

## Studi Mekanisme *Upheaval Buckling* pada Pipa Penyalur Bawah Laut

Ricky L. Tawekal<sup>1)</sup>

### Abstrak

Lengkungan awal pada pipa penyalur yang terpasang bisa terjadi akibat ketidakrataan permukaan dasar perairan atau adanya rintangan yang menonjol. Kombinasi dari kenaikan temperatur saat operasional dan gaya gesek tanah akan menghasilkan gaya tekan aksial efektif pada pipa. Gaya aksial efektif yang bekerja pada pipa penyalur yang mempunyai lengkungan awal ini akan menimbulkan gaya tekan vertikal pipa terhadap lapisan tanah di atasnya. Jika gaya tekan vertikal ini melebihi gaya tahan yang diakibatkan oleh berat lapisan tanah di atasnya dan berat pipa pada kondisi operasi, maka pipa akan bergerak ke atas. Fenomena ini dikenal sebagai *upheaval buckling*.

**Kata-kata kunci:** *upheaval buckling, pipa penyalur.*

### Abstract

An initial over-bend of an installed pipeline may occur due to uneven seabed or obstacles. Combination of temperature increase during operation and friction between pipeline and soil will create an axial compressive force on the pipeline. On an over-bend pipeline, the compressive force will induce uplift force to the soil above the pipeline. The pipeline will move upward if the uplift force is greater than uplift resistance due to weight of soil above the pipeline and weight of the pipeline during operational. This phenomenon is known as *upheaval buckling*.

**Keyword:** *upheaval buckling, pipeline.*

## 1. Pendahuluan

Sesuai dengan peraturan yang diberikan oleh Ditjen MIGAS, pipa penyalur yang diletakkan dalam perairan dengan kedalaman kurang dari 12 m harus dikubur sedalam 2 m dari atas muka tanah. Alasan utama dilakukannya penguburan pipa seperti ini adalah untuk melindungi jaringan pipa tersebut dari kerusakan akibat jangkar dan tebaran jaring nelayan, atau aktivitas kelautan lainnya. Selain itu penguburan pipa juga berguna untuk melindungi pipa di perairan dangkal dari gaya-gaya hidrodinamik yang cukup besar.

Pada kondisi operasional, temperatur pipa akan mengalami kenaikan dibandingkan pada saat instalasi. Kenaikan temperatur tersebut akan menyebabkan pipa memuai (memanjang). Pipa yang terkubur dalam tanah tidak bebas untuk memanjang, melainkan ditahan oleh gaya gesek tanah. Kombinasi dari suhu, tekanan internal dan gaya gesek tanah akan menghasilkan gaya aksial efektif pada pipa. Apabila terdapat lengkungan

awal pada pipa penyalur akibat ketidakrataan permukaan dasar laut, gaya aksial efektif ini akan berubah menjadi gaya tekan vertikal pipa terhadap lapisan tanah di atasnya. Jika gaya tekan vertikal ini melebihi daya tahan yang diakibatkan oleh berat lapisan tanah di atasnya dan berat terendam (*submerged weight*) dari pipa, maka pipa akan cenderung untuk bergerak ke atas dan displacement yang besar dapat terjadi. Fenomena ini dikenal sebagai *upheaval buckling*.

Mengacu pada **Gambar 2**, proses *upheaval buckling* adalah sebagai berikut: Pada saat instalasi pipa berlangsung, pipa diletakkan di atas tanah atau dalam parit (*"trench"*). Ketidakrataan tanah (*"imperfection"*) pada saat instalasi adalah sesuatu yang tidak mungkin dihindari. *Imperfertion* ini dapat berupa bukit kecil maupun batu yang terdapat dalam laut. Ketika pipa sudah ditanam dan mulai beroperasi, beban aksial mulai terjadi pada pipa akibat kenaikan temperatur dan tekanan lainnya. Beban aksial dan imperfektion tanah tadi adalah modal awal terjadinya *upheaval buckling*

