

Desain dan Analisis Keandalan Pipa Bawah Laut pada Kondisi Instalasi Akibat Keacakan Tinggi Gelombang dan Kuat Leleh Baja

Andika Razandi Ibrahim

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

Paramashanti

Kelompok Keahlian Teknik Lepas Pantai, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa 10 Bandung 40132, E-mail: parama0307@gmail.com

Abstrak

Demi mencapai metoda distribusi migas yang efisien, pipa bawah laut harus didesain agar dapat memenuhi tujuan desain selama masa layan. Pada proses desain digunakan data deterministic berupa tinggi gelombang signifikan dan kuat leleh baja desain. Pada studi ini proses desain dilakukan sesuai dengan standar DNV OS F101 dan DNV RP E305 untuk pipa dengan diameter 32 inci. Pada kondisi aktual saat proses instalasi, pipa mengalami tegangan yang diakibatkan oleh gelombang acak. Serta nilai desain kuat leleh baja yang digunakan merupakan hasil pengolahan dari banyak data acak uji tarik sampel baja. Oleh karena itu dilakukan analisis keandalan menggunakan simulasi Monte Carlo untuk mengetahui efek dari keacakan tinggi gelombang dan kuat leleh baja terhadap tegangan yang terjadi disepanjang pipa. Simulasi Monte Carlo dilakukan sebanyak 100 simulasi untuk 3 (tiga) arah datang gelombang. Pada proses analisis keandalan, pipa dianggap gagal apabila nilai tegangan total maksimum yang terjadi lebih besar atau sama dengan nilai kuat leleh. Berdasarkan hasil simulasi didapat kesimpulan bahwa pipa dinyatakan tidak handal karena memiliki nilai probabilitas keandalan kurang dari 0.998.

Kata Kunci: Instalasi pipa bawah laut, analisis keandalan, *monte carlo*

Abstract

In order to achieve an efficient oil and gas distribution method, subsea pipelines must be designed to meet design goals during service life. In term of design process, deterministic data used in form of significant wave height and steel yield strength. In this study, the design process carried out according to DNV OS F101 and DNV RP E305 standards for pipeline with 32 inches outer diameter. In actual conditions during the installation process, tensions applied along the pipeline as effect from random waves. Also the design value of design steel yield strength is a result from many random tensile test value of steel samples. Therefore, reliability analysis carried out using Monte Carlo simulation to determine the effect of random wave heights and steel yield strengths on the stress occurred along pipeline. Monte Carlo simulation are carried out as many as 100 simulations for each of three wave headings. In reliability analysis, pipeline is considered fail if the maximum total stress that occurs is greater or equal to its yield strength. Based on the simulation results, pipeline considered unreliable due to its reliability probability value which is lower than 0.998.

Keywords: Underwater pipeline installation, reliability analysis, *monte carlo*.

1. Pendahuluan

Demi mencapai metoda distribusi migas yang efisien, pipa bawah laut harus didesain agar dapat memenuhi tujuan desain selama masa layan. Pada proses desain digunakan data deterministic berupa tinggi gelombang signifikan dan kuat leleh baja desain. Proses desain ketebalan dinding pipa dilakukan dengan mengacu pada DNV OS F101 dan proses desain ketebalan selimut beton mengacu pada DNV RP E305. Proses analisis instalasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak simulasi instalasi pipa bawah laut.

Pada kondisi aktual saat proses instalasi, pipa mengalami tegangan yang diakibatkan oleh gelombang acak. Untuk mengetahui efek dari adanya keacakan tersebut terhadap pipa pada saat instalasi dilakukan analisis keandalan menggunakan simulasi Monte

Carlo. Pada studi ini dilakukan analisis keandalan menggunakan 2 (dua) variabel acak yaitu tinggi gelombang dan kuat leleh baja. Simulasi Monte Carlo dilakukan sebanyak 100 simulasi pada masing-masing 3 (tiga) arah datang gelombang yaitu 0°, 45°, dan 90°.

Sesuai dengan kewajaran dalam bidang *engineering* diambil nilai probabilitas keandalan minimum 0.998 atau indeks keandalan bernilai 3 sebagai batas penentu untuk menyatakan bahwa pipa dianggap handal.

2. Teori dan Metodologi

2.1 Desain wall thickness

Sesuai standar DNV OS F101, desain ketebalan dinding pipa dilakukan dengan memeriksa ketahanan

pipa terhadap moda kegagalan *internal overpressure*, *external overpressure*, *propagation buckling*, dan *combined loading*.

2.1.1 Moda kegagalan *internal overpressure*

Pada moda kegagalan ini pipa diperiksa pada 2 (dua) kondisi yaitu kondisi operasi dan *hydrotest* untuk mengetahui ketahanan pipa dengan adanya tekanan internal pada pipa. Syarat-syarat yang harus dipenuhi pada moda kegagalan ini adalah sebagai berikut.

$$\left| P_d - P_e < \frac{P_b(t)}{(\gamma_{sc} \cdot \gamma_m)} \right| \quad (1)$$

$$P_b(t) = \min \left(\frac{2t}{D-t} \cdot SMYS \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} ; \frac{2t}{D-t} \cdot \frac{SMTS}{1.15} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \quad (2)$$

$$P_{e,operation} = \rho_{sw} \cdot g \cdot h \quad (4)$$

$$P_{e,hydrotest} = 0 \quad (5)$$

$$P_{d,hydrotest} = (1.5)P_d \quad (6)$$

P_d = tekanan desain (MPa)

P_e = tekanan eksternal (MPa)

$P_b(t)$ = kapasitas *pressure containment* (MPa)

γ_{sc} = *safety class resistance factor*

γ_m = *material resistance factor*

D = diameter pipa (m)

t = tebal dinding pipa (m)

$SMYS$ = *specified Minimum Yield Strength* (MPa)

$SMTS$ = *Specified Minimum Tensile Strength* (MPa)

ρ_{sw} = densitas air laut (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

h = kedalaman perairan (m)

2.1.2 Moda kegagalan *external overpressure*

Pada moda kegagalan ini pipa diperiksa pada kondisi instalasi untuk mengetahui ketahanan pipa saat mengalami tekanan eksternal tanpa adanya tahanan dari tekanan internal. Syarat-syarat yang harus dipenuhi pada moda kegagalan ini adalah sebagai berikut.

$$(P_c - P_{el}) \cdot (P_c^2 - P_p^2) = P_c \cdot P_{el} \cdot P_p \cdot f_o \cdot \frac{D}{t} \quad (7)$$

$$P_{el} = 2E \cdot \frac{\left(\frac{t}{D}\right)^3}{(1 - \nu^2)} \quad (8)$$

$$P_p = 2 \cdot SMYS \cdot \alpha_{fab} \cdot \frac{t}{D} \quad (9)$$

$$f_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (10)$$

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_c}{(1,1) \cdot \gamma_{sc} \cdot \gamma_m} \quad (11)$$

P_c = karakteristik tekanan *collapse* (MPa)

P_{el} = tekanan *collapse* elastis (MPa)

P_p = tekanan *collapse* plastis (MPa)

f_o = koefisien ovalitas pipa

D = diameter pipa (m)

t = tebal dinding pipa

E = modulus elastisitas (MPa)

ν = tebal dinding pipa (m)

D = diameter (m)

ν = *poisson ratio*

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

α_{fab} = faktor fabrikasi

P_e = tekanan eksternal (MPa)

P_{min} = tekanan internal minimum desain (MPa)

P_c = tekanan *collapse* pipa (MPa)

γ_{sc} = *safety class resistance factor*

γ_m = *material resistance factor*

2.1.3 Moda kegagalan *propagation buckling*

Pada moda kegagalan ini pipa diasumsikan telah mengalami tekuk lokal sehingga tekuk tersebut berpropagasi sepanjang pipa. Syarat-syarat yang harus dipenuhi pada moda kegagalan ini adalah sebagai berikut.

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \quad (12)$$

$$P_{pr} = (35) \cdot SMYS \cdot \alpha_{fab} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{2.5} \quad (13)$$

P_e = tekanan eksternal (MPa)

P_{min} = tekanan minimum desain (MPa)

P_{pr} = tekanan propagasi (MPa)

γ_{sc} = safety class resistance factor

γ_m = material resistance factor

SMYS = Specified Minimum Yield Strength (MPa)

α_{fab} = faktor fabrikasi

t = tebal dinding pipa (m)

D = diameter pipa (m)

2.1.4 Moda kegagalan combined loading

Pada moda kegagalan ini, beban yang bekerja pada pipa berupa kombinasi dari momen lentur dan gaya aksial yang dikombinasikan tekanan internal berlebih atau tekanan eksternal berlebih. Persamaan syarat batas untuk masing-masing kombinasi adalah sebagai berikut.

1. Kombinasi Tekanan Internal Berlebih

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right)^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{(P_i - P_e)}{\alpha_c \cdot P_b} \right)^2 \quad (14)$$

2. Kombinasi Tekanan Eksternal Berlebih

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left(\frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right)^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{(P_e - P_{min})}{P_c} \right)^2 \quad (15)$$

2.2 Desain concrete coating thickness

Dalam proses desain ketebalan selimut beton dilakukan dengan memeriksa kestabilan vertikal dan lateral pipa sesuai dengan standar DNV RP E305.

2.2.1 Stabilitas vertikal

Stabilitas vertikal pipa secara sederhana ditentukan oleh berat keseluruhan pipa didalam air. Berat pipa terdiri dari berat lapisan baja, berat lapisan anti korosi, berat lapisan selimut beton, dan berat konten fluida didalam pipa. Pipa dinyatakan stabil apabila berat total pipa dalam air lebih besar dibandingkan gaya apung yang terjadi mengikuti persamaan berikut.

$$\frac{W_{sb} + B}{B} \geq 1.1 \quad (16)$$

Berat Lapisan Baja :

$$W_s = \frac{\pi}{4} (OD^2 - ID^2) \rho_s \quad (17)$$

Berat Lapisan Anti Korosi :

$$W_{corr} = \frac{\pi}{4} (D_{corr}^2 - D_s^2) \rho_{corr} \quad (18)$$

Berat Selimut Beton :

$$W_{cc} = \frac{\pi}{4} (D_{cc}^2 - D_{corr}^2) \rho_{cc} \quad (19)$$

Berat Konten :

$$W_{cont} = \frac{\pi}{4} ID^2 \rho_{cont} \quad (20)$$

Berat Tercelup Pipa :

$$W_{sb} = W_s + W_{corr} + W_{cc} + W_{cont} - B \quad (21)$$

Gaya Apung (Buoyancy) :

$$B = \frac{\pi}{4} (D_{tcc}^2 \rho_{sw}) \quad (22)$$

ID = diameter pipa baja bagian dalam

OD = diameter luar pipa baja

D_{corr} = diameter luar lapisan pelindung korosi

D_{tcc} = diameter luar selimut beton

W_s = berat lapisan baja

W_{corr} = berat lapisan anti korosi

W_{cc} = berat selimut beton

W_{cont} = berat konten

W_{sb} = berat tercelup pipa

B = gaya apung

ρ_s = densitas baja

ρ_{corr} = densitas lapisan korosi

ρ_{cc} = densitas lapisan beton

ρ_{cont} = densitas konten

ρ_{sw} = densitas air laut

2.2.2 Stabilitas lateral

Stabilitas lateral pipa dipengaruhi oleh besar gaya seret (*drag*), gaya inersia, gaya angkat, gelombang, arus, dan resistensi material dasar laut. Pipa dinyatakan stabil secara lateral apabila memenuhi persamaan berikut.

$$W_{sb} \geq W_{req} \quad (23)$$

Gaya Lift :

$$FL = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_w}{g} \cdot OD \cdot CL \cdot (U_s \cdot \cos(\theta) + U_D)^2 \quad (24)$$

Gaya Drag :

$$FD = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_w}{g} \cdot OD \cdot Cd \cdot (U_s \cdot \cos(\theta) + U_D)^2 \quad (25)$$

Gaya Inersia :

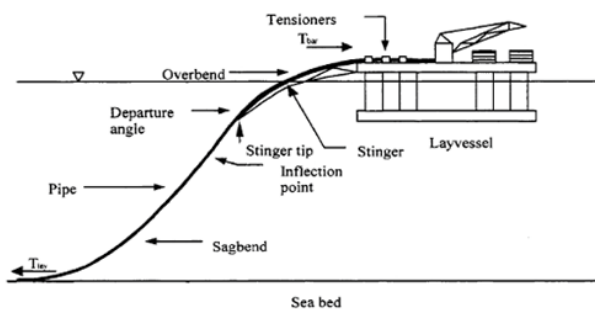
$$FI = \frac{\pi OD^2}{4} \cdot \frac{\rho_w}{g} \cdot CM \cdot As \cdot \sin(\theta) \quad (26)$$

Berat Minimum :

$$W_{req} = \left(\left(\frac{FD + FI + \mu \cdot FL}{\mu} \right) \right) F_w \quad (27)$$

2.3 Metoda instalasi

Pada studi ini metoda instalasi yang digunakan ada metoda instalasi *S-Lay*. Metoda instalasi *S-lay* digunakan untuk instalasi pipa bawah laut pada perairan dangkal (kedalaman maksimum 500ft). Instalasi dilakukan menggunakan *lay barge* yang dilengkapi dengan stasiun pengelasan, *crane*, *roller* dan *stinger*. *Stinger* berfungsi sebagai landasan peluncuran pipa, pada *stinger* terdapat *tensioner* yang berfungsi sebagai pengatur lengkungan pipa (*overbend*) sedemikian rupa agar tegangan yang terjadi akibat konfigurasi *support* pada *overbend* tidak melebihi 85% SMYS dan *sagbend* tidak melebihi 72% SMYS. Pada Gambar 1 adalah sketsa metoda instalasi *S-lay*.



Gambar 1 Ilustrasi metoda instalasi *S-Lay*

2.4 Uji statistik

Untuk menguji antara data hasil pengamatan dengan data hasil analisis dilakukan uji statistik dengan tujuan memberikan informasi kecocokan distribusi dan kelayakan fungsi distribusi tersebut. Pada studi ini dilakukan uji statistik non-parametrik menggunakan bantuan perangkat lunak MINITAB. Pada perangkat lunak MINITAB digunakan uji kecocokan distribusi menggunakan uji *Anderson-Darling* dan *P-Value* untuk menentukan seberapa dekat distribusi dari data hasil pengamatan dengan bentuk distribusi empiris.

2.4.1 Uji anderson-darling dan P-value

Uji *Anderson-Darling* merupakan metoda uji statistik yang ditemukan oleh *Theodore Wilbur Anderson* dan *Donald A. Darling*. Pada uji ini dilakukan pengecekan apakah sampel data pengamatan merupakan data yang diambil dari suatu distribusi probabilitas empiris. Menurut *Anderson-Darling* hasil uji statistik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$A_n^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (2j-1) [\log u_{(j)} + \log 1 - u_{(n-j+1)}] \quad (28)$$

A_n^2 = nilai uji statistik

$u_{(j)}$ = nilai PDF data pengamatan apabila dianggap memenuhi distribusi empiris tertentu

n = jumlah data

j = urutan data

Pada uji statistik harus ditentukan nilai *significance level* sebagai batas penentu suatu hasil uji statistik dapat dikatakan signifikan secara statistik atau tidak. *American Statistical Association* menyetujui pemilihan nilai *significance level* yang dianggap valid berkisar antara 0.005 sampai 0.5 Suatu hasil uji statistik dikatakan signifikan secara statistik (*Statistically Significance*) apabila nilai *P-Value* lebih kecil atau sama dengan nilai *significance level*. *Anderson-Darling* menemukan bahwa untuk *significance level* sebesar 5% batas nilai uji statistik adalah 2.492 sedangkan untuk *significance level* sebesar 1% batas nilai uji statistik adalah 3.880.

Untuk lebih memastikan bahwa distribusi data hasil pengamatan benar-benar mendekati salah satu distribusi empiris pada studi ini dilakukan juga pengecekan *P-Value*. Pada proses pengecekan *P-Value* terlebih dahulu ditentukan *null hypothesis* (H_0) dan *alternative hypothesis* (H_a) dimana pada studi ini dipilih *null hypothesis* sebagai hipotesa bahwa “distribusi data hasil pengamatan benar mendekati distribusi empiris” dan *alternative hypothesis* sebagai hipotesa bahwa “distribusi data hasil pengamatan bukan merupakan distribusi empiris”.

P-Value merupakan nilai probabilitas diperolehnya nilai PDF lebih ekstrim atau sama dengan PDF dari data hasil pengamatan apabila dianggap *null hypothesis* adalah benar. Secara teoritis, apabila *P-Value* bernilai lebih besar dari *significance level* (α) maka *null hypothesis* diterima, sedangkan apabila *P-Value* bernilai lebih kecil dari *significance point* maka *null hypothesis* ditolak dan *alternative hypothesis* diterima.

2.5 Pembangkitan variabel acak

2.5.1 Pendekatan stokastik terhadap distribusi gelombang *Rayleigh*

Pada proses pembangkitan data acak tinggi gelombang digunakan pendekatan stokastik dengan asumsi gelombang memiliki rentang spektrum frekuensi yang kecil serta tinggi gelombang mengikuti bentuk distribusi *Rayleigh* (Ochi, 1998). Pada dasarnya nilai kerapatan probabilitas dari distribusi *Rayleigh* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

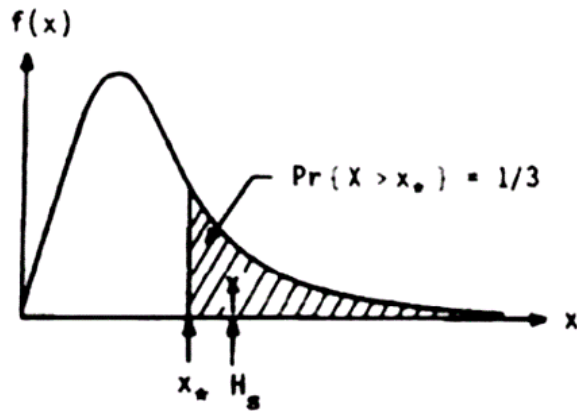
$$f_x(x) = \frac{2x}{R} \exp\left(-\frac{x^2}{R}\right), x \geq 0 \quad (29)$$

$f_x(x)$ = Kerapatan probabilitas untuk data individu x

x = Data individu

R = Parameter distribusi *Rayleigh*

Nilai tinggi gelombang signifikan (H_s) merupakan titik berat dari luas dibawah kurva PDF *Rayleigh* dengan batas bawah x_* , dimana nilai probabilitas $x > x_*$ sebesar (Ochi, 1998). Ilustrasi dari letak tinggi gelombang signifikan pada kurva PDF *Rayleigh* disajikan pada **Gambar 2** berikut.



Gambar 2. Ilustrasi letak tinggi gelombang signifikan pada kurva PDF *Rayleigh* (Sumber: Ochi, 1998)

Nilai tinggi gelombang signifikan (H_s) dapat dihitung menggunakan penurunan persamaan berikut sehingga diperoleh hubungan antara H_s dengan parameter distribusi *Rayleigh*.

$$H_s = x_{1/3} = \frac{\int_{x_*}^{\infty} x f_x(x) dx}{\int_{x_*}^{\infty} f_x(x) dx} = \frac{x_* \exp\left(\frac{x_*^2}{R}\right) + \sqrt{\pi R} \left\{1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{2}{R}} x_*\right)\right\}}{\frac{1}{3}} \quad (30)$$

$$H_s \cong 1.42 \sqrt{R} \quad (31)$$

Berdasarkan pendekatan stokastik tersebut dilakukan pembangkitan satu set data acak berisikan 100 unit data tinggi gelombang.

2.5.2 Bentuk distribusi data acak kuat leleh baja

Menurut Hess et. al, (2002), data acak kuat leleh baja dapat dideskripsikan dalam bentuk distribusi Lognormal dengan parameter koefisien nilai rerata sebesar 1.05Fy dan koefisien variasi sebesar 0.1. Berdasarkan referensi tersebut dilakukan pembangkitan data acak menggunakan perangkat lunak MINITAB untuk membangkitkan satu set data acak berisikan 100 unit data kuat leleh baja.

2.6 Metoda simulasi Monte Carlo

Pada dasarnya metoda simulasi *monte carlo* memiliki 6 (enam) tahap penting yaitu: (1) memformulasikan permasalahan; (2) mengkuantifikasi semua variabel acak secara statistik; (3) membangkitkan data acak berdasarkan data statistik; (4) mengevaluasi permasalahan secara deterministic untuk setiap set data acak; (5) mengekstraksi informasi probabilitas hasil

simulasi; (6) mengevaluasi akurasi dan efisiensi dari simulasi.

3. Data dan Pengolahan

Pada studi ini dilakukan proses desain dan analisis terhadap pipa SSWJ-PGN *phase 1* zona 5.

3.1 Properti pipa

Properti dari pipa yang digunakan pada studi ini disajikan pada **Tabel 1** berikut.

Tabel 1. Properti pipa

Parameter	Value	Unit
Pipe Outside Diameter	32	in
Corrosion Allowance	3	mm
Pipe Grade	SAWL DNV 450 I FUD	-
SMYS	450	Mpa
SMTS	535	MPa
Anti-corrosion Coating Thickness	2.5	mm
Anti-corrosion Coating Density	1280	kg/m ³
Concrete Coating Density	3044	kg/m ³
Steel Density	7850	kg/m ³
Young's Modulus	207000	MPa
Poisson Ratio	0.3	-
Design Pressure	1150	psig
Content Density	50	kg/m ³

3.2 Data kedalaman perairan

Data kedalaman perairan pada studi ini disajikan pada **Tabel 2** berikut.

Tabel 2. Data Kedalaman

Parameter	Value	Unit
Minimum Depth	39.13	m
Maximum Depth	70.49	m

3.3 Data geoteknik

Data geoteknik dari dasar perairan pada studi ini disajikan pada **Tabel 3** berikut.

Tabel 3. Data geoteknik

Soil Type	Shear Strength	Unit
Sand	-	kPa

3.4 Data gelombang

Data gelombang signifikan yang digunakan pada studi ini disajikan pada **Tabel 4** berikut.

3.5 Data kecepatan arus maksimum

Data kecepatan maksimum yang digunakan pada studi ini disajikan pada **Tabel 5** berikut.

Tabel 4 Data gelombang

Zone	1 Year Return Period		100 Years Return Period	
	Hs (m)	Ts (s)	Hs (m)	Ts (s)
1	1.27	5.59	4.25	10.34
2	1.01	5.04	3.1	8.74
3	1.27	5.6	3.82	9.92
4	1.27	5.6	4.07	10.42
5	1.34	5.74	3.6	9.74
6	1.27	5.58	3.81	10.05
7	0.81	4.46	3.56	9.54
8	0.81	4.49	3.18	8.92

Tabel 5 Data kecepatan arus maksimum

Parameter	Value	Unit
1 Year Return Period	0.67	m/s
100 Years Return Period	0.82	m/s

3.6 Data barge

3.6.1 Properti barge

Properti *barge* yang digunakan pada studi ini disajikan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Properti barge

Parameter	Value	Unit
Length Overall (LOA)	128	m
Depth	8.5	m
Draft	4.6	m
Width	35	m
Number of Tensioner	2	Unit
Tensioner Capacity	750	kN

3.6.2 Properti support

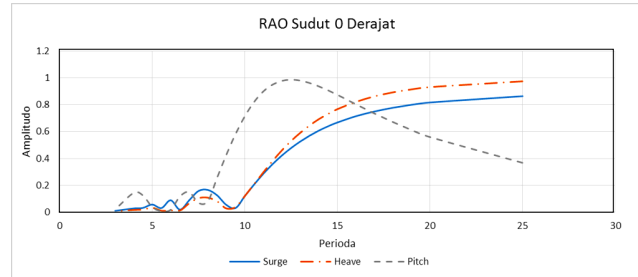
Properti *support* pada *barge* yang digunakan pada studi ini disajikan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Properti support

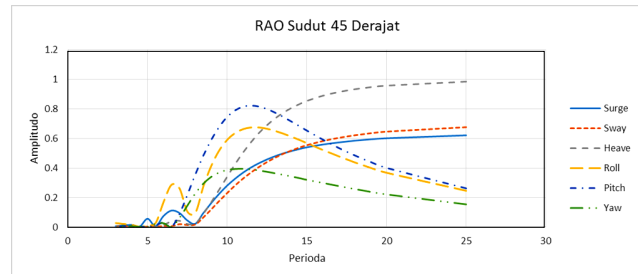
Support Name	Support Type	X Coordinate	Y Coordinate
R1	Roller	47.77	2.03
R2	Roller	38.58	1.92
T1	Tensioner	29.57	1.8
T2	Tensioner	21	1.68
R3	Roller	12.5	1.45
R4	Roller	6.5	1.2
S1	Stinger	-0.85	0.7
S2	Stinger	-7	0.2
S3	Stinger	-12	-0.4
S4	Stinger	-16.5	-1
S5	Stinger	-21.5	-1.82
S6	Stinger	-25	-2.5

3.6.3 Data RAO barge

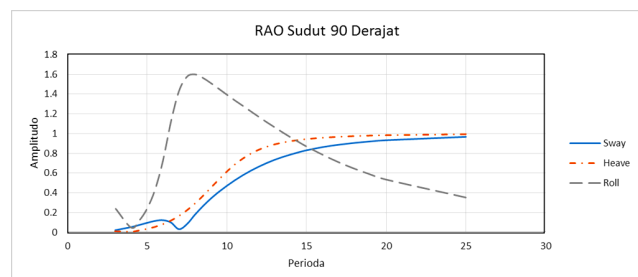
Data respon (RAO) yang digunakan pada studi ini berupa data respon untuk sudut datang gelombang 0°, 45°, dan 90° seperti pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 berikut.



Gambar 3. Grafik RAO sudut datang gelombang 0°



Gambar 4 Grafik RAO sudut datang gelombang 45°



Gambar 4 Grafik RAO sudut datang gelombang 90°

4. Hasil dan Analisis

4.1 Desain wall thickness

Sesuai dengan standar *DNV-OS-F101* diperoleh ketebalan minimum dinding pipa seperti pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8 Tabel nilai minimum wall thickness

Failure Mode	Minimum Wall Thickness	Unit
Internal Overpressure - Operation	0.526	in
Internal Overpressure - Hydrotest	0.593	in
External Overpressure	0.49	in
Propagation Buckling	0.866	in

Dari hasil perhitungan diambil nilai desain ketebalan dinding pipa sebesar 0.875 in.

4.2 Desain concrete coating thickness

Proses desain ketebalan selimut beton dilakukan dengan memeriksa kestabilan pipa pada kondisi instalasi dan operasi pada kedalaman maksimum yaitu 70.49m. Diperoleh ketebalan minimum selimut beton seperti pada Tabel 9 berikut.

Tabel 9 Tabel nilai minimum concrete coating thickness

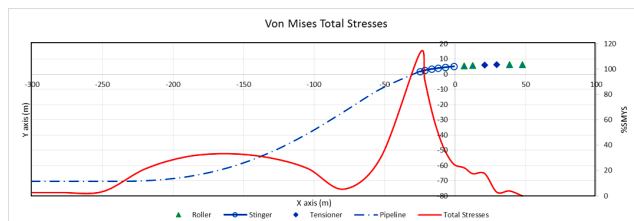
Condition	Minimum Concrete Coating Thickness	Unit
Installation	2.318	in
Operation	1.824	in

4.3 Analisis instalasi statik

Analisis instalasi kondisi statik dilakukan untuk memperoleh konfigurasi *support* untuk instalasi paling optimal agar tegangan maksimum yang terjadi disepanjang pipa tidak melebihi tegangan izin.

4.3.1 Analisis instalasi statik konfigurasi awal

Simulasi instalasi dilakukan dengan input data *support* dan properti pipa tanpa mengikutsertakan data lingkungan. Diperoleh tegangan maksimum yang terjadi sebesar 112.46% SMYS. Pada **Gambar 6** berikut adalah grafik tegangan total disepanjang pipa akibat konfigurasi *support* awal.

**Gambar 6.** Grafik tegangan total akibat konfigurasi *support* awal

4.3.2 Optimasi konfigurasi *support*

Optimasi dilakukan dengan menyesuaikan posisi *support* sampai diperoleh tegangan total maksimum tidak melebihi tegangan izin. Perubahan yang dilakukan adalah seperti pada **Tabel 10** sebagai berikut.

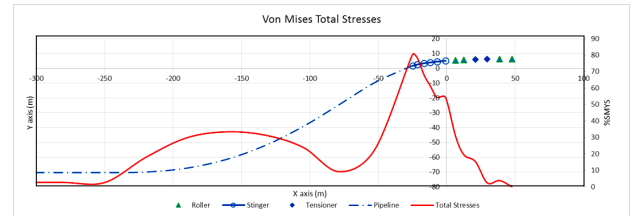
Tabel 10. Optimasi konfigurasi *support*

Support Name	Support Type	X Coordinate		Y Coordinate	
		Initial	Optimized	Initial	Optimized
R1	Roller	47.77	47.77	2.03	2.03
R2	Roller	38.58	38.58	1.92	1.92
T1	Tensioner	29.57	29.57	1.8	1.8
T2	Tensioner	21	21	1.68	1.68
R3	Roller	12.5	12.5	1.45	1.45
R4	Roller	6.5	6.5	1.2	1.2
S1	Stinger	-0.85	-0.85	0.7	0.7
S2	Stinger	-7	-7	0.2	0
S3	Stinger	-12	-12	-0.4	-0.9
S4	Stinger	-16.5	-16.5	-1	-1.9
S5	Stinger	-21.5	-21.5	-1.82	-3.3
S6	Stinger	-25	-25	-2.5	-4.65

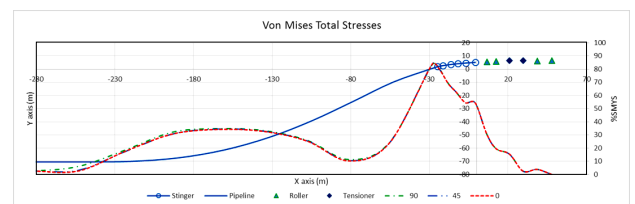
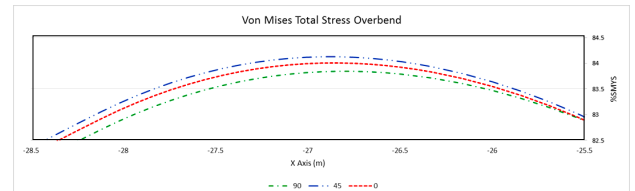
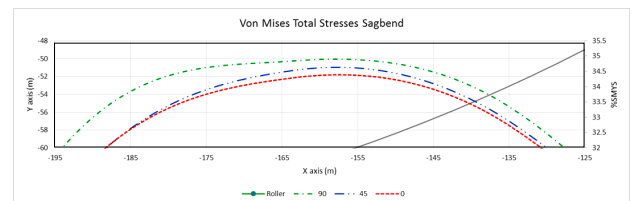
Dari hasil optimasi konfigurasi *support* diperoleh tegangan total maksimum yang terjadi disepanjang pipa sebesar 80.41% SMYS. Pada **Gambar 7** berikut adalah grafik tegangan total disepanjang pipa akibat konfigurasi *support* hasil optimasi

4.4 Analisis instalasi dinamik

Pada analisis instalasi dinamik, digunakan data gelombang individu periode ulang 1 tahunan pada zona 5

**Gambar 7.** Grafik tegangan total akibat konfigurasi *support* hasil optimasi

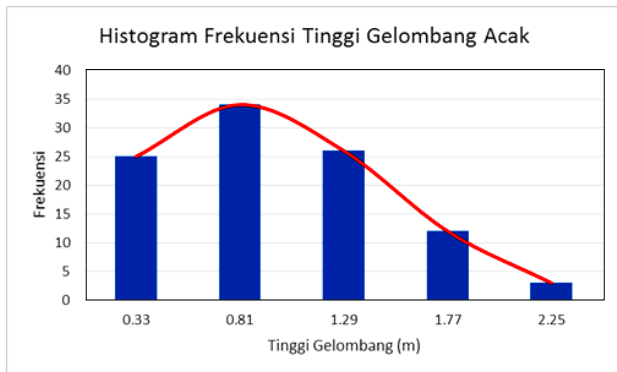
dan amplitudo serta sudut fasa RAO pada perioda yang mendekati perioda signifikan dari gelombang desain yaitu 5.74s. Kecepatan arus maksimum diasumsikan hanya bekerja pada permukaan air. Tegangan total maksimum yang terjadi akibat arah datang gelombang 0° sebesar 83.92% SMYS, arah datang gelombang 45° sebesar 84.06% SMYS, dan arah datang gelombang 90° sebesar 83.71% SMYS. Pada **Gambar 8**, **Gambar 9**, dan **Gambar 10** berikut adalah grafik tegangan total yang terjadi.

**Gambar 8** Grafik tegangan total akibat simulasi instalasi dinamik**Gambar 9.** Puncak grafik tegangan total akibat simulasi instalasi dinamik area *overbend***Gambar 10.** Puncak grafik tegangan total akibat simulasi instalasi dinamik area *sagbend*

4.5 Simulasi Monte Carlo

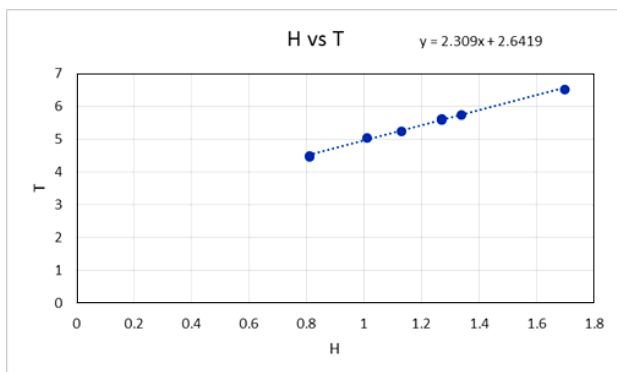
4.5.1 Pembangkitan data acak tinggi gelombang

Melalui pendekatan stokastik diperoleh nilai parameter distribusi *Rayleigh* untuk tinggi gelombang signifikan sebesar 1.34 m adalah 0.856. Selanjutnya dilakukan pembangkitan data acak menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk diperoleh 100 unit data tinggi gelombang. Pada **Gambar 11** berikut adalah histogram frekuensi dari data acak yang dibangkitkan.



Gambar 11. Histogram frekuensi tinggi gelombang acak

Selanjutnya dilakukan plot kurva hubungan tinggi gelombang signifikan satu tahunan dengan periodanya untuk diperoleh persamaan regresi liner. Plot kurva hubungan tinggi gelombang satu tahunan dengan periodanya disajikan pada **Gambar 12** berikut.



Gambar 12 Kurva hubungan tinggi gelombang satu tahunan dengan periodanya

Persamaan regresi liner digunakan untuk memperoleh nilai perioda dari tinggi gelombang acak yang dibangkitkan.

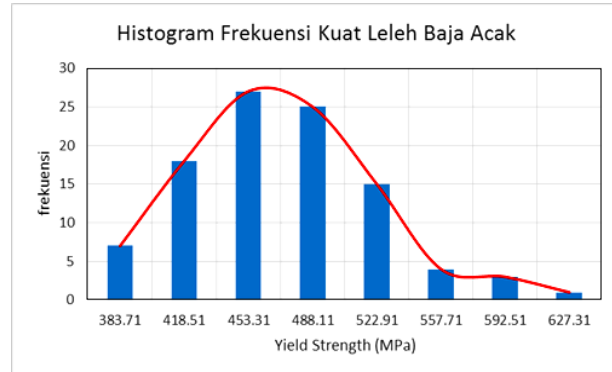
4.5.2 Pembangkitan data acak *yield strength*

Menggunakan parameter koefisien mean sebesar $1.05F_y$ dan koefisien variasi sebesar 0.1 diperoleh nilai rerata dari data acak *yield strength* 472.5MPa dengan parameter skala dan parameter lokasi distribusi Lognormal 0.09975 dan 6.15306. Selanjutnya dilakukan pembangkitan data acak menggunakan perangkat lunak MINITAB untuk memperoleh 100 unit data *yield strength*. Pada **Gambar 13** berikut adalah histogram frekuensi dari data acak yang dibangkitkan.

4.5.3 Simulasi instalasi

Data input yang digunakan pada masing-masing simulasi adalah :

1. Tinggi gelombang dan periodanya
2. Amplitudo dan sudut fasa RAO pada perioda yang mendekati perioda gelombang
3. Kecepatan arus maksimum pada permukaan air
4. Konfigurasi *support* hasil optimasi
5. Parameter pipa desain

Gambar 13 Histogram frekuensi *Yield Strength* acak

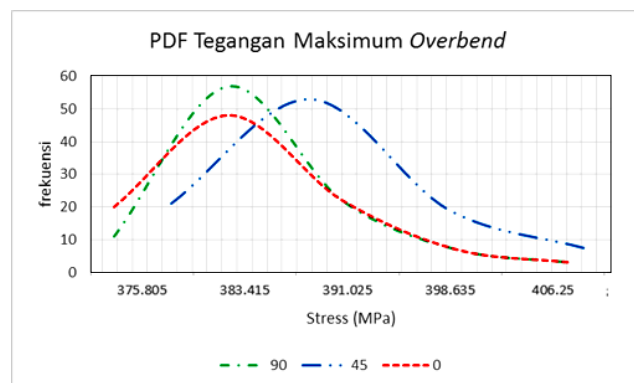
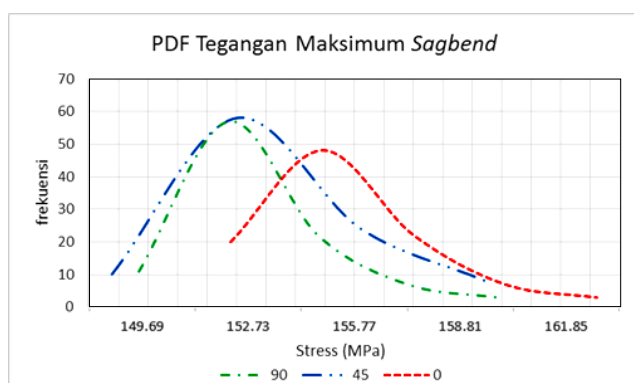
6. Kuat leleh baja

Dari masing-masing 100 simulasi untuk 3 (tiga) arah datang gelombang diperoleh probabilitas kehandalan seperti pada **Tabel 11** berikut.

Tabel 11 Hasil Simulasi Instalasi

Wave Heading	Overbend			Sagbend		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Reliability $\Phi(\beta)$	0.98	0.96	0.98	0.944	0.945	0.945
Reliability Index (β)	2.054	1.751	2.054	1.591	1.595	1.6

Pada **Gambar 14** dan **Gambar 15** berikut adalah plot PDF dari hasil simulasi instalasi untuk area *overbend* dan *sagbend*.

Gambar 14. PDF tegangan maksimum area *overbend*Gambar 15. PDF tegangan maksimum area *sagbend*

5. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil analisis instalasi untuk kondisi desain diperoleh tegangan maksimum pada area *overbend* terjadi pada arah datang gelombang 45° sebesar 84.06% SMYS.
2. Berdasarkan hasil analisis instalasi untuk kondisi desain diperoleh tegangan maksimum pada area *sagbend* terjadi pada arah datang gelombang 90° sebesar 34.84% SMYS.
3. Berdasarkan hasil simulasi *Monte Carlo* diperoleh bahwa Probabilitas kehandalan minimum pipa pada area *overbend* sebesar 0.96.
4. Berdasarkan hasil simulasi *Monte Carlo* diperoleh bahwa Probabilitas kehandalan minimum pipa pada area *sagbend* sebesar 0.944.
5. Berdasarkan hasil analisis kehandalan, pipa dinyatakan tidak handal karena nilai probabilitas kehandalan lebih kecil dari 0.998.

Daftar Pustaka

- Det Norske Veritas, 2013, *DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems*. Norwegia : Det Norske Veritas.
- Det Norske Veritas, 2013, *DNV-RP-E305 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Norwegia : Det Norske Veritas.
- Haldar, Achintya dan Sankaran Mahadevan, 2000, *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Hess, Paul E. et. al, 2002, *Uncertainties in Material Strength, Geometric, and Load Variables*. American Society of Naval Engineers.
- Ochi, Michel K. 1998. *Ocean Waves : The Stochastic Approach*. Cambridge : Cambridge University Press.

