

Desain dan Analisis *Fatigue* Pada Bentang Bebas Pipa Bawah Laut

Muhammad Ikhsan Dwianto

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan, FTSL, ITB

mikhsand@gmail.com

Kata Kunci: Pipeline, Freespan, Fatigue, Response Model, Force Model

Daftar Simbol

$\bar{a}$	= Konstanta eksponen kurva pada S-N
$f_{n,IL}$	= Frekuensi eigen ke-n bentang <i>in-line</i>
$f_{n,CF}$	= Frekuensi natural <i>cross-flow</i>
f_v	= Frekuensi vibrasi
M_d	= Bending moment
M_p	= Moment plastic capacities
m	= Konstanta eksponen kurva pada S-N
P_c	= Tekanan <i>collapse</i>
P_b	= <i>Burst pressure</i>
P_i	= Tekanan internal maksimum
P_e	= Tekanan eksternal
P_{min}	= Tekanan internal minimum
P_{ci}	= Probabilitas dari aliran yang bekerja pada pipa
S_{eff}	= Gaya aksial efektif
S_i	= <i>Stress range</i>
S_p	= Axial plastic capacities
T_{life}	= Kapasitas desain umur <i>fatigue</i>
$T_{exposure}$	= Masa kerja beban
$U_{c,100year}$	= Kecepatan arus periode ulang 100 tahun

$U_{w,1year}$ = Kecepatan partikel air akibat gelombang periode ulang 1 tahun

$V_{R,onset}^{IL}$ = Kecepatan arah *in-line* tereduksi

$V_{R,onset}^{CF}$ = Kecepatan arah *cross-flow* tereduksi

$\bar{\alpha}$ = Rasio aliran arus = $\frac{U_{c,100\ year}}{U_{w,1\ year} + U_{c,100\ year}}$

α_c = *Flow stress parameter*

γ_m = Faktor daya tahan material

γ_{SC} = *Safety Class Factor*

γ_{IL} = Faktor keamanan untuk kriteria *in-line screening*

γ_{CF} = Faktor keamanan untuk kriteria *cross-flow screening*

η = Rasio *fatigue damage* yang diperbolehkan

PENDAHULUAN

Scouring dan pergerakan pipa dapat menimbulkan bentang bebas pada pipa bawah laut. Panjang bentang bebas yang melebihi batas aman dapat menyebabkan kerusakan pada pipa. Bentang bebas pipa bawah laut yang tertumpu dapat menimbulkan beban statik dan dinamik pada pipa. Beban statik meliputi berat sendiri pipa, sementara beban dinamik meliputi gaya yang timbul akibat *vortex induced vibration* dan beban gelombang langsung.

Untuk mencegah terjadinya kegagalan akibat beban yang timbul karena bentang bebas, diperlukan analisis terhadap setiap bentang. Berbagai metode analisis dapat dilakukan. Salah satu diantaranya adalah pemodelan numerik. Dalam praktiknya biasanya digunakan standar DNV-RP-F105 untuk analisis bentang bebas pipa bawah laut. Namun, keterbatasan penjelasan pada dokumen dan tidak adanya alur serta asumsi-asumsi yang harus digunakan terkadang menimbulkan ketidakpastian dalam proses perhitungan.

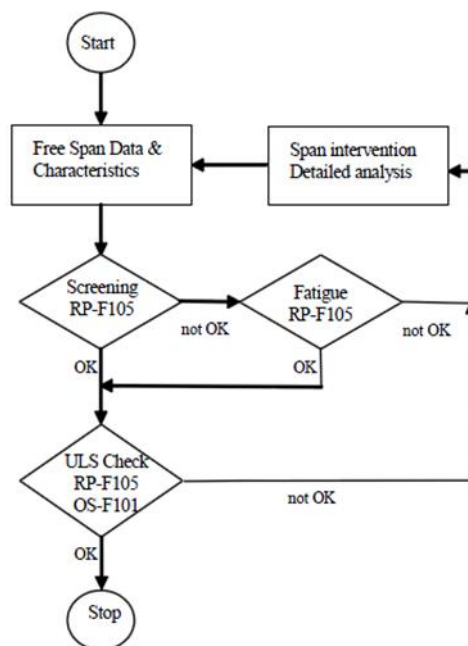
Hadirnya perangkat lunak penghitung umur *fatigue* juga memiliki keterbatasan, seperti tidak dapat diaksesnya hasil analisis secara terperinci. Perangkat lunak penghitung umur *fatigue* yang penulis gunakan hanya menampilkan hasil akhir berupa *fatigue damage* dan umur *fatigue*. Terbatas jika ingin mengakses data dari proses perhitungan yang tidak ditampilkan oleh perangkat lunak.

