

DESAIN DAN ANALISIS ROAD CROSSING ONSHORE PIPELINE PADA FLOWLINE DI PAPUA BARAT

Design and Road Crossing Analysis of Onshore Pipeline for Flowline in West Papua

Rifqi Muhammad Faiq Fagmi¹, Ricky Lukman Tawekal², dan Jessica Rikanti Tawekal³

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,

Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

¹f.qi@students.itb.ac.id, ²ricky@ocean.itb.ac.id, dan ³jessicart@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Sistem pipeline menjadi alternatif utama untuk pendistribusian minyak bumi dan gas yang efektif dan ekonomis, baik di darat maupun di laut sehingga diperlukan perancangan yang sesuai dengan standar dan memenuhi masa layan. Sistem pipeline yang sedang dirancang adalah dua *flowline* dalam sistem onshore pipeline di Papua Barat. Dalam perancangan kedua *flowline* tersebut, kondisi geografis dan aktivitas sosial sekitar *flowline* harus dipertimbangkan, seperti jalan raya, sungai dan pemukiman penduduk. Selain itu, perancangan *flowline* harus memenuhi kondisi instalasi, hidrotess, dan operasi dan meliputi pemilihan material berdasarkan API 5L, desain ketebalan dinding berdasarkan ASME B31.8, desain concrete weight support untuk pipa yang melewati sungai dengan melakukan analisis kestabilan berdasarkan DNV RP E305 dan analisis *free span* berdasarkan DNV 1981, analisis *end expansion* dan analisis tegangan pipa dengan program metode elemen hingga, serta analisis *road crossing* untuk pipa yang berada di bawah jalan raya berdasarkan API RP 1102. Setelah dilakukan analisis dan desain tersebut, diperoleh bahwa kedua *flowline* tersebut didesain menggunakan material pipa baja dengan mutu API 5L X65 yang dilapisi oleh *cladding* Incoloy 825 dan lapisan anti korosi eksternal 3LPP. Ketebalan dinding *flowline* A1 dan A2 berturut-turut adalah 7.14 mm dan 8.74 mm. *Flowline* A1 menggunakan concrete weight support berbentuk kubus dengan rusuk sepanjang 0.53 m, sedangkan *flowline* A2 tidak memerlukan concrete weight support. Jarak antar support pada *flowline* A1 adalah 12.2 m sesuai dengan *free span* izin sebesar 31.3 m. *End expansion* yang terjadi pada *flowline* A1 sebesar 391.2 mm, sedangkan *flowline* A2 sebesar 411.8 mm. *Pipeline stress analysis* yang dilakukan pada program CAESAR II menyatakan bahwa *flowline* A2 memenuhi syarat tegangan izin dan aman. Analisis *road crossing* menyatakan bahwa *flowline* A1 gagal saat melewati jalan sehingga dilakukan remediasi yaitu, tebal dinding pipa ditambah menjadi 8.38 m atau digunakan casing dengan spesifikasi pipa baja API 5L Grade B dengan diameter 14 inch dan tebal 9.53 mm.

Kata kunci: *flowline*, onshore pipeline, road crossing, ASME B31.8, API RP 1102

Abstract: The pipeline system is the main alternative for effective and economical distribution of oil and gas, both on land and at sea, so that it is necessary to design according to standards and meet service life. The pipeline systems that currently designed are two flowlines in the onshore pipeline system in West Papua. Geographical conditions and social activities around the flowline must be considered, such as roads, rivers and residential areas in flowlines design. In addition, the design of flowline must meet installation, hydrotest, and operation conditions, that include material selection based on API 5L, wall thickness design based on ASME B31.8, concrete weight support design for pipes that pass through the river by conducting a stability analysis based on DNV RP E305 and free span analysis based on DNV 1981, end expansion analysis, and pipe stress analysis with the finite element method program, as well as road crossing analysis for pipes under the highway roads based on API RP 1102. After the analysis and design, it was found that the two flowlines were designed using API 5L X65 steel pipe material coated with Incoloy 825 cladding and 3LPP external anti-corrosion coating. The thickness of the flowline A1 and A2 walls are 7.14 mm and 8.74 mm, respectively. Flowline A1 uses cube-shaped concrete weight support with ribs along 0.53 m, while flowline A2 does not require concrete weight support. Distance between two supports on flowline A1 is 12.2 m and it meets allowable free span 31.3 m. End expansion that occurs in flowline A1 is 391.2 mm, while flowline A2 is 411.8 mm. Pipeline stress analysis conducted on the CAESAR II program states that flowline A2 meet allowable stresses. Road crossing analysis states that flowlines A1 does not meet requirement and should be remediated by increase wall thickness to 8.38 m or use casing with API 5L Grade B steel pipe with a diameter of 14 inches and a thickness of 9.53 mm.

Key words: *flowline*, onshore, pipeline, road crossing, ASME B31.8, API RP 1102

PENDAHULUAN

Kebutuhan gas dan minyak bumi semakin meningkat seiring dengan perkembangan zaman. Setiap aspek kehidupan membutuhkan gas dan minyak bumi sebagai salah satu sumber energi. Oleh karena itu, diperlukan sistem distribusi gas dan minyak bumi untuk memenuhi kebutuhan tersebut pada setiap aspek kehidupan.

Untuk pemenuhan kebutuhan gas dan minyak bumi tersebut, banyak perusahaan yang bergerak dalam bidang minyak dan gas merencanakan sistem *pipeline* dalam distribusi gas dan minyak bumi karena dinilai lebih efektif dan ekonomis dibanding metode distribusi yang lain sehingga harus dirancang kuat, aman, dan ekonomis agar penyaluran gas dan minyak bumi dapat terjamin dan efektif.

Salah satu sistem *pipeline* yang sedang direncanakan adalah sistem *onshore pipeline* yang berada di daerah Papua Barat. Sistem *onshore pipeline* tersebut terdiri banyak jalur *pipeline*, seperti *flowline A2* dan *flowline A1* yang menghubungkan *wellhead* dengan GGS yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Dalam perencanaan sistem *onshore pipeline* tersebut, termasuk *flowline A1* dan *A2*, standar yang digunakan sebagai standar desain. Selain itu, sistem *onshore pipeline* tersebut memerlukan analisis tambahan yang berbeda dengan *offshore pipeline* karena lokasinya di darat, seperti analisis *road crossing* untuk menentukan desain *casing*

pipeline saat *pipeline* harus melewati jalan raya.

