

DESAIN DAN ANALISIS *FATIGUE* PADA BENTANG BEBAS PIPA BAWAH LAUT DI PERAIRAN LAUT JAWA

DESIGN AND FATIGUE ANALYSIS ON FREE SPANNING PIPELINE AT THE JAVA SEA

Albertus Rianto Wibisono¹ dan Ricky Lukman Tawekal²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10 Bandung 40132

¹albertusrianto@students.itb.ac.id dan ²ricky@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Perkembangan teknologi yang signifikan di zaman modern ini menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi, salah satunya minyak bumi dan gas alam sebagai salah satu energi yang dapat diambil dari zona lepas pantai. Pipa bawah laut sebagai penyalur hasil pengeboran dasar laut perlu didesain secara tepat agar tidak terjadi kegagalan, seperti bocornya dinding pipa karena tidak kuat menahan tekanan yang dapat menyebabkan tercemarnya ekosistem sekitar. Proses desain pipa bawah laut mencakup desain ketebalan dinding baja pipa untuk menahan tekanan internal atau eksternal berlebih, mencegah propagasi tekuk pada pipa, dan menahan kombinasi pembebanan yang mengacu pada standar DNV-OS-F101. Setelah didapat nilai tebal dinding baja, dilanjutkan dengan analisis *on-bottom stability*. Analisis ini bertujuan untuk mendapatkan nilai tebal lapisan beton sebagai pemberat sehingga pipa dapat stabil secara vertikal dan lateral di dasar laut dan mengacu pada standar DNV-RP-F109. Desain dilanjutkan dengan analisis instalasi statik (tanpa memperhitungkan respon pergerakan kapal) untuk mendapatkan konfigurasi *laybarge* yang paling optimum sehingga pipa *layable* dengan berbagai jenis kapal. Kemudian dilakukan perhitungan panjang bentang bebas maksimum yang diijinkan untuk kondisi statik dan dinamik berdasarkan kriteria DNV-RP-F105. Bentang bebas yang lolos kriteria *screening fatigue* dilakukan analisis *fatigue* untuk pembuktian nilai umur *fatigue* yang diterapkan standar DNV. Analisis *fatigue* juga diiterasi sehingga didapatkan panjang bentang bebas maksimum yang masih memenuhi umur *fatigue* desainnya. Seluruh bentang bebas dicek terhadap kriteria *ultimate limit state* sehingga tidak melebihi batas kekuatan material.

Kata Kunci: Tebal dinding, lapisan beton, instalasi, bentang bebas, *fatigue*.

Abstract: The significant technology development in modern times has led an increase in energy demand, one of which is petroleum and natural gas as one of the energy that can be extracted from the offshore zone. Subsea pipelines for drilling of seabed wells need to be designed precisely to avoid failure, such as leakage of pipe wall because of not strong enough to withstand pressure that can cause contamination to surrounding ecosystem. The subsea pipeline design process including the design of wall thickness to withstand internal or external overpressure, prevent propagation buckling on pipes, and withstand combined loading that refers to DNV-OS-F101 standard. After obtaining wall thickness, continued with *on-bottom stability* analysis. This analysis aims to obtain the thickness value of the concrete coating as a ballast so the pipe can be stable vertically and laterally on the seabed and the analysis refers to DNV-RP-F109 standard. The design is continued with static installation analysis (without taking account the ship movements response) to obtain the most optimum lay barge configuration so that the pipe is layable with various type of vessels. Then continued with the calculation of the maximum allowable free span for static and dynamic conditions based on DNV-RP-F105 criteria. Free span that passed the fatigue screening criteria continued to fatigue analysis to prove the fatigue life value set by DNV standard. The fatigue analysis is also iterated to get the maximum free span that still meet the fatigue life design. All free spans are checked against the ultimate limit state criterion so as not to exceed the limits of material strength.

Key Words: Wall thickness, concrete coating, installation, free span, *fatigue*.

PENDAHULUAN

Minyak bumi dan gas alam merupakan salah satu contoh sumber energi dari zona lepas pantai yang ditransmisikan ke darat menggunakan infrastruktur pipa bawah laut. Kelebihan penggunaan jaringan pipa yaitu lebih praktis dibandingkan kapal tanker yang mahal dan kapasitas pengangkutannya yang terbatas.

Dewasa ini, desain dan konstruksi jaringan pipa yang semakin canggih diperlukan akibat peningkatan akan kebutuhan instalasi pipa di laut yang lebih dalam. Pipa yang terbentang di bawah laut akan mengalami gaya hidrodinamika (gelombang dan arus) yang bersifat siklik, sehingga dapat mengakibatkan fenomena kelelahan struktur (*fatigue*).

Oleh karena itu, dibutuhkan suatu analisis untuk menghitung kekuatan struktur pipa bawah laut dalam menahan beban siklik. Dengan demikian, dapat dihitung waktu yang dibutuhkan untuk pipa mengalami retak yang menembus dinding pipa, yang dikenal dengan umur *fatigue*.

Dalam Tugas Akhir ini, desain pipa secara keseluruhan melingkupi desain tebal dinding baja, desain tebal lapisan pemberat (beton) untuk kestabilan di dasar laut, dan analisis instalasi kondisi statik untuk menentukan kelayakan instalasi pipa di dasar laut serta mencari konfigurasi kapal penggelar yang paling optimum. Kemudian dilanjutkan dengan analisis *fatigue* pada bentang bebas yang melingkupi perhitungan bentang bebas maksimum yang diijinkan untuk kondisi statik dan dinamik serta perhitungan umur *fatigue*. Di akhir, seluruh bentang bebas yang ada dicek terhadap kriteria *ultimate limit state* (ULS).

TEORI DAN METODOLOGI

• *Wall Thickness*

Pada perhitungan tebal dinding pipa diperlukan parameter karakteristik tebal

dinding, sesuai DNV-OS-F101 diberikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Nilai Tebal Dinding Karakteristik

	Sebelum Beroperasi	Operasi
t_1	$t-t_{fab}$	$t-t_{fab}-t_{corr}$
t_2	t	$t-t_{corr}$

Sumber: DNV OS-F101. *Table 5-2*

Keterangan:

t_{fab} = Tebal toleransi fabrikasi

t_{corr} = Tebal corrosion allowance

Tebal dinding dihitung berdasarkan kriteria *internal bursting*, *system collapse*, *propagation buckling*, dan *local buckling* akibat beban kombinasi (*load-controlled conditions*) dengan persamaan batas yang dapat ditemukan pada DNV-OS-F101.

