

# ANALISIS *ON-BOTTOM STABILITY* DAN *LOCAL BUCKLING*: STUDI KASUS PIPA BAWAH LAUT DARI *PLATFORM ULA* MENUJU *PLATFORM UW*

Clinton Sibuea<sup>(1)</sup>, Yeyes Mulyadi<sup>(2)</sup>, Imam Rochani<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Mahasiswa Teknik Kelautan ITS, <sup>(2),(3)</sup> Staf Pengajar Teknik Kelautan ITS  
Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111  
*e-mail*: yeyesmulyadi@gmail.com<sup>(2)</sup>

**Abstrak** - Pipa bawah laut merupakan suatu teknologi transportasi yang digunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon. Industri minyak dan gas telah membuktikan bahwa penggunaan pipa bawah laut merupakan cara yang paling ekonomis untuk memindahkan fluida dalam skala besar. Pada penelitian ini, dilakukan analisis *on-bottom stability* dan *local buckling* pada pipa bawah laut dari platform ULA menuju platform UW milik PT.PHE ONWJ. Analisis *on-bottom stability* bertujuan untuk mengetahui apakah pipa bawah laut stabil secara vertikal dan lateral di dasar laut pada saat terkena beban hidrodinamis. Analisis *local buckling* bertujuan untuk menentukan panjang maksimum *free span* yang diijinkan agar pipa tidak mengalami *buckling*. Besar gaya horizontal pada kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 405 N/m dan 1119 N/m. Besar gaya vertikal pada kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 138 N/m dan 1058 N/m. Besar gaya tahanan tanah pada kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 111 N/m dan 121 N/m. Hasil analisis *absolute lateral static* menunjukkan pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi instalasi dan operasi karena berat terendam aktual lebih kecil dari berat terendam minimum yang harus dipenuhi agar stabil. Hasil analisis *generalized parameter* menunjukkan pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi operasi, namun stabil secara lateral pada kondisi instalasi. Panjang *free span* pipa bawah laut maksimum yang diijinkan agar tidak terjadi *local buckling* adalah 50 m.

**Kata Kunci:** Pipeline, On-Bottom Stability, Local Buckling

## I. PENDAHULUAN

PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java (PHE ONWJ) adalah anak perusahaan PT. Pertamina Hulu Energi. Perusahaan ini menyelenggarakan usaha hulu di bidang minyak dan gas bumi. Wilayah kerja PHE ONWJ mencakup area sekitar 8.300 kilometer persegi di Laut Jawa yang terletak di utara Kepulauan Seribu sampai perairan utara Cirebon. Hingga Juni 2015, PHE ONWJ berhasil mencapai rata-rata produksi sebesar 40.400 barel minyak per hari (BOPD). Sedangkan produksi gas bumi PHE ONWJ mencapai 173 MMSCFD. Produksi minyak dan gas bumi PHE ONWJ disalurkan seluruhnya untuk kebutuhan strategis nasional seperti BBM, pembangkit listrik dan bahan baku pembuatan pupuk.

Wilayah kerja yang terletak di laut lepas membuat perusahaan memerlukan banyak teknologi canggih untuk menjalankan kegiatan operasi hulu minyak dan gas. Fasilitas yang dimiliki PHE ONWJ terdiri dari lebih dari 200 struktur platform, 404 jaringan pipa bawah laut sepanjang 1900 kilometer.

Pipa bawah laut merupakan suatu teknologi transportasi yang digunakan untuk mengangkut produk hidrokarbon seperti minyak mentah, gas alam bertekanan tinggi, dan kondensat yang relative rendah. Fluida yang dibawa pipa bawah laut dalam jumlah besar dan jarak yang jauh dilewatkan melalui jalur laut atau lepas pantai. Pipa bawah laut dapat bekerja 24 jam sehari, 265 hari dalam setahun selama umur pipa yang bisa mencapai 30 tahun atau bahkan lebih [1].