TEORI DAN METODOLOGI

Desain pipa darat (*onshore pipeline*) dilakukan berdasarkan standar internasional seperti ASME dan API. Proses desain pipa tersebut dilakukan dalam tiga kondisi, yaitu kondisi instalasi saat pipa kosong, kondisi hidrotess saat pipa diuji dengan air, dan kondisi operasi saat pipa sudah mengalirkan fluida. Selain itu, pipa darat diklasifikasikan berdasarkan lokasi pipa tersebut berdasarkan ASME B31.8. Klasifikasi pipa darat tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Klastifikasi pipa darat berdasarkan ASME B31.8.

Kelas Lokasi	Divisi	Keadaan Lokasi	Jumlah Gedung
1	1	Daerah tidak ada/jarang penduduk	< 10
	2		
2	-	Daerah pinggiran	10 – 46
3	-	Daerah banyak penduduk	> 46
4	-	Daerah sangat padat penduduk & lalu lintas	> 46, ada gedung bertingkat > 4 lantai



Gambar 1 Skesta *flowline* di daerah Papua Barat (Google Earth, 2020)

Desain pipa darat diawali dengan pemilihan material pipa dan *coating* yang mempertimbangkan beberapa aspek, yaitu:

1. Kekuatan dan ketahanan
2. Resistansi terhadap kelelahan
3. Kemudahan dalam pengelasan
4. Resistansi terhadap korosi
5. Konten fluida dan temperatur

Setelah diperoleh material pipa dan *coating* yang sesuai kebutuhan, dilakukan desain ketebalan dinding pipa. Desain ketebalan ini dilakukan berdasarkan ASME B31.8 dengan meninjau tegangan yang terjadi pada pipa, yaitu:

1. Tegangan *hoop*

Tegangan *hoop* dapat dihitung dengan **Persamaan (1)** dengan syarat tegangan izin pada **Persamaan (2)**.

$$S_H = \frac{PD}{2t} \quad (1)$$

$$S_H \leq FETS_y \quad (2)$$

dengan keterangan S_H adalah tegangan *hoop*, P adalah tekanan internal, D adalah diameter luar pipa, t adalah tebal dinding pipa, F adalah faktor desain, E adalah faktor *longitudinal joint*, T adalah faktor *temperature derating*, dan S_y adalah SMYS.

2. Tegangan longitudinal

Tegangan longitudinal yang terjadi dapat dihitung dengan **Persamaan (3)** dengan syarat tegangan izin pada **Persamaan (4)**.

$$S_L = 0.3S_H + E_s \alpha (T_2 - T_1) + \frac{M}{Z} + \frac{R}{A} \quad (3)$$

$$S_L \leq 0.9S_y T \quad (4)$$

dengan keterangan S_L adalah tegangan longitudinal, E_s adalah modulus elastisitas baja, α adalah koefisien ekspansi termal, T_1 adalah temperatur instalasi, T_2 adalah temperatur operasi, M adalah momen yang terjadi pada pipa, Z adalah modulus plastis, R adalah beban aksial, A adalah luas penampang pipa.

3. Tegangan kombinasi

Tegangan kombinasi dapat dihitung dengan **Persamaan (5)** dan **Persamaan (6)** dengan syarat tegangan izin pada

Persamaan (7).

$$S_{eq} = \max(|S_H - S_L|, |S_H|, |S_L|) \quad (5)$$

$$S_{eq} = \sqrt{S_H^2 - S_H S_L + S_L^2} \quad (6)$$

$$S_H \leq kS_y T \quad (7)$$

dengan keterangan S_{eq} adalah tegangan kombinasi dan k adalah konstanta syarat batas tegangan kombinasi, bernilai 0.9 untuk beban lama, serta 1.0 untuk beban sewaktu-waktu.

Dari setiap tegangan tersebut, diperoleh tebal dinding nominal yang dipilih tebal dinding nominal terbesar, lalu ditambahkan *fabrication tolerance* sebesar 12.5% sesuai ASME B31.3 dan diperoleh tebal dinding acuan untuk pemilihan tebal dinding desain sesuai standar ASME B36.10M.

Beberapa pipa darat memiliki rute yang melewati sungai. Oleh karena itu, dilakukan desain *weight support* untuk menstabilkan pipa tersebut. Desain *weight support* dilakukan berdasarkan analisis stabilitas yang diadopsi dari DNV RP E305.

Analisis stabilitas dilakukan dengan meninjau stabilitas vertikal dan lateral. Pipa dinyatakan stabil secara vertikal apabila memenuhi **Persamaan (8)** dan stabil secara lateral apabila memenuhi **Persamaan (9)**.

$$\frac{W_{dry}}{F_B} \geq 1.1 \quad (8)$$

$$W_{sub} \geq W_{req} = \left(\frac{F_D + F_I + \mu_s F_L}{\mu_s} \right)_{\max} F_W \quad (9)$$

dengan keterangan W_{dry} adalah berat kering pipa dan *support*, F_B adalah *buoyancy* pipa, W_{sub} adalah berat terendam pipa, W_{req} adalah berat yang dibutuhkan agar stabil, F_D adalah gaya *drag*, F_I adalah gaya inersia, μ_s adalah koefisien friksi tanah, F_L adalah gaya *lift*, dan F_W adalah faktor kalibrasi.

Dalam analisis stabilitas vertikal, dilakukan perhitungan gaya hidrodinamika dengan **Persamaan (10)**, **Persamaan (11)**, dan **Persamaan (12)**.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A_{pro} U^2 \quad (10)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w A_{pro} U^2 \quad (11)$$

$$F_I = C_M V_{sub} A_s \quad (12)$$

dengan keterangan C_D adalah koefisien gaya drag, C_L adalah koefisien gaya lift, C_M adalah koefisien gaya inersia, ρ_w adalah densitas air, A_{pro} adalah luas proyeksi, A_s adalah percepatan arus, dan U adalah kecepatan arus.

Apabila *weight support* mengenai dasar sungai, dilakukan perhitungan kapasitas *bearing* tanah untuk mengecek daya dukung tanah saat memikul beban dari *weight support*. Daya dukung tanah harus memenuhi **Persamaan (13)** agar tanah tidak runtuh dan mengakibatkan kerusakan pada pipa.

$$\frac{q_u}{q_{max}} \geq SF = 3 \quad (13)$$

dengan keterangan q_u adalah kapasitas *bearing* tanah, q_{max} adalah beban akibat *support* di atas tanah, dan SF adalah *safety factor*.

Untuk menghitung daya dukung tanah, dapat digunakan metode Terzaghi dengan **Persamaan (14)** untuk *support* berbentuk persegi.

$$q_u = 1.3c'N_c + qN_q + 0.4\gamma_s B N_\gamma \quad (14)$$

dengan keterangan c' adalah kohesi tanah, N_c adalah faktor kapasitas *bearing* untuk kohesi, q adalah *equivalent surcharge*, N_q adalah faktor kapasitas *bearing* untuk *equivalent surcharge*, γ_s adalah berat jenis tanah, B adalah lebar *support* atau fondasi, dan N_γ adalah faktor kapasitas *bearing* untuk berat jenis tanah.

