

DESAIN PIPA SERTA ANALISIS *THERMAL EXPANSION* DAN TEGANGAN PADA SUBSEA TIE-IN SPOOL

Subsea Pipeline Design and Thermal Expansion and Stress Analysis for Subsea Tie-In Spool

Don Revo Refaldiano¹ dan Rildova, Ph.D²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi

Bandung Jalan Ganesha 10 Bandung 40312

donrefaldiano@students.itb.ac.id¹ dan rildova@ocean.itb.ac.id²

Abstrak

Pipa penyalur merupakan solusi yang bisa tergolong lebih murah dan efisien ketimbang kapal *tanker* dalam transportasi produk apa bila jarak yang transpor yang tergolong dekat. Pipa penyalur pada lokasi lepas pantai tentu mengalami banyak beban lingkungan yang dapat berupa beban akibat arus dan gelombang. Proses desain terhadap pipa penyalur ini perlu dilakukan dalam kondisi operasi, hidrotess, dan instalasi dengan konfigurasi desain tebal dinding pipa menggunakan standar DNV-OS-F101, desain stabilitas di dasar laut menggunakan standar DNV-RP-F109, dan desain bentang bebas menggunakan standar DNV-RP-F105. Setelah itu, pipa akan dilanjutkan untuk desain konfigurasi perletakan pipa yang dilakukan berdasarkan analisis ekspansi termal pada bagian *expansion spool* menggunakan standar ASME B31.8 Ch VIII yang kemudian dilanjutkan dengan analisis tegangan pipa yang dilakukan menggunakan perangkat lunak CAESAR II 2019.

Kata Kunci: *pipa bawah laut, pipa lepas pantai, tie-in spool, expansion spool, tebal dinding, stabilitas dasar, bentang bebas, ekspansi termal, tegangan, DNV-OS-F101, DNV-RP-F109, DNV-RP-F105, ASME B31.8 Ch VIII, CAESAR II 2019*

Abstract

Subsea pipeline is one of the few structure with supporting function of products transportation in oil and gas industries. Regarding the condition of the place, subsea pipeline is affected the more by its environment rather than onshore pipeline, for example there are effects from wave and current force. As the environment affection is rising, the operational affection will rise so the product can be transported in an extreme condition. The engineering process for subsea pipeline need to be conducted for operational condition, hydrotest condition, and installation condition.. The engineering of pipe property in this Undergraduate Thesis are including the design of wall thickness regarding DNV-OS-F101, the design of on-bottom stability regarding DNV-RP-F109, and the design of free span regarding DNV-RP-F105. Next, subsea pipeline will be designed and analyzed for thermal expansion in expansion spool regarding ASME B31.8 Ch VIII, then will be analyzed with the help of CAESAR II 2019 software for stress analysis.

Keywords: *subsea pipeline, offshore pipeline, tie-in spool, expansion spool, wall thickness, on bottom stability, free span, thermal expansion, stress, DNV-OS-F101, DNV-RP-F109, DNV-RP-F105, ASME B31.8 Ch VIII, CAESAR II 2019*

PENDAHULUAN

Pipa penyalur adalah salah satu komponen yang penting dalam transportasi hasil eksplorasi atau pengolahan minyak dan gas alam. Kondisi lingkungan sangat menentukan desain suatu pipa penyalur, terutama untuk pipa penyalur lepas pantai karena dipengaruhi lingkungan yang lebih ekstrem.

Pipa penyalur, terutama lepas pantai, perlu didesain dengan sangat baik dari konfigurasi properti material pipa dan kondisi operasional pipa. Kegagalan pada pipa penyalur ini dapat berdampak luas bagi lingkungan laut yang berdampak juga ke perekonomian.

Pertambahan panjang akibat ekspansi termal memberikan tambahan tegangan pada pipa. Maka dari itu perlu dilakukan desain terhadap komponen *subsea tie-in (expansion) spool* yang berguna mengurangi efek tersebut pada sistem pipa penyalur lepas pantai.

TEORI DAN METODOLOGI

Pemilihan Material Pipa

Pemilihan material pipa penyalur dilakukan berdasarkan perhitungan komponen H_2S dan CO_2 dalam fluida yang menyebabkan korosi. Melalui kompoenen tersebut dalam fluida dilihat seberapa besar dampaknya terhadap dinding pipa. Dampak ini diperhitungkan dari tekanan parsial dari keduanya yang dpt dihitung dengan persamaan (1) dan (2).

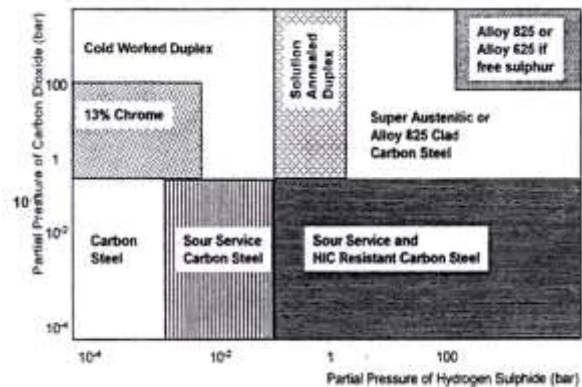
$$P_{\text{partial } H_2S} = \frac{\text{ppmv } H_2S}{10^6} \times P_{\text{system}} \quad (1)$$

$$P_{\text{partial } CO_2} = \frac{\text{mol\% } CO_2}{100} \times P_{\text{system}} \quad (2)$$

Tekanan parsial ini menggambarkan seberapa besar korosi yang mungkin terjadi pada pipa akibat komponen H_2S dan CO_2 . Dampak korositivitas fluida ini dapat digolongkan menjadi non-korosif, korosif, dan sangat korosif. Maka dari itu terdapat 3 jenis baja

pipa yaitu low carbon steel untuk non-korosif, high strength low alloy steel untuk korosif normal, dan alloyed steel (CRA) untuk sangat korosif yang umumnya dipadukan sebagai lapisan baja lainnya karena umumnya kapasitas tegangannya kecil.

