

DESAIN DAN ANALISIS CROSSING PIPA BAWAH LAUT

SUBSEA PIPELINE DESIGN AND CROSSING ANALYSIS

Irene Gloriani Putri¹ dan Ricky Lukman Tawekal²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10 Bandung 40132

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

Abstrak: Pemilihan rute pipa bawah laut harus memiliki banyak pertimbangan. Salah satunya adalah menghindari terjadinya persilangan dengan pipa eksisting yang telah terpasang. Seiring dengan bertambahnya kebutuhan minyak dan gas bumi, persilangan pipa bawah laut baru dengan eksisting tidak terhindarkan. Pipa diharapkan tidak mengalami keretakan, korosi, dan kelelahan saat berada di bawah laut. Proses desain pipa bawah laut mengacu pada beberapa standar desain. Proses yang dilakukan antara lain menentukan tebal dinding pipa, analisis kestabilan, analisis instalasi, dan analisis bentang bebas. Tebal dinding pipa ditentukan berdasarkan empat kriteria yang mengacu pada standar desain DNV-OS-F101. Nilai terbesar yang diperoleh menjadi tebal dinding desain agar pipa terhindar dari korosi internal. Analisis kestabilan pipa akan menentukan tebal lapisan beton. Lapisan tersebut dapat membantu pipa agar tetap stabil di bawah laut. Analisis kestabilan pipa mengacu kepada standar desain DNV-RP-F109. Selain itu, spesifikasi *lay barge* untuk menginstalasi pipa dapat ditentukan dari analisis instalasi. Desain dilanjutkan dengan analisis bentang bebas yang mengacu pada DNV-RP-F105. Dari analisis ini akan diperoleh panjang bentang bebas yang diizinkan. Seluruh proses desain dilakukan dalam tiga kondisi yaitu instalasi, hidrotetes, dan operasi. Pada Tugas Akhir ini, panjang bentang bebas yang diperoleh sebesar 7.5 m dan nilai ini digunakan untuk analisis *crossing*. Analisis ini dipengaruhi juga oleh tinggi struktur pendukung. Tegangan dari analisis *crossing* diperiksa agar memenuhi dari tegangan yang diizinkan. Dirancang dua pemodelan yaitu empat struktur *concrete mattress* dengan satu struktur *concrete sleeper* dan tujuh struktur *concrete sleeper*. Kedua pemodelan tersebut telah memenuhi syarat.

Kata Kunci: analisis kestabilan, bentang bebas, *crossing*, pipa bawah laut, tebal dinding.

Abstract: The selection of subsea pipeline must have many considerations. One of it is to avoid crossing with existing pipeline which has already installed. Along with the increasing demand of oil and natural gas, the crossing of new and existing pipeline is inevitable. Pipeline is expected not to have crack, corrosion, and fatigue when it is installed on seabed. The design process of subsea pipeline refers to several design standards. The undertaken process is pipeline's wall thickness, on bottom stability, installation analysis, and free span analysis. Wall thickness is determined by four criteria based on DNV-OS-F101 design standard. The highest number obtained becomes the wall thickness to prevent pipeline from internal corrosion. On-bottom stability will determine concrete coating thickness. This coating can help pipeline to remain stable on seabed. On-bottom stability refers to DNV-RP-F109. Furthermore, lay barge specification for pipe installation can be determined from installation analysis. Design is continued with free span analysis which refers to DNV-RP-F105. From this analysis will be obtained the allowed free span length. The entire design process is carried out under three conditions: installation, hydrotetest, operation. In this thesis, the obtained free span length is 7.5 m and this value is used for crossing analysis. This analysis is also affected by the height of support structure. The stress obtained from crossing analysis will be checked to fulfill the allowed stress. Two models are designed which are four concrete mattress structures with one concrete sleeper structure and seven concrete sleeper structures. Both of these models have met the allowable stress.

Key Words: crossing, free span, on-bottom stability, pipeline, wall thickness.

PENDAHULUAN

Dalam satu tahun, penduduk Indonesia bertambah sekitar empat juta jiwa. Dari jumlah penduduk yang semakin lama meningkat pesat, kebutuhan untuk menggunakan sumber daya mineral semakin banyak. Sumber daya mineral yang dimaksud merupakan minyak dan gas bumi. Dalam kehidupan sehari – hari minyak dan gas bumi dibutuhkan untuk bahan bakar kendaraan, keperluan dapur, dan industri kimia. Hal tersebut memicu kegiatan eksplorasi dan eksploitasi sumber daya mineral di wilayah perairan Indonesia, khususnya di laut lepas, semakin gencar dilakukan.

Kegiatan eksplorasi dan eksploitasi migas tidak luput dari infrastruktur penunjang. Menurut Jaeyoung Lee (2007), infrastruktur penunjang kegiatan migas membutuhkan 4 elemen yaitu sistem *subsea*, sistem *flowline/pipeline/riser*, struktur tetap/terapung, dan *topside processing system*. Sistem *pipeline* atau pipa bawah laut merupakan struktur penyalur hasil eksploitasi migas dari tempat asal ke tempat yang akan dituju.

Salah satu komponen penting dalam merancang (*desain*) *pipeline* adalah menentukan rute pipa bawah laut. Seiring dengan bertambahnya zaman, kegiatan eksplorasi dan eksploitasi migas semakin banyak dilakukan sehingga sudah banyak struktur pipa bawah laut yang terpasang di dasar laut. Maka ketika ada sebuah struktur baru yang dipasang untuk memulai kegiatan eksplorasi dan eksploitasi, rute pipa bawah laut dirancang sedemikian rupa agar dapat terpasang dengan aman dan dengan biaya yang ekonomis. Salah satu caranya adalah dengan *crossing*, yaitu *pipeline* baru terpasang terpasang menyilang di atas *pipeline* lama yang dibantu dengan struktur pendukung. Oleh karena itu, penulis ingin merancang sebuah pipa bawah laut yang mengalami persilangan (*crossing*) dengan pipa eksisting.

