

## Studi Komparasi Stabilitas Pipa Bawah Laut Dengan DNVGL-RP-F109 dan Elemen Hingga

Nafisa Nandalianadhira<sup>1\*</sup>, Mochammad Fathurridho Hermanto<sup>1</sup>, M. Syarif Hidayatullah<sup>1</sup>

Institut Teknologi Sumatera

Jl. Terusan Ryacudu Way Huwi Jati Agung Lampung Selatan 35365 Lampung

\*[nafisa.nandalianadhira@kl.itera.ac.id](mailto:nafisa.nandalianadhira@kl.itera.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i2.18804>

### Abstrak

Penggelaran di bawah laut tanpa digali atau dikubur merupakan alternatif yang paling efektif. Pipa harus dipastikan stabil di dasar laut, tidak mengalami pergerakan saat terkena gaya lingkungan. Terdapat dua hal penting yang dianalisis dalam proses desain dan analisis stabilitas pipa bawah laut yaitu gaya hidrodinamis dan hidrostatik. Dalam proses desain pipa bawah laut, salah satu tahap paling penting adalah penentuan ketebalan dinding pipa. Salah satu standar yang banyak digunakan di industri adalah DNVGL-ST-F101. Diameter dan tebal pipa bawah laut menjadi parameter penting kestabilan pipa bawah laut. Hubungan gaya yang bekerja pada pipa bawah laut dengan tahanan tanah (dasar laut) telah diatur dalam DNVGL-RP-F109. Selain itu, perhitungan stabilitas juga dapat dilakukan berdasarkan pemodelan pipa dan aliran air disekitarnya dengan metode elemen hingga. Berdasarkan kedua metode tersebut, kestabilan vertikal dan lateral pipa bawah laut dapat ditentukan. Jika pipa tidak stabil, maka diperlukan penambahan lapisan beton. Berdasarkan properti pipa dan data lingkungan, ketebalan dinding pipa bawah laut didapatkan 18.203 mm. Untuk dapat memenuhi kestabilan vertikal dan lateral untuk kondisi operasi dan instalasi dibutuhkan lapisan beton setebal 41 mm. Gaya hidrodinamis terbesar terjadi pada kondisi operasi sebesar 165.693 N/m berdasarkan DNVGL-RP-F109 dan 154.150 N/m berdasarkan elemen hingga. Selisih hasil kedua metode tersebut hanya 6.96%.

**Kata Kunci** : pipa bawah laut, stabilitas, pemodelan, metode elemen hingga

### Abstract

Deployment under the sea without being excavated or buried is the most effective alternative. The subsea pipeline must be ensured to be stable on the seabed, not experiencing movement when exposed to environmental forces. There are two main things that must be analyzed in the design process and stability analysis of subsea pipelines, hydrodynamic and hydrostatic forces. In the subsea pipeline design process, one of the most important steps is determining the wall thickness. One standard that is widely used is DNVGL-ST-F101. The diameter and thickness of the subsea pipeline are important parameters for determining subsea pipeline stability. The relationship between the forces acting to the subsea pipeline and the resistance of the soil (seabed) has been regulated in DNVGL-RP-F109. In addition, stability calculations can also be performed based on subsea pipeline modeling on the seabed using the finite element method. Based on these two methods, the vertical and lateral stability of the subsea pipeline can be determined. If the subsea pipeline is unstable, it is necessary to add concrete coating. Based on the pipe properties and environmental data, the wall thickness of the subsea pipeline is 18.203 mm. To be able to meet vertical and lateral stability for operating and installation conditions, 41 mm thick concrete coating is required. The greatest hydrodynamic force occurs in operating condition of 165.693 N/m based on DNVGL-RP-F109 and 154.150 N/m based on finite element. The difference of those result is only 6.96%.

**Key words** : subsea pipeline, stability, modelling, finite element method

## PENDAHULUAN

Kebutuhan setiap daerah terhadap minyak dan gas tidak selalu dapat dipenuhi dari daerahnya sendiri. Selain menghubungkan daerah-daerah, pipa bawah laut merupakan penghubung penting antara anjungan lepas pantai dengan daratan (Yu

et al., 2013). Selain itu, pipa bawah laut juga dapat menghubungkan antar anjungan lepas pantai, mengingat tidak seluruh anjungan lepas pantai memiliki fungsi yang lengkap dan sama. Oleh karena itu, kebutuhan distribusi fluida menggunakan fasilitas pipa bawah laut masih tinggi, dalam mendistribusikan minyak bumi dan gas alam. Mengacu pada Rencana Induk Jaringan Transmisi dan Distribusi Gas Bumi Nasional Tahun 2022-2031 berdasarkan Keputusan Menteri Energi Sumber Daya dan Mineral (ESDM) Nomor

### Article History:

**Received:** Jan, 28<sup>th</sup> 2023; **Accepted:** July, 8<sup>th</sup> 2023

### Cite this as :

Nandalianadhira, N., Hermanto, M.F & Hidayatullah, M.S. 2023. Studi Komparasi Stabilitas Pipa Bawah Laut dengan DNVGL-RP-109 dan Elemen Hingga. *Rekayasa*. Vol 16(2). 226-234

10.K/MG.01/MEM.M/2023, telah diputuskan bahwa diperlukan fasilitas dan sarana infrastruktur, antara lain pipa transmisi dan pipa distribusi meliputi 6 provinsi, termasuk Kepulauan Riau (Menteri ESDM RI, 2023).

