

ANALISIS KEHANDALAN KESTABILAN LATERAL PIPA BAWAH LAUT AKIBAT KEACAKAN KECEPATAN ARUS DAN MASSA JENIS BETON

Ulfa Chairunnisa

Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganeca No.10, Bandung 40132

email: ulfaulfachairunnisa@gmail.com¹, ddaya02@yahoo.com²

Kata kunci: analisis kehandalan, DnV RP E305, kestabilan pipa bawah laut, metode analisis kestabilan sederhana, simulasi Monte Carlo

ABSTRAK

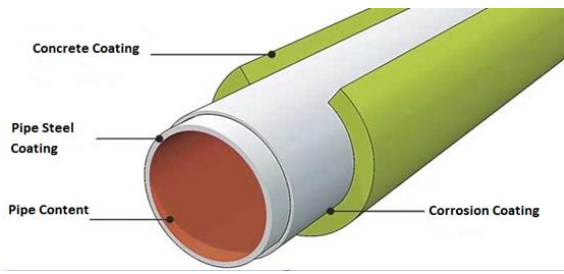
Sistem pipa bawah laut akan menghadapi berbagai hambatan dan masalah dalam proses instalasi maupun operasinya. Masalah yang sering terjadi salah satunya adalah masalah kestabilan pipa bawah laut (*on-bottom stability*). Masalah ini nantinya akan mengakibatkan ketidakstabilan yang merupakan kegagalan pada sistem pipa bawah laut tersebut. Standar umum yang digunakan untuk masalah di atas ada dua yaitu DnV RP E305 dan DnV RP F109. Namun pada studi ini standar umum yang digunakan adalah DnV RP E305. Analisis kestabilan pipa bawah laut ini dilakukan untuk dua kondisi yaitu instalasi dan operasi. Periode ulang parameter gelombang desain yang digunakan untuk kondisi instalasi adalah 1 tahun dan untuk kondisi operasi adalah 100 tahun. Data kecepatan arus yang digunakan merupakan hasil pemodelan setiap jam selama 10 tahun. Metode yang digunakan dalam menganalisis kestabilan pipa bawah laut adalah Metode Analisis Kestabilan Sederhana. Pipa bawah laut yang ditinjau hanya pipa pada zona 4 yang merupakan pipa proyek SSWJ PGN *phase 1*. Dilakukan analisis kehandalan dengan Metode Simulasi Monte Carlo dengan variabel acak kecepatan arus dan variabel acak massa jenis beton. Perhitungan parameter statistik dan penentuan bentuk distribusi dilakukan terlebih dahulu sebagai informasi dasar dalam melakukan analisis kehandalan dengan Metode Simulasi Monte Carlo. Hasil *generate* dari kedua variabel acak di atas digunakan untuk menganalisis kembali kestabilan pipa bawah laut. Sehingga *output* yang dikeluarkan berupa probabilitas kegagalan dan kehandalan yang terjadi pada sistem pipa bawah laut yang ditinjau.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Dalam pemanfaatan sumber daya bawah laut dibutuhkan sebuah jaringan pipa bawah laut untuk membantu proses pendistribusiannya menuju daratan. Dalam proses desainnya sering ditemui banyak

kegagalan seperti kegagalan *free span*, *fatigue*, dan kestabilan pipa bawah laut. Beberapa variabel acak yang mempengaruhinya antara lain kecepatan arus, gelombang, kemiringan *seabed*, massa jenis beton, massa jenis baja, dan massa jenis lapisan korosi mengingat hal ini bergantung kepada lapisan-lapisan yang terdapat pada pipa. Sebuah pipa bawah laut umumnya terdiri atas lapisan baja, lapisan beton, dan lapisan korosi yang dapat dilihat pada **Gambar 1** di bawah ini:



Gambar 1. Ilustrasi Lapisan Penampang Pipa Bawah Laut

Dikarenakan banyak dipengaruhi variabel acak maka hasil dari analisis ini berupa probabilitas atas kegagalan dan kehandalan kestabilan pipa bawah laut. Pada studi ini akan dilakukan perhitungan probabilitas kegagalan dan kehandalan akibat keacakan kecepatan arus dan massa jenis beton. Dengan mengetahui hal tersebut maka dapat dilakukan sebuah tindakan mitigasi.

