

DESAIN DAN ANALISIS TEGANGAN PADA PERSILANGAN PIPA GAS BAWAH LAUT DENGAN STRUKTUR PENYANGGA TIPE CONCRETE SLEEPER

Ichsan Pradana Soewono¹, Ricky Lukman Tawekal², dan Jessica Rikanti Tawekal³

Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

¹ichsansoewono@gmail.com, ²ricky.tawekal@gmail.com, dan ³jessica.rikanti@gmail.com

ABSTRAK

Kemajuan peradaban manusia erat kaitannya dengan pengembangan teknologi dalam bidang energi minyak dan gas bumi yang sangat pesat. Sumber migas yang semakin menipis menyebabkan kegiatan eksplorasi cadangan energi fosil beralih ke arah lepas pantai sehingga membutuhkan struktur pipa bawah laut. Perancangan *pipeline wall thickness* dihitung berdasarkan standar desain DNV-OS-F101. Dinding pipa didesain agar tahan terhadap kegagalan akibat tekanan internal berlebih, *local buckling*, dan perambatan kegagalan tekuk.

Tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis *pipeline on-bottom stability* yang diperhitungkan menggunakan standar DNV-RP-F109. Jika berat baja pipa tidak cukup untuk menjaga pipa agar tetap diam, maka desain tebal *concrete coating* dan *trenching* diperlukan guna menjaga kestabilan pipa. Analisis instalasi pipa dilakukan menggunakan *software* OFFPIPE. Analisis ini bertujuan untuk menentukan konfigurasi komponen *lay barge* instalasi yang sesuai dengan ketentuan kuat tegang material tebal dinding pipa agar tidak mengalami leleh (*yield*).

Kemudian dilakukan desain panjang *free span* pipa yang diizinkan saat berada di dasar laut dengan standar DNV-RP-F105. Pipa bawah laut yang digelar, tidak sepenuhnya tersandar di dasar laut karena kontur batimetri dasar laut yang tidak rata. Diperlukan analisis untuk menentukan bentang panjang bebas izin pipa yang memenuhi kriteria *screening fatigue* dan *ultimate limit state* (ULS).

Tahap berikutnya adalah analisis tegangan pada persilangan pipa. Tidak dapat diabaikan, jalur pipa bawah laut terkadang menemui jalur pipa lainnya. Sehingga dibutuhkan struktur penyangga untuk menyebrangi pipa eksisting diantaranya adalah struktur penyangga tipe *concrete sleeper*. Struktur tersebut harus dianalisis kestabilan nya terhadap kestabilan vertikal, *overturning*, *sliding*, dan pemeriksaan *bearing capacity*. Perhitungan *settlement* pada struktur penyangga juga perlu dilakukan agar desain tinggi struktur tetap memiliki jarak aman antara pipa yang menyebrangi dengan pipa eksisting. Setelah itu, dilakukan analisis tegangan persilangan pipa menggunakan *software* CAESAR II berdasarkan standar ASME B31.8 untuk memastikan pipa tidak melewati tegangan izin.

Proses desain dan analisis yang telah dilakukan menghasilkan desain tebal dinding pipa sebesar 7,1 mm, ketebalan lapisan *concrete coating* sebesar 41 mm dan bentang bebas maksimum yang diizinkan sebesar 6,3 m. Stabilitas desain struktur penyangga aman terhadap berbagai kegagalan dan tegangan yang dialami pipa saat menyebrangi pipa eksisting tidak melebihi tegangan izin ASME B31.8.

Kata Kunci: Pipa Bawah Laut, Persilangan, Analisis Kestabilan, Struktur Penyangga, *Concrete Sleeper*

Design and Stress Analysis of Subsea Gas Pipeline Crossing with Concrete Sleeper as The Support

ABSTRACT

Nowadays the world's demand for oil and gas is increasing while the reserves are running low. This has prompted the industry to undertake offshore search exploration. One of the facilities used to support the operation is a subsea pipeline. At the stage of detailed engineering, the piping design process started from the design and analysis of the pipe thickness. Analyzes were performed using the DNV-OS-F101 standard taking into account failures against pressure containment, external overpressure, propagation buckling, and local buckling.

Then performed on-bottom stability analysis using the DNV-RP-F109 standard. If the weight of the steel pipe is not sufficient to withstand the environmental load, then concrete coating and/or trenching design is required to maintain pipeline stability. The next step is to perform an installation analysis using the OFFPIPE software. The goal is to determine the position of suitable rollers configuration so that there is no yield failure during the installation.

Moreover, the subsea pipeline that is laid does not fully rest on the seabed due to the uneven bathymetric contours of the seabed. Therefore, the free span analysis is carried out based on the DNV-RP-F105 standard to determine the allowable free span length that meets the screening fatigue and Ultimate Limit State (ULS) criteria.