TEORI DAN METODOLOGI

a. Teori

Perancangan pipa bawah laut dilakukan dengan proses matematis yang disesuaikan dengan standar internasional. Proses desain dilakukan dalam tiga kondisi yaitu instalasi, hidrotas, dan operasi. Kondisi instalasi adalah kondisi saat pipa sedang tidak dialiri fluida. Kondisi hidrotas adalah kondisi saat pipa sedang diuji dengan fluida berupa air laut. *Metoccean data* yang digunakan pada proses perhitungan untuk kondisi instalasi dan hidrotas adalah data periode ulang 1 tahun. Sementara itu, kondisi operasi adalah kondisi saat pipa telah dialiri fluida yang diinginkan dan pada proses perhitungannya menggunakan *metoccean data* 100 tahun.

Langkah awal dalam proses desain pipa bawah laut adalah menentukan rute. *Rule of thumb* pemilihan rute pipa bawah laut adalah: memilih rute paling aman, paling mudah untuk menginstalasi pipa, paling pendek dan ideal, dan memiliki biaya paling sedikit.

Pada tugas akhir ini, proses desain diawali dengan menentukan tebal dinding pipa bawah laut. Ketebalan ini perlu dirancang untuk mencegah terjadinya kegagalan pipa. Menurut DNV-OS-F101, ketebalan dinding pipa bawah laut ditentukan dengan empat kriteria yaitu *internal pressure containment*, *Local buckling – external pressure collapse*, *local buckling – combined loading*, dan *propagation buckling*.

Pipa dirancang agar kuat menahan *hoop stress* terhadap tekanan internal. Maka kriteria *internal pressure containment* harus terpenuhi seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$P_{tx} - P_e \leq \frac{P_b(t_1)}{\gamma_{sc} \cdot \gamma_m} \quad 1$$

Apabila pipa tidak memenuhi persamaan tersebut, maka pipa dianggap gagal. Contoh nyata bentuk kegagalan tersebut ialah terjadinya kebocoran dan retak pada pipa.

Kriteria *local buckling* akibat *external pressure collapse* mempertimbangkan tekanan

eksternal yang lebih besar dari tekanan internal. Selisih dari kedua tekanan tersebut dapat menyebabkan pipa berdeformasi sehingga mengalami keruntuhan. Maka pada kriteria ini pipa harus memenuhi Persamaan 2.

$$p_e - p_{min} \leq \frac{p_c(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad 2$$

Local buckling juga dapat diakibatkan kombinasi beban atau *combined loading*. Beban yang dimaksud adalah momen tekuk, gaya aksial efektif, tekanan internal berlebih, dan tekanan eksternal berlebih. Apabila beban tidak mampu menahan seluruh beban tersebut maka beban akan menjadi penyok. Kriteria ini dibagi menjadi dua kondisi, namun pada tugas akhir ini yang digunakan adalah kondisi *Load Controlled* (LC). Kondisi LC dibagi dua yaitu tekanan internal berlebih seperti Persamaan 3 dan tekanan eksternal berlebih seperti Persamaan 4.

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2) \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}} \right)^2 \leq 1 \quad 3$$

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad 4$$

Kriteria terakhir yang ditinjau pada penentuan tebal dinding pipa adalah *propagation buckling*. Kegagalan yang dapat terjadi adalah deformasi yang menyebar atau merambat di suatu bagian pipa. Syarat dari kriteria ini dinyatakan pada Persamaan 5.

$$p_e < \frac{p_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad 5$$

Selanjutnya ditinjau analisis kestabilan pipa bawah laut. Pipa akan menerima beban akibat gelombang dan arus di dasar laut. Beban akibat gelombang dan arus tersebut adalah beban akibat gaya hidrodinamika yang terdiri dari gaya angkat (*lift force*), gaya seret (*drag force*), dan gaya inersia. Dari arah yang berlawanan dari gaya hidrodinamika, kestabilan pipa juga dipengaruhi oleh gaya gesek tanah terhadap pipa. Analisis kestabilan

dibagi menjadi dua yaitu vertikal dan lateral dengan hanya meninjau kondisi instalasi dan operasi.

Kestabilan vertikal mempertimbangkan aspek berat tenggelam pipa bawah laut dan gaya angkat (*buoyancy*) pipa. Berat total yang diperhitungkan berasal dari berat baja, berat lapisan pelidung, korosi, berat lapisan beton, dan berat lapisan lainnya. Berat lapisan beton akan diiterasi sampai memenuhi kriteria *on-bottom stability*. Pipa dikatakan stabil dalam arah vertikal apabila memenuhi Persamaan 6.

$$\frac{\gamma_w}{\frac{W_s + B}{B}} \leq 1 \quad 6$$

γ_w merupakan faktor keamanan. biasanya diambil nilai 1.1.

Analisis kestabilan lateral didasarkan pada persamaan statik dari gaya tahanan atau hambatan (*resistance*) melawan respon gerakan pipa akibat gaya hidrodinamika. Analisis ini harus memenuhi Persamaan 7 dan 8.