Penggelaran pipa di bawah laut tanpa digali atau dikubur merupakan alternatif yang lebih ekonomis. Namun, risiko dari metode konstruksi pipa yang tidak dikubur lebih besar, terutama jika kondisi lingkungan laut ekstrem (Youssef *et al.*, 2013). Pipa harus dipastikan stabil di dasar laut atau pipa cenderung tidak berpindah lebih dari nilai ambang batas saat terkena pengaruh gaya hidrodinamis dan hidrostatis (Chukwu, 2016; Tian *et al.*, 2015). Stabilitas pipa bawah laut (*on-bottom stability*) dicapai dengan memenuhi keseimbangan antara beban dan tahanan. Beban yang diterima pipa bawah laut adalah gaya hidrodinamis yang merupakan gabungan dari arus dan gelombang. Stabilitas pipa dipengaruhi oleh gesekan antara pipa dengan tanah, yang berlawanan dengan gaya hidrodinamis gelombang air laut. Gaya angkat, atau yang biasa disebut *lift force* dan gaya seret yang biasa disebut *drag force* adalah komponen gaya hidrodinamis. Pipa bawah laut yang digelar di dasar laut akan sedikit terbenam ke dalam dasar laut, sehingga pipa mendapatkan tahanan akibat gesekan dengan tanah dasar laut (*seabed*). Hubungan beban-tahanan untuk analisis stabilitas pipa bawah laut telah diatur dalam standar desain, standar yang banyak digunakan oleh industri dan digunakan dalam penelitian ini adalah DNVGL-RP-F109 dalam penentuan stabilitas pipa bawah laut dan DNVGL-RP-F114 dalam penentuan hubungan pipa dengan tanah (DNVGL, 2017a, 2017b; Douglas Chukwu, 2016; Yu *et al.*, 2013).

DNVGL-RP-F109 merupakan dokumen panduan untuk kriteria desain yang rasional untuk stabilitas pipa yang terletak di dasar laut dan mengalami pembebanan gelombang dan arus. Dokumen ini merujuk dan mematuhi standar DNV GL lepas pantai DNVGL-ST-F101 terkait system pipa bawah laut, dan dianggap sebagai panduan pelengkap yang relevan (DNVGL, 2017c). Standar ini juga mengacu pada metode LRFD (*Load and Resistance Factors Design Format*). Untuk kriteria stabilitas absolut, rangkaian faktor keamanan dikalibrasi ke probabilitas kegagalan yang dapat diterima dengan menggunakan metode berbasis keandalan. Untuk kriteria desain lainnya, menggunakan rekomendasi tingkat keselamatan yang didasarkan pada penilaian teknik untuk

mendapatkan tingkat keselamatan yang setara dengan praktik industri modern. Penjelasan khusus terkait hubungan pipa dengan tanah DNVGL-RP-F109 merujuk kepada dokumen DNVGL-RP-F114 (DNVGL, 2017b).

Metode desain untuk penilaian stabilitas pipa bawah laut dibagi menjadi tiga kategori. Kategori pertama mencakup analisis *absolute lateral static stability* (ALSS) (DNVGL, 2017a), kategori kedua mencakup analisis *generalized lateral stability* (GLS) (DNVGL, 2017a), dan kategori ketiga mencakup analisis *dynamic lateral stability* (Hafez *et al.*, 2022; Youssef & O'Brien, 2017). Dalam penelitian ini, dilakukan analisis ALSS pada pipa berdiameter 273,05 mm yang diletakkan di perairan Natuna di dasar laut lempung. Kondisi pipa yang dipelajari adalah kondisi instalasi (pipa kosong) dan kondisi operasi (pipa berisi gas). *Absolute Lateral Static Stability* (ALSS) *method* atau metode statis lateral absolut mensyaratkan pipa tidak mengalami perpindahan statis lateral. Mengacu pada metode ALSS, berat minimal pipa terendam di bawah laut harus diperhitungkan untuk memenuhi syarat. (DNVGL, 2017a; Youssef & O'Brien, 2017).

Analisis dengan bantuan metode Elemen Hingga atau yang biasa disebut *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan perangkat lunak saat ini sudah umum digunakan dalam analisis dan desain pipa seperti yang dilakukan Bai *et al.* (2015). Berdasarkan pengalaman teknis konstruksi pipa, analisis dengan menggunakan metode elemen hingga bisa saja berbeda dengan perhitungan dari DNV (Bai & Yu, 2011). Untuk mencari tahu perbandingan kedua metode tersebut, dilakukan penelitian ini dengan studi kasus pipa bawah laut di perairan Natuna. Model elemen hingga pipa bawah laut dikembangkan dalam perangkat lunak ANSYS, yang mempertimbangkan interaksi pipa dengan tanah dan fluida. Lingkungan laut dalam ANSYS disimulasikan berdasarkan spektrum JONSWAP (*Joint North Sea Wave Observation Project*) (Peng & Hao, 2012).

