

ANALISIS FATIGUE PADA BENTANG BEBAS PIPA BAWAH LAUT

Fathur Rizki¹ dan Rildova²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,

Jalan Ganesha 10 Bandung 40123

[¹fathurizki@gmail.com](mailto:fathurizki@gmail.com) dan [²rildova@ocean.itb.ac.id](mailto:rildova@ocean.itb.ac.id)

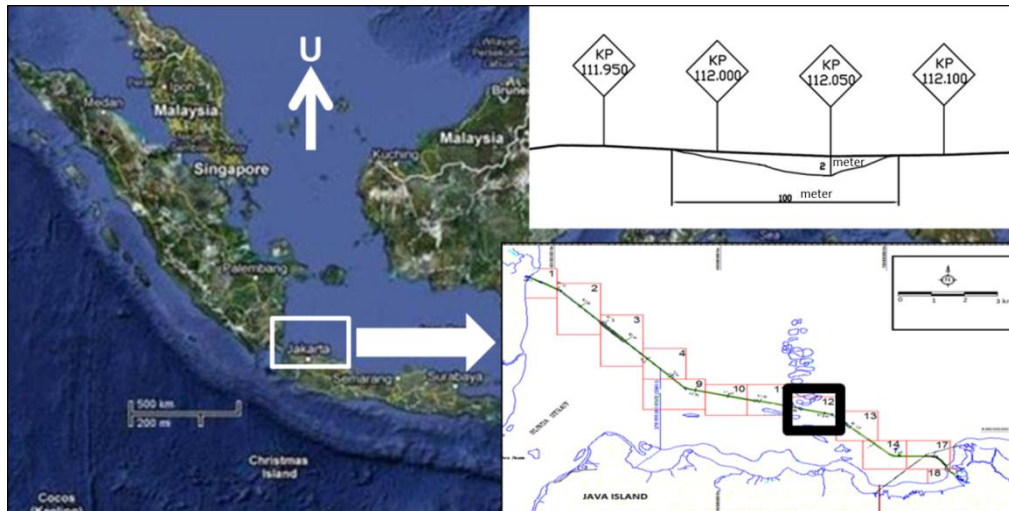
ABSTRAK

Fatigue merupakan bentuk dari kegagalan yang terjadi pada struktur akibat beban dinamik yang terjadi dalam waktu lama dan berulang-ulang. Fenomena *fatigue* pada jaringan pipa bawah laut umumnya terjadi pada bentang bebas (*free span*) akibat gaya gelombang maupun gaya arus yang mengenai pipa. Ketika gelombang dan arus mengenai pipa maka pipa akan mengalami getaran akibat adanya *vortex*, dalam kasus ini biasa disebut VIV (*vortex induced vibration*). Semakin panjang suatu bentang bebas pada pipa bawah laut, maka semakin cepat fenomena *fatigue* terjadi. Untuk mengatasi hal ini, biasanya panjang pipa yang menggantung diperpendek dengan menambah supporting pada bentang bebas. Pipa yang sudah ditambahkan supporting harus memenuhi umur desain yang direncanakan. Studi analisis *fatigue* ini dilakukan pada jalur pipa bawah laut Labuhan Maringgai – Muara Bekasi dengan mengecek ketebalan dinding pipa dengan menggunakan DNV OS F101, mengecek kestabilan pipa di dasar laut menggunakan DNV RP E305, mencari panjang bentang bebas izin (statik dan dinamik) menggunakan DNV 1981, dan menghitung umur *fatigue* yang terjadi pada bentang bebas dengan panjang 100 meter menggunakan DNV RP F105. Dari hasil studi didapatkan bahwa pipa membutuhkan *buckle arrestor* ketika pengoperasiannya, pipa sudah stabil pada arah vertikal dan lateral dengan pemberat selimut beton setebal 60 mm, namun dengan panjang bentang bebas 100 meter pipa tidak memenuhi kriteria desain selama 20 tahun. Setelah dilakukan mitigasi dengan menambah supporting pada bentang bebasnya, dapat disimpulkan bahwa panjang bentang bebas maksimal agar memenuhi kriteria desain sebesar 95 meter.