Industri minyak dan gas telah membuktikan bahwa penggunaan pipa bawah laut merupakan cara yang paling ekonomis untuk memindahkan fluida dalam skala besar. Hal tersebut dikarenakan operasi penyaluran fluida dengan pipa bawah laut bersifat kontiniu dan handal. Pipa bawah laut telah menunjukkan kemampuan untuk bertahan pada berbagai macam kondisi lingkungan yang buruk [2]. Namun, jika pipa bawah laut mengalami kegagalan akan menimbulkan kerugian ekonomi dan lingkungan yang sangat besar, sehingga perancangannya memerlukan banyak analisis [3].

Analisis *on-bottom stability* merupakan salah satu analisis utama pada perancangan pipa bawah laut. Analisis *on-bottom stability* bertujuan untuk menentukan berat minimum pipa agar dapat stabil di dasar laut [4]. Pipa bawah laut dikatakan stabil apabila gaya tahanan tanah lebih besar daripada gaya akibat beban hidrodinamis yang bekerja pada pipa [5].

Saat ini, DnV RP F109 adalah code yang sering digunakan untuk analisis stabilitas pipa bawah laut. Sehingga, pada penelitian ini dilakukan analisa stabilitas pipa bawah laut dari platform ULA ke UW sepanjang 3,8 mil dengan menggunakan DnV RP F109 revisi tahun 2010.

Pada kondisi operasional pipa bawah laut, sering terjadi scouring tanah di bawah pipa yang menyebabkan free span pada pipa bawah laut. Sehingga perlu juga dilakukan analisis local buckling pada free span pipa bawah laut.

## II. DASAR TEORI

### A. On-Bottom Stability

Analisis *on-bottom stability* dilakukan untuk mengetahui stabilitas pipa ketika terkena gaya gelombang dan arus. Ada tiga jenis stabilitas yang dianalisis pada analisis *on-bottom stability* pada penelitian ini, yaitu:

- Stabilitas Vertikal

Untuk menghindari pipa mengapung, berat terendam pipa harus memenuhi kriteria berikut [6]:

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{(w_s + b)} = \frac{\gamma_w}{S_g} \leq 1,0$$

Keterangan:

- $\gamma_w$  : Safety factor
- $b$  : Gaya apung pipa
- $w_s$  : Berat terendam pipa
- $S_g$  : Pipe specific gravity

- Absolute Lateral Static Stability

Metode *Absolute Lateral Static Stability* memberikan tidak mengijinkan perpindahan lateral pipa didasar laut berdasarkan penyamaan gaya yang memastikan gaya tahanan pipa mencukupi untuk bertahan terhadap beban hidrodinamis maksimum.

Pada metode ini, koefisien *lift*, *drag*, dan inersia digantikan dengan koefisien beban vertikal dan horizontal. Koefisien didapatkan berdasarkan data eksperimen [6].

$$F_Y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Y^* (U^* + V^*)^2$$

$$F_Z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_Z^* (U^* + V^*)^2$$

Keterangan:

- $F_Y^*$  : Beban horizontal
- $F_Z^*$  : Beban vertikal
- $r_{tot}$  : Faktor reduksi beban
- $\rho_w$  : Massa jenis air laut
- $D$  : Diameter pipa
- $C_Y^*$  : Koefisien reduksi beban horizontal
- $C_Z^*$  : Koefisien reduksi beban vertikal

Desain kriteria metode *absolute stability* adalah [6]:

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0$$

dan

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Z^*}{w_s} \leq 1,0$$

Keterangan:

- $\gamma_{SC}$  : Faktor keamanan
- $F_Y^*$  : Beban horizontal
- $F_Z^*$  : Beban vertikal
- $w_s$  : Berat terendam pipa

$F_R$  : Gaya tahanan pasif tanah

- Generalized Lateral Stability

*Generalized lateral stability* mengiinkan perpindahan lateral sebesar 1/2 sampai 10 kali diameter pipa. Berat minimum yang diperlukan agar pipa berpindah maksimal sejauh 1/2 kali diameter pipa pada tanah lempung dapat dihitung dengan rumus beriku [6]:

$$L_{stable} = 90 \sqrt{\frac{G_c}{N^{0,67} \cdot K} \cdot f(M)}$$

dimana,

$$f(M) = [0,58(\log M)^2 + 0,60 \cdot (\log M) + 0,47]^{1,1} \leq 1,0$$

Keterangan:

- $G_c$  : Soil (clay) strength parameter
- $M$  : Rasio kecepatan arus dan gelombang
- $K$  : Keulegan-carpenter number
- $N$  : Faktor percepatan spektra

Untuk perpindahan pipa maksimal sejauh 10 kali diameter, berat minimum yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus berikut [6]:

$$\frac{L_{10}}{(2+M)^2} = \begin{cases} c_1 + \frac{c_2}{K^{c_3}} & \text{untuk } K \geq K_b \\ c_1 + \frac{c_2}{K^{c_3}} & \text{untuk } K < K_b \end{cases}$$

Keterangan:

- $M$  : Rasio kecepatan arus dan gelombang
- $K$  : Keulegan-carpenter number
- $K_b$  : Equivalent soil roughness parameter
- $c_1, c_2, c_3$  : Koefisien berat minimum

### B. Local Buckling

*Local buckling* adalah deformasi plastis pada sebagian kecil dari panjang pipa yang menyebabkan perubahan besar pada penampang pipa. Local buckling disebabkan oleh kombinasi tekanan eksternal, tekanan internal, gaya aksial, dan *bending moment*.

Member pipa yang mengalami bending moment, effective axial force dan internal overpressure harus didesain agar memenuhi kriteria berikut ini pada semua bagian [7]:

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 + \alpha_p \cdot p_i - p_{eac} \cdot P_b(t_2) \leq 1 \right.$$

dimana,

$$S_{p(t)} = f_y \cdot \pi \cdot (D - t) \cdot t$$

$$M_{p(t)} = f_y \cdot \pi \cdot (D - t)^2 \cdot t$$

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \cdot \frac{f_u}{f_y}$$

$$\alpha_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{p_i - p_e}{p_b}\right) & \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases}$$

$$\beta = \frac{60 - D_s/t_z}{90}$$

Keterangan:

- $S_p$  : Kapasitas plastis aksial pipa
- $M_p$  : Kapasitas plastis momen pipa
- $M_{sd}$  : Design moment
- $S_{sd}$  : Design effective axial force
- $p_i$  : Tekanan internal
- $p_e$  : Tekanan eksternal
- $p_b$  : Burst pressure
- $f_y$  : Yield strength
- $f_u$  : Ultimate strength
- D : Diameter pipa
- T : Tebal pipa
- $\gamma_m$  : Material resistance factor
- $\gamma_{sc}$  : Safety class resistance factor
- $\alpha_c$  : Flow stress parameter
- $\alpha_p$  : Faktor tekanan
- B : Faktor pada kombinasi beban

### III. METODOLOGI

#### 1. Studi Literatur

Tahap ini penulis akan mempelajari serta memahami teori – teori dasar tentang *on-bottom stability* dan *local buckling* pipa bawah laut dan dan penelitian yang berhubungan dengan stabilitas pipa bawah laut. Literatur berupa buku, tugas akhir, jurnal dll.

#### 2. Pengumpulan Data

Tahap ini, penulis mengumpulkan data-data yang diperlukan dalam pengerjaan penelitian seperti data pipa, tanah, gelombang dan arus.

#### 3. Penentuan Kombinasi Pembebanan

Beban yang dikombinasikan adalah gelombang dan arus. Kondisi pembebanan terbagi menjadi dua, yaitu:

- a. Kondisi Sementara (Setelah Instalasi)
- b. Kondisi Permanen (Operasi)

#### 4. Perhitungan Kondisi Gelombang, Arus, Pipa dan Tanah

Perhitungan bertujuan untuk mendapatkan kecepatan gelombang, arus dan tahanan tanah yang bekerja pada pipa.

#### 5. Analisis Stabilitas Vertikal

Perhitungan bertujuan untuk menentukan berat minimum pipa untuk memenuhi syarat stabilitas vertikal.

#### 6. Analisis *Generalized Lateral Stability*

Pada perhitungan ini, perpindahan pipa yang diijinkan adalah 10 kali diameter.

#### 7. Analisis *Absolute Static Stability*

Perhitungan bertujuan untuk menentukan berat minum pipa agar tidak berpindah saat terkena beban beban lingkungan pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida).