## METODE PENELITIAN

Diagram alir penelitian ini secara keseluruhan ditunjukkan pada 1. Selain properti pipa, data lain yang digunakan antara lain data tanah dasar laut dan data lingkungan. Properti pipa yang digunakan dimuat dalam Tabel 1. Data lingkungan dan tanah dasar laut sesuai dengan lokasi studi, yaitu laut Natuna, dimuat dalam Tabel 2.

Tabel 1. Data Properti Pipa

Deskripsi	Simbol	Satuan	Kondisi	
			Instalasi	Operasi
Pipe Position	-	-	Seabed	Seabed
Material Grade	-	-	API 5L X-60	
Steel Density	$\rho_{steel}$	kg/m <sup>3</sup>	7,850	
Pipe Joint	JL	m	12.00	
Outside Diameter	OD	mm	273.05	
Corrosion Allowance	CA	mm	4	
Specified Minimum Yield Strength	SMYS	MPa	415	
Young's Modulus	E	MPa	207 x 10 <sup>3</sup>	
Anti-Corrosion Coating Thickness	$t_{corr}$	mm	3	
Anti-Corrosion Coating Density	$\rho_{corr}$	kg/m <sup>3</sup>	900	
Concrete Coating Density	$\rho_{conc}$	kg/m <sup>3</sup>	3,040	
Design Pressure	$P_d$	MPa	22.06	
Maximum Allowable Operating Pressure	MAOP	MPa	22.06	
Hydrotest Pressure	$P_h$	MPa	30.89	
Maximum Operating Temperature	$T_{op}$	°C	143	
Water Absorbtion	$Absn$	%	0.00	0.00
Content Density	$\rho_{max}$	kg/m <sup>3</sup>	0.00	83.20

Tabel 2. Data Lingkungan

Deskripsi	Simbol	Satuan	Kondisi	
			Instalasi	Operasi
Water Depth	$D_{max}$	m	76.13	
Sea Water Density	$\rho_{water}$	kg/m <sup>3</sup>	1,025.2	
Soil Type	-	-	Clay	
Dry unit soil weight	$\gamma_{soil}$	N.m <sup>-3</sup>	18,000	
Clay Shear Strength	$S_u$	Pa	5,000	
Soil Friction Factor	$\mu$	-	0.20	
Current Velocity	$V_s$	m/s	0.37	0.47
Measurement Height of Current Velocity	$Z_r$	m	3.00	
Significant Wave Height	$H_s$	m	4.00	5.70
Peak Wave Period	$T_p$	s	9.80	10.80
Angle between Current with Pipeline Bearing	-	deg	90.00	
Angle between Wave with Pipeline Bearing	-	deg	90.00	

**Pemilihan Ketebalan Pipa**

Ketebalan dinding pipa dipilih berdasarkan API 5L *Specification for Line Pipe* (API, 2007) dengan pertimbangan data properti pipa. Pemilihan ketebalan dinding pipa menyesuaikan ketersediaan ukuran ketebalan untuk kualitas dan diameter pipa tertentu. Ketebalan dinding pipa yang dipilih kemudian dicek menggunakan standar DNVGL-ST-F101 *Submarine Pipeline System* (DNVGL, 2017c). Jika ketebalan dinding pipa memenuhi standar tersebut maka nilai ketebalan tersebut akan dipilih untuk dianalisis lebih lanjut. Jika tidak, maka nilai ketebalan harus diperbesar dan dicek ulang.

Proses iterasi ini dilakukan terhadap empat kriteria yang ditinjau, yaitu: *Internal pressure containmernt*, *Local buckling – Combined loading*, *Propagation Buckling* dan *Local buckling – External pressure collapse* (Han-Suk et al., 2012). Tebal dinding adalah parameter yang akan mempengaruhi kekuatan struktur pipa di bawah laut terhadap beban yang bekerja pada pipa. Beban tersebut adalah tekanan yang disebabkan oleh fluida yang mengalir dalam pipa atau biasa disebut tekanan internal dan tekanan yang disebabkan oleh kondisi lingkungan laut (tekanan

hidrostatik) atau yang biasa disebut tekanan eksternal.

**Perhitungan Gaya Hidrostatik & Hidrodinamis**

Gaya hidrostatik dihitung untuk mendapatkan berat terendam pipa. Berat terendam pipa kemudian digunakan untuk analisis kestabilan vertikal dengan kriteria yang mengacu pada DNVGL-RP-F109. Pada tahap ini, dilakukan perhitungan gaya hidrodinamis berdasarkan parameter diameter luar pipa serta parameter lingkungan seperti arus, gelombang dan tanah. Perhitungan ini terdiri dari perhitungan pada arah horizontal ( $F_y^*$ ) dan vertikal ( $F_z^*$ ). Perhitungan ini mengacu pada DNVGL-RP-F109. Perhitungan gaya hidrodinamis ini diperlukan untuk analisis stabilitas lateral.

**Analisis Stabilitas Vertikal**

Analisis ini mempertimbangkan parameter pipa bawah laut berupa berat di dalam air dan gaya apung pipa. Parameter terpenuhinya analisis kestabilan vertikal ditunjukkan pada persamaan 1.