Selain itu, perlu diketahui *settlement* yang terjadi akibat beban *weight support* untuk mengetahui kebutuhan analisis *free span*. *Settlement* dibagi menjadi dua, yaitu *immediately settlement* yang dapat dihitung dengan **Persamaan (15)** dan *consolidation settlement* yang dapat dihitung dengan **Persamaan (16)**.

$$S_i = q B \frac{1 - \mu}{E_{soil}} I_w \quad (15)$$

$$S_c = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_{av}}{\sigma'_0} \quad (16)$$

dengan keterangan S_i adalah besar *immediately settlement*, μ adalah bilangan Poisson tanah, E_{soil} adalah elastisitas tanah, I_w adalah faktor

bentuk struktur, S_c adalah *consolidation settlement*, C_c adalah *compression index*, H_c adalah tebal lapisan tanah, e_0 adalah *void ratio*, σ'_0 adalah tegangan efektif tanah, dan $\Delta\sigma'_{av}$ adalah penambahan tegangan efektif tanah akibat beban di atas tanah.

Apabila *settlement* tidak terlalu besar, dilakukan analisis *free span* untuk mengetahui jarak aman antar *support* akan tidak terjadi kegagalan. Analisis *free span* dilakukan berdasarkan DNV 1981 dan dibagi menjadi dua, yaitu analisis *free span* statik dan analisis *free span* dinamik.

Analisis *free span* statik dilakukan dengan meninjau tegangan *von misses* yang dapat dihitung dengan **Persamaan (17)** dengan kriteria izin sesuai dengan **Tabel 2**. Analisis *free span* dinamik dilakukan dengan meninjau frekuensi *free span* terhadap frekuensi VIV yang terjadi yang harus memenuhi **Persamaan (18)**.

$$\sigma_{von} = \sqrt{\sigma_{long}^2 + \sigma_h^2} \quad (17)$$

$$\frac{f_v}{f_n} \leq 0.7 \quad (18)$$

Tabel 2 Kriteria tegangan izin. (Det Norske Veritas, 1981)

Kondisi	Batasan
Instalasi	0.72 SMYS
Hidrotes	0.9 SMYS
Operasi	0.9 SMYS

dengan keterangan σ_{von} adalah tegangan *von misses*, σ_{long} adalah tegangan longitudinal, σ_h adalah tegangan *hoop*, f_v adalah frekuensi VIV, dan f_n adalah frekuensi natural *free span*.

Pipa akan mengalirkan fluida dengan temperatur dan tekanan tinggi sehingga terjadi gaya aksial yang mengakibatkan ekspansi. Oleh karena itu, dilakukan analisis *end expansion* untuk mengetahui panjang ekspansi pipa. Analisis *end expansion* dilakukan dengan perhitungan yang diadopsi dari Bai dan Bai 2014.

Panjang *end expansion* dipengaruhi oleh gaya aksial yang terjadi akibat beberapa faktor, yaitu tekanan pada *end cap*, efek Poisson, dan temperatur. Gaya aksial total

dapat dihitung dengan **Persamaan (19)**.

$$F_{ax} = \frac{\pi}{4} (ID)^2 P - \nu \frac{P(D-t)A}{2} + E_s A \alpha \Delta T \quad (19)$$

dengan keterangan F_{ax} adalah gaya aksial total, ID adalah diameter internal pipa, ν adalah rasio Poisson pipa, dan ΔT adalah perbedaan temperatur instalasi dan operasi.

Gaya aksial yang terjadi pada pipa dapat ditahan oleh gaya friksi tanah yang dapat dihitung dengan **Persamaan (20)** untuk pipa terkubur.

$$F_r = \int_0^L \mu_s \left\{ \left(2\pi \frac{\gamma_s D}{4} \right) \left(z_t + \frac{D}{2} \right) (1 + K_o) + \pi D \alpha_a S_u + W_{tot} \right\} dx \quad (20)$$

dengan keterangan F_r adalah gaya friksi tanah, L adalah panjang pipa, z_t adalah kedalaman penguburan pipa, K_o adalah koefisien tegangan tanah pasif, α_a adalah koefisien adhesi tanah, S_u adalah *undrained shear strength*, dan W_{tot} adalah berat total pipa.

Ekspansi pipa hanya terjadi pada bentang pipa dari ujung hingga titik *anchor virtual* yang dapat dicari dengan **Persamaan (21)**.

$$F_{ax}(VAP) - F_r(VAP) = 0 \quad (21)$$

dengan keterangan VAP adalah jarak antara titik ujung pipa dengan titik *virtual anchor*.

Setelah diperoleh panjang titik *anchor virtual*, panjang ekspansi yang terjadi dapat dihitung dengan **Persamaan (22)**.

$$\Delta_{end} = \int_0^{VAP} \frac{F_{ax} - F_r}{E_s A} dx \quad (22)$$

dengan keterangan Δ_{end} adalah panjang *end expansion*.

Untuk memastikan tegangan yang terjadi pada pipa memenuhi tegangan izin sesuai standar, dilakukan *pipeline stress analysis* dengan menggunakan program analisis *pipe flexibility* dan *pipe stresses* berbasis metode elemen hingga, seperti program CAESAR II. *Output* dari program CAESAR II berupa perpindahan dan berbagai tegangan yang terjadi pada pipa. Pipa dinyatakan tidak mengalami kegagalan oleh CAESAR II apabila *code stress* yang terjadi

tidak melebihi *allowable stress* sesuai standar yang telah ditentukan.

Selain pipa dapat melewati sungai, pipa darat dapat memiliki rute yang melewati jalan raya sehingga perlu dilakukan analisis *road crossing* sesuai API RP 1102. Analisis *road crossing* dilakukan dengan meninjau tegangan dan *fatigue* pipa saat melewati jalan. Apabila pipa dinyatakan gagal, diperlukan *casing* untuk melindungi pipa.

Tegangan yang ditinjau adalah tegangan Barlow atau *hoop* yang dapat dihitung dengan **Persamaan (1)** dengan syarat batas yang dinyatakan oleh **Persamaan (2)**.