1. Staf Pengajar PST-Kelautan, FTSP-ITB.

**Catatan :** Usulan makalah dikirimkan pada 18 Agustus 2004 dan dinilai oleh peer reviewer pada tanggal 30 Agustus 2004 – 27 September 2004. Revisi penulisan dilakukan antara tanggal 28 September 2004 hingga 7 Agustus 2004.

pada pipa bawah laut. Pipa yang mengalami gaya keatas ini harus diimbangi dengan beban yang cukup di atasnya. Apabila tidak, pipa akan sedikit demi sedikit melengkung naik hingga ekstrimnya akan mencaat keluar dari permukaan tanah.

Perubahan temperatur yang berulang-ulang dapat menyebabkan lengkung (*buckle*) bertambah besar. Dalam beberapa kasus, pipa dapat menonjol keluar dari dasar laut, seperti ditunjukkan dalam **Gambar 1**. Ini adalah situasi yang sangat berbahaya, bukan saja karena deformasi lengkungan yang tajam, namun juga gaya gelombang dan arus yang bekerja pada bagian pipa yang keluar tersebut dapat menjaral ke bagian pipa yang lain.

*Upheaval buckling* ini dapat dihindari dengan cara menimbun lapisan tanah atau bebatuan di atas jalur pipa. Hal ini akan menambah berat tanah di atas pipa sehingga dapat menahan gaya vertikal penyebab *upheaval buckling*. Pencegahan ini hanya perlu (dan akan lebih efisien) dilakukan pada lokasi yang berpotensi kritis buckling. Lokasi-lokasi ini perlu dicari terlebih dahulu dan untuk setiap lokasi perlu dihitung berapa berat batu yang dibutuhkan.

**2. Model Analitis Pipa Penyalur**

Pipa penyalur dalam makalah ini akan dimodelkan sebagai balok yang dikenai beban tekan aksial  $P$  dan beban merata  $q(x)$  seperti yang terlihat dalam **Gambar 3**. Sumbu koordinat  $x$  diambil sejajar dengan kondisi awal batang pada saat lurus.

Dari teori dasar balok tekan (*beam-column*), persamaan diferensial orde ke-empat untuk  $\delta$  dalam kondisi setimbang adalah:

$$(EI \cdot \delta'''' + P_{comp} \cdot \delta'' = q(x)) \tag{1}$$

dimana

$E$  = modulus elastisitas material pipa penyalur

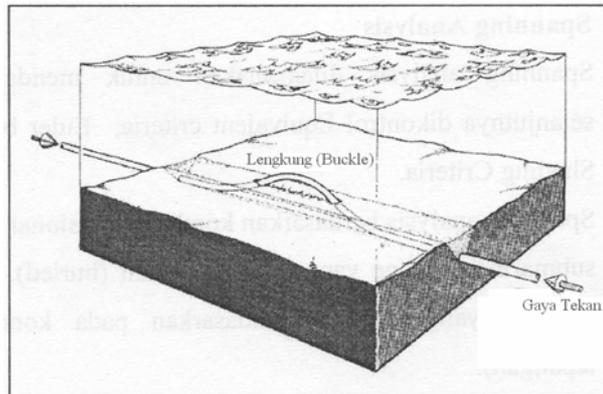
$I$  = momen inersia penampang pipa penyalur