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{w_s + b} \leq 1.0 \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- $\gamma_w$  : Faktor keamanan
- $w_s$  : Berat tercelup pipa per unit panjang (N/m)
- $b$  : Gaya apung pipa per unit panjang (N/m)
- $S_g$  : Massa jenis spesifik pipa (kg/m<sup>3</sup>)

**Analisis Stabilitas Lateral**

Pipa pada saat di bawah laut harus dapat menahan gaya hidrodinamis dengan gaya gesek antara pipa dengan tanah. Pipa dinyatakan stabil secara lateral jika memenuhi persamaan 2 dan 3. Persamaan 2 disebut dengan kriteria 1 dan persamaan 3 disebut sebagai kriteria 2.

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_y^* + \mu \cdot F_z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1.0 \dots \dots \dots (2)$$

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_z^*}{w_s} \leq 1.0 \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan:

- $\gamma_{sc}$  : Faktor keamanan sesuai dengan jenis tanah
- $\mu$  : Koefisien Gesek sesuai dengan jenis tanah
- $F_y^*$  : Gaya Hidrodinamis Lateral
- $F_z^*$  : Gaya Hidrodinamis Vertikal
- $F_R$  : Tahanan Pasif Tanah

Gaya hidrodinamis lateral dan vertikal yang bekerja pada pipa dihitung menggunakan persamaan 4 dan 5.

$$F_Y^* = r_{tot,Y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D \cdot C_Y^* \cdot (U^* + V^*)^2 \dots \dots (4)$$

$$F_Z^* = r_{tot,Z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D \cdot C_Z^* \cdot (U^* + V^*)^2 \dots \dots (5)$$

$$V^* = U_r \cdot \frac{\left( \left( 1 + \frac{Z_0}{D} \right) \ln \left( \frac{D}{Z_0} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left( \frac{Z_r}{Z_0} + 1 \right)} \sin(\theta_c) \dots (6)$$

$$U^* = \frac{1}{2} \left( \sqrt{2 \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(\tau)}} \right) U_s \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan:

- $r_{tot,i}$  : Faktor pengurangan beban sesuai arah sumbu "i"
- $D$  : Total diameter luar pipa
- $C_Y^*$  : Koefisien puncak beban lateral pada tabel 3-9 DNVGL-RP-F109
- $C_Z^*$  : Koefisien puncak beban vertikal pada tabel 3-10 DNVGL-RP-F109
- $\rho_{sw}$  : Massa jenis air laut
- $V^*$  : *Steady current velocity associated with design oscillation, perpendicular to pipe*
- $U^*$  : *Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipe*
- $\tau$  : Jumlah osilasi (dapat dihitung dengan cara membagi nilai periode saat badai dengan periode *zero up-crossing* rata-rata, asumsi periode badai yang lazim digunakan adalah 3 jam)

Dari hasil desain, pipa bawah laut dengan tebal yang sudah didesain mungkin saja tidak stabil. Solusi yang dapat dilakukan adalah melapisi pipa dengan lapisan beton yang akan menambah berat struktur pipa secara keseluruhan (DNVGL, 2017a; Chukwu, 2016; Draper *et al.*, 2015). Namun, jika pipa sudah stabil maka penambahan lapisan beton pada pipa tidak diperlukan.

**Pemodelan dengan Elemen Hingga**

Pada tahap ini, pemodelan pipa bawah laut dilakukan dengan pendefinisian parameter pipa bawah laut berupa panjang dan diameter. Setelah itu, pemodelan dilanjutkan dengan memasukkan model kecepatan aliran yang terjadi di sekitar pipa bawah laut yang. Selain itu, kekasaran dasar laut juga dimodelkan untuk mendapatkan nilai dari gaya gesek dan hidrodinamis arah horizontal dan vertikal. Perbandingan antara hasil pemodelan

dan hasil perhitungan gaya hidrodinamis berdasarkan DNVGL-RP-F109 dilakukan. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui perbedaan antara keduanya.

**HASIL PEMBAHASAN**

**Desain Tebal Pipa**

Penentuan ketebalan dinding pipa berdasarkan empat kriteria. Kriteria pertama, yaitu *internal pressure containment*, kondisi yang ditinjau hanyalah operasi. Hal tersebut dikarenakan fluida belum mengalir di dalam pipa pada kondisi instalasi. Sebaliknya, pada kriteria kedua, yaitu *local buckling – external pressure collapse*, kondisi instalasi menjadi satu satunya yang ditinjau. Hal tersebut dikarenakan tekanan di luar pipa pada kondisi ini pasti lebih besar dibandingkan dengan tekanan di dalam pipa. Hasil dari perhitungan menurut DNVGL-ST-F101 ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Desain Ketebalan Pipa

Kriteria	Kondisi		
	Instalasi	Hidrotes	Operasi
<i>Internal Pressure Containment</i>		13.49	15.93
<i>Local Buckling – External Pressure Collapse</i>	4.6		
<i>Local Buckling – Combined Loading</i>	6.07	10.1	11.68
<i>Propagation Loading</i>	6.24	6.24	11.05
Tebal Dinding Terpilih		15.93	
<b>Tebal dinding pipa berdasarkan API 5L</b>	<b>0.719 in atau 18.203 mm</b>		

Berdasarkan perhitungan kasus ini, kriteria *internal pressure containment* dengan kondisi operasi adalah yang paling menentukan desain ketebalan dinding pipa dengan nilai 15.93 mm. Sehingga, diambil tebal pipa 18.203 mm atau 0.719 in untuk pipa dengan diameter 273.05 mm sesuai dengan ketersediaan dalam API 5L *Specification for Line Pipe*.

