

Analisis Tegangan Pada Sistem Wild Crude Oil Di Production Platorm Module Menggunakan Metode Elemen Hingga

Kevin Syukma Prasetya^{1*}, Pekik Mahardhika¹, Adi Wirawan Husodo¹

Teknik Perpipaan, Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia¹

Email: [kevinsyukma26@student.ppons.ac.id¹](mailto:kevinsyukma26@student.ppons.ac.id) ; [pekikmahardhika@ppons.ac.id¹](mailto:pekikmahardhika@ppons.ac.id) ; [adi_wirawan@ppons.ac.id¹](mailto:adi_wirawan@ppons.ac.id)

Abstract

In the Marjan Gas Oil Separation Plant (GOSP) project, the piping system plays a crucial role in supporting the crude oil production process. One of the pipeline routes classified as a critical line is line number 42"-P-9042-3LE2P06 and 42"-P-8992-15LE2P06, which transports wild crude oil from the Production Platform to the Tie-in Platform. This line is categorized as requiring detailed analysis (C1) based on client standards and refers to DNV-RP-D101 and ASME B31.3. This study aims to analyze the stress, flexibility, and loads acting on the nozzle using stress analysis software. The analysis methods include calculations of the maximum allowable span between supports, pipe flexibility, and stresses due to sustained, thermal, and occasional loads. The analysis results show that the smallest allowable pipe span is 24.8 meters, and the minimum number of required supports is six. The pipe flexibility value complies with ASME B31.3 requirements. Moreover, all analyzed stress values are below the allowable limits. Therefore, the piping system on these lines is deemed structurally safe and suitable for operation. This research contributes to ensuring the reliability and safety of piping systems in offshore facilities.

Keyword: Stress Analysis, Allowable Pipe Span, Fleksibilitas Pipa, Analisis Statis, Nozzle Load

Nomenclature

Nomenclature menyatakan simbol dan keterangan yang kita tampilkan dalam paper

OD	<i>Outside Diameter</i>
ID	<i>Inside Diameter</i>
L_s	<i>Limitation of stress</i>
L_d	<i>Limitation of deflection</i>
T	<i>Temperature</i>
P	<i>Pressure</i>
t	<i>Thickness</i>
Sh	<i>Allowable Stress</i>
Z	<i>Section Modulus</i>
E	<i>Modulus elasticity</i>
I	<i>Moment of Inertia</i>
D	<i>Outside Diameter</i>
y	<i>Resultant Displacement</i>
L	<i>Total Panjang Pipa</i>
U	<i>Jarak Antar Anchor</i>
K1	<i>Allowable Fleksibiliy</i>

1. PENDAHULUAN

Proyek Marjan GOSP merupakan pengembangan ladang minyak dan gas lepas pantai yang berlokasi di Teluk Arab. Saat ini fasilitas tersebut memproduksi 500 MBCD Arab Medium Crude Oil melalui dua GOSP (MRJN GOSP-2 dan MRJN GOSP-3) yang terhubung dengan 40 wellhead platforms dan 9 tie-in platforms. Program pengembangannya bertujuan

meningkatkan kapasitas produksi hingga 800 MBCD minyak dan 2.200 MMSCFD gas pada puncaknya. Platform produksi ini dirancang untuk mengekstraksi dan mengolah minyak mentah langsung dari bawah laut sebelum disalurkan ke darat melalui sistem perpipaan. Pada sistem perpipaan Marjan, terdapat jalur *critical line* seperti 42"-P-9042-3LE2P06 dan 42"-P-8992-15LE2P06 yang terhubung ke *High Pressure Production Trap* 631-D-0001C. Berdasarkan document dari *Piping Standards Committee* dan standar DNV-RP-D101 (2017), jalur ini masuk kategori *Detailed Analysis* sehingga wajib dilakukan *stress analysis* menggunakan *software* analisis tegangan. Fluida yang dialirkan pada *line* ini adalah *wild crude oil*, yaitu minyak mentah tanpa pengolahan awal, yang mengandung impuritas seperti air, gas, pasir, dan sulfur. Tujuannya adalah untuk memastikan sistem perpipaan dapat beroperasi secara aman dan sesuai dengan standar desain yang berlaku. Analisis ini juga mendukung perancangan *support* sistem pipa untuk mencegah potensi kegagalan akibat tegangan berlebih serta memastikan kesesuaian material terhadap karakteristik fluida.

