

Desain Bentang Bebas untuk wilayah *Near Shore* dan *Shore Approach* dari *Export Trunkline* Anjungan Stupa menuju Terminal Senipah, Blok Mahakam Selatan

Iedhamsyah Fitra Samudra

Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa 10 Bandung 40132, E-mail: iedhamsyahfs@gmail.com

Rildova

Kelompok Keahlian Teknik Lepas Pantai, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa 10 Bandung 40132, E-mail: rildova@ocean.itb.ac.id

1. Pendahuluan

Dalam kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi dan gas alam di lautan diperlukan fasilitas anjungan lepas pantai, salah satunya jaringan pipa (*pipeline*). Sistem jaringan pipa bawah laut dibagi-bagi menjadi beberapa jenis sesuai keperluannya dalam mentransmisikan konten, seperti *flowline*, *export-trunkline*, dan *riser*. Ketidakrataan dasar laut dapat menimbulkan bentang bebas (*free span*) pada pipa. Panjang bentang bebas yang melebihi batas aman dapat menyebabkan kerusakan pada pipa.

Dalam tugas akhir ini, penulis memilih untuk melakukan desain terhadap salah satu jenis pipa yang disebut di atas, yaitu *export-trunkline*. *Export-trunkline* adalah jenis jaringan pipa yang mengalirkan fluida dari anjungan ke fasilitas darat. Pada tugas akhir ini, dilakukan desain bentang bebas (*free span*) pada pipa bawah laut yang terdapat pada proyek pembangunan lapangan minyak dan gas di wilayah blok Mahakam Selatan, Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia.

Dalam melakukan analisis terhadap jaringan pipa untuk wilayah dekat pantai (*shore approach*) dilakukan perhitungan transformasi gelombang air laut terlebih dahulu untuk wilayah jalur jaringan pipa tersebut.

Pada pelaksanaan di lapangan, pipa pada umumnya diletakkan di dasar laut, dimana dasar laut memiliki kontur yang tidak rata. Ketidakrataan dasar laut dapat menimbulkan bentang bebas (*free span*) pada pipa. Panjang bentang bebas yang melebihi batas aman dapat menyebabkan kerusakan pada pipa.

Sementara itu, untuk mencegah terjadinya kegagalan akibat beban yang timbul akibat bentang bebas, dilakukan analisis terhadap bentang bebas pada pipa tersebut. Dalam melakukan analisis bentang bebas tersebut,

digunakan standar DNV-RP-F105, *Free Spanning Pipelines*. Proses desain bentang bebas menurut standar tersebut akan dimulai dari pengecekan tebal pipa, pengecekan *screening fatigue*, dan pengecekan kriteria *Ultimate Limit State* (ULS).



Gambar 1 - Wilayah Lokasi Blok Mahakam Selatan, Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia

2. Dasar Teori

2.1 Analisis Pendangkalan dan Gelombang Pecah

Parameter gelombang dalam analisis pendangkalan, sepanjang penjarannya menuju *breaker zone* dihitung melalui persamaan (1) dan (2).

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \sqrt{\frac{c_{g,0}}{c_g}} \quad (1)$$

$$c_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (2)$$

keterangan:

K_s = koefisien pendangkalan

H_0 = tinggi gelombang awal

H = tinggi gelombang setelah mengalami efek pendangkalan

$c_{g,0}$ = cepat rambat grup gelombang

c_g = cepat rambat grup gelombang setelah mengalami efek pendangkalan

k = bilangan gelombang = $2\pi/L$

L = panjang gelombang

d = kedalaman perairan

Parameter gelombang pecah terdiri dari *breaker depth index* (γ_b) dan *breaker height index* (Ω_b), yang merupakan parameter tanpa dimensi yang dituliskan dalam persamaan (3) dan (4).

$$\gamma_b = \frac{H_b}{d_b} \quad (3)$$

$$\Omega_b = \frac{H_b}{H_0} \quad (4)$$

keterangan:

H_b = tinggi gelombang pecah

d_b = kedalaman gelombang pecah

2.2 Pengecekan Tebal Dinding Pipa

2.2.1 Tebal Dinding Pipa Karakteristik

Nilai tebal dinding pipa untuk perhitungan tahanan berdasarkan DNV-OS-F101 dihitung berdasarkan ketentuan pada *Section 5 C400* nomor 401 dan 402 Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 – Nilai Tebal Dinding Pipa Karakteristik

	Sebelum operasi	Operasi
t_1	$t - t_{fab}$	$t - t_{fab} - t_{ca}$
t_2	T	$t - t_{ca}$

keterangan:

t = tebal dinding nominal pipa

t_{fab} = tebal toleransi fabrikasi

t_{ca} = tebal *corrosion allowance*

2.2.2 Kriteria *Pressure Containment*

Kriteria *pressure containment* harus dipenuhi untuk menahan tekanan internal yang ditimbulkan pada keadaan pengujian sistem dan operasi. Dalam DNV-OS-F101, ketentuan perhitungan *pressure containment* diterangkan dalam *Section 5 D200*, yang ditulis dalam persamaan (5) berikut.