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_y^* + \mu \cdot F_z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1.0 \quad 7$$

$$\gamma_{SC} \cdot \frac{F_z^*}{w_s} \leq 1.0 \quad 8$$

Menurut DNV-RP-F109, koefisien gesek pada tanah lempung sebesar 0.2 sementara untuk tanah pasir dan batuan sebesar 0.6. Perhitungan gaya hidrodinamika juga ditentukan sendiri oleh standar desain ini seperti pada Persamaan 9 dan 10.

$$F_y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D \cdot C_y^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad 9$$

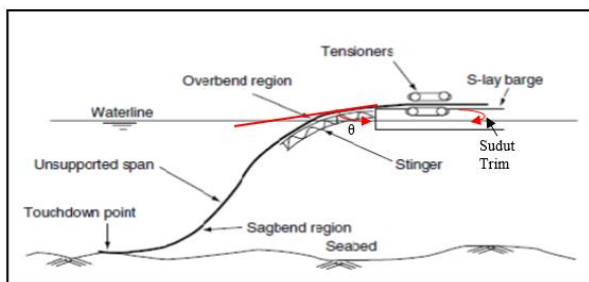
$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D \cdot C_z^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad 10$$

Faktor Keamanan ditentukan menurut jenis tanah dan tingkat keamanannya. Hal ini ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Faktor Keamanan On-Bottom Stability

	Rendah	Sedang	Tinggi
<i>Sand and Rock</i>	0.98	1.32	1.67
<i>Clay</i>	1	1.4	1.83

Selanjutnya adalah analisis instalasi. Terdapat beberapa metode instalasi namun pada tugas akhir ini yang digunakan adalah metode S-lay. Konfigurasi *barge* yang digunakan mempengaruhi bentuk pipa pada metode S-lay. Konfigurasi yang dimaksud adalah tegangan *tensioner*, sudut trim *barge*, dan sudut *stinger hitch* atau sudut antara posisi *stinger* awal dengan posisi akhirnya. Parameter yang diperhatikan pada analisis ini adalah tegangan pada *overbend* dan *sagbend* pipa. Ilustrasi bagian – bagian kapal dapat dilihat pada **Gambar 1**.



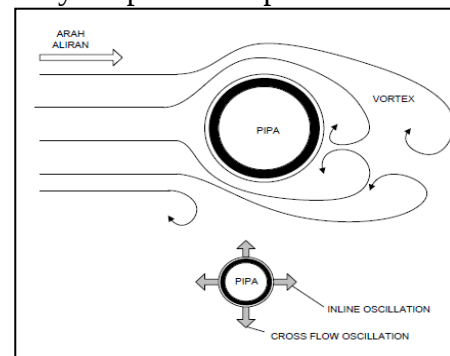
Gambar 1 Ilustrasi Metode Instalasi S-Lay

Daerah *overbend* memanjang dari pipa melewati *stern* kapal lalu turun ke *stinger* sampai dengan titik dimana pipa tidak lagi bertumpu pada *stinger*. Daerah *sagbend* memanjang dari *inflection point* sampai dengan titik *touchdown*. Tegangan pada kedua daerah tersebut harus lebih kecil daripada tegangan *yield* yang diizinkan. Pada daerah *overbend* tegangan *yield* yang diizinkan sebesar 85% sementara pada daerah *sagbend* sebesar 72%. Selain itu syarat pipa agar dapat diinstalasi dengan baik adalah memiliki tegangan di bawah 96% dari SMYS.

Bentang bebas atau *free span* adalah suatu keadaan dimana pipa tidak tertopang di dasar laut. Penyebab adanya bentang bebas adalah

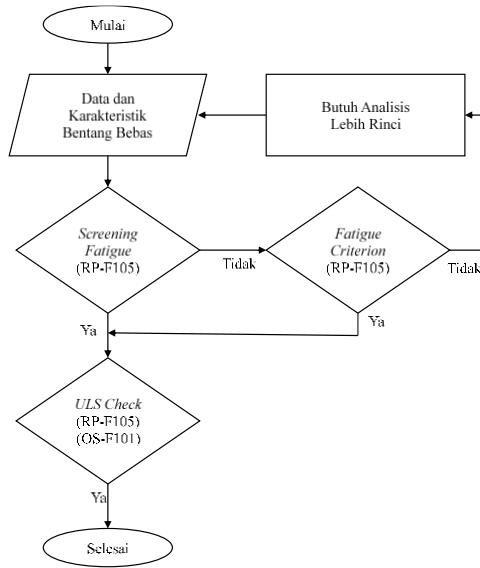
kontur di dasar laut yang tidak rata, terjadinya *scouring* di dasar laut, serta *crossing* yang terjadi dengan pipa bawah laut eksisting. Agar pipa bawah laut tidak mengalami kegagalan, panjang maksimum bentang bebas perlu diketahui.

Pipa yang memiliki bentang bebas tertentu dapat mengalami osilasi akibat VIV (*Vortex Induced Vibrations*). Osilasi terjadi dalam dua arah yaitu *in-line* (sejajar aliran fluida) dan *cross-flow* (tegak lurus arah aliran fluida). Ilustrasinya dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Fenomena Terbentuknya Vortex (Sumber: Materi Perkuliahan KL4221 Pipa Bawah Laut)

Analisis bentang bebas terbagi menjadi analisis statik dan dinamik. Keduanya mengacu pada DNV-RP-F105. Analisis dinamik meliputi tiga kriteria yang dijalani seperti **Gambar 3**.



Gambar 3 Diagram Alir Analisis Bentang Bebas Dinamik

(Sumber: DNV-RP-F105. Halaman 14)

Pada kriteria *screening fatigue*, ukuran bentang bebas diperoleh dari hubungan antara frekuensi natural pipa dengan frekuensi VIV. Hubungan ini dapat dilihat dari Persamaan 11 untuk arah *in-line* dan Persamaan 12 untuk arah *cross-flow*.