**Analisis Stabilitas Pipa**

Untuk menentukan stabilitas pipa bawah laut, lebih dulu dihitung gaya-gaya yang akan bekerja pada pipa di bawah laut. Gaya tersebut adalah hidrostatis dan hidrodinamis, selain berat pipa itu sendiri. Gaya hidrostatis diperlukan untuk menentukan stabilitas pipa secara vertikal. Sedangkan gaya hidrodinamis diperlukan untuk menentukan stabilitas pipa secara lateral.

Perhitungan gaya hidrodinamis dan analisis stabilitas pipa akan dilakukan berdasarkan DNVGL-RP-F109. Analisis ini meninjau pada kondisi instalasi dan operasi menggunakan metode perhitungan tanpa spektrum dan dengan spektrum.

**Stabilitas Vertikal**

Dalam analisis stabilitas vertikal, parameter berat pipa di bawah laut dan gaya apung pipa merupakan parameter yang dipertimbangkan. Hasil pemeriksaan stabilitas vertikal dengan kriteria nilai ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Stabilitas Vertikal

Kondisi	Ketebalan lapisan beton (mm)	Kedalaman (m)	Kestabilan Vertikal	
			Cek	Kriteria Nilai
Instalasi	0		0.589	≤ 1.000
Operasi	41		0.519	≤ 1.000
Operasi (tanpa spektrum)	15	76.13	0.607	≤ 1.000

Berdasarkan hasil di atas, pipa bawah laut pada kondisi instalasi telah memenuhi kriteria dengan nilai 0.589. Sedangkan pada kondisi operasi telah memenuhi kriteria dengan nilai 0.519. Adapun pada kondisi operasi dengan metode tanpa menggunakan spektrum telah memenuhi kriteria dengan nilai 0.607.

**Stabilitas Lateral**

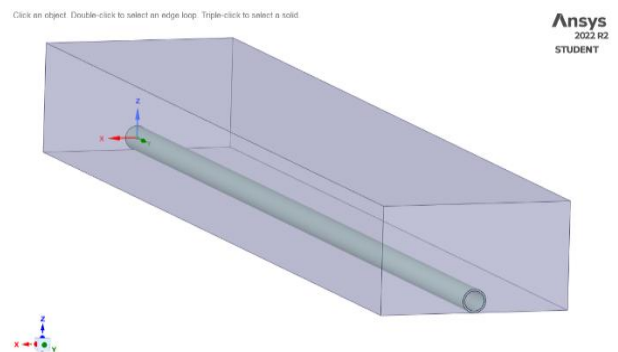
Perhitungan stabilitas lateral mempertimbangkan beban lateral. Perhitungan beban lateral pada penelitian ini menggunakan 2 metode, DNVGL-RP-F109 dan elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak. Perhitungan beban lateral berdasarkan DNVGL-RP-F109 ditunjukkan pada Tabel 5. Perhitungan dengan elemen hingga dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Ansys CFX. Pemodelan dilakukan dengan kondisi instalasi dan operasi.

Tabel 5. Perhitungan Peak Load Berdasarkan DNVGL-RP-F109

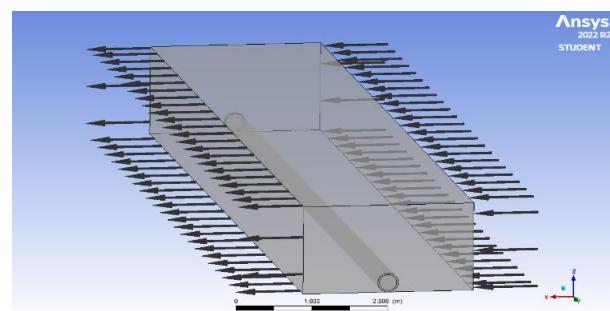
No	Perhitungan	Notasi	Nilai			Satuan
			Instalasi	Operasi	Operasi (tanpa spektrum)	
1	Tebal Lapisan Beton	$t_c$	0	41	15	mm
2	Steady current velocity associated with design oscillation, perpendicular to pipe	$V^*$	0.226	0.302	0.293	m/s
3	Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipe	$U^*$	0.204	0.403	0.297	m/s

No	Perhitungan	Notasi	Nilai			Satuan
			Instalasi	Operasi	Operasi (tanpa spektrum)	
4	Peak Horizontal Load Coefficient	$C_Y$	1.884	1.919	1.709	-
5	Peak Vertical Load Coefficient	$C_Z$	1.210	1.761	1.274	-
6	Total load reduction (horizontal)	$r_{tot,y}$	0.955	0.938	0.955	-
7	Total load reduction (vertical)	$r_{tot,z}$	1.088	1.073	1.088	-
8	Peak Horizontal Load	$F_Y^*$	47.817	165.693	90.260	N/m
9	Peak Vertical Load	$F_Z^*$	34.97	173.818	76.687	N/m

Kondisi instalasi adalah kondisi dimana pipa bawah laut masih dalam proses penggelaran atau konstruksi sehingga belum dialiri fluida di dalamnya. Sedangkan dalam kondisi operasi, fluida sudah mengalir di dalamnya dan proses instalasi sudah selesai. Langkah awal pemodelan dilakukan dengan mendefinisikan satu segmen pipa sepanjang 12 m. Hal tersebut dirasa cukup untuk pemodelan mengingat keseluruhan panjang pipa bawah laut memang tersusun dari banyak segmen pipa sepanjang 12 m. Gambar 1 menunjukkan tipikal model pipa bawah laut dalam box enclosure yang menunjukkan area pemodelan aliran. Box enclosure ditentukan sebesar volume yang masih cukup berpengaruh terhadap pipa bawah laut. Pada input tersebut terlihat aliran diberikan dari sumbu x negative ke sumbu x positif.