Pemilihan material pipa berdasarkan tekanan parsial H_2S dan CO_2 dapat mengikuti **Gambar 1**.



Gambar 1 Diagram Pemilihan Material Pipa (Taufik, 2020)

Desain Tebal Dinding Pipa dengan DNV-OS-F101

Standar yang digunakan dalam bagian ini adalah DNV-OS-F101 tahun 2013. Berdasarkan DNV-OS-F101 terdapat 4 jenis kegagalan dapat diperiksa sebagai berikut:

1. Pressure Containment (Bursting)

Pipa harus memenuhi dua persyaratan yang dirumuskan dalam persamaan (3) untuk kondisi operasi dan persamaan (4) untuk kondisi *hydrotest* agar tidak terjadi kegagalan *bursting*.

$$p_{li} - p_e \leq \min \left(\frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \gamma_{SC}}; \frac{p_{lt}}{\alpha_{spt}} - p_e; \frac{p_h \alpha_U}{\alpha_{mpt}} \right) \quad (3)$$

$$p_{lt} - p_e \leq \min \left(\frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \gamma_{SC}}; p_h \right) \quad (4)$$

dimana:

p_{li} : tekanan insiden lokal (MPa)

p_{lt} : tekanan tes lokal (MPa)

p_e : tekanan eksternal (MPa)

p_h : tekanan mill stress (MPa)
 $p_b(t_1)$: kapasitas *pressure containment* (MPa)
 γ_m : faktor *material resistance*
 γ_{SC} : faktor *safety class resistance*
 α_U : faktor *material strength*
 α_{spt} : faktor *system pressure test*
 α_{mpt} : faktor *mill pressure test*

2. Local Buckling – External Over Pressure Only (System Collapse)

Pipa harus memenuhi persyaratan yang dirumuskan pada persamaan (5) agar tidak mengalami *local buckling* akibat *external overpressure*, yang dilihat dari selisih tekanan luar dan dalam minimum dengan tekanan karakteristik *collapse*.

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_c(t_1)}{\gamma_m \gamma_{SC}} \quad (5)$$

dimana:

p_e : tekanan eksternal (MPa)
 p_{min} : tekanan minimum (MPa)
 p_c : tekanan *collapse* (MPa)
 γ_m : faktor *material resistance*
 γ_{SC} : faktor *safety class resistance*

3. Propagation Buckling

Pipa harus memenuhi persyaratan yang dirumuskan pada persamaan (5) agar tidak mengalami *propagation buckling*, yang dilihat dari selisih tekanan luar dan dalam minimum dengan tekanan karakteristik *propagating*.

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_{pr}}{\gamma_m \gamma_{SC}} \quad (6)$$

dimana:

p_e : tekanan eksternal (MPa)
 p_{min} : tekanan minimum (MPa)
 p_{pr} : tekanan *propagating* (MPa)
 γ_m : faktor *material resistance*
 γ_{SC} : faktor *safety class resistance*

4. Local Buckling – Combined Loading

Persyaratan yang harus dipenuhi adalah persamaan (7) pada saat kondisi tekanan internal lebih besar daripada tekanan eksternal, sedangkan persamaan (8) pada saat kondisi tekanan eksternal lebih besar daripada tekanan internal.

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} S_{Sd}(P_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \frac{p_i - p_e}{\alpha_c p_b(t_2)} \right)^2 < 1 \quad (7)$$

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{SC} \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \gamma_{SC} S_{Sd}(P_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \gamma_{SC} \frac{p_e - p_{min}}{\alpha_c p_b(t_2)} \right)^2 < 1 \quad (8)$$

Gaya aksial efektif desain (S_{Sd}) merupakan gaya desain terhadap gaya aksial efektif (S_F) yang dikalikan dengan faktor-faktor pengaruh gaya. Gaya aksial efektif (S_F) dapat diperhitungkan menggunakan tegangan longitudinal yang merupakan kombinasi dari beban *end cap*, *bending stress*, *thermal stress*, dan *hoop stress* (Q. Bai and Bai, 2014). Tegangan longitudinal dapat dihitung dengan persamaan (9).

$$\sigma_l = \sigma_t + \sigma_b + \sigma_v + \sigma_{ec} \quad (9)$$

dimana:

σ_t : tegangan *thermal* (MPa)
 σ_b : tegangan lentur (MPa)
 σ_v : tegangan *poisson* (MPa)
 σ_{ec} : tegangan *end-cap* (MPa)

Perhitungan gaya aksial efektif (S_F) berdasarkan tegangan longitudinal dapat dilakukan menggunakan persamaan (10).

$$S_F = \left(-E \cdot \alpha \cdot (T_f - T_o) + \sigma_b + v \left(\frac{p_i - p_e}{2t} D_o \right) \right) A_p + \frac{\pi}{4} (p_i (D_o - 2t_2)^2 - p_e D_o^2) \quad (10)$$

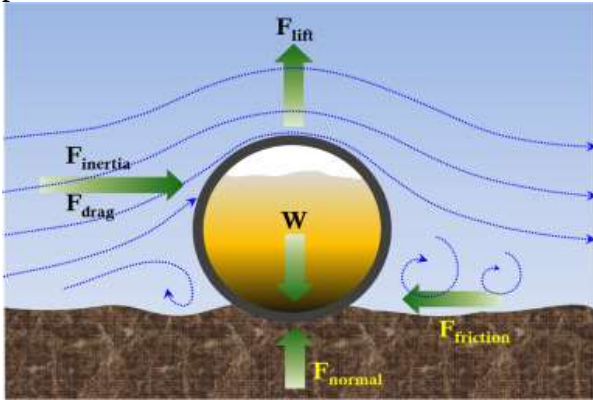
dimana:

E : modulus elastisitas baja (MPa, ksi)
 α : koefisien *thermal expansion* (1/°C)
 T_f : temperatur akhir (°C)

