

ANALISIS KEHANDALAN KESTABILAN LATERAL PIPA BAWAH LAUT AKIBAT POLA KEACAKAN ARUS DAN GELOMBANG

Syaidina Agusta Sukarta

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,

Jl. Ganeca 10 Bandung 40132

syaidinagusta@gmail.com

Abstrak

Analisis kehandalan adalah analisis kemungkinan suatu komponen atau sistem akan bekerja sesuai dengan fungsinya ketika dioperasikan selama periode waktu tertentu. Beberapa parameter yang mempengaruhi sistem dapat memiliki sifat keacakan. Akibat sifat keacakan akan dilakukan analisis kehandalan. Pada tugas akhir ini, analisis kehandalan dilakukan untuk menentukan probabilitas kegagalan kestabilan dari pipa bawah laut. Kegagalan pipa bawah laut dapat terjadi apabila berat aktual pipa bawah laut kurang dari berat minimum yang dibutuhkan. Sementara itu, berat minimum yang dibutuhkan ditentukan berdasarkan berbagai faktor seperti kecepatan arus, tinggi gelombang dan periode gelombang. Oleh karena itu, faktor keacakan yang ditinjau pada tugas akhir ini adalah faktor keacakan kecepatan arus, tinggi gelombang dan periode gelombang. Metode analisis kestabilan pipa bawah laut yang digunakan adalah metode kestabilan statik sederhana berdasarkan DNV RP-E305. Hasil dari analisis kehandalan pada tugas akhir ini adalah probabilitas kegagalan. Probabilitas kegagalan ditentukan dengan membandingkan jumlah kejadian yang gagal dengan jumlah total kejadian. Metode yang digunakan untuk menentukan probabilitas kegagalan adalah Metode Simulasi Monte Carlo.

Kata kunci: Kehandalan, Kestabilan, Pipa Bawah Laut, Kecepatan Arus, dan Gelombang.

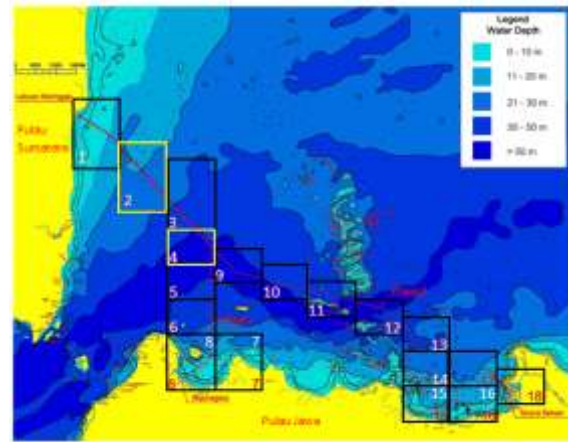
PENDAHULUAN

Minyak bumi dan gas masih menjadi pilihan utama sumber energi di dunia. Hal tersebut menuntut pelaku industri minyak bumi dan gas mengembangkan teknologi dalam proses produksi. Salah satu yang dikembangkan adalah jaringan pipa bawah laut. Jaringan pipa bawah laut adalah salah satu media transportasi minyak dan gas bumi yang umum digunakan untuk menyalurkan minyak dan gas bumi dari platform menuju fasilitas berikutnya. Beberapa faktor perlu diperhatikan dalam proses desain, Salah satunya kestabilan pipa bawah laut.

Analisis kestabilan pipa dilakukan untuk menentukan berat pipa agar pipa tetap stabil akibat pengaruh gaya-gaya hidrodinamika, gaya lingkungan dan resistansi tanah yang bekerja pada pipa. Salah satu untuk menambahkan berat pipa agar pipa dapat stabil yaitu menambahkan lapisan beton pada pipa. Selain itu juga perlu diperhatikan risiko kegagalan yang mungkin terjadi pada saat proses operasi berupa probabilitas kegagalan. Hal ini disebabkan kondisi di perairan terdapat variabel acak yang berubah-ubah seperti kecepatan arus, tinggi gelombang dan periode gelombang. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis kehandalan untuk mengetahui probabilitas kegagalan yang terjadi.