Inevitably, subsea pipelines sometimes run into existing pipelines. So that a support structure is required to cross the existing pipeline, one of which is a concrete sleeper support type. The structure must be analyzed for vertical stability, overturning, sliding, and bearing capacity checks. Settlement calculations on the support structure also need to be carried out so that the design of the structure height still has a safe distance between the crossing pipeline and the existing pipeline. After that, the pipeline crossing analysis was carried out using CAESAR II software based on the ASME B31.8 standard to ensure that the pipe did not pass the allowable stress.

The design and analysis process that has been carried out resulted in a pipe wall thickness design of 7.1 mm, a thickness of the concrete coating layer of 41 mm, and a maximum allowable free span of 6.3 m. The stability of the support structure final design is safe against various failures and the pipeline crossing stress does not exceed the allowable stress according to ASME B31.8.

Keywords: *Offshore Pipeline, Subsea, Crossing, Stability, Concrete Sleeper*

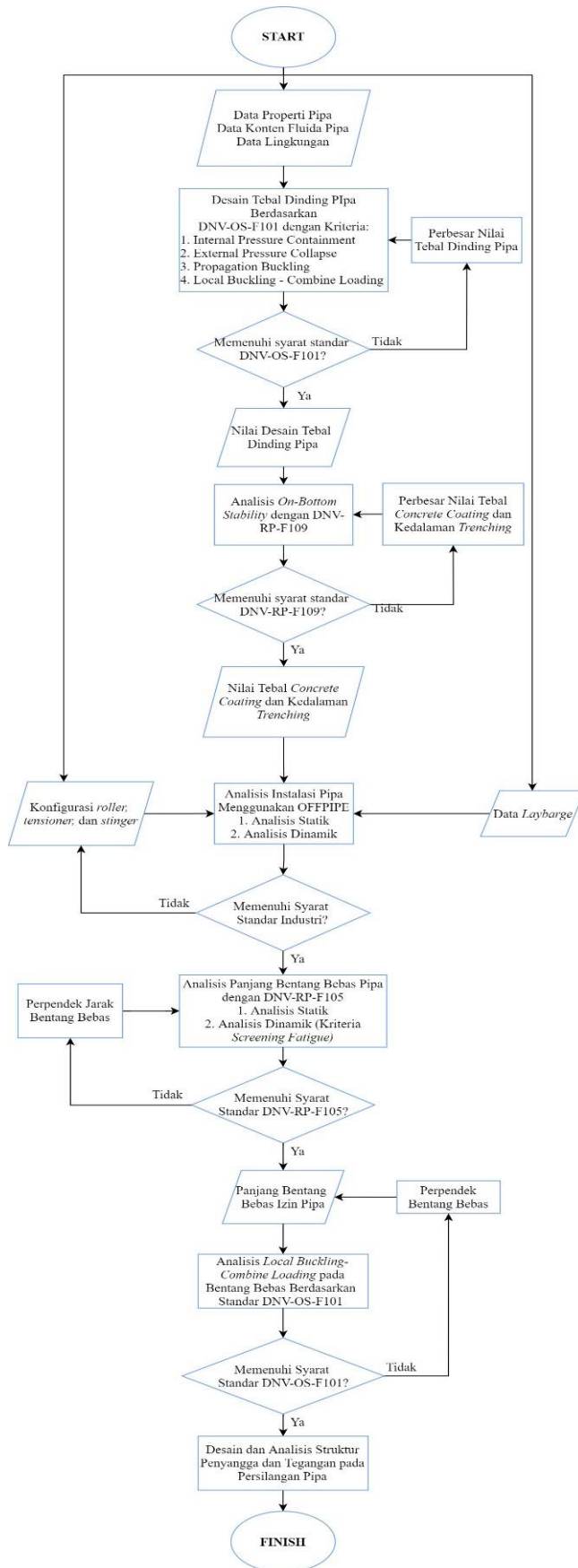
PENDAHULUAN

Salah satu kebutuhan manusia untuk dapat bertahan hidup adalah sumber energi. Penggunaan energi meliputi segala aspek kehidupan manusia seperti listrik, bahan bakar transportasi, bahan bakar untuk proses manufaktur, dll. Pada tahun 2018, kebutuhan konsumsi energi global masih didominasi oleh energi minyak dan gas sebesar 85 persen (British Petroleum, 2019). Hal tersebut mendorong manusia atau perusahaan melakukan peningkatan eksplorasi dan produksi. Keterbatasan sumber energi di darat menyebabkan pergeseran eksplorasi ke arah lepas pantai dengan didukung oleh fasilitas-fasilitas yang memadai (Sianturi, 2008).

Untuk memindahkan minyak atau gas dari sumur ke daratan, dibutuhkan alat transportasi seperti kapal. Selain kapal, pipa bawah laut dapat menjadi alternatif lain untuk menyalurkan minyak dan gas. Pipa bawah laut digunakan untuk berbagai maksud dalam pengembangan sumber daya hidrokarbon di lepas pantai, termasuk pipa transportasi untuk ekspor, dan pipa penyalur untuk mengangkut produksi dari suatu platform ke pipa ekspor (Soegiono, 2007). Menurut Soegiono (2007), dengan menggunakan pipa bawah laut, biaya transportasi minyak dan gas berkurang menjadi seperlimanya.

