

ANALISIS *FATIGUE* INSTALASI PIPA BAWAH LAUT

Fariz Darmawan

Program Studi Teknik Kelautan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan

Institut Teknologi Bandung

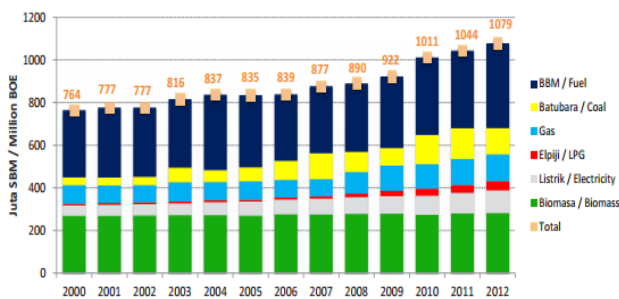
Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

darmawanfariz@gmail.com

Kata kunci : instalasi pipa bawah laut, tegangan von mises, umur *fatigue*, Kurva S-N, Rentang Tegangan

PENDAHULUAN

Pemenuhan kebutuhan energi dalam kehidupan sehari-hari masih didominasi bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara dan gas alam. **Gambar 1** menunjukkan bahwa konsumsi energi Indonesia selama tahun 2000-2012 masih didominasi oleh BBM.



Gambar 1 Grafik Konsumsi Energi Indonesia

Dengan konsumsi BBM dan gas alam Indonesia yang semakin meningkat tahun ke tahun, perlu dilakukan usaha pencarian dan eksploitasi cadangan gas dan minyak baru demi pemenuhan kebutuhan energi. Ladang minyak dan gas bumi yang terletak di laut memerlukan metoda dan fasilitas-fasilitas khusus dalam pengambilan dan pendistribusiannya. Pipa bawah laut (*Subsea Pipeline*) sangat dibutuhkan untuk menyalurkan gas/minyak dari reservoir ke reservoir lainnya ataupun menuju fasilitas lainnya di darat atau di laut. Dalam proses instalasi pipa pipa yang digelar melalui *laybarge* akan bergantung sampai akhirnya pipa selesai digelar. Pada saat pipa bergantung tersebut, pipa akan terkena beban

lingkungan yang bersifat siklik. Gaya yang bekerja terus menerus terhadap pipa yang bergantung tersebut bisa menyebabkan kegagalan *fatigue*. *Fatigue* yang terjadi pada pipa saat instalasi dapat menyebabkan dinding pipa akan rusak dan retak sehingga pemasangan pipa yang sedang terjadi akan terhambat. Analisa *fatigue* dilakukan untuk mengetahui umur *fatigue*. Umur *fatigue* adalah waktu yang dibutuhkan hingga terjadi retak yang menembus dinding pipa. Dalam tugas akhir ini, dilakukan analisa umur *fatigue* instalasi pipa di perairan Selat Madura.

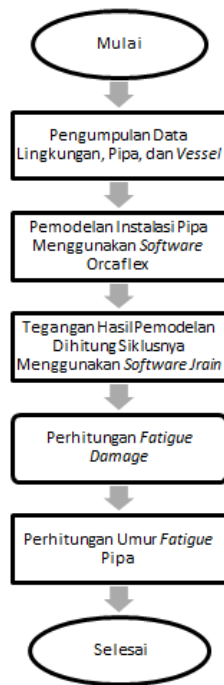
Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah menentukan umur *fatigue* pipa ketika proses instalasi pada kedalaman 19.35 m. Kedalaman 19.35 m terletak pada daerah sekitar titik awal instalasi pipa seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Lokasi Titik Tinjauan

TEORI DAN METODOLOGI

Tahapan pengerjaan Tugas Akhir ini digambarkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

Data lingkungan, pipa, dan vessel diperoleh dari PT. ZEE Engineering Indonesia. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Orcaflex. Pemodelan yang dilakukan antara lain memodelkan kondisi lingkungan, vessel support, vessel, dan pipa yang diinstal. Tegangan von Mises hasil pemodelan kemudian diolah dengan perangkat lunak Jrain untuk dikelompokkan siklus tegangannya. Distribusi rentang tegangan yang diperoleh digunakan untuk menghitung *fatigue damage* dengan menggunakan aturan Palmgren-Miner. Setelah *fatigue damage* diketahui, nilai umur *fatigue* didapat

Perhitungan umur *fatigue* dilakukan dengan menggunakan kurva S-N. Perhitungan dengan kurva S-N memerlukan siklus tegangan yang terjadi pada pipa.