• *On-Bottom Stability*

Untuk kestabilan vertikal, agar pipa tidak mengapung, berdasarkan DNV-RP-F109, berat tercelup pipa harus memenuhi **Persamaan 1** berikut.

$$\gamma_W \cdot \frac{b}{w_s + b} = \frac{\gamma_W}{s_g} \leq 1,00 \quad 1$$

Keterangan:

γ_W = Faktor keamanan

b = Gaya apung pipa per unit panjang

w_s = Berat tercelup pipa per unit panjang

s_g = Massa jenis spesifik pipa

Sedangkan untuk ketabilan lateral, pipa dapat dikatakan memiliki kestabilan statik mutlak apabila memenuhi **Persamaan 2** dan **Persamaan 3**.

$$\gamma_W \cdot \frac{F_Y^* + \mu \cdot F_Z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0 \quad 2$$

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_Z^*}{w_s} \leq 1,0 \quad 3$$

Keterangan:

γ_{SC} = Faktor keamanan

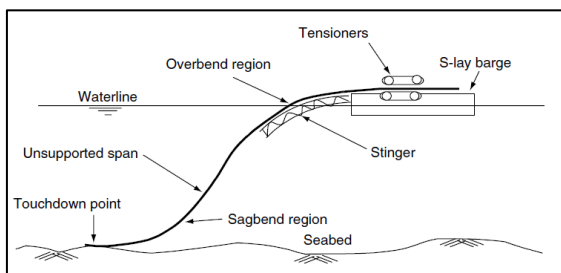
F_Y^* = Gaya hidrodinamik horizontal (*drag* dan inersia)

- F_z^* = Gaya hidrodinamik vertikal (*lift*)
- F_R = Tahanan pasif tanah
- μ = Koefisien friksi
- r_{tot} = Faktor pengurangan beban
- D = Diameter terluar pipa (mencakup semua lapisan)
- C_y^* dan C_z^* = Koefisien puncak beban horizontal dan vertikal
- U^* = *Oscillatory velocity amplitude for single design oscillation*, tegak lurus pipa
- V^* = *Steady current velocity associated with design oscillation*, tegak lurus pipa

Faktor-faktor yang dapat mengurangi gaya hidrodinamik yang bekerja pada pipa adalah sifat permeabilitas dasar laut, penetrasi pipa pada tanah, dan adanya *trench*.

• **Analisis Instalasi**

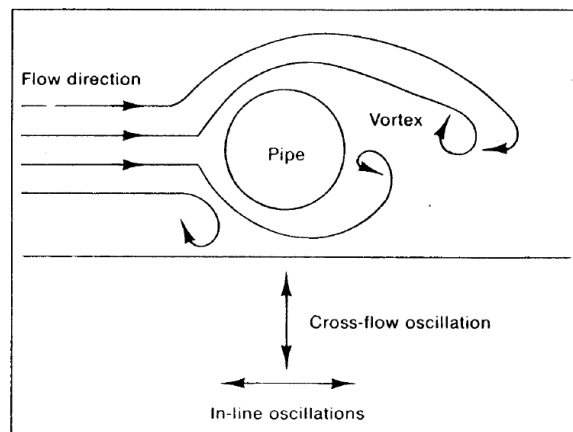
Proses instalasi pipa dapat menggunakan 2 metode, *towing* dan *laying*. *Laying* merupakan metode yang paling umum, yaitu dengan membentangkan pipa melalui *stinger* dari *lay barge*. Selama proses penggelaran, pipa oleh beratnya sendiri membentuk kurva, menimbulkan *bending stress* pada pipa. Metode *laying* terdiri dari *S-lay* (*perairan dangkal hingga dalam*), *J-lay* (*perairan menengah hingga dalam*), dan *Reel lay* (*perairan menengah hingga dalam*). Ilustrasi dari kapal penggelar *S-lay* diberikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Ilustrasi Kapal Penggelar *S-Lay*
 Sumber: Guo, Boyun, etc. 2005. *Offshore Pipeline*. Oxford. Elsevier : 130

• **Bentang Bebas**

Dasar laut yang tidak rata dapat mengakibatkan pipa terbentang secara bebas (ada bagian yang tidak tertumpu). Akibat pembebanan statik, pipa dapat mengalami defleksi yang dapat menyebabkan keruntuhan leleh. Akibat pembebanan dinamik, pipa akan mengalami osilasi/bergetar yang dapat menghasilkan keruntuhan *fatigue*. Maka dari itu, panjang bentang bebas yang terjadi harus diberi batasan panjang tertentu sehingga tidak terjadi kegagalan akibat defleksi atau osilasi yang terlalu ekstrim. Ilustrasi dari osilasi akibat *vortex* di belakang pipa disajikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2 *Vortex Induced Oscillations*
 Sumber: Mousselli, A. H. 1981. *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Oklahoma. PennWell : 49

Dalam Tugas Akhir ini, digunakan standar desain DNV-RP-F105 *Free Spanning Pipelines* sebagai acuan untuk analisis.

Bentang bebas yang ada perlu dicek terlebih dahulu dengan kriteria *screening fatigue* untuk memberi batasan frekuensi natural yang diijinkan sesuai DNV-RP-F105. Bentang yang tidak lolos *screening fatigue* perlu dilakukan analisis *fatigue* secara mendetail untuk mengecek umur *fatigue*-nya apakah kurang dari umur *fatigue* desainnya atau tidak. Apabila kurang, maka diperlukan intervensi bentang berupa mitigasi seperti penambahan struktur pendukung.