Selain itu, tegangan yang ditinjau juga adalah tegangan *circumferential* akibat beban tanah yang dapat dihitung dengan **Persamaan (23)**, beban kendaraan yang dapat dihitung **Persamaan (24)**, dan tekanan internal yang dapat dihitung dengan **Persamaan (25)**.

$$S_{He} = K_{He} B_e E_e \gamma_s D \quad (23)$$

$$\Delta S_{Hh} = K_{Hh} G_{Hh} R L F_i w \quad (24)$$

$$S_{Hi} = \frac{P(D-t)}{2t} \quad (25)$$

dengan keterangan S_{He} adalah tegangan *circumferential* akibat beban tanah, K_{He} adalah faktor kekakuan tanah, B_e adalah faktor penguburan, E_e adalah faktor *excavation*, ΔS_{Hh} adalah tegangan *circumferential* siklik akibat beban kendaraan, K_{Hh} adalah faktor kekakuan jalan untuk tegangan *circumferential*, G_{Hh} adalah faktor geometri jalan untuk tegangan *circumferential*, R adalah faktor tipe trotoar, L adalah faktor konfigurasi sumbu roda, F_i adalah faktor *impact*, w adalah beban desain roda, dan S_{Hi} adalah tegangan *circumferential* akibat tekanan internal.

Selain itu, ditinjau tegangan longitudinal akibat beban kendaraan yang dapat dihitung dengan **Persamaan (26)**.

$$\Delta S_{Lh} = K_{Lh} G_{Lh} R L F_i w \quad (26)$$

dengan keterangan ΔS_{Lh} adalah tegangan longitudinal siklik akibat beban kendaraan, K_{Lh} adalah faktor kekakuan jalan untuk tegangan longitudinal, dan G_{Lh} adalah faktor geometri jalan untuk tegangan longitudinal.

Setelah dihitung tegangan *circumferential* dan tegangan *longitudinal*, dihitung tiga tegangan *principal* yang dapat dihitung oleh **Persamaan (27)**, **Persamaan (28)**, dan **Persamaan (29)**.

$$S_1 = S_{He} + \Delta S_{Hh} + S_{Hi} \quad (27)$$

$$S_2 = \Delta S_{Lh} - E_s \alpha (T_2 - T_1) + \nu (S_H + S_{Hi}) \quad (28)$$

$$S_3 = -P \quad (29)$$

dengan keterangan S_1 adalah tegangan *principal* (tegangan *circumferential* maksimum), S_2 adalah tegangan *principal* (tegangan longitudinal maksimum), dan S_3 adalah tegangan *principal* (tegangan radial maksimum)

Setelah diperoleh tiga tegangan *principal*, dapat dihitung tegangan efektif dengan **Persamaan (30)**. Pipa dinyatakan aman apabila tegangan efektif yang terjadi memenuhi **Persamaan (31)**.

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2} [(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2]} \quad (30)$$

$$S_{eff} \leq F S_y \quad (31)$$

dengan keterangan S_{eff} adalah tegangan efektif yang terjadi pada pipa saat melewati jalan.

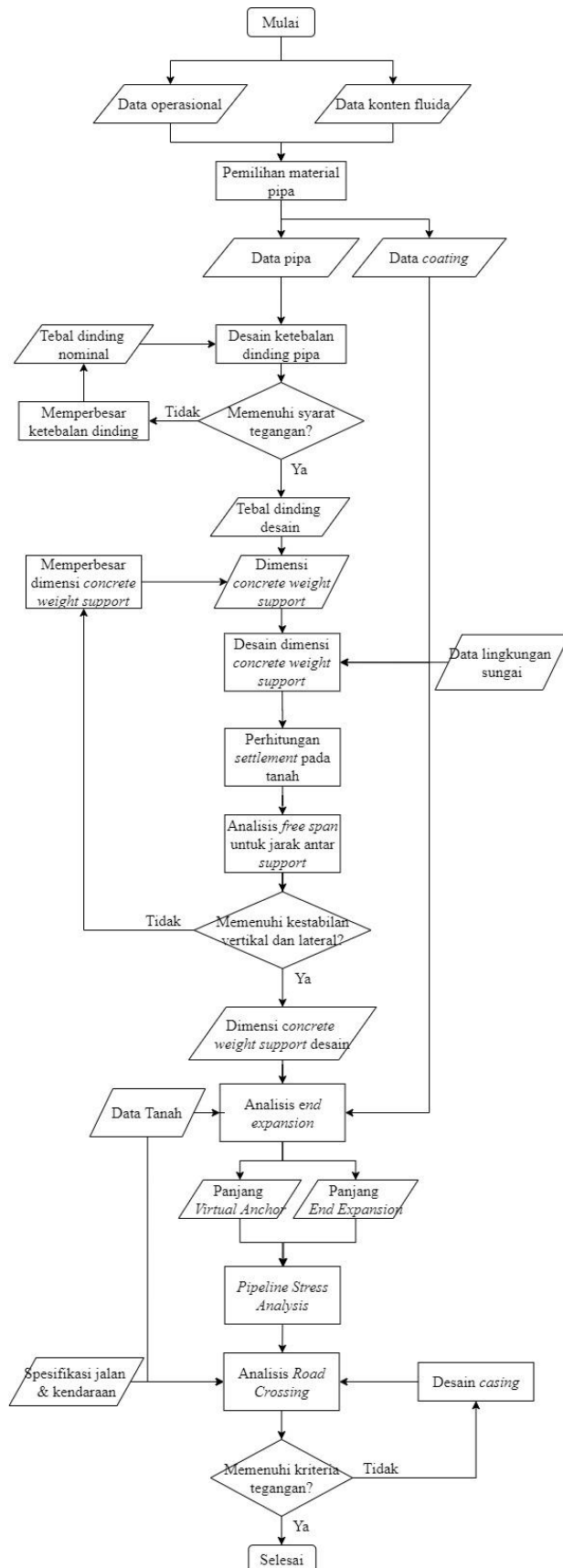
Selain meninjau tegangan, ditinjau juga kelelahan pipa akibat beban kendaraan berdasarkan las pada pipa. Pipa dinyatakan aman terhadap beban *fatigue* apabila memenuhi **Persamaan (32)** untuk *girth weld* dan **Persamaan (33)** untuk *longitudinal weld*.

$$\Delta S_{Lh} \leq S_{FG} F \quad (32)$$

$$\Delta S_{Hh} \leq S_{FL} F \quad (33)$$

dengan keterangan S_{FG} adalah *fatigue limit* untuk *girth weld* dan S_{FL} adalah *fatigue limit* untuk *longitudinal weld*.

Dalam Tugas Akhir ini, dilakukan desain *flowline* darat. Metodologi yang digunakan dalam desain *flowline* darat tersebut secara sistematis dapat dilihat pada diagram alir yang ditunjukkan oleh **Gambar 2**.