Persamaan umum dari kurva S-N di atas dinyatakan sebagai berikut :

$$\log N = \log \bar{a} - m \log S \quad (1)$$

$$N = \frac{\bar{a}}{S^m} \quad (2)$$

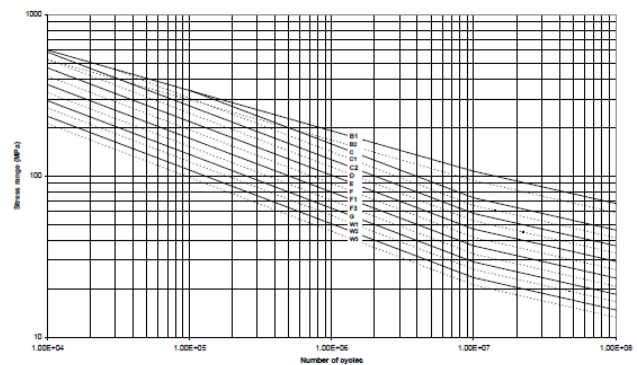
Dimana

N = jumlah siklus yang dibutuhkan *stress range* S untuk mencapai kegagalan

S = *stress range* (selisih tegangan maksimum dan minimum dari satu siklus tegangan)

m = *negative inverse slope* pada kurva S-N

$\log \bar{a}$ = *intercept of log N-axis* pada kurva S-N



Gambar 4 Kurva S-N

Kurva S-N dibagi menjadi beberapa kelas berdasarkan jenis pengelasan pada sambungan pipa. Tabel Kurva S-N ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Tabel Kurva S-N

S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles	Fatigue limit at 10^7 cycles a)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), ref. also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$	$\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

^a) see also section 2.11

Dalam Tugas Akhir ini, pipa yang akan diinstal diasumsikan termasuk kategori F, yaitu pipa dilas dengan teknik *butt weld*. Deskripsi jenis

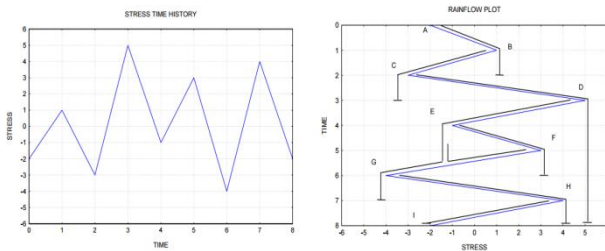
pengelasan pada sambungan kategori F dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Kategori Pipa

C1		3. Circumferential butt weld made from both sides dressed flush.	3., 4., 5. and 6.
D		4. Circumferential butt weld made from both sides.	— The applied stress must include the stress concentration factor to allow for any thickness change and for fabrication tolerances, ref. section 3.3.7.
E		5. Circumferential butt weld made from both sides made at site.	— The requirements to the corresponding detail category in Table A-5 apply.
F		6. Circumferential butt weld made from one side on a backing bar.	

Untuk menggunakan kurva S-N, diperlukan perhitungan siklus tegangan. Dalam Tugas Akhir ini, metode perhitungan siklus tegangan yang digunakan adalah dengan menggunakan metode *rainflow counting* yang digunakan oleh perangkat lunak JRain. Dengan menggunakan metode *rainflow counting*, aturan Palmgren-Miner dapat digunakan.

Perhitungan siklus dengan metode *rainflow counting* menggunakan analogi turunnya air dari atap pagoda. Bayangkan sebuah grafik tegangan dalam seri waktu kemudian diputar 90° dan dari atas grafik ada tetesan hujan turun seperti **Gambar 5**.



Gambar 5 Ilustrasi Rainflow Counting

Aturan dari metode ini antara lain :

1. Tetesan hujan dimulai dari setiap puncak dan lembah
2. Ketika aliran dimulai dari lembah menuju bawah, aliran akan berhenti bila lembah selanjutnya lebih negatif dari pada aliran dari lembah awal dan aliran tersebut dihitung setengah siklus. Aliran akan terus berlanjut

ke bawah sampai menemukan nilai lembah yang lebih negatif atau *time series* berakhir.