TEORI DAN METODOLOGI

Adapun tujuan dalam Laporan Tugas Akhir ini yaitu mendesain dan menganalisis tegangan pada persilangan pipa gas bawah laut dengan struktur penyangga tipe *concrete sleeper* di Laut Jawa. Pekerjaan dimulai dari mendesain tebal dinding pipa bawah laut menggunakan standar DNV-OS-F101 “*Submarine Pipeline Systems*” dan menentukan spesifikasi tebal dinding pipa menggunakan API *Specification 5L*. Setelah itu, Mendesain tebal *concrete coating* dan kedalaman *trenching* menggunakan standar desain DNV-RP-F109 “*On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*”. Kemudian, dilakukan analisis tegangan pipa saat instalasi menggunakan *software* OFFPIPE pada kondisi statik dan dinamik. Tahap berikutnya, melakukan analisis panjang bentang bebas berdasarkan standar desain DNV-RP-F105 “*Free Spanning Pipelines*”. Tahapan terakhir adalah analisis tegangan persilangan pipa. Struktur penyangga yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah tipe *concrete sleeper*. Struktur penyangga harus memenuhi kriteria kestabilan vertikal, *overturning*, *sliding*, dan *bearing capacity*. Analisis tegangan persilangan pipa dilakukan dengan perangkat lunak CAESAR II berdasarkan standar ASME B31.8 *Chapter IX*. Diagram alir pengerjaan Tugas Akhir ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram Tugas Akhir

a. Desain Tebal Dinding Pipa dengan DNV-OS-F101

Internal pressure containment merupakan kriteria penentuan tebal pipa yang didasarkan pada kekuatan pipa untuk menahan tekanan internal yang disebabkan oleh tekanan desain pipa. Tebal dinding pipa yang dinyatakan mampu menahan tegangan tersebut harus memenuhi **Persamaan (1)**.

$$P_i - P_e \leq \frac{P_b(t_1)}{\gamma_m \times \gamma_{sc}} \quad (1)$$

dengan:

P_i = Tekanan Internal (P_{it} untuk kondisi hidrotes; P_{li} untuk kondisi operasi)

P_e = Tekanan Eksternal atau Tekanan Hidrostatik

$P_b(t_1)$ = *Burst Pressure*

t_1 = Tebal dinding pipa saat kegagalan yang mungkin terjadi pada sambungan dengan kapasitas yang rendah

γ_m = faktor resistensi material

γ_{sc} = faktor resistensi tingkat keamanan

Tebal dinding pipa bawah laut perlu didesain untuk dapat menahan terjadinya keruntuhan akibat *external pressure* atau tekanan hidrostatik. Pada kriteria ini, pipa bawah laut harus memenuhi **Persamaan (2)**.

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_c(t_1)}{\gamma_m \times \gamma_{sc}} \quad (2)$$

dengan:

P_{min} = Tekanan internal minimum.
Diambil nilai nol untuk kondisi instalasi

$P_c(t)$ = *Characteristic Resistance for External Pressure*

Kriteria *propagation buckling* merupakan kriteria penentuan tebal pipa berdasarkan kekuatan untuk menahan adanya perambatan dari *buckling* yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik air laut pada kedalaman elevasi pipa bawah laut.

$$P_{pr} = 35 \times f_y \times \alpha_{fab} \times \left(\frac{t_2}{D}\right)^{2.5} \quad (3)$$

keterangan:

P_{pr} = *Propagation Pressure*
 f_y = *Yield Stress*
 α_{fab} = Faktor Fabrikasi Pipa
 t_2 = Tebal Nominal Dinding Pipa

Kriterira *local buckling* akibat beban kombinasi menunjukkan kekuatan pipa baja di dasar laut terhadap semua gaya, momen, dan tekanan yang terjadi pada pipa. Persamaan yang digunakan untuk menentukan tebal pipa dengan kriteria *local buckling* akibat beban kombinasi ditinjau pada salah satu kondisi, seperti tekanan internal berlebih atau tekanan eksternal berlebih. **Persamaan (4)** menampilkan kriteria *external overpressure* dan **Persamaan (5)** menampilkan kriteria *internal overpressure*.

$$\left\{ \left[\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right)^2 \right]^2 + \left[\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{P_e - P_{min}}{P_c} \right]^2 \right\} \leq 1 \quad (4)$$

$$\left\{ \left[\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right)^2 \right]^2 + \left[\alpha_p \cdot \frac{P_i - P_e}{\alpha_c \cdot P_b \cdot \sqrt{3}} \right]^2 \right\} \leq 1 \quad (5)$$

dengan:

γ_m : *Material resistance factor*
 γ_{sc} : *Safety class resistance factor*
 M_{sd} : *Design bending moment*
 M_p : *Plastic capacities of bending moment*
 S_{sd} : *Design axial force*
 S_p : *Plastic capacities of axial force*
 α_p : *Pressure Factor*
 α_c = *Flow Stress Parameter*

b. Analisis On-Bottom Stability dengan DNV-RP-F109

Terdapat dua jenis pemeriksaan stabilitas pipa, yaitu pemeriksaan stabilitas vertikal dan stabilitas absolut. Pemeriksaan stabilitas vertikal diberikan pada **Persamaan (6)**, pemeriksaan stabilitas absolut arah lateral diberikan pada **Persamaan (7)** dan pemeriksaan stabilitas absolut arah vertikal pada **Persamaan (8)**.

$$SG = \frac{W_s + B}{B} \geq 1.1 \quad (6)$$

dengan:

γ_w = Faktor keamanan, dimana $\gamma_w = 1.1$
 B = Gaya apung pipa per unit panjang
 W_s = Berat terendam pipa per unit panjang
 SG = Massa jenis spesifik pipa

$$\gamma_{sc} \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot W_s + F_R} \leq 1,00 \quad (7)$$

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_Z^*}{W_s} \leq 1,00 \quad (8)$$

dengan:

γ_{sc} = Faktor keamanan sesuai dengan jenis tanah

μ = Koefisien gesek sesuai dengan jenis tanah (untuk *concrete coating* = 0,2)

F_Y^* = Gaya hidrodinamika lateral

F_Z^* = Gaya hidrodinamika vertikal

W_s = Berat terendam pipa per unit panjang

F_R = Resistensi pasif tanah

c. Analisis Instalasi menggunakan OFFPIPE

Analisis instalasi bertujuan untuk menentukan konfigurasi *roller* pada *laybarge* dan *stinger* yang tepat sehingga tidak terjadi kegagalan *buckling* pada pipa yang akan digelar. Analisis terdiri dari dua tipe, yaitu analisis statik dan analisis dinamik. Kedua analisis tersebut dikerjakan dengan bantuan *software* OFFPIPE.

Metoda instalasi pipa yang digunakan adalah metoda *S-lay*. Pada metoda *S-lay*, terdapat dua daerah yang memiliki tegangan besar yaitu daerah *overbend* dan daerah *sagbend*.

Daerah *overbend* biasanya dimulai dari *tensioner* pada *deck barge*, melalui *barge ramp*, dan turun ke *stinger* sampai pada titik *lift-off* dimana pipa tidak lagi didukung oleh *stinger* (Guo dkk., 2005). Pada daerah

overbend ini diharapkan total tegangan akibat dari berat pipa sendiri, momen *bending* pada tumpuan atau *roller* tidak melebihi 85% SMYS (Lee, 2007).

Daerah *sagbend* bermula dari *inflection point* sampai dengan titik lokasi pipa pertama kali menyentuh *seabed* (*touchdown point*) (Guo dkk., 2005). Berdasarkan (Lee, 2007), tegangan maksimum yang diizinkan pada daerah *sagbend* adalah 72% untuk kondisi statik dan 96% untuk kondisi dinamik.

d. Analisis Panjang Bentang Bebas dengan DNV-RP-F105

Bentang bebas atau *free span* adalah suatu keadaan dimana pipa tidak tertopang oleh dasar laut (Bai dan Bai, 2014). Analisis bentang bebas diawali dengan analisis statik, kemudian analisis dinamik (kriteria *screening fatigue*), dan analisis *local buckling* pada bentang bebas (kriteria ULS).

1. Analisis Statik

Panjang bentang bebas yang diizinkan menurut analisis statik ialah panjang yang memenuhi syarat tegangan pipa yang dihasilkan akibat beban statik yaitu kurang dari 96% SMYS.

$$\sigma_{static} < 96\% \text{ SMYS} \quad (9)$$

$$\sigma_{static} = \frac{M_{static} D_s}{2 I_s} \quad (10)$$

dengan:

σ_{static} = Static bending stress

M_{static} = *Bending moment design* statik

D_s = Diameter terluar pipa baja

I_s = Momen inersia pipa baja

2. Analisis Dinamik

Kriteria *screening fatigue* dilakukan untuk menganalisis *fatigue* yang disebabkan oleh *Vortex Induced Vibrations* (VIV) dan beban langsung dari kombinasi gelombang dan arus pada bentang bebas pipa (Det Norske Veritas, 2006). *Vortex* timbul akibat adanya turbulensi serta ketidakstabilan aliran di bagian belakang pipa.