- **Analisis Fatigue**

Umur *fatigue* yang dihasilkan menggunakan metode *response model* dan *force model*. *Amplitude response models* adalah model empirik dimana respon amplitudo VIV *steady state* maksimum sebagai fungsi dari parameter hidrodinamika dan struktur dasar. Pada *response models* ini, getaran *in-line* dan *cross-flow* dihitung secara terpisah. Sedangkan *force model* dapat digunakan untuk beban akibat *vortex* maupun akibat arus dan gelombang secara langsung. *Force model* untuk VIV arah *cross-flow* biasanya tidak ada. *Force model* didasarkan pada persamaan Morison untuk beban arah *in-line*. Secara umum, kriteria *fatigue* dapat dihitung dengan **Persamaan 4**.

$$\eta \cdot T_{life} \geq T_{exposure} \quad 4$$

Keterangan:

η = Allowable fatigue damage ratio

T_{life} = Fatigue design life capacity

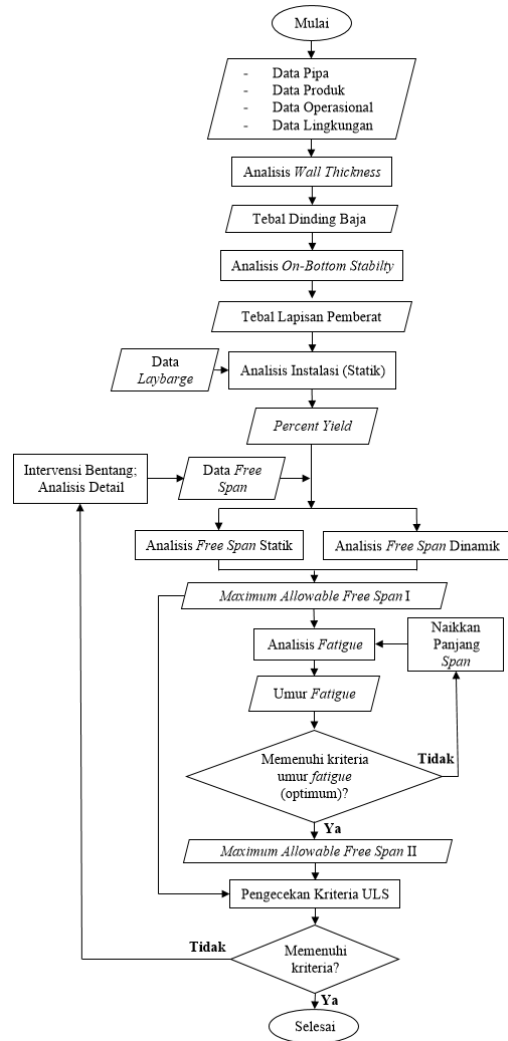
$T_{exposure}$ = Design life or load exposure time

Pengecekan *local buckling* untuk bentang bebas pipa harus sesuai dengan kriteria *combined loading-load controlled* pada DNV-OS-F101. Momen lentur lingkungan maksimum akibat VIV arah *in-line* dan *cross-flow* atau gelombang dan arus dapat ditentukan dari tegangan dinamik. Nilai tegangan lingkungan maksimum dapat ditentukan melalui persamaan yang dapat ditemukan di DNV-RP-F105. Pada arah *cross-flow*, tegangan dapat langsung dihitung dari amplitudo akibat VIV. Sedangkan pada arah *in-line*, rentang tegangan dinamik diambil maksimum sebagai 40% dari nilai tegangan gerakan CF akibat VIV.

- **Metodologi**

Untuk metodologi pengerjaan Tugas Akhir, langkah awalnya adalah desain pipa bawah laut yang mencakup analisis *wall thickness*, analisis *on-bottom stability*, dan analisis instalasi kondisi statik. Setelah didapatkan desain pipa yang optimum, dilanjutkan dengan analisis *fatigue* pada bentang bebas berupa

perhitungan *maximum allowable free span* dan umur *fatigue* pada bentang bebas. Seluruh bentang bebas dicek terhadap kriteria ULS. Metodologi pengerjaan Tugas Akhir dijelaskan secara umum dengan diagram alir pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Diagram Alir Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

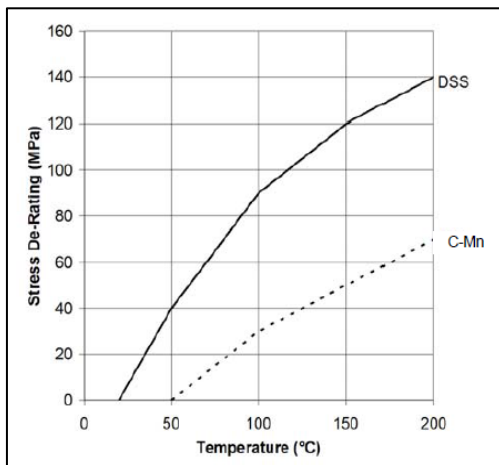
HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Wall Thickness

Analisis *wall thickness* bertujuan untuk mendapatkan nilai tebal dinding baja yang diperlukan berdasarkan standar DNV-OS-F101. Analisis dilakukan terhadap ketiga kondisi, yaitu instalasi (penggelaran), *hydrotest* (pengujian tekanan sistem), dan

operasi. Hasil akhir tebal dinding pipa harus dapat memenuhi keempat kriteria yang diberikan, yaitu *pressure containment*, *local buckling due to external overpressure (system collapse)*, *propagation buckling*, dan *local buckling due to combined loading*.

Sebelumnya perlu dilakukan koreksi terlebih dahulu terhadap properti karakteristik material untuk perhitungan tahanan. Berdasarkan DNV-OS-F101, nilai *yield stress* dan *tensile strength* dikoreksi berdasarkan dengan **Grafik 1**.



Grafik 1 Grafik de-rating Values untuk berbagai Temperatur Desain

Sumber: DNV OS-F101. *Figure 2*

Untuk perhitungan nilai tebal dinding karakteristik (tebal dinding pipa yang digunakan ke dalam perhitungan kriteria), diperlukan parameter toleransi fabrikasi yang dapat diperoleh dari Tabel 7-18 pada DNV-OS-F101. Untuk memperoleh kriteria tebal dinding, diperlukan besar tekanan internal yang berdasarkan DNV-OS-F101 dihitung menggunakan **Persamaan 5** dan **Persamaan 6** di bawah.

$$p_{li} = p_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot (h_{ref} - h_l) \quad 5$$

$$p_{lt} = p_t + \rho_t \cdot g \cdot (h_{ref} - h_l) \quad 6$$

di mana,

$$p_{inc} = p_d \times \gamma_{inc}$$

Keterangan:

$$p_{li} = \text{Local incidental pressure}$$

p_{inc} = Incidental reference pressure at the reference elevation

ρ_{cont} = Density of the relevant content of the pipeline

g = Percepatan gravitasi

h_{ref} = Elevation of the reference point (diambil elevasi referensi = 0)

h_l = Elevation of the local pressure point (diambil nilai kedalaman)

p_{lt} = Local system pressure test

p_t = System test reference pressure at the reference elevation

ρ_t = Density of the relevant test medium of the pipeline

γ_{inc} = Incidental to design pressure ratios. Berdasarkan tabel 3-1 DNV-OS-F101 diambil nilai 1,1 untuk instalasi dan operasi; 1,0 untuk *hydrotest*

Faktor resistensi material (γ_m) dan faktor resistensi kelas keamanan (γ_{SC}) dipilih dari DNV-OS-F101 sesuai dengan kelas keamanannya. Untuk kriteria *combined loading* diperlukan nilai momen tekuk dan gaya aksial desain. Pada tahap *preliminary design* ini, nilai momen desain ditentukan sebesar 0 kN-m dan gaya aksial efektif desain dihitung berdasarkan komponen gaya fungsionalnya dengan gaya aksial fungsional ditentukan sebesar 0 kN.