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100tahun} + U_{w,1tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \quad 11$$

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100tahun} + U_{w,1tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \quad 12$$

Frekuensi natural pipa dapat dihitung menggunakan Persamaan 13.

$$f_n = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{EI}{m_e L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right)} \quad 13$$

Apabila bentang bebas yang ada pada kondisi aktual lebih kecil dari yang diizinkan, maka umur *fatigue* pipa harus dihitung. Umur desain pipa harus lebih besar dari umur *fatigue*. Kriteria analisis ini dapat dilihat pada Persamaan 14.

$$\eta \cdot T_{life} \geq T_{exposure} \quad 14$$

Dari kriteria *screening fatigue* maupun analisis *fatigue*, keduanya dilanjutkan ke kriteria ULS (*Ultimate Limit State*). Kriteria ini

mengombinasikan acuan DNV-RP-F105 dan DNV-OS-F101. Syarat terpenuhinya kriteria ini berasal dari Persamaan 3 dan 4 dengan momen bending serta tegangan aksial efektif diperoleh dari kriteria *screening fatigue*.

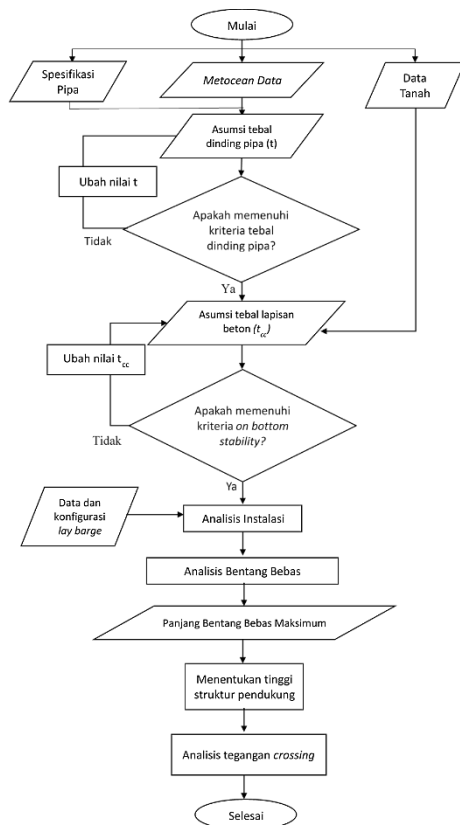
Selain dinamik, ada juga analisis statik. Analisis ini memperhitungkan berat dari pipa itu sendiri. Panjang bentang bebas ditentukan dari hasil iterasi untuk Persamaan 15.

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} < \sigma_{all} \quad 15$$

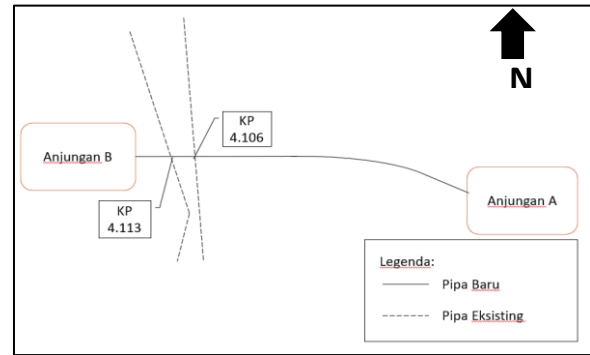
Setelah pipa selesai di desain, selanjutnya dilakukan analisis *crossing*. Ketentuan *crossing* diatur di dalam DNV-OS-F101 Section 5B. Disebutkan bahwa jarak minimum antara pipa baru dengan pipa eksisting sebesar 300 mm. Selain itu sudut antara pipa yang *crossing* dengan pipa eksisting tidak boleh lebih kecil dari 30°. Sudut *crossing* yang terlalu kecil dapat menyebabkan pipa bertumpu langsung kepada pipa eksisting.

Metodologi

Langkah awal pengerjaan Tugas Akhir ini adalah mendesain tebal dinding pipa bawah laut. Selanjutnya dilakukan analisis kestabilan pipa untuk memperoleh tebal lapisan beton. Dari kedua perhitungan tersebut diperoleh struktur pipa final. Analisis dilanjutkan ke analisis instalasi untuk memperoleh konfigurasi *lay barge* yang sesuai dengan karakteristik pipa. Kemudian dilakukan analisis bentang bebas untuk mengetahui bentang bebas yang diizinkan. Setelah seluruh data telah diperoleh, analisis *crossing* dimulai dengan menentukan tinggi struktur pendukung kemudian menganalisis tegangan yang terjadi. Pengerjaan Tugas Akhir dilakukan dengan mengikuti metodologi yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Metodologi Tugas Akhir



Gambar 5 Ilustrasi Proyek untuk Tugas Akhir

1. Penentuan Tebal Dinding Pipa

Tebal dinding pipa ditentukan dari empat kriteria yang telah disebutkan. Pada kriteria *internal pressure containment* kondisi instalasi tidak ditinjau karena pada kondisi ini pipa belum dialiri oleh fluida. Sebaliknya, kriteria *local buckling – external pressure collapse* hanya meninjau kondisi instalasi karena pada kondisi ini tekanan eksternal lebih besar daripada tekanan internal pipa. Hasil dari perhitungan menurut DNV-RP-F101 dapat dilihat dari **Tabel 2**.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Tebal Dinding Pipa

Kriteria \ Kondisi	Instalasi	Hidrotess	Operasi
<i>Internal Pressure Containment</i>	-	2.25	5.5
<i>Local Buckling – External Pressure Collapse</i>	2.8	-	-
<i>Local Buckling – Combined Loading</i>	6	1.5	4.5
<i>Propagation buckling</i>	3.8	3.8	7.2
Tebal Dinding Terpilih	7.2 mm		
Design Wall Thickness According to API 5L	API 50 (X52) OD 6.625 inch Wall Thickness 0.312 inch atau 7.9 mm		