Oleh karena itu, penulis mencoba melihat alur kerja dari perangkat lunak tersebut kemudian menyusun ulang dalam program pengolah angka yang dapat diakses secara terbuka sesuai dengan keinginan pengguna.

TEORI DAN METODOLOGI

Pada tugas akhir ini dilakukan analisis terhadap bentang bebas pipa bawah laut sesuai dengan standar pada DNV RP F105. Namun, sebelum memulai analisis bentang bebas, terlebih dahulu dilakukan desain ulang pipa untuk menentukan tebal dinding pipa dan tebal selimut beton. Desain tebal dinding pipa dilakukan dengan mengikuti kriteria yang ditetapkan pada DNV OS F101. Sedangkan tebal selimut beton ditentukan sesuai dengan kriteria pada DNV RP F109

Setelah melakukan desain ulang pipa, dilakukan analisis bentang bebas dengan menggunakan *respon model* dan *force model*. Berdasarkan kriteria pada DNV RP F105, analisis *fatigue* dibagi menjadi 3 tahap, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Analisis Bentang Bebas

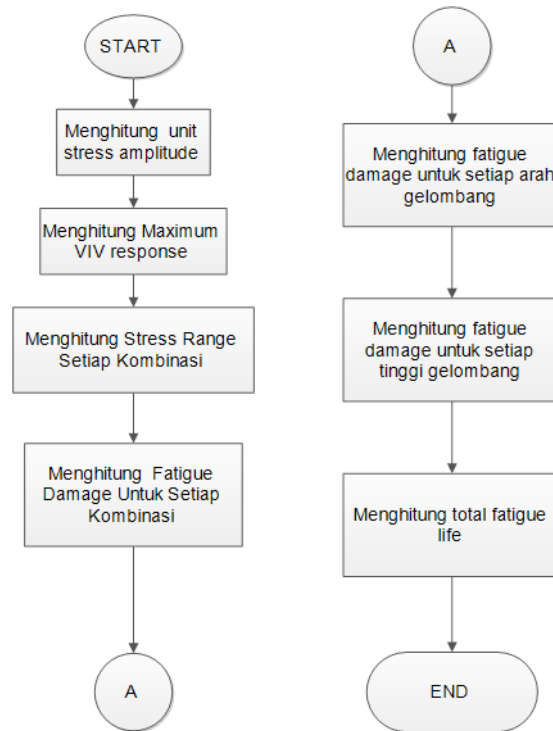
Tahap pertama adalah analisis *screening fatigue* yang bertujuan untuk membandingkan frekuensi natural pipa dengan frekuensi VIV arah *in line* dan *cross flow*. Kriteria yang digunakan dapat dilihat pada persamaan (1), (2), dan (3).