Dalam penelitian tugas akhir ini,

dilakukan analisis kehandalan kestabilan pipa bawah laut di daerah Laut Jawa. Pada jalur pipa bawah laut tersebut dibagi menjadi 18 zona, Zona yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah zona 2 dan zona 4. Zonasi jalur pipa dapat dilihat pada **Gambar 1**



Gambar 1 Zonasi Jalur Pipa Phase SSWJ PGN

Analisis ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu analisis kehandalan kestabilan pipa bawah laut akibat pola keacakan arus serta analisis kehandalan kestabilan pipa bawah laut akibat pola keacakan arus dan gelombang. Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui probabilitas kegagalan yang terjadi akibat masing – masing keacakan.

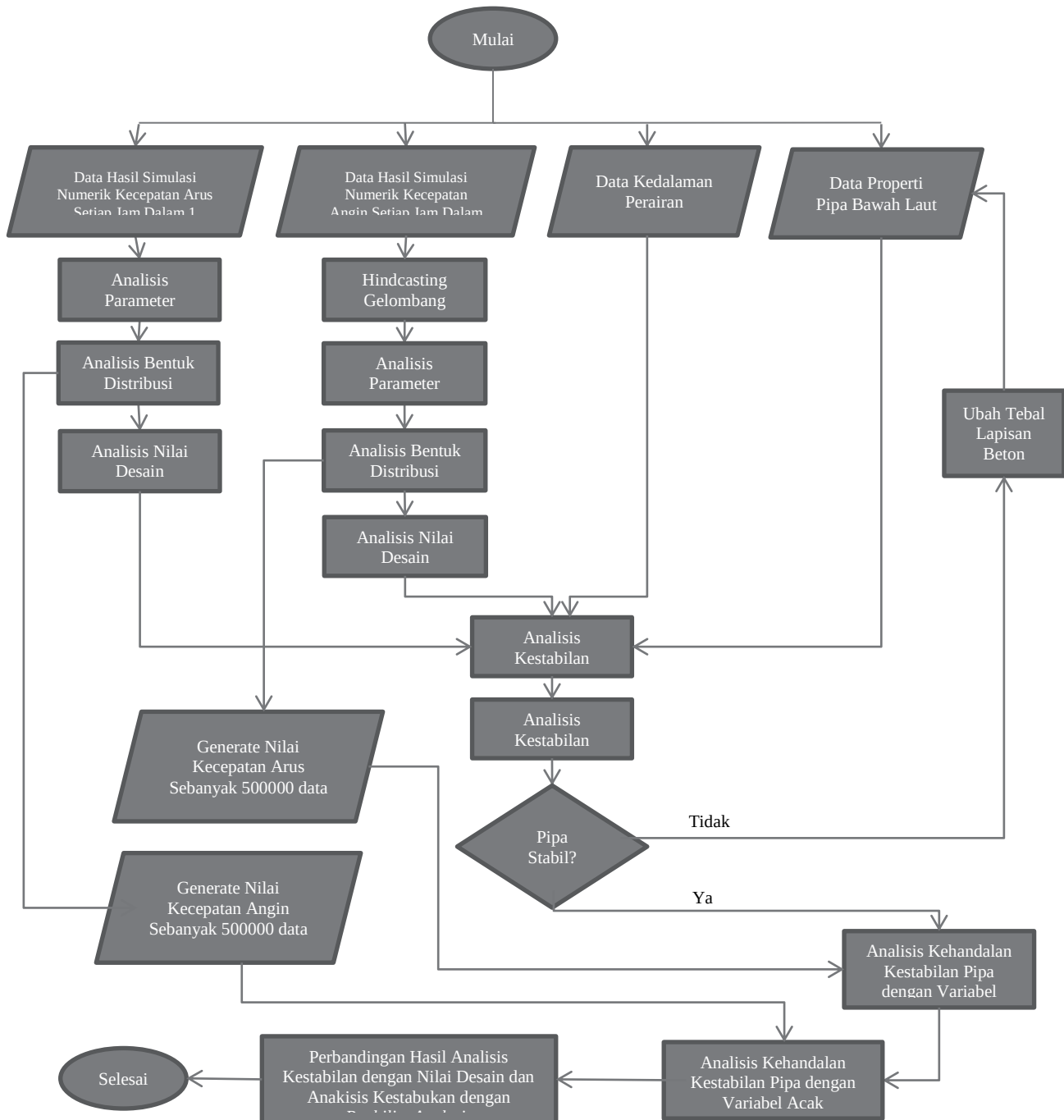
Tujuan dilakukannya penelitian Tugas Akhir ini adalah untuk:

1. Pemeriksaan kestabilan pipa bawah laut dengan kecepatan arus desain, tinggi gelombang desain ,dan periode gelombang desain.

2. Perhitungan probabilitas kegagalan kestabilan lateral pipa bawah laut dengan variabel acak kecepatan arus.

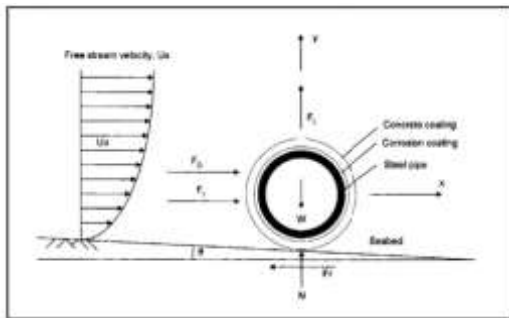
3. Perhitungan probabilitas kegagalan kestabilan lateral pipa bawah laut dengan variabel acak arus, tinggi dan periode gelombang.

TEORI DAN METODOLOGI



Gambar 2 Diagram Alir Metodologi Tugas Akhir

Pada **Gambar 2** dapat dilihat metodologi yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini. Dalam menganalisis kehandalan pipa bawah laut terlebih dahulu melakukan analisis kestabilan pipa bawah laut tersebut. Analisis kestabilan pipa bawah laut dilakukan untuk memastikan pipa bawah laut stabil secara vertikal maupun lateral. Stabilitas pipa di dasar laut sangat dipengaruhi oleh berat pipa di dalam air, gaya-gaya lingkungan yang bekerja, serta resistensi tanah di dasar laut. Gaya-gaya lingkungan yang masuk ke dalam analisis stabilitas pipa terdiri dari gaya-gaya hidrodinamika, seperti gaya seret, gaya inersia, dan gaya angkat. Ilustrasi gaya yang bekerja pada pipa dapat dilihat pada **Gambar 3**



Gambar 3 Ilustrasi gaya yang bekerja pada pipa

Pada tugas akhir ini, hal yang pertama dilakukan sebelum menganalisis kestabilan adalah menentukan parameter dari data kecepatan arus dan menentukan distribusi yang cocok dengan

data kecepatan arus. Selanjutnya, dari distribusi yang cocok tersebut dapat ditentukan nilai kecepatan arus desain.

Langkah selanjutnya yaitu menganalisis kestabilan pipa bawah laut secara vertikal maupun berdasarkan kriteria desain yang ada dengan menggunakan DNV RP E-305. Setelah pipa yang ditinjau memenuhi kriteria kestabilan, akan dilakukan analisis kehandalan sehingga diperoleh probabilitas kegagalan kestabilan lateral pipa bawah laut.

Stabilitas Vertikal Pipa

Berdasarkan DNV RP E-305, kestabilan vertikal pipa tercapai apabila memenuhi **Persamaan 1**.

$$\frac{W_{stcc} + B_{tcc}}{B_{tcc}} \geq 1.1 \quad (1)$$

Dimana :

W_{stcc} = Berat pipa di dalam air (kg/m)

B_{tcc} = Gaya apung (kg/m)

Berat pipa di dalam air adalah berat keseluruhan pipa dikurang gaya apung pipa. Sementara pipa keseluruhan pipa adalah jumlah dari berat lapisan baja, berat lapisan korosi, berat lapisan beton, dan berat isi pipa.