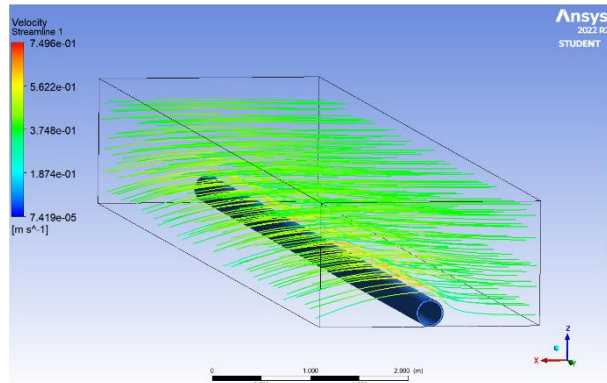


Gambar 1. Model pipa bawah laut dalam box enclosure

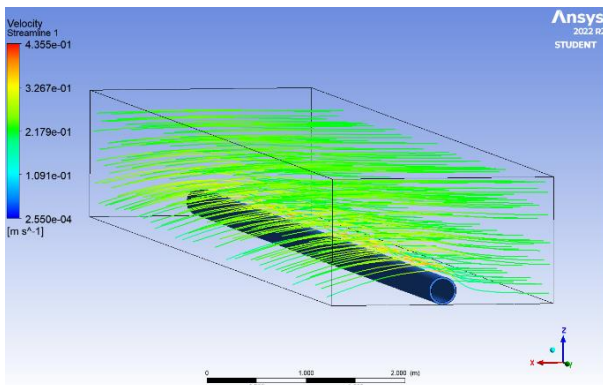


Gambar 2. Input model aliran fluida pada box enclosure

Hasil simulasi aliran yang terjadi di sekitar pipa diwujudkan dalam parameter kecepatan aliran yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Masing masing gambar tersebut menunjukkan hasil untuk input berupa arus dan berupa gelombang. Berdasarkan hasil tersebut, secara visual tidak berbeda signifikan. Dari kedua gambar tersebut, terlihat kecepatan aliran yang dihasilkan pada model dengan input berupa arus sedikit lebih besar dibandingkan kecepatan aliran yang dihasilkan pada model dengan input berupa gelombang.



Gambar 3. Simulasi aliran dengan input arus



Gambar 4. Simulasi aliran dengan input gelombang

Selain berupa kecepatan aliran di sekitar pipa, hasil simulasi yang didapatkan adalah gaya hidrodinamis horizontal yang terjadi pada pipa akibat aliran di sekitar pipa. Gaya tersebut diwujudkan dengan nilai permeter panjang pipa. Tabel 6. Gaya hidrodinamis horizontal hasil simulasi

Kondisi	Gaya Hidrodinamis Horizontal (N/m)		Selisih (%)
	DNVGL-RP-F109	Ansys	
Instalasi	47.817	46.630	2.49
Operasi	165.693	154.150	6.96
Operasi (tanpa spektrum)	90.260	90.810	0.61

Pada table tersebut juga tersanding hasil perhitungan dari DNVGL-RP-F109 dan selisihnya terhadap hasil model elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak Ansys. Hasil perhitungan gaya hidrodinamis horizontal yang terjadi pada pipa berdasarkan DNVGL-RP-F109 dan elemen hingga tidak berbeda signifikan. Kondisi operasi tanpa spektrum merupakan kondisi yang memiliki hasil perhitungan berdasarkan dua metode yang paling mirip, selisih 0.61%. Sedangkan kondisi operasi dengan spektrum memiliki selisih paling besar, yaitu 6.96%. Hasil pemeriksaan ditunjukkan pada Tabel 7 untuk kriteria 1 dan kriteria 2 pada Tabel 8.

Tabel 7. Hasil Pemeriksaan *Absolute Lateral Static Stability* Kriteria 1

Kondisi	Ketebalan lapisan beton (mm)	Kedalaman (m)	<i>Absolute Lateral Static Stability</i>	
			Check	Kriteria Nilai
Instalasi	0		0.323	≤ 1.0
Operasi	41		0.995	≤ 1.0
Operasi (tanpa spektrum)	15	76.13	0.989	≤ 1.0

Tabel 8. Hasil Pengecekan *Absolute Lateral Static Stability* Kriteria 2

Kondisi	Ketebalan lapisan beton (mm)	Kedalaman (m)	<i>Absolute Lateral Static Stability</i>	
			Check	Kriteria Nilai
Instalasi	0		0.066	≤ 1.0
Operasi	41		0.276	≤ 1.0
Operasi (tanpa spektrum)	15	76.13	0.229	≤ 1.0

Kondisi operasi dengan spektrum menjadi kondisi dengan selisih terbesar dikarenakan kompleksitas kondisi tersebut. Berdasarkan hasil tersebut, maka hasil perhitungan dengan metode DNVGL-RP-F109 cukup sesuai dengan perhitungan dengan elemen hingga. Oleh karena itu, model dan nilai tersebut dapat lebih lanjut digunakan untuk pengecekan stabilitas lateral pipa bawah laut. Perlakuan yang dilakukan kepada model pipa bawah laut sama dengan pengecekan gaya hidrodinamis di atas. Perbedaan hanya pada hasil yang dilihat.