Kata Kunci: *fatigue*, VIV (*vortex induced vibration*), *free span*

PENDAHULUAN

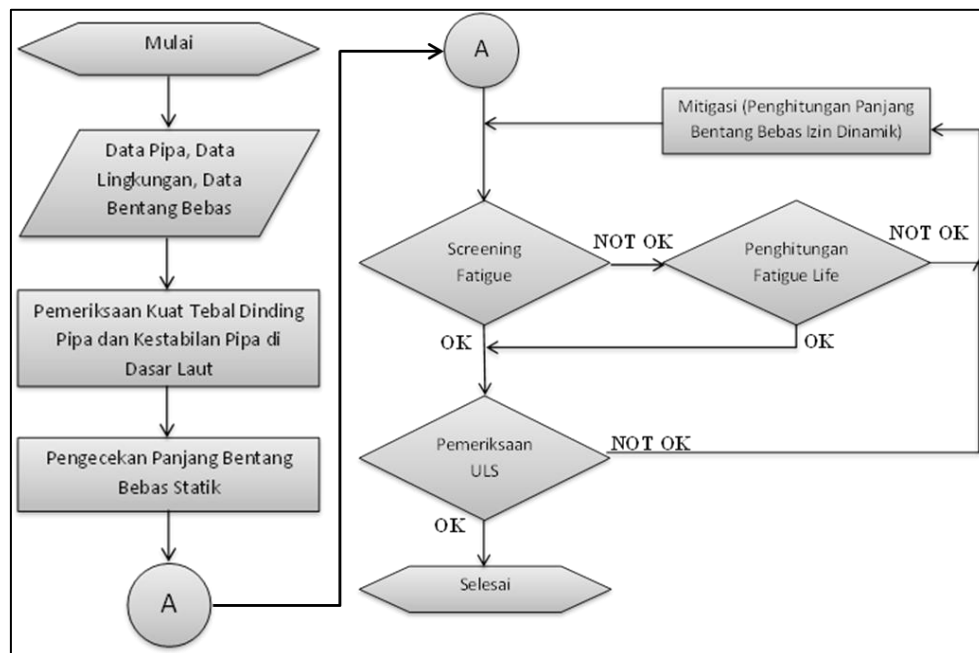
Kegiatan eksplorasi energi hidrokarbon di laut sebagai sarana pemenuhan energi bagi umat manusia memerlukan infrastruktur dalam melakukan kegiatannya. Salah satu infrastruktur yang digunakan dalam kegiatan eksplorasi di laut adalah jaringan pipa bawah laut. Adanya bentang bebas (*free span*) pada jalur pipa bawah laut dapat menyebabkan pipa terekspos aliran arus dekat dasar laut. Pipa yang terekspos dapat mengalami kelelahan (*fatigue*) pada struktur pipa akibat VIV (*Vortex Induced Vibration*). Tujuan dari studi yang dilakukan diantaranya untuk mengecek ketebalan dinding pipa, mengecek kestabilan pipa di dasar laut, menganalisis fenomena *fatigue* dengan mencari umur operasi pipa, dan menemukan panjang bentang bebas maksimal yang dapat memenuhi kriteria umur desain pipa. Pada jalur pipa bawah laut Labuhan Maringgai (Lampung) – Muara Bekasi (Jawa Barat) yang mengalirkan material gas, terdapat bentang bebas sepanjang 100 meter pada kedalaman perairan 60 meter yang memiliki potensi terjadinya *fatigue* dibawah umur desain, berlokasi diantara rentang kilometer point 111.98 sampai kilometer point 112.08 seperti pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Lokasi bentang bebas pada studi kasus

TEORI DAN METODOLOGI

Secara umum, metodologi studi analisis *fatigue* pada bentang bebas pipa bawah laut dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Bagan alir studi kasus

Tahapan pertama desain pipa bawah laut yaitu desain tebal dinding pipa seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1) sampai persamaan (5) berdasarkan DNV OS F101 *Submarine Pipeline Systems*.

a. Pengecekan *pressure containment*,

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

Dimana:

P_i = tekanan lokal insidental (Pa) γ_m = faktor daya tahan material
 P_e = tekanan eksternal (Pa) γ_{sc} = *safety class factor*
 P_b = *pressure containment* (Pa)

b. Pengecekan *system collapse*,

$$P_e - P_{min} \leq \frac{P_c}{\gamma_{sc} \cdot \gamma_m} \quad (2)$$

Dimana:

P_c = tahanan collapse (Pa) P_{min} = tekanan internal minimum (Pa)

c. Pengecekan *propagation buckling*,

$$P_e < \frac{P_{pr}}{(\gamma_m \cdot \gamma_{sc})} \quad (3)$$

Dimana:

P_{pr} = tekanan propagasi (Pa)

d. Pengecekan *combined loading*,

Kondisi tekanan internal berlebih,

$$\left\{ \left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{P_i - P_e}{\alpha_c \cdot P_b} \right)^2 \right\} \leq 1 \quad (4)$$

Kondisi tekanan eksternal berlebih,

$$\left\{ \left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{P_e - P_{min}}{P_c} \right)^2 \right\} \leq 1 \quad (5)$$

Dimana:

M_{sd} = momen tekuk desain (N.m) S_p = gaya aksial statis (N)
 S_{sd} = gaya aksial efektif desain (N) α_c = parameter *flow stres*
 M_p = momen statis (N.m) α_p = *pressure factor*

Tahapan selanjutnya adalah desain kestabilan di dasar laut seperti yang ditunjukkan pada persamaan (6) dan persamaan (7) berdasarkan DNV RP E305 *On Bottom Stability*.

a. Kestabilan secara vertikal,

$$\frac{[W_{sub} + B]}{B} \geq 1.1 \quad (6)$$

Dimana:

W_{sub} = massa terendam pipa (kg/m) B = gaya apung (kg/m)

b. Kestabilan secara horizontal,

$$W_{sub} \geq \left[\frac{F_D + F_I + \mu \cdot F_L}{\mu} \right] \cdot F_w \quad (7)$$

Dimana:

F_D = gaya seret (kg/m) F_w = faktor kalibrasi
 F_I = gaya inersia (kg/m) μ = faktor friksi tanah
 F_L = gaya angkat (kg/m)

Desain bentang bebas izin dilakukan terhadap dua kondisi yaitu pada kondisi statik dan pada kondisi dinamik seperti yang ditunjukkan pada persamaan (8) dan persamaan (9) berdasarkan DNV 1981 *Rules for Submarine Pipeline Systems*.

a. Panjang bentang bebas izin statik,

$$L_{static} = \sqrt{\frac{16 \cdot I \cdot \sigma_{max}}{W \cdot OD}} \quad (8)$$

Dimana:

I = momen inersia pipa baja (m^4) σ_{max} = bending stress maksimum (Pa)
 W = massa total pipa (kg/m) OD = diameter luar pipa baja (mm)

b. Panjang bentang bebas izin dinamik,

$$L_{dinamik} = \left(C_1 \cdot \left(\frac{E \cdot I}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{D_{tot} \cdot V_{R,onset}}{U_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Dimana:

C_1 = koefisien kondisi perletakan $V_{R,onset}$ = nilai onset untuk pengurangan kecepatan
 E = modulus young pipa baja (Pa)
 D_{tot} = diameter terluar pipa (mm) m_e = massa pipa di udara
 U_c = kecepatan arus rata-rata

Pengecekan *screening fatigue* dilakukan terhadap arah *in line* dan *cross flow* ditunjukkan pada persamaan (10) dan persamaan (11) berdasarkan DNV RP F105 *Free Spanning Pipelines*.

a. Kriteria *screening fatigue* arah *in line*,

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100year}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_{tot}} \cdot \left(1 - \frac{L/D_{tot}}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (10)$$

Dimana:

$f_{n,IL}$ = frekuensi natural arah *in line* (Hz) $U_{c,100year}$ = kecepatan arus pada kedalaman pipa (periode ulang 100 tahun) (m/s)
 γ_{IL} = faktor screening arah *in line*
 L = panjang bentang bebas pipa (m)
 α = rasio aliran
 $V_{IL,R,onset}$ = nilai onset untuk pengurangan kecepatan dalam arah *in line*

b. Kriteria *screening fatigue* arah *cross flow*,

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100year} + U_{w,1year}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_{tot}} \quad (11)$$

Dimana:

$U_{w,1year}$ = kecepatan aliran yang dipengaruhi gelombang pada kedalaman pipa dengan periode ulang 1 tahun (m/s) $V_{CF,R,onset}$ = nilai onset untuk pengurangan kecepatan dalam arah *cross flow*
 $f_{n,CF}$ = frekuensi natural *cross flow* (Hz)
 γ_{CF} = faktor screening arah *cross flow*

Pada pengecekan *fatigue*, perlu dilakukan perhitungan *fatigue damage* dan perhitungan umur *fatigue* seperti yang ditunjukkan pada persamaan (12) dan persamaan (13) berdasarkan DNV RP F105 *Free Spanning Pipelines*.

a. *Fatigue damage*,

$$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq \alpha_{fat} \quad (12)$$

Dimana:

N_i = jumlah siklus yang terjadi dalam sampai mengalami kegagalan α_{fat} = rasio *fatigue damage* yang diperbolehkan
 n_i = jumlah siklus yang terjadi dalam blok tegangan

b. Umur *fatigue*,

$$T_{life} = \frac{1}{\sum \left(\frac{f_v \cdot S_i^m \cdot P_i}{\bar{a}} \right)} \quad (13)$$

Dimana:

f_v = frekuensi vibrasi (Hz) S_i = range tegangan

P_i = probabilitas aliran arus/gelombang
 m = konstanta eksponen

$\bar{a}$ = konstanta eksponen

Tahapan terakhir dalam analisis *fatigue* adalah pengecekan ULS (*Ultimate Limit State*) seperti yang ditunjukkan pada persamaan (14) dan persamaan (15) berdasarkan DNV OS F101 *Submarine Pipeline Systems*.

Kondisi tekanan internal berlebih,

$$\left\{ \left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{P_i - P_e}{\alpha_c \cdot P_b} \right)^2 \right\} \leq 1 \quad (14)$$

Kondisi tekanan eksternal berlebih,

$$\left\{ \left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{Sd}|}{\alpha_c \cdot M_p} + \left\{ \frac{\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot S_{Sd}}{\alpha_c \cdot S_p} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{P_e - P_{min}}{P_c} \right)^2 \right\} \leq 1 \quad (15)$$

HASIL DAN ANALISIS

Hasil perhitungan desain tebal dinding pipa dengan tebal pipa baja sebesar 15.875 mm dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Hasil Perhitungan Tebal Dinding Pipa

Kriteria	Ketebalan Pipa (15.875 mm)	Ketebalan Pipa + Buckle Arrestor (19.05 mm)
<i>Pressure Containment</i>	OK	OK
<i>System Collapse</i>	OK	OK
<i>Combined Loading</i>	OK	OK
<i>Propagation Buckling</i>	NOT OK	OK

Berdasarkan **Tabel 1**, dapat disimpulkan bahwa ketebalan pipa 15.875 mm tidak memenuhi kriteria *propagation buckling*, kriteria *propagation buckling* dapat terpenuhi setelah ditambah *buckle arrestor* sehingga ketebalannya sebesar 19.05 mm. Hasil perhitungan kestabilan pipa dengan ketebalan selimut beton sebesar 60 mm dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Kestabilan Vertikal Pipa

Kondisi	$\frac{[W_{sub} + B]}{B}$	Keterangan
Instalasi	1.113	OK
Hydrotest	1.813	OK
Operasional	1.147	OK

Tabel 3 Hasil Perhitungan Kestabilan Lateral Pipa

Kondisi	Massa Terendam Pipa (kg/m)	Massa Izin Pipa (kg/m)	Keterangan
Instalasi	79.682	12.389	OK
Hydrotest	575.485	12.389	OK
Operasional	103.867	102.742	OK

Berdasarkan **Tabel 2** dan **Tabel 3**, dapat disimpulkan bahwa pipa sudah stabil pada arah vertikal dan horizontal dengan tebal delimit beton sebesar 60 mm. Panjang bentang bebas izin statik dan panjang bentang bebas izin dinamik dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Panjang Bentang Bebas Izin

Kondisi	Panjang Bentang Izin Statik (m)	Panjang Bentang Izin Dinamik (m)	
		<i>In Line</i>	<i>Cross Flow</i>
Instalasi	166.30	45.831	76.002
Hydrotest	64.328	44.312	70.701
Operasional	152.86	45.645	75.694

Berdasarkan **Tabel 4**, dapat disimpulkan bahwa panjang bentang pada studi kasus sebesar 100 meter memenuhi kriteria panjang bentang bebas statik (152.86 meter), namun tidak memenuhi kriteria panjang bentang bebas dinamik sehingga perlu dilakukan pengecekan *screening fatigue*. Hasil pengecekan *screening fatigue* dengan panjang bentang bebas sebesar 100 m dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Hasil Pengecekan *Screening Fatigue*

Kondisi	<i>In Line</i>			<i>Cross Flow</i>		
	Frekuensi Natural (Hz)	Frekuensi VIV (Hz)	Keterangan	Frekuensi Natural (Hz)	Frekuensi VIV (Hz)	Keterangan
Instalasi	0.218	0.273	NOT OK	0.219	0.173	OK
Hydrotest	0.201	0.273	NOT OK	0.202	0.173	OK
Operasional	0.228	0.273	NOT OK	0.229	0.173	OK