$$p_b(t) = \frac{2t}{D-t} f_{cb} \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Dengan syarat yang harus dipenuhinya ditulis dalam persamaan (6) dan (7).

$$f_{cb} = \text{Min} \left[f_y; \frac{f_u}{1.15} \right] \quad (6)$$

$$p_{li} - p_e \leq \text{Min} \left(\frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}}; \frac{p_{lt}}{\alpha_{spt}} - p_e; \frac{p_h \cdot \alpha_U}{\alpha_{mpt}} \right) \quad (7)$$

keterangan:

$p_b(t)$ = *pressure containment resistance*

D = diameter luar nominal pipa

f_y = *specified minimum yield stress*

f_u = *specified minimum tensile strength*

p_{li} = tekanan insidental pipa

p_e = tekanan eksternal

p_{li} = *local system test pressure*

p_{lt} = *mill test pressure*

2.2.3 Kriteria *External Over Pressure Only*

Kriteria ini dijelaskan secara detail pada *Section 5D 400*. Kriteria ini harus dipenuhi pada pipa untuk mencegah kegagalan akibat tekanan eksternal maksimum saat tekanan internal minimum. Kriteria tersebut ditulis dalam persamaan (8).

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_c(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \quad (8)$$

Dengan syarat yang harus dipenuhinya ditulis dalam persamaan (9).

$$(p_c(t) - p_{el}(t)) \cdot (p_c(t)^2 - p_p(t)^2) = p_c(t) \cdot p_{el}(t) \cdot p_p(t) \cdot f_o \cdot \frac{D}{t} \quad (9)$$

keterangan:

p_c = tekanan runtuh karakteristik

p_{min} = tekanan internal minimum, biasanya bernilai 0

p_{el} = tekanan runtuh elastis

p_p = tekanan runtuh plastis

f_o = ovalitas/kelengkungan

2.2.4 Kriteria *Propagation Buckling*

Kriteria *propagation buckling* tidak akan terjadi kecuali *local buckling* telah terjadi, dapat dituliskan dalam persamaan (10) berikut.

$$p_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \left(\frac{t_2}{D}\right)^{2.5} \quad (10)$$

Dengan syarat yang harus dipenuhinya ditulis dalam persamaan (11) berikut.

$$p_e - p_{min} < \frac{p_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (11)$$

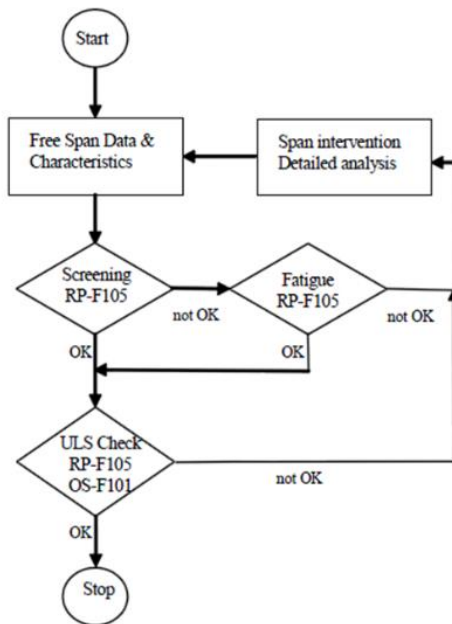
keterangan:

p_{pr} = tekanan propagasi

2.3 Analisis Bentang Bebas Pipa Bawah Laut

2.3.1 Tahapan Analisis Bentang Bebas

Dalam DNV-RP-F105, ditetapkan tahapan yang harus dilalui dalam analisis bentang bebas pipa bawah laut. Tahapan tersebut dapat dilihat dalam .



Gambar 2 – Metodologi Analisis Bentang Bebas Pipa berdasarkan DNV-RP-F105

2.3.2 Analisis Struktur

Perhitungan pada bagian ini mencakup penentuan beberapa faktor keamanan yang akan digunakan dan juga beberapa parameter lainnya, seperti kekakuan selimut beton, gaya aksial efektif, panjang bentang efektif, defleksi dan momen lentur statis, serta frekuensi natural pipa.

