

Pemodelan dan Analisis Pipeline Crossing

Aldea Permatasari Firdhaus

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

aldea.firdhaus@yahoo.com

Kata kunci: *freespan, crossing, tegangan, penurunan tanah*

ABSTRAK

Karya tulis ini membahas tentang desain pipeline crossing yang memenuhi stabilitas bawah laut dengan tegangan yang tidak melebihi nilai tegangan ijinnya dengan memperhitungkan penurunan tanah yang terjadi pada lokasi crossing. Pembahasan dalam karya tulis ini meliputi bentang bebas maksimum untuk arah sejajar dan tegak lurus arah aliran yang bekerja pada pipa, desain crossing dengan perangkat lunak berbasis elemen hingga, serta penurunan tanah yang terjadi pada lokasi crossing sehingga didapatkan desain crossing yang aman dalam artian tegangan yang bekerja tidak melebihi nilai tegangan ijinnya dan jarak gap antarpipanya memenuhi ketentuan yang berlaku. Hasil yang diperoleh dalam karya tulis ini adalah desain pipeline crossing yang aman dalam kriteria tegangan dan jarak gap dengan memperhitungkan penurunan tanah yang terjadi.

PENDAHULUAN

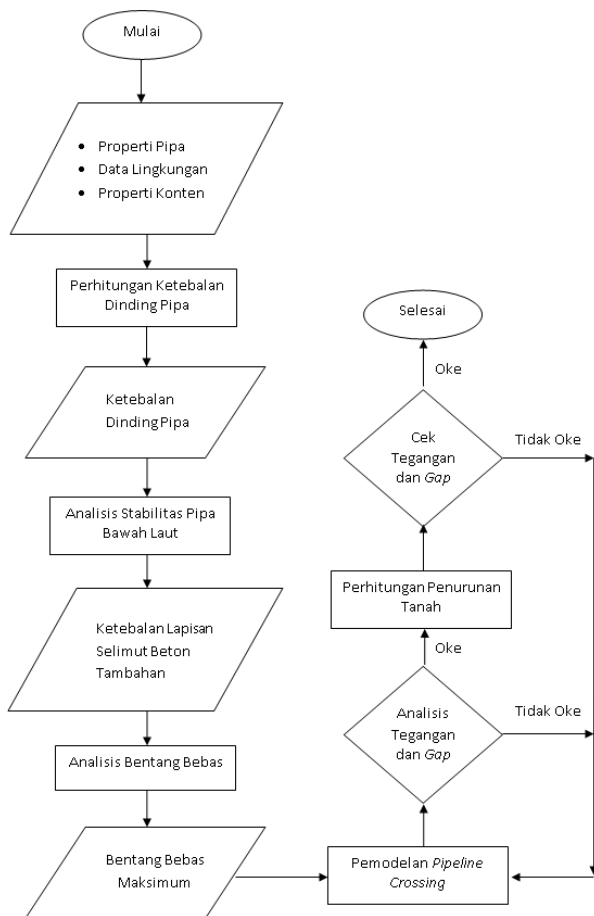
Dengan berkembangnya era globalisasi, kebutuhan sehari-hari manusia akan meningkat, begitu pula akan kebutuhan sumber energi pemenuh kebutuhan manusia sehari-hari tersebut. Minyak dan gas bumi merupakan contoh dari berbagai sumber energi yang kini digunakan. Sumber minyak dan gas bumi tersebar di penjuru dunia, meliputi daratan dan lautan. Minyak dan gas bumi dari sumber akan disalurkan ke suatu lokasi tujuan. Pipa, sebagai fasilitas yang ideal dalam menyalurkan fluida dalam jumlah dan jarak yang dapat terus dikembangkan, menjadi

pilihan utama dalam menyalurkan minyak dan gas bumi dari sumber. Dengan maraknya sektor industri minyak dan gas bumi yang melakukan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi, sangat memungkinkan adanya pertemuan dan persimpangan antarjalur pipa, sehingga perlu didesain fasilitas penunjang persimpangan tersebut, *pipeline crossing*.