$P_{comp}$  = gaya tekan aksial efektif yang bekerja pada pipa penyalur

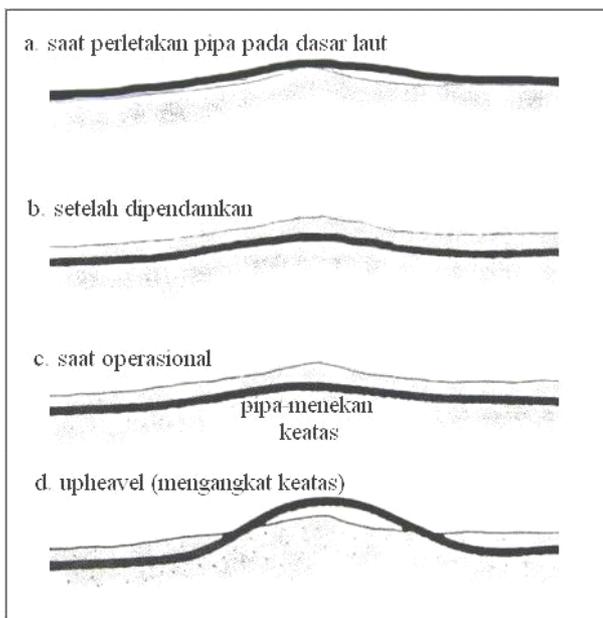
$q(x)$  = beban vertikal terdistribusi

Untuk kondisi dimana beban vertikal terdistribusi konstan ( $= q$ ), persamaan (1) mempunyai penyelesaian umum sebagai berikut [Fah Chen, Atsuta, 1976]:

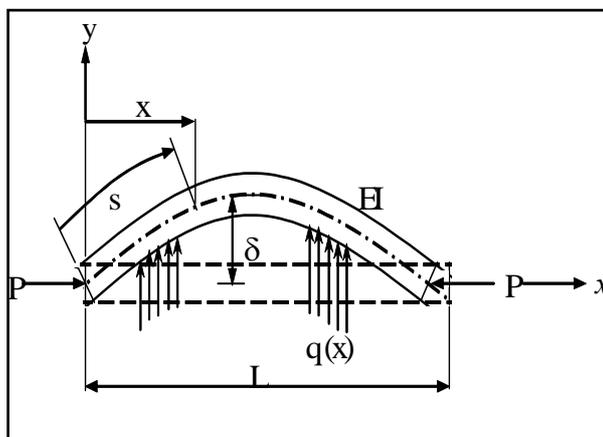
$$\delta_{(x)} = A \cos kx + B \sin kx + Cx + D + \frac{q}{2P_{comp}} x^2 \tag{2}$$



**Gambar 1. Ilustrasi 3-D upheaval buckling**



**Gambar 2. Proses terjadinya upheaval buckling**



**Gambar 3. Balok dengan beban tekan aksial P dan beban terdistribusi q(x)**

**Tawekal**

dimana  $k = \sqrt{\frac{P_{comp}}{EI}}$

A,B,C, dan D adalah konstanta

Untuk menyelesaikan **persamaan (2)**, diperlukan syarat batas berdasarkan asumsi bentuk defleksi yang terjadi pada balok tekan yang ditinjau. Sesuai dengan bentuk deformasi pipa penyalur yang diperlihatkan pada **Gambar 4**, diasumsikan balok tekan mempunyai syarat batas pada kedua ujungnya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \delta &= 0, \quad \delta' = 0 \quad \text{pada} \quad x = -L/2 \\ \delta &= 0, \quad \delta' = 0 \quad \text{pada} \quad x = L/2 \end{aligned} \tag{3}$$

Maka didapat hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A &= \frac{qL}{2P_{comp}k} \csc\left(\frac{kL}{2}\right) \\ B &= 0 \\ C &= 0 \\ D &= -\frac{qL}{2P_{comp}k} \cot\left(\frac{kL}{2}\right) - \frac{qL^2}{8P_{comp}} \end{aligned} \tag{4}$$