Tujuan

Adapun tujuan dari pengerjaan studi ini adalah melakukan pemeriksaan kestabilan pipa bawah laut dengan parameter desain dan menentukan probabilitas kegagalan dan kehandalan pada kestabilan pipa bawah laut akibat keacakan kecepatan arus dan massa jenis beton.

Ruang lingkup

Ruang lingkup atau tahapan pekerjaan yang akan dilakukan pada pengerjaan studi ini antara lain adalah:

1. Pengumpulan data properti pipa, kedalaman, data gelombang desain, data hasil pemodelan kecepatan arus setiap jam selama 10 tahun, dan data hasil pengujian kuat tekan beton di laboratorium.
2. Analisis statistik kecepatan arus dan massa jenis beton yaitu meliputi perhitungan parameter statistik, pengujian distribusi probabilitas, dan penentuan nilai desain kecepatan arus dan massa jenis beton.
3. Analisis kestabilan pipa bawah laut dengan parameter desain.
4. Penentuan kemungkinan (probabilitas) terjadinya kegagalan dan kehandalan dalam kestabilan pipa bawah laut akibat keacakan kecepatan arus dan massa jenis beton.

TEORI DAN METODOLOGI

On-Bottom Stability

Analisis *On-Bottom Stability* ini terdiri atas dua bagian yaitu stabilitas vertikal dan lateral. Analisis stabilitas vertikal merupakan perhitungan berat tercelup pipa bawah laut dimana kondisi akan dikatakan stabil apabila *specific gravity* yang dihitung lebih besar sama dengan 1. Berikut persamaan untuk menghitung *specific gravity* : $SG = \frac{W_{tcc} + B_{tcc}}{B_{tcc}} \geq 1.1$

Dimana: W_{tcc} adalah berat pipa di dalam air, B_{tcc} adalah gaya apung pipa. Sedangkan pada analisis lateral pipa dilakukan perhitungan berat yang dibutuhkan (W_{req}) pipa dimana pipa akan stabil apabila berat tercelup (W_{stcc}) pipa lebih besar dari berat yang dibutuhkan (W_{req}) pipa.

Massa Jenis

Massa jenis adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda. Setiap zat memiliki massa jenis yang berbeda. Dan satu zat berapapun massanya berapapun volumenya akan memiliki massa jenis yang sama. Massa jenis yang digunakan pada pengerjaan studi ini adalah massa jenis beton yaitu **3044 kg/m³**.

Statistika

Parameter Statistik

Nilai rata-rata $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, dimana: μ adalah nilai rata-rata, N adalah jumlah keseluruhan data, dan x_i adalah nilai data tunggal.

Standar deviasi $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$, dimana: σ adalah standar deviasi, x_i adalah nilai data tunggal, μ adalah nilai rata-rata data, dan N adalah jumlah keseluruhan data.

Koefisien variasi (COV) $COV = \frac{\sigma_x}{\mu_x}$, dimana: COV adalah koefisien variasi, σ_x adalah standar deviasi data, dan μ_x adalah nilai rata-rata suatu data.

Jenis-Jenis Fungsi Distribusi Probabilitas

Dalam dunia statistika terdapat beberapa fungsi distribusi yang dapat merepresentasikan beberapa data. Namun di dalam studi ini hanya digunakan tiga fungsi distribusi untuk merepresentasikan data yang ditinjau yaitu distribusi normal (distribusi Gauss), distribusi lognormal, distribusi weibull.

Jenis-Jenis Uji Statistik

Pada studi ini digunakan tiga uji statistik yaitu uji *Kolmogorov-Smirnov*, uji *Chi-Square* dan uji Deviasi. Masing-masing metode uji ini memiliki ketentuan-ketentuan sendiri dalam menentukan distribusi mana yang layak digunakan.

Peristiwa Bebas dan Bersyarat

Peristiwa bebas merupakan sebuah kejadian atau ketidakjadian suatu peristiwa tidak mempengaruhi peristiwa lain. Sedangkan peristiwa bersyarat adalah kejadian atau ketidakjadian suatu peristiwa akan berpengaruh terhadap peristiwa lainnya.