Faktor kekakuan beton (*Concrete Stiffness Factor/CSF*) didefinisikan dalam persamaan (12).

$$CSF = k_c \left(\frac{E_{conc} \cdot I_{conc}}{E \cdot I} \right)^{0.75} \quad (12)$$

keterangan:

k_c = konstanta empiris akibat deformasi

E_{conc} = modulus elastisitas beton

I_{conc} = inersia penampang selimut beton

E = modulus elastisitas baja

I = inersia penampang pipa baja

Gaya aksial efektif merupakan kuantitas yang cukup penting dalam perhitungan sebuah karakteristik bentak bebas, didefinisikan dalam persamaan (13).

$$S_{eff} = N_{tr} - p_i \cdot A_i + p_e \cdot A_e \quad (13)$$

keterangan:

S_{eff} = gaya aksial efektif

N_{tr} = gaya aksial yang bekerja pada dinding pipa

A_e = luas permukaan eksternal pipa

A_i = luas permukaan internal pipa

Sementara itu, defleksi statik dapat dihitung dengan persamaan berikut (14).

$$\delta = C_6 \cdot \frac{W_{sub} \cdot L_{eff}^4}{E \cdot I \cdot (1 + CSF)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (14)$$

keterangan:

W_{sub} = massa tercelup pipa

P_{cr} = beban *buckling* kritis

Selain itu, momen lentur statis dituliskan dalam persamaan (15) berikut.

$$M_{static} = C_5 \cdot \frac{W_{sub} \cdot L_{eff}^2}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (15)$$

Adapun koefisien kondisi perletakan dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2 – Koefisien Kondisi Perletakan

Koefisien	<i>Pinned-Pinned</i>	<i>Fixed-Fixed</i>	<i>Single Span on Seabed</i>
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1	4	4
C_3	0.8	0.2	0.4
C_4	4.93	14.1	$Shoulder = 14.1 \cdot \left(\frac{L}{L_{eff}}\right)^2$ $Midspan = 8.60$
C_5	1/8	1/12	$Shoulder =$

Koefisien	<i>Pinned-Pinned</i>	<i>Fixed-Fixed</i>	<i>Single Span on Seabed</i>
			$\frac{1}{18 \cdot \left(\frac{L_{eff}}{L}\right)^2 - 6}$ <i>Midspan</i> = 1/24
C₆	5/384	1/384	1/384

Persamaan untuk mencari frekuensi natural pipa arah *in-line* dan *cross-flow* masing – masing dapat dihitung dengan persamaan (16) dan (17) berikut.

$$f_{n,IL} = C_1 \cdot \sqrt{1 + CSF} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L_{eff,IL}^4} \cdot \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr,IL}} + C_3 \cdot \left(\frac{\delta_{IL}}{D_{tot}}\right)^2\right)} \quad (16)$$

$$f_{n,CF} = C_1 \cdot \sqrt{1 + CSF} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{m_e \cdot L_{eff,CF}^4} \cdot \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr,CF}} + C_3 \cdot \left(\frac{\delta_{CF}}{D_{tot}}\right)^2\right)} \quad (17)$$

Dengan nilai beban *buckling* kritis dituliskan dalam persamaan (18).

$$P_{cr} = (1 + CSF) \cdot C_2 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{E \cdot I}{L_{eff}^2}\right) \quad (18)$$

2.3.3 Kriteria Screening Fatigue

Analisis *screening* merupakan kemungkinan terjadinya *fatigue* yang diakibatkan adanya osilasi pada suatu bentang bebas yang menerima beban lingkungan dan operasi tertentu. Kriteria yang harus dipenuhi dalam *screening fatigue* ini adalah frekuensi natural *in-line* dan frekuensi natural *cross flow*.

Kriteria *screening* arah *in-line* dirumuskan dalam persamaan (19).

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100year}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (19)$$

Sedangkan kriteria *screening* arah *cross-flow* dirumuskan dalam persamaan (20).

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100year} + U_{w,1year}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \quad (20)$$

keterangan:

$V_{R,onset}^{IL}$ = Kecepatan arah *in-line onset* tereduksi

$V_{R,onset}^{CF}$ = Kecepatan arah *cross-flow onset* tereduksi

$U_{c,100year}$ = Kecepatan arus periode ulang 100 tahun

$U_{w,1year}$ = Kecepatan partikel air akibat gelombang periode ulang 1 tahun

Jika kriteria *screening* arah *in-line* tidak terpenuhi maka perlu dilakukan *full in-line VIV fatigue analysis*. Jika kriteria *screening* arah *cross-flow* tidak terpenuhi maka perlu dilakukan *full in-line VIV fatigue analysis* dan *full cross-flow VIV fatigue analysis*.

2.3.7 Kriteria Ultimate Limit State (ULS)

Analisis kriteria ULS merupakan pengecekan kondisi batas kekuatan pipa terhadap gaya internal atau gaya eksternal yang bekerja pada pipa dikombinasikan dengan momen lentur dan gaya aksial efektif.