Sehingga **persamaan (2)** dapat kita tulis kembali menjadi:

$$\delta = \frac{qL}{2P_{comp}k} \csc\left(\frac{kL}{2}\right) \cos kx - \frac{qL}{2Pk} \cot\left(\frac{kL}{2}\right) - \frac{qL^2}{8P} + \frac{q}{2P_{comp}} x^2$$

atau

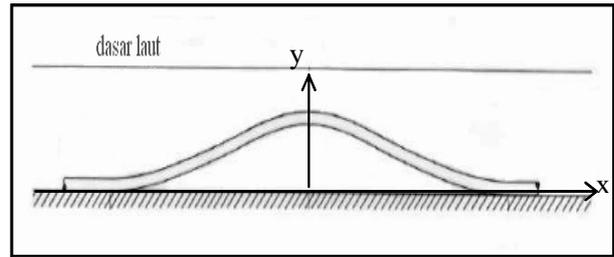
$$\delta = \frac{qL}{2P_{comp}k} \left( \csc\left(\frac{kL}{2}\right) \cos kx - \cot\left(\frac{kL}{2}\right) \right) - \frac{qL^2}{8P} + \frac{q}{2P_{comp}} x^2 \tag{5}$$

Defleksi maksimum  $\Delta$  terjadi di tengah-tengah bentang ( $x=0$ ), yaitu:

$$\Delta = \delta_{max} = \frac{qL}{2P_{comp}k} \left[ \csc\left(\frac{kL}{2}\right) - \cot\left(\frac{kL}{2}\right) \right] - \frac{qL^2}{8P_{comp}}$$

atau

$$\Delta = \frac{qL}{2P_{comp}k} \left[ \frac{1 - \cos\left(\frac{kL}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kL}{2}\right)} \right] - \frac{qL^2}{8P_{comp}} \tag{6}$$



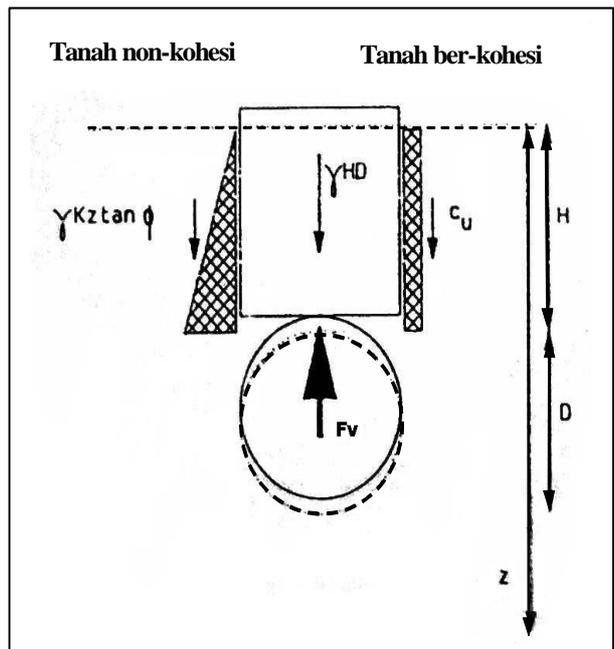
**Gambar 4. Ilustrasi melintang fenomena upheaval buckling**

**3. Tahanan Tanah Terhadap Gaya Vertikal**

Gaya tahanan tanah terhadap gaya vertikal ke atas (*uplift resistance*) dihitung berdasarkan perumusan yang diusulkan [Schaminee et al] yang diperlihatkan pada **Gambar 5**.

**3.1 Tanah non-koheksi**

Pipa yang dikubur dalam tanah tak berkoheksi (pasir, batu, kerikil) akan mengalami reaksi mekanik yang ditentukan oleh gesekan inter-partikel. Dapat diasumsikan bahwa *uplift resistance* ( $F_{ur}$ ) dari tanah non-koheksi per satuan panjang pipa adalah fungsi dari jumlah friksi yang bekerja dan beban mati dari tanah itu sendiri. Model yang dapat menunjukkan hal ini terdapat pada **Gambar 5**, dengan pipa berdiameter  $D$  dikubur dalam tanah dengan tebal  $H$ , yang memiliki berat satuan  $\gamma$ . *Uplift resistance* meliputi berat tanah di atas pipa penyalur dan komponen gaya gesek:



**Gambar 5. Model tanah vertikal slip**

$$F_{ur} = W_{soil} + S \quad (7)$$

Berat tanah di atas pipa penyalur dapat diasumsikan dengan:

$$W_{soil} = \gamma \cdot H \cdot D \quad (8)$$

dimana

$\gamma$  = berat jenis tanah dalam air

$H$  = tinggi timbunan tanah di atas pipa penyalur

$D$  = diameter luar pipa penyalur

Sedangkan gaya gesek tanah dapat ditulis sebagai berikut:

$$S = f_d \cdot H^2 \cdot \gamma \quad (9)$$

Dimana  $f_d$  adalah faktor beban yang nilainya bervariasi antara 0,3 sampai 0,5.

Maka, dapat ditulis bahwa untuk tanah non-koheesi mempunyai *uplift resistance* sebesar:

$$F_{ur} = \gamma \cdot H \cdot D + f_d \cdot H^2 \cdot \gamma \quad (10)$$

Berdasarkan hasil percobaan, Schaminee et al merekomendasikan persamaan empiris untuk gaya tahanan vertikal tanah non-koheesi seperti pasir, lanau, dan batuan sebagai berikut:

$$w = HD \left( 1 + f \frac{H}{D} \right) \quad (11)$$

dimana

$w$  = gaya tahanan vertikal tanah (*uplift resistance*) per-satuan panjang pipa

$H$  = kedalaman timbunan (dari tepi atas pipa sampai permukaan tanah)

$D$  = diameter luar pipa

$f$  = koefisien gaya tahanan vertikal yang besarnya ditentukan berdasarkan hasil percobaan, yaitu 0,5 untuk *dense materials* dan 0,1 untuk *loose materials*

### 3.2 Tanah berkoheesi

Berdasarkan Gambar 5, komponen gaya gesek dari material kohesif secara umum dapat diberikan dalam kekuatan geser  $C_u$ :

$$S = 2 \cdot H \cdot c_u \quad (12)$$

Berdasarkan hasil percobaan, Schaminee et al merekomendasikan persamaan empiris untuk gaya tahanan vertikal tanah berkoheesi seperti lempung, sebagai berikut:

$$w = c_u D \min \left[ 3, \frac{H}{D} \right] \quad (13)$$

Dimana  $C_u$  = kuat geser tanah (*shear strength*)

## 4. Studi Kasus

Sebuah model pipa penyalur akan digunakan untuk studi kasus dalam makalah ini dengan data sebagai berikut:

Massa jenis air laut	$\rho_{water} = 1025 \text{ kg m}^{-3}$
Massa jenis fluida	$\rho_{conc} = 740 \text{ kg m}^{-3}$
Diameter terluar pipa	$D_o = 609,6 \text{ mm} = 24 \text{ inch}$
Tebal pipa	$t = 25,4 \text{ mm}$
Koefisien termal pipa	0,0000117
Tebal <i>corrosion</i> coating	$t_{corr} = 17 \text{ mm}$
Tebal beton pemberat	$t_{concr} = 40 \text{ mm}$
Modulus elastisitas pipa	$E = 207000 \text{ MPa}$
<i>Flexural rigidity</i> pipa	$EI = 412.447.621,3 \text{ Nm}^2$

Gaya angkat (*bouyancy*)  $W_b$

$$W_b = 4137.66 \text{ Nm}^{-1}$$

Berat material pipa  $W_s$

$$W_s = 3588.69 \text{ Nm}^{-1}$$

Berat material beton pemberat  $W_{conc}$

$$W_{conc} = 2476.74 \text{ Nm}^{-1}$$

Berat material anti korosi (*coating*)  $W_{coat}$

$$W_{coat} = 301.92 \text{ Nm}^{-1}$$

Berat fluida dalam pipa saat instalasi  $W_{water}$

$$W_{water} = 2467.58 \text{ Nm}^{-1}$$

Berat fluida/gas dalam pipa saat operasional  $W_f$

$$W_f = 48.58 \text{ Nm}^{-1}$$

Gaya vertikal pada pipa yang bekerja pada kondisi instalasi adalah  $W_{inst}$  (positif ke atas)

$$\begin{aligned} W_{inst} &= W_b - (W_s + W_{conc} + W_{coat} + W_{water}) \\ &= - 4697.26 \text{ Nm}^{-1} \end{aligned}$$