Gambar 2 Metodologi desain *flowline* darat untuk Tugas Akhir

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pemilihan Material *Flowline*

Pemilihan material dilakukan untuk memilih material CRA untuk *cladding* dan material anti korosi eksternal. Pemilihan material CRA dilakukan dengan meninjau data tekanan, temperatur, dan konten fluida. Pemilihan material anti korosi eksternal dilakukan berdasarkan standar BS EN ISO 21809-1 dengan meninjau temperatur desain dan berat pipa per satuan panjang. Hasil pemilihan material CRA dan anti korosi eksternal dapat dilihat pada **Tabel 3** dengan ilustrasi penampang pipa pada **Gambar 3**.

Tabel 3 Hasil pemilihan material CRA dan anti korosi eksternal.

Parameter	Simbol	Nilai		Satuan
		A1	A2	
Material lapisan anti korosi	-	3LPP		-
Tebal lapisan anti korosi	t_{cc}	2.3		mm
Densitas lapisan anti korosi	ρ_{cc}	900		kg/m ³
Material <i>cladding</i>	-	Incoloy 825		-
Tebal <i>cladding</i>	t_{cd}	3		mm
Densitas <i>cladding</i>	ρ_{cd}	8140		kg/m ³

2. Desain Ketebalan Dinding *Flowline*

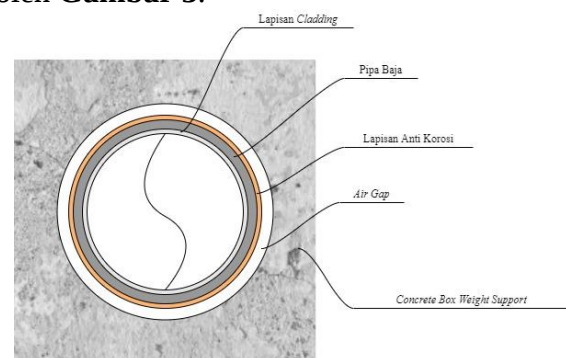
Desain ketebalan dinding *flowline* dilakukan berdasarkan ASME B31.8 dengan meninjau tegangan *hoop*, longitudinal, dan kombinasi. Berdasarkan hasil desain ketebalan dinding tersebut, diperoleh bahwa tebal nominal dari tegangan *hoop* yang menjadi tebal terbesar dan acuan untuk pemilihan tebal dinding desain sesuai standar ASME B36.10M. Hasil desain ketebalan dinding *flowline* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Hasil desain ketebalan dinding *flowline*.

Tebal Dinding Nominal	Nilai (mm)		
	Instalasi	Hidrotes	Operasi
Flowline A1			
Tegangan <i>hoop</i>	0.01	6.23	4.16
Tegangan longitudinal	0.01	2.46	1.64
Tegangan kombinasi (Cara 1)	0.01	4.99	3.33
Tegangan kombinasi (Cara 2)	0.01	4.38	2.92
Tebal dinding nominal maksimum	6.23		
Tebal dinding minimum (+ <i>fabrication tolerance</i>)	7.01		
Tebal dinding desain (ASME B36.10M)	7.14		
Flowline A2			
Tegangan <i>hoop</i>	0.01	7.57	5.05
Tegangan longitudinal	0.01	2.07	1.38
Tegangan kombinasi (Cara 1)	0.01	4.21	2.81
Tegangan kombinasi (Cara 2)	0.01	3.69	2.46
Tebal dinding nominal maksimum	7.57		
Tebal dinding minimum (+ <i>fabrication tolerance</i>)	8.52		
Tebal dinding desain (ASME B36.10M)	8.74		

3. Desain *Concrete Weight Support Flowline*

Weight support yang digunakan pada *flowline* adalah *weight support* dari beton dengan bentuk kubus yang dapat diilustrasikan oleh **Gambar 3**.



Gambar 3 Penampang *weight support* berbentuk kubus.

Weight support dipasang pada *flowline* dengan jarak 12.2 m sesuai panjang satu pipa sebelum dilas. Ukuran *weight support* didesain dengan melakukan analisis stabilitas vertikal dan lateral sesuai DNV RP E305. Hasil desain berdasarkan analisis stabilitas tersebut dapat

dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Hasil analisis stabilitas untuk desain *weight support*.

Parameter	Batas Minimal	Nilai			Satuan
		Instalasi	Hidrotes	Operasi	
Flowline A1					
Dimensi rusuk <i>concrete weight</i>	-	0.53	0	0.48	m
<i>Safety factor</i> kestabilan vertikal	1.1	1.1	1.83	1.11	-
<i>Safety factor</i> kestabilan lateral	1.0	14.98	141.65	14.69	-
Flowline A2					
Dimensi rusuk <i>concrete weight</i>	-	0	0	0	m
<i>Safety factor</i> kestabilan vertikal	1.1	1.31	2.12	1.35	-
<i>Safety factor</i> kestabilan lateral	1.0	46.92	168.16	52.57	-

Berdasarkan hasil desain, diperoleh desain terbesar adalah desain saat kondisi instalasi karena pipa dalam kondisi kosong. Selain itu juga, diperoleh bahwa *flowline A1* memerlukan *weight support*, sedangkan *flowline A2* tidak.

Setelah itu, dilakukan pengecekan daya dukung dan *settlement* tanah pada dasar sungai terhadap beban akibat *weight support* pada *flowline A1*. Hasil perhitungan kapasitas *bearing* dan *settlement* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6 Hasil perhitungan kapasitas *bearing* untuk *flowline A1*.

Parameter	Nilai	Satuan
Dimensi rusuk <i>concrete weight</i>	0.53	m
Daya dukung tanah		
Beban kontak <i>support</i>	9.96	kN/m ²
Kapasitas <i>bearing</i> tanah	111.15	kN/m ²
<i>Safety factor</i> kestabilan lateral (SF > 3)	11.16	-
	OK	-
Settlement		
<i>Immediately settlement</i>	0.22	mm
<i>Consolidation settlement</i>	3.5	mm
<i>Total settlement</i>	3.72	mm
Batasan pipa mengenai tanah ($\Sigma S > 0.5r$)	265	mm
	Pipa tidak mengenai tanah	-

Berdasarkan hasil *settlement*, diperoleh

bahwa pipa tidak mengenai tanah sehingga diperlukan analisis *free span*. Hasil dari analisis *free span* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Hasil dari analisis *free span*.