Probabilitas Kegagalan dan Kehandalan

Probabilitas kegagalan (*probability of failure*)

Probabilitas kegagalan merupakan sebuah prediksi mengenai kemungkinan terjadinya kegagalan dalam kurun waktu tertentu. Dibutuhkan analisis statistik untuk menghitungnya dimana mencakup perhitungan parameter statistik, bentuk distribusi, dan uji kecocokan. Kemudian untuk menghitung probabilitas kegagalan ini dapat menggunakan persamaan berikut: $POF = 1 - P(Kehandalan)$

Kehandalan (*reliability*)

Kejadian dari keluaran yang bervariasi tanpa pola apapun dikenal sebagai **ketidakpastian** atau **keacakan**. Tugas utama dari proses perencanaan dan desain adalah untuk memastikan performa kestabilan yang mungkin terjadi. Probabilitas jaminan performa atau kehandalan dalam dunia *engineering* secara matematis, ditulis seperti berikut: $P(Kehandalan) = 1 - P(Kegagalan)$

Metode Analisis Kehandalan

Terdapat dua kategori metode yang dapat digunakan dalam analisis kehandalan yaitu secara analitik dan simulasi. Metode *fully analytic* terdiri atas dua jenis yaitu FORM dan SORM. Sedangkan metode yang

digunakan pada studi ini adalah metode simulasi yaitu Simulasi Monte Carlo. Prinsip men-generate data dalam Simulasi Monte Carlo adalah pada umumnya komputer modern mempunyai kapabilitas untuk men-generate bilangan acak terdistribusi merata antara 0 sampai 1. Terkadang pembangkit bilangan acak menggunakan bit dan digit biner dalam kasus yang paling sering yaitu LCG (*Linear Congruential Generators*). Dengan mengubah nilai umpan (*seed*) seperti yang telah dijelaskan di atas maka kumpulan bilangan acak yang berbeda akan dapat dibangkitkan. Tergantung dengan ukuran komputer, maka bilangan acak memungkinkan untuk terulang. Namun, pengulangan ini biasanya hanya akan dimulai setelah membangkitkan kuantitas bilangan acak yang sangat besar yaitu 10^9 . Saat ini bilangan acak dikenal sebagai *pseudo random numbers*.

Metodologi

Adapun metodologi yang digunakan dalam pengerjaan studi ini terdiri atas pengumpulan data-data penunjang seperti data properti pipa, kedalaman, gelombang desain, dan kuat tekan beton. Setelah itu dilakukan perhitungan parameter statistik, penentuan bentuk distribusi dan penentuan nilai desain. Kemudian dengan nilai desain tersebut dilakukan analisis *on-bottom stability* dengan t_{cc} (*concrete coating*) 61 mm sampai pipa berada pada kondisi stabil. Setelah itu dilakukan analisis kehandalan dengan menggunakan informasi parameter statistik dan bentuk distribusi yang telah dihitung untuk masing-masing parameter acak. Kemudian dilakukan perbandingan hasil dari keduanya.

HASIL DAN ANALISIS

Berikut parameter pipa bawah laut yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 1** di bawah ini:

Tabel 1. Parameter Pipa Bawah Laut

No.	Parameter Nilai Desain	Nilai
1.	Diameter terluar pipa (D_o)	0.8128 m
2.	Wall Thickness (t_w)	0.875 in
3.	Tebal lapisan korosi (t_{cor})	0.0025 m
4.	Tebal lapisan beton (t_c)	0.0061 m
5.	Korosi yang diizinkan (C_d)	0.003 m
6.	Massa jenis baja	7850 kg/m ³
7.	Massa jenis lapisan beton	3044 kg/m ³
8.	Massa jenis lapisan korosi	1280 kg/m ³
9.	Massa jenis air laut	1025 kg/m ³
10.	Massa jenis produk	50 kg/m ³

Berikut parameter lingkungan yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 2** di bawah ini:

Tabel 2. Parameter Lingkungan

No.	Parameter	Nilai
1.	Kedalaman perairan (d)	48 m – 59 m
2.	Tinggi gelombang signifikan (H_s) 100 th	4.07 m
3.	Periode gelombang signifikan (T_s) 100 th	10.42 detik
4.	Tinggi gelombang signifikan (H_s) 1 th	1.27 m
5.	Periode gelombang signifikan (T_s) 1 th	5.6 m
6.	Jenis tanah	Pasir

Kestabilan Pipa Bawah Laut Akibat Keacakan Kecepatan Arus

Perhitungan Parameter Statistik

Berikut akan dipaparkan hasil perhitungan parameter statistik dari kecepatan arus yang ditunjukkan pada **Tabel 3** di bawah ini:

Tabel 3. Hasil Perhitungan Parameter Statistik Kecepatan Arus

No.	Parameter Statistik Kecepatan Arus	Nilai
1.	Nilai Rata-rata	0.203 m/s
2.	Standar Deviasi	0.133 m/s
3.	Koefisiens Variasi	0.65

Perhitungan Uji Distribusi

Dalam perhitungan uji distribusi, distribusi dengan *error* terkecil yang dipilih. Berikut dipaparkan nilai *error* dari masing-masing bentuk distribusi dalam metode uji Deviasi (uji yang layak) yang ditunjukkan pada **Tabel 4** di bawah ini:

Tabel 4. Perhitungan Nilai Error

No	Distribusi	Uji Kecocokan	Nilai Error
1	Lognormal	Uji Deviasi	0.001875378
2	Weibull	Uji Deviasi	0.000779974
3	Normal	Uji Deviasi	0.00144571

Penentuan Nilai Desain

Nilai desain kecepatan arus yang digunakan adalah **0.65 m/s** dengan periode ulang kecepatan arus 100 tahun.

Analisis On-Bottom Stability

Berikut parameter desain yang digunakan dalam perhitungan kestabilan pipa bawah laut yang ditunjukkan pada **Tabel 5** di bawah ini:

Tabel 6. Parameter Desain Pipa Bawah Laut

No.	Parameter Nilai Desain	Nilai
1.	Diameter terluar pipa (D_s)	0.8128 m
2.	Wall Thickness (t_s)	0.875 in
3.	Tebal lapisan korosi (t_{corr})	0.0025 m
4.	Tebal lapisan beton (t_{cc})	0.0061 m
5.	Korosi yang diizinkan (C_a)	0.003 m
6.	Massa jenis baja	7850 kg/m ³
7.	Massa jenis lapisan beton	3044 kg/m ³
8.	Massa jenis lapisan korosi	1280 kg/m ³
9.	Massa jenis air laut	1025 kg/m ³
10.	Massa jenis produk	50 kg/m ³

Dengan parameter desain di atas didapat hasil perhitungan stabilitas vertikal pipa bawah laut dimana SG yang dihitung lebih besar dari 1.1 atau berada dalam keadaan stabil. Hal ini dijelaskan pada **Tabel 6** di bawah ini:

Tabel 5. Hasil Perhitungan Stabilitas Vertikal Pipa

No.	Parameter	Kondisi	
		Operasi (m)	Instalasi (m)
1	D_s	0.8128	0.8128
2	t_s	0.0222	0.0222
3	D_i	0.7744	0.7684
4	ID	0.7684	0.7684
5	D_{corr}	0.8178	0.8178
6	D_{cc}	0.9397	0.9397
7	D_{tec}	0.9397	0.9397
8	Berat pipa baja	433.3157	433.3157
9	Berat lapisan korosi	8.1963	8.1963
10	Berat lapisan beton	512.2828	512.2828
11	Berat isi pipa	23.5469	0.0000
12	Gaya apung pipa	710.9036	710.9036
13	Berat pipa tercelup	266.4381	242.8912
14	SG	1.3417	1.3748

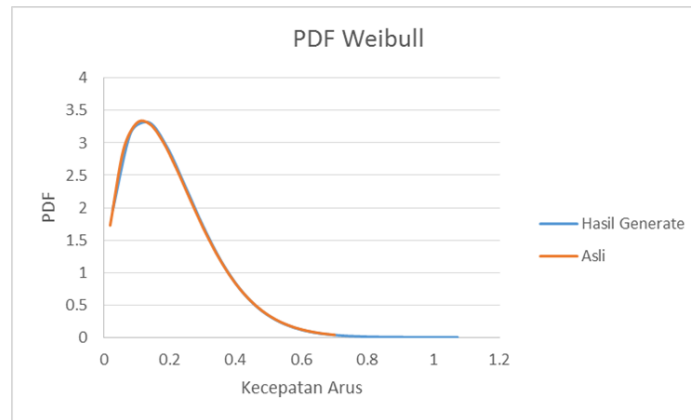
Analisis Kehandalan

Berikut data hasil *generate* kecepatan arus dengan menggunakan Matlab yang ditunjukkan pada **Tabel 7** di bawah ini