Berdasarkan hasil dari kedua kriteria pada tabel di atas, untuk mencapai kestabilan vertikal dan lateral, pipa membutuhkan tambahan lapisan beton setebal 41 mm untuk kondisi operasi menggunakan spektrum gelombang, 15 mm untuk kondisi operasi tanpa menggunakan

spektrum gelombang dan tidak membutuhkan tambahan lapisan beton untuk kondisi instalasi dengan posisi pipa yang digelar diatas permukaan dasar laut. Hal tersebut dikarenakan pada kondisi operasi dengan spektrum gelombang, pipa mendapatkan gaya horizontal lebih besar dibandingkan tanpa spektrum gelombang. Sebaliknya, pada kondisi instalasi, pipa bawah laut minim menerima beban lateral.

Nilai ketebalan lapisan beton tersebut lebih besar dibandingkan pada pipa yang didesain untuk lokasi ONWJ dengan kedalaman lebih dangkal, 22 m dengan tebal 40 mm berdasarkan pemodelan menggunakan elemen hingga dan 33 mm berdasarkan perhitungan DNV RP F109 (Ridwan et al., 2022). Hal tersebut masuk akal mengingat semakin dalam perairan maka tekanan hidrostatis yang terjadi pada pipa semakin besar sehingga membutuhkan lapisan beton lebih tebal. Dibandingkan dengan jenis analisis lain, misalnya analisis dinamis pada pipa, hasil yang didapatkan lebih besar. Pada perairan dengan kedalaman 20 m namun tinggi gelombang signifikan lebih rendah, 2.4 – 3.0 m, didapati tebal lapisan beton yang dibutuhkan mencapai 150-160 mm (Hafez et al., 2022). Hasil tersebut dikarenakan pada perairan dangkal, pipa bawah laut masih sangat terpengaruh oleh gaya gelombang. Hal tersebut juga yang mendasari analisis dinamis terhadap pipa bawah laut tersebut perlu dilakukan. Berbeda pada kasus di penelitian ini yang mengkaji lokasi perairan dengan kedalaman yang besar.

Berdasarkan 2 metode yang dibandingkan tersebut, sangat terlihat dengan jelas bahwa analisis dinamis mengharuskan pipa bawah laut memiliki ketebalan lapisan beton 3.5 – 4.0 kali lebih besar dibandingkan analisis elemen hingga yang bahkan dilakukan pada kedalaman perairan 3.8 lebih dalam. Di sisi lain, pada kenyataannya, pipa bawah laut yang beroperasi juga akan mendapatkan stabilitas tambahan dari tertanamnya pipa bawah laut akibat berat sendiri ke dalam sedimen dan timbunan yang diakibatkan sedimentasi (Griffiths et al., 2018; Leckie et al., 2016). Hal tersebut dibuktikan berdasarkan pengecekan lapangan yang dilakukan pada pipa bawah laut yang sudah beroperasi (Ho et al., 2020; Leckie et al., 2018).

## KESIMPULAN

Standar desain DNVGL-ST-F101 memberikan ketebalan dinding pipa bawah laut sebesar 18.2 mm yang ditentukan berdasarkan kriteria *internal pressure containment* saat kondisi operasi. Hasil analisis kestabilan berdasarkan DNVGL-RP-F109 menunjukkan bahwa pipa bawah laut membutuhkan tambahan lapisan beton sebesar 41 mm untuk mendapatkan stabilitas baik vertikal maupun lateral untuk setiap kondisi. Pemodelan dengan metode elemen hingga mendapatkan hasil gaya hidrodinamis terbesar 154.150 N/m untuk kondisi operasi. Sedangkan berdasarkan DNVGL-RP-F109 senilai 165.693 N/m untuk kondisi yang sama. Dengan begitu, selisih hasil dari kedua metode hanya sebesar 6.96%. Analisis lain pada pipa bawah laut ini mungkin dapat menjadikan kajian stabilitas pipa bawah laut ini menjadi lebih komprehensif. Analisis lain yang mungkin dapat dilakukan adalah analisis terhadap cuaca ekstrim analisis terhadap jatuh jangkar atau seret jangkar, analisis resiko atau analisis retak.