Berdasarkan Det Norske Veritas (2006), pipa yang mengalami bentang bebas dapat dikatakan memenuhi *screening fatigue* arah *in-line* jika:

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{C,100year}}{V_{R,onset}^{IL} D} \left(1 - \frac{\frac{L}{D}}{250} \right) \frac{1}{\alpha} \quad (11)$$

dengan:

f_n = Frekuensi natural pipa arah *in-line*

γ_{IL} = Faktor *screening fatigue* untuk *in-line* = 1.4

α = *Current flow ratio* (minimum 0,6)

D = Diameter terluar pipa (termasuk *coating*)

L = Panjang bentang bebas pipa

$U_{C,100year}$ = Kecepatan arus pada elevasi pipa periode ulang 100 tahun

$U_{w,1year}$ = *wave induced flow velocity* periode ulang 1 tahun

$V_{R,onset}^{IL}$ = *Onset value for reduced velocity* arah *in-line*

Berdasarkan Det Norske Veritas (2006), pipa yang mengalami bentang bebas dapat dikatakan memenuhi *screening fatigue* arah *cross-flow* jika:

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{C,100year} + U_{w,1year}}{V_{R,onset}^{CF} D} \quad (12)$$

dimana:

γ_{CF} = Faktor *screening fatigue* untuk *cross-flow* = 1.4

$V_{R,onset}^{CF}$ = *Onset value for reduced velocity* arah *cross-flow*

3. Kriteria ULS

Nilai panjang bentang bebas maksimum yang dihasilkan dari kriteria *screening fatigue* akan diuji kembali dengan pemeriksaan kriteria ULS. Perhitungan *bending moment* akibat bentang bebas dilakukan berdasarkan DNV-RP-F105.

dengan:

M_F = Momen karena Beban Fungsional (Nm)

M_E = Momen karena *Environmental Load* (Nm)

γ_F = Faktor Pembebanan untuk Beban Fungsional

γ_c = Faktor Pengaruh Kondisi Beban

γ_E = Faktor Pembebanan untuk
Environmental Load

Nilai *bending moment* desain tersebut menjadi *input* pada pemeriksaan *local buckling combined loading* pada **Persamaan (4)** dan **(5)**.

e. Stabilitas Struktur Penyangga

Dilakukan pemeriksaan kestabilan vertikal, *overturning moment*, kegagalan geser atau *sliding* dan juga pengecekan *bearing capacity* terhadap struktur penyangga.

1. Kestabilan Vertikal

Berikut disajikan persamaan pemeriksaan kestabilan vertikal:

$$\frac{W_{support}}{B_{support}} \geq 1,1 \quad (13)$$

2. Kestabilan Overturning Moment

Analisa *overturning* pada *support* dilakukan untuk mengetahui kemampuan *support* dalam melawan momen yang bekerja pada *support*.

$$SF_{overturning} = \frac{M_{resisting}}{M_{overturning}} \geq 1,5 \quad (14)$$

3. Kestabilan Sliding

Analisa *sliding* pada *support* dilakukan untuk mengetahui kemampuan *support* dalam melawan gaya luncur yang diakibatkan oleh gaya-gaya horizontal yang mengenai struktur. Gaya-gaya horizontal tersebut dilawan dengan gaya gesek *support* dengan tanah di bawahnya.

$$SF = \frac{\Sigma F_{resisting}}{\Sigma F_{horizontal}} \geq 1.5 \quad (15)$$

4. Bearing capacity

Analisa *bearing capacity* dilakukan untuk mengetahui daya dukung tanah dalam menerima beban struktur di atasnya. Berdasarkan Das (2011), Mayerhoff mengekspresikan persamaan *bearing capacity* sebagai berikut:

$$Q_{ult} = c N_c s_c d_c + q N_q s_q d_q + 0,5 \gamma_s B_\gamma N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (16)$$

f. Analisis Penurunan Tanah

1. Immediately Settlement

Penurunan seketika (*immediate settlement*) biasanya terjadi berkisar antara 0-7 hari

$$S_i = q B \frac{1 - \mu^2}{E_s} I_w \quad (17)$$

2. Consolidation Settlement

Penurunan konsolidasi merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air akibat keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.

$$S_c = \frac{C_c - H_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'_{av}}{\sigma'_0} \quad (18)$$

HASIL DAN ANALISIS

a. Desain Tebal Dinding Pipa

Nilai tebal dinding pipa minimum yang memenuhi seluruh kriteria kegagalan yang telah diperhitungkan menurut standar DNV-OS-F101 adalah **6,98 mm**. Data ketebalan pipa kemudian diambil berdasarkan spesifikasi manufaktur standar API-5L sehingga nilai desain tebal pipa adalah **7.1 mm** atau **0.28 in.**

b. Analisis On-bottom Stability

Analisis kestabilan vertikal dan lateral dilakukan terhadap empat kombinasi pembebanan sesuai yang disajikan tabel di bawah ini:

Tabel 1. Kombinasi pembebanan

Case	Kondisi	Wave	Current	Water Depth
1	Operation	100-yr	10-yr	100-yr
2	Operation	10-yr	100-yr	100-yr
3	Installation	10-yr	1-yr	1-yr
4	Installation	1-yr	10-yr	1-yr

1. Vertical Stability

Analisis kestabilan vertikal dihitung dalam keempat case tersebut. Dari empat case, nilai desain tebal *concrete* beton paling besar diperoleh dari kondisi operasi yaitu sebesar **8 mm**. Hal tersebut dikarenakan tebal dinding pipa dikurangkan *corrosion allowance* sebesar 3,175 mm sehingga berat terendam lebih kecil.