Tebal dinding pipa ditentukan dari kriteria *propagation buckling* kondisi operasi sebesar 7.2 mm. Angka tersebut dibulatkan ke atas dan menurut API 5L *Specification for Line Pipe*, tebal masuk ke dalam 0.312 inch atau 7.9 mm.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data tugas akhir ini menggunakan data dari proyek pembangunan pipa bawah laut yang akan menyalurkan hasil produksi dari anjungan lepas pantai A menuju anjungan lepas pantai B. Pipa penyalur sepanjang 4.5 km tersebut memiliki diameter sebesar 6.625 inch. Rute pipa bawah laut ini harus melewati atau menyilang (*crossing*) dengan dua pipa eksisting. Persilangan tersebut terjadi di KP (Kilometer Point) 4.106 dan 4.113 dimana KP 0 berada pada anjungan A dan KP 4.5 berada di anjungan B. Gambaran proyek ini diilustrasikan pada **Gambar 5**.

2. Analisis Kestabilan Pipa

Dari analisis ini dapat diperoleh tebal lapisan beton yang dapat menambah stabilitas pipa di dasar laut. Analisis ini dilakukan dengan acuan DNV-RP-F109 dan dibagi menjadi dua, yaitu kestabilan vertikal dan kestabilan lateral.

a. Kestabilan Vertikal

Tebal lapisan beton dapat mengubah nilai berat tenggelam pipa. Parameter terpenuhinya analisis ini telah ditunjukkan pada Persamaan 6. Hasil analisis kestabilan vertikal dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Hasil Analisis Kestabilan Vertikal

Kedalaman	Kondisi	Tebal Lapisan Beton (mm)	Berat Tenggelam Pipa (kg/m)	Buoyancy (kg/m)	UC
Maks.	Instalasi	0	9.563	25.586	0.801
	Operasi	50	87.902	62.339	0.456
Min.	Instalasi	0	9.563	25.586	0.801
	Operasi	85	162.692	97.647	0.413

Semakin tebal dinding pipa, maka pipa akan semakin stabil. Semakin tebal lapisan beton maka pipa akan semakin stabil secara vertikal karena mampu menahan gaya angkat akibat pipa itu sendiri. Bahkan tanpa adanya lapisan beton, pipa telah stabil.

b. Kestabilan Lateral

Analisis tidak hanya harus memenuhi kestabilan vertikal, tapi juga kestabilan lateral. Pipa bawah laut harus dapat menahan gaya hidrodinamika yang ada dibantu dengan gaya gesek antara pipa dengan tanah. Pada tugas akhir ini, jenis tanah pada lokasi tinjauan proyek adalah tanah lempung. Maka koefisien gesek tanah (μ) sebesar 0.2 dan faktor reduksi akibat tanah *permeable* sebesar 1.

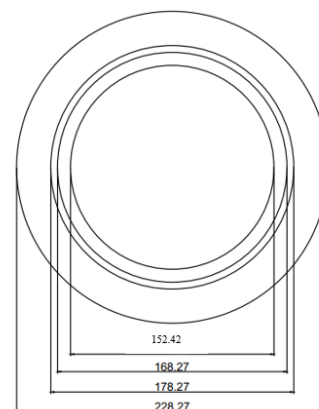
Perolehan tebal lapisan beton terbesar adalah 86 mm dari kondisi operasi kedalaman minimum. Lapisan beton yang sangat tebal ini baru dapat melawan gaya hidrodinamika yang ada. Dari perhitungan, kecepatan partikel

gelombang pada kondisi operasi sebesar 0.619 m/s dan kecepatan arusnya sebesar 0.468 m/s. Gaya gesek pipa dengan tanah pun tidak banyak membantu pipa menjaga kestabilannya karena koefisiennya yang sangat kecil. Selain itu, kriteria analisis kestabilan lateral dipengaruhi oleh *peak load coefficient* seperti pada **Tabel 4**. Banyak dari nilai koefisien ini bernilai lebih dari satu sehingga parameter gaya hidrodinamika yang harus dilawan oleh pipa bertambah besar. Sehingga lapisan beton pipa juga bertambah tebal.

Tabel 4 Peak Load Coefficient
(Sumber: DNV-RP-F109. Halaman 18)

C_r^*		K^*										
		2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	≥ 140
M^*	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52	1.30
	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33	1.22
	0.2	9.02	5.00	3.15	2.30	1.85	1.58	1.42	1.33	1.27	1.18	1.14
	0.3	7.64	4.32	2.79	2.01	1.63	1.44	1.33	1.26	1.21	1.14	1.09
	0.4	6.63	3.80	2.51	1.78	1.46	1.32	1.25	1.19	1.16	1.10	1.05
	0.6	5.07	3.30	2.27	1.71	1.43	1.34	1.29	1.24	1.18	1.08	1.00
	0.8	4.01	2.70	2.01	1.57	1.44	1.37	1.31	1.24	1.17	1.05	1.00
	1.0	3.25	2.30	1.75	1.49	1.40	1.34	1.27	1.20	1.13	1.01	1.00
	2.0	1.52	1.50	1.45	1.39	1.34	1.30	1.08	1.03	1.00	1.00	1.00
	5.0	1.11	1.10	1.07	1.06	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Lapisan beton sebesar 86 mm terlalu tebal untuk pipa berdiameter 6.625 inch sehingga perlu dilakukan *trenching*. Dari proses iterasi, diperoleh tebal lapisan beton minimum adalah 25 mm dengan kedalaman *trenching* minimum sebesar 2.5 cm. Adanya kedalaman *trenching*, membantu pipa dalam menahan gaya hidrodinamika yang menabrak pipa. Sehingga ukuran pipa dapat diilustrasikan seperti pada **Gambar 6**.