METODOLOGI Pengerjaan

Metodologi pengerjaan karya tulis dengan judul “*Pemodelan dan Analisis Pipeline*

Crossing” ini ditunjukkan pada diagram alir pada **Gambar 1** sebagai berikut,



Gambar 1 : Diagram Alir Metodologi Pengerjaan

BENTANG BEBAS MAKSIMUM

Dalam mendesain *pipeline crossing*, perlu diketahui jarak bentang bebas maksimum yang dapat ditahan oleh pipa. Analisis bentang bebas maksimum yang dapat ditahan oleh pipa dilakukan untuk arah sejajar dan tegak lurus aliran yang bekerja pada pipa serta dilakukan pada kondisi instalasi, hidrotas, dan operasi yang memiliki perbedaan dalam hal fluida

yang berada di dalam pipa beserta tekanan yang bekerja di dalam pipa. Perbedaan lain dari ketiga kondisi operasional tersebut adalah beban lingkungan yang bekerja. Untuk kondisi instalasi dan hidrotas, beban lingkungan yang digunakan adalah beban lingkungan dengan periode ulang satu tahun, sedangkan untuk kondisi operasi, beban lingkungan yang digunakan adalah beban lingkungan dengan periode ulang seratus tahun. Analisis bentang bebas maksimum dilakukan dengan membandingkan frekuensi natural pipa dengan frekuensi *vortex shedding*, dimana diharapkan terjadi kondisi locked-in yang merupakan kondisi dimana frekuensi natural pipa sama dengan frekuensi *vortex shedding* [1]. Kriteria yang perlu dipenuhi untuk bentang bebas dengan arah sejajar dan tegak lurus aliran ditunjukkan pada persamaan-persamaan sebagai berikut,

Arah sejajar aliran

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100year}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D} \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \frac{1}{\bar{\alpha}} \dots (1)$$

Arah tegak lurus aliran

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100year} + U_{w,1year}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \dots (2)$$

Bentang bebas maksimum untuk arah sejajar dan tegak lurus aliran yang bekerja pada pipa serta untuk kondisi instalasi, hidrotas, dan operasi ditunjukkan pada **Tabel 1** sebagai berikut,

Tabel 1: Panjang Bentang Bebas Maksimum

No.	Parameter	Kondisi	Nilai [m]
1	Bentang Bebas Maksimum Arah Sejajar	Instalasi	24.167
		Hidrotes	22.35
		Operasi	22.313
2	Bentang Bebas Maksimum Arah Tegak Lurus	Instalasi	35.845
		Hidrotes	33.151
		Operasi	33.096

Berdasarkan tabel di atas, nilai bentang bebas maksimum yang digunakan dalam desain adalah 22 m, yang akan memenuhi nilai maksimum untuk tiap arah dan kondisi.

DESAIN PIPELINE CROSSING

Setelah mendapatkan bentang bebas maksimum yang dapat ditahan oleh pipa, nilai bentang bebas maksimum tersebut dapat digunakan sebagai jarak maksimum antar tumpuan pada lokasi *crossing*. Dalam mendesain *pipeline crossing*, perlu ditentukan terlebih dahulu tinggi tumpuan utama yang akan digunakan. Tinggi tumpuan utama dipengaruhi oleh diameter total pipa yang telah ada, *existing pipeline* [2]. Penentuan tinggi tumpuan utama dapat dilakukan menggunakan persamaan sebagai berikut,

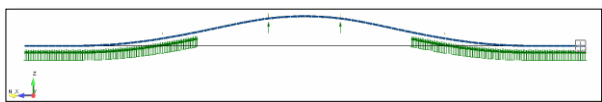
$$H_{smin} = D_{existingpipe} + \Delta_{clearance}$$

dengan $\Delta_{clearance}$ merupakan jarak *gap* minimum yang harus dipenuhi berdasarkan DNV 1981 dan DNV OS F101 sebesar 300 mm. Dengan diameter luar total pipa yang

telah ada, *existing pipeline* sebesar 325 mm, maka tinggi tumpuan utama minimum adalah 625 mm.