3. Untuk aliran yang dimulai dari puncak, aliran akan berhenti ketika nilai puncak di bawahnya lebih positif daripada puncak awal dan dihitung setengah siklus. Aliran akan terus berlanjut ke bawah sampai menemukan nilai puncak yang lebih positif atau *time series* berakhir.
4. Jika ada aliran hujan yang memotong jalur dari aliran hujan yang jatuh dari aliran atasnya, aliran hujan tersebut berhenti dan dihitung setengah siklus.
5. Pasangkan setengah siklus dengan besar yang sama untuk menghitung total siklus.

Hasil siklus tegangan yang diperoleh dari perangkat lunak Jrain kemudian dihitung lagi dengan persamaan sebagai berikut :

$$S_r = S_o SCF \left(\frac{t_{fat}}{t_{ref}} \right)^k \quad (3)$$

Dimana :

- S_o = Stress Range nominal
 SCF = Stress Concentration Factor
 $\left(\frac{t_{fat}}{t_{ref}} \right)^k$ = Faktor koreksi ketebalan

Nilai k dan SCF pada DNV RP C203 bernilai 0 dan 1 berturut-turut sesuai dengan **Gambar 6**.

Description	Geometry and hot spot	Tolerance requirement	S-N curve	Thickness exponent k	SCF
Welding					
Single side		$\delta \leq \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.15t, 3 \text{ mm})$	F3	0.00	1.0
Single side on backing		$\delta \leq \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F	0.00	1.0
		$\delta > \min(0.1t, 2 \text{ mm})$	F1	0.00	1.0

Gambar 6 Penjelasan Tentang Stress Concentration Factor

Sehingga *stress range* yang digunakan sama dengan *stress range* nominal yang diperoleh dari perangkat lunak Jrain.

Perhitungan *fatigue damage* menggunakan aturan Palmgren-Miner. Persamaan Palmgren-Miner adalah sebagai berikut :

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

Dimana :

D = *Fatigue Damage*

n_i = jumlah siklus *stress range* ke- i

N_i = jumlah siklus *stress range* ke- i yang dibutuhkan untuk mencapai kegagalan

Fatigue damage yang dihitung kemudian dijumlahkan setiap *stress range* yang ada. Apabila nilai *fatigue damage* bernilai sama dengan atau lebih dari 1, maka *fatigue* sudah terjadi. Umur *fatigue* dihitung dengan menggunakan rumus :

$$T_{life} = \frac{1}{D} \quad (5)$$

Dimana :

T_{life} = Umur *fatigue*

D = *fatigue damage*.

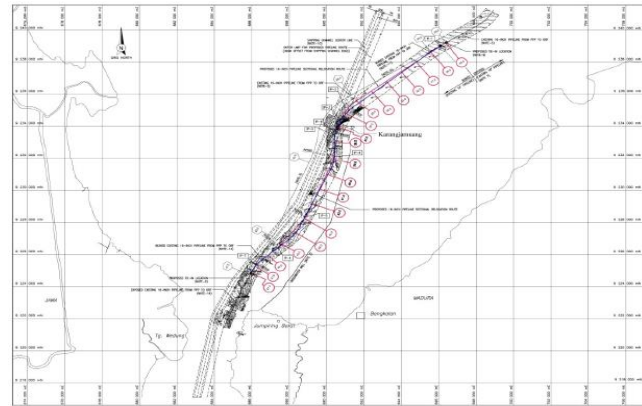
STUDI KASUS DAN PEMODELAN

Studi kasus yang ditinjau pada Tugas Akhir ini adalah proyek pemindahan 20 kilometer pipa gas dari PPP (*Poleng Process Platform*) ke ORF (*Onshore Receiving Facilities*) karena jalur pipa tersebut mengganggu jalur pelayaran kapal pada Alur Pelayaran Barat Surabaya (ABPS). Peta rencana pemindahan pipa bisa dilihat di **Gambar 7**.

Kondisi perairan pada rute instalasi pipa tersaji pada **Tabel 3**.

Kondisi lingkungan pada lokasi tinjauan ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 5 menunjukkan properti pipa yang digunakan ketika instalasi pipa.