- T_o : temperatur awal (°C)
 ν : rasio Poisson
 A_i : luas internal pipa (mm², in²)
 A_e : luas eksternal pipa (mm², in²)
 σ_b : bending stress (MPa, ksi)
 A_p : luas penampang (mm², in²)

Desain Tebal Concrete Coating Melalui On Bottom Stability dengan DNV-RP-F109

Analisis desain *on-bottom stability* merupakan desain terhadap kestabilan gaya-gaya pada pipa saat sudah terletak di dasar laut. Gaya-gaya pada pipa dapat diilustrasikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Gaya-Gaya pada Pipa di Dasar Laut (Yu et al., 2013)

Pada analisis desain ini akan diperoleh tebal *concrete coating* yang dibutuhkan untuk menahan gaya-gaya di atas. Tebal *concrete coating* ini akan mempengaruhi diameter total pipa (D_{tot}) pada persamaan (11).

$$D_{tot} = D + 2 \cdot t_{corr} + 2 \cdot t_{cc} \quad (11)$$

dimana:

- D : diameter pipa baja (mm)
 t_{corr} : tebal *corrosion coating* (mm)
 t_{cc} : tebal *concrete coating* (mm)

Berdasarkan DNV-RP-F109 analisis desain *on-bottom stability* dilakukan terhadap *vertical stability* dan *lateral stability* yang dilakukan sebagai berikut:

1. Vertical Stability

Pada *vertical stability* pipa dianalisis terhadap gaya-gaya mati pada pipa, yaitu gaya akibat berat sendiri pipa dan gaya apung. Syarat *vertical stability* terpenuhi apabila persamaan (12) terpenuhi.

$$\gamma_w \cdot \frac{B}{W_{sub} + B} \leq 1 \quad (12)$$

dimana:

- W_{sub} : berat terendam keseluruhan pipa
 B : gaya apung (*Buoyancy*)
 γ_w : *safety factor*

2. Lateral Stability

Lateral stability berdasarkan DNV-RP-F109 adalah analisis terhadap keseluruhan gaya pada pipa yang merupakan kombinasi beban gaya mati pada pipa dan beban gaya lingkungan pada pipa. Beban gaya lingkungan adalah akibat gelombang dan arus yang memiliki kombinasi sebagai berikut:

- Kondisi Operasional
 - Kasus 1: Data gelombang 100 tahunan + data arus 10 tahunan
 - Kasus 2: Data gelombang 10 tahunan + data arus 100 tahunan
- Kondisi Non-Operasional/Temporer (*Hydrotest* dan Instalasi)
 - Kasus 1: Data gelombang 10 tahunan + data arus 1 tahunan
 - Kasus 2: Data gelombang 1 tahunan + data arus 10 tahunan

Pipa perlu memenuhi *lateral stability* secara horizontal pada persamaan (13) dan secara vertikal pada persamaan (14).

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_y^* + \mu \cdot F_z^*}{\mu \cdot W_{sub} + F_R} \leq 1 \quad (13)$$

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_z^*}{W_{sub}} \leq 1 \quad (14)$$

dimana:

- F_y^* : *peak horizontal load* (N/m)
 F_z^* : *peak vertical load* (N/m)

F_R : passive resistance on clay (N/m)
 W_{sub} : berat pipa terendam (N/m)
 γ_{sc} : faktor keamanan
 μ : friksi dasar laut

Peak horizontal load (F_y^*) adalah gaya horizontal baru pada pipa akibat pengaruh gelombang dan arus, sedangkan *peak vertical load* merupakan gaya yang serupa hanya arahnya pada vertikal. *Passive resistance on clay* (F_R) adalah gaya gesek pada dasar laut. Masing-masing gaya dapat diperhitungkan melalui persamaan (15), (16), dan (17).

$$F_y^* = r_{tot_y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_{tot} \cdot C_y^* \cdot (U^* + V_c)^2 \quad (15)$$

$$F_z^* = r_{tot_z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_{tot} \cdot C_z^* \cdot (U^* + V_c)^2 \quad (16)$$

$$F_R = F_c \cdot \frac{4.1K_c'}{G_c^{0.39}} \cdot \left(\frac{z_{pi}}{D_{tot}} \right)^{1.31} \quad (17)$$

dimana:

r_{tot_y} : efek reduksi tanah arah horizontal
 r_{tot_z} : efek reduksi tanah arah vertikal
 ρ_w : massa jenis air laut (kg/m³)
 D_{tot} : diameter total pipa (mm)
 C_y^* : *peak horizontal coefficient*
 C_z^* : *peak vertical coefficient*
 U^* : amplitudo kecepatan osilasi (cm/s)
 V_c : kecepatan arus (cm/s)
 F_c : *contact vertical force* (N/m)
 K_c' : *clay parameter*
 G_c : parameter gaya dukung tanah
 z_{pi} : kedalaman penetrasi pipa

Sedangkan untuk *contact vertical force* (F_c) merupakan selisih gaya vertikal baru dengan berat pipa terendam, yang diperhitungkan pada persamaan (18).

$$F_c = W_{sub} - F_z^* \quad (18)$$

dimana:

F_z^* : *peak vertical load* (N/m)
 W_{sub} : berat pipa terendam (N/m)

Desain *Free Span* dengan DNV-RP-F105

Berdasarkan DNV-RP-F105, analisis *free span* pada pipa dilakukan menjadi dua buah analisis yaitu:

1. *Static Free Span*

Analisis desain terhadap *static free span* menurut DNV-RP-F105 memiliki kriteria yang perlu dipenuhi pada persamaan (19).

$$\sigma_{static} \leq 0.96 \cdot SMYS \quad (19)$$

dimana:

$SMYS$: *Specified Minimum Yield Strength* (MPa)

σ_{static} : tegangan statik (MPa)

Tegangan statik (σ_{static}) dapat diperhitungkan melalui persamaan (20).

$$\sigma_{static} = \frac{|M_{static}| \cdot 0.5D_{tot}}{I_s} \quad (20)$$

dimana:

M_{static} : momen tekuk statik (kN-m)

D_{tot} : diameter total pipa (mm)

I_s : inersia penampang pipa baja (mm⁴)

Momen tekuk statik (M_{static}) merupakan perhitungan dari koefisien perletakan, beban defleksi, gaya aksial efektif, dan beban kritis *buckling* yang dapat dihitung menggunakan persamaan (21).

$$M_{static} = C_5 \cdot \frac{q \cdot L_{eff}^2}{1 + \frac{S_F}{P_{cr}}} \quad (21)$$

dimana:

C_5 : koefisien batas perletakan pipa di dasar laut

q : beban defleksi per satuan panjang, bernilai W_{sub} (kN/m)

L_{eff} : panjang bentang bebas efektif (m)

S_F : gaya aksial efektif (kN)

P_{cr} : beban kritis *buckling* (kN)

Beban kritis *buckling* dapat diperhitungkan sebagai pada persamaan

$$P_{cr} = (1 + CSF) \cdot \frac{C_2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_s}{L_{eff}^2} \quad (22)$$

dimana:

CSF : concrete stiffening effect

C_2 : koefisien kondisi perletakan pipa di dasar laut

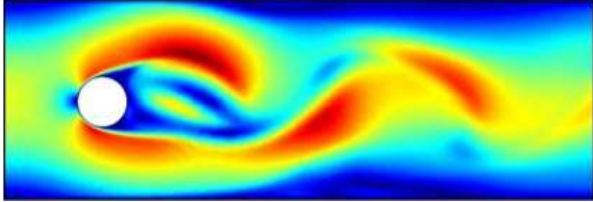
E : modulus Young untuk baja (MPa)

I_s : inersia penampang pipa baja (mm⁴)

L_{eff} : panjang bentang bebas efektif (m)

2. Dynamic Free Span

Pada desain *dynamic free span* dilakukan desain terhadap frekuensi pipa agar menghindari dan jauh dari frekuensi *vortex induced vibration* (VIV) yang ilustrasinya dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Ilustrasi Vortex Induced Vibration (Van den Abeele et al., 2008)

Berdasarkan DNV-RP-F105 *dynamic free span* perlu memenuhi 1 kriteria pada masing-masing arah yang dapat dilihat pada persamaan dan

$$\frac{f_{1,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_c}{V_{R,on}^{IL} \cdot D_{tot}} \cdot \left(1 - \frac{L_{IL}/D_{tot}}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (23)$$

$$\frac{f_{1,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_c + U_w}{V_{R,on}^{CF} \cdot D_{tot}} \quad (24)$$

dimana:

f_1 : eigen frekuensi pertama untuk *in-line/cross flow* (Hz)

γ : safety factor untuk *in-line/cross flow*

L_{IL} : panjang *free span* untuk *in-line* (mm)

D_{tot} : diameter total pipa (mm)

$V_{R,on}$: nilai awal dari *reduced velocity* untuk *in-line/cross flow*

U_c : besar kecepatan arus (cm/s)

U_w : besar kecepatan aliran akibat gelombang (cm/s)

α : *current flow ratio*, min 0.6

Current flow ratio (α) menggambarkan perbandingan kecepatan aliran yang diakibatkan oleh arus dan gelombang. Faktor ini dapat diperhitungkan menggunakan persamaan

$$\alpha = \frac{U_c}{U_c + U_w} > \frac{2}{3} \quad (25)$$

dimana:

α : *current flow ratio*

U_c : besar kecepatan arus (cm/s)

U_w : besar kecepatan aliran akibat gelombang (cm/s)

Perhitungan untuk eigen frekuensi pertama untuk *in-line* dan *cross flow* (f_1) adalah serupa yang dapat dilakukan menggunakan persamaan (26).

$$f_1 = C_1 \cdot \sqrt{1 + CSF} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_s}{m_e \cdot L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_F}{P_{cr}} + C_3 \cdot \left(\frac{\delta}{D_{tot}}\right)^2\right)} \quad (26)$$

dengan:

$$P_{cr} = (1 + CSF) \cdot \frac{C_2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_s}{L_{eff}^2} \quad (27)$$

dimana:

I_s : inersia penampang pipa baja (mm⁴)

m_e : massa pipa efektif per satuan panjang (kg/m)

P_{cr} : beban kritis *buckling* (kN)

δ : defleksi pada pipa (m), diabaikan untuk *in-line*

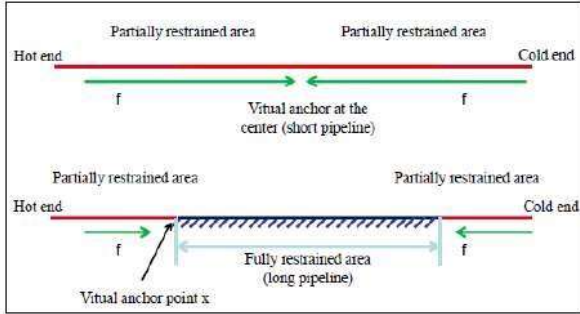
q : beban per satuan panjang (N/m)

D_{tot} : diameter total pipa (mm)

Analisis Thermal Expansion berdasarkan ASME B31.8

Thermal expansion adalah pertambahan panjang pada pipa yang terjadi akibat regangan-regangan longitudinal yang disebabkan oleh tekanan dan temperatur, yang akan tertahan oleh friksi tanah pada pertengahan pipa. Sehingga peristiwa *thermal expansion* umumnya hanya terjadi pada ujung-ujung pipa. Titik di mana pipa mulai

berekspansi adalah titik selisih kedua regangan tersebut bernilai nol, titik ini disebut *virtual anchor point*. Ilustrasi *thermal expansion* dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Ilustrasi Thermal Expansion (Ketkar and Patil, 2014)

Perhitungan *thermal expansion* yang terjadi pada pipa berdasarkan ASME B31.8 dapat dilakukan berdasarkan persamaan (28).