2. Absolute Stability

Tabel 2. Hasil analisis absolute stability

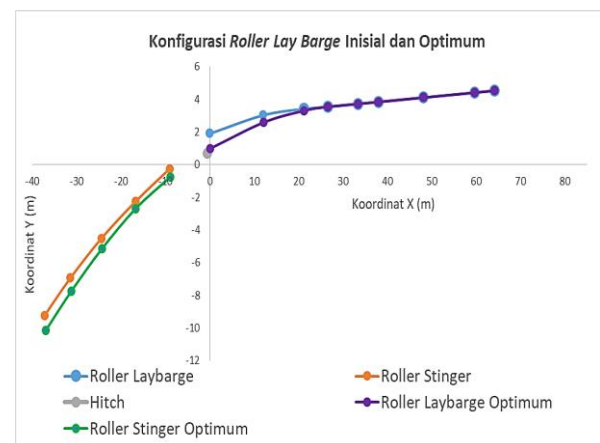
CASE	Tebal Concrete Layer [mm]	Trenching [m]
1	41	0
2	20	0
3	0	0
4	0	0

Berdasarkan hasil yang disajikan pada **Tabel 6**, nilai tebal *concrete layer* terbesar berasal

dari case 1 yaitu 41 mm. Hal tersebut dikarenakan tebal dinding baja yang dikurangkan dengan *corrosion allowance* dan pengaruh gelombang 100 tahunan lebih besar dari pada arus 100 tahunan.

c. Analisis Instalasi

Diperlukan iterasi konfigurasi *roller* agar pipa tidak mengalami kegagalan. Berikut ditampilkan konfigurasi *roller* optimum dan inisial, konfigurasi optimum ditunjukkan oleh grafik berwarna ungu dan hijau.



Gambar 2. Konfigurasi optimum roller

Dari konfigurasi *roller* tersebut, pipa tidak mengalami kegagalan dari analisis statik dan dinamik.

Tabel 3. Hasil analisis instalasi statik

Static Analysis			
Segmen	Stress Max (MPa)	Percent SMYS	Percent SMYS Ijin
Kedalaman Minimum (h = 48.4 m)			
Overbend	256.06	71.42	85
Sagbend	91.61	25.55	72
Kedalaman Maksimum (h = 50.21 m)			
Overbend	256.88	71.65	85
Sagbend	91.52	25.53	72

Untuk analisis dinamik dilakukan dengan kombinasi gelombang dan arus arah 0^0 , 45^0 , dan 90^0 . Dari hasil analisis menggunakan OFFPIPE, diperoleh tegangan terbesar dari arah 0^0 atau dari arah belakang kapal.

Tabel 4. Hasil analisis instalasi dinamik arah gelombang dan arus 0^0

Segemen	Stress Max (MPa)	Persen SMYS	Persen SMYS Izin
Kedalaman Minimum (48,4 m)			
Overbend	301.95	84.22	85
Segemen	Stress Max (MPa)	Persen SMYS	Persen SMYS Izin
Sagbend	108.26	30.19	72
Kedalaman Maksimum (50,21 m)			
Overbend	302.82	84.46	85
Sagbend	107.99	30.12	72

Dari hasil keluaran OFFPIPE yang telah dioptimasi didapat bahwa nilai *percent yield* maksimum yang dialami pipa pada kedalaman maksimum dan minimum serta dari tiga arah datang gelombang telah memenuhi kriteria industri.

d. Analisis Free Span

1. Analisis Statik

Analisis statik dilakukan dalam keadaan pipa dikenai gelombang dan arus serta beban akibat berat pipa itu sendiri.

Tabel 5. Hasil rekapitulasi analisis statik

Case	Panjang Bentang Bebas (m)
1	15,4
2	15,5

Case	Panjang Bentang Bebas (m)
3	105
4	110
5	150
6	150

2. Analisis Dinamik

Tabel 6. Hasil analisis dinamik

Kriteria	Panjang Bentang Bebas (m)		
	Operasi	Hidrotes	Instalasi
Analisis Dinamik In-line	6,4	10,2	10,2
Analisis Dinamik Cross-flow	8,2	11,8	13,1
Panjang Bentang Bebas Izin	6,4		

Berdasarkan **Tabel 6**, nilai panjang bentang bebas maksimum sebesar 6,4 meter akibat *vortex induced vibration* (VIV) arah *in-line* dalam kondisi operasi. Setelah itu, dilakukan pemeriksaan kriteria ULS untuk mengecek apakah struktur pipa mengalami kegagalan dengan panjang bentang bebas tersebut.

