

ANALISIS KEGAGALAN *FATIGUE* PIPA BAWAH LAUT PADA SKENARIO *NORMAL-LAY*

Shafira Anindita

Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,

Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganeca No.10, Bandung 40132

email: shafiranindita12@gmail.com

Kata kunci: *fatigue*, *fatigue life*, pipa bawah laut, *Rainflow counting*, OFFPIPE

ABSTRAK

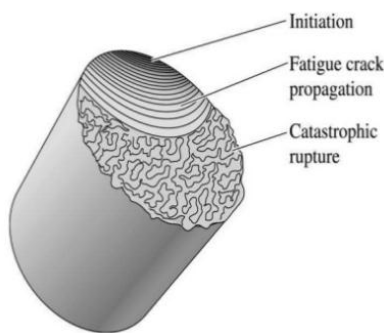
Pipa bawah laut merupakan moda transportasi yang fleksibel namun cukup rentan akan kegagalan sehingga pada proses desain perlu dipersiapkan dengan baik. Salah satu skenario krusial yang penting untuk ditinjau adalah skenario instalasi *normal lay* dimana pipa berada di posisi menggantung dari *laybarge* tanpa *support* dan dikenai beban siklik akibat arus, gelombang dan pergerakan *laybarge*. Beban siklik tersebut berpotensi menyebabkan kegagalan *fatigue* pada pipa bawah laut meskipun tegangan yang dikenai relatif rendah. Kegagalan *fatigue* umumnya diawali dengan retak awal hingga berkembang menjadi patahan permanen yang berbahaya. Untuk itu, perlu diketahui nilai kerusakan *fatigue* serta umur *fatigue* pada pipa saat dilakukan instalasi. Standar yang digunakan dalam analisis tugas akhir ini adalah DNV RP C203 untuk kegagalan *fatigue* dan DNV OS F101 untuk instalasi pipa bawah laut. Studi dilakukan dengan mensimulasikan proses instalasi pipa menggunakan perangkat lunak OFFPIPE yang memperhitungkan beban dinamik. Metoda yang digunakan untuk menghitung siklus tegangan adalah *Rainflow counting method*. Pada analisis *fatigue*, dilakukan pendekatan berbasis kurva S-N dimana posisi pipa yang ditinjau diasumsikan sebagai posisi *weld root*, kemudian dilakukan perhitungan *cumulative damage* berdasarkan teori Palmgren-Miner untuk diperoleh nilai kerusakan *fatigue* dan umur *fatigue* pipa. Selain perhitungan tersebut, pada tugas akhir ini juga dilakukan perbandingan waktu integrasi simulasi 3 jam dan 6 jam serta perbandingan umur *fatigue* di lokasi *overbend*, *sagbend* dan lokasi lain yang lebih tidak rawan kerusakan.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pipa bawah laut saat ini telah menjadi moda transportasi minyak dan gas yang terpercaya dan ekonomis selama beberapa tahun terakhir. Agar pipa dapat beroperasi dengan baik dan aman, pipa bawah laut perlu didesain dan dipersiapkan dengan tepat dalam skenario instalasi hingga operasional. Pada skenario instalasi, pipa bawah laut dikenai gelombang, arus dan pergerakan *lay barge* ketika menggantung dari *lay barge*. Beban beban tersebut terjadi berulang dan dapat menyebabkan fluktuasi tegangan, karena itu pipa berpotensi mengalami kegagalan *fatigue*. Kegagalan *fatigue* dimulai dari *crack initiation* yang bersifat mikroskopis, propagasi hingga fraktur lebih besar, lihat **Error!**

Reference source not found..



Gambar 1 Mekanisme kegagalan fatigue.

Secara ideal, observasi yang dilakukan mencakup seluruh area pipa ketika instalasi, namun *sagbend* dan *overbend* merupakan dua kurvatur pipa pada instalasi metoda S-Lay yang umumnya mengalami tegangan paling tinggi. Untuk itu umumnya secara konservatif umur *fatigue* dan kerusakan *fatigue* dapat dianalisis di kedua bagian tersebut.

Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari pengerjaan studi ini adalah memperoleh nilai tegangan pada pipa skenario *normal lay* terutama di wilayah *overbend* dan *sagbend*, serta mengetahui umur *fatigue* dan besar kerusakan *fatigue* yang dialami pipa pada skenario *normal lay*.

Ruang Lingkup

Agar studi berlangsung lebih fokus, diperlukan batasan ruang lingkup mencakup:

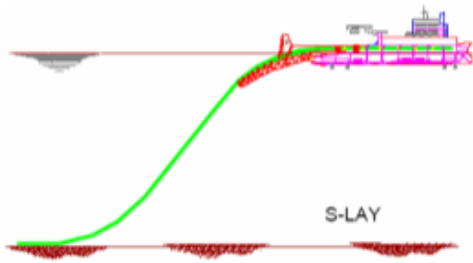
- Beban yang berkontribusi pada kegagalan *fatigue* adalah beban akibat lingkungan;
- Pada pemilihan kurva S-N, diasumsikan titik tinjauan adalah bagian *weld root*;
- Pada simulasi instalasi dinamik, arah beban gelombang yang diperhitungkan adalah 0° , 45° , 90° , 135° , 180° ;

- Waktu integrasi simulasi adalah 3 jam dan 6 jam;
- Lokasi utama untuk ditinjau adalah *overbend* dan *sagbend*;
- Perhitungan mengacu pada DNV OS F101 dan DNV RP C203.

TEORI DAN METODOLOGI

Instalasi Pipa Bawah Laut

Terdapat berbagai metoda instalasi pipa bawah laut, yang paling umum dipraktikkan adalah S-Lay, J-Lay dan Reel-Lay. Pemilihan metoda didasari berbagai faktor misalnya ketersediaan *vessel*, kedalaman perairan dan karakteristik pipa. Pipa yang menjadi obyek studi saat ini menerapkan metoda instalasi S-



Lay, ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada metoda S-Lay, pipa dilas diatas *laybarge* kemudian diturunkan ke dasar laut membentuk huruf S, pipa mengalami dua kurvatur yaitu *overbend* dan *sagbend*.

Gambar 2 Metoda instalasi S-Lay.

Terdapat kriteria tegangan mengacu pada DNV OS F101 yang harus dipenuhi pada kurvatur *sagbend* dan *overbend*. Pada *overbend*, nilai tegangan dinamik harus kurang dari 95% SMYS, sedangkan pada *sagbend* nilai tegangan dinamik harus kurang dari 87% SMYS. Jika setelah simulasi dilakukan didapati tengangan melewati nilai kriteria tegangan, maka perlu dilakukan perubahan konfigurasi *laybarge* lebih lanjut.

Beban yang Berkontribusi Pada Kegagalan *Fatigue*

Beban dinamik yang dominan sebagai penyebab kegagalan *fatigue* adalah beban akibat lingkungan. Beban akibat lingkungan diakibatkan oleh arus, gelombang dan pergerakan *laybarge*.

Arus yang tenang sebetulnya dapat dikategorikan sebagai beban statik, namun arus dapat memperkuat gaya seret yang diakibatkan oleh gelombang, hal ini dapat menimbulkan kerusakan *fatigue* yang signifikan pada pipa, sehingga arus perlu dihitung sebagai beban lingkungan pada analisis beban pipa kondisi instalasi.

Pada simulasi pipa, teori gelombang yang digunakan adalah teori gelombang Airy. Gelombang dianggap gelombang acak dengan menggunakan formula spektrum gelombang Bretschneider. Arus dan

gelombang tersebut membangkitkan gaya gelombang hidrodinamika yang kemudian dihitung dengan persamaan Morrison karena struktur memenuhi syarat $D/L < 0.2$.