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

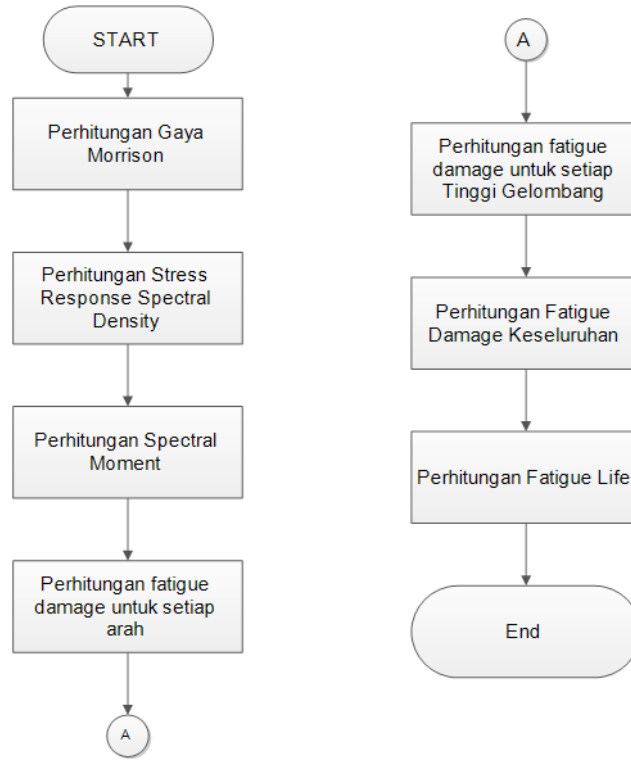
$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100year} + U_{w,1year}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D} \quad (2)$$

$$\frac{U_{c,100year}}{U_{w,1year} + U_{c,100year}} > \frac{2}{3} \quad (3)$$

Setelah melalui tahap *screening fatigue*, kemudian dilakukan analisis *fatigue* pada bentang tak lolos kriteria *screening*. Analisis *fatigue* dibagi menjadi dua, yaitu analisis *response model* dan *force model*. Analisis *response model* digunakan untuk mendapatkan amplitudo respon pipa terhadap VIV. Sedangkan *force model* digunakan untuk mendapatkan amplitudo respon pipa terhadap gaya gelombang (Morison). Diagram alir perhitungan *response model* dan *force model* disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2 Diagram Alir Perhitungan *Response Model*



Gambar 3 Diagram Alir Perhitungan *Force Model*

Kriteria *fatigue* yang harus dipenuhi, ditunjukkan pada persamaan (4)

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

Besarnya kapasitas desain umur *fatigue* dapat dihitung menggunakan persamaan (5)

$$T_{life} = \frac{1}{\sum \left(\frac{f_v \cdot S_i^m \cdot P_{ci}}{\bar{a}} \right)} \quad (5)$$

Setelah melalui tahap *screening* dan analisis *fatigue*, dilanjutkan dengan analisis *ultimate limit state* (ULS). Analisis ULS dilakukan apabila pipa sudah dinyatakan memenuhi kriteria *fatigue*. Analisis ini bertujuan membandingkan kapasitas kekuatan pipa terhadap beban yang bekerja padanya. Kriteria lolos dari analisis ini dapat dilihat pada persamaan (6) dan (7).

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \gamma_m \cdot \frac{\gamma_{sc} \cdot S_{sd}}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{p_e - p_{min}}{p_c(t_2)} \right)^2 \leq 1 \quad (6)$$

$$\left\{ \gamma_m \cdot \gamma_{sc} \cdot \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c \cdot M_p(t_2)} + \left\{ \gamma_m \cdot \frac{\gamma_{sc} \cdot S_{sd}(p_i)}{\alpha_c \cdot S_p(t_2)} \right\}^2 \right\}^2 + \left(\alpha_p \cdot \frac{p_i - p_e}{\alpha_c \cdot p_b(t_2) \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}} \right)^2 \leq 1 \quad (7)$$

HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan hasil perhitungan, didapat nilai 0.02055 meter untuk tebal dinding pipa. Nilai tersebut dapat memenuhi kondisi pipa pada tekanan internal berlebih, tekanan eksternal berlebih, *local buckling*, serta *propagation buckling*. Nilai tersebut kemudian disesuaikan dengan standar tebal dinding pipa pada API 5L *Specification for Linepipe*. Kemudian dipilih tebal dinding pipa sebesar 0.0222 meter. Hasil desain tebal dinding pipa untuk semua kriteria dan kondisi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Desain Tebal Dinding Pipa