Gaya vertikal pada pipa saat operasional adalah  $W_{op}$

$$\begin{aligned} W_{op} &= W_b - (W_s + W_{conc} + W_{coat} + W_f) \\ &= - 2278.27 \text{ Nm}^{-1} \end{aligned}$$

Gaya vertikal pada pipa saat kosong adalah  $W_o$

$$\begin{aligned} W_o &= W_b - (W_s + W_{conc} + W_{coat}) \\ &= - 2229.69 \text{ Nm}^{-1} \end{aligned}$$

Temperatur operasional =  $100^0 \text{ C}$

Temperatur lingkungan =  $25^0 \text{ C}$

**Tawekal**

Tekanan fluida/gas untuk kondisi operasional  $P_i = 110$  bar

Karakteristik tanah timbunan :

Jenis tanah Lempung (clay)

Kuat geser tanah  $C_u = 3,5$  kPa

Gaya tekan aksial akibat perubahan temperatur

$$P_{temp} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot \left[ \frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D_i^2) \right] = 8647,64 \text{ kN}$$

Gaya tekan aksial akibat tekanan fluida atau gas di dalam pipa

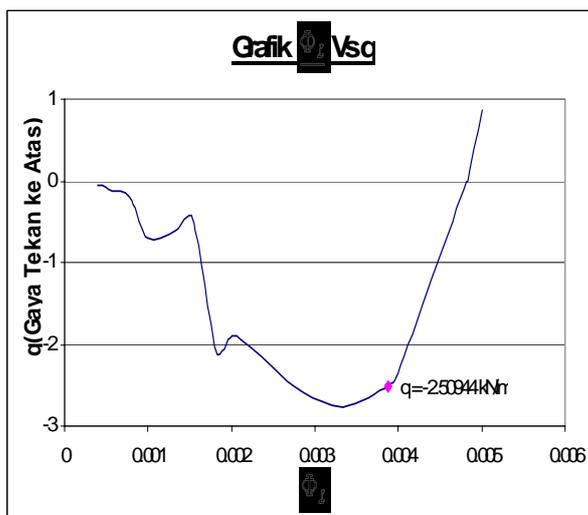
$$P_{fluid} = p_i \cdot A_i - \nu \cdot p_i \cdot \frac{(D_o - 2 \cdot t)}{2 \cdot t} \cdot A_s = 1005,51 \text{ kN}$$

Maka, gaya tekan aksial efektif pada pipa penyalur untuk analisa *upheavel buckling* adalah:

$$P_{comp} = P_{temp} + P_{fluid} = 9473,15 \text{ kN}$$

**4.1 Perhitungan gaya tekan ke atas**

Berdasarkan asumsi besar defleksi pada tengah bentang, bentang L yang terjadi, dan gaya aksial efektif yang terjadi  $P_{comp}$ , besar gaya merata vertikal q yang dibutuhkan agar pipa tetap dalam keadaan stabil dapat dihitung dengan menggunakan **persamaan (6)**. Penentuan bentang L dimana mekanisme *upheavel buckling* akan terjadi sampai saat ini masih belum bisa dilakukan. Oleh karena itu, grafik hasil perhitungan diberikan dalam parameter tak berdimensi  $\Phi_L = \Delta/L$ . Hasil perhitungan gaya tekan ke atas q untuk berbagai kondisi  $\Delta/L$  diperlihatkan dalam bentuk grafik pada **Gambar 6**.