Stabilitas Lateral Pipa

Syarat yang harus dipenuhi pada kestabilan lateral pipa (DNV RP E305, 1998) dapat dilihat pada **Persamaan 2**

$$\frac{W_{stcc}}{W_{req}} \geq 1 \quad (2)$$

Dimana :

W_{stcc} = berat pipa di dalam air (kg/m)

W_{req} = berat minimum pipa yang dibutuhkan (kg/m)

Berat minimum pipa yang dibutuhkan dapat diperoleh dari **Persamaan 3**

$$W_{req} = \left[\frac{(F_D + F_I) + (\mu F_L)}{\mu} \right]_{\theta_{max}} F_W \quad (3)$$

$$F_D = \frac{1}{2g} \rho_{SW} D_{tcc} C_D [(U_S \cos(\theta) + U_D)(U_S \cos(\theta) + U_D)] \quad (4)$$

$$F_I = \frac{\pi D_{tcc}^2 \rho_{SW} C_M A_S \sin \theta}{4g} \quad (5)$$

$$F_L = \frac{1}{2g} \rho_{SW} D_{tcc} C_L (U_S \cos(\theta) + U_D)^2 \quad (6)$$

Dimana :

W_{req} = berat minimum pipa yang dibutuhkan (kg/m)

F_D = gaya seret (kg/m)

F_I = gaya inersia (kg/m)

F_L = gaya angkat (kg/m)

F_W = faktor kalibrasi

μ = koefisien friksi tanah

D_{tcc} = diameter keseluruhan pipa (m)

ρ_{SW} = densitas air laut (kg/m³)

C_D = koefisien *drag*

C_M = koefisien inersia

C_L = koefisien *lift*

U_D = kecepatan arus rata-rata yang melewati pipa (m/s)

U_S = kecepatan partikel air (m/s)

A_S = percepatan arus tegak lurus pipa (m/s²)

θ = sudut fasa yang memberikan nilai hidrodinamika maksimum

Tahap-tahap perhitungan berat minimum pipa yang dibutuhkan (DNV RP E305, 1998) sebagai berikut:

1. Tentukan *peakedness parameter*
2. Tentukan kecepatan partikel air
3. Tentukan faktor Reduksi
4. Tentukan periode *Zero Up Crossing*
5. Tentukan ukuran butiran dan *roughness* dari tanah di dasar laut
6. Tentukan kecepatan arus rata-rata yang melewati pipa
7. Tentukan *Wave current velocity ratio*
8. Tentukan percepatan partikel air *wave induced*
9. Tentukan bilangan Keulegan – Carpenter
10. Tentukan faktor kalibrasi
11. Tentukan faktor friksi tanah
12. Tentukan koefisien hidrodinamik

Parameter Statistik

Parameter statistik digunakan untuk menentukan nilai kecepatan arus desain. Pada tugas akhir ini, parameter statistik yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Nilai Rata – rata
- Nilai Varian
- Nilai Standar Deviasi
- Nilai Koefisien Variasi

Uji Kecocokan Distribusi Variabel Acak

Uji kecocokan distribusi variabel acak digunakan untuk menentukan distribusi mana yang mendekati distribusi kecepatan arus. Pada tugas akhir ini, jenis distribusi yang akan digunakan adalah Distribusi Normal, Distribusi Log Normal, dan Distribusi Weibull.

Sementara itu, uji kecocokan yang akan dilakukan adalah uji kecocokan rata-rata persentase error dan uji kecocokan deviasi.

- Uji Kecocokan Rata-rata Persentase Error

Secara matematika dapat dinyatakan dengan

Persamaan 7:

$$\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{x}_i - x_i}{x_i} \right| * 100\% \right] \quad (7)$$

- Uji Kecocokan Deviasi

Secara matematika dapat dinyatakan dengan

Persamaan 8:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{N - 1}} \quad (8)$$

Keterangan:

- $\hat{x}_i$ = Nilai analitis
 x_i = Nilai aktual
 N = Jumlah data
 i = nomor urut data (1,2,3,...)
 δ = Deviasi

Penentuan Nilai Desain Variabel Acak.

