

Analisis Tegangan dan Fleksibilitas pada *Horizontal Expansion Loop* No.6 Pipa Existing Jalur Cluster-I sampai Junction-B

Fathor Rasyid^{1*}, Pekik Mahardhika², Tarikh Azis Ramadani³

PT.Depriwangga Engineering, Jakarta, Indonesia¹

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

Email: fathorrysyid29@student.ppns.ac.id^{1}; pekikmahardhika@ppns.ac.id²; tarikh@ppns.ac.id³ ;*

Abstract – *The Debottlenecking project in Ulubelu was built to expanse the amount of production quantity by transmitting steam from outlet separator that connected to piping system of well head. There is a line designed with some expansion loop to maintain overstress due to occasional and thermal load. The 32” diameter Cluster-I to Junction-B line that operate with 194.7 °C of temperature with 12.86 bar of pressure was connected from piping system of well head at Cluster-I to branch of pipe at Junction-B. The temperature and pressure categorized as critical line, therefore a stress and flexibilty analysis needed to evaluate the piping system. Stress and flexibility calculation were carried out for expansion loop placed at intersection between sloping and flat ground of pipeline for sustained, occasional and thermal expansion load based on ASME B31.1 code as calculation reference using manual method and pipe stress analysis software. Based on the manual calculation and result of pipe stress analysis software, the stress value of sustained load is 41.44 % under the allowable stress value while the stress value of occasional load 3 with 249.22 % ratio, occasional load 24 with 248.7% ratio and thermal expansion load with 105.7% ratio that exceeding the allowable stress value.*

Keyword: *Debottlenecking, expansion loop, stress analysis, flexibility*

Nomenclature

Δ	Allowable deflection (in)
OD	Outside Diameter (in)
ID	Inside Diameter (in)
Ls	Pipe span limitation of stress (ft)
Ld	Pipe span limitation of deflection (ft)
Z	Section Modulus (in ³)
Sh	Allowable tensile stress (psi)
Sb	Allowable bending stress (psi)
St	Allowable torsion stress (psi)
W	Berat total (lb/ft)
W_{pipe}	Berat total pipa (lb/ft)
W_{fluid}	Berat total fluida (lb/ft)
E	Modulus elastisitas (psi)
I	Momen Inersia (in ⁴)
L	Panjang total pipa (ft)
L_L	Length of Loop (ft)

1. PENDAHULUAN

Sebuah perusahaan yang bergerak di bidang pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) yang berlokasi di, Lampung, memiliki sistem perpipaan yang berfungsi mengalirkan uap dari sumur untuk kebutuhan memutar turbin dari beberapa unit pembangkit plant. Dalam proses tersebut terdapat *pipeline* dari *Cluster-I* menuju *Junction-B* terbentang lurus sepanjang 1250 meter dengan diameter 32 inch yang terletak di atas tanah yang ditopang oleh penyangga *vertical* yang menyalurkan fluida *steam* bersuhu 194,7°C dari *outlet steam separator* menuju ke *header* di Percabangan pipa *Junction-B*.

Berdasarkan diameter dan suhu, jalur pipa ini dapat dikategorikan sebagai jalur kritis [8] yang tentunya perlu dilakukan analisa tegangan lebih lanjut mengenai perhitungan maksimum tegangan Tekuk dan Defleksi [2]. Untuk melakukan perhitungan berat total pipa yaitu pertama menghitung berat pipa, berat fluida dan berat insulasi. Langkah selanjutnya yaitu melakukan perhitungan maksimum jarak antar *support* yang diijinkan berdasarkan batas defleksi dan batas tegangan. Nilai *pipe span* diambil dari nilai terkecil dari perhitungan tersebut yang dibandingkan dengan nilai yang disarankan standart ASME B31.1. Menurut [3] perhitungan fleksibilitas berfungsi untuk memastikan apakah tegangan, gaya dan defleksi statik akibat beban tekanan dan berat dalam keadaan aman.