Gambar 6 Ilustrasi Potongan Melintang Pipa Bawah Laut (dalam mm)

3. Analisis Instalasi

Proses analisis instalasi dilakukan menggunakan perangkat lunak OFFPIPE.

Pada Tugas Akhir ini, analisis yang dilakukan hanya analisis statik. Dilakukan analisis untuk tiga *lay barge*. Untuk memperoleh tegangan pipa di bawah tegangan yang diizinkan, konfigurasi seperti kapasitas tensioner, sudut trim, dan sudut *stinger hitch* perlu diubah. Hasil konfigurasi final untuk setiap *lay barge* dapat dilihat pada **Tabel 5**.

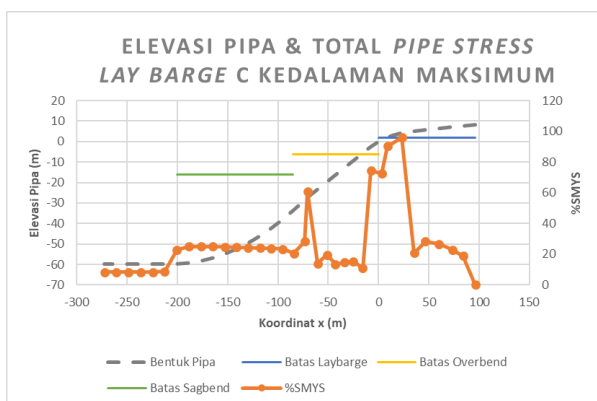
Tabel 5 Konfigurasi Setiap *Lay Barge*

<i>Lay Barge</i>	Kapasitas	Sudut <i>Stinger Hitch</i>	Sudut <i>Trim</i>
A	45 ton	0°	2.5°
B	2 x 15 ton	12°	0°
C	2 x 15 ton	20°	1.5°

Konfigurasi tersebut menghasilkan tegangan pipa seperti pada **Tabel 6**. Untuk bisa mengukur apakah tegangan tidak melebihi tegangan izin, dapat dibuat grafik seperti **Grafik 1** **Tabel 6**.

Tabel 6 Hasil Tegangan yang Diperoleh

Kedalaman	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks	Min.
<i>Lay Barge</i>	Daerah di Dalam <i>Lay barge</i>		Daerah <i>Overbend</i>		Daerah <i>Sagbend</i>	
A	85.28	85.27	84.5	84.2	30.07	30.14
B	89.95	89	81.43	81	24.91	24.69
C	95.99	95	74.47	74.48	25.07	24.84



Grafik 1 Contoh *Plotting* Tegangan Pipa Terhadap Tegangan yang Diizinkan

4. Analisis Bentang Bebas

Analisis bentang bebas dibagi menjadi dua, analisis statik dan analisis dinamik.

a. Analisis Statik

Penentuan panjang bentang bebas yang diizinkan dengan analisis statik bergantung pada berat pipa tersebut. Perhitungan berat pipa ini meliputi berat pipa tenggelam yang juga telah memperhitungkan berat fluida. Dari berat pipa tersebut, momen bending statik dapat dihitung dan kemudian dapat diperoleh hasil tegangan pipa. Tegangan inilah yang akan dibandingkan dengan tegangan izin sebesar 96% SMYS atau pada tugas akhir ini sebesar 345.5 MPa diperoleh dari DNV-OS-F101. Analisis dilakukan. Dalam tiga kondisi yaitu instalasi, hidrotres, dan operasi. Hasil analisis statik dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Hasil Analisis Bentang Bebas Statik

Kondisi	Tegangan (Mpa)	Tegangan Izin (Mpa)	Panjang Bentang Bebas (m)
Instalasi	337.6	345.6	27
Hidrotres	344.2		23
Operasi	342.7		31

Bentang bebas yang diizinkan menurut analisis statik sebesar 23 m diperoleh dari kondisi hidrotres.

b. Analisis Dinamik

Panjang bentang bebas dapat menentukan besar frekuensi natural arah *cross-flow* dan arah *in-line*, serta frekuensi VIV pada arah *in-line*. Semakin besar panjang bentang bebas, maka frekuensi natural akan semakin kecil dan dapat menyebabkan adanya resonansi antara pipa dengan keadaan lingkungan. Frekuensi VIV pada arah *cross-flow* sangat dipengaruhi kecepatan arus dan gelombang, sementara frekuensi VIV pada arah *in-line* dipengaruhi oleh kecepatan arus saja. Analisis bentang bebas dinamik untuk kriteria *screening fatigue* dilakukan pada setiap kondisi dan kedalaman. Hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Hasil Analisis Bentang Bebas
Kriteria *Screening Fatigue*

Kondisi	Kedalaman	Panjang Bentang Bebas yang Diizinkan (m)
Instalasi	Maksimum	14
	Minimum	13
Hidrotes	Maksimum	12
	Minimum	12
Operasi	Maksimum	7.5
	Minimum	7.5

Panjang bentang bebas sebesar 7 m diperoleh dari jarak antara dua pipa eksisting yang terdapat pada rute pipa. Dari hasil kriteria *screening fatigue*, panjang bentang bebas yang diizinkan sebesar 7.5 m dari kondisi operasi pada kedua kedalaman. Analisis kondisi operasi menggunakan *metocean data* periode ulang 100 tahun sehingga diperoleh panjang bentang bebas yang paling kecil.