Gambar 7 Peta Rencana Pemindahan Pipa

Tabel 3 Data Kondisi Perairan

Parameter	Satuan	Nilai
<i>Water Depth</i>		
Kedalaman Maksimum	m	19.35 (KP 44.6)
Kedalaman Minimum	m	4.3 (KP 27.8)
<i>Properti Air Laut</i>		
Massa Jenis	Kg/m ³	1025
Suhu maks. Dasar Laut	°F	84
Suhu min. Dasar Laut	°F	59
Viskositas	M ² /s	1.03 x 10 ⁻⁶

Tabel 4 Data Kondisi Lingkungan

Parameter	Satuan	1 Year Return
<i>Significant Wave</i>		
Tinggi Gelombang, H_s	m	2.30
Periode Gelombang, T_s	detik	6.30
Periode Puncak Gelombang, T_p	detik	5.99
<i>Current Speed</i>		
0% water depth	m/s	1.068
10% water depth	m/s	1.007
20% water depth	m/s	0.976
30% water depth	m/s	0.915
40% water depth	m/s	0.885
50% water depth	m/s	0.824
60% water depth	m/s	0.763
70% water depth	m/s	0.732
80% water depth	m/s	0.671
90% water depth	m/s	0.641
100% water depth	m/s	0.580

Tabel 5 Properti Pipa

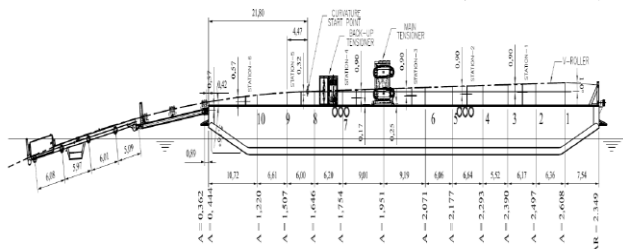
Parameter	Satuan	Keterangan
Outer Diameter Pipa	mm	406.4 (16 inch)
Nominal Wall Thickness	mm	12.7 (0.5 inch)
Line Pipe Material	-	API 5L Grade X52 PSL-2 CS
Line Pipe Fabrication Method	-	HF-ERW
Specified Minimum Yield Strength	MPa	360
Modulus Young	MPa	2.07×10^5
Poisson Ratio	-	0.3
Massa Jenis Baja	Kg/m ³	7850
Thermal Expansion Coefficient	°C	1.17×10^{-5}
Design Life	Tahun	20

Tabel 6 menunjukkan *coating* yang dipasang pada pipa

Tabel 6 Data Coating

Parameters	Satuan	Nilai
<i>External Coating</i>		
Ashpalt Enamel	mm	5.5
Massa Jenis	kg/m ³	1300
<i>Concrete Coating</i>		
Tebal Beton	mm	25.4 (1 inch)
Massa Jenis	kg/m ³	3044

Tabel 7 menunjukkan dimensi, kapasitas, dan data teknis dari KALINDA *laybarge* yang digunakan dalam proses instalasi pipa. Gambar 7 menunjukkan gambar teknik dari KALINDA *laybarge*.

Gambar 8 Tampak Samping KALINDA *laybarge*Tabel 7 Spesifikasi KALINDA *Laybarge*

Penjelasan	Satuan	Nilai
LOA	m	86.00
Breadth	m	27.50
Depth	m	5.50
Operating Draft	m	1.80
Deadweight	MT	3800
Trim	derajat	0.00
Jumlah Tensioner	Nos.	1
Kapasitas Tensioner	kN	298.920
Jumlah Support pada Barge (termasuk Tensioner)	Nos	9
Jumlah Roller pada Stinger	Nos	7
Kapasitas Beban Support Barge	MT	20.0
Kapasitas Beban Roller Stinger	MT	20.0
Panjang Stinger	m	39

Konfigurasi *Pipe Support* pada barge disajikan di Tabel 8 serta konfigurasi *Support* di *stinger* disajikan pada Tabel 9 untuk proses instalasi pipa yang akan dilakukan.