Beberapa kajian terkait perhitungan fleksibilitas cukup banyak dilakukan. [3] melakukan penelitian tentang perhitungan fleksibilitas menggunakan metode *simplified flex analysis* yang menunjukkan jalur pipa untuk mengetahui sistem tersebut fleksibel atau tidak. Menurut [4] analisis tegangan yaitu kegiatan untuk memperoleh perilaku sistem perpipaan. [5] melakukan analisis tegangan sistem perpipaan *existing* dan re-desain *expansion loop* baru dengan 3 variasi desain yakni *horizontal*, *vertical* dan *threedimension loop*. Analisis tegangan meliputi *sustained*, *occasional* dan *thermal expansion load* serta analisis pemilihan jenis *expansion loop* berdasarkan nilai tegangan paling rendah.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan

allowable pipe span, perhitungan fleksibilitas dan analisis tegangan pada existing expansion loop no. 6 jalur cluster-I menuju junction-B berdasarkan kondisi pembebanan sustain, okasional dan ekspansi thermal dengan acuan [5] dan [6] Analisis dilakukan menggunakan software analisis tegangan untuk dapat mengetahui tegangan yang terjadi dalam sistem.

2. METODOLOGI

2.1 Maximum Allowable Pipe Span

Perhitungan Maximum Allowable Pipe Span dilakukan untuk mengetahui jarak maksimal yang diperbolehkan antar support. Pada perhitungan ini semua variabel menggunakan satuan imperial.

$$W_{\text{pipe}} = \frac{\pi (OD^2 - ID^2) \times \rho \text{ pipe}}{4} \quad (1)$$

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

$$W_{\text{insulation}} = \frac{\pi \times (D_{\text{ins}}^2 - ID^2) \rho \text{ insulation}}{4} \quad (3)$$

$$W_{\text{total}} = W_{\text{pipe}} + W_{\text{fluid}} + W_{\text{insulation}} \quad (4)$$

$$W_{\text{fluid}} = \frac{W_{\text{total}}}{W_{\text{pipe}}} \quad (5)$$

Kondisi limitation of stress dan limitation of deflection berdasarkan berat pipa, fluida, dan insulasi dapat dihitung dengan rumus dari [8] yaitu:

- Based on limitation of stress

$$L = \sqrt{\frac{0,33 \times Z \times S_h}{W}} \quad (6)$$

- Based on limitation of deflection

$$L = \sqrt[4]{\frac{\Delta EI}{22,5 w}} \quad (7)$$

2.2 Fleksibilitas Pipa

Analisis fleksibilitas pipa ini akan dilakukan pada expansion loop #6 jalur cluster-I menuju junction-B. Nilai fleksibilitas pipa dapat dicari dengan menggunakan rumus Persamaan (8) untuk mencari beberapa variabel yang terdapat pada persamaan tersebut maka dapat mengikuti langkah- langkah di bawah ini dengan mengacu pada [6].

$$\frac{D_y}{(L-U)^2} \leq 30 \frac{SA}{Ec} \quad (8)$$

2.3 Tegangan Pada Pipa

Tegangan yang terjadi pada sistim perpipaan dapat dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu tegangan normal (normal stress) dan tegangan geser (shear stress). Tegangan normal meliputi tegangan longitudinal, tegangantangensial dan tegangan radial.

Berikut adalah penjelasan dan rumus untuk mendapatkan masing-masing nilai tegangan longitudinal.

- Tegangan Aksial

$$- Fax = P \times Ai \quad (9)$$

$$- Ai = \frac{\pi \cdot (ID^2)}{4} \quad (10)$$

$$- Am = \frac{\pi \cdot (OD^2 - (ID^2))}{4} \quad (11)$$

$$- \sigma_{ax} = \frac{Fax}{Am} \quad (12)$$

- Tegangan Longitudinal Tekan

$$\sigma_{lp} = \frac{P.O.D}{4.t} \quad (13)$$

- Tegangan Torsi

$$SL = \frac{Fax}{Am} + \frac{Mc}{I} + \frac{POD}{4t} \quad (14)$$

- Tegangan Tangensial (Hoop Stress)

$$\sigma_{SH} = \frac{P \text{ di } L}{2 Lt} = \frac{P \text{ di}}{2l} = \frac{P \text{ do}}{2t} \quad (15)$$