Zona	Tebal Dinding Pipa (meter)								
	Internal Pressure Containment		Local Buckling - External Overpressure	Propagation Buckling			Local Buckling - Combined Loading Criteria		
	Operation	Hydrotest	Installation	Operation	Hydrotest	Installation	Operation	Hydrotest	Installation
1	0.01234	9.75E-03	0.01491	9.34E-03	6.34E-03	6.34E-03	0.009	0.0123	0.0059
2	0.01225	9.66E-03	0.01694	1.20E-02	9.02E-03	9.02E-03	0.0088	0.012	0.0074
3	0.01211	9.53E-03	0.01854	1.50E-02	1.20E-02	0.012	0.00863	0.0119	0.00885
4	0.01186	9.28E-03	0.02031	1.80E-02	1.50E-02	0.015	0.0082	0.01159	0.0108
5	0.01182	9.23E-03	0.02055	1.80E-02	1.50E-02	0.015	0.00812	0.0115	0.01107
6	0.01209	9.51E-03	0.01875	1.50E-02	1.20E-02	0.012	0.00815	0.0119	0.009085
7	0.01229	9.71E-03	0.01608	1.08E-02	7.82E-03	7.82E-03	0.0089	0.0122	0.00665
8	0.01235	9.77E-03	0.01452	8.90E-03	5.90E-03	5.90E-03	0.009	0.0123	0.00559
Maksimum	0.02055								
API 5L	0.0222								

Untuk menjaga kestabilan pipa di dasar laut, didesain tebal lapisan beton sebagai pemberat. Perhitungan dilakukan di semua zona pipa dalam kondisi penggelaran dan operasi. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Analisis *On Bottom Stability*

Kondisi	Zona	tebal concrete coating (m)	water depth (m)
Instalasi	1	0.035	6.15
	2	0.035	14.85
	3	0.035	27.59
	4	0.035	51.61
	5	0.035	55.77
	6	0.035	29.84
	7	0.035	10.38
	8	0.055	5.14
Operation	1	0.04	6.15
	2	0.04	14.85
	3	0.1	27.59
	4	0.04	51.61
	5	0.04	55.77
	6	0.07	29.84
	7	0.04	10.38
	8	0.04	5.14
Tebal terpilih		0.1	< 28 m
		0.07	> 28 m

Analisis *screening* dilakukan pada semua bentang untuk membandingkan frekuensi natural pipa dengan frekuensi VIV. Apabila bentang tidak lolos *screening*, maka dapat dikatakan bahwa pipa pada bentang tersebut akan memiliki umur *fatigue* kurang dari 50 tahun. Sehingga perlu dilakukan pengecekan umur *fatigue* agar dapat dibandingkan dengan masa layannya. Hasil analisis *screening* ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil Analisis *Screening*

NO	KP	L	Depth	Gap	In-Line	Cross-Flow
13	17.97	67	17.5	0.4	NOT OK	OK
15	45.78	48	38.8	0.3	NOT OK	OK
16	47.63	96	47.1	0.3	NOT OK	NOT OK
59	61.86	106	58.6	1	NOT OK	OK
101	73.80	44	34.4	0.8	NOT OK	OK
102	73.92	45	32.7	0.8	NOT OK	OK

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh bentang yang tidak lolos kriteria adalah bentang dengan panjang 67 meter. Namun, bentang yang lebih panjang justru lolos kriteria atau lolos dari risiko gagal *fatigue*. Hal ini disebabkan karena tidak terbentuknya VIV pada bentang tersebut.

Tabel 4 Hasil Analisis *Fatigue*

(a)

KP	h (m)	L (m)	e (m)	Zone	Uc (m/s)	Us (m/s)	alfa	fn IL	fn CF	VR IL	VR CF	KS in	KS cf
17.97	17.5	67	0.4	3	0.739	0.144	0.84	0.25	0.87	3.48	0.99	1.13	0.89
45.78	38.8	48	0.3	3	0.739	0.024	0.97	0.52	0.61	1.45	1.24	1.13	0.89
47.63	47.1	96	0.3	3	0.739	0.013	0.98	0.00	1.06	739.10	0.70	1.13	0.89
61.86	58.6	106	1	5	0.639	0.006	0.99	0.00	0.91	633.69	0.70	0.51	0.53
73.8	34.4	44	0.8	6	0.651	0.034	0.95	0.85	0.89	0.80	0.76	0.51	0.53
73.92	32.7	45	0.8	6	0.651	0.039	0.94	0.81	0.85	0.84	0.80	0.51	0.53