Tabel 7. Kecepatan Arus Hasil *Generate*

No	Ur (m/s)
1	0.082638
2	0.052003
3	0.359245
4	0.04917
5	0.137914
6	0.387823
7	0.264884
8	0.164312
9	0.030793
10	0.027207
...	
397859	0.708514
397860	0.238163

Kemudian berikut akan ditunjukkan grafik fungsi PDF Weibull kecepatan arus awal dan kecepatan arus hasil *generate* pada **Gambar 2** di bawah ini:



Gambar 2. PDF Weibull Kecepatan Arus

Dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Matlab didapat hasil probabilitas kegagalan dan kehandalan akibat keacakan arus yang ditunjukkan pada **Tabel 8** di bawah ini:

Tabel 8. Probabilitas Kegagalan dan Kehandalan

No.	Kondisi	Probabilitas Kegagalan	Probabilitas Kehandalan
1	Instalasi	0.003734	0.996266
2	Operasi	0.002242	0.997758

Berdasarkan tabel di atas dapat diketahui bahwa saat kondisi operasi probabilitas kegagalan yang terjadi yaitu **0.2242%** dan **0.3734%** saat instalasi.

Kestabilan Pipa Bawah Laut Akibat Keacakan Kecepatan Arus dan Massa Jenis Beton

Perhitungan Parameter Statistik Massa Jenis Beton

Dengan merujuk data kuat tekan beton mutu K-250 kita dapat menghitung parameter statistik massa jenis beton. Berikut hasil perhitungannyayang ditunjukkan pada **Tabel 9** di bawah ini:

Tabel 9. Parameter Statistik Massa Jenis Beton

No.	Massa Jenis Beton	
1.	Bentuk distribusi	Distribusi Normal
2.	Nilai Rata-rata	4276.19 kg/m ³
3.	Standar Deviasi	328.4 kg/m ³

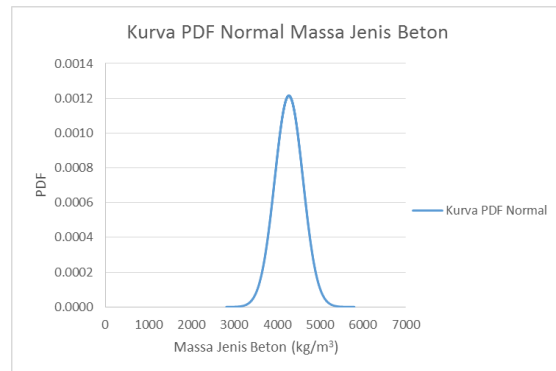
Analisis Kehandalan

Berikut data massa jenis beton hasil *generate* yang ditunjukkan pada **Tabel 10** di bawah ini:

Tabel 10. Massa Jenis Beton Hasil *Generate*

Rho Beton (kg/m ³)
2820.17
2835.975
2847.432
2856.337
2869.079
2880.92
2886.2
2921.582
2926.346
.....
4338.052
4338.053
4338.054
4338.055
4338.056

Kemudian berikut grafik fungsi PDF Normal massa jenis beton hasil *generate* yang ditunjukkan pada **Gambar 3** di samping:



Gambar 3. PDF Normal Massa Jenis Beton Hasil *Generate*

Untuk Parameter Keacakan Massa Jenis Beton

Berikut akan dipaparkan hasil perhitungan probabilitas kegagalan dan kehandalan kestabilan pipa bawah laut akibat keacakan kecepatan arus saja yang ditunjukkan pada **Tabel 11** di bawah ini:

Tabel 11. Hasil Probabilitas Kegagalan dan Kehandalan

No.	Kondisi	Probabilitas Kegagalan	Probabilitas Kehandalan
1	Instalasi	0.022872	0.977128
2	Operasi	0.176762	0.823238

Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwa kegagalan pada kondisi operasi yaitu **0.176762** lebih besar daripada saat instalasi yaitu **0.022872**.