- Tegangan yang arahnya sama dengan sumbu radial (tegangan radial).

$$- rm = \frac{ro+ri}{2} \quad (16)$$

$$- \sigma R = \frac{P(ri^2 + \frac{ri^2 + ro^2}{rm^2})}{2} \quad (17)$$

2.4 Tegangan Ijin

Persamaan penentuan nilai aktual terhadap batasan yang diijinkan pada setiap pembebanan tersebut dijelaskan sebagai berikut [6].

2.4.1 Tegangan Ijin Akibat Sustained Load

Jumlah dari tegangan longitudinal (SL) yang disebabkan oleh tekanan, berat pipa dan semua komponen dalam sistem perpipaan. yang tidak boleh lebih dari tegangan ijin pada (Sh). Dimana Sh diperoleh dari [6]. Nilai tegangan izin untuk kondisi akibat pembebanan sustain ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$SL = \sqrt{\left[\left| \left[\left| \frac{P \text{ do}}{4t_n} + \frac{F_a}{A_p} \right| + \frac{\sqrt{((LMIA)^2 + (LoMoA)^2)}}{z} \right]^2 + \left(\frac{LMIA}{z} \right)^2 \right] \leq Sh} \quad (18)$$

2.4.2 Tegangan Ijin Akibat Occasional Load

Berdasarkan [6] pada ketentuan 302.3.6 menyebutkan bahwa jumlah tegangan longitudinal yang disebabkan oleh tekanan, berat dan pembebanan sustain yang lain dan tegangan yang dihasilkan karena beban occasional seperti angin atau gempa bumi tidak melebihi 1.33 kali nilai tegangan izin dasar (Sh).

$$SL = \sqrt{\left[\left| \left[\left| \frac{P \text{ do}}{4t_n} + \frac{F_b}{A_p} \right| + \frac{\sqrt{((LMB)^2 + (LoMoB)^2)}}{z} \right]^2 + \left(\frac{LMB}{z} \right)^2 \right] \leq kSh} \quad (19)$$

2.4.3 Tegangan Ijin Akibat Thermal Expansion Load

Tegangan izin akibat kondisi expansion thermal yang terjadi pada suatu material pipa dan komponennya akibat beban thermal yang berulang, expansion ditetapkan berdasarkan [6].

$$S \text{ due to Thermal load} \leq S_A$$

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25 S_h) \quad (20)$$

2.5 Analisa Tegangan

Analisa tegangan diakibatkan karena beban *sustained*, *occasional* dan *thermal load*. Perhitungan tegangan statis menggunakan software CAESAR II [7][8]. Pada pemodelan diperlukan penentuan node/segmen terlebih dahulu dan *load case* sesuai dengan tegangan yang akan dianalisa [9], sebagai berikut:

Tabel 1 *Load case* tegangan untuk pemodelan software pipe stress analysis

No.	Kategori	Load Combination
3	<i>Sustained</i>	SUS = W + P
4	<i>Occasional 1</i>	OCC 1 = W + P + U1
5	<i>Occasional 2</i>	OCC 2 = W + P - U1
6	<i>Occasional 3</i>	OCC 3 = W + P + U2
7	<i>Occasional 4</i>	OCC 4 = W + P - U2
8	<i>Thermal Exp.</i>	EXP = L2-L3

Sumber : Peneliti, 2023

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Maximum Allowable Pipe Span

Dalam pengerjaan ini digunakan Persamaan (1) sampai (7) sehingga menghasilkan nilai seperti pada Tabel 2 yang menyatakan jarak maksimum antar penyangga.