Hal pertama yang diperlukan untuk menentukan nilai desain variabel acak adalah dengan menentukan probabilitas kejadian dari periode ulang yang ditentukan. Nilai variabel acak desain dapat ditentukan dengan menentukan nilai variabel acak yang berpasangan dengan CDF variabel acak.

Metode Simulasi Monte Carlo

Metode ini memiliki enam proses utama (Haidar,2000), yaitu:

- Mendefinisikan variabel acak yang berpengaruh pada permasalahan yang ingin diselesaikan
- Tentukan parameter statistik dari variabel acak tersebut serta PDF dan CDFnya.
- Generate* nilai variabel acak tersebut sejumlah N data.
- Mengevaluasi masalah variabel acak dengan mengelompokkan bagian yang

memenuhi kriteria dan yang tidak memenuhi kriteria.

- Hitung probabilitas kegagalan dengan **Persamaan 9**:

$$POF = \frac{N_{gagal}}{N_{total}} \quad (9)$$

- Analisis akurasi dan efisiensi dari proses simulasi ini.

DASAR DESAIN DAN PEMODELAN

Dasar Desain

Pada tugas akhir ini akan ditinjau dua jalur pipa. Jalur pipa *phase 1* adalah jalur pipa dari Maringgai ke Bojonegara dan jalur pipa *phase 2* adalah jalur pipa dari Maringgai ke Muara Bekasi. Data pipa bawah laut yang akan digunakan pada tugas akhir ini ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Data pipa bawah laut

Parameter	Nilai	Nilai
Phase	I	II
Jalur Pipa	Maringgai - Bojonegara	Maringgai - Muara Bekasi
Diameter Terluar Pipa (D_o)	0.8128 m	0.8128 m
Corrosion Allowance (C_a)	0.002 m	0.002 m
Tebal Lapisan Korosi (t_{cor})	0.0025 m	0.0025 m
Massa Jenis Lapisan Korosi (ρ_{cor})	1280 kg/m ³	1280 kg/m ³
Tebal Lapisan Beton (t_{cc}) Zona 2	0.0845 m	0.096 m
Tebal Lapisan Beton (t_{cc}) Zona 4	0.0292 m	0.0515 m
Massa Jenis Beton (ρ_{cc})	3044 kg/m ³	3044 kg/m ³
Tebal Lapisan Baja Zona 2	0.015875 m	0.015875 m
Tebal Lapisan Baja Zona 4	0.022225 m	0.015875 m
Massa Jenis Baja (ρ_s)	7850 kg/m ³	7850 kg/m ³
Poisson's Ratio for Steel	0.3	0.3
Content Density (ρ_{con})	50 kg/m ³	50 kg/m ³
Soil Type	Sand	Sand

Sedangkan kedalaman minimum dan maksimum

pada setiap zona dapat dilihat pada **Tabel 2**

Tabel 2 Kedalaman Perairan

Parameter	Pipa phase 1 dan phase 2			
	Kedalaman Minimum		Kedalaman Maksimum	
	Zona2	Zona4	Zona2	Zona4
Kedalaman Perairan (d)	13 m	51.9 m	26 m	58.41 m

Sementara itu untuk data gelombang pada setiap zona dapat dilihat pada **Tabel 3** dan data arus pada setiap zona dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 3 Data Gelombang

Tabel 4 Data Arus

Parameter Gelombang		
Zona	100 Tahun	
	H_z (m)	T_z (s)
2	3.10	8.74
4	4.07	10.42

Range Kecepatan Arus (m/s)	Distribusi Kejadian Tahunan per Jam	
	Zona 2	Zona 4
0.0 - 0.1	1580	2402
0.1 - 0.2	1944	2545
0.2 - 0.3	1807	1691
0.3 - 0.4	1252	1237
0.4 - 0.5	972	681
0.5 - 0.6	689	186
0.6 - 0.7	385	18
0.7 - 0.8	123	0
0.8 - 0.9	0	0