Panjang bentang bebas yang ada masih masuk ke dalam bentang bebas yang diizinkan sehingga tidak perlu melakukan analisis *fatigue*. Selanjutnya analisis ULS memperhitungkan tegangan aksial efektif, momen bending statik dan dinamik berdasarkan DNV-RP-F105. Nilai yang diperoleh dari perhitungan tersebut dimasukkan kepada kriteria *Local Buckling – Combined Loading* berdasarkan DNV-OS-F101. Hasil analisis dari kriteria ini dapat dilihat **Tabel 9**.

Tabel 9 Hasil Analisis Bentang Bebas
Kriteria ULS

Kondisi	Kedalaman	Arah		Keterangan
		In-Line	Cross-Flow	
Instalasi	Minimum	0.002	0.004	OK
	Maksimum	0.0023	0.0042	OK
Hydrotest	Minimum	0.08	0.09	OK
	Maksimum	0.087	0.091	OK
Operasi	Minimum	0.391	0.397	OK
	Maksimum	0.365	0.371	OK

Parameter perhitungan kriteria ULS memenuhi sehingga dapat dilanjutkan dengan analisis *crossing*.

5. Pemodelan dan Analisis *Crossing*

Pemodelan dan analisis *crossing* dilakukan menggunakan perangkat lunak CAESAR II.

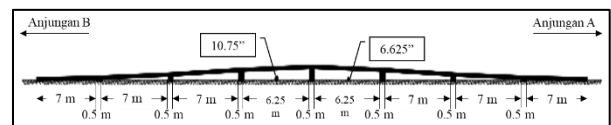
a. Pemodelan

Faktor – faktor yang harus diperhatikan adalah jarak vertikal pipa baru dengan pipa eksisting minimum sebesar 0.3 m dan panjang bentang bebas. Tinggi struktur pendukung dapat dihitung menggunakan Persamaan 16.

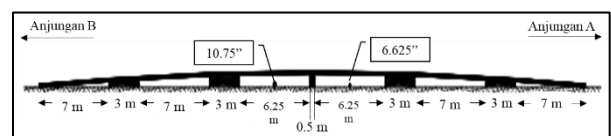
$$H_{struktur} = D_{eksisting} + H_{clearance} \quad 16$$

Diperoleh tinggi struktur pendukung minimum sebesar 0.573 m. Dirancang lima struktur pendukung dengan dua struktur di ujung kiri dan kanan setinggi 0.3 meter, dua struktur di kiri dan kanan setinggi 0.6 meter, dan satu struktur di antara pipa eksisting setinggi 0.7 meter.

Dibuat dua pemodelan *crossing* menggunakan struktur pendukung *concrete mattress* dan *concrete sleeper*. Pada pemodelan ini yang berbeda dari keduanya hanya lebar dari struktur tersebut. *Concrete sleeper* 2 m sedangkan *concrete mattress* memiliki lebar 3 m. Ilustrasi penempatan struktur pendukung untuk *concrete sleeper* dapat dilihat pada **Gambar 7** dan untuk *concrete mattress* pada **Gambar 8**.



Gambar 7 Rancangan Pemodelan untuk
Concrete Sleeper



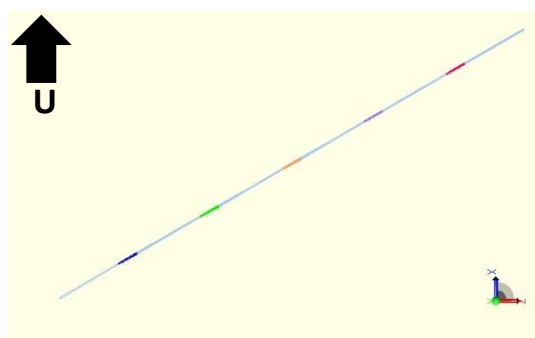
Gambar 8 Rancangan Pemodelan untuk
Concrete Mattress

Material pipa yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah API 5L X52 dengan temperatur sebesar 65 °C. Kode pipa yang digunakan berdasarkan ASME B31.8.

Pemodelan yang dihasilkan dapat dilihat pada **Gambar 9** dan **Gambar 10**.



Gambar 9 Pemodelan Tampak Samping



Gambar 10 Pemodelan Tampak Atas

Struktur pendukung dimodelkan dengan *displacement* dan *restrain*. *Displacement* dengan arah Y+ atau ke atas menggambarkan perpindahan pipa akibat struktur setinggi struktur tersebut. *Restrain* menggambarkan adanya penahan.

b. Analisis Crossing

Analisis dilakukan dengan memasukkan data gelombang dan arus. Kedalaman di lokasi *crossing* sebesar 53.81 m. Dari hasil analisis yang dilakukan, hal pertama yang harus diperhatikan adalah *displacement* yang terjadi pada titik di atas pipa eksisting. *Displacement* maksimum dapat dikurang dengan diameter pipa eksisting sehingga menghasilkan nilai jarak antara pipa baru dengan pipa eksisting. Jarak ini dapat dilihat pada **Tabel 10**.

Tabel 10 Jarak Antara Pipa Baru dengan Pipa Eksisting Hasil Analisis *Crossing*

	Concrete Sleeper		Concrete Mattress	
	Hidrotes	Operasi	Hidrotes	Operasi
Pipa 6.625"	0.591 m	0.532 m	0.479 m	0.516 m
Pipa 10.75"	0.367 m	0.356 m	0.481 m	0.415 m
Clearance	0.3 m	0.3 m	0.3 m	0.3 m

Setelah adanya *displacement* dari *crossing*, jarak antara pipa baru dengan pipa eksisting memenuhi kriteria yang ada. Maka tinggi struktur pendukung telah layak.