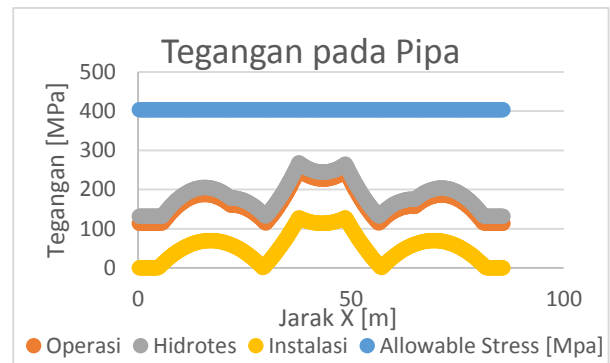
Pemodelan *pipeline crossing* menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga dilakukan dengan memodelkan properti pipa, fluida yang mengalir di dalam pipa, tinggi tumpuan pada lokasi *crossing* menggunakan sistem *displacement*, serta beban lingkungan yang bekerja pada pipa. Pada kondisi instalasi, tidak terdapat fluida yang mengalir di dalam pipa. Pada kondisi hidrotes, fluida yang mengalir di dalam pipa adalah air, sedangkan pada kondisi operasi, pipa yang merupakan *water injection flowline* ini mengalirkan air laut. Beban lingkungan yang bekerja pada pipa pada kondisi instalasi dan hidrotes adalah beban lingkungan dengan periode ulang satu tahun berupa gelombang dengan tinggi gelombang signifikan, $H_s = 3.5$ m dan periode gelombang signifikan, $T_s = 11.619$ s, serta arus dengan kecepatan arus, $u_c = 0.23$ m/s dengan lokasi referensi adalah 7 m di atas dasar laut, sedangkan untuk kondisi operasi, beban lingkungan dengan periode ulang seratus tahun berupa gelombang dengan tinggi gelombang signifikan, $H_s = 6.3$ m dan periode signifikan, $T_s = 12.476$ s, serta arus dengan kecepatan arus, $u_c = 0.31$ m dengan lokasi referensi adalah 7 m di atas dasar laut. Kedalaman laut pada lokasi *crossing* adalah 1383 m.

Tumpuan yang digunakan pada desain *pipeline crossing* adalah *concrete sleeper* dengan ukuran panjang 13 m dan lebar 1 m. Desain *pipeline crossing* dengan tinggi tumpuan utama sebesar 625 mm dan tumpuan penunjang setinggi 170 mm dengan jarak antartumpuannya adalah 11 m dan jarak tumpuan utama dengan tumpuan penunjang adalah 15 m ditunjukkan pada **Gambar 2** sebagai berikut,



Gambar 2: Tampak Isometrik Desain Pipeline Crossing

Dengan desain *pipeline crossing* dengan tumpuan utama setinggi 625 mm dan tumpuan penunjang setinggi 170 mm, jarak *gap* antarpipa berdasarkan DNV 1981 dan DNV OS F101 sebesar 300 mm terpenuhi. Selain pengecekan terhadap jarak *gap* antarpipa, tegangan yang terjadi pada pipa juga harus diperiksa, apakah tegangan yang terjadi melebihi nilai tegangan ijinnya atau tidak. Perbandingan tegangan yang terjadi pada pipa untuk kondisi instalasi, hidrotes, dan operasi dengan nilai tegangan ijin ditunjukkan pada **Grafik 1** sebagai berikut,



Grafik 1: Tegangan pada Pipa Desain Pipeline Crossing dengan Tumpuan Utama 625 mm dan Tumpuan Penunjang 170 mm

Berdasarkan grafik di atas, tampak bahwa tegangan yang terjadi pada pipa untuk seluruh kondisi pada desain *pipeline crossing* menggunakan tumpuan utama setinggi 625 mm dengan tumpuan penunjang setinggi 170 mm tidak melebihi nilai tegangan ijinnya.