Parameter	Nilai			Satuan
	Instalasi	Hidrotes	Operasi	
<i>Free span</i> statik kritis	253.47	31.3	256.53	m
<i>Free span</i> dinamik kritis	45.51	45.77	45.7	m
<i>Free span</i> izin	31.3			-
Jarak antar <i>support</i>	12.2			m
	OK			m

4. Analisis *End Expansion Flowline*

Analisis *end expansion* pada *flowline* dilakukan pada kondisi desain hidrotes dan operasi karena pipa tidak mengalami ekspansi pada kondisi instalasi. Hasil analisis *end expansion* pada *flowline* dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Hasil analisis *end expansion* pada *flowline*.

Parameter	Nilai		Satuan
	Hidrotes	Operasi	
Flowline A1			
Panjang pipa	1.9		km
Panjang virtual anchor	96.17	436.63	m
Panjang end expansion	9.77	195.63	mm
Flowline A2			
Panjang pipa	2.5		km
Panjang virtual anchor	69.83	488.48	m
Panjang end expansion	4.3	205.87	mm

Berdasarkan hasil analisis *end expansion*, diperoleh ekspansi terbesar pada kondisi operasi karena terjadi perubahan temperatur yang besar pada pipa. Namun, panjang *end expansion* dari analisis *end expansion* pada **Tabel 6** merupakan panjang *end expansion* pada satu ujung.

Pada kenyataan lapangan, pipa mengalami *end expansion* pada kedua ujungnya yang dapat diilustrasikan oleh **Gambar 4**. Pada *flowline A1* dan *A2*, panjang *end expansion* yang terjadi pada kedua ujung

sama akibat kondisi temperatur yang seragam sehingga panjang *end expansion* keseluruhannya adalah panjang *end expansion*

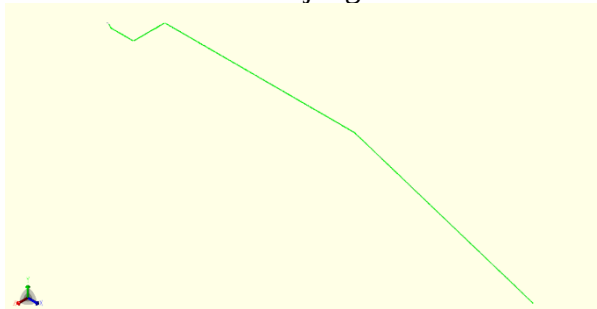
satu ujung dikalikan dua, yaitu 391.2 mm untuk *flowline* A1 dan 411.8 mm untuk *flowline* A2.



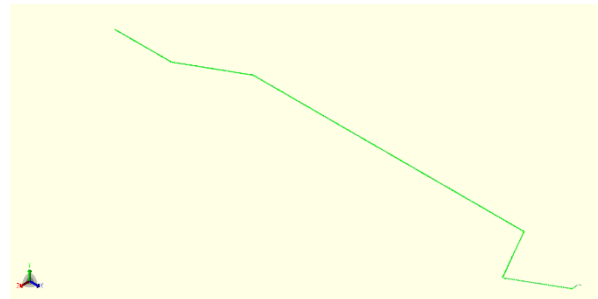
Gambar 4 Ilustrasi *end expansion* yang terjadi sepanjang pipa.

5. Pipeline Stress Analysis Flowline

Pipeline Stress Analysis pada kedua ujung *flowline* A2 dilakukan pada kondisi desain hidrotes dan operasi pada program CAESAR II. Ilustrasi model *flowline* pada CAESAR II dapat dilihat pada **Gambar 5** untuk ujung awal dan **Gambar 6** untuk ujung akhir

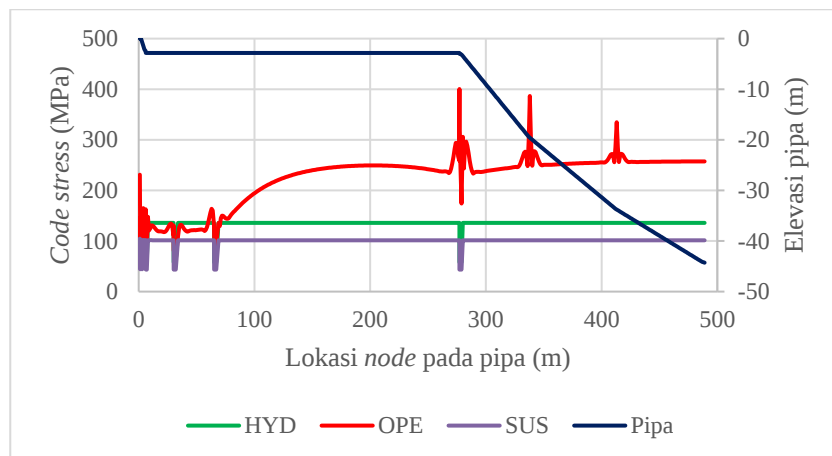


Gambar 5 Ilustrasi model ujung awal *flowline* A2. (CAESAR II 2014, 2020)

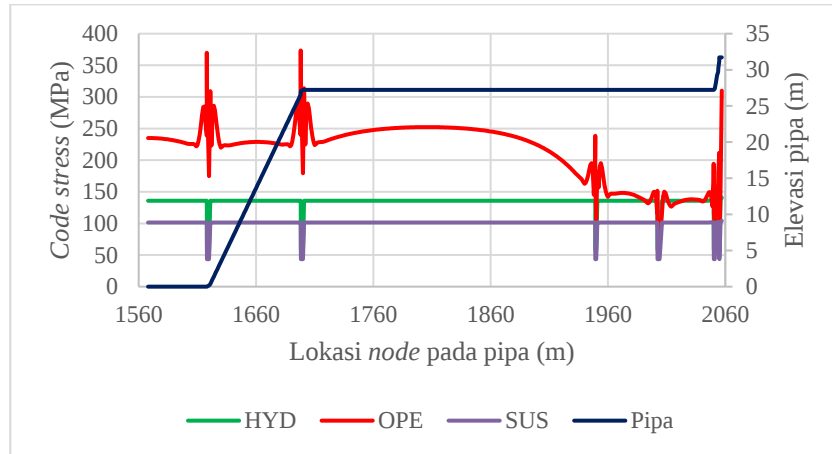


Gambar 6 Ilustrasi model ujung akhir *flowline* A2. (CAESAR II 2014, 2020)

Berdasarkan hasil analisis dengan CAESAR II, diperoleh *code stress* pada setiap kondisi pembebanan yang ditunjukkan oleh **Gambar 7** untuk ujung awal dan **Gambar 8** untuk ujung akhir. Selain itu, rangkuman tegangan maksimum yang terjadi pada *flowline* A2 dapat ditunjukkan oleh **Tabel 9**.



Gambar 7 Code stress yang terjadi di ujung awal *flowline* A2.