Sistem perpipaan dalam rekayasa teknik dibagi menjadi *non-critical* dan *critical piping*. *Non-critical piping* tidak dianalisis karena temperatur dan ukuran pipa tidak memenuhi kriteria teknis. Sebaliknya, *critical piping* harus dianalisis karena

parameternya berpotensi mempengaruhi integritas dan keselamatan sistem. [3].

Untuk memastikan akurasi dalam evaluasi sistem perpipaan, seorang engineer harus memiliki pemahaman mendalam terkait respons pipa terhadap beban yang bekerja, serta menguasai ketentuan desain berdasarkan kode dan standar teknis yang relevan. Respons tersebut ditinjau melalui parameter-parameter teknik seperti deformasi, percepatan, tegangan, gaya, momen, dan lainnya. Proses rekayasa ini dikenal sebagai analisis tegangan atau fleksibilitas pipa, yang bertujuan memberikan karakteristik menyeluruh dari sistem perpipaan yang dianalisis [9].

Dalam melakukan analisis fleksibilitas dan tegangan pada sistem perpipaan, hal yang paling krusial adalah memastikan bahwa desain memenuhi seluruh ketentuan dalam kode dan standar yang berlaku. Ketentuan-ketentuan tersebut umumnya terbagi menjadi dua kategori utama: pertama, batasan terkait tegangan yang timbul dalam sistem perpipaan; dan kedua, batasan terhadap beban berupa gaya serta momen yang diterima oleh nozzle peralatan sebagai akibat dari beban operasi maupun beban tetap yang dihasilkan oleh sistem perpipaan [4].

Pada penelitian ini telah menghitung jumlah *allowable pipe span*, fleksibilitas pipa, dan analisis tegangan akibat *sustained load*, *occasional load*, dan *thermal load*.

2. METODOLOGI

Secara umum, penelitian ini difokuskan pada perhitungan dan analisis tegangan pada sistem perpipaan yang dikategorikan sebagai *critical line*. Proses analisis dilakukan dengan dukungan perangkat lunak khusus guna memperoleh hasil evaluasi yang akurat dan sesuai dengan standar teknis yang berlaku.. Perhitungan *allowable pipe span* dilakukan untuk memastikan bahwa jumlah *support* pada *system* tersebut sudah memenuhi batas minimum jumlah *support*. Perhitungan fleksibilitas dilakukan untuk memastikan bahwa nilai fleksibilitas pada *system* tersebut masih dibawah nilai *allowable K1*. Pada tahap simulasi tegangan pipa menggunakan *software pipe stress analysis*. Nilai tegangan yang sudah disimulasikan kemudian disesuaikan dengan kriteria penerimaan menurut ASME B31.3. Kriteria penerimaan merupakan acuan yang digunakan untuk memastikan keselamatan dan keamanan sistem perpipaan telah sesuai dengan peraturan yang berlaku untuk suatu desain sistem perpipaan. Dari semua hasil tahapan di atas akan dianalisis apakah perlu terjadi evaluasi pada desain untuk mengatasi tegangan yang terjadi pada sistem perpipaan pada jalur *wild crude oil* di *production platform module*. Data desain pada

penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 spesifikasi pipa

Data	Spesifikasi
NPS	42
Sch	2,591
t (in)	2,591
OD (in)	42
ID (in)	36,818
Modulus Elasticity	28.800.000
Section modulus	2979,527752
Moment of inertia	62.500

Tabel 2 Data Fluida

Data	Nilai	Satuan
Jenis Fluida	Oil	
Temperatur desain (T)	158	F
Tekanan Desain (P)	3000	psig
Fluid Density	0,0043	lb/in ³

2.1 Kriteria Critical Line

Untuk menjamin integritas dan keamanan suatu sistem perpipaan, diperlukan pemenuhan kualifikasi teknis yang mencakup serangkaian analisis penting. Evaluasi ini meliputi penentuan ketebalan dinding pipa, analisis tegangan, serta analisis fleksibilitas. Analisis tegangan dilakukan guna memastikan ketahanan jalur perpipaan terhadap beban kerja, termasuk beban yang diterima oleh nozzle dan penyangga pipa.