Hasil perhitungan tebal dinding pipa optimum untuk semua kondisi menggunakan keempat kriteria disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Hasil Tebal Dinding Pipa

Kriteria	Kondisi					
	Instalasi		Hydrotest		Operasi	
	inci	mm	inci	mm	inci	mm
<i>Bursting</i>	-	-	0,146	3,7	0,287	7,3
<i>System Collapse</i>	0,079	2	-	-	-	-
<i>Propagation</i>	0,15	3,8	0,15	3,8	0,276	7
<i>Combined Loading</i>	0,15	3,8	0,11	2,8	0,228	5,8
Tebal Dinding Terpilih	7,3 mm (0,287")					
Tebal Dinding berdasarkan API 5L	API 5L OD 6,625" thickness 0,312" (7,925 mm)					

Hasil perhitungan ini tidak menyimpulkan bahwa nilai tebal dinding yang terpilih akan selalu terjadi pada kondisi operasi atau kriteria *internal bursting*, namun harus tetap dicek terhadap kondisi dan kriteria lain karena adanya perbedaan massa jenis fluida yang dialirkan atau kondisi struktural pipa.

b. Analisis *On-Bottom Stability*

- Berat Terendam Pipa

Analisis ini dimulai dengan perhitungan berat terendam pipa per satuan panjang. Pertama dilakukan permisalan nilai tebal lapisan beton untuk kemudian diiterasi sehingga dapat dihitung berat setiap lapisan di luar atau di dalam pipa baja per satuan panjang. Lalu dilanjutkan dengan perhitungan gaya apung per satuan panjang untuk keseluruhan berat pipa, sehingga dapat dihitung nilai berat terendam pipa.

- Data Gelombang dan Arus

Analisis kestabilan dilanjutkan untuk kestabilan secara lateral, yang sangat dipengaruhi oleh gaya-gaya hidrodinamika yang terjadi di dasar laut. Untuk itu diperlukan data gelombang dan arus yang perlu ditransformasikan terlebih dahulu sesuai dengan langkah yang diberikan DNV-RP-F109.

Untuk data arus, diperlukan nilai kecepatan arus referensi, yaitu pada ketinggian di mana nilai kecepatan arus hanya sedikit bervariasi pada arah horizontal (hampir konstan). Biasanya diambil nilai kecepatan arus pada 90% kedalaman. Nilai kecepatan arus ini perlu direduksi dengan memperhitungkan adanya efek dari *bottom boundary layer* dan arah datangnya. Berdasarkan DNV-RP-F109, melalui rumus empiris, nilai kecepatan arus yang sudah direduksi tersebut perlu ditransformasikan menjadi kecepatan arus *steady* yang berhubungan dengan osilasi desain tunggal, V^* .

Data gelombang yang diperlukan berupa tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode puncak spektrum (T_p). Kedua parameter ini dapat

dipakai untuk membentuk spektrum JONSWAP sehingga kondisi laut (*sea states*) yang irregular, stasioner, dan berjangka pendek dapat digambarkan. Spektrum kecepatan partikel akibat gelombang pada dasar laut dapat diperoleh dari transformasi spektrum pada permukaan air dengan teori gelombang orde pertama. Dengan begitu dapat diperoleh nilai kecepatan aliran signifikan dan periode rata-rata *zero up-crossing* dari aliran yang beresilasi pada elevasi pipa.

Sama seperti kecepatan arus, amplitudo kecepatan osilasi tunggal desain, U^* , dan periode kecepatan osilasi tunggal desain, T^* , dapat diperoleh dari rumus empiris berdasarkan DNV-RP-F109. Semua nilai kecepatan partikel akibat gelombang perlu dikalikan dengan faktor reduksi akibat persebaran dan arah datang gelombang.

- Hasil dan Analisis

Analisis *on-bottom stability* dilakukan terhadap kondisi instalasi dan operasi saja, namun terhadap kedalaman maksimum dan minimum. Untuk *hydrotest* tidak perlu dianalisis karena data *sea-state* yang digunakan sama seperti kondisi instalasi (1-tahun periode ulang) dan adanya muatan fluida membuat berat per satuan panjang lebih besar. Maka apabila pipa pada kondisi *hydrotest* pasti lebih stabil dibanding pada kondisi instalasi. Hasil tebal lapisan beton untuk kedua kondisi dan kedalaman disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Hasil Perhitungan Tebal Lapisan Beton

Kondisi	Kedalaman	Tebal Lapisan Beton (mm)	Specific Gravity (Stabilitas Vertikal)	Safety Factor (Stabilitas Lateral)
Instalasi	Maksimum	0	1,349	6,011
	Minimum	60	1,895	1,106
Operasi	Maksimum	500	2,16	1,069
	Minimum	730	2,174	1,016

Pada tabel di atas dapat dilihat bahwa nilai lapisan beton terpilih pada kondisi operasi kedalaman minimum. Secara umum memang nilai tebal lapisan beton yang paling menentukan adalah kondisi operasi kedalaman

minimum. Hal ini dikarenakan nilai kecepatan arus dan gelombang pada kondisi operasi lebih ekstrim dibandingkan instalasi. Selain itu, gaya hidrodinamika akibat arus dan gelombang akan semakin kecil seiring bertambahnya kedalaman. Maka untuk penentuan lapisan beton sudah sewajarnya terjadi pada kondisi ketika gaya hidrodinamikanya paling besar. Berikut merupakan rangkuman gaya hidrodinamika puncak pada pipa disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Rangkuman Gaya Hidrodinamika Puncak

Kondisi	Kedalaman	Gaya Horizontal	Gaya Vertikal
		Puncak (N/m)	Puncak (N/m)
Instalasi	Maksimum	26,107	13,77
	Minimum	183,21	270,955
Operasi	Maksimum	3.447,561	5.213,473
	Minimum	7.507,808	13.301,395

