

# Analisis Pengaruh Scouring Pada Pipa Bawah Laut (Studi Kasus Pipa Gas Transmisi SSWJ Jalur Pipa Gas Labuhan Maringgai – Muara Bekasi)

Muhammad Catur Nugraha, Suntoyo, Yoyok Setyo Hadiwidodo

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: suntoyo@oe.its.ac.id

**Abstrak**— Jalur pipa gas bawah laut merupakan salah satu infrastruktur transportasi jarak jauh untuk minyak dan gas yang paling efisien untuk pemindahan produksi minyak dan gas dibandingkan dengan penggunaan struktur terapung seperti kapal tanker. Pada struktur pipa bawah laut fenomena *scouring* juga dapat terjadi yang berpengaruh kepada struktur pipa. Akibat yang timbul darinya ialah adanya *freespan* yang dapat menyebabkan defleksi dan vibrasi atau biasa dikenal sebagai fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). Tugas akhir ini adalah melakukan analisis pengaruh *scouring* pada pipa bawah laut, data yang digunakan adalah data Pipa Gas Labuhan Maringgai – Muara Bekasi yang dioperasikan oleh Perusahaan Gas Negara, berdasarkan *code* DnV RP F105 untuk analisa dinamis. Dari hasil analisa, maka diperoleh kedalaman *scouring* maksimal pada tiap zona yang dianalisa adalah 0.65 m, 0.26 m, 0.2 m, 0.15 m, 0,2 m dan 0.48 m sedangkan panjang span yang diijinkan ialah panjang span yang dihitung berdasarkan gerak *inline flow* yaitu 29.13 m, 36.93 m, 44.53 m, 47.43 m, 34.17 m dan 30.61 m untuk zona yang sama. Dari hasil panjang span yang ijin tersebut didapatkan defleksi yang terjadi tiap zona yaitu 0.001873 m, 0.004013 m, 0,007476 m, 0.009259 m, 0.003117 m dan 0.003117 m. Sedangkan dari hasil analisa terjadinya osilasi pada pipa diketahui bahwa pada tiap zona menghasilkan frekuensi natural yang lebih besar daripada frekuensi *vortex shedding* sehingga osilasi pada pipa akibat *vortex* tidak terjadi dan pipa aman dioperasikan.

**Kata kunci** : *freespan*; *inline flow*; *Scouring*; *vortex induced vibration*, *vortex shedding*

## I. PENDAHULUAN

JARINGAN pipa bawah laut secara umum merupakan media transportasi aliran minyak dan gas bumi. Pipa bawah laut menjadi hal yang penting dalam proses produksi minyak dan gas bumi, sehingga dalam pemasangan maupun perawatannya harus terlebih dahulu direncanakan. Perencanaan konstruksi jaringan pipa yang sudah matang dapat berdampak baik dalam ketahanan dan eksistensi jaringan pipa. Konstruksi jaringan pipa bawah laut merupakan suatu konstruksi yang dapat mengalami fenomena *scouring* akibat pengaruh dari kecepatan arus dan kecepatan orbital gelombang

di *seabed*. Atas alasan tersebut maka analisa *scouring* perlu dilakukan.

Salah satu jaringan pipa yang ada di Indonesia yang berperan penting dalam transportasi aliran gas adalah jalur pipa gas Labuhan Maringgai – Muara Bekasi. Jalur pipa gas Labuhan Maringgai – Muara Bekasi adalah jalur pipa *offshore* yang dimiliki oleh PT. Perusahaan Gas Negara (Persero) Tbk (PGN). Jalur pipa ini merupakan bagian dari jalur transmisi yang mengalirkan gas dari Sumatera Selatan (sumber gas dari Pertamina dan Conoco Philips) ke Jawa Barat dan memiliki panjang  $\pm$  165 km dan mulai beroperasi pada bulan Agustus 2007. Saat ini pipa tersebut mengalirkan gas sejumlah  $\pm$  400 MMSCFD (*Million Metric Standard Cubic Feet Per Day*) dengan tekanan  $\pm$  800 psig untuk kebutuhan pembangkit listrik dan industri di daerah Jawa Barat [1]