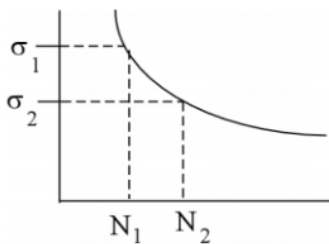
Pada aktivitas instalasi, interaksi antara *lay barge* dengan osilasi gelombang menimbulkan eksitasi *lay barge* yang juga perlu diperhitungkan sebagai beban tidak langsung penyebab *fatigue*. Untuk mengetahui pengaruh eksitasi *lay barge* pada pembebanan pipa, digunakan *Respon Amplitude Operator* (RAO) atau rasio amplitudo *lay barge* dan amplitudo gelombang.

Fenomena *Fatigue*

Kegagalan *Fatigue* adalah salah satu kegagalan material yang terjadi secara progresif akibat beban yang umumnya dibawah batas kuat leleh material namun terjadi berulang-ulang. Pada kasus pipa bawah laut, *fatigue* dapat timbul akibat beban berulang yang disebabkan oleh parameter lingkungan. Kegagalan ini berbahaya karena dapat memperpendek usia layan pipa bawah laut.

Metoda Analisis Berbasis Kurva S-N

Dalam analisis *fatigue*, menurut DNV RP C203, pendekatan paling umum dilakukan adalah pendekatan berbasis kurva S-N. Kurva S-N menggambarkan ketahanan *fatigue* material sebagai grafik tegangan siklik yang diplot terhadap jumlah siklus yang diizinkan pada besaran tegangan tertentu, ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3 Contoh kurva S-N sederhana.

Untuk memperoleh nilai kerusakan *fatigue*, perlu dihitung jumlah siklus yang diizinkan pada *range* tegangan yang terjadi menggunakan kurva S-N atau persamaan dasar kurva S-N yang diberikan sebagai berikut:

$$\log N = \log \bar{a} - m \cdot \log \Delta \sigma \quad (2)$$

Dimana:

N = jumlah *allowable cycle* $\bar{a}$ = variable kurva S-N

m = variable kurva S-N σ = stress range

Metoda Perhitungan Siklus Tegangan

Terdapat beberapa metoda siklus tegangan untuk untuk memperoleh *range* tegangan dengan jumlah siklus yang terjadi, pada tugas akhir ini metoda yang digunakan adalah *Rainflow counting method*. Metoda ini menganalogikan perhitungan sebagai aliran air yang mengalir di atas atap pagoda, kurva

range tegangan tiap waktu dianggap seperti atap pagoda. *Output* yang diperoleh dari perhitungan ini adalah sekelompok nilai *range* tegangan dengan masing-masing jumlah siklus yang terjadi.

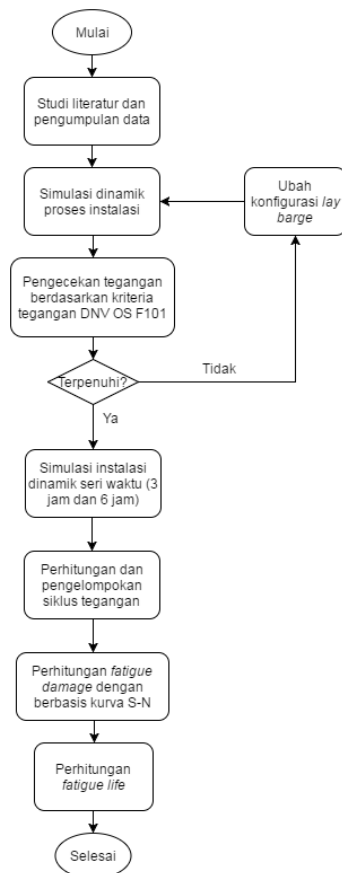
Perhitungan Kerusakan *Fatigue* dan Umur *Fatigue*

Untuk menghitung kerusakan *fatigue* total, pada kasus struktur lepas pantai cukup umum diasumsikan bahwa struktur mengalami kerusakan kumulatif. Teori ini dikenal sebagai *Palmgren-Miner's rule*. Kegagalan *fatigue* terjadi ketika nilai kerusakan kumulatif **besar sama dengan 1**.