$$\Delta = \int_0^{VAP} \varepsilon_{NET} dx \quad (28)$$

dimana:

Δ : panjang *thermal expansion* (m)

VAP : panjang *virtual anchor* (m)

ε_{NET} : *net strain*

Perhitungan panjang *virtual anchor* dapat dilakukan berdasarkan persamaan (29).

$$VAP = \text{root}(F_{AX} - F_F) \quad (29)$$

dimana:

F_{AX} : gaya aksial pada pipa (kN)

F_F : gaya friksi akibat *seabed* (kN)

Net strain (ε_{NET}) adalah regangan murni (net) pada pipa akibat beban-beban yang terjadi pada pipa. Berdasarkan ASME B31.8, regangan ini dapat dirumuskan seperti pada persamaan (30).

$$\varepsilon_{NET} = \frac{F_{AX} - F_F}{E \cdot A_{ST}} \quad (30)$$

dimana:

σ_L : tegangan longitudinal pada pipa (MPa)

F_{AX} : gaya aksial pada pipa (kN)

F_F : gaya friksi akibat *seabed* (kN)

E : *Young's modulus* (MPa)

A_{ST} : luas penampang pipa bagian *steel* yang tidak terkorosi (mm^2)

Gaya-gaya yang menjadi penyusun regangan murni pada pipa dapat juga dirumuskan menjadi persamaan sampai persamaan

$$F_E = P_i \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot D_{in}^2 \quad (31)$$

$$F_V = -v \frac{P_i \cdot D_{tot}}{2 \cdot t} A_{ST} \quad (32)$$

$$F_T = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot A_{ST} \quad (33)$$

$$F_F = \int_0^L \mu \cdot \left(\left(2\pi \frac{\gamma \cdot D}{4} \right) \left(z_t + \frac{D_{tot}}{2} \right) \cdot (1 + K_0) + W_{sub} \right) dx \quad (34)$$

$$F_{AX} = F_E + F_V + F_T \quad (35)$$

dimana:

F_E : *End Cap Force* (kN)

F_V : *Poisson's Force* (kN)

F_T : *Thermal Expansion Force* (kN)

α : koefisien *Thermal Expansion* ($1/^\circ\text{C}$)

ΔT : perbedaan temperatur *intake* dan *output* fluida ($1/^\circ\text{C}$)

L : panjang pipa keseluruhan (m)

μ : koefisien gesek tanah

γ : *soil unit weight* (N/m^3)

z_t : kedalaman penguburan pipa (m)

K_0 : *passive earth coefficient*

Analisis Tegangan Pipa Menggunakan CAESAR II 2019

Berdasarkan ASME B31.8 analisis tegangan ini dilakukan terhadap 3 beban utama pada pipa, yaitu:

- *Hoop Stress*
- *Longitudinal Stress*
- *Combined Stress (Equivalent Stress)*

Berdasarkan ASME B31.8 tegangan-tegangan ini memiliki faktor desain dari SMYS pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Faktor Desain untuk Tegangan Pipa

Stresses	Design Factor
Hoop	0.72
Longitudinal Stress	0.80
Combined Stress (Equivalent Stress)	0.90

Persamaan (36) berikut yang digunakan untuk melakukan perhitungan pada *Hoop Stress*.

$$\sigma_h = \frac{P_{in} \cdot D_{tot}}{2t} \quad (36)$$

dimana:

σ_h : *Hoop Stress* (MPa)
 P_{in} : tekanan internal pipa (MPa)
 D_{tot} : diameter terluar pipa (mm)
 t : tebal dinding *steel* pipa (mm)

Persamaan (37) berikut yang digunakan untuk melakukan perhitungan pada *Longitudinal Stress*.

$$\sigma_L = \frac{N_{lay}}{A_s} + v \cdot \sigma_h - E \cdot \alpha \cdot \Delta T \pm \sigma_B \quad (37)$$

dengan:

$$\sigma_B = \frac{E \cdot D_{tot}}{2R_H} \quad (38)$$

dimana:

N_{lay} : *residual lay tension* (N)
 A_s : luas penampang pipa baja (mm²)
 σ_B : *bending stress* akibat tekukan horizontal (MPa)
 R_H : radius tekukan horizontal (m)

Persamaan (39) berikut yang digunakan untuk melakukan perhitungan pada *Combined Stress* (*Equivalent Stress*).

$$\sigma_{eq} \approx [\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \cdot \sigma_L]^{1/2} \quad (39)$$

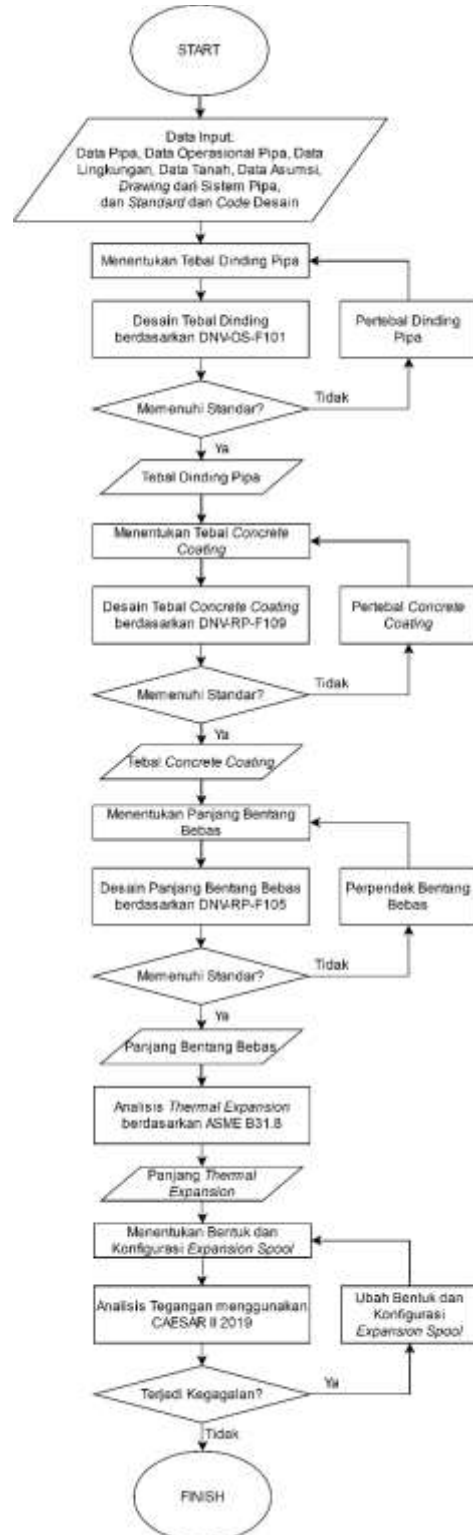
dimana:

σ_{eq} : *Combined Stress* (MPa)
 σ_h : *Hoop Stress* (MPa)
 σ_L : *Longitudinal Stress* (MPa)

Namun karena dalam analisis ini perlu diperiksa terhadap tiap titik pipa yang masing-masing bentuknya berbeda karena konfigurasi *laying*. Maka dari itu dalam pengerjaan analisis tegangan pipa bawah laut ini dilakukan menggunakan *software* pemodelan pipa yaitu CAESAR II 2019.

Metodologi

Metodologi pengerjaan Tugas Akhir secara keseluruhan dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5 Diagram Alir Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

HASIL DAN ANALISA

Hasil Desain Tebal Dinding Pipa

Berdasarkan desain analisis terhadap tebal pipa menggunakan DNV-OS-F101 diperoleh tebal pipa yang diperlukan pada **Tabel 2** sampai dengan **Tabel 5**.

Tabel 2 Tebal Dinding Kriteria Bursting

Tebal Dinding Pipa						
Kedalaman	Operational		Hydrotest		Installation	
	in	mm	in	mm	in	mm
50.7 m	0.259	6.6	0.1378	3.5	-	-

Tabel 3 Tebal Dinding Kriteria Local Buckling

Tebal Dinding Pipa						
Kedalaman	Operational		Hydrotest		Installation	
	in	mm	in	mm	in	mm
50.7 m	0.2244	5.7	0.0945	2.4	0.0945	2.4

Tabel 4 Tebal Dinding Kriteria Propagation Buckling

Tebal Dinding Pipa						
Kedalaman	Operational		Hydrotest		Installation	
	in	mm	in	mm	in	mm
50.7 m	-	-	-	-	0.1496	3.8

Tabel 5 Tebal Dinding Kriteria Combined Loading

Tebal Dinding Pipa						
Kedalaman	Operational		Hydrotest		Installation	
	in	mm	in	mm	in	mm
50.7 m	0.2677	6.8	0.1496	3.8	0.1496	3.8

Dari tabel diperoleh tebal sebesar 6.8 mm, kemudian diambil tebal dinding yang tersedia pada API-5L, yaitu sebesar 0.2790 in atau 7.1 mm.

Hasil Desain Tebal Concrete Coating

Berdasarkan desain analisis terhadap *on-bottom stability* menggunakan DNV-RP-F109 diperoleh tebal *concrete coating* yang diperlukan pada *vertical stability* pada **Tabel 6**, sedangkan *lateral stability* tanpa *trenching* pada **Tabel 5**.

Tabel 6 Tebal Concrete Coating Kriteria Vertical Stability

Tebal Concrete Coating						
Kedalaman	Operational		Hydrotest		Installation	
	in	mm	in	mm	in	mm
-	1.77	45	0.63	16	1.38	35

Tabel 7 Tebal Concrete Coating Kriteria Lateral Stability tanpa Trenching

Tebal Concrete Coating						
Kedalaman & Kasus	Operational		Hydrotest		Installation	
	in	mm	in	mm	in	mm
Keseluruhan	1.77	45	0.63	16	1.38	35

Hasil untuk konfigurasi *trenching* 0.2 diameter total pada kondisi *operational* dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Tebal Concrete Coating Kriteria Lateral Stability dengan 0.2D Trenching

Tebal Concrete Coating						
Kedalaman & Kasus	Operational		Hydrotest		Installation	
	in	mm	in	mm	in	mm
Keseluruhan	1.339	34	-	-	-	-

Pada konfigurasi pertama, yaitu tanpa *trenching*, diperlukan tebal *concrete coating* setebal 45 mm (1.77 in). Sedangkan pada konfigurasi kedua diperlukan tebal *concrete coating* setebal 34 mm (1.34 in).

Hasil Desain Panjang Bentang Bebas

Berdasarkan desain analisis terhadap *free span* menggunakan DNV-RP-F105 diperoleh panjang bentang bebas yang diperlukan pada *static free span* pada **Tabel 9**, *dynamic in-line free span* pada **Tabel 10**, dan *dynamic cross flow free span* pada **Tabel 11**.

Tabel 9 Panjang Bentang Bebas Kriteria Static Free Span

Panjang Bentang Bebas (m)			
Efek Trenching	Operational	Hydrotest	Installation
Ya	48	56	46
Tidak	37	44	36

Tabel 10 Panjang Bentang Bebas Kriteria Dynamic Free Span In-Line Flow

Panjang Bentang Bebas (m)			
Efek Trenching	Operational	Hydrotest	Installation
Ya	9	11	9
Tidak	9	11	9

Tabel 11 Panjang Bentang Bebas Kriteria Dynamic Free Span Cross Flow

Panjang Bentang Bebas (m)			
Efek Trenching	Operational	Hydrotest	Installation
Ya	16	21	15
Tidak	14	18	13

Disimpulkan dua buah konfigurasi yang sama yang masing-masing memiliki bentang bebasnya yang sama yaitu sebesar 9 m. Hasil keduanya ini diperoleh dari analisis *in-line free span* pada kondisi *operational* dan *installation*.