Gambar 1 Lokasi SSWJ Phase II Labuhan Maringgai – Muara Bekasi

*Scouring* pada struktur lepas pantai yang berdiri tegak dapat mengakibatkan struktur tersebut mengalami *subsidence* sehingga *gap* antara dek dengan gelombang tertinggi yang didesain menjadi berkurang sedangkan jika terjadi pada struktur yang terdapat pada permukaan dasar laut seperti jaringan pipa bawah laut dapat mengakibatkan *freespan*. *Freespan* dapat terjadi ketika kontak antara pipa dengan *seabed* hilang dan memiliki jarak pada permukaan *seabed* [2]. *Freespan* ini nantinya akan mengakibatkan terjadinya defleksi pada jaringan pipa, sehingga rentan mengalami kelelahan dan kepecahan. Selain itu akibat dari *freespan* ialah pipa akan mengalami tambahan beban yaitu beban hidrodinamis ke arah bawah dan setiap benda termasuk jaringan pipa memiliki gaya

pengembali, kejadian ini akan terus menerus dan mengakibatkan *vortex* yang tidak baik untuk jaringan pipa tersebut.

Oleh sebab itu penelitian tentang analisa pengaruh *scouring* pada pipa bawah laut (studi kasus pipa gas transmisi SSWJ Jalur pipa gas Labuhan Maringgai – Muara Bekasi) sangat diperlukan. Penelitian ini mencakup tentang sebuah analisa akibat pengaruh *scouring* yang terjadi pada pipa bawah laut meliputi kedalaman, lebar *scouring* yang terjadi serta defleksi yang terjadi karena *freespan* akibat *scouring* dan analisa kemungkinan osilasi yang terjadi akibat span. Data hasil analisa *scouring* ini berdasarkan titik tempat yang kemungkinan besar mengalami *scouring*, dari data tersebut kemudian ditentukan berapakah lebar, kedalaman serta panjang span yang diijinkan terjadi serta defleksi yang diakibatkan oleh span tersebut.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Pengumpulan data

Penelitian ini dilakukan dengan studi literatur dan mengumpulkan data – data terlebih dahulu. Data desain *pipeline* dan data lingkungan didapat dari *Design Basis Manual* milik PT. PGN sebagai perusahaan yang mengoperasikan pipa bawah laut yang dijadikan subjek untuk penelitian. Berikut data – data yang digunakan untuk penelitian [1]

Tabel 1. Data Pipeline

Parameter	Offshore Pipeline
Pipeline outer diameter (mm)	812.8
Designation/ Material Grade	SAWL 450 II FD & SAWL 485 II FUD
Corrosion Allowance (mm)	1.5
Internal Coating (µm)	80 (min)
External Coating	3 LPE
External Coating thickness (mm)	2.5
External Coating density (kg/m3)	1280
Concrete Weight Density (kg/m3)	3043
Concrete Coating Cutback (mm)	300 & 405

Tabel 2. Data material pipeline

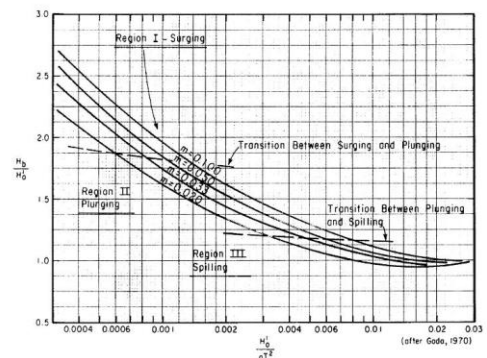
Parameter	Offshore Pipeline
Density (kg/m3)	7850
Young’s Modulus (N/mm2)	207000
Poisson’s Ratio	0.3
SMYS (N/mm2)	450 & 485
SMTS (N/mm2)	535 & 570
Linear Thermal Expansion Coefficient (1/oC)	11.7 x 10-6
Thermal Conductivity (W / (m oC))	45.35