Pipa yang terkena *bending moment*, *effective axial force*, dan tekanan eksternal berlebih dapat ditentukan dengan persamaan (21).

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \gamma_m \cdot \frac{\gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (21)$$

Pipa yang terkena *bending moment*, *effective axial force*, dan tekanan internal berlebih dapat ditentukan dengan persamaan (22).

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \gamma_m \cdot \frac{\gamma_{SC} \cdot S_{Sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (22)$$

keterangan:

S_p = kapasitas aksial plastis

M_p = kapasitas momen plastis

3. Data dan Pengolahan

3.1 Deskripsi Proyek

Untuk menghubungkan Anjungan Stupa Utama menuju Terminal Senipah, dibangun jaringan pipa bawah laut sepanjang 68.6 km. Jaringan pipa bawah laut ini akan mentransportasikan gas yang dihasilkan dari Lapangan Mahakam Selatan ke Terminal Senipah, yang merupakan *Onshore Receipt Facility* (ORF).



Gambar 3 – Denah Jaringan Pipa Export-Trunkline Anjungan Stupa menuju Terminal Senipah, Blok Mahakam Selatan

3.2 Data Proyek

3.2.1 Data Pipa Bawah Laut

Data pipa bawah laut berikut didapat dari data Spesifikasi dan Desain pipa untuk pengembangan Blok Mahakam Selatan, Indonesia.

Tabel 3 – Data Pipa Bawah Laut

Parameter	Pipa ukuran 24"
Grade material	API 5L X-65
SMYS/SMTS (MPa)	448/531
Modulus Young (MPa)	207000
Rasio Poisson	0.3
Koefisien Ekspansi Termal ($^{\circ}\text{C}$)	11.7×10^{-6}
Densitas (kg/m^3)	7850
Konduktivitas termal (W/m K)	45
Kapasitas kalor (J/kg°)	880
Metode fabrikasi	SAWL
Panjang joint pipa rata-rata (m)	12.20

3.2.2 Data Coating

Data coating berikut didapat dari data Spesifikasi dan Desain pipa untuk pengembangan Blok Mahakam Selatan, Indonesia.

Untuk melindungi pipa dari korosi akibat dari kondisi lingkungan laut yang korosif, pipa perlu dilindungi oleh lapisan-lapisan anti korosi (*anti-*

corrosion coating). Lapisan beton ini berfungsi sebagai pemberat pada pipa bawah laut agar pipa tetap stabil di dasar laut.

Tabel 4 – Data Anti-corrosion coating Bawah Laut

Lokasi (untuk bagian jaringan pipa bawah laut)	Jenis Coating
Current section	3.2mm of 3LPP
Field joint	PP shrinkable sleeve + infill (PU or injected PP)

Tabel 5 – Data lapisan-lapisan lain yang digunakan

Material	Densitas
PU	1100 kg/m^3
3-LPP	900 kg/m^3
Beton	3050 kg/m^3 (densitas maksimum)
Tanah	1160 kg/m^3
Elastomeric-based rubber	1500-1800 kg/m^3

Tabel 6 – Tebal concrete coating pipa wilayah shore approach

Section (KPfrom – KPto)	Concrete Coating Thickness (mm)
KP50.0 – KP57.0	60
KP57.0 – KP61.0	60
KP57.0 – KP61.0 (considering settlement along this section)	70
KP61.0 – KP68.0	60

3.2.3 Data Operasional

Data operasional adalah data yang digunakan untuk mengidentifikasi pembebanan pada struktur, seperti desain tekanan, tekanan maksimum, temperatur maksimum, dan lain-lain.

Data lingkungan berikut didapat dari data Spesifikasi dan Desain pipa untuk pengembangan Blok Mahakam Selatan, Indonesia.

Tabel 7 – Data Operasional Pipa

Pressure		
Hydrotest	Topsides, Riser	98. barg
	Pipeline	87.5 barg
Design		70.0 barg
Maximum allowable operating		70.0 barg
Maximum Operating		63.6 barg
Temperature		
Maximum Design		120 degC
Minimum Design		-29 degC
Maximum Operating		105 degC
Minimum Operating		N/A
Black body temperature		85 degC
Fluid Density		
Operation		15 to 82 kg/m^3

Hydrotest	1026 kg/m ³
-----------	------------------------

3.2.5 Data Lingkungan

Dalam tugas akhir ini, desain jarak dari pipa ke dasar palung (*seabed gap*) adalah 5 sentimeter untuk setiap KP dimana akan didesain panjang bentang bebasnya. Untuk desain bentang bebas yang dilakukan pada kedalaman perairan kurang dari 13 meter, kedalaman palung yang didesain sebesar 3 meter. Hal tersebut dilakukan karena untuk desain yang dilakukan untuk kedalaman di bawah 13 meter, dilakukan penimbunan (*burying*) terhadap jaringan pipa. Selain itu, perhitungan desain bentang bebas hanya dilakukan untuk kondisi instalasi pada jaringan pipa yang berada pada kedalaman perairan di bawah 13 meter.