PENURUNAN TANAH

Dengan adanya penggelaran pipa baru yang dilengkapi dengan tumpuannya, akan memberikan beban tambahan pula kepada tanah dasar laut, yang memungkinkan adanya penurunan tanah pada lokasi *crossing*. Penurunan tanah yang terjadi meliputi penurunan tanah elastis dan penurunan tanah akibat konsolidasi yang mencakup konsolidasi primer dan sekunder. Penurunan tanah elastis terjadi dengan segera setelah pemberian beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan kadar air. Penurunan tanah elastis dapat

dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut[3],

$$S_e = \Delta\sigma \cdot B_{sp} \cdot \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_p \dots (3)$$

$$I_p = \frac{1}{\pi} \left[m_1 \ln \left(\frac{1 + \sqrt{m_1^2 + 1}}{m_1} \right) + \ln \left(m_1 + \sqrt{m_1^2 + 1} \right) \right] \dots (4)$$

$$m_1 = \frac{L_{sp}}{B_{sp}} \dots (5)$$

Setelah penurunan tanah elastis, terjadilah penurunan tanah akibat konsolidasi (untuk lempung. Untuk pasir, penurunan tanah elastis berlangsung bersamaan dengan penurunan tanah akibat konsolidasi primer). Penurunan tanah akibat konsolidasi primer terjadi akibat berkurangnya volume tanah akibat keluarnya air dari dalam pori tanah akibat meningkatnya tekanan air pori akibat adanya penambahan beban. Penurunan tanah akibat konsolidasi primer dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut[3],

$$S_c = \sum \left[\frac{C_c \cdot H_i}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_{o(i)} + \Delta p_i}{p_{o(i)}} \right) \right] \dots (6)$$

Konsolidasi sekunder terjadi setelah konsolidasi primer terjadi secara sepenuhnya. Penurunan tanah akibat konsolidasi sekunder terjadi akibat penyesuaian plastis dari butiran tanah. Penurunan tanah akibat konsolidasi sekunder dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut[3],

$$S_s = C'_\alpha \cdot H \cdot \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \dots (7)$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{(1 + e_p)} \dots (8)$$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} \dots (9)$$

Penurunan tanah total yang terjadi pada tanah di dasar pondasi merupakan penjumlahan dari seluruh penurunan tanah yang terjadi, atau dapat dituliskan sebagai persamaan sebagai berikut[3],

$$S_T = S_c + S_s + S_e \dots (10)$$

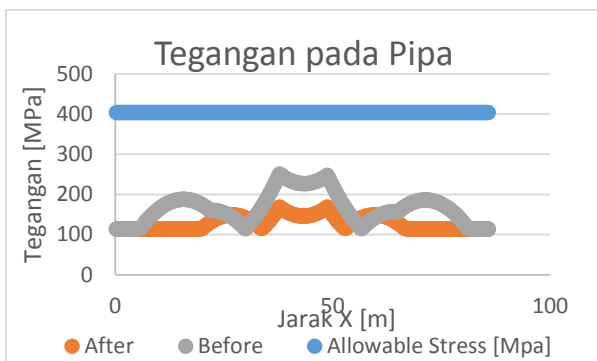
Desain *pipeline crossing* dengan tinggi tumpuan utama sebesar 625 mm dan tumpuan penunjang setinggi 170 mm yang terletak di atas tanah dasar laut berupa *organic soft clay* dengan masa layan 20 tahun mengalami penurunan tanah sebesar yang ditunjukkan pada **Tabel 2** sebagai berikut,

Tabel 2: Penurunan Tanah pada Desain Pipeline Crossing dengan Tumpuan 625 mm

No.	Penurunan Tanah	Nilai [mm]	
		Utama	Penunjang
1	Elastis	5.274	1.518
2	Konsolidasi Primer	525	209
3	Konsolidasi Sekunder	0	0
PENURUNAN TANAH TOTAL		530.274	210.518