Setelah diperoleh nilai kerusakan *fatigue*, perhitungan umur *fatigue* ditulis sebagai berikut: $F_L = 1/D$

Metodologi

Metodologi pengerjaan analisis kegagalan *fatigue* tugas akhir ini dijelaskan pada *flowchart* Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Tahapan pengerjaan.

HASIL DAN ANALISIS

Parameter pipa bawah laut yang digunakan disajikan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 Parameter Pipa

Parameters	Units	Properties
Line Pipe OD	mm	16 inch
Selected Nominal Wall Thickness for Linepipe	mm	0.5 inch
Line Pipe Material	-	API 5L Grade X52 PSL-2 CS
Line Pipe Fabrication Method	-	HF-ERW
Line Pipe SMYS	Mpa	360
Young Modulus	Mpa	2.07×10^5
Poisson Ratio	-	0.3
Steel Density	kg/m ³	7850
Coefficient of Thermal Expansion	/oC	1.17×10^{-5}

Tabel 2 menyajikan parameter lingkungan yang digunakan dalam analisis.

Tabel 2 Parameter Lingkungan

Parameters	Units	1 Year Return
Max. Wave		
Height, Hmax	m	4.88
Period, Tmax	sec	7.6
Significant Wave		
Height, Hs	m	2.3
Period, Ts	sec	6.3
Spectral Peak Period, Tp	sec	5.99
Current Speed		
at 0% water depth	m/s	1.07
at 10% water depth	m/s	1.01
at 20% water depth	m/s	0.96
at 30% water depth	m/s	0.91
at 40% water depth	m/s	0.88
at 50% water depth	m/s	0.82
at 60% water depth	m/s	0.76
at 70% water depth	m/s	0.73
at 80% water depth	m/s	0.67
at 90% water depth	m/s	0.64
at 100% water depth	m/s	0.58

Pengecekan Kriteria Tegangan DNV OS F101

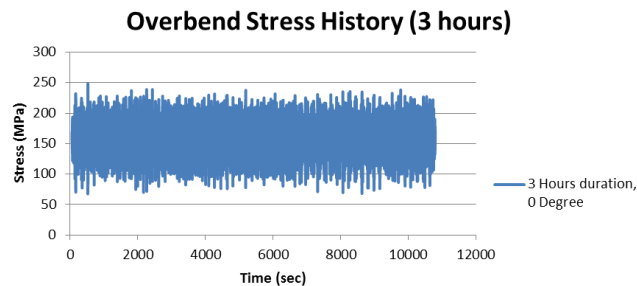
Berikut hasil pengecekan tegangan dinamik berdasarkan kriteria tegangan DNV OS F101 ditunjukkan pada tabel 3 berikut:

Tabel 3 Pengecekan Kriteria Tegangan

Arah Datang Gelombang	Titik	Durasi Integrasi (jam)	STATUS
0	Overbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
	Sagbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
45	Overbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
	Sagbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
90	Overbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
	Sagbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
135	Overbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
	Sagbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
180	Overbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi
	Sagbend	3	Terpenuhi
		6	Terpenuhi

Perhitungan Kelompok Tegangan

Selanjutnya dilakukan simulasi seri waktu dengan contoh keluaran *stress range history* selama 3 jam sebagai gambar 5 berikut.



Gambar 5 *Stress range history*.

Setelah itu dilakukan perhitungan siklus tegangan dengan metoda *Rainflow counting*. Contoh keluaran yang diperoleh disajikan pada tabel 4 berikut:

Tabel 4 Hasil Perhitungan Siklus Tegangan

Max Stress (Mpa)	Min Stress (Mpa)	Cycles
0.303	0.263	3
1.105	0.637	1220
1.309	0.218	198
1.508	0.422	81
1.6	1.57	1
1.653	0.144	502
15.81	0.025	2

Perhitungan Kerusakan *Fatigue* dan Umur *Fatigue*

Selanjutnya dilakukan perhitungan siklus tegangan yang diizinkan berdasarkan kurva S-N. Tabel 5 menyajikan contoh hasil perhitungan siklus tegangan dan kerusakan *fatigue*. Perlu diingat bahwa pada perhitungan kerusakan *fatigue*, nilai tegangan dibawah batas *endurance* tidak dihitung.

