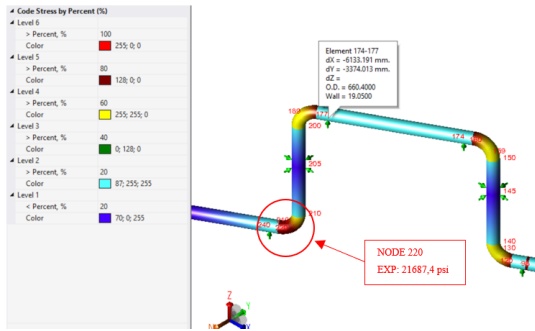
Code Component	Node		Code Stress Geo. 1 (lb/in ²)	Code Stress Geo. 3 (lb/in ²)	Code Stress Geo. 4 (lb/in ²)	Allowable Stress (lb/in ²)
	From	To				
PE10	110	120	7673,3	8274,9	8347,8	23100
EL1	120	130	16979,6	18153,2	18418,3	23100
PE11	130	150	6539,7	6343,6	5968,3	23100
EL2	150	160	20480,9	20969,5	19812,8	23100
PE12	160	180	8563	8756,2	8218,6	23100
EL3	180	190	19151,4	19324,3	18106,4	23100
PE13	190	210	6556,9	6589,4	6721,3	23100
EL4	210	220	19610,1	21560,4	21687,4	23100
PE14	220	240	8172,9	8987,8	9031,3	23100



Gambar 3.3 Thermal Load Case Stress Point Geometri 1



Gambar 3.3 Thermal Load Case Stress Point Geometri 3



Gambar 3.3 Thermal Load Case Stress Point Geometri 4

[4] Mahardhika, P. (2017). Penentuan Allowable Span Antar Penyangga Pipa SLF Berdasarkan Tegangan, Defleksi, Frekuensi Alami. *Jurnal Iptek*, 21(2), 27–34. <https://doi.org/10.31284/j.iptek.2017.v21i2.149>

[5] Kannapan, S. 1986. *Introduction to Pipe Stress Analysis*. Canada: John Wiley & Sons Inc

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir “Kajian Efek Konfigurasi *Vertical Expansion Loop* Terhadap *Flashing* di *Hot Brine Line Geothermal Lumut Balai-Margabanyur*” yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan yang ditunjukkan sebagai berikut:

1. Hasil analisis tegangan pada konfigurasi geometri *vertical expansion loop* juga memiliki nilai tegangan yang masih di bawah nilai tegangan yang diizinkan ASME B31.1, dengan geometri 1 yang paling besar dalam mengurangi tegangan akibat beban *thermal*.
2. Semakin tinggi *vertical expansion loop*, semakin rendah nilai tegangan yang terjadi pada pipa akibat beban *thermal*.
3. Semakin lebar *vertical expansion loop*, semakin rendah nilai tegangan yang terjadi pada pipa akibat beban *thermal*.

5. PUSTAKA

[1] Hasan, M., Santoso, E., Mahardhika, P. (2017). *Desain Expansion Loop Pada Line 116sv203-150-16h20 Faty Acid Destilation PT. Wilmar Nabati Indonesia*. Proceedings Conference on Piping Engineering and its Application. Surabaya: Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, 31–36.

[2] ASME. 2022. *ASME B31.1 Power Piping*. New York: ASME.

[3] Kellogg, M.W. 1956. *Design of Piping Systems Second Edition*. New York: John Wiley & Sons Inc.