2.2 Kriteria Critical Line

Untuk menjamin integritas dan keamanan suatu sistem perpipaan, diperlukan pemenuhan kualifikasi teknis yang mencakup serangkaian analisis penting. Evaluasi ini meliputi penentuan ketebalan dinding pipa, analisis tegangan, serta analisis fleksibilitas. Analisis tegangan dilakukan guna memastikan ketahanan jalur perpipaan terhadap beban kerja, termasuk beban yang diterima oleh nozzle dan penyangga pipa.

Hasil penentuan *critical line* mengacu pada *document responsibility: piping standards committee by client*, dokumen ini mengacu pada ASME B31.3 dan DNV-RP-D101. Penentuan kriteria critical line ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Kriteria Critical Line

Kriteria	Keterangan
1.3.1 (a)	Jalur pada sour service dengan ukuran NPS 10 inchi atau lebih besar.
1.3.4 (e)	Pressure vessel dan tangki dengan jalur pipa ukuran 8"
1.4	Kategori <i>Detailed Analysis</i>

2.3 Maximum Allowable Pipe Span

Dalam desain sistem perpipaan, penyangga pipa berperan penting dalam menahan beban dan

menjaga stabilitas terhadap pengaruh gaya statis maupun dinamis. Berdasarkan standar ASME B31.3, desain penyangga harus mampu menahan beban sustain, beban sesekali, serta pergeseran akibat ekspansi termal. Untuk menentukan jarak maksimum antar penyangga, dilakukan perhitungan allowable pipe span yang mengacu pada batasan tegangan dan batasan defleksi, sebagaimana dijelaskan oleh Sam Kannappan dalam persamaan (1) dan (2).

$$L_s = \frac{\sqrt{0.4ZSh}}{w} \quad (1)$$

$$L_d = \frac{\sqrt{\Delta EI}}{13.5w} \quad (2)$$

Perhitungan *maximum allowable pipe span berdasarkan limitation of deflection* menurut Timoshenko dan M.W. Kellogg dapat dilihat pada persamaan 3 dan 4.

$$L_d = \frac{\sqrt[4]{384.y_{max}.EI}}{5q} \quad (3)$$

$$L_d = \frac{\sqrt[4]{\delta.EI}}{17.1.w} \quad (4)$$

Dimana L adalah maximum allowable pipe span (ft); S adalah tegangan yang diizinkan (psi); Z adalah section modulus pipa (in³); w adalah berat total pipa per satuan panjang (lb/ft); I adalah moment of inertia pipa (in⁴); Δ adalah defleksi yang diizinkan (in); dan E adalah modulus elastisitas pada temperature desain (psi).

2.4 Fleksibilitas pipa

Fleksibilitas sistem perpipaan sangat penting untuk mengakomodasi ekspansi termal dan deformasi akibat suhu serta tekanan operasi. Sistem yang tidak cukup fleksibel berisiko mengalami kegagalan struktural, terutama pada titik *support* dan peralatan yang terhubung. Oleh karena itu, tugas utama seorang *piping stress engineer* adalah memastikan bahwa desain perpipaan mampu menyerap pemuatan tanpa menghasilkan tegangan berlebih.

Menurut ASME B31.3, terdapat rumus evaluasi awal untuk menentukan apakah analisis tegangan ekspansi termal secara formal diperlukan. Jika hasil perhitungan menunjukkan nilai lebih besar dari batas K1, maka analisis mendalam wajib dilakukan. Sebaliknya, jika hasilnya kurang dari atau sama dengan K1, analisis formal tidak diwajibkan, meskipun perhitungan tegangan tetap dilakukan secara ringkas.

$$\frac{Dy}{(L-U)^2} \leq K1 \quad (5)$$

Dimana D adalah diameter luar pipa (in); y merupakan pemuatan yang harus diserap pipa (in); L adalah panjang semua pipa antara dua anchor (ft); U merupakan jarak kedua anchor (ft)/(m); K1 merupakan nilai allowable fleksibilitas.