Tabel 2 *Maximum allowable span*

Parameter	Units	Nilai
<i>Allowable Pipe Span Based on Limitation of Stress</i>	ft	50,929
<i>Allowable Pipe Span Based on Limitation of Deflection</i>	ft	59,929

Untuk perhitungan berdasarkan batas tegangan diperoleh nilai sebesar 50,929 ft atau 15,523 m, sedangkan hasil perhitungan berdasarkan batas defleksi sebesar 59,929 ft atau 18,036 m, sementara jarak yang disarankan [6] adalah 13,5 meter. Maka hasil perhitungan jarak minimum antar penyangga diambil dari nilai yang paling kecil diantara nilai jarak minimum berdasarkan batas tegangan, berdasarkan batas defleksi dan berdasarkan jarak yang disarankan standart. Sehingga nilai yang digunakan ialah berdasarkan batas tegangan sebesar 44,291 ft atau 13,5 meter.

3.2 Fleksibilitas Pipa

Perhitungan mengacu pada Persamaan (8). Parameter panjang pipa, *thermal coefficient*, *displacement*, Sa dan Ea yang terdapat pada Tabel 3 digunakan untuk menghitung nilai fleksibilitas pipa.

Tabel 3 Data perhitungan analisis fleksibilitas

DESCRIPTION	VALUE	UNIT
L pipa X	742.9	Ft
L pipa Y	0	Ft
L pipa Z	66.765	Ft
<i>Thermal Coefficient</i>	2.64	in./100ft

ΔX	19.6	In
ΔY	0	In
ΔZ	1.763	In
<i>Resultant Displacement(Y)</i>	19.692	In
L total	809.669	Ft
Jarak kedua anchor (U)	643	Ft
<i>Factor (f)</i>	0.93	-
<i>S hot</i>	10800	Psi
Sa	22481.9	Psi
Ea	27558000	Psi

Hasil perhitungan dari fleksibilitas pipa yaitu sebesar 0.022684213. Nilai ini masih dibawah dari 0.022940805, sehingga hasil perhitungan dapat dinyatakan fleksibel.

3.3 Tegangan Akibat Sustained Load

Perhitungan nilai tegangan mengacu pada persamaan (16) yang digunakan untuk mendapatkan hasil *output stress* dari software pipe stress analysis di beberapa segmen pada jalur *cluster-I* menuju *junction-B*. Nilai tegangan tertinggi berada pada node 1260 dengan nilai sebesar 7873.7 psi dengan batas tegangan ijin 19000 psi, maka didapatkan rasio tegangan yang terjadi terhadap tegangan ijin adalah 41.44%. Hasil tersebut menunjukkan nilai tegangan tertinggi akibat pembebanan sustain pada kondisi desain yang masih di bawah batas tegangan yang diijinkan oleh [6]. Nilai tegangan berada dibawah tegangan ijin karena beban yang bekerja pada kondisi *sustained* adalah beban berapa pipa dan beban akibat tekanan pada fluida.

3.4 Tegangan Akibat Occasional Load

Perhitungan nilai tegangan mengacu pada persamaan (17). Berdasarkan hasil *output stress* dari software pipe stress analysis pada beberapa segmen jalur *cluster-I* menuju *Junction-B*. Nilai tegangan tertinggi pada *loadcase occasional load 1* dan *occasional load 2* berada pada node 1299 dengan nilai sebesar 20577.3 psi dan 20444.8 psi. sedangkan untuk *loadcase occasional load 3 & occasional load 4* sebesar 54454.1 psi dan 54339.8 psi sedangkan batas tegangan yang diijinkan adalah 21850 berdasarkan [6]. Rasio tegangan yang terjadi pada *occasional load 1* dan *occasional load 2* adalah 94.18% dan 93.57% sedangkan rasio tegangan yang terjadi pada *occasional load 3* dan *occasional load 4* adalah 249.2% dan 248.7%. Hasil tersebut menunjukkan nilai tegangan akibat pembebanan *occasional load 1 & occasional load 2* masih berada dibawah batas tegangan ijin sedangkan pada kondisi *occasional 3 & 4* melebihi batas batas ijinnya. Tegangan *occasional* yang terjadi dalam perhitungan ini adalah akibat pembebanan *seismic factor* sebesar 0.8 G's [10] dengan U1 untuk pembebanan gaya dengan arah sumbu X dan U2 untuk pembebanan gaya dengan arah sumbu Z. Tegangan pada *case occasional 3&4* melebihi