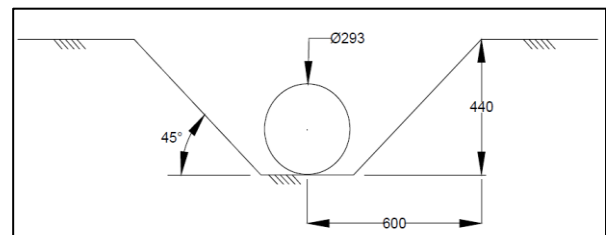
Pada Tugas Akhir ini nilai kedalaman minimum adalah 14,875 m dan kedalaman maksimum adalah 24,904 m. Perbedaan kedalaman yang hanya sebesar 10,1 m ini dapat menghasilkan perbedaan gaya hidrodinamika hingga 12 kN menggunakan perhitungan yang diberikan DNV-RP-F109. Bahkan untuk kedalaman yang sama, gaya hidrodinamika untuk kondisi instalasi dengan operasi memberikan perbedaan hingga 60 kali lipat. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perhitungan analisis *on-bottom stability* yang diberikan DNV-RP-F109 terlalu konservatif.

- Optimasi Perhitungan

Hasil akhir tebal lapisan beton sebesar 73 cm tidak aplikatif di dunia industri, membuat pipa sulit untuk digelar pada proses instalasi. Maka dari itu diputuskan untuk mengambil nilai tebal lapisan beton dari kondisi instalasi kedalaman minimum, yaitu sebesar 6 cm. Sedangkan untuk kondisi operasi, pipa dikubur secara keseluruhan. Untuk penguburan sebelumnya perlu dibuat *trenching* terlebih

dahulu di sekeliling pipa, dengan metode *post-trenching*.

Pembuatan *trenching* dilakukan dengan menentukan tebal lapisan beton di awal dan mengiterasi ketinggian *trenching* hingga didapatkan *safety factor* yang paling optimum. Kemiringan *trenching* diambil sebesar 45° sebagai nilai konservatif dan lebar *trenching* diambil 2 kali diameter total pipa. Ilustrasi desain *trenching* diberikan pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Desain *Trenching*

c. Analisis Instalasi Statik

Pada analisis instalasi, digunakan 3 macam *laybarge* yang berbeda. Hasil akhir dari analisis ini adalah untuk menentukan konfigurasi *laybarge* yang paling optimum agar pipa dapat di-*lay* menggunakan ketiga *laybarge*. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak OFFPIPE. OFFPIPE akan mengeluarkan hasil berupa tegangan yang terjadi sepanjang pipa, yang telah diolah dalam bentuk *percent yield*. Syarat *percent yield* yang harus dipenuhi untuk analisis instalasi adalah:

- Tegangan sepanjang pipa $\leq 96\%$ SMYS
- Tegangan pada daerah *overbend* $\leq 85\%$ SMYS
- Tegangan pada daerah *sagbend* $\leq 72\%$ SMYS

Perubahan yang dilakukan pada *laybarge* dan diiterasi agar menghasilkan konfigurasi yang paling optimum adalah berupa:

- Perubahan nilai tegangan (*tension*) dari tensioner kapal
- Perubahan sudut *trim* kapal
- Perubahan sudut *stinger hitch*

Apabila ketiga opsi di atas masih belum memenuhi syarat, maka baru dilakukan

perubahan koordinat *roller* dan *stinger*. Semua opsi tersebut dapat saling dikombinasikan untuk menjaga tegangan pada pipa tetap pada batas-batas yang disyaratkan.

- Analisis Hasil Iterasi

Iterasi pada analisis instalasi untuk ketiga *barge* dilakukan dengan memperkecil nilai *tension* terlebih dahulu. Dari percobaan terhadap ketiga *barge*, diketahui bahwa penurunan *tension* berbanding lurus dengan penurunan tegangan yang terjadi. Hal ini tidak mutlak berlaku untuk seluruh kasus instalasi pipa. Pada kasus ini, dikarenakan kedalaman penggelaran pipa yang sangat dangkal, maka tegangan yang diberikan *tensioner* tidak perlu terlalu besar. Namun berbeda halnya dengan kasus laut dalam, dimana tegangan sepanjang pipa harus dijaga dengan bantuan *tensioner* sehingga lekukan yang terjadi pada pipa tidak terlalu ekstrim sehingga pipa tidak mengalami keretakan.

Perubahan sudut *trim* kapal juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh sudut *trim* terhadap tegangan yang terjadi. Perubahan sudut *trim* tidak boleh terlalu ekstrim, batasnya yaitu hingga bagian *deck* kapal yang mengalami penurunan menyentuh permukaan air. Kapal yang terlalu miring juga dapat membahayakan para awak kapal di dalamnya. Maka dalam Tugas Akhir ini, sudut *trim* yang coba diiterasi hanya dalam rentang $-1^\circ \leq \theta \leq 1^\circ$.

Perubahan sudut *stinger hitch* akan mengakibatkan turun atau naiknya lengan *stinger* pada kapal penggelar. Hal ini dapat menurunkan tegangan yang terjadi pada beberapa titik kapal, namun pada suatu nilai yang terlalu ekstrim justru akan membuat tekuk yang terlalu patah pada beberapa titik sehingga terjadi peningkatan tegangan yang signifikan. Perubahan sudut *stinger hitch* ini tidak memberikan respon yang sama untuk berbagai kapal, karena perbedaan letak *working stations* yang dimiliki oleh setiap kapal yang berpengaruh pada geometri pipa.

- Hasil dan Analisis

Iterasi dilakukan pada kedalaman maksimum dan minimum menggunakan ketiga jenis *laybarge*. Pada *laybarge* A, diketahui bahwa kombinasi perubahan *tension*, sudut *hitch*, dan sudut *trim* masih belum memberikan tegangan yang memenuhi kriteria, maka dari itu perlu dilakukan perubahan koordinat *working stations*. Setelah dilakukan berbagai percobaan, akhirnya diputuskan untuk menurunkan koordinat *stinger roller* pertama sebesar 0,294 m dari posisi awalnya.