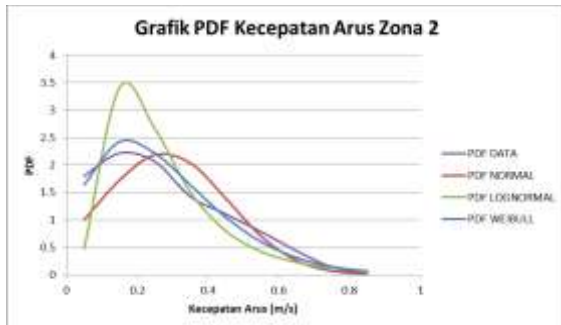
Pada tugas akhir ini, parameter statistik yang akan digunakan adalah nilai rata-rata, standar deviasi, varian, dan koefisien variansi. Hasil perhitungan parameter statistik kecepatan arus dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Parameter statistik kecepatan arus

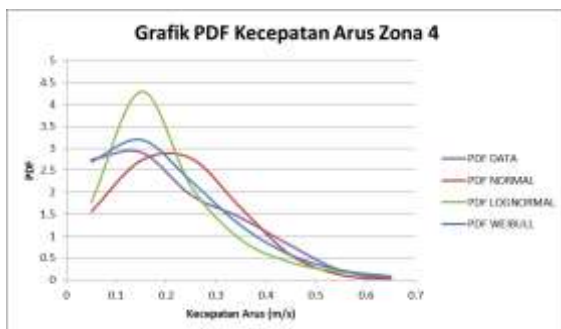
	Zona 2	Zona 4
Nilai Rata - Rata	0.277 m/s	0.203 m/s
Nilai Varian	0.033 m/s	0.021 m/s
Nilai Standar Deviasi	0.181 $\sqrt{\text{m/s}}$	0.147 $\sqrt{\text{m/s}}$
Nilai Koefisien Variansi	0.655	0.722

Uji statistik kecepatan arus dilakukan untuk mencocokkan jenis distribusi yang paling sesuai

dengan variabel acak arus. Hal yang perlu dilakukan ialah membandingkan PDF distribusi kecepatan arus dengan distribusi normal, lognormal dan weibull. Grafik perbandingan distribusi pada zona 2 dapat dilihat pada **Gambar 3** dan pada zona 4 dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 3 Grafik perbandingan PDF kecepatan arus (zona 2)



Gambar 4 Grafik perbandingan PDF kecepatan arus (zona 4)

Pada tugas akhir ini, uji statistik kecepatan arus menggunakan metode uji statistik deviasi dan uji statistik persentase error. Hasil perhitungan nilai deviasi dapat dilihat pada **Tabel 6**

Tabel 6 Hasil perhitungan nilai deviasi (Zona 2)

Zona	Deviasi Normal	Deviasi Log Normal	Deviasi Weibull
2	0.0126	0.0209	0.0047
4	0.0160	0.0194	0.0055

Berdasarkan perhitungan pada **Tabel 6**, zona dua memiliki nilai deviasi terkecil terdapat

pada distribusi weibull dengan nilai 0.0047 dan pada zona empat memiliki nilai deviasi terkecil terdapat pada distribusi weibull dengan 0.0055. Oleh karena itu, pada zona dua dan zona empat distribusi yang paling sesuai dengan variabel acak yaitu distribusi weibull.

Hasil perhitungan nilai persentase *error* pada zona dua dapat dilihat pada **Tabel 7**

Tabel 7 Hasil perhitungan nilai persentase error (Zona 2)

Zona	Deviasi Normal	Deviasi Log Normal	Deviasi Weibull
2	42.09%	72.32%	22.93%
4	44.76%	48.68%	22.25%

Berdasarkan perhitungan pada, zona dua memiliki nilai persentase *error* terkecil terdapat pada distribusi weibull dengan nilai 22.93% dan pada zona empat memiliki nilai persentase *error* terkecil terdapat pada distribusi weibull dengan 22.25%. Oleh karena itu, pada zona dua dan zona empat distribusi yang paling sesuai dengan variabel acak yaitu distribusi weibull.