Berdasarkan **Tabel 5**, dapat disimpulkan bahwa pipa tidak memenuhi kriteria *screening fatigue* arah *in line* sehingga perlu dilakukan perhitungan *fatigue*. Hasil perhitungan *fatigue damage* dan perhitungan umur *fatigue* dengan dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6 Hasil Perhitungan *Fatigue Damage* dan Umur *Fatigue*

Panjang Bentang (m)	Akumulasi <i>Fatigue Damage</i>	Umur <i>Fatigue</i> (tahun)
100	1.329	15.045
99	1.258	15.904
98	1.185	16.873
97	1.113	17.969
96	1.041	19.215
95	0.969	20.636
94	0.898	22.264
93	0.829	24.138
92	0.760	26.306
91	0.694	28.828
90	0.629	31.778
89	0.567	35.252
88	0.508	39.372
87	0.452	44.292
86	0.398	50.215

Berdasarkan **Tabel 6**, dapat disimpulkan bahwa dengan panjang bentang bebas sebesar 95 meter sudah memenuhi umur desain pipa (20 tahun). Hasil pengecekan ULS (*Ultimate Limit State*) dengan panjang bentang bebas sebesar 95 m dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Hasil Peengecekan ULS

Kondisi	Keterangan
Instalasi	OK
Hydrotest	OK
Operasional	OK

Berdasarkan **Tabel 7**, dapat disimpulkan bahwa dengan panjang bentang bebas sebesar 95 meter pipa sudah memenuhi kriteria ULS.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi kasus dan analisis, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pemeriksaan *wall thickness*, ketebalan pipa yang dibutuhkan agar memenuhi kriteria *pressure containment*, *system collapse*, *combined loading* dan *propagation buckling* adalah sebesar 19.05 mm.

2. Pada pemeriksaan kestabilan bawah laut, ketebalan beton sebesar 60 mm sebagai pemberat untuk melapisi pipa baja sudah memenuhi kriteria kestabilan arah vertikal dan kestabilan arah horizontal.
3. Pada perhitungan panjang bentang bebas izin statik, panjang bentang pada studi kasus sebesar 100 meter mampu menahan massa pipa beserta konten yang dialirkan yaitu gas, akan tetapi tidak mampu menahan massa pipa apabila konten yang dialirkan air.
4. Pada pemeriksaan *screening fatigue*, panjang bentang bebas sebesar 100 meter tidak memenuhi kriteria *screening fatigue* pada arah *in line* sehingga umur *fatigue* akan kurang dari 50 tahun.
5. Pada perhitungan *fatigue damage* akibat arus selama masa operasional, besarnya nilai akumulasi *fatigue damage* melebihi 1, yaitu sebesar 1.329 sehingga umur *fatigue* akan kurang dari umur desain pipa.
6. Pada perhitungan umur *fatigue* selama masa operasional, besarnya umur *fatigue* yang didapatkan selama 15.045 tahun sehingga tidak memenuhi umur desain pipa selama 20 tahun dan perlu dilakukan mitigasi.
7. Mitigasi yang dilakukan yaitu dengan menambah supporting pada bentang bebas tersebut sehingga panjang bentang bebas terpanjang kurang dari 100 meter.
8. Berdasarkan hasil pengecekan *fatigue damage* dan umur *fatigue* pada bentang bebas yang sudah diberikan supporting, bentang bebas dengan panjang 95 meter sudah memenuhi kriteria *fatigue damage* (kurang dari 1) dan memenuhi umur desain pipa (20 tahun).
9. Pada pemeriksaan ULS (*ultimate limit state*) dengan panjang bentang bebas 95 meter sudah memenuhi kriteria, pipa dapat menahan seluruh gaya internal dan eksternal yang bekerja.
10. Panjang bentang bebas maksimal yang digunakan agar memenuhi seluruh kriteria (instalasi, hidrotest, dan operasional) adalah sebesar 64.328 meter.

DAFTAR PUSTAKA

- Det Norsk Veritas (DNV), "*Rules for Submarine Pipeline Systems*", Oslo, 1981
- Det Norsk Veritas (DNV) Offshore Standard (OS) F101, "*Submarine Pipeline Systems*", Oslo, October 2010
- Det Norsk Veritas (DNV) Recommended Practice (RP) E305, "*On Bottom Stability*", Oslo, October 1988
- Det Norsk Veritas (DNV) Recommended Practice (RP) F105, "*Free Spanning Pipelines*", Oslo, February 2006