Tabel 5 Contoh Hasil Perhitungan Siklus Tegangan dan Kerusakan *Fatigue*

20 Stinger - 135 DEGREE DIRECTION				
3 Hours Duration				
Stress Range (Mpa)	Cycles (n)	N	Damage	Remarks
0.94	11	6.02E+11	1.83E-11	Below endurance lim.
2.3	124	4.11E+10	3.02E-09	Below endurance lim.
3.04	35	1.78E+10	1.97E-09	Below endurance lim.
3.48	427	1.19E+10	3.60E-08	Below endurance lim.
4.3	4	6.29E+09	6.36E-10	Below endurance lim.
8.42	1	8.38E+08	1.19E-09	Below endurance lim.
9.35	102	6.12E+08	1.67E-07	Below endurance lim.
14.11	977	1.78E+08	5.49E-06	Below endurance lim.
26.2	241	2.78E+07	8.67E-06	
27.29	43	2.46E+07	1.75E-06	
36.64	475	1.02E+07	4.67E-05	
40.32	2	7.63E+06	2.62E-07	
51.1	104	3.75E+06	2.78E-05	
67.26	11	1.64E+06	6.69E-06	
TOTAL DAMAGE			9.19E-05	

Setelah diperoleh kerusakan *fatigue* kumulatif masing-masing lokasi dengan arah datang gelombang berbeda, dihitung umur *fatigue*.

Tabel 6 menyajikan umur *fatigue* yang diperoleh pada lokasi *sagbend* dan *overbend* dengan pembebanan arah gelombang masing-masing.

Tabel 6 Hasil Perhitungan Umur Fatigue Pada Overbend dan Sagbend

DIRECTION (DEG)	NODE	STORM DURATION (HOURS)	MAX. STRESS (MPA)	FATIGUE DAMAGE	FATIGUE LIFE (DAYS)
0	Overbend	3	247.47	0.19%	67
		6	248.95	0.37%	67
	Sagbend	3	170.82	0.02%	659
		6	181.17	0.04%	646
45	Overbend	3	325.68	0.54%	23
		6	363.12	1.07%	23
	Sagbend	3	223.29	0.09%	136
		6	234.08	0.19%	135
90	Overbend	3	307.09	0.24%	52
		6	324.82	0.50%	50
	Sagbend	3	129.92	0.09%	136
		6	129.92	0.19%	135
135	Overbend	3	322.5	0.58%	22
		6	322.5	1.16%	22
	Sagbend	3	224.92	0.10%	121
		6	233.91	0.21%	120
180	Overbend	3	301.58	0.39%	32
		6	301.58	0.79%	32
	Sagbend	3	248.03	0.03%	424
		6	248.03	0.06%	448

Diperoleh bahwa usia *fatigue* terkecil adalah 22 hari, dimana berada di lokasi *overbend* dengan arah datang gelombang 135°. Untuk membuktikan bahwa *overbend* dan *sagbend* memang merupakan daerah paling rentan terhadap kegagalan, dilakukan perhitungan kerusakan *fatigue* dan umur *fatigue* di seluruh lokasi, namun hanya dengan arah datang gelombang 135°. Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 7 Perhitungan Umur Fatigue di Lokasi Lain