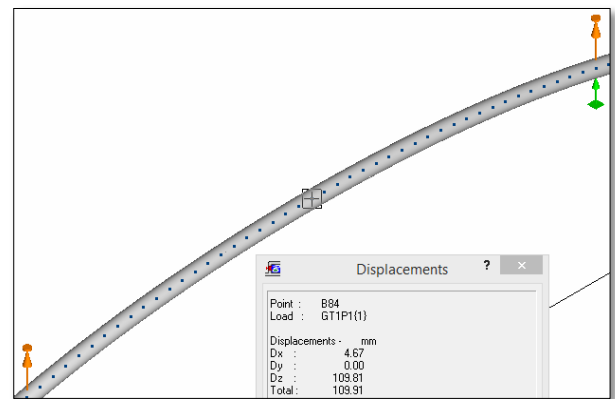
Pada desain *pipeline crossing* menggunakan dua tumpuan utama setinggi 625 mm dan dua tumpuan penunjang setinggi 170 mm, penurunan tanah total yang sama akan

diberlakukan pada setiap lokasi tumpuan karena tanah dasar laut di bawah pondasi merupakan tanah yang sama dan desain *pipeline crossing* dibuat simetris. Hasil perbandingan tegangan sebelum dan setelah penurunan dengan nilai tegangan ijin ditunjukkan pada **Grafik 2** sebagai berikut,



Grafik 2: Tegangan pada Pipa Setelah Penurunan Tanah Selama 20 Tahun Masa Layan

Pemeriksaan yang harus dilakukan pada desain *pipeline crossing* setelah terjadi penurunan tanah, tidak hanya pada tegangannya, namun juga pada jarak *gap* antarpipa di lokasi *crossing*. Jarak *gap* antarpipa pada lokasi *crossing* pada desain *pipeline crossing* menggunakan dua tumpuan utama dengan tinggi 625 mm dan dua tumpuan penunjang setinggi 170 mm setelah terjadi penurunan tanah ditunjukkan pada **Gambar 3** sebagai berikut,

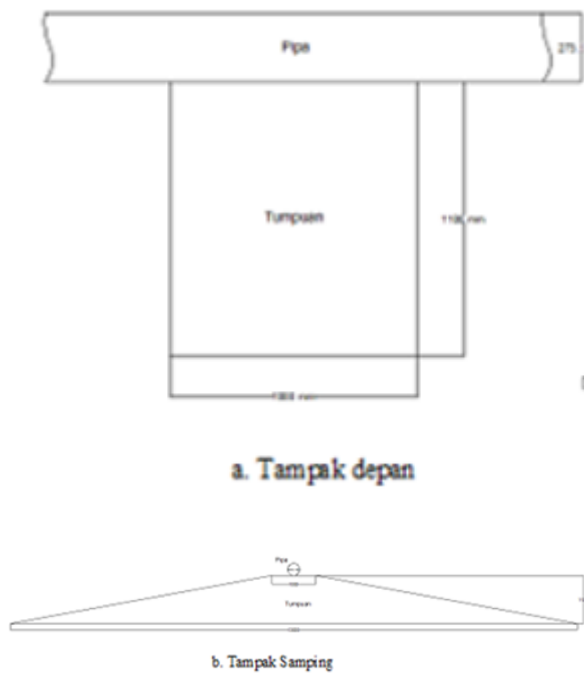


Gambar 3: Jarak Pipa Terhadap Seabed

Tampak bahwa jarak pipa dengan *seabed* pada desain *pipeline crossing* menggunakan dua tumpuan dengan tinggi 625 mm adalah 109.81 mm, dimana pipa yang telah ada, *existing pipeline* memiliki diameter luar total sebesar 325 mm, sehingga desain awal dapat dikatakan telah gagal untuk mencapai kondisi aman dalam artian tegangan tidak melebihi tegangan ijin dan jarak *gap* antarpipa memenuhi ketentuan yang berlaku.

