

Prediksi Umur Kelelahan Struktur *Keel Buoy* Tsunami dengan Metode *Spectral Fatigue Analysis*

Angga Yustiawan dan Ketut Suastika

Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: k_suastika@na.its.ac.id

Abstrak—Salah satu komponen dari *Indonesia Tsunami Early Warning System (InaTEWS)* adalah *surface buoy*. *Surface buoy* selama beroperasi di laut akan menerima beban akibat gelombang yang relatif besar, bersifat dinamis dan acak, yang dapat menyebabkan beban berulang pada struktur *keel buoy*. Apabila terjadi secara terus-menerus, beban ini dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan pada struktur *keel* dari *surface buoy*. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui umur kelelahan struktur *keel buoy* tsunami dengan metode *spectral fatigue analysis*, dimana struktur *keel buoy* tsunami merupakan penghubung antara tali tambat (*mooring line*) dengan *surface buoy*. Struktur *keel buoy* ini terbuat dari material poros bekas pakai. Untuk menentukan umur kelelahan struktur *keel buoy* ini, telah dilakukan pembuatan diagram sebaran gelombang (*wave scatter diagram*) selama setahun pada koordinat 108.3417 BT dan 10.3998 LS. Selanjutnya dilakukan uji olah gerak *buoy* dan beban gelombang untuk mendapatkan fungsi transfer tegangan pada *keel buoy*. Pembuatan spektrum gelombang untuk masing-masing kondisi laut dilakukan untuk memperoleh respon tegangan pada struktur *keel buoy*. Hasil pengujian material berupa kurva SN digunakan sebagai basis dalam menentukan umur kelelahan. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa umur kelelahan struktur *keel buoy* tsunami akibat beban gelombang sekitar 11 tahun untuk berbagai kondisi laut (*sea state*) di perairan yang ditinjau.

Kata Kunci—*Buoy tsunami, keel buoy, spectral fatigue analysis, umur kelelahan.*

I. PENDAHULUAN

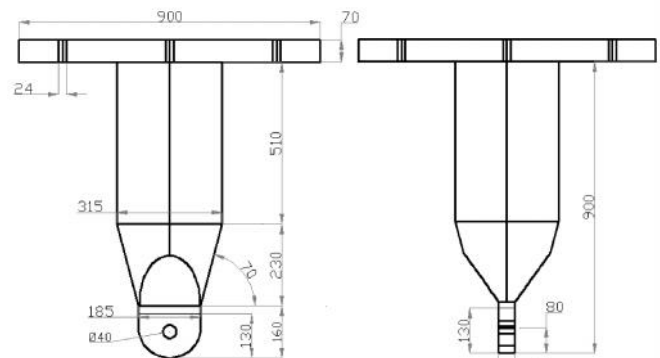
INDONESIA terletak di daerah dengan tingkat aktivitas gempa bumi tinggi, hal tersebut sebagai akibat bertemunya tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Samudera India-Australia di sebelah selatan, Samudera Pasifik di sebelah timur, dan Eurasia, dimana sebagian besar wilayah Indonesia berada di dalamnya. Pergerakan relatif ketiga lempeng tektonik tersebut dan dua lempeng lainnya, yakni Laut Philipina dan Carolina mengakibatkan terjadinya gempa-gempa bumi di daerah perbatasan pertemuan antar lempeng dan juga menimbulkan terjadinya sesar-sesar regional yang selanjutnya menjadi daerah pusat sumber gempa. Beberapa gempa berpotensi menimbulkan tsunami [1].

Salah satu komponen dari sistem peringatan dini tsunami Indonesia (*Indonesia tsunami early warning system*) adalah *buoy* tsunami berupa *surface buoy* yang dioperasikan di beberapa lokasi di perairan Indonesia yang rawan tsunami

(misalnya Samudera Indonesia). *Surface buoy* ini selama beroperasi di laut akan menerima beban akibat gelombang, arus, dan angin. Beban yang diakibatkan oleh arus dan angin bersifat statis dan relatif kecil, sedangkan beban yang diakibatkan oleh gelombang relatif besar, bersifat dinamis dan acak. Beban akibat gelombang ini dapat menyebabkan beban berulang pada struktur *keel buoy*. Apabila terjadi secara terus-menerus, beban ini dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan pada struktur *keel* yang menghubungkan *buoy* ke tali tambat (*mooring line*).



Gambar 1. Struktur *keel* terpasang pada *buoy* [2].