Tabel 8 Konfigurasi *Support* di *Laybarge*

Notasi	Keterangan	Jarak dari Stern (mm)	Ketinggian dari Main Deck (mm)
B3	Pipe Support No. 1	65950	2390
B4	Pipe Support No. 2	60430	2293
B5	Pipe Support No. 3	53790	2177
B6	Pipe Support No. 4	47730	2071
T	Tensioner Support	38540	1951
B7	Pipe Support No. 5	29530	1754
B8	Pipe Support No. 6	23330	1646
B9	Pipe Support No. 7	17330	1507
B10	Pipe Support No. 8	10720	1220

Tabel 9 Konfigurasi Support pada Stinger

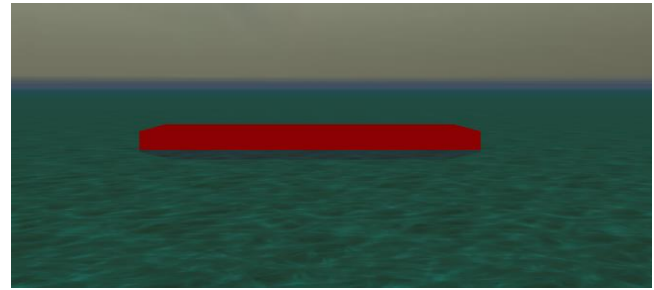
Roller	Keterangan	Jarak dari Stern (mm)	Tinggi Roller dari Main Deck(mm)
O1	Stinger Support No. 1	-951.7	898
O2	Stinger Support No. 2	-7600.8	432
O3	Stinger Support No. 3	-13684.4	-154
O4	Stinger Support No. 4	-20188.7	-1107
O5	Stinger Support No. 5	-26159.7	-1858
O6	Stinger Support No. 6	-32085.6	-2697.7
O7	Stinger Support No. 7	-38096	-3562

Data-data yang sudah tertera kemudian dimodelkan menggunakan Orcaflex 9.2a. Pemodelan yang dilakukan secara umum dibagi menjadi 2 bagian, yaitu pemodelan lingkungan dan pemodelan struktur.

Pemodelan lingkungan secara umum hanya memasukkan data gelombang, arus, dan kondisi perairan.

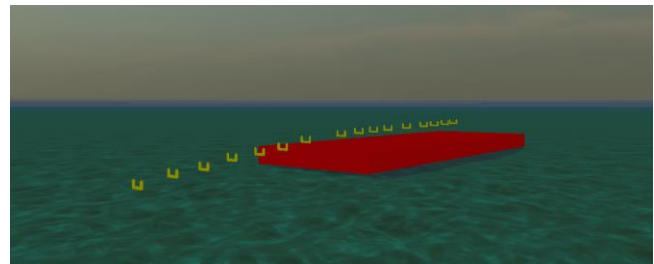
Pemodelan struktur yang dilakukan antara lain pemodelan *laybarge*, *pipe support*, dan *stinger support*.

Pemodelan *laybarge* dilakukan pada Orcaflex dilakukan dalam Menu *Vessel Type* pada *Model Browser*. Input yang dilakukan adalah pada menu *structure*, *drawing*, dan *displacement RAOs* sesuai dengan data yang ada. Hasil pemodelan *laybarge* yang dilakukan disajikan pada **Gambar 9**.



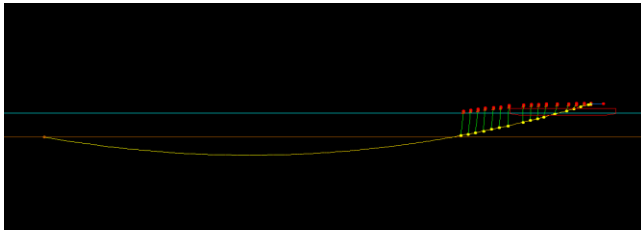
Gambar 9 Tampilan Model Laybarge Tampak Samping

Pemodelan *pipe support* & *stinger support* pada Orcaflex seri 9.2a dibentuk dengan cara memodelkan *line* berbentuk U sederhana. Bentuk seperti ini diambil untuk mempermudah pemodelan karena pada umumnya *support pipa* di *laybarge* berbentuk U dengan lebar bagian bawah sepanjang 2 meter & tingginya 1 meter dengan diameter sebesar 0.5 meter. Tampilan *pipe support* & *stinger support* yang sudah dimodelkan disajikan pada **Gambar 10**.