**Gambar 6. Grafik gaya tekan ke atas terhadap  $\Phi_L$**

Apabila diasumsikan tinggi timbunan tanah adalah 1,5 meter, maka gaya tahanan vertikal tanah adalah:

$$w = c_u \cdot D \cdot H/D = 5250 \text{ Nm}^{-1}$$

Gaya vertikal total yang menahan pergerakan pipa ke atas adalah:

$$W_{down} = w + W_{op} = 5,25 + 2,278 = 7,528 \text{ kNm}^{-1}$$

Dengan memasukkan faktor keamanan sebesar 3, maka besar gaya tahanan vertikal yang diperhatikan dalam analisa *upheavel buckling* adalah:

$$w_{allw} = W_{down} / 3 = 2509,42 \text{ Nm}^{-1}$$

Apabila besar imperfection yang diijinkan atau yang mungkin terjadi adalah sebesar  $\Delta = 1,2$  meter dan dengan menambahkan faktor keamanan sebesar 3 untuk gaya tahanan vertikal yang tersedia, maka panjang bentang kritis dimana pipa mulai tidak stabil (bergerak ke atas) bisa didapat dari grafik hasil perhitungan pada **Gambar 6**. Yaitu, pada saat  $\Phi_L = \Delta/L = 0.003879$  atau pada panjang bentang  $L = 309,4$  meter.

**5. Kesimpulan**

Mekanisme *upheavel buckling* pada pipa penyalur bawah laut dalam makalah ini dimodelkan berdasarkan teori balok tekan di atas fondasi elastis (*beam-column on elastic foundation*). Untuk studi kasus di atas dimana tinggi timbunan ditetapkan setinggi 1,5 meter, faktor keamanan gaya tahanan vertikal sebesar 3, dan besar imperfection maksimum ditetapkan sebesar 1,2 meter, maka didapat panjang bentang kritis yaitu  $L = 309,4$  meter.

Untuk studi kasus yang sama, perhitungan dengan menggunakan formulasi [Palmer et al] dimana fungsi defleksi pipa penyalur diasumsikan sebagai fungsi sinusoidal sederhana

$$\delta = \Delta \cos^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) \text{ untuk } -\frac{L}{2} < x < \frac{L}{2}$$

dan gaya tekan ke atas maksimum pada tengah bentang sebagai

$$q = 2 \Delta P \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 - 8 \Delta EI \left(\frac{\pi}{L}\right)^4$$

akan memberikan hasil berbeda. Yaitu, panjang bentang kritis  $L = 205$  meter.

Metoda perhitungan yang lebih detail perlu dikembangkan lebih lanjut dengan memperhatikan

kemungkinan terjadinya deformasi plastis dan penentuan panjang pipa yang membentuk lengkungan awal (*imperfection length*) yang lebih akurat berdasarkan percobaan atau kondisi yang terjadi di lapangan.

### **Daftar Pustaka**

- Chen, W.F., Atsuta, T., 1976, "*Theory of Beam-Columns In-Plane Behavior and Design*". McGraw-Hill, Inc, United State of America.
- Det Norske Veritas (DNV), 2000, "*Offshore Standard OS-F101*", Submarine Pipeline Systems.
- Palmer, A.C., Ellinas, C.P., Richards, D.M., Guilt, J., 1990, "*Design of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling. OTC 6335, 22<sup>nd</sup> Annual Offshore Technology Conference, Houston*", Texas, May 7-10, 551-560.
- Schaminee, P.E.L., Zorn, N.F., Schotman, G.J.M., 1990, "*Soil Response for Pipeline Upheaval Buckling Analyses: Full-Scale Laboratory Tests and Modelling. OTC 6486, 22<sup>nd</sup> Annual Offshore Technology Conference*", Houston, Texas, May 7-10, 563-572.