Hasil Analisis Ekspansi Termal

Analisis ekspansi termal memiliki konstrain sebagai berikut:

- Panjang Pipa Keseluruhan (L_p) = 500 m
- *Interval Data Range* (x) = 10 m

Berdasarkan analisis desain diperoleh *axial force* pada **Gambar 6** atau sebagai berikut:

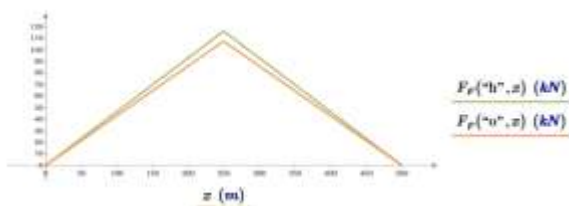
- F_{AX} saat *operational* = 65.082 kN
- F_{AX} saat *hydrotest* = 97.615 kN



Gambar 6 Axial Force Sepanjang Pipa

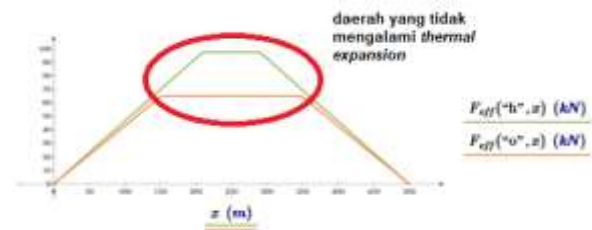
Hasil *Friction Force* dapat dilihat pada **Gambar 7** dengan nilai maksimum sebagai berikut:

- F_F saat *operational* = 107.535 kN
- F_F saat *hydrotest* = 116.197 kN



Gambar 7 Friction Force Sepanjang Pipa

Maka diperoleh selisih dari *axial force* dan *friction force* sebagai *effective force* pada **Gambar 8**.



Gambar 8 Daerah yang Tidak Mengalami Thermal Expansion

Maka diperoleh *Virtual Anchor Point Length* sebagai berikut:

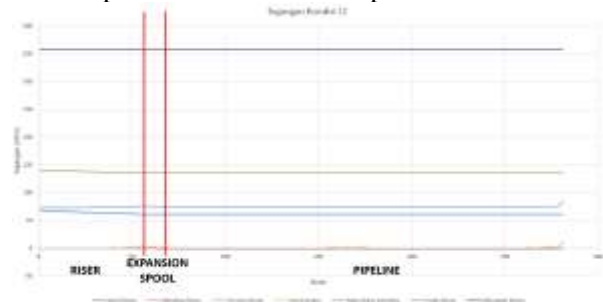
- VAP saat *operational* = 151.303 m
- VAP saat *hydrotest* = 210.020 m

Maka diperoleh panjang *thermal expansion* (Δ) sebagai berikut:

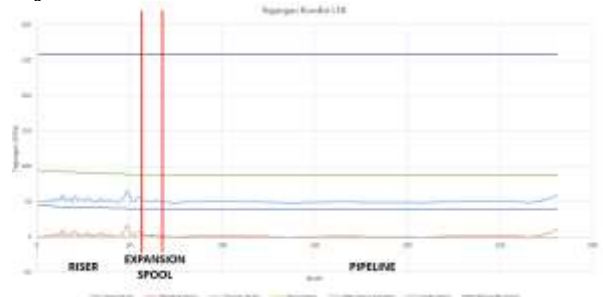
- Δ saat *operational* = 11.2560 mm
- Δ saat *hydrotest* = 23.4350 mm

Hasil Analisis Tegangan Menggunakan CAESAR II 2019

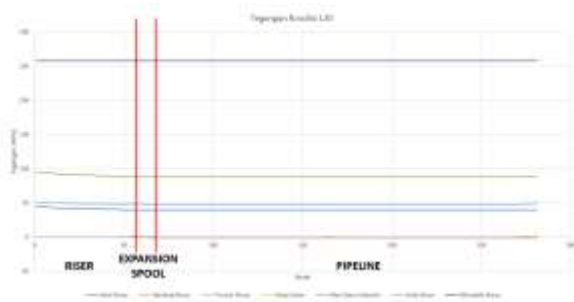
Analisis tegangan pada model sistem pipa dilakukan pada total 32 jenis kasus. Pada kali ini akan ditampilkan 4 jenis kasus yang mewakili analisis tegangan ini, yang dapat dilihat pada **Gambar 9** sampai **Gambar 12**.



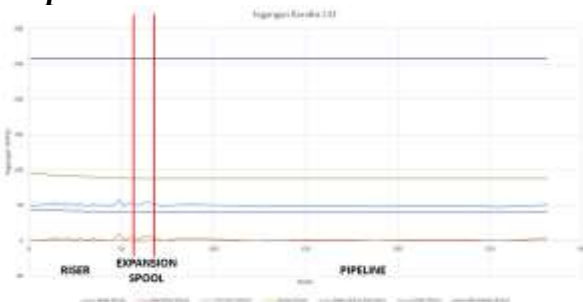
Gambar 9 Grafik Tegangan Kondisi Hydrotest L1



Gambar 10 Grafik Tegangan Kondisi Operational L18



Gambar 11 Grafik Tegangan Kondisi Suspended L20



Gambar 12 Grafik Tegangan Kondisi Occasional L33

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari pengerjaan tugas akhir diatas, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan standard DNV-OS-F101, diperoleh hasil Tebal pipa menurut API 5L, yaitu setebal 7.1 mm (0.2790 in) untuk tipe pipa API 5L-X52 PSL 2.
2. Berdasarkan standard DNV-RP-F109, diperoleh hasil konfigurasi pertama diperlukan tebal *concrete coating* setebal 45 mm (1.77 in). Sedangkan pada konfigurasi kedua diperlukan tebal *concrete coating* setebal 34 mm (1.34 in).
3. Berdasarkan standard DNV-RP-F105, diperoleh hasil konfigurasi pertama diperoleh panjang bentang bebas terkecil adalah sebesar 9 m. Sedangkan pada konfigurasi kedua diperoleh panjang bentang bebas pipa terkecil adalah sebesar 9 m.
4. Dipilih pipa dengan konfigurasi *trenching* sebesar 0.2 diameter total pipa, maka memiliki tebal dinding 7.1 mm (0.2790 in),

tebal *concrete coating* 34 mm (1.34 in), dan bentang bebas 9 m.