Analisis tegangan yang dilakukan menggunakan kombinasi pembebanan. Tegangan akibat *crossing* ini tidak boleh lebih besar daripada yang diizinkan. Parameter tegangan yang diizinkan sebesar 90%. Nilai tersebut menjadi parameter karena tegangan yang dianalisis berasal dari *loadcase* yang ada. Maka tegangan yang diizinkan pada analisis *crossing* ini sebesar 324 MPa.

Dari seluruh hasil tegangan yang ada, tegangan *bending* dapat dijadikan perbandingan. Selain itu tegangan kombinasi juga merupakan tegangan paling besar dari seluruh tegangan.

Tabel 11 Tegangan Paling Maksimum

Tegangan	Concrete Sleeper		Concrete Mattress	
	Hidrotes	Operasi	Hidrotes	Operasi
Kombinasi (MPa)	199.247	161.45	177.666	113.195
Izin (MPa)	324	324	324	324

Tegangan terbesar berasal dari kombinasi tegangan. Kombinasi tegangan yang dimaksud telah termasuk tegangan aksial, tekuk, dan *hoop*. Kombinasi ini juga ditentukan berdasarkan kode yang digunakan, dalam Tugas Akhir ini adalah ASME B31.8. Dapat dilihat bahwa seluruh kombinasi tegangan yang terjadi pada kedua struktur, kondisi, dan semua kasus telah memenuhi syarat kombinasi tegangan dari kode ASME B31.8.

Tegangan paling maksimum yang dihasilkan di kedua struktur dan kondisi terjadi saat kasus 3. Setiap kasus dipengaruhi oleh kecepatan arus. Pada titik *crossing* ini kecepatan arus menuju arah timur adalah yang paling cepat. Sehingga hal ini memengaruhi hasil tegangan yang dialami oleh pipa.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan seperti berikut.

1. Dari hasil perhitungan menggunakan standar desain DNV-RP-F101, diperoleh tebal dinding untuk pipa berdiameter 6.625 inch sebesar 7.2 mm dari kriteria *propagation buckling* saat kondisi operasi. Nilai ini disesuaikan dengan API 5L “*Specification for Line Pipe*” sehingga tebal dinding pipa yang ditentukan adalah 0.312 inch.
2. Tebal dinding pipa hasil analisis *on-bottom stability* berdasarkan DNV-RP-F109 adalah minimum 25 mm dengan kedalaman *trenching* minimum sebesar 2.5 cm. Nilai ini diperoleh dari kondisi operasi pada kedalaman minimum. Apabila tidak di-*trenching* tebal lapisan beton pipa sebesar 86 mm.
3. Konfigurasi *lay barge* A adalah satu tensioner berkapasitas 45 ton, sudut trim 2.5°, dan sudut *stinger hitch* 0°. Konfigurasi *lay barge* B adalah dua tensioner dan masing-masing berkapasitas 15 ton, sudut trim 0°, dan sudut *stinger hitch* 12°. Konfigurasi *lay barge* C adalah dua tensioner dan masing-masing berkapasitas 15 ton, sudut trim 1.5°, dan sudut *stinger hitch* 20°.
4. Panjang bentang bebas maksimum berdasarkan analisis yang dilakukan menggunakan acuan standar desain DNV-RP-F105 sebesar 7.5 m. Nilai ini diperoleh dari kondisi operasi.
5. Dirancang dua jenis struktur pendukung yaitu *concrete mattress* dan *concrete*

sleeper. Pemodelan pertama yaitu terdapat tujuh struktur *concrete sleeper* dengan dua struktur di ujung kanan dan kiri setinggi 0.1 m, lalu menuju ke tengah di bagian kiri dan kanan setinggi 0.3 m, kemudian ke tengah lagi mendekati pipa eksisting di bagian kiri dan kanan sebesar 0.6 m, dan satu struktur di antara dua pipa eksisting setinggi 0.8 m. Pemodelan kedua yaitu terdapat empat struktur *concrete mattress* dengan dua struktur di ujung kanan dan kiri setinggi 0.3 m, dua struktur menuju ke tengah di bagian kiri dan kanan setinggi 0.6 m, dan ditengahnya terdapat satu struktur *concrete sleeper* di antara dua pipa eksisting setinggi 0.7 m. Tegangan yang dihasilkan dari kedua pemodelan tersebut memenuhi tegangan izin. Tegangan maksimum yang terjadi pada pemodelan yang pertama ketika kondisi hidrotas sebesar 199.247 MPa dan kondisi operasi sebesar 161.45 MPa. Lalu untuk tegangan maksimum yang terjadi pada pemodelan yang kedua ketika kondisi hidrotas sebesar 177.936 MPa dan kondisi operasi sebesar 113.1957 MPa.

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

1. Perlu dilakukan perbandingan tebal lapisan beton hasil analisis kestabilan pipa menggunakan standar desain DNV-RP-F109 dengan DNV-RP-E305.
2. Analisis *crossing* dapat dilanjutkan dengan perhitungan *settlement* akibat struktur pendukung.

DAFTAR PUSTAKA

Institute, A. P. (2007). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*. Washington, D.C: API Publishing Services.

- American Society of Mechanical Engineers. (2010). *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
- Guo, Buyon, dkk. (2005). *Offshore Pipelines*. Oxford: Elsevier.
- Lee, Jaeyong. (2007). *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*.
- Tawekal, R. L. (2012). *Diktat Kuliah KL – 4221 – Anjungan Lepas Pantai II*. Bandung: Penerbit ITB.
- Veritas, D. N. (2006). *Recommended Practice DNV-RP-F105 Free Spanning Pipeline*.
- Veritas, D. N. (2007). *Offshore Standard DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems*.
- Veritas, D. N. (2010). *Recommended Practice DNV-RP-F109 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines*.