(b)

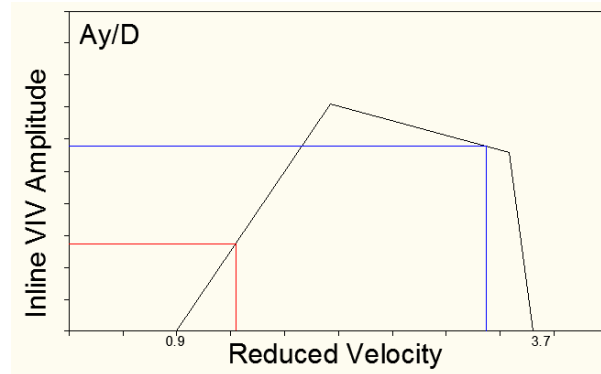
KP	h (m)	L (m)	e (m)	VR Onset IL	VR End IL	VR Onset CF	VR End CF	Flow Regime	In-Line Response Model (years)	Cross-Flow Response Model (years)	In-Line Force Model (years)
17.97	17.5	67	0.4	0.9	3.7	2.2	16	Wave dominant - Current superimposed by wave	3.34E+00	3.00E+07	3.61E+00
45.78	38.8	48	0.3	0.9	3.7	2.2	16	Current dominant	4.13E+05	3.00E+07	
47.63	47.1	96	0.3	0.9	3.7	2.2	16	Current dominant	3.00E+07	3.00E+07	
61.86	58.6	106	1	0.9	4.1	2.5	16	Current dominant	2.99E+07	2.99E+07	
73.8	34.4	44	0.8	0.9	4.1	2.5	16	Current dominant	4.30E+05	3.00E+07	
73.92	32.7	45	0.8	0.9	4.1	2.5	16	Current dominant	6.85E+04	3.00E+07	

VIV pada bentang bebas pipa bawah laut tersebut dapat terbentuk apabila memiliki *reduced velocity* (VR) pada *range* tertentu. VR sendiri merupakan fungsi dari kecepatan arus, kecepatan partikel air akibat gelombang, frekuensi natural pipa, serta diameter pipa. Kecepatan partikel air akibat arus dan gelombang pada semua bentang tidak memiliki perbedaan yang besar. Diameter pipapada semua bentang pun sama. Dengan demikian frekuensi natural lah yang memberikan pengaruh pada perbedaan VR pada satu bentang dengan bentang lain. Semakin besar frekuensi natural, VR akan semakin kecil. Begitu pula sebaliknya. Frekuensi natural pipa merupakan fungsi dari panjang bentang. Semakin panjang bentang pipa, maka frekuensi natural nya akan semakin kecil dan VR akan menjadi besar.

Untuk memperjelas, diambil contoh bentang pada KP 17.97, 45.78, dan 47.63. Ketiga bentang tersebut berada pada zona lingkungan nomor 3. Untuk membentuk VIV pada bentang pipa di zona 3, diperlukan VR *in line* minimum (VRil onset) sebesar 0.9 dan VR *in line* maksimum (VRil end) sebesar 3.7.

Berdasarkan **Error! Reference source not found.**, KP 17.97 memiliki nilai VRil sebesar 3.4, KP 45.78 sebesar 1.4, serta KP 47.63 sebesar 739. Besarnya amplitudo respon pipa akibat VIV dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar **Error! No text of specified style in**

document..4. Garis berwarna merah menunjukkan respon bentang KP 45.78, garis berwarna biru menunjukkan respon bentang KP 17.97, sementara bentang KP 47.63 tidak bisa digambarkan dalam grafik karena memiliki nilai VRil yang besar.