ALTERNATIF DESAIN

Dengan gagalnya desain awal *pipeline crossing* dengan empat tumpuan berupa dua tumpuan utama setinggi 625 mm dan dua tumpuan penunjang setinggi 170 mm karena tidak tercapainya jarak *gap* antarpipa di lokasi *crossing* akibat terjadinya penurunan tanah, dilakukan pencarian alternatif desain dengan mengubah bentuk dan dimensi tumpuan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4** sebagai berikut,



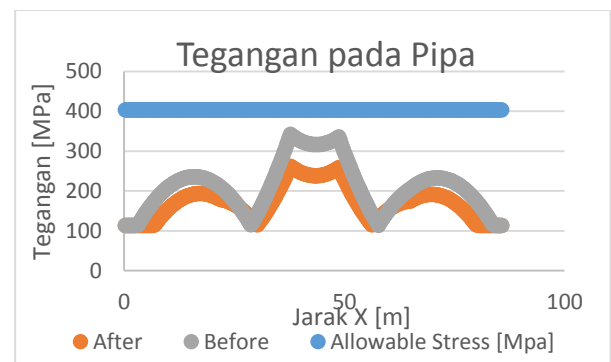
Gambar 4: Dimensi Tumpuan Baru

Panjang tumpuan *concrete sleeper* tetap 13 m namun bentuknya berubah dari balok menjadi prisma dengan penampang atas dan bawah yang berbeda. Tinggi tumpuan kini ditambah menjadi 1,200 mm untuk tumpuan utama dan 365 mm untuk tumpuan penunjang agar dapat mencapai jarak *gap* antarpipa pada lokasi *crossing* baik sebelum maupun sesudah terjadinya penurunan tanah. Dengan berubahnya dimensi tumpuan pada lokasi *crossing*, terjadi perubahan pula pada nilai penurunan tanah yang terjadi pada dasar tiap pondasi. Penurunan tanah pada desain *pipeline crossing* dengan tinggi tumpuan sebesar 1200 mm untuk tumpuan utama dan 365 mm untuk tumpuan penunjang ditunjukkan pada **Tabel 3** sebagai berikut,

Tabel 3: Penurunan Tanah pada Desain Pipeline Crossing dengan Tumpuan 1100 mm

No.	Penurunan Tanah	Nilai [mm]	
		Utama	Penunjang
1	Elastis	5.708	1.542
2	Konsolidasi Primer	553	212
3	Konsolidasi Sekunder	0	0
PENURUNAN TANAH TOTAL		558.708	213.542

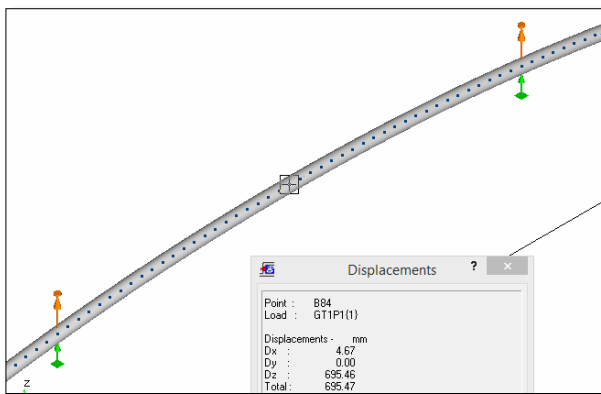
Pada desain *pipeline crossing* menggunakan dua tumpuan utama setinggi 1200 mm dan dua tumpuan penunjang setinggi 365 mm, penurunan tanah total yang sama akan diberlakukan pada setiap lokasi tumpuan karena tanah dasar laut di bawah pondasi merupakan tanah yang sama dan desain *pipeline crossing* dibuat simetris. Hasil perbandingan tegangan sebelum dan setelah penurunan dengan nilai tegangan ijin ditunjukkan pada **Grafik 3** sebagai berikut,



Grafik 3: Tegangan pada Pipa Setelah Penurunan Tanah Selama 20 Tahun Masa Layan

Pemeriksaan yang harus dilakukan pada desain *pipeline crossing* setelah terjadi penurunan tanah, tidak hanya pada tegangannya, namun

juga pada jarak *gap* antarpipa di lokasi *crossing*. Jarak *gap* antarpipa pada lokasi *crossing* pada desain *pipeline crossing* menggunakan dua tumpuan utama dengan tinggi 1200 mm dan dua tumpuan penunjang setinggi 365 mm setelah terjadi penurunan tanah ditunjukkan pada **Gambar 5** sebagai berikut,