2.5 Tegangan Pada Sistem Perpipaan

Analisis tegangan pada sistem perpipaan mencakup evaluasi terhadap beban sustain dan beban termal. Proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak khusus, dengan acuan tegangan izin (*allowable stress*) berdasarkan standar yang berlaku dan jenis material yang digunakan dalam sistem perpipaan [10].

2.4.1 Sustained Load

Beban sustained didefinisikan sebagai gabungan dari tegangan longitudinal yang mencakup tegangan aksial, tekanan internal, dan tegangan akibat lentur sepanjang jalur perpipaan (Puryantoro *et al.*, 2020). Berdasarkan ASME B31.3 Pasal 302.3.5(c), keseluruhan tegangan longitudinal (SL) yang berasal dari pengaruh tekanan internal, berat pipa, serta komponen sistem lainnya termasuk dalam kategori beban sustained. Besaran total tegangan ini harus dijaga agar tidak melampaui batas tegangan yang diizinkan (Sh), sebagaimana tercantum dalam Tabel A-1 pada Lampiran A standar ASME B31.3.

2.4.2 Occasional Load

Beban occasional merupakan jenis pembebanan yang terjadi secara tidak kontinu dan umumnya berasal dari faktor eksternal, seperti angin, gempa bumi, salju, es, fluktuasi suhu, arus laut, serta gelombang. Dalam konteks tertentu, variasi suhu dapat dikategorikan sebagai beban berkelanjutan (*sustained load*), tergantung pada karakteristik operasi sistem. Selain itu, pengaruh seperti prategang, sisa tegangan akibat pemasangan, penurunan tanah, pergeseran diferensial, serta proses pembentukan dan pencairan embun beku, juga termasuk dalam kelompok occasional load yang harus diperhitungkan dalam kajian integritas sistem perpipaan [2].

2.4.3 Thermal Load

Variasi temperatur serta karakteristik material pipa dapat menyebabkan terjadinya ekspansi termal, yaitu pemanjangan fisik yang terjadi

Tabel 4 Load Case Pada Software Stress Analysis

Load Case	Definition	Load Combination
L3	Sustained Case	W+P1
L12	Occasional Sus + Wind +X	L3+L8
L13	Occasional Sus + Wind -X	L3+L9
L14	Occasional Sus + Wind +Z	L3+L10
L15	Occasional Sus + Wind -Z	L3+L11
L17	Expansion Case	L1-L3

sepanjang jalur perpipaan. Tegangan yang muncul akibat ekspansi ini, khususnya jika bersifat siklik karena proses pemanasan dan pendinginan berulang, berisiko menimbulkan kegagalan struktural. Untuk menjamin keselamatan sistem, perlu dilakukan analisis terhadap batas tegangan yang diizinkan (*allowable stress*) pada kondisi *expansion load*—yakni tegangan yang ditimbulkan oleh pembebangan termal berulang seperti ekspansi dan kontraksi yang dialami oleh pipa dan komponen terkait.

2.6 Pembebangan Pada Software Stress Analysis

Pembebangan atau *load case* merupakan hal yang diperlukan dalam menganalisis tegangan menggunakan *software*. Pembebangan yang digunakan dalam analisis sistem perpipaan ini meliputi *sustained load*, *occasional load*, dan *thermal load*. Pada *software stress analysis* pembebangan yang ada juga disebut *load case*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan maximum *allowable pipe span* merupakan tahap pertama yang dilakukan untuk mendapatkan jumlah *minimum support* pada sistem perpipaan *wild crude oil* yang dianalisis. Perhitungan maksimum *allowable pipe span* menggunakan persamaan 1 dan 2 untuk mendapatkan nilai maksimum *allowable pipe span* berdasarkan *limitation of deflection* dan *limitation of stress* berdasarkan Sam Kannappan, pada persamaan 3 menurut Timoshenko dan persamaan 4 menurut M.W. Kellog. Dari keempat persamaan tersebut, diambil nilai terkecil untuk menentukan nilai *allowable pipe span*.