## DAFTAR PUSTAKA

- API. (2007). *Specification for Line Pipe* (44th ed.).
- Bai, Y., Tang, J., Xu, W., & Ruan, W. (2015). Reliability-based design of subsea light weight pipeline against lateral stability. *Marine Structures*, 43, 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.06.002>
- Bai, Y., & Yu, Z. (2011). *Pipeline On-Bottom Stability Analysis Based on FEM Model*. 5.
- Choi, Han-Suk, Yu, Su-Young, Kang, Dae-Hoon, & 강효동. (2012). Parametric Study of Offshore Pipeline Wall Thickness by DNV-OS-F101, 2010. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(2), 1–7. <https://doi.org/10.5574/KSOE.2012.26.2.001>
- DNVGL. (2017a). *Recommended Practice F109 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*.
- DNVGL. (2017b). *Recommended Practice F114 Pipe-Soil Interaction for Submarine Pipelines*.
- DNVGL. (2017c). *Standard F101 Submarine Pipeline Systems*.
- Douglas Chukwu, O. (2016). Estimating On-Bottom Stability of Offshore Pipelines in Shallow Waters of the Gulf of Guinea. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 4(3),

115.  
<https://doi.org/10.11648/j.ijmea.20160403.13>
- Draper, S., An, H., Cheng, L., White, D. J., & Griffiths, T. (2015). Stability of subsea pipelines during large storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2033), 20140106. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0106>
- Griffiths, T., Draper, S., White, D., Cheng, L., An, H., & Fogliani, A. (2018). Improved Stability Design of Subsea Pipelines on Mobile Seabeds: Learnings From the STABLEpipe JIP. *Volume 5: Pipelines, Risers, and Subsea Systems*, V005T04A046. <https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77217>
- Hafez, K. A., Abdelsalam, M. A., & Abdelhameed, A. N. (2022). Dynamic on-bottom stability analysis of subsea pipelines using finite element model-based general offshore analysis software: A case study. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 11(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s43088-022-00219-x>
- Ho, M., El-Borgi, S., Patil, D., & Song, G. (2020). Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper. *Structural Health Monitoring*, 19(2), 606–645. <https://doi.org/10.1177/1475921719837718>
- Leckie, S. H. F., Draper, S., White, D. J., Cheng, L., Griffiths, T., & Fogliani, A. (2018). Observed changes to the stability of a subsea pipeline caused by seabed mobility. *Ocean Engineering*, 169, 159–176. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.059>
- Leckie, S. H. F., Mohr, H., Draper, S., McLean, D. L., White, D. J., & Cheng, L. (2016). Sedimentation-induced burial of subsea pipelines: Observations from field data and laboratory experiments. *Coastal Engineering*, 114, 137–158. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.04.017>
- Menteri ESDM RI. (2023). *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia tentang Rencana Induk Jaringan Transmisi dan Distribusi Gas Bumi Nasional Tahun 2022—2031*.
- Mousselli, A. H. (1981). *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. PennWell Books. <https://books.google.co.id/books?id=u7pTAAAAMAAJ>
- Peng, X.-L., & Hao, H. (2012). A Numerical Study Of Damage Detection Of Underwater Pipeline Using Vibration-Based Method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 12(03), 1250021. <https://doi.org/10.1142/S0219455412500216>
- Ridwan, A., Hidayatullah, M. S., & Kencana, E. R. (2022). On-Bottom Stability Analysis of Subsea Pipelines Based on DNVGL RP F109. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*, 19(3), 165–176. <https://doi.org/10.14710/kapal.v19i3.48398>
- Santoso, J. F., Tawekal, R. L., Arianta, & Ilman, E. C. (2023). Numerical Assessment Of Subsea Pipeline Pressure Capacity Due To External Circumferential semi-Elliptical crack. *International Journal of GEOMATE*, 25(108). <https://doi.org/10.21660/2023.108.3734>
- Tanujaya, V. A., Tawekal, R. L., & Ilman, E. C. (2022). Vessel traffic geometric probability approaches with AIS data in active shipping lane for subsea pipeline quantitative risk assessment against third-party impact. *Ocean Systems Engineering*, 12(3), 267–284. <https://doi.org/10.12989/OSE.2022.12.3.267>
- Tawekal, R. L., Allo, R. P. R., & Taufik, A. (2017). *Damage Analysis of Subsea Pipeline Due to Anchor Drag*. 12(15).
- Tawekal, R. L., & Velas, J. D. (2019). Subsea Pipeline Protection Design Subjected To Dropped Anchor Using Concrete Mattress. *International Journal of GEOMATE*, 17(60). <https://doi.org/10.21660/2019.60.84652>
- Tian, Y., Cassidy, M. J., & Chang, C. K. (2015). Assessment of offshore pipelines using dynamic lateral stability analysis. *Applied Ocean Research*, 50, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.01.001>
- Youssef, B., & O'Brien, D. (2017). On-Bottom Stability Analysis of Submarine Pipelines, Umbilicals and Cables Using 3D Dynamic Modelling. *Day 3 Wed, May 03, 2017*, D031S035R001. <https://doi.org/10.4043/27727-MS>
- Youssef, B. S., Cassidy, M. J., & Tian, Y. (2013). Application of Statistical Analysis Techniques to



Pipeline On-Bottom Stability Analysis. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 135(3), 031701. <https://doi.org/10.1115/1.4023204>

Yu, S. Y., Choi, H. S., Lee, S. K., Do, C. H., & Kim, D. K. (2013). An optimum design of on-bottom

stability of offshore pipelines on soft clay. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(4), 598–613. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0156>