Nilai kecepatan arus desain dapat ditentukan dengan mengetahui nilai kecepatan arus dengan nilai $P(-\infty \leq u \leq U_{100}) = 0.99$ pada grafik CDF weibull. Dari grafik weibull diperoleh nilai kecepatan arus desain setiap zona yang dapat dilihat pada **Tabel 9**

Tabel 9 Nilai kecepatan arus desain

Zona	Nilai Kecepatan Arus Desain (100 tahun)
2	0.814 m/s
4	0.613 m/s

Hasil perhitungan analisis kestabilan vertikal pipa bawah laut dapat dilihat pada **Tabel 10**.

Tabel 10 Hasil perhitungan analisis vertikal

	Pipa Phase 1		Pipa Phase 2	
	Zona 2	Zona 4	Zona 2	Zona 4
Diameter Keseluruhan Pipa (m)	0.99	0.88	1.01	0.92
Diameter Lapisan Korosi (m)	0.82	0.82	0.82	0.82
Berat Lapisan Baja (kg/m)	372.91	433.32	312	312
Berat Lapisan Korosi (kg/m)	8.2	8.2	8.2	8.2
Berat Lapisan Beton (kg/m)	729.13	236.52	838.91	428.13
Berat Isi Pipa (kg/m)	23.57	23.18	23.96	23.96
Berat Total Pipa (kg/m)	1133.79	701.21	1183.06	772.28
Bouyancy (kg/m)	783.92	618.05	820.89	682.57
Wstcc (kg/m)	349.87	83.17	362.17	89.71
Specific Gravity (SG)	1.45	1.13	1.44	1.13

Pada 4 kondisi diatas nilai *specific gravity* memiliki nilai lebih kecil dari 1.1 maka dapat disimpulkan kedua pipa bawah laut memenuhi kriteria kestabilan vertikal.

Hasil perhitungan analisis kestabilan lateral pipa bawah laut dapat dilihat pada **Tabel 11**.

Tabel 11 Hasil perhitungan analisis lateral

Parameter	Pipa Phase	Kedalaman Minimum		Kedalaman Maksimum	
		Zona2	Zona4	Zona2	Zona4
Kedalaman Perairan (d)	1 dan 2	13 m	51.9 m	26 m	58.41 m
Periode Referensi (Tn)	1 dan 2	1.15 s	2.30 s	1.63 s	2.44 s
Peakedness Parameter (y)	1 dan 2	1	1	1	1
Kecepatan Partikel Air (Us)	1 dan 2	0.89 m/s	0.32 m/s	0.41 m/s	0.21 m/s
Periode Zero-Up Crossing	1 dan 2	8.81 s	11.60 s	9.36 s	12.04 s
Kecepatan Arus yang Bekerja pada Pipa (Ud)	1	0.72 m/s	0.50 m/s	0.68 m/s	0.50 m/s
	2	0.73 m/s	0.51 m/s	0.69 m/s	0.51 m/s
Wave Current Velocity Ratio (M)	1	0.81	1.59	1.67	2.44
	2	0.82	1.6	1.68	2.45
Percepatan Partikel Air Wiper Induced (As)	1 dan 2	0.63 m/s ²	0.17 m/s	0.28 m/s	0.11 m/s
Angka Keulegan Carpenter (K)	1	4.93	4.42	3.88	2.84
	2	4.75	3.99	3.79	2.7
Bilangan Reynolds (Re)	1	148038.04	66853.06	100373.9	57902.98
	2	151638.41	70463.12	102854.97	61057.47
Koefisien Kalibrasi (Fw)	1 dan 2	1	1	1	1
Berat Pipa yang Dibutuhkan (Wreq)	1	347.87 kg	82.57 kg	167.44 kg	59.94 kg
	2	360.05 kg	88.97 kg	173.63 kg	64.47 kg
Berat Pipa di Dalam Air (Wstcc)	1	349.87 kg	83.17 kg	349.87 kg	83.17 kg
	2	362.17 kg	89.71 kg	362.17 kg	89.71
Kestabilan Lateral	1	1.005	1.007	2.090	1.388
	2	1.006	1.008	2.086	1.387

Pada 8 kondisi diatas nilai *specific gravity*

memiliki nilai lebih besar dari 1 maka dapat disimpulkan kedua pipa bawah laut memenuhi kriteria kestabilan lateral.