Hasil dari perhitungan yang telah dilakukan mendapatkan nilai *maximum allowable pipe span* terkecil berdasarkan *limitation of deflection* yaitu 81,2648 ft. Dari hasil tersebut jumlah *minimum support* pada system perpipaan *wild crude oil* adalah 6 buah *support*.

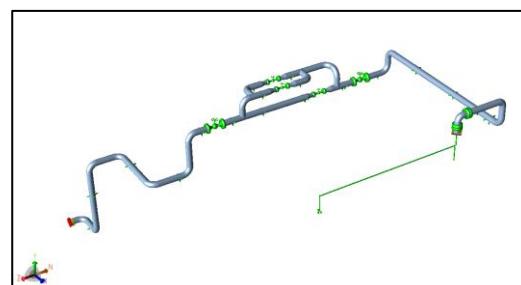
Pada tahap berikutnya yaitu melakukan perhitungan fleksibilitas pipa. Untuk memastikan bahwa sistem perpipaan memiliki fleksibilitas yang memadai terhadap ekspansi termal, dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan 3 sebagaimana dijelaskan dalam ASME B31.3. Hasil yang didapatkan dari perhitungan nilai fleksibilitas tersebut adalah 0,0031 untuk nilai fleksibilitas dan 0,0391 untuk nilai K1. Dari hasil yang didapatkan bisa dipastikan bahwa nilai fleksibilitas tidak melebihi batas *allowable* berdasarkan ASME B31.3.

Selanjutnya merupakan tahap analisis tegangan pada system perpipaan *wild crude oil* pada *production platform module*. Pemodelan system perpipaan pada *wild crude oil system* dapat dilihat pada Gambar 1. Untuk nilai tertinggi dari *sustained load* pada desain *existing* yang didapatkan yaitu 12726,12 psi dengan nilai

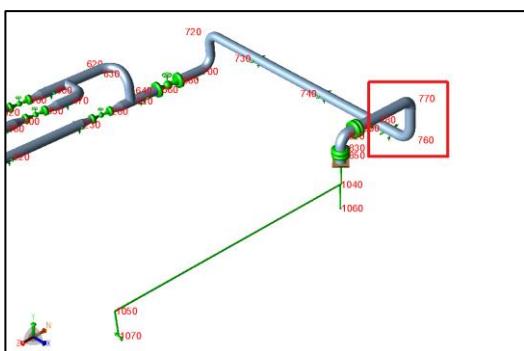
allowable stress 25000 psi, rasio yang didapatkan sebesar 50,9%. Tegangan tertinggi dari *sustained load* terjadi pada node 770-780, hal ini terjadi karena lokasi tersebut terletak dekat dengan *equipment* dan setelah elbow, sebagaimana dijelaskan dalam ASME B31.3 bahwa nilai tegangan pada lokasi terdekat dengan elbow atau tee memiliki nilai stress intensification factor (SIF) yang lebih tinggi. Kemudian untuk nilai tegangan akibat *occasional load* pada desain *existing* yang didapatkan yaitu 12726,48 psi dengan nilai *allowable stress* 33250 psi, rasio yang didapatkan yaitu sebesar 38,28%. Tegangan tertinggi dari *occasional load* ini terjadi pada node 770-780, hal ini terjadi karena karena lokasi tersebut terletak dekat dengan *equipment* dan setelah elbow, sebagaimana dijelaskan dalam ASME B31.3 bahwa nilai tegangan pada lokasi terdekat dengan elbow atau tee memiliki nilai stress intensification factor (SIF) yang lebih tinggi. Lokasi *stress* tertinggi untuk tegangan *sustained load* dan *occasional load* bisa dilihat pada Gambar 2. Nilai tegangan akibat *thermal load* pada desain *existing* yang didapatkan yaitu 5068,75 psi dengan nilai *allowable stress* 39700,29 psi, rasio yang didapatkan yaitu sebesar 12,77%. Tegangan tertinggi dari *thermal load* ini terjadi pada node 810-819, hal ini terjadi karena nilai tersebut terletak sebelum elbow terdekat dengan *equipment*. Untuk lokasi *stress* tertinggi dari tengangan *thermal load* bisa dilihat pada Gambar 3. Dari ketiga hasil tegangan yang didapatkan, untuk desain *existing* masih dibawah nilai *allowable stress* sehingga bisa dipastikan bahwa sistem perpipaan masih aman untuk beroperasi.