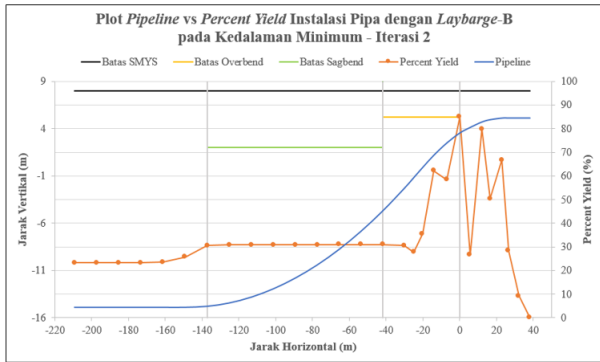
Rangkuman hasil iterasi analisis instalasi statik menggunakan ketiga *laybarge* berupa konfigurasi yang diperlukan sehingga pipa dapat digelar disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Rangkuman Konfigurasi Optimum untuk Setiap *Laybarge*

<i>Laybarge</i>	Kedalaman	Sudut <i>Trim</i> (deg)	Sudut <i>Hitch</i> (deg)	<i>Tension</i> (kN)
A	Minimum	0	10	100
	Maksimum	0	10	150
B	Minimum	0	0	350
	Maksimum	0	0	350
C	Minimum	0	10	150
	Maksimum	1	10	150

Semua kapal dengan konfigurasi seperti yang tertera di atas telah memberikan tegangan pada pipa yang telah memenuhi batas yang diberikan. Dari ketiga kapal, kapal yang paling aplikatif dan berpotensi untuk dipilih yaitu *laybarge* B, karena tidak diperlukan perubahan konfigurasi pada kedalaman yang berbeda selama pengelaran pipa berlangsung.

Contoh plot *percent yield* sepanjang pipa untuk instalasi dengan *laybarge* B pada kedalaman minimum menggunakan konfigurasi yang telah dioptimasi dapat dilihat pada **Grafik 2**.



Grafik 2 Contoh *Plot Percent Yield* Sepanjang Pipa

d. Analisis Bentang Bebas

Perhitungan bentang bebas dilakukan untuk kondisi statik dan dinamik. Tujuan dari analisis ini adalah mendapatkan nilai panjang bentang bebas maksimum yang diijinkan agar tidak terjadi kegagalan pada pipa yang terbentang bebas.

- Bentang Bebas Statik

Perhitungan bentang bebas kondisi statik dilakukan dengan mempertimbangkan berat sendiri dari struktur pipa tersebut. Momen yang terjadi pada pipa yang terbentang bebas akan menghasilkan tegangan, di mana tegangan tersebut tidak boleh melebihi batas kekuatan material pipa yang diberikan (sebesar $0,96 \times \text{SMYS}$ berdasarkan DNV-OS-F101). Perhitungan momen menggunakan persamaan momen statik yang diberikan DNV-RP-F105 dapat dilihat pada **Persamaan 7**.

$$M_{\text{Static}} = C_5 \frac{q \cdot L_{\text{eff}}^2}{\left(1 + \frac{S_{\text{eff}}}{P_{\text{cr}}}\right)} \quad 7$$

Keterangan:

C_5 = Koefisien perletakkan ujung bentang bebas, dapat dilihat pada DNV-RP-F105

q = Beban defleksi per satuan panjang (berat tercelup pipa)

L_{eff} = Panjang bentang efektif

S_{eff} = Gaya aksial efektif, untuk tahap *preliminary* diambil nilai 0 kN

P_{cr} = Beban *critical buckling*

Perhitungan bentang bebas statik dilakukan untuk ketiga kondisi. Dikarenakan pada kondisi statik gaya hidrodinamika tidak berpengaruh, maka panjang bentang bebas maksimum yang diijinkan untuk ketiga kondisi bernilai sama. Hasil perhitungan bentang bebas kondisi statik diberikan pada **Tabel 6**.

Tabel 6 Hasil Perhitungan Bentang Bebas Maksimum Ijin Kondisi Statik

	Instalasi	Hydrotest	Operasi	Satuan
<i>Maximum Allowable Free Span</i>	26	22	30	m
<i>Unity Check Ratio</i>	0,946	0,957	0,979	

Dari hasil analisis diketahui bahwa panjang bentang bebas terpilih pada kondisi *hydrotest*, yaitu sebesar 22 m, karena memiliki nilai berat per satuan panjang yang paling besar, disusul dengan kondisi instalasi dan operasi. Pada kondisi operasi, pipa dianggap terkorosi total sehingga berat satuan bajanya lebih ringan dibanding pada kondisi instalasi.

- Bentang Bebas Dinamik

Perhitungan bentang bebas kondisi dinamik menggunakan kriteria *screening fatigue* yang diberikan oleh DNV-RP-F105. Pipa pada kondisi dinamik mengalami gaya hidrodinamika yang dapat menyebabkan *vortex* di sekeliling pipa, sehingga pipa dapat berosilasi. *Screening fatigue* merupakan kriteria awal yang harus dipenuhi suatu bentang bebas. Tahap ini bertujuan untuk perhitungan kemungkinan terjadinya *fatigue* yang diakibatkan adanya osilasi pada suatu bentang bebas yang menerima beban lingkungan dan operasi tertentu.

Perhitungan kondisi dinamik dilakukan untuk ketiga kondisi dan kedua batas kedalaman. Hasil perhitungan bentang bebas maksimum yang diijinkan untuk kondisi dinamik diberikan pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Hasil Perhitungan Bentang Bebas Maksimum Ijin Kondisi Dinamik

	Instalasi		Hydrotest		Operasi	
	Maks	Min	Maks	Min	Maks	Min
Maximum Allowable Free Span (meter)	14	10	12	9	9	7
Safety Factor						
In-Line	1,046	1,029	1,047	1,042	1,147	1,005
Cross-Flow	1,834	1,946	1,827	1,922	2,61	2,405

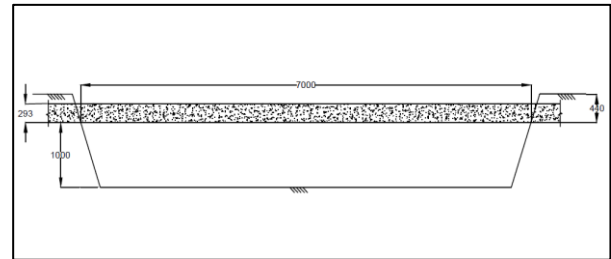
Pada kondisi dinamik, panjang bentang bebas maksimum ijin didapat pada kondisi operasi kedalaman minimum, yaitu sebesar 7 meter. Dari hasil analisis, didapat bahwa:

1. *Safety factor* paling menentukan adalah pada arah *in-line*, karena batasan frekuensinya lebih besar dibanding pada arah *cross-flow*. Parameter yang paling menentukan adalah nilai kecepatan tereduksi awal (*onset*) dari *response model* yang nilainya berbanding terbalik dengan frekuensi natural. Kecepatan tereduksi arah *in-line* ditentukan oleh parameter stabilitas yang bergantung kepada massa efektif pipa. Sedangkan untuk arah *cross-flow* nilainya sama untuk segala kondisi dan kedalaman (faktor koreksi akibat *trenching* tidak terlalu berpengaruh akibat jarak bentang bebas ke dasar laut yang diasumsikan konservatif).
2. Panjang bentang bebas ijin maksimum dibanding lurus sesuai dengan kedalaman. Hal ini dikarenakan pengaruh gaya-gaya hidrodinamika yang semakin berkurang seiring bertambahnya kedalaman, sehingga *vortex* yang terbentuk akan semakin kecil pada kedalaman yang lebih besar.
3. Kondisi yang terpilih adalah kondisi operasi dikarenakan periode ulang dari data gelombang dan arus yang digunakan sebesar 100-tahunan.

e. Analisis Fatigue

Dari perhitungan bentang bebas statik dan dinamik, dipilih panjang bentang bebas ijin maksimum sebesar 7 meter. Ilustrasi dari

bentang bebas yang terjadi dapat dilihat pada **Gambar 5** (satuan dalam mm).



Gambar 5 Ilustrasi Bentang Bebas

Analisis *fatigue* bertujuan untuk mendapatkan nilai *fatigue life* pipa. Analisis *fatigue* berdasarkan DNV-RP-F105 dilakukan terhadap bentang bebas yang tidak memenuhi kriteria *screening fatigue*, namun pada Tugas Akhir ini analisis *fatigue* juga dilakukan terhadap bentang yang telah memenuhi *screening fatigue*. Hal ini dilakukan untuk membuktikan standar DNV-RP-F105 yang menyatakan bahwa kriteria *screening fatigue* telah dikalibrasi untuk memberikan umur *fatigue* bentang bebas melebihi 50 tahun.

Perhitungan umur *fatigue* dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak *FatFree* yang dikeluarkan oleh Det Norske Veritas. Untuk penggunaan *Fatfree* diperlukan data-data pipa untuk pemodelan struktural serta data bentang dan tanah. Selain itu juga diperlukan *input* kurva S-N yang sesuai. Dikarenakan kurangnya data material pipa, maka dipakai tipe kurva yang memberikan nilai paling konservatif, yaitu F3 (*seawater with cathodic protection*). Kemudian juga diperlukan *input* data gelombang dan arus yang dilengkapi dengan probabilitas kejadian tiap arah. Untuk data ini digunakan distribusi *Weibull* dengan 3 parameter.

Analisis *fatigue* hanya dilakukan untuk kondisi operasi. Hasil dari analisis *fatigue* untuk bentang bebas 7 meter (lolos *screening fatigue*) diberikan pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Hasil Analisis *Fatigue* untuk Bentang 7 meter

Panjang Bentang Bebas (m)	Kedalaman	Umur <i>Fatigue</i> (tahun)			
		<i>In-Line (Response Model)</i>	<i>Cross-Flow</i>	<i>In-Line (Force Model)</i>	<i>In-Line (Combined)</i>
7	Minimum	1.000.705	1.000.705	13.320	13.288
	Maksimum	1.000.705	1.000.705	38.256	38.252

Dari tabel di atas didapatkan bahwa bentang bebas ijin maksimum, dengan panjang 7 meter, memiliki nilai *fatigue life* untuk semua kondisi dan kedua kedalaman lebih besar dari 50 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa kriteria *screening fatigue* yang dikeluarkan oleh DNV-RP-F105 telah benar memberikan umur *fatigue* lebih dari 50 tahun.

Analisis *fatigue* kembali dilakukan dengan iterasi setiap 1 meter untuk bentang bebas dengan nilai di atas bentang bebas ijin maksimum hingga didapatkan nilai umur *fatigue* yang kurang dari umur desainnya (20 tahun). Hasil iterasi perhitungan umur *fatigue* disajikan pada **Tabel 9**.

Tabel 9 Hasil Iterasi Panjang Bentang untuk Optimasi Umur *Fatigue*

Panjang Bentang Bebas (m)	Kedalaman	Umur <i>Fatigue</i> (tahun)			
		<i>In-Line (Response Model)</i>	<i>Cross-Flow</i>	<i>In-Line (Force Model)</i>	<i>In-Line (Combined)</i>
14	Minimum	1.171	129	837	509
	Maksimum	794.799	313.399	2.495	2.495
15	Minimum	432	48	610	268
	Maksimum	271.883	42.567	1.821	1.815
16	Minimum	80	7	310	68
	Maksimum	52.266	6.383	1.348	1.332

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa pada bentang bebas dengan panjang 16 meter terdapat nilai umur *fatigue* yang tidak memenuhi, yaitu sebesar 7 tahun, pada kedalaman minimum dan arah osilasi *cross-flow*. Dengan demikian dapat disimpulkan batas panjang bentang bebas yang masih memenuhi kriteria umur layannya adalah sebesar **15 meter**.

f. *Ultimate Limit State*

Analisis *ultimate limit state* bertujuan untuk mengecek kapasitas kekuatan material pipa pada suatu bentang bebas. Analisis ini dilakukan berdasarkan kriteria *combined loading* pada DNV-OS-F101 seperti pada perhitungan ketebalan dinding pipa sebelumnya, namun terdapat perbedaan perhitungan parameter untuk nilai beban yang bekerja pada pipa, yaitu momen dan gaya aksial efektif desain. Untuk momen desain ditentukan berdasarkan nilai terbesar antara *bending moment* untuk kondisi statik dan dinamik yang ditetapkan berdasarkan DNV-RP-F105. Untuk gaya aksial desain menggunakan rumus gaya aksial efektif dengan asumsi bentang bebas pipa terkekang total pada kedua ujungnya.

Analisis *ultimate limit state* berdasarkan metodologi yang diberikan DNV-RP-F105 dilakukan terhadap bentang yang telah lolos *screening fatigue* maupun bentang yang tidak lolos *screening fatigue* namun memiliki umur *fatigue* yang memenuhi. Maka dari itu, pengecekan ULS dilakukan terhadap bentang bebas dengan panjang 7 meter dan 15 meter. Hasil pengecekan ULS berupa nilai ruas kiri dari kriteria *combined loading* diberikan pada **Tabel 10**.