Gambar **Error! No text of specified style in document..4** Ilustrasi Penentuan A_Y/D

Bentang KP 17.97 memberikan respon yang lebih besar dari bentang KP 45.78. Dengan demikian, *stress range* yang dihasilkan bentang KP 17.97 juga akan lebih besar dan memberikan umur *fatigue* yang lebih pendek. Sementara bentang 47.63 memberikan respon nol. Karena memiliki nilai VRil diluar range VRil *onset* dan VRil *end*.

Pipa dengan bentang bebas yang panjang memang akan menghasilkan frekuensi natural yang kecil sehingga tidak memungkinkan terjadinya VIV. Namun, momen statik yang dihasilkan akan sangat besar. Oleh karena itu, sebaiknya dilakukan juga analisis statik pada bentang bebas sebagai salah satu rangkaian proses analisis bentang bebas.

Menurut perhitungan analisis statik, panjang bentang diizinkan adalah 85 meter. Dengan demikian, sebenarnya panjang bentang yang melebihi 85 meter harus dilakukan mitigasi. Detail perhitungan analisis statik ditampilkan dalam lampiran.

Setelah pipa dinyatakan lolos kriteria *fatigue*, perlu dilakukan pengecekan terhadap kapasitas kekuatan pipa dalam menahan beban yang bekerja. Berdasarkan hasil analisis ULS, semua bentang lolos kriteria ULS. Sehingga dapat terus menahan beban operasi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis pada lokasi studi kasus yang ditinjau, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Hasil desain ulang tebal dinding pipa yang mampu menahan tekanan internal berlebih, tekanan eksternal berlebih, *local buckling*, serta *propagation buckling* adalah 22.22 mm;
- b. Hasil desain ulang tebal lapisan beton untuk menjaga kestabilan pipa di dasar laut adalah 10 cm untuk kedalaman perairan kurang dari 28 meter dan 7 cm untuk kedalaman perairan lebih dalam dari 28 meter;
- c. Terdapat 6 bentang yang tidak lolos kriteria *screening* DNV RP F105 karena memiliki frekuensi natural lebih besar dari frekuensi VIV;
- d. Terdapat 1 bentang yang tidak lolos kriteria *fatigue* karena memiliki umur *fatigue* 3 tahun (kurang dari masa layan), yaitu pada KP 17.97 dengan panjang bentang 67 meter dan kedalaman 17.5 meter;
- e. Bentang terpanjang (106 meter) lolos kriteria *fatigue* karena memiliki *reduced velocity* yang sangat besar dan melebihi batas maksimum yang dapat menyebabkan VIV;
- f. Analisis *fatigue* dengan perangkat lunak dan program perhitungan mandiri memberikan hasil yang sama;
- g. Semua bentang lolos kriteria ULS karena memiliki rasio interaksi momen, gaya aksial, dan kapasitas tekanan kurang dari 1.

Terhadap beberapa permasalahan yang ditemui, penulis memberikan beberapa saran seperti:

- a. Sebaiknya dilakukan analisis statik sebelum melakukan *screening*.
- b. Pengembangan lebih lanjut program perhitungan analisis *fatigue* agar memungkinkan analisis multi span;
- c. Pengembangan lebih lanjut program perhitungan analisis *fatigue* agar memungkinkan input data gelombang dan arus selain dari histogram;
- d. Pengembangan lebih lanjut program perhitungan analisis *fatigue* agar memungkinkan input data gelombang dan arus dari berbagai arah dengan probabilitas kejadiannya.

DAFTAR PUSTAKA

Bai, Yong. 2005. *Subsea Pipelines and Risers*. Oxford: Elsevier.

Kyrakides, Stelios. 2007. *Mechanics of Offshore Pipelines Vol. 1: Buckling and Collapse*. Oxford: Elsevier.

Lee, Jaeyoung, P.E. 2007. *Introduction to Offshore Pipelines and Risers*.

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.

Det Norsk Veritas. 2006. DNV RP F105 *Free Spanning Pipelines*. Oslo : Veritas Offshore Technology and Services A/S.

Det Norsk Veritas. 2010. DNV RP C203 *Fatigue Design of Offshore Steel Structure*. Oslo : Veritas Offshore Technology and Services A/S.