Tabel 5 Hasil Nilai Tegangan Software

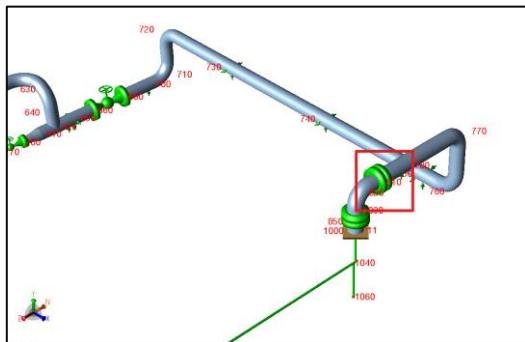
Load Case	Code Stress (lb/sq.in)	Allowable Stress (lb/sq.in)	Ratio (%)
Sustained	12726,12	25000	50,9%
Occasional	12726,48	33250	38,2%
Expansion	5068,75	39700,29	12,7%



Gambar 1 Pemodelan Sistem Perpipaan



Gambar 2 Stress tertinggi Sustained Load dan Occasional Load



Gambar 3 Stress tertinggi Thermal Load

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan menggunakan *software*, hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan akibat sustained load, occasional load, dan themal load masih memenuhi batas *allowable* dengan jarak antar *support* yang masih dibawah perhitungan maksimum allowable pipe span dan nilai fleksibilitas pipa yang masih dibawah nilai allowable K1. Sehingga dari hasil yang didapatkan bisa memastikan *system wild crude oil di production platform module* masih aman saat beroperasi.

5. PUSTAKA

3. PUSTAKA

 - [1] Agustinus, Donny (2009). Pengantar Piping Stress Analysis. Jakarta: Entry Augustino Publisher.
 - [2] ASME (2018). ASME B31.3-2018, Process Piping, ASME Code for Pressure Piping, B31. The American Society of Mechanical Engineering, U.S.A.
 - [3] Chamsudi, A. (2005). Diktat–Piping Stress Analysis. PT rekayasa industri, Jakarta.
 - [4] COADE. (1998). Pipe Stress Analysis Note. Texas : Coade , Inc.
 - [5] Kannappan, S. (1986). Introduction to Pipe Stress Analysis (S. Kannappan, Ed.; 1st ed., Vol. 1). John Wiley & Sons, Inc
 - [6] Mahardhika, P. (2017). Penentuan Allowable Span Antar Penyangga SLF Berdasarkan Tegangan, Defleksi, Frekuensi

Alami, Proceeding Conference Of Piping Engineering and its Application, 21(2), 1-8.

- [7] Maulana A, Ricky (2024). Analisis Tegangan Jumper Line Penajam Station Sebagai Peningkatan Fleksibilitas Operasi Transfer Crude Oil Project RDMP RU-V Balikpapan. Tugas Akhir Teknik Perpipaan PPNS
 - [8] M. W. Kellogg. (1956). Design of Piping Systems (The M. W. Kellogg Company, Ed.;Second, Vol 1). A Wiley-Interscience Publication.
 - [9] Pratama, T. (2004). Analisis Dasar Pelatihan Tegangan Pipa. Jakarta: Tijara Pratama Inc.
 - [10] Smith, R. P., & Van Laan, T. (1987). Piping and Pipe Support System, New York: McGraw Hill Book Companies Inc.
 - [11] Wirawan Husodo, A., Mahardhika, P., Vadilla, V. V., Pengajar Jurusan Teknik Permesinan Kapal, S., & Perkapalan Negeri Surabaya, P. (2019). Analisa Fleksibilitas Sistem Perpipaan pada Fatty Acid Plant Akibat Pergeseran Posisi Evaporator. In Jurnal Integrasi | (Vol. 112, Issue 2)