Tabel 3. Data Lingkungan

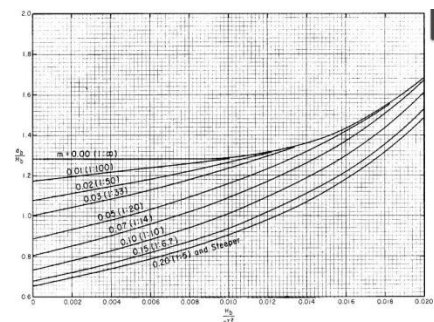
Zones	Z1	Z3	Z10	Z12	Z17	Z18
<b>Waves</b>						
Significant Wave Height (Hs) (m)	4,10	4,49	4,98	4,98	3,80	3,46
Spectral Peak Period (Ts) (sec)	8,18	8,55	9,00	9,00	7,88	7,52
<b>Current Speed</b>						
At 0% of depth	1,72	1,70	1,53	1,55	1,28	1,42
10% of depth	1,18	0,95	0,78	0,80	0,75	0,89
20% of depth	1,17	0,93	0,76	0,79	0,74	0,88
30% of depth	1,16	0,91	0,75	0,77	0,73	0,87
40% of depth	1,15	0,89	0,72	0,75	0,71	0,85
50% of depth	1,13	0,85	0,69	0,71	0,69	0,83
60% of depth	1,10	0,81	0,64	0,66	0,66	0,80
70% of depth	1,07	0,74	0,58	0,60	0,62	0,76
80% of depth	1,02	0,66	0,49	0,51	0,56	0,70
90% of depth	0,96	0,53	0,37	0,39	0,49	0,63
100% of depth	0,87	0,37	0,20	0,23	0,38	0,52

B. Gelombang Pecah

Setelah data – data diperoleh, kemudian dilakukan perhitungan. Perhitungan yang dilakukan pertama kali adalah menghitung kedalaman gelombang pecah untuk menentukan zona yang dianalisa dipengaruhi oleh arus atau gelombang. Untuk mencari kedalaman gelombang pecah perlu memperhatikan grafik perbandingan  $H_o/gT^2$  dan  $H_b/gT^2$  sebagai berikut [3]:



Gambar 2. Grafik perbandingan  $H_o/gT^2$



Gambar 3. Grafik perbandingan  $H_b/gT^2$

**C. Kedalaman Scouring**

Setelah diketahui pengaruh dari tiap zona maka dapat dilakukan perhitungan kedalaman *scouring*. Untuk perhitungan kedalaman *scouring* akibat arus menggunakan persamaan [4] :

$$S = 0,929 \left( \frac{U^2}{2g} \right)^{0,26} D^{0,78} d_{50}^{-0,04} \tag{1}$$

Dimana :

- D = diameter pipa (m)
- d<sub>50</sub> = ukuran partikel jenis pasir

Sedangkan persamaan untuk kedalaman *scouring* akibat pengaruh gelombang adalah sebagai berikut [5]:

$$\frac{S}{D} = 0,1 \sqrt{KC} \tag{2}$$

Dimana :

- KC = Karpenter Keulegan Number

Nilai dari KC bisa dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$KC = \frac{U_m T_w}{D} \tag{3}$$

Dimana :

- U<sub>m</sub> = Kecepatan maksimum partikel di *sea bed* (m/s)
- T<sub>w</sub> = Periode gelombang (s)

**D. Lebar Scouring**

Selain kedalaman *scouring* untuk *scouring* yang dipengaruhi oleh gelombang dapat dihitung lebar *scouring* dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{W}{D} = 0,35 KC^{0,65} \tag{4}$$

Dimana :