3. Kriteria ULS

Berikut rekapitulasi hasil pengecekan *local buckling* akibat beban kombinasi pada *free span* yang sebesar 6,4 meter.

Tabel 7. Rekapitulasi hasil pemeriksaan kriteria ULS

Case	Rumus	Nilai
1	Persamaan (5)	$0,531 \leq 1$ OK
2	Persamaan (5)	$0,525 \leq 1$ OK
3	Persamaan (5)	$0,106 \leq 1$ OK
4	Persamaan (5)	$0,106 \leq 1$ OK
5	Persamaan (4)	$0,084 \leq 1$ OK
6	Persamaan (4)	$0,083 \leq 1$ OK

Berdasarkan **Tabel 7**, pipa dengan ketebalan 7,1 mm dan panjang bentang bebas maksimum sebesar **6,4 meter** memenuhi kriteria ULS.

e. Desain dan Analisis Struktur Penyangga dan Tegangan pada Persilangan Pipa

Pada Tugas Akhir ini, *support structure* didesain dengan dimensi sebagai berikut:

Tabel 8. Dimensi struktur penyangga

Dimensi	Struktur			
	1	2	3	4
L_{base} [m]	1	1	1	1
B_{base} [m]	4	4	4	4
H_{base} [m]	0,2	0,2	0,2	0,2
L_{stem} [m]	1	1	1	1
B_{stem} [m]	1	1	1	1
H_{stem} [m]	1	0,79	0,48	0,11
L_{barrier} [m]	0,2	0,2	0,2	0,2
B_{barrier} [m]	0,3	0,3	0,3	0,3
Volume [m³]	1,92	1,71	1,4	1,03

Jarak antar struktur *concrete sleeper* sebesar 6 meter yang berada di dalam rentang izin bentang bebas.

Kemudian struktur penyangga diuji stabilitasnya dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 9. Analisis kestabilan penyangga

Pemeriksaan Stabilitas	Struktur			
	1	2	3	4
Vertikal	2,97 > 1,1	2,97 > 1,1	2,97 > 1,1	2,97 > 1,1
Overtur ning	12,0 > 1,5	13,97 > 1,5	18,52 > 1,5	31,87 > 1,5
Sliding	3,32 > 1,5	3,26 > 1,5	3,15 > 1,5	2,99 > 1,5
Bearing capacity	3,08 > 3	3,32 > 3	3,8 > 3	4,72 > 3

Analisis penurunan tanah segera terjadi pada kondisi *hydrotest* sedangkan analisis penurunan tanah konsolidasi terjadi pada kondisi operasi. Penurunan tanah total adalah jumlah penurunan tanah segera saat *hydrotest* dan penurunan tanah konsolidasi kondisi operasi.

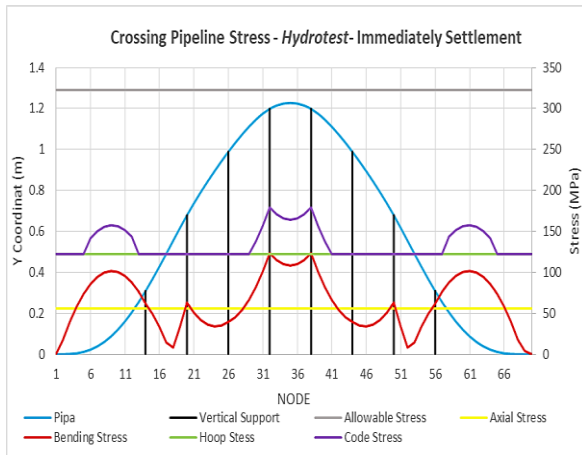
Tabel 10. Penurunan tanah *immediately* struktur penyangga

Struktur	<i>Immediately Settlement</i> [mm]
1	1,941
2	1,752
3	1,473
4	1,141

Tabel 11. Penurunan tanah *consolidation* struktur penyangga

Struktur	<i>Immediately Settlement</i> [mm]	<i>Consolidation Settlement</i> [mm]	<i>Total Settlement</i> [mm]
1	1,941	246,587	248,528
2	1,752	231,871	233,623
3	1,473	207,98	209,453
4	1,141	175,1	176,241

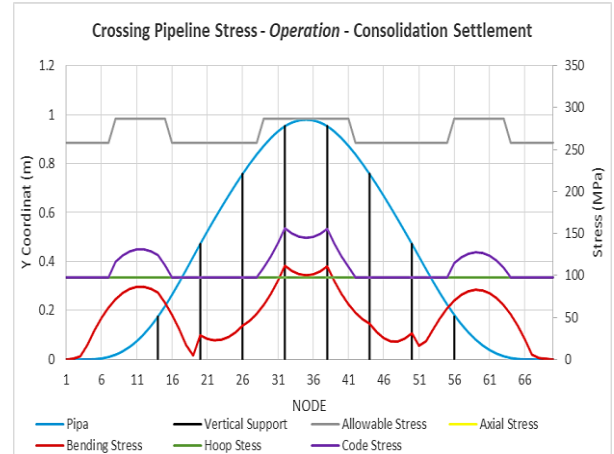
Setelah itu dilakukan analisis tegangan persilangan pipa menggunakan CAESAR II untuk kondisi hidrotetes dengan penurunan tanah segera dan kondisi operasi dengan penurunan tanah total (konsolidasi dan segera).