Gambar 10 Tampilan Model Pipe Support & Stinger Support

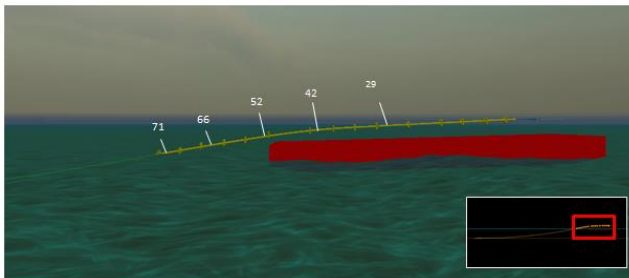
Pipa dimodelkan dalam Menu *Line*. *Outer diameter* pipa total adalah 0.4373 m dan massa jenis total pipa adalah 12194 kg/m³. Panjang pipa yang dimodelkan sepanjang 450 m yang muncul dari berbagai *trial & error* untuk mendapatkan pemodelan instalasi *s-lay* yang baik. Hasil pemodelan pipa yang dilakukan tersaji pada **Gambar 11**.



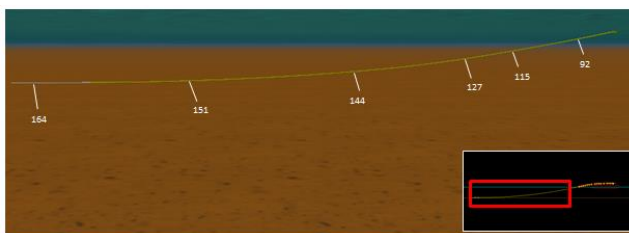
Gambar 11 Tampak Samping Model Pipa

HASIL DAN ANALISIS

Struktur yang sudah dimodelkan selanjutnya akan disimulasikan selama periode tertentu dan diberikan beban lingkungan akibat arus dan gelombang dengan periode ulang dari arah 0° , 45° , 90° , 135° , dan 180° . Penentuan umur *fatigue* akan ditinjau pada 11 titik yang tersebar dari daerah *overbend* hingga *sagbend* dan dipilih nilai umur *fatigue* yang paling kecil. Titik-titik yang ditinjau dapat dilihat pada **Gambar 12 & Gambar 13**.



Gambar 12 Persebaran Titik Tinjauan Pada Pipa (1)



Gambar 13 Persebaran Titik Tinjauan Pada Pipa (2)

Sebelum analisis instalasi dan *fatigue* dilakukan, diperlukan penentuan waktu simulasi yang digunakan. Untuk studi kasus kali ini, waktu simulasi yang dipertimbangkan adalah simulasi selama 3,6, dan 12 jam. Parameter-parameter yang dibandingkan adalah jumlah siklus tegangan yang terjadi di setiap titik tinjauan pada kasus

gaya hidrodinamik dari arah 0 derajat karena dari arah 0 derajat rata-rata tegangan terbesar terjadi pada pipa. **Tabel 10** menunjukkan hasil perbandingan jumlah siklus tegangan di setiap titik dari arah 0 derajat.

Tabel 10 Hasil Perbandingan Jumlah Siklus Tegangan

Titik	Jumlah Siklus yang Terjadi		
	3 Jam	6 Jam	12 Jam
29	2211	4433	8852
42	1871	3116	6322
52	3048	6032	12202
66	3050	6097	12223
71	1871	3784	7653
92	2435	4886	9832
115	2661	5318	10662
127	2702	5516	10979
144	2809	5686	11503
151	2811	5632	11376
164	1973	3946	7961

Hasil jumlah siklus yang terjadi ketika simulasi 6 jam ± 2 kali lipat dari hasil jumlah siklus 3 jam. Begitu juga hasil 12 jam terhadap 6 jam. Ini berarti jumlah siklus tegangan yang terjadi tiap jamnya sama sehingga pemilihan waktu simulasi 3 jam, 6 jam, maupun 12 jam tidak masalah.