Gambar 5: Jarak Pipa Terhadap Seabed

Tampak bahwa jarak pipa dengan *seabed* pada desain *pipeline crossing* menggunakan dua tumpuan utama dengan tinggi 1200 mm dan dua tumpuan penunjang setinggi 365 mm adalah 695.46 mm, dimana pipa yang telah ada, *existing pipeline* memiliki diameter luar total sebesar 325 mm, dan didapatkan jarak *gap* antarpipa melebihi 300 mm dan dapat dikatakan bahwa desain alternatif *pipeline crossing* dengan tinggi tumpuan utama 1200 mm dan tumpuan penunjang setinggi 365 mm telah mencapai kondisi aman dalam artian tegangan tidak melebihi tegangan ijin dan jarak *gap* antarpipa memenuhi ketentuan yang berlaku.

KESIMPULAN

Desain *pipeline crossing* dengan empat tumpuan (dua tumpuan utama dan dua tumpuan penunjang) berupa *concrete sleeper* dengan dimensi panjang dasar 13 m, panjang atas 1 m, lebar 1 m, dan tinggi 1.2 m untuk tumpuan utama dan 365 mm untuk tumpuan penunjang dengan jarak antartumpuan utama sebesar 11 m dan jarak tumpuan utama dengan tumpuan penunjang adalah 15 m, dapat memfasilitasi pipa untuk berpotongan dengan pipa yang telah ada, *existing pipeline* dengan kondisi aman dalam artian tegangan yang terjadi tidak melebihi nilai tegangan ijin dan jarak *gap* antarpipa pada lokasi *crossing* telah memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh DNV 1981 dan DNV OS F101, yakni 300 mm.

DAFTAR PUSTAKA

1. DNV RP F105 – *Free Spanning Pipelines*. Februari 2006
2. DNV 1981 – *Rules for Submarine Pipeline Systems*. 1981
3. Das, Braja M. 2002. *Principles of Geotechnical Engineering*. California: Brooks/Cole.

LAMPIRAN A

DAFTAR SIMBOL

SIMBOL

B_{sp}	lebar pondasi	$U_{c,100year}$	kecepatan arus dengan periode ulang 100 tahun
C_c	indeks pemampatan		
D	diameter luar total pipa	$U_{w,1year}$	kecepatan partikel dengan periode ulang 1 tahun
$D_{existingpipe}$	diameter luar total <i>existing pipe</i>		
e_o	angka pori awal, rasio pori	$V_{R,onset}^{CF}$	reduksi kecepatan onset arah tegak lurus aliran
e_p	angka pori pada akhir konsolidasi primer	$V_{R,onset}^{IL}$	reduksi kecepatan onset arah sejajar aliran
E_s	modulus elastisitas tanah		
$f_{n,CF}$	frekuensi natural arah tegak lurus aliran		
$f_{n,IL}$	frekuensi natural arah sejajar aliran		
H	tebal lapisan		
H_i	tebal sub-lapisan i		
H_{smin}	tinggi minimum tumpuan utama		
I_p	faktor pengaruh non-dimensional		
L	panjang aktual bentang bebas		
L_{sp}	panjang pondasi		
m_1	rasio panjang dan lebar pondasi		
p	penambahan tekanan vertikal pada lapisan		
p_o	tekanan efektif <i>overburden</i>		
q_p	beban yang bekerja pada pipa		
S_c	penurunan tanah akibat konsolidasi primer		
S_e	penurunan tanah elastis		
S_s	penurunan tanah akibat konsolidasi sekunder		
S_T	penurunan tanah total		
t_1, t_2	waktu tinjau		

HURUF YUNANI

$\bar{\alpha}$	rasio kecepatan aliran
γ_{CF}	faktor keamanan untuk kriteria <i>screening fatigue</i> arah tegak lurus
γ_{IL}	faktor keamanan untuk kriteria <i>screening fatigue</i> arah sejajar
$\Delta_{clearance}$	jarak minimum antarpipa
Δe	perubahan angka pori
$\Delta \sigma$	penambahan tegangan
μ_s	<i>Poisson's ratio</i> tanah
ρ	massa jenis pipa baja
ρ_s	massa jenis air laut