Gambar 8 Code stress yang terjadi di ujung akhir *flowline* A2.

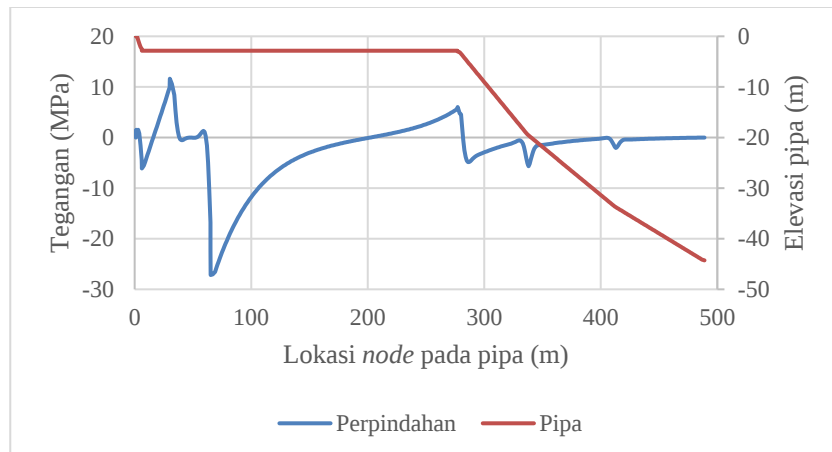
Tabel 9 Tegangan maksimum pada *flowline* hasil CAESAR II.

Tegangan	Nilai (MPa)	Node	Load Case	Allowable stress (MPa)
Ujung awal				
Axial	112.4	4889	OPE	-
Bending	237.1	2772	OPE	-
Torsion	0.0	along pipe	HYD, OPE, SUS	-
Hoop	193.9	along pipe	HYD	-
Code	400.4	2771	OPE	403.3
Ujung akhir				
Axial	107.5	18060	OPE	-
Bending	242.9	16982	OPE	-

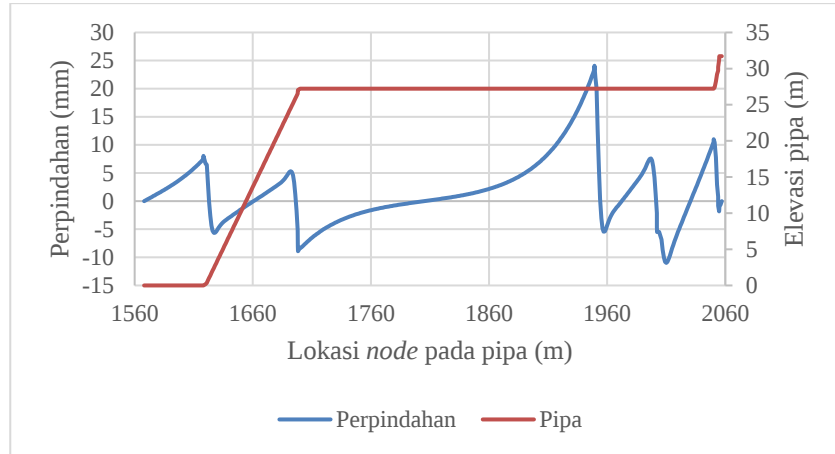
Tegangan	Nilai (MPa)	Node	Load Case	Allowable stress (MPa)
Torsion	0.0	along pipe	HYD, OPE, SUS	-
Hoop	193.9	along pipe	HYD	-
Code	373.4	16981	OPE	403.3

Hasil tegangan pada CAESAR II menyatakan bahwa *flowline* tidak mengalami kegagalan karena *code stress* yang terjadi kurang dari *allowable stress* yang disyaratkan standar.

Selain tegangan, diperoleh perpindahan pipa untuk mengetahui besar *end expansion*. Perpindahan yang terjadi pada *flowline* A2 dapat dilihat pada **Gambar 9** untuk ujung awal dan **Gambar 10** untuk ujung akhir.



Gambar 9 Perpindahan yang terjadi di ujung awal *flowline* A2.

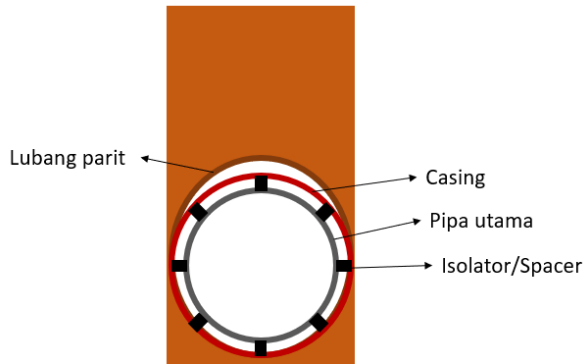


Gambar 10 Perpindahan yang terjadi di ujung akhir *flowline* A2.

Besar *end expansion* pada ujung awal adalah -1040 mm dan ujung akhir adalah 882.86 mm sehingga total *end expansion* yang terjadi pada *flowline* A2 adalah -157.14 mm.

6. Analisis Road Crossing Flowline

Analisis *road crossing* dilakukan untuk mengetahui keamanan pipa saat melewati jalan seperti yang digambarkan oleh **Gambar 11**.



Gambar 11 Potongan pipa saat melewati jalan.

Analisis *road crossing* hanya dilakukan pada *flowline* A1 dengan dua kondisi, yaitu kondisi pipa tanpa *casing* dan kondisi pipa dengan *casing*. Analisis tanpa *casing* dilakukan dalam semua kondisi desain, sedangkan analisis dengan *casing* dilakukan pada kondisi operasi saja karena tidak ada tekanan internal pada *casing*. Hasil analisis *road crossing* tanpa *casing* dapat dilihat pada **Tabel 10**.

Tabel 10 Hasil analisis *road crossing* dengan parameter awal

Unity Check	Nilai		
	Instalasi	Hidrotes	Operasi
Tebal dinding 7.14 mm			
Tegangan Barlow	0	0.87	0.58
Tegangan efektif	0.49	1.08	0.85
Fatigue girth weld	0.3		
Fatigue longitudinal weld	0.22		

Berdasarkan hasil analisis tanpa *casing*, diperoleh bahwa *flowline* A1 mengalami kegagalan pada saat kondisi hidrotes karena *unity check* melebihi 1 sehingga tebal dinding dipertebal menjadi 8.38 m atau diperlukan *casing* untuk perlindungan. Hasil analisis *road crossing* tersebut dapat dilihat pada **Tabel 11**.

Tabel 11 Hasil analisis *road crossing* tanpa dan dengan *casing*.