- W = lebar yang dihitung dari tengah pipa sampai akhir lubang *scour*

**E. Regresi Hasil Perhitungan**

Untuk membandingkan hasil prediksi perhitungan kedalaman *scouring* dengan hasil inspeksi maka perlu dilakukan analisa regresi linear,  $y = mx + c$

**F. Massa Pipa**

Hasil dari kedalaman *scouring* maksimal dijadikan sebagai *span gap ratio* (e/D) dimana nilai dari e/D ini akan mempengaruhi nilai koefisien *added mass* (Ca), dimana persamaan Ca adalah sebagai berikut [6]:

$$C_a = 0,68 + \frac{1,6}{(1+5(\frac{e}{D}))} \tag{5}$$

Massa pipa yang digunakan dalam perhitungan ialah massa pipa efektif yang diberikan dalam persamaan sebagai berikut [2] :

$$M_c = M_{str} + M_c + M_a \tag{6}$$

Dimana :

- M<sub>str</sub> = Massa struktur pipa (Kg/m)
- M<sub>c</sub> = Massa kandungan pipa (Kg/m)
- M<sub>a</sub> = Massa tambah pipa (Kg/m)

**G. Panjang freespan yang diijinkan**

Panjang *freespan* yang diijinkan mengacu pada *code DnV*

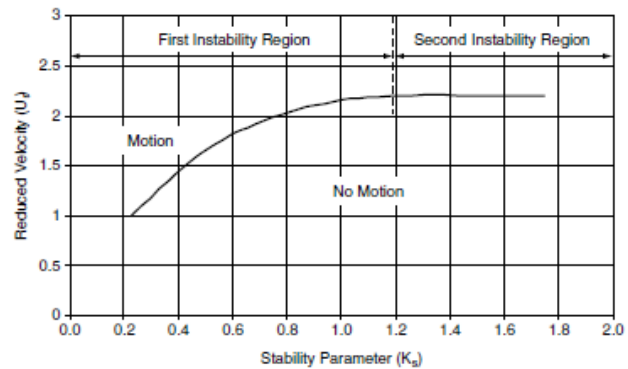
RP F105. Persamaan untuk menghitung panjang span adalah sebagai berikut:

$$L_s = \sqrt{\frac{C_e f_m}{2\pi}} \tag{7}$$

Dimana :

- C<sub>e</sub> = Konstanta ujung span
- U<sub>r</sub> = *reduced velocity*
- EI = Hasil dari perkalian modulus young dengan inerti
- M<sub>e</sub> = Massa efektif

Nilai dari *reduced velocity* dapat ditentukan dari grafik dibawah ini :



Gambar 4. *Reduced velocity* untuk gerak *inline flow*

Untuk menghitung frekuensi yang terjadi akibat gerak *inline* atau *crossflow* dibutuhkan panjang span ideal yang merupakan panjang span pada kondisi ujung tumpuan fix – fix yang memiliki rentang respon yang sama pada kondisi nyata. Persamaan untuk menghitung Panjang span efektif ialah perbandingan antara Panjang span efektif dengan panjang span aktual dalam formula dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4,73}{-0,066\beta^2 + 1,02\beta + 0,63} \text{ untuk } \beta \geq 2,7 \tag{8}$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \frac{4,73}{0,036\beta^2 + 0,61\beta + 1,0} \text{ untuk } \beta < 2,7 \tag{9}$$

Dimana nilai dari β ditentukan dari persamaan sebagai berikut:

$$\beta = \log_{10} \left( \frac{KL^4}{(1+CSF)EI} \right) \tag{10}$$

Dimana :

- K : Kekakuan tanah Vertical atau horisontal
- CSF : *Concrete stiffness factor*

**H. Defleksi akibat freespan**

Akibat dari *freespan* maka akan timbul defleksi atau lendutan, defleksi tersebut ditentukan menggunakan persamaan berikut :

$$\delta = C_6 \frac{qL_{eff}^4}{EI(1+CSF)} \frac{1}{(1+\frac{5\delta}{F_1})} \tag{11}$$

Dimana :

- C<sub>6</sub> = Konstanta ujung span
- L<sub>eff</sub> = Panjang span efektif (m)

- CSF = Concrete Stiffness factor
- Pcr = Euler buckling load (N)
- Seff = Gaya aksial pada pipa (kN)

I. Frekuensi akibat span

Kemudian dapat diperoleh frekuensi akibat span, yang ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$f_0 \approx C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI}{M_e L_{eff}^4} \left( 1 + C_2 \frac{S_{eff}}{P_E} \right) + C_3 \left( \frac{\delta}{D} \right)^2}$$

Dimana :

- C1, C2, C3 : Konstanta ujung span
- Me : Massa efektif pipa per meter termasuk massa struktur pipa, massa tambah, dan massa fluida yang terkandung dalam pipa
- D : Diameter luar pipa
- PE : Euler buckling load
- $\delta$  : Defleksi statik
- Seff : Gaya Aksial
- Leff : Panjang span efektif

Kriteria untuk mencegah terjadinya VIV akibat gerakan *inline* yang bersesuaian dengan DnV RP-F105 ialah ketika natural frekuensi untuk gerakan *inline* memenuhi kondisi sebagai berikut :

$$f_{o,IL} > \frac{U_{c,100year}}{V_{R,onset}^{IL} D} \left( 1 - \frac{L/D}{250} \right) \gamma_{IL} \gamma_f \quad (13)$$

Dimana :

- $\gamma_f$  : Safety factor pada natural frekuensi
- $\gamma_{IL}$  : Screening factor untuk gerakan *inline*
- $\alpha$  : Current flow ratio
- D : Diameter luar pipa termasuk *coating*
- L : Panjang *freespan*
- $U_{c,100year}$  : Kecepatan arus untuk periode ulang 100 tahun
- $V_{R,onset}^{IL}$  : *inline onset value for reduced velocity*

Sama halnya dengan untuk gerakan *cross flow*, natural frekuensi harus memenuhi kondisi sebagai berikut

$$f_{o,CF} > \frac{U_{c,100year} + U_{w,1year}}{V_{R,onset}^{CF} D} \gamma_{CF} \gamma_f \quad (14)$$

Dimana :

- $\gamma_{CF}$  : screening factor for crossflow
- $V_{R,onset}^{CF}$  : crossflow onset value for the reduced velocity

III. HASIL DAN DISKUSI

Berikut adalah hasil yang telah didapat dari analisa yang telah dilakukan. Hasilnya berupa kedalaman dan lebar *scouring*, panjang *freespan* yang diijinkan serta panjang span efektif dan defleksi yang terjadi pada pipa akibat dari *freespan* tersebut.

Tabel 4. Perhitungan kedalaman *scouring* akibat pengaruh arus (Zona 1 dan 18)

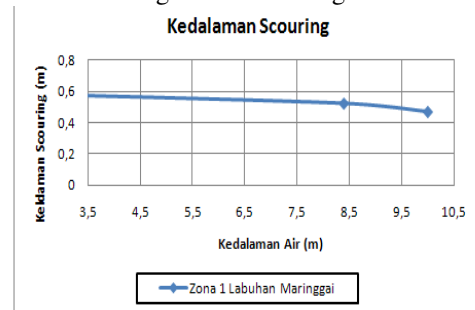
KP (km)	Se (m)	KP (km)	S (m)
0 - 1.0	0,657	156.0-155.9	0,566
2.0 - 2.2	0,657	155.5 - 155.4	0,556
2.8 - 3.0	0,654	155.1 - 155.0	0,539
6.8 - 7.0	0,593	154.5-154.4	0,525
10.8 - 11.0	0,532	154.0-153.9	0,503

	153.0-152.9	0,431
--	-------------	-------

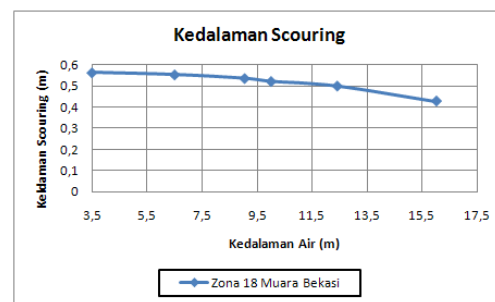
Tabel 5. Perhitungan kedalaman *scouring* akibat pengaruh gelombang Zona 10

Start	End	Depth (m)	S (m)	W (m)
KP	KP			
74,053	74,061	60,6	0,14	0,139
77,588	77,593	53,5	0,17	0,165
80,064	80,139	47,2	0,19	0,193
81,353	81,376	47,8	0,19	0,19
82,731	82,761	45,8	0,2	0,199
83,385	83,399	45,1	0,2	0,203
85,838	85,864	48,6	0,19	0,186

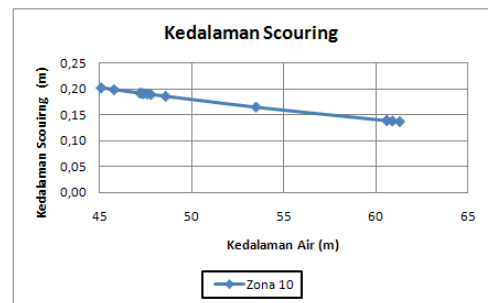
Perhitungan yang terdapat dalam tabel diatas apabila dijadikan dalam bentuk grafik ialah sebagai berikut :



Gambar 5. Kedalaman *Scouring* Zona 1



Gambar 6. Kedalaman *Scouring* Zona 18

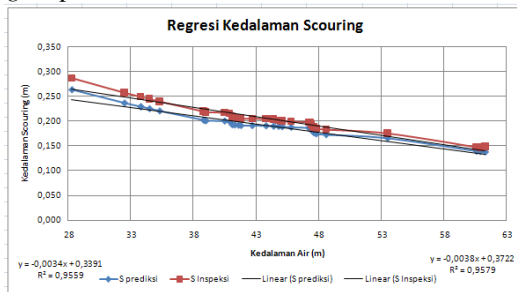


Gambar 7. Kedalaman *Scouring* Zona 10

Dari gambar 5 – 7 mengenai hubungan kedalaman air dengan kedalaman *scouring* yang terjadi dapat dikatakan bahwa kedalaman air sangat berpengaruh terhadap kedalaman

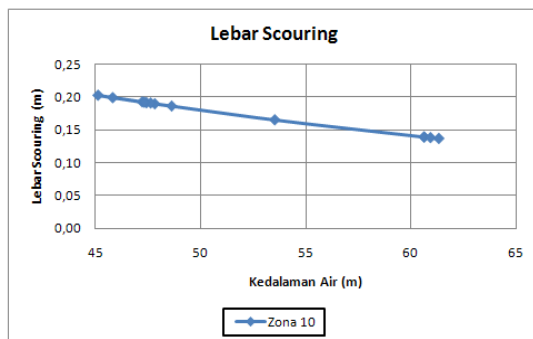
scouring yang terjadi. Apabila kedalaman air semakin bertambah maka kedalaman scouring yang akan terjadi akan berkurang dan sebaliknya jika kedalaman air berkurang maka kedalaman scouring akan bertambah besar. Apabila dibandingkan pengaruh scouring yakni akibat arus dan gelombang bisa dibandingkan antara gambar 5 dan 6 untuk yang dipengaruhi arus. Gambar 7 yang dipengaruhi gelombang, bisa dilihat bahwa kedalaman scouring yang terjadi lebih besar pengaruh scouring yang disebabkan oleh arus ini disebabkan karena kecepatan arus pada seabed lebih besar daripada kecepatan orbital gelombang.

Dari hasil regresi yang telah dilakukan didapat persamaan  $Y = -0,0034X + 0,3391$ , margin error dengan hasil kedalaman scouring inspeksi 0,08 atau 8%.



Gambar 8. Regresi kedalaman scouring

Hasil perhitungan lebar scouring akibat pengaruh gelombang maka diperoleh grafik sebagai berikut :



Gambar 9. Lebar scouring zona 10

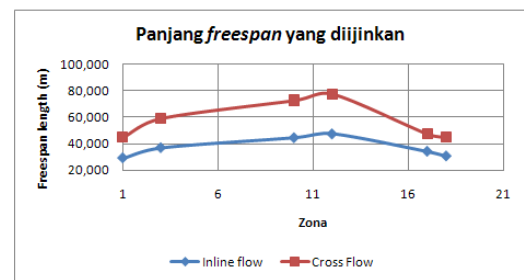
Sama halnya dengan kedalaman scouring, bahwa lebar scouring yang terjadi juga dipengaruhi oleh kedalaman air. Semakin dalam kedalaman air tempat pipa berada maka semakin kecil lebar scouring yang terjadi. Lebar scouring ini hanya dihitung pada zona yang dianalisa akibat pengaruh gelombang disebabkan dari formula untuk menghitung lebar scouring membutuhkan nilai KC yang didapat dari kecepatan orbital gelombang pada seabed. Sehingga lebar scouring untuk zona yang dipengaruhi arus tidak dihitung.

Hasil dari panjang freespan yang terjadi ialah sebagai berikut :

Tabel 6. Perhitungan Panjang span yang diijinkan

Zone	e	e/D	L	Leff
1	0,65	0,639	29,134	36,693
3	0,26	0,255	36,933	44,389
10	0,2	0,197	44,532	51,860
12	0,15	0,147	47,436	54,710
17	0,2	0,197	34,178	41,674
18	0,48	0,472	30,619	38,161

Bila hasil perhitungan dalam tabel diatas dijadikan dalam bentuk grafik hasilnya ialah sebagai berikut



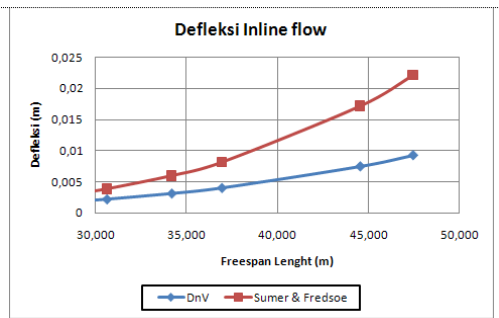
Gambar 10. Allowable freespan length

Dari gambar 10 bisa dilihat bahwa panjang freespan yang diijinkan baik untuk gerakan inline flow maupun cross flow sangat dipengaruhi oleh lokasi zona dimana pipa tersebut berada. Pada zona 1 dan 18 yang mendekati nearshore dimana kedalaman scouring di zona ini paling besar terjadi maka panjang freespan yang diijinkan lebih kecil dibandingkan dengan zona 3,10,12 dan 17. Begitu juga dengan pengaruh kedalaman air, pada zona 12 dimana merupakan zona dengan kedalaman air paling dalam didapatkan panjang freespan paling besar dibandingkan zona yang lain.

Akibat dari freespan tersebut maka timbul defleksi pada struktur pipa, hasil defleksi yang dianalisa adalah sebagai berikut :

Tabel 7. Perhitungan defleksi yang terjadi akibat freespan in flow

Zone	L (m)	Leff (m)	$\delta_{in}$ (m)	$\delta_{SF}$ (m)
1	29,134	36,693	0,001873	0,003152
3	36,933	44,389	0,004013	0,008142
10	44,532	51,860	0,007476	0,017209
12	47,436	54,710	0,009259	0,022155
17	34,178	41,674	0,003117	0,005971
18	30,619	38,161	0,002192	0,003846



Gambar 11. Grafik defleksi yang terjadi untuk gerak *inline flow*

Dari gambar 11 bisa disimpulkan bahwa semakin besar panjang *freespan* yang terjadi maka semakin besar pula defleksi yang terjadi. Sehingga untuk defleksi terbesar terjadi pada zona yang memiliki panjang *freespan* terbesar yaitu zona 12. Untuk defleksi dari formula Sumer & Fredsoe memiliki nilai yang lebih besar daripada DnV sebab pada formula tersebut hanya memperhatikan panjang *freespan* dan hasil dari EI (modulus young dan momen inerti steel) berbeda dengan formula DnV yang lebih detail karena memperhatikan nilai CSF, Seff (gaya aksial), dan Beban euler.

Tujuan dari perhitungan panjang *freespan* yang diijinkan ialah untuk menghindari terjadi VIV pada struktur pipa, dari hasil perhitungan yang telah dilakukan didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 8. Perhitungan analisa *Vortex shedding* untuk gerak *inline flow*

Zone	e/D	fs (Hz)	fn, inline flow (hz)	fs < 0,7fn	Ket
1	0,639	0,237	1,81	1,2669	OK
3	0,255	0,247	1,185	0,8295	OK
10	0,197	0,249	0,869	0,6083	OK
12	0,147	0,25	0,772	0,5407	OK
17	0,197	0,249	1,312	0,9186	OK
18	0,472	0,241	1,648	1,1534	OK

Dari hasil analisa *vortex shedding* yang terdapat pada tabel 8 dapat diketahui bahwa dengan panjang span yang diijinkan yang telah diperhitungkan maka hasilnya ialah memenuhi syarat  $f_s \leq 0,7f_n$  untuk gerakan *inline flow*. Maka pada pipa tersebut tidak mengalami osilasi sehingga pipa dapat aman beroperasi

### III. KESIMPULAN

Tujuan dari analisis pengaruh *scouring* pada pipa bawah laut ini adalah untuk mengetahui kedalaman *scouring* yang timbul akibat *scouring* yang mempengaruhi nilai *span gap ratio*. Semakin dalam kedalaman *scouring* yang timbul maka *span gap ratio* juga akan bertambah yang berpengaruh pada nilai koefisien *added mass* (Ca). Nilai Ca akan berpengaruh pada massa efektif struktur pipa yang nilainya tersebut akan dijadikan sebagai perhitungan mencari panjang *freespan* yang diijinkan. Dari hasil analisa yang telah dilakukan disimpulkan bahwa semakin besar kedalaman *scouring* maka panjang

*freespan* yang diijinkan semakin kecil. Hal ini untuk mencegah besarnya defleksi yang terjadi. Besarnya defleksi ini akan berpengaruh pada frekuensi natural yang diakibatkan oleh adanya *freespan*. Hasilnya nanti dibandingkan dengan *frekuensi shedding* yang terjadi akibat adanya *span gap ratio*. Nilainya harus  $f_s < 0,7f_n$  sehingga osilasi pada pipa tidak terjadi dan pipa dapat beroperasi dengan aman

Untuk penelitian selanjutnya perlu diperhatikan laju propagasi *scouring*, kemudian membandingkan dengan *code* yang lain seperti ASME B31.8

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] PGN, *Design Basis Manual – Pipeline Offshore*. (2005)
- [2] Boyun Guo, Shanhong Song, Jacob Chacko, dan Ali Ghalambor, *Offshore Pipelines*. USA: Gulf Professional Publishing (2005)
- [3] CERC, *Shore Protection Manual, US Army Coastal Engineering Research Center*, Washington (SPM, 1984).
- [4] R. Whitehouse, *Scour at Marine Structures*, UK: Thomas Telford (1998).
- [5] B. M. Sumer dan J. Fredsoe, *The Mechanics Of Scour in the Marine Environment*, Denmark: World Scientific, (2002).
- [6] *Recommended Practice for Free Spanning Pipelines. (DNV RP F105. 2002)*, Det Norske Veritas, Norway (2002, Feb.).