Tabel 10 Hasil Pengecekan ULS untuk Semua Bentang

Panjang Span (m)	Kriteria <i>Combined Loading</i> (Nilai ≤ 1)				Keterangan
	Kondisi	Kedalaman	Arah		
			<i>In-Line</i>	<i>Cross-Flow</i>	
7	Instalasi	Minimum	0,00089	0,00080	OK
		Maksimum	0,00127	0,00119	OK
	<i>Hydrotest</i>	Minimum	0,05704	0,05618	OK
		Maksimum	0,05904	0,05788	OK
	Operasi	Minimum	0,70027	0,69501	OK
		Maksimum	0,69106	0,68511	OK
15	Instalasi	Minimum	0,00509	0,00477	OK
		Maksimum	0,00542	0,00510	OK
	<i>Hydrotest</i>	Minimum	0,08184	0,07948	OK
		Maksimum	0,09130	0,08781	OK
	Operasi	Minimum	0,83008	0,81945	OK
		Maksimum	0,83707	0,82459	OK

Untuk kedua bentang bebas, sebagai batas panjang maksimum yang diijinkan, pada semua kondisi dan kedalaman telah memenuhi kriteria ULS. Maka, dapat dikatakan bahwa kedua bentang bebas aman, sehingga tidak diperlukan mitigasi tambahan untuk bentang bebas tersebut. Dengan demikian, analisis *fatigue* pada bentang bebas telah selesai dilakukan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pemodelan dan analisis yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil desain tebal dinding baja pipa berdasarkan standar DNV-OS-F101 yang memenuhi kriteria tekanan internal berlebih, tekanan eksternal berlebih, *local buckling*, dan *propagation buckling* menggunakan API 5L 2000 adalah sebesar 0,312 in (7,925 mm).
2. Hasil desain tebal lapisan pemberat beton berdasarkan standar DNV-RP-F109 untuk menjaga kestabilan vertikal dan horizontal di dasar laut adalah sebesar 6 cm dan diperlukan penguburan sepanjang pipa dengan metode *post-trenching*. Tinggi *trenching* adalah 44 cm, sudut kemiringan 45 derajat, dan lebar *trenching* 60 cm.
3. Hasil analisis instalasi statik membuktikan bahwa ketiga pipa *layable* menggunakan:
 - *Laybarge A*, diperlukan penurunan elevasi stinger roller pertama sebesar 0,294 m, dengan konfigurasi:
 - Kedalaman minimum: sudut *trim* 0°, sudut *hitch* 10°, *tension* 100 kN
 - Kedalaman maksimum: sudut *trim* 0°, sudut *hitch* 10°, *tension* 150 kN
 - *Laybarge B*, dengan konfigurasi:
 - Kedalaman minimum: sudut *trim* 0°, sudut *hitch* 0°, *tension* 350 kN
 - Kedalaman maksimum: sudut *trim* 0°, sudut *hitch* 0°, *tension* 350 kN
 - *Laybarge C*, dengan konfigurasi:
 - Kedalaman minimum: sudut *trim* 0°, sudut *hitch* 10°, *tension* 150 kN

- Kedalaman maksimum: sudut *trim* 1°, sudut *hitch* 10°, *tension* 150 kN
4. Hasil perhitungan bentang bebas kondisi statik berdasarkan DNV-RP-F105 didapatkan panjang bentang bebas maksimum yang diijinkan adalah 22 meter. Sedangkan untuk kondisi dinamik menggunakan kriteria *screening fatigue* berdasarkan DNV-RP-F105 didapatkan panjang bentang bebas maksimum yang diijinkan sebesar 7 meter. Dengan demikian dipilih nilai bentang bebas ijin maksimum adalah 7 meter.
 5. Hasil analisis *fatigue* untuk bentang bebas yang memenuhi kriteria *screening fatigue* telah benar didapatkan nilai umur *fatigue* melebihi 50 tahun, sesuai dengan DNV-RP-F105.
 6. Hasil analisis *fatigue* untuk bentang bebas yang tidak memenuhi kriteria *screening fatigue* didapatkan panjang bentang bebas maksimum yang masih memenuhi umur *fatigue* desain adalah sebesar 15 meter.
 7. Semua bentang yang memenuhi *screening fatigue* maupun yang tidak memenuhi (namun lolos analisis *fatigue*) memenuhi kriteria ULS karena nilai rasio interaksi momen, gaya aksial, dan kapasitas tekanan kurang dari 1.

Adapun saran bagi penelitian pada Tugas Akhir ini agar mencapai hasil yang lebih komprehensif adalah sebagai berikut.

1. Analisis *on-bottom stability* dapat dilakukan menggunakan standar yang berbeda sebagai perbandingan, sehingga tidak memberikan hasil yang terlalu konservatif.
2. Analisis *on-bottom stability* yang menggunakan standar DNV-RP-F109 dapat dicoba menggunakan metode lain.
3. Sebaiknya dilakukan perhitungan mandiri untuk umur *fatigue* untuk pembuktian nilai yang dikeluarkan dari perangkat lunak *Fatfree*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bai, Y. dan Bai, Q. (2005) : *Subsea Pipelines and Risers*. Oxford: Elsevier.
- Det Norsk Veritas (2006) : DNV RP F105 *Free Spanning Pipelines*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S.
- Det Norsk Veritas (2007) : DNV OS F101 *Submarine Pipeline Systems*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S.
- Det Norsk Veritas (2010) : DNV RP F109 *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*. Oslo: Veritas Offshore Technology and Services A/S.
- Dwianto, M.I. (2014) : *Desain dan Analisis Fatigue pada Bentang Bebas Pipa Bawah Laut*. Tugas Akhir. Tidak Diterbitkan. Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Guo, B., Song, S., Chacko, J., Ghalambor, A. (2005) : *Offshore Pipelines*. Oxford: Elsevier.
- Lee, J. (2007) : *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*.
- Lumbantoruan, P. (2015) : *Analisis Instalasi Export Pipeline dengan Metode S-Lay di Laut Jawa dengan acuan DNV OS-F101*. Tugas Akhir. Tidak Diterbitkan. Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Mousselli, A. H. (1981) : *Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods*. Oklahoma: PennWell Books.
- Tawekal, R.L. (2017) : *KL4221 Bangunan Lepas Pantai II*. Diktat Kuliah. Bandung: Penertbit ITB.