Gambar 3. Grafik tegangan pipa akibat *support* tambahan penurunan segera *hydrotest*

Tabel 12. Tegangan maksimum bentang pipa *support* tambahan penurunan segera kondisi *hydrotest*

<i>Stress Type</i>	<i>Value [MPa]</i>	<i>Node</i>
<i>Allowable Stress (0,9 SMYS)</i>	322,67	<i>along the pipeline</i>
<i>Longitudinal Code Stress</i>	179,23	32 dan 38
<i>Hoop Code Stress</i>	122,29	<i>along the pipeline</i>
<i>Axial Stress</i>	55,88	<i>along the pipeline</i>
<i>Bending Stress</i>	123,35	32 dan 38
<i>Torsion Stress</i>	0	-



Gambar 4. Grafik tegangan pipa akibat *support* tambahan penurunan konsolidasi kondisi operasi

Tabel 13. Tegangan maksimum bentang pipa *support* tambahan penurunan konsolidasi kondisi operasi

<i>Stress Type</i>	<i>Value [MPa]</i>	<i>Node</i>
<i>Hoop Allowable Stress</i>	258,13	<i>along the pipeline</i>
<i>Longitudinal Allowable Stress</i>	286,82	<i>along the pipeline</i>
<i>Longitudinal Code Stress</i>	156,36	32 dan 38
<i>Hoop Code Stress</i>	97,72	<i>along the pipeline</i>
<i>Axial Stress</i>	44,65	<i>along the pipeline</i>
<i>Bending Stress</i>	111,71	32 dan 38
<i>Torsion Stress</i>	0	-

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Tebal dinding pipa berdiameter 168,275 mm, sebesar 6,98 mm. Nilai tebal dinding pipa kemudian disesuaikan dengan katalog

yang disediakan standar API 5L sehingga tebal dinding pipa desain adalah 7,1 mm.

2. Dari hasil perhitungan dan analisis on-bottom stability berdasarkan standar DNV-RP-F109, tebal lapisan beton desain sebesar 41 mm.
3. Iterasi konfigurasi *roller*, *tensioner* dan *stinger* dengan analisis statik maupun dinamik yang telah dilakukan telah menghasilkan konfigurasi optimum yang menyatakan bahwa pipa layak untuk diinstalasi.
4. Panjang bentang bebas maksimum yang diizinkan untuk penggeleran pipa bawah laut yang telah dianalisis berdasarkan standar DNV-RP-F105 adalah 6,4 m.
5. Pemeriksaan kegagalan stabilitas *vertical*, *overturning moment*, *sliding*, dan *bearing capacity* telah dilakukan dan seluruhnya bernilai lebih dari 1,5 sehingga struktur dapat dipastikan stabil dan aman.
6. Tinggi desain struktur penyangga utama sebesar 1,2 meter yang memenuhi jarak aman terhadap pipa eksisting dan penurunan tanah yang terjadi.
7. Pemodelan dan analisis tegangan setelah terjadinya *settlement* menggunakan CAESAR II menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum terjadi pada kondisi operasi sebesar 308,25 MPa yang masih berada dibawah *allowable stress* sebesar 322,67 MPa

Saran yang dapat diberikan yaitu, pemodelan *lay barge* pada MAXSURF dilakukan sesuai dengan geometri kapal yang sebenarnya untuk mendapatkan RAO yang lebih akurat. Pelajari secara komprehensif mengenai input, proses perhitungan, dan output dari perangkat lunak yang akan digunakan sebelum melakukan analisis agar mendapatkan hasil yang lebih akurat dan kesalahan dapat diminimalisir.

DAFTAR PUSTAKA

- Bai, Y., dan Bai, Q. (2014): *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*, Elsevier, Oxford.
- British Petroleum (2019): *BP Statistical Review of World Energy*, British Petroleum, London.
- Das, B. M. (2011): *Principles of Foundation Engineering*, Cengage Learning, Stamford.
- Det Norske Veritas (2006): *Free Spanning Pipeline* (DNV-RP-F105), Det Norske Veritas, Oslo.
- Det Norske Veritas (2007): *Submarine Pipeline Systems* (DNV-OS-F101), Det Norske Veritas, Oslo.
- Det Norske Veritas (2010): *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines* (DNV-RP-F109), Det Norske Veritas, Oslo.
- Guo, B., Song, S., Chacko, J., dan Ghalambor, A. (2005): *Offshore Pipelines*, Elsevier, Oxford.