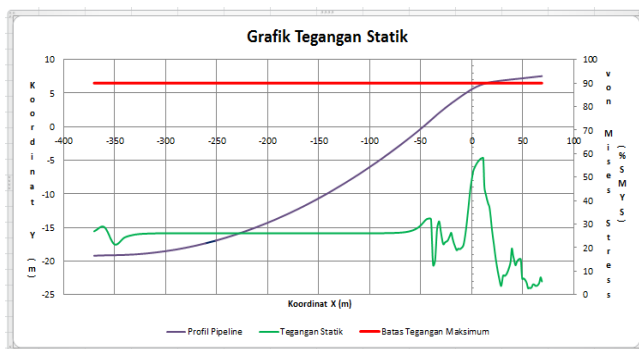
Tabel 11 menampilkan hasil umur *fatigue* untuk waktu simulasi 3, 6, & 12 jam dari arah 0 derajat. Dari **Tabel 11** bisa dilihat bahwa umur *fatigue* yang dihasilkan dari simulasi 3, 6, dan 12 jam tidak terlalu berbeda. Perbedaan yang ditunjukkan pada simulasi 12 jam terjadi karena persebaran data rentang tegangan lebih banyak terjadi di waktu simulasi 12 jam dibanding waktu yang lain. Data rentang tegangan yang lebih banyak akan memberikan perbedaan yang signifikan terhadap perhitungan *damage* akumulatif yang membuat nilai umur *fatigue* yang berbeda pula.

Tabel 11 Hasil Komparasi *Umur fatigue* Untuk 3, 6, & 12 Jam dari Arah 0 Derajat

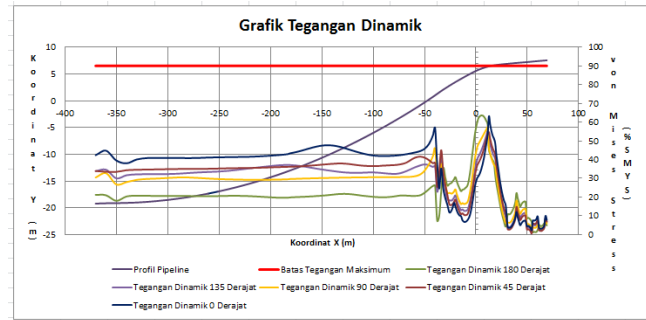
Titik	Umur <i>Fatigue</i> (Hari)		
	3 Jam	6 Jam	12 Jam
29	824	819	833
42	28	28	28
52	4749	4646	4019
66	227	226	216
71	23	23	23
92	88	88	88
115	148	148	149
127	150	149	149
144	141	141	141
151	109	109	109
164	91	91	90

Dari pertimbangan-pertimbangan di atas, dipilih waktu simulasi 3 jam karena hasil dari simulasi 3 jam, 6 jam, dan 12 jam tidak jauh berbeda.

Syarat tegangan von mises yang diizinkan berdasarkan ASME B31.8 ketika proses instalasi pipa harus di bawah 90% SMYS untuk daerah *overbend* dan *sagbend* ketika kondisi instalasi statik dan dinamik. Nilai 90% SMYS berarti 324 MPa. Hasil dari analisis instalasi statik dan dinamik ditunjukkan pada **Gambar 14 & 15** berturut-turut. Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat bahwa kondisi instalasi pipa pada studi kasus ini memenuhi syarat ASME B31.8.



Gambar 14 Grafik Tegangan von Mises Statik



Gambar 15 Grafik Tegangan von Mises Dinamik

Perhitungan umur *fatigue* dimulai dari perhitungan rentang tegangan dan jumlah siklus dari rentang tegangan tersebut pada titik-titik yang ditinjau. Rentang tegangan tiap titik diperoleh dari perangkat lunak Jrain. Kemudian dihitung nilai N dari setiap *stress range* sesuai dengan Persamaan Kurva S-N. Pertama-tama, diasumsikan nilai m dan $\log \bar{a}$ diambil untuk kondisi $N \leq 10^7$. Ketika hasil perhitungan menunjukkan nilai $N > 10^7$, maka nilai m dan $\log \bar{a}$ mengikuti. Setelah didapat nilai N tiap rentang tegangan, dihitung *fatigue damage*-nya dan dijumlahkan. Lalu umur *fatigue* pada tiap titik diperoleh. **Tabel 12** menunjukkan rangkuman nilai umur *fatigue* terkecil dari berbagai arah.