NODE NO.	LOCATION	STORM DURATION (HOURS)	MAX. STRESS (MPA)	FATIGUE DAMAGE	FATIGUE LIFE (DAYS)
3	LAYBARGE	3	5.84	4.37E-10	286041190
5	LAYBARGE	3	15.81	0	~
7	LAYBARGE	3	39.69	0	~
9	TENSIONER	3	107.93	3.99E-05	3133
11	LAYBARGE	3	61.42	3.76E-05	3320
13	LAYBARGE	3	85.82	2.02E-05	6188
15	LAYBARGE	3	181.77	6.72E-05	1860
17	LAYBARGE	3	208.98	6.79E-05	1841
20	STINGER / OVERBEND	3	192.06	9.19E-05	1360
22	STINGER / OVERBEND	3	204.48	5.91E-05	2115
24	STINGER / OVERBEND	3	237.58	1.57E-04	796
26	STINGER / OVERBEND	3	119.47	8.86E-06	14108
28	STINGER / OVERBEND	3	108.54	1.70E-04	735
30	STINGER / OVERBEND	3	164.37	1.06E-03	118
32	STINGER / OVERBEND	3	322.5	5.77E-03	22
34	STINGER / OVERBEND	3	102.81	1.09E-04	1147
35	STINGER / OVERBEND	3	147.45	1.08E-03	116
36	SAGBEND	3	174.57	2.05E-03	61
37	SAGBEND	3	177.72	1.44E-03	87
38	SAGBEND	3	161.07	7.22E-04	173
39	SAGBEND	3	182.51	6.11E-04	205
40	SAGBEND	3	247.34	1.02E-03	123
41	SAGBEND	3	224.92	1.04E-03	120
42	SAGBEND	3	211.88	4.66E-04	268
43	SAGBEND	3	163.16	1.05E-04	1190
48	SEABED	3	62.78	1.56E-05	7992
49	SEABED	3	60.2	2.12E-05	5896
50	SEABED	3	56.73	2.30E-05	5445

Pada tabel umur *fatigue* terkecil tetap berada pada *overbend* dan *sagbend* yaitu 22 hari dan 61 hari. Umur *fatigue* tersebut dapat dianggap aman karena pada umumnya jarang sekali proses penggelaran terhenti dan pipa dibiarkan menggantung selama lebih dari 1 hari, namun jika kondisi tidak dapat dihindari, dapat dilakukan mitigasi seperti prosedur *Abandon and Recovery*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari studi dan analisis tugas akhir ini sebagai berikut:

- Titik yang mengalami tegangan paling tinggi dari pembebanan lingkungan seluruh arah adalah titik *overbend*;
- Analisis simulasi dengan durasi integrasi 6 jam akan menghasilkan nilai kerusakan *fatigue* dua kali nilai kerusakan *fatigue* pada simulasi dengan durasi integrasi 3 jam, serta menghasilkan umur *fatigue* yang tidak jauh berbeda;
- Pada simulasi dengan perangkat OFFPIPE, permukaan laut terbukti bersifat stasioner pada durasi 3 jam (mengacu pada DNV RP C205);
- Umur *fatigue* terkecil yang diperoleh adalah 22 hari yang terjadi akibat arah gelombang 135° dan berada pada titik *overbend*;
- Proses instalasi dapat dianggap aman dengan syarat proses penggelaran tidak akan terhenti dan tetap di posisi yang sama selama lebih dari 7 hari (secara konservatif);
- Wilayah *overbend* dan *sagbend* terbukti sebagai wilayah yang paling rentan kegagalan, dapat dilihat dari nilai tegangan yang relatif lebih tinggi serta umur *fatigue* yang relatif lebih rendah dibanding lokasi lain.

Saran

Adapun saran dari pengerjaan studi ini adalah:

- Untuk menambah akurasi perhitungan umur *fatigue*, pembebanan akibat VIV (*vortex induced vibration*) dapat diperhitungkan.

- Untuk pengerjaan selanjutnya, jika data angin tersedia, dapat digunakan spectrum gelombang yang sesuai dengan kondisi laut.

DAFTAR PUSTAKA

Bai, Q, and Y Bai. *Subsea Pipeline Design, Analysis and Installation*. n.d.

Collins, J. A. *Failure of Materials in Mechanical Design*. New York: Wiley, 1981.

DNV OS F101. *Subsea Pipeline System*. 2012.

DNV RP C203 . *Fatigue Design of Offshore Steel Structures*. 2011.

DNV RP C205. *Environmental Conditions and Environmental Loads*. 2010.

Lee, Jayeoung. *Introduction to Offshore Pipelines and Riser*. Texas, 2008.

Revie, R. *Oil and Gas Pipelines*. n.d.