#### 8. Analisis Local Buckling

Analisis *local buckling* bertujuan untuk mencari panjang span maksimum agar tidak terjadi *buckling* pada pipa.

#### 9. Hasil Analisis dan Pembahasan

Hasil analisis *on-bottom stability* dan *local buckling* pada *free span* akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik serta dilakukan pembahasan terhadap hasil analisis yang didapat.

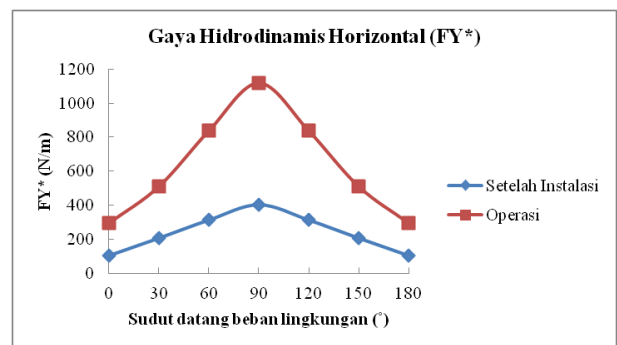
#### 10. Kesimpulan

Pengambilan kesimpulan sesuai dengan permasalahan yang diangkat pada penelitian ini.

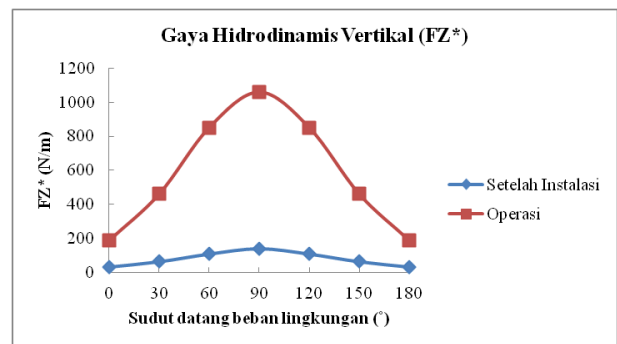
### IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Analisis Gaya Hidrodinamis

Koefisien gaya *drag*, gaya angkat, dan gaya inersia pada perhitungan gaya hidrodinamis digantikan dengan koefisien beban vertikal dan horizontal berdasarkan data eksperimen laboratorium dan data lapangan.



Gambar 4.1: Grafik gaya hidrodinamis horizontal



Gambar 4.2: Grafik gaya hidrodinamis vertikal

Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 menunjukkan beban hidrodinamis horizontal dan vertikal paling tinggi terjadi pada sudut pembebanan 90° karena tidak ada reduksi beban pada sudut 90°.

#### 4.2. Analisis Tahanan Tanah

Tahanan tanah terbagi menjadi dua, yaitu *Coulomb friction* dan tahanan pasif karena tumpukan tanah yang terbentuk akibat penetrasi pipa ke dalam tanah.

Pada kondisi setelah instalasi (kosong), *Coulomb friction* dan tahanan pasif masing-masing bernilai 184 N/m dan 111 N/m. Pada kondisi operasi (berisi fluida), *Coulomb friction* dan tahanan pasif masing-masing bernilai 202 N/m dan 121 N/m. Tahanan tanah pada kondisi operasi lebih besar daripada kondisi instalasi karena pada kondisi operasi pipa terisi oleh hidrokarbon yang membuat pipa semakin berat, sehingga tahanan tanahnya juga lebih besar.

Tabel 4.1: Gaya tahanan tanah

Tahanan tanah	Setelah Instalasi	Operasi
	(N/m)	(N/m)
<i>Coulomb friction</i>	184	202
Tahanan pasif	111	121

**4.3. Analisis Stabilitas Vertikal**

Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan berat minimum pipa yang harus dipenuhi agar stabil secara vertikal adalah 150 N/m. Sedangkan, berat terendam aktual pipa pada saat kondisi instalasi dan operasi masing-masing adalah 918 N/m dan 1008 N/m. Sehingga, pipa stabil secara vertikal pada kondisi instalasi dan operasi.