Unity check (UC < 1)	Nilai		
	Instalasi	Hidrotes	Operasi
Tebal dinding 8.38 mm (kondisi tanpa casing)			
Tegangan Barlow	0	0.74	0.5
Tegangan efektif	0.48	0.96	0.77
Fatigue girth weld	0.27		
Fatigue longitudinal weld	0.19		
Casing diameter 14 inchi dengan tebal 9.53 mm (kondisi dengan casing)			
Tegangan efektif	-	-	0.24
Fatigue girth weld	-	-	0.31
Fatigue longitudinal weld	-	-	0.26

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil desain dan analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Material yang digunakan untuk *flowline* A1 dan A2 adalah pipa baja dengan mutu X65 yang dilapisi dengan material *cladding* Incoloy 825 dan lapisan anti korosi eksternal 3LPP.
2. Ketebalan dinding pipa adalah 7.14 mm untuk *flowline* A1 dan 8.74 mm untuk *flowline* A2.
3. Bentuk *concrete weight support* yang digunakan untuk *onshore flowline* adalah kubus. Panjang rusuk kubus beton untuk *flowline* A1 adalah 0.53 m, sedangkan *flowline* A2 tidak memerlukan kubus beton. *Settlement* akibat beban *support* pada *flowline* A1 yang terjadi sebesar 3.72 mm sehingga tidak mengakibatkan pipa mengenai tanah dan harus dilakukan perhitungan *free span*. Jarak antara *support* pada *flowline* A1 adalah 12.2 m sesuai dengan *free span* izin yaitu, 31.3 m.
4. Panjang *end expansion* yang terjadi pada *onshore flowline* adalah 391.2 mm untuk *flowline* A1 dan 411.8 mm untuk *flowline* A2. Panjang VAP untuk *flowline* A1 adalah 363.47 m dan *flowline* A2 adalah 488.48 m.
5. *Flowline* A2 merupakan *flowline* yang memiliki rute dekat dengan permukiman sehingga rawan menyebabkan dampak besar apabila terjadi kerusakan. Oleh karena itu, dilakukan *pipeline stress analysis* pada *flowline* tersebut dengan program CAESAR II. Berdasarkan hasil analisis dari CAESAR II, diperoleh bahwa tegangan yang terjadi pada *flowline* A2 memenuhi kriteria syarat aman sesuai ASME B31.8. Selain itu, diperoleh besar *end expansion* berdasarkan CAESAR II sebesar -157.14 mm.
6. *Flowline* A1 merupakan *flowline* dengan rute yang melewati jalan raya. Untuk melindungi *flowline* agar tidak gagal pada saat melewati jalan raya, dapat dipertebal dinding pipa pada bagian yang melewati

jalan raya menjadi 8.38 mm atau dapat dilindungi dengan *casing* yang terbuat dari pipa baja bermutu API 5L *Grade B* dengan diameter 14 inci dan tebal 9.53 mm. Namun, penggunaan *casing* menjadi rekomendasi karena pemasangan *casing* pada pipa lebih mudah dibandingkan menambah tebal dinding pipa pada bagian yang melewati jalan.

Adapun saran yang dapat disampaikan selama pengerjaan Tugas Akhir agar diperoleh hasil yang komprehensif adalah sebagai berikut.

1. Dalam *pipeline stress analysis*, sebaiknya panjang elemen dapat lebih diperpendek lagi agar perhitungan menjadi lebih teliti.
2. Dalam desain *concrete weight support*, sebaiknya perlu dilakukan pemodelan arus sungai agar mendekati dengan realitanya.

DAFTAR PUSTAKA

- American Petroleum Institute (2007): *Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways* (API RP 1102), API Publication Service, Washington.
- American Petroleum Institute (2018): *Line Pipe* (API 5L), API Publication Service, Washington.
- American Society for Testing and Materials (1999a): *Standard Specification for Nickel-Iron-Chromium-Molybdenum-Copper Alloy (UNS N08825 and N08221) Seamless Pipe and Tube* (ASTM B423), ASTM, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials (1999b): *Standard Specification for UNS N08904, UNS N08925, and UNS N08926 Seamless Pipe and Tube* (ASTM B677), ASTM, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials (2000): *Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes* (ASTM A276), ASTM, Pennsylvania.
- American Society of Mechanical Engineers (2018a): *Gas Transmission and Distribution Piping Systems* (ASME B31.8), ASME, New York.
- American Society of Mechanical Engineers

- (2018b): *Process Piping* (ASME B31.3), ASME, New York.
- American Society of Mechanical Engineers (2018c): *Welded and Seamless Wrought Steel Pipe* (ASME B36.10M), ASME, New York.
- Bai, Q., and Bai, Y. (2014): *Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation*, Elsevier Science, Oxford.
- British Standard (2011): *Petroleum and natural gas industries - External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems, Part 1: Polyolefin coatings (3-layer PE and 3-layer PP)* (BS EN ISO 21809-1), BSI Standards Publication, London.
- Das, B. M. (2015): *Principles of Foundation Engineering* (Eighth), Cengage Learning, Boston.
- Det Norske Veritas (1981): *Rules of Submarine Pipeline Systems* (DNV 1981), Veritas Offshore Technology and Services A/S, Oslo.
- Det Norske Veritas (1988): *On-Bottom Stability Design of Submarine Pipeline* (DNV RP E305), Veritas Offshore Technology and Services A/S, Oslo.
- Hadihardaja, J. (1997): *Rekayasa Fundasi II: Fundasi Dangkal dan Fundasi Dalam*, Gunadarma, Jakarta.
- Hernawan, U., Prasetyo, F. B., and Risdianto, R. K. (2020): Numerical modeling of abrasion hazard in Senindara River, Bintuni Bay, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **429**. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012008>
- Hexagon AB (2020): B31.8 • CAESAR II Users Guide (2019 Service Pack 1) • Reader • PPM Documentation, retrieved July 4, 2020, from internet: <https://docs.hexagonppm.com/reader/O04dxcwMfibZIK1cyksZvQ/LEUszCC0dmi58jzep0JAZg>.
- Smith, P. R., and Van Laan, T. J. (1987): *Piping and Pipe Support Systems: Design and Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Society of Automotive Engineers, and American Society for Testing and Materials (1999): *Metals & Alloys in the Unified Numbering System* (Handbook Supplements Series), Society of Automotive Engineers, Pennsylvania.
- Stewart, M. (2016): *Surface Production Operations: Facility Piping and Pipeline Systems*, Gulf Professional Publishing, Elsevier, Oxford, **III**.
- Taufik, A. (2004): *Designing Pipeline and Managing Risk for Better Life: Class 4 - Pipeline Material Selection for Pipeline*.