Analisis Kehandalan

Pada metode simulasi Monte Carlo dibutuhkan persamaan performansi yang akan digunakan pada perangkat lunak Matlab dengan simulasi sebanyak 500,000 nilai kecepatan arus dan tinggi gelombang. Hasil perhitungan probabilitas kegagalan pipa bawah laut dapat dilihat pada **Tabel 12**.

Tabel 12 Hasil perhitungan probabilitas kegagalan

Zona	Pipa	Diameter Keseluruhan Pipa (D _{ecc})	Probability of Failure (Akibat Keacakan Arus)	Probability of Failure (Akibat Keacakan Arus dan Gelombang)
2	1	0.99 m	1.24%	10.89%
	2	1.01 m	1.27%	8.09%
4	1	0.88 m	1.14%	4.76%
	2	0.92 m	1.16%	3.67%
2	1	0.99 m	0.004%	0.35%
	2	1.01 m	0.002%	0.24%
4	1	0.88 m	0.08%	3.40%
	2	0.92 m	0.09%	2.51%

Berdasarkan **Tabel 12**, Probabilitas kegagalan yang terjadi di bawah 11% dengan kondisi probabilitas kegagalan kegagalan pada kedalaman minimum lebih besar dibandingkan kedalaman maksimum Hal ini disebabkan karena desain pipa bawah laut yang digunakan untuk kedalaman minimum adalah desain minimum pipa bawah laut agar pipa tersebut dapat memenuhi kriteria kestabilan secara vertikal maupun lateral.

Sementara itu, apabila diperlukan probabilitas kegagalan yang lebih kecil dapat melakukan penambahan lapisan beton pada pipa bawah laut agar berat pipa dalam air lebih berat sehingga kestabilan lateral pada pipa bawah laut menjadi lebih besar.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dapat disimpulkan analisis *on-bottom* stability pada zona 2 dengan kecepatan arus desain 0.814 m/s dan pada zona 4 dengan kecepatan arus desain 0.613 m/s, pipa bawah laut *phase* 1 maupun pipa bawah laut *phase* 2 memenuhi kriteria kestabilan secara vertikal dan lateral.

Peninjauan analisis kehandalan kestabilan lateral pipa bawah laut menunjukkan bahwa semakin dalam suatu perairan maka akan semakin kecil *probability of failure* yang terjadi.

Selain itu, dengan meninjau dari variabel keacakan arus dibandingkan meninjau dari variabel keacakan arus dan gelombang menunjukkan bahwa *probability of failure* dari kestabilan lateral pipa bawah laut pada saat meninjau dari variabel keacakan arus dan gelombang lebih besar dibandingkan pada saat meninjau dari variabel keacakan arus saja.

Hal-hal yang dapat diteliti lebih lanjut untuk penelitian berikutnya adalah:

1. Menganalisis kestabilan pipa bawah laut dapat dilakukan berdasarkan DNV RP F109.
2. Menganalisis kestabilan pipa bawah laut dapat dilakukan pada kondisi instalasi.
3. Menganalisis kehandalan kestabilan pipa bawah laut dengan metode *Variance Reduction Techniques* dan *Simulation of Correlated Random Variables*.
4. Menganalisis kehandalan kestabilan pipa bawah laut dengan mempertimbangkan keacakan parameter geoteknik seabed.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹ Det Norske Veritas. 1998. *DNV RP E305 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Norwegia: Det Norske Veritas.
- ² Haldar, Achintya dan Sankaran Mahadevan. 2000. *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- ³ Ochi, Michael K. 1998. *Ocean Waves: The Stochastic Approach*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ⁴ Bai, Yong. 2001. *Pipeline and Risers: Volume 3*. Oxford; Elsevier