Untuk Parameter Keacakan Kecepatan Arus dan Massa Jenis Beton

Berikut akan dipaparkan hasil perhitungan probabilitas kegagalan dan kehandalan kestabilan pipa bawah laut akibat keacakan kecepatan arus dan massa jenis beton yang ditunjukkan pada **Tabel 12** di bawah ini:

Tabel 12. Hasil Perhitungan Probabilitas Kegagalan dan Kehandalan

No.	Kondisi	Probabilitas Kegagalan	Probabilitas Kehandalan
1	Instalasi	0.004062	0.995938
2	Operasi	0.026862	0.973138

Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwa kegagalan terbesar terjadi di saat kondisi operasi yaitu **0.026862**. Sedangkan untuk kondisi instalasi, kegagalan hanya terjadi $\frac{1}{6.6}$ dari kondisi operasi yaitu **0.004062**.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Adapun kesimpulan dalam studi ini adalah sebagai berikut:

1. Bentuk distribusi kecepatan arus yang diperoleh dari pengujian dengan beberapa uji statistic adalah Distribusi Weibull.
2. Kecepatan arus desain yang didapat dari analisis statistik kecepatan arus setiap jam untuk 10 tahun dengan periode ulang 100 tahun adalah 0.65 m/s.
3. Analisis kestabilan pipa bawah laut yang telah dilakukan dengan menggunakan parameter desain dan tebal lapisan beton (concrete coating) pada pipa sebesar 61 mm untuk kondisi instalasi dan operasi dinyatakan stabil.
4. Hasil yang didapat dari perhitungan parameter statistik kecepatan arus adalah nilai rata-rata sebesar 0.203 m/s, standar deviasi sebesar 0.133 m/s, dan koefisien variasi sebesar 0.658.
5. Hasil yang didapat dari perhitungan parameter statistik massa jenis beton adalah nilai rata-rata sebesar 4276.19 kg/m³, standar deviasi sebesar 328.4 kg/m³, dan koefisien variasi sebesar 0.076.
6. Analisis kehandalan dengan bantuan Metode Simulasi Monte Carlo sebanyak 500000 menghasilkan probabilitas kegagalan pada kestabilan pipa bawah laut dengan menjadikan kecepatan arus saja sebagai parameter acak adalah 0.003734 untuk kondisi instalasi dan 0.002242 untuk kondisi operasi.
7. Analisis kehandalan dengan bantuan Metode Simulasi Monte Carlo sebanyak 500000 menghasilkan probabilitas kegagalan pada kestabilan pipa bawah laut dengan menjadikan massa jenis beton saja sebagai parameter acak adalah 0.022872 untuk kondisi instalasi dan 0.176762 untuk kondisi operasi.
8. Analisis kehandalan dengan bantuan Metode Simulasi Monte Carlo sebanyak 500000 menghasilkan probabilitas kegagalan pada kestabilan pipa bawah laut dengan menjadikan kecepatan arus dan massa

jenis beton sebagai parameter acak adalah 0.004062 untuk kondisi instalasi dan 0.026862 untuk kondisi operasi.

9. Hasil analisis kehandalan kestabilan pipa bawah laut dengan memperhitungkan dua parameter acak sekaligus adalah bahwa probabilitas kegagalan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan hasil probabilitas kegagalan yang hanya memperhitungkan satu parameter acak baik itu kecepatan arus maupun massa jenis beton.

Saran

Adapun saran dalam pengerjaan studi ini antara lain:

1. Analisis kestabilan pipa bawah laut yang dilakukan dapat menggunakan *code* lain yaitu DnV RP F109.
2. Analisis kehandalan dapat dilakukan dengan metode lain yaitu secara *fully analytic* yakni dengan cara FORM ataupun SORM.
3. Jumlah simulasi yang semakin besar dalam penerapan Metode Simulasi Monte Carlo akan meningkatkan akurasi dari proses simulasi yang dilakukan.
4. Selanjutnya dapat dilakukan analisis resiko dan mitigasi serta analisis sensitivitas terhadap kestabilan pipa bawah laut.

DAFTAR PUSTAKA

Bai, Yong. 2001. *Pipeline and Risers: Volume 3*. Oxford: Elsevier.

Det Norske Veritas. 2010. *DnV RP E305 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Norwegia: Det Norske Veritas.

Fauzi, Muhammad Reza. 2015. *Analisis Resiko Kestabilan Lateral Pipa Bawah Laut Akibat Keacakan Kecepatan Arus*. Bandung: ITB.

Haldar, Achintya dan Sankaran Mahadevan. 2000. *Probability and Statistics: Sixth Edition*. Boston: PWS Publishers.

Tawekal, R. L. 2012. *Bangunan Lepas Pantai II: Desain Pipa Bawah Laut*. Bandung: ITB.

Wurjanto, Andoyo. 2004. *Analisis Statistik dan Probabilitas*. Bandung: ITB.