Data lingkungan berikut didapat dari data Spesifikasi dan Desain pipa untuk pengembangan Blok Mahakam Selatan, Indonesia.

Tabel 8 – Data Gelombang Wilayah *Shore Approach*

Parameter	Unit	1-year Return Period	100-year Return Period
Maximum Individual Wave Height, H_{max}	M	3.2	4.9
Significant Wave Height, H_s	M	1.7	2.7
Peak Period, T_p	S	5.2	5.9

Tabel 9 – Data Perioda Zero-Up Crossing Wilayah *Shore Approach*

Section (KPfrom – KPto)	Unit	1-year Return Period	100-year Return Period
KP50.0 – KP57.0	m	5.71	6.24
KP57.0 – KP61.0	m	5.38	5.93
KP61.0 – KP68.0	m	5.11	5.62

Tabel 10 – Data Arus Laut Mahakam Selatan

Perioda Ulang	Offshore	Shore Approach
1 tahun	0.7 m/s	1 m/s
100 tahun	0.7 m/s	1 m/s

Tabel 11 – Data Properti Air Laut

Parameter	Kedalaman perairan	Minimum	Rata-rata	Maximum
Temperatur air laut (°C)	40 m	26.8	27.7	28.6
	50 m	N/A	25.0	N/A
	60 m	N/A	23.5	N/A
Densitas air laut (kg/m ³)	1026 kg/m ³			

Tabel 12 – Data *Marine Growth*

Rentang kedalaman perairan	Ketebalan <i>marine growth</i>
Di atas +2.0 m/LAT	0 mm
+2.0 m/LAT sampai -15.0 m/LAT	100 mm
-15.0 m/LAT sampai -30.0 m/LAT	50 mm
-30.0 m/LAT sampai -50.0 m/LAT	25 mm
-50.0 m/LAT sampai <i>mud line</i>	0 mm

3.2.6 Data Tanah

Kondisi tanah sepanjang rute pipa di dasar laut dari Anjungan Stupa sampai *landfall point* dirangkum dalam Tabel 13. Untuk wilayah Mahakam Selatan, bagian paling atas dari dasar perairan merupakan tanah lunak sampai lempung kelanauan (*silty clay*).

Data tanah berikut didapat dari data Spesifikasi dan Desain pipa untuk pengembangan Blok Mahakam Selatan, Indonesia.

Tabel 13 – Data Tanah untuk wilayah Mahakam Selatan

Parameter	Location	Lower Bound	Mean	Upper Bound
Submerged unit weight at mudline (γ') (kN/m ³)	Main Stupa – Senipah	2.05	5.81	4.95
	East Mandu – Wye	2.22	4.31	6.40
	West Stupa – Main Stupa	2.23	5.81	9.39
Undrained Shear Strength at mudline (S_u) (kPa)	Main Stupa – Senipah	0.63	2.91	5.19
	East Mandu – Wye	0.81	5.61	10.41
	West Stupa – Main Stupa	2.11	3.58	5.06

3.3 Pengolahan Data Gelombang

3.3.1 Perhitungan Transformasi Gelombang Akibat *Shoaling*

Perhitungan efek pendangkalan ini dimulai dari perhitungan panjang gelombang yang terbentuk pada titik awal desain bentang bebas (KP50.0),

kemudian dilanjutkan dengan menghitung cepat rambat gelombang. Selanjutnya, setelah didapatkan cepat rambat gelombang pada 2 titik awal peninjauan (KP50.0 dan KP 51.0), akan didapatkan tinggi gelombang pada titik selanjutnya (KP51.0). Tinggi gelombang rencana yang digunakan adalah tinggi gelombang signifikan untuk periode ulang 1 dan 100 tahun. Tinggi gelombang rencana tersebut dianggap berada di KP50.0, kemudian gelombang merambat sampai ke wilayah *breaker zone*.

Selain itu, dilakukan perkiraan tinggi gelombang pecah dan posisi kedalaman gelombang pecah dalam tugas akhir ini. Pengestimasi parameter tersebut dilakukan agar dapat ditentukan sampai wilayah mana perhitungan efek pendangkalan akan dilakukan.

Dari hasil analisis *shoaling* tersebut, didapat tinggi dan kedalaman gelombang pecah untuk periode ulang 1 tahun masing-masing **1.775 m** dan **2.267 m**, sedangkan untuk periode ulang 100 tahun masing-masing **2.703 m** dan **3.461 m**.