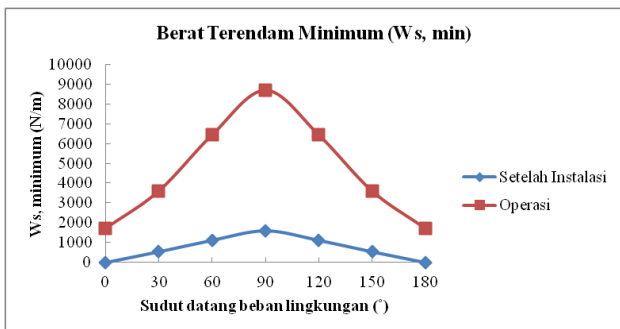
Tabel 4.2: Hasil analisis stabilitas vertikal

Kondisi	$W_{s,min}$ (N/m)	$W_{s, aktual}$ (N/m)
Setelah Instalasi (Kosong)	150	918
Operasi (berisi fluida)	150	150

**4.4. Analisis Absolute Lateral Static Stability**

Pada kondisi instalasi, pipa masih dalam kondisi kosong atau tidak terisi fluida. Berdasarkan DnV RP F109 kombinasi pembebanan lingkungan pada kondisi operasi kombinasi pembebanan lingkungan menggunakan periode ulang 1 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus.

Pada kondisi operasi, pipa terisi dengan fluida (hidrokarbon), sehingga menambah berat terendam aktual pipa. Berdasarkan DnV RP F109 kombinasi pembebanan lingkungan pada kondisi operasi menggunakan periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 100 tahun arus. Perhitungan dilakukan dengan variasi sudut datang beban lingkungan yaitu 0-180°.

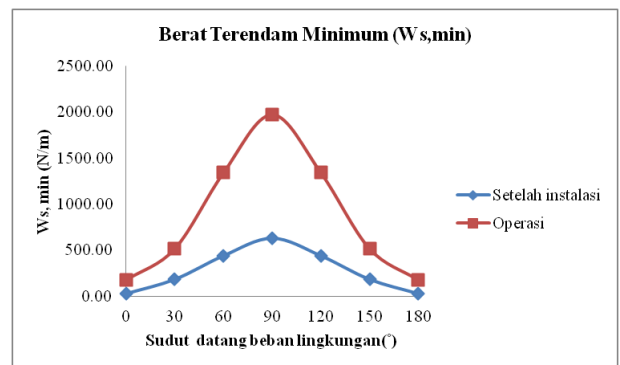


Gambar 4.3: Grafik Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) Absolute Lateral Static

Dari Gambar 4.3 didapatkan berat terendam minimum pipa agar memenuhi kriteria *absolute lateral static* adalah 1610 N/m pada kondisi instalasi dan 8710 N/m pada kondisi operasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa pipa tidak memenuhi kriteria *absolute lateral static stability* pada kondisi instalasi maupun kondisi operasi karena berat terendam aktual pipa lebih kecil dari berat minimum yang harus dipenuhi untuk stabil. Sehingga, tebal *concrete* perlu ditambah menjadi 60 mm dan 190 mm atau dilakukan *pipeline anchoring* agar stabil pada kondisi setelah instalasi dan operasi.

**4.5. Analisis Generalized Lateral Stability**

Pada metode ini pipa diijinkan untuk berpindah secara lateral maksimal sejauh 10 kali diameter pipa. Tabel dan grafik berikut ini menunjukkan berat terendam minimum pipa agar memenuhi kriteria *generalized parameter* pada kondisi instalasi dan operasi.



Gambar 4.4: Grafik Berat Terendam Minimum ( $W_{s,min}$ ) Generalized Parameter.

Grafik di atas menunjukkan bahwa pipa tidak stabil pada kondisi operasi, namun stabil pada kondisi instalasi. Sehingga, tebal *concrete* perlu ditambah menjadi 70 mm dilakukan *pipeline anchoring* agar stabil pada kondisi operasi.