batas tegangan ijin dan terjadi pada bagian elbow dikarenakan peningkatan tegangan disebabkan oleh fleksibilitas tinggi dari tikungan yang dihasilkan dari kemampuan penampang melintang untuk melengkung ketika mengalami pembengkokan atau tekanan internal. Selain itu, permukaan karakteristik geometris tikungan dapat menyebabkan sejumlah gaya dorong yang tidak seimbang yang disebabkan oleh tekanan internal ditambah adanya gaya eksternal U2 dengan arah sumbu Z positif dan negatif.

3.5 Tegangan Akibat *Thermal Expansion Load*

Perhitungan nilai tegangan akibat pembebanan ekspansi termal mengacu pada persamaan (18) yang merupakan rumus dasar untuk menghasilkan *output stress* dari *pipe stress analysis software* pada beberapa segmen pada jalur *cluster-I* menuju *Junction-B*. Nilai tegangan tertinggi berada pada node 1270 dengan nilai tegangan sebesar 44887 *psi*. Sedangkan nilai tegangan ijin dari *thermal expansion case* adalah 42451.2 *psi* sehingga rasio tegangan yang terjadi terhadap tegangan ijin adalah 105.74% dan melebihi batas tegangan ijin. Hasil tegangan ini disebabkan oleh temepatur operasi pada desain *existing* sebesar 194.7 °C sehingga pada kondisi ekspansi atau memuai menyebabkan nilai tegangan melenihi batas tegangan ijin.

4. KESIMPULAN

Nilai fleksibilitas sistem perpipaan pada kondisi eksisting berada dibawah batas nilai maksimal kriteria penerimaan berdasarkan [6] sehingga sistem perpipaan ini fleksibel. Sedangkan untuk nilai tegangan yang terjadi pada kondisi *sustained load*, *occasional load 1* dan *occasional load 2* dinyatakan aman karena memiliki nilai tegangan dibawah tegangan ijin berdasarkan [6]. Sementara nilai tegangan yang terjadi pada kondisi *occasional load 3*, *occasional load 4* dan *thermal expansion load* dinyatakan tidak aman karena memiliki nilai tegangan melebihi batas tegangan ijin menurut [6].

5. PUSTAKA

- [1] DNV-RP-D101. (2008). *Structural Analysis of Piping Systems*. Havik, Norway.
- [2] Mahardhika, P. (2017). Penentuan *Allowable Span* antar Penyangga Pipa SLF Berdasarkan Tegangan, Defleksi dan Frekuensi Alami. *JurnalIptek*, Volume 21.2, pp. 27-34.
- [3] Mahardhika, P. (2018). Analisis *Symmetrical* dan *Nonsymmetrical Vertical Expansion Loop* untuk Meningkatkan Fleksibilitas dan Menurunkan Tegangan Pipa Berdasarkan ASME B31.3. *Jurnal Ilmiah Bidang Ilmu Kerekayasaan*, Volume 42.1, pp 63-70.

- [4] Tijara, P. (2004). Pelatihan Dasar Analisis Tegangan Menggunakan *Software* COADE CAESAR II. PT. Tijara Pratama.
- [5] Bulan Puspita (2022). Desain Expansion Loop Pada Line 350-TOHS-1030-C14B-100HC Untuk Proses Distribusi Thermal Oil. Tugas Akhir PPNS, Surabaya.
- [6] ASME. (2018). ASME B31.1 Power Piping. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- [7] Chamsudi, A. (2005). Piping Stress Analisis. Diktat - Piping Stress Analisis. Jakarta.
- [8] Kannappan, Sam. (1986). *Introduction for Pipe Stress Analysis*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] CAESAR II,.(2019). User's Guide, COADE Engineering Software. Inc.
- [10] 03-1726, S. (2010). *STANDAR PERENCANAAN KETAHANAN GEMPA UNTUK STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG DAN NON GEDUNG*. Rancangan Standar Nasional Indonesia.