Berdasarkan hasil di atas, untuk perhitungan *shoaling* dengan menggunakan data gelombang 1 tahun hanya akan dikerjakan sampai KP 66.500. Hal tersebut karena kedalaman di KP66.600 adalah sebesar 1.82 meter. Sedangkan untuk perhitungan *shoaling* dengan menggunakan data gelombang 100 tahun, hanya akan dikerjakan sampai KP65.0. Hal tersebut karena kedalaman di KP66.0 adalah sebesar 3 meter. Sehingga, diputuskan bahwa desain bentang bebas akan dilakukan sampai KP66.500.

Tabel 14 – Data Tinggi dan Panjang Gelombang untuk KP50.0 sampai KP66.0

Kilometer Post (KP)	Kedalaman Perairan (m)	Tinggi Gelombang (m)		Panjang Gelombang (m)	
		Periode Ulang 100 Tahun	Periode Ulang 1 Tahun	Periode Ulang 100 Tahun	Periode Ulang 1 Tahun
50.0	30	2.7	1.7	49.281	38.281
51.0	29	2.698	1.7	49.281	38.281
52.0	27	2.692	1.699	49.281	38.281
53.0	25	2.682	1.697	49.281	38.281
54.0	23	2.674	1.695	49.011	38.281
55.0	22	2.666	1.693	48.936	38.281
56.0	20.5	2.653	1.688	48.782	38.281
57.0	19.7	2.644	1.685	48.676	38.281
58.0	19	2.636	1.684	48.564	38.135
59.0	18	2.623	1.679	48.372	38.08

Kilometer Post (KP)	Kedalaman Perairan (m)	Tinggi Gelombang (m)		Panjang Gelombang (m)	
		Periode Ulang 100 Tahun	Periode Ulang 1 Tahun	Periode Ulang 100 Tahun	Periode Ulang 1 Tahun
60.0	17	2.608	1.673	48.13	38.005
61.0	15.5	2.583	1.662	47.654	37.839
62.0	11	2.503	1.607	44.935	35.672
63.0	9.7	2.485	1.588	43.606	35.816
64.0	9	2.478	1.578	42.75	35.295
65.0	8.5	2.475	1.571	42.069	34.864
66.0	3		1.628		24.648

Tabel 15 – Data Tinggi dan Panjang Gelombang untuk KP66.0 sampai KP66.700

Kilometer Post (KP)	Kedalaman Perairan (m)	Tinggi Gelombang Periode Ulang 1 Tahun (m)	Panjang Gelombang Periode Ulang 1 Tahun (m)
66.100	2.855	1.638	24.149
66.200	2.71	1.649	23.63
66.300	2.565	1.662	23.088
66.400	2.42	1.676	22.522
66.500	2.275	1.692	21.93

4. Desain dan Analisis

4.1 Pemeriksaan Tebal Dinding Pipa

Pemeriksaan tebal dinding pipa dimulai dengan pemeriksaan kriteria *pressure containment*. Pemeriksaan kriteria *pressure containment* adalah pemeriksaan terhadap kekuatan dinding pipa baja terhadap tekanan internal yang terjadi di dalam pipa.

Pemeriksaan kedua dari tebal dinding pipa adalah pemeriksaan kriteria *system collapse*. Pada pemeriksaan ini, dilakukan pemeriksaan tekanan eksternal pipa terhadap kekuatan dinding pipa.

Pemeriksaan berikutnya adalah pemeriksaan untuk kriteria *propagation buckling*. Pemeriksaan pada bagian ini dilakukan untuk tekanan eksternal terhadap tekanan propagasi. Tekanan propagasi adalah tekanan dimana jika tekanan eksternal pipa mencapai tekanan propagasi tersebut, maka akan terjadi *buckling* yang sifatnya merambat ke bagian pipa yang lain.

4.2 Screening Fatigue

Analisis *screening* merupakan kemungkinan terjadinya *fatigue* yang diakibatkan adanya osilasi pada suatu bentang bebas yang menerima beban

lingkungan dan operasi tertentu. Sesuai yang sudah dibahas dalam Bab 2, dalam *screening fatigue* ini perlu diketahui apakah frekuensi natural pipa arah *in-line* dan *cross-flow* memenuhi syarat dalam persamaan (19) dan (20).

Untuk dapat memenuhi persamaan (19) dan (20) tersebut, perlu terlebih dahulu dicari frekuensi natural arah *in-line* dan arah *cross-flow*. Sementara itu, frekuensi natural arah *in-line* dan arah *cross-flow* merupakan fungsi dari panjang bentang bebas. Oleh karena itu, dalam tugas akhir ini ditentukan terlebih dahulu panjang bentang bebas yang diinginkan. Terkait dengan panjang bentang bebas yang akan didesain, nilai panjang bentang bebas desain yang diizinkan akan diiterasi hingga dapat dipenuhi kriteria *screening fatigue* arah *in-line* dan *cross-flow*.

Berikut ini ditampilkan nilai bentang bebas tiap KP hasil pengecekan kriteria *screening fatigue* saat kondisi operasional, *hydrotest*, dan instalasi.

Tabel 16 – Data Tinggi dan Panjang Gelombang untuk KP66.0 sampai KP66.700

KP	Kedalaman Perairan (m)	Panjang Bentang Bebas (m)		
		Kondisi Operasional	Kondisi <i>Hydrotest</i>	Kondisi Instalasi
50.0	30	19.9	20.2	22.1
51.0	29	19.8	20.1	22
52.0	27	19.7	20.1	21.9
53.0	25	19.4	20	21.8
54.0	23	19.2	19.9	21.7
55.0	22	19	19.8	21.6
56.0	20.5	18.8	19.7	21.4
57.0	19.7	18.6	19.6	21.3
58.0	19	18.5	19.5	21.2
59.0	18	18.2	19.4	21
60.0	17	18	19.2	20.8
61.0	15.5	17.6	19	20.5

4.3 Pemeriksaan Kriteria ULS

Pada pemeriksaan bagian ini, dilakukan pemeriksaan terhadap kriteria beban terkombinasi (*combined loading criteria – load controlled loading*) untuk kondisi *internal overpressure* dan *external overpressure*.

Untuk kriteria *internal overpressure*, harus memenuhi kriteria berikut.

$$\left\{ \gamma_{sc} \cdot \gamma_m \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_{sc} \cdot \gamma_m \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2)} \right)^2 \leq 1$$

Sedangkan untuk kriteria *external overpressure*, harus memenuhi kriteria berikut.

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \gamma_m \cdot \frac{\gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1$$

4.3 Hasil Perhitungan Desain

Perhitungan desain dilakukan untuk kondisi operasional, *hydrotest*, dan instalasi pada semua KP yang akan didesain bentang bebasnya. Berikut disajikan hasil perhitungan desain bentang bebas desain yang diizinkan untuk semua titik KP yang telah ditinjau untuk kondisi operasional, *hydrotest*, dan instalasi, yang dapat dilihat dalam Tabel 17 dan 18.

Tabel 17 Panjang Bentang Bebas Desain yang diizinkan untuk KP50.0 sampai KP61.0

KP	Kedalaman perairan (m)	Panjang bentang bebas (m)		
		Operasional	<i>Hydrotest</i>	Instalasi
50.0	30	19.9	20.2	22.1
51.0	29	19.8	20.1	22
52.0	27	19.7	20.1	21.9
53.0	25	19.4	20	21.8
54.0	23	19.2	19.9	21.7
55.0	22	19	19.8	21.6
56.0	20.5	18.8	19.7	21.4
57.0	19.7	18.6	19.6	21.3
58.0	19	18.5	19.5	21.2
59.0	18	18.2	19.4	21
60.0	17	18	19.2	20.8
61.0	15.5	17.6	19	20.5

Tabel 18 Panjang Bentang Bebas Desain yang diizinkan untuk KP58.0 - KP61.0 dengan Tebal Selimut Beton 70 mm

KP	Kedalaman Perairan (m)	Panjang Bentang Bebas (m)		
		Kondisi Operasional	Kondisi <i>Hydrotest</i>	Kondisi Instalasi
58.0	19	18.6	19.6	21.3
59.0	18	18.4	19.5	21.1
60.0	17	18.1	19.4	20.9
61.0	15.5	17.8	19.1	20.6

Tabel 19 Panjang Bentang Bebas Desain yang diizinkan untuk KP62.0 – KP66.0

KP	Kedalaman Perairan (m)	Panjang bentang bebas kondisi instalasi (m)
62.0	11	19.2
63.0	9.7	18.7
64.0	9	18.4
65.0	8.5	18.2
66.0	3	14.5

Tabel 20 Panjang Bentang Bebas Desain yang diizinkan untuk KP66.100 – KP66.500

KP	Kedalaman Perairan (m)	Panjang bentang bebas kondisi instalasi (m)
66.100	2.855	14.4
66.200	2.71	14.2
66.300	2.565	14
66.400	2.42	13.8
66.500	2.275	13.6

Berdasarkan tabel di atas, diambil nilai-nilai desain bentang bebas yang dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 21 Panjang Bentang Bebas Desain untuk KP50.0 sampai KP61.0

KP	Panjang bentang bebas desain (m)
50.0	19.9
51.0	19.8
52.0	19.7
53.0	19.4
54.0	19.2
55.0	19
56.0	18.8
57.0	18.6
58.0	18.5
59.0	18.2
60.0	18
61.0	17.6

Tabel 22 Panjang Bentang Bebas Desain untuk KP62.0 sampai KP66.0

KP	Panjang bentang bebas desain (m)
62.0	19.2
63.0	18.7
64.0	18.4
65.0	18.2
66.0	14.5

Tabel 23 Panjang Bentang Bebas Desain untuk KP62.0 sampai KP66.0

KP	Panjang bentang bebas desain (m)
66.100	14.4
66.200	14.2
66.300	14
66.400	13.8
66.500	13.6

Tabel 24 Panjang Bentang Bebas Desain untuk KP58.0 sampai KP61.0 dengan Tebal Selimut Beton 70 mm

KP	Panjang bentang bebas desain (m)
58.0	18.6
59.0	18.4
60.0	18.1
61.0	17.8

Berdasarkan Tabel 19 dan Tabel 20, nilai panjang bentang bebas desain yang diizinkan diambil dari panjang yang terkecil diantara hasil perhitungan untuk kondisi operasional, *hydrotest*, dan instalasi. Untuk KP50.0 sampai KP61.0, panjang bentang bebas desain yang diizinkan diambil dari hasil perhitungan untuk kondisi operasional. Hal tersebut disebabkan karena perhitungan untuk kondisi operasional menggunakan kondisi gelombang rencana yang paling ekstrim diantara semua kondisi yang diperhitungkan.

Sementara itu, khusus untuk KP 58.0 sampai 61.0, panjang bentang bebas desain yang diizinkan diambil pada keadaan tanah di sekitarnya tidak mempertimbangkan konsolidasi. Hal tersebut disebabkan karena antara hasil desain menggunakan data tanah yang tidak mempertimbangkan konsolidasi dengan data tanah yang mempertimbangkan konsolidasi menghasilkan desain yang lebih konservatif (panjang bentang bebas diizinkan lebih pendek) untuk perhitungan desain menggunakan data tanah yang tidak memperhitungkan konsolidasi.

Efek dari pengerjaan desain yang mempertimbangkan konsolidasi, yaitu didapatkan data tebal selimut beton yang lebih tebal dibandingkan apabila pengerjaan desain tidak mempertimbangkan konsolidasi. Hal tersebut

menyebabkan perhitungan desain dengan menggunakan tebal selimut beton yang lebih kecil menghasilkan desain yang lebih konservatif.

Untuk KP 62.0 sampai 66.700, panjang bentang bebas desain diambil dari perhitungan untuk kondisi instalasi.

5. Penutup

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan desain pada lokasi studi kasus yang ditinjau, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Dari analisis pendangkalan (shoaling), didapatkan tinggi dan kedalaman gelombang pecah (H_b dan db) untuk gelombang perioda ulang 1 tahun yaitu masing-masing 1.775 meter dan 2.267 meter. Sedangkan untuk gelombang perioda ulang 100 tahun, didapatkan tinggi dan kedalaman gelombang pecah sebesar 2.703 meter dan 3.461 meter.
- Hasil desain panjang bentang bebas diambil sebagai berikut.
 - Panjang bentang bebas untuk KP50.0 adalah 19.915 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP51.0 adalah 19.829 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP52.0 adalah 19.627 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP53.0 adalah 19.378 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP54.0 adalah 19.091 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP55.0 adalah 18.92 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP56.0 adalah 18.636 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP57.0 adalah 18.469 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP58.0 adalah 18.315 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP59.0 adalah 18.081 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP60.0 adalah 17.83 meter.
 - Panjang bentang bebas untuk KP61.0 adalah 17.424 meter.

- Panjang bentang bebas untuk KP62.0 adalah 17.852 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP63.0 adalah 17.044 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP64.0 adalah 16.675 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP65.0 adalah 16.401 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.0 adalah 12.224 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.100 adalah 12.05 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.200 adalah 11.869 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.300 adalah 11.678 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.400 adalah 11.479 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.500 adalah 11.27 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.600 adalah 10.533 meter.
- Panjang bentang bebas untuk KP66.700 adalah 9.625 meter.

Daftar Pustaka

- Guo, Boyun. 2005. *Offshore Pipelines*. Oxford: Elsevier.
- Bai, Yong. 2005. *Subsea Pipelines and Risers*. Oxford: Elsevier.
- Lee, Jaeyoung, P.E. 2007. *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*.
- Det Norsk Veritas. 2013. DNV-OS-F101 *Submarine Pipeline Systems*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S.
- Det Norsk Veritas. 2014. DNV RP-C205 *Environmental Conditions and Environmental Loads*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S.
- Det Norsk Veritas. 2012. DNV RP-C502 *Offshore Concrete Structures*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S.

Det Norsk Veritas. 2006. DNV RP F105 *Free Spanning Pipelines*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S.

American Society of Mechanical Engineers. 2010. ASME B31.8 *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. New York: American National Standard.