**4.6. Analisis Local Buckling**

Tegangan aksial yang terjadi pada pipa bawah laut adalah 12,39 MPa, sedangkan tegangan aksial maksimum yang diijinkan adalah 311,04 MPa, sehingga tegangan aksial masih memenuhi kriteria ASD (*allowable stress design*). Kemudian, selama proses operasi pipa bawah laut kemungkinan akan terjadi *free span* akibat penggerusan tanah di bawah pipa oleh arus laut. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis *local buckling* pada *free span* untuk mengetahui berapa panjang *free span* yang diijinkan agar pipa tidak mengalami *buckling*. *Local buckling* pada *free span* dianalisis menggunakan kriteria *load controlled condition* pada DnV OS F101. Berikut ini adalah hasil analisis *local buckling* dengan panjang *free span* yang berbeda-beda:

Tabel 4.3: Hasil analisis *local buckling* pada *free span*

L(m)	Msd (N.m)	Mp(t) (N.m)	Ssd (N)	Sp(t) (N)	pi (MPa)	pe (MPa)	Pb(t) (MPa)	Local buckling check
40	221760	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	0.319
45	280665	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	0.511
50	346500	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	0.777
55	419265	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	1.137
60	498960	470062	-136683	3812465	1.111	0.314	28.855	1.609

Tabel di atas menunjukkan semakin panjang *free span*, maka semakin besar *bending moment* pada pipa karena semakin bertambahnya panjang dan massa pipa yang tidak memiliki tumpuan. Berdasarkan kriteria *load controlled condition* pada DnV OS F101, panjang maksimum *free span* yang diijinkan adalah 50 m karena nilai *local buckling check* masih di bawah 1 yang berarti pipa bawah laut tidak akan mengalami *local buckling*.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Besar gaya hidrodinamis horizontal pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 405 N/m dan 1119 N/m. Besar gaya hidrodinamis vertikal pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 138 N/m dan 1058 N/m. Besar *Coulomb friction* pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 184 N/m dan 202 N/m. Besar tahanan pasif pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida) masing-masing adalah 111 N/m dan 121 N/m
2. Berdasarkan kriteria *on-bottom stability* DnV, pipa bawah laut stabil secara vertikal pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida). Pada metode *absolute lateral static* pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi setelah instalasi (kosong) dan operasi (berisi fluida). Sehingga, tebal *concrete* perlu ditambah menjadi 60 mm dan 190 mm agar stabil pada kondisi setelah instalasi dan operasi. Pada metode *generalized parameter* pipa bawah laut tidak stabil secara lateral pada kondisi operasi (berisi fluida), namun stabil secara lateral pada kondisi instalasi (kosong). Sehingga, tebal *concrete* perlu ditambah menjadi 70 mm agar stabil pada kondisi operasi.
3. Panjang *free span* pipa bawah laut maksimum yang diijinkan agar tidak terjadi *local buckling* adalah 50 m. Hasil analisis *local buckling* dapat digunakan untuk melakukan mitigasi pada *free span* pipa bawah laut.

### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian ini untuk penelitian lebih lanjut adalah:

1. Melakukan analisis biaya berdasarkan hasil analisis *on-bottom stability*.

2. Melakukan analisis mitigasi apabila terdapat panjang *free span* yang melebihi panjang *free span* yang diijinkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Soegiono. 2007. **Pipa Laut**. Surabaya : Airlangga University Press.
- [2] Guo, B., Song, S, Chacko, J., dan Ghalambor, A. 2005. **Offshore Pipelines**. Gulf Professional Publishing, Burlington, USA.
- [3] Tian, Y., Youssef, B., Cassidy, M.J. 2015. Assessment of pipeline stability in the Gulf of Mexico during hurricanes using dynamic analysis. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**.
- [4] Bai, Y., Bai, Q. 2005. **Subsea Pipelines and Risers**. Elsevier Science, USA
- [5] Teh, T., Palmer, A., Bolton, M., dan Damgaard, J. 2006. Stability of Submarine Pipelines on Liquefied Seabeds. **Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.** 132: 244–251.
- [6] Det norske Veritas. 2007. **DNV RP F109, On-bottom stability design of submarine pipelines**. Norway.
- [7] Det norske Veritas. 2013. **DNV OS F101, Submarine pipeline systems**. Norway.