5. Berdasarkan analisis *thermal expansion* menggunakan ASME B31.8 diperoleh pipa memiliki panjang *thermal expansion* sebesar 11.2560 mm pada kondisi *operational* dan 23.4350 mm pada kondisi *hydrotest*.
6. Berdasarkan hasil analisis tegangan pipa menggunakan CAESAR II 2019 berdasarkan ASME B31.8 Ch VII diperoleh bahwa *expansion spool* dengan bentuk L dengan panjang masing-masing sisi 5 m dan 5 m tidak mengalami *overstress* dan memenuhi standar.
7. Hasil *thermal expansion* yang telah dihitung dari Mathcad dan pemodelan CAESAR II memiliki perbedaan sebesar 2.31 mm yang kurang lebih merupakan error sebesar 10% dari *thermal expansion* yang diperhitungkan menggunakan analisis ekspansi *thermal* pada *software* Mathcad

Saran

Saran untuk tugas akhir ini agar dapat lebih baik lagi adalah:

1. Hasil pemodelan untuk analisis tegangan dan *thermal expansion* dapat lebih akurat dan konservatif bila disertai data desain seperti *pipeline alignment sheet* dan data yang berisi kemiringan tanah, kemiringan pipa, dan data-data konfigurasi perletakan pipa
2. Sebaiknya analisis instalasi dilakukan agar analisis yang menggunakan data-data dari instalasi pipa, umumnya data tegangan residual akibat *laying* (N_{lay}), seperti desain *wall thickness*, desain *free span*, dan analisis *thermal expansion* dapat dilakukan dengan lebih akurat
3. Hasil analisis *thermal expansion* akan lebih baik bila memiliki data persebaran suhu yang lebih detail sepanjang pipa, bisa diperoleh melalui analisis *flow assurance*, agar dalam analisis dapat ditentukan *cold end* dan *hot end* yang akan mempengaruhi panjang *expansion* pipa

DAFTAR PUSTAKA

- ASME (2018): *Asme B31.8-2018* (ASME B31.8-2018), The American Society of Mechanical Engineers, Two Park Avenue, New York, retrieved July 4, 2020 from internet:
https://www.academia.edu/40862876/Asme_B31.8_Ed.2018.
- Bai, Q., and Bai, Y. (2014): Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation, *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*, 1–809.
- Bai, Y., and Bai, Q. (2005): *Subsea Pipelines and Risers*, Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044566-3.X5000-3>
- Bitner-Gregersen, E. M., Dong, S., Fu, T., Ma, N., Maisondieu, C., Miyake, R., and Rychlik, I. (2016): Sea state conditions for marine structures' analysis and model tests, *Ocean Engineering*, **119**, 309–322.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.03.024>
- COADE (n.d.): Load Case Definition in CAESAR II, *COADE*, retrieved June 6, 2020, from internet:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjP_JPA57rqAhXh8HMBHbhVDuoQFjAEegQIARAB&url=http%3A%2F%2Fforums.coade.com%2Fubbt_hreads%2Fubbthreads.php%3Fubb%3Ddownload%26Number%3D895%26filename%3D895-387-LoadCases.pdf&usg=AOvVaw3ECXD8c5GZMHaZMM7wD7ff.
- DNV GL (2006): *Free Spanning Pipelines* (DNV-RP-F105), Det Norske Veritas AS, Oslo, Norway.
- DNV GL (2010): *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines* (DNV-RP-F109), Det Norske Veritas AS, Oslo, Norway.
- DNV GL (2013): *Submarine Pipeline System* (DNV-OS-F101), Det Norske Veritas AS, Oslo, Norway.
- Ketkar, M., and Patil, Dr. K. (2014): Review of Subsea Pipeline for Minimizing
- KHI Pipe Industries (n.d.): Concrete Weight Coating | KHI Pipe Industries, retrieved May 1, 2020, from internet:
<https://www.khipipe.com/products-services/coating-facilities/concrete-weight-coating/>.
- Taufik, A. (February 2020): *Class 4 - Pipelien Material Selection*, Class presented at the Pipeline Engineering Training Course, Bandung, Indonesia, retrieved from internet:
https://drive.google.com/drive/folders/1K73IPTQ0wD2Aoejr1Ax1iIHY_UOs6XqW.
- Tianyuan, Y., Liu, B., Duan, M., Guo, Z., and An, C. (2015): Numerical Simulation of The Buckle Propagation Problem in Deepwater Pipelines, *The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15)*, ASEM, Incheon, Korea, retrieved from internet:
http://www.i-asem.org/publication_conf/ asem15/7.ICOSE15/1w/W3H.1.MS622_2109F1.pdf.
- Van den Abeele, F., Vande Voorde, J., and Goes, P. (2008): Numerical Modelling of Vortex Induced Vibrations in Submarine Pipelines, Presented at the COMSOL Conference, ArcelorMittal Research & Development Industry Gent, Hannover, retrieved from internet:
<https://www.comsol.jp/paper/download/37737/VandenAbeele.pdf>.
- Wermac (n.d.): Piping Flexibility - Adequate flexibility for absorbing the Thermal Expansion of the pipe - Expansion Loop, retrieved July 3, 2020, from internet:
http://www.wermac.org/documents/thermal_expansion_steel_pipe.html.
- Yu, S. Y., Choi, H. S., Lee, S. K., Do, C. H., and Kim, D. K. (2013): An optimum design of on-bottom stability of offshore pipelines on soft clay, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, **5**(4), 598–613.
<https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0156>