Tabel 12 Rangkuman Hasil Nilai *Umur fatigue* Terkecil

Arah	Titik	Tegangan von Mises Rata-Rata (MPa)	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Umur Fatigue</i> (Hari)
0°	71	103.327	0.001815	23
45°	71	104.219	0.002968	14
90°	71	95.572	0.000124	337
135°	42	141.49	0.003884	11
180°	71	94.202	0.001764	24

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan, nilai umur *fatigue* yang paling kecil adalah 11 hari yang terjadi di titik 42 dari arah 135 derajat. Dari perhitungan yang dilakukan, besar kecilnya tegangan tidak banyak berpengaruh terhadap

umur *fatigue*. Yang lebih berpengaruh adalah perubahan dan persebaran data rentang tegangan yang terjadi. Dengan data rentang tegangan yang lebih sedikit, membuat nilai *fatigue damage* lebih kecil dan nilai umur *fatigue* akan membesar.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari Tugas Akhir ini antara lain :

1. Waktu simulasi model yang digunakan adalah 3 jam. Perbedaan hasil jumlah siklus tegangan yang terjadi dan umur *fatigue* antara 3 jam dan 6 jam tidak terlalu jauh, namun ketika menggunakan waktu simulasi 12 jam hasilnya berbeda jauh.
2. Proses instalasi pipa pada studi kasus ini memenuhi syarat tegangan pada kondisi instalasi dinamik dan statik di bawah 90% dari SMYS sebesar 324 MPa sesuai dengan syarat ASME B31.8. Tegangan terbesar pada kondisi statik sebesar 209.29 MPa. Tegangan terbesar pada kondisi dinamik sebesar 227.21 MPa yang terjadi ketika gaya lingkungan yang terjadi dari arah 0 derajat. Kedua tegangan terbesar terjadi di daerah *overbend*.
3. Umur *fatigue* yang paling kecil diperoleh sebesar 12 hari pada kondisi arah gaya lingkungan dari 135 derajat di titik 42 daerah *overbend* dengan *fatigue damage* 0.002968. Rata-rata tegangan von Mises yang terjadi pada titik tersebut sebesar 141.49 MPa.

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian ini lebih lanjut, yaitu :

1. Dapat dilakukan penelitian di kedalaman yang lain sepanjang rute instalasi sehingga nilai umur *fatigue* lebih menyeluruh.
2. Dapat dilakukan pemodelan dengan *software* edisi terbaru sehingga pemodelan lebih akurat.
3. Nilai properti kapal seperti *stiffness*, *added mass*, *damping*, *hydronamic drag*, dll lebih baik bila dilengkapi, tidak hanya nilai RAO

kapal sehingga pemodelan yang dilakukan lebih sempurna.

4. Perhitungan umur *fatigue* yang lebih detail dapat mencakup perhitungan akibat beban dari *Vortex-Induced Vibration* (VIV).

DAFTAR PUSTAKA

- Guo, Boyun et. al. 2005. *Offshore Pipelines*. Burlington, USA : Elsevier
- Det Norske Veritas. 2010. *DNV RP C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures*. Oslo : Veritas Offshore Technology and Services A/S.
- Naess, A. Almar. 1999. *Fatigue Handbook : Offshore Steel Structure*. Norway : Trondheim.
- Herdianti, Jihan. 2013. *Comparisons Study of S-lay and J-lay Methods for Pipeline Installation in Ultra Deep Water*. Universitetet I Stavanger: Norwegia.
- Chakrabarti, Subrata K. 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Springer-Berlag Berlin: Germany.
- Dean, Robert G. and Robert A. Dalrymple. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientist*. World Scientific: Singapore.
- Goda, Yoshimi. 2010. *Random Seas and Design of Martimie Structures 3rd Edition*. World Scientific: Singapore.
- Kyriakides, Stelios and Edmundo Corona. 2007. *Mechanics of Offshore Pipelines Volume 1*. Elsevier: USA.
- Wægter, John. 2009. *Notes 5.1 : Stress Range Histories and Rain Flow Counting*. Aalborg University: Denmark.
- US Army Corps of Engineers. 1984. *Shore Protection Manual*. Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office: USA.
- Orcina. 2010. *Orcaflex Manual : Version 9.2a*. Ulverston: UK.
- The American Society of Mechanical Engineers. 2010. *ASME B31.8-2010 : Gas Transmission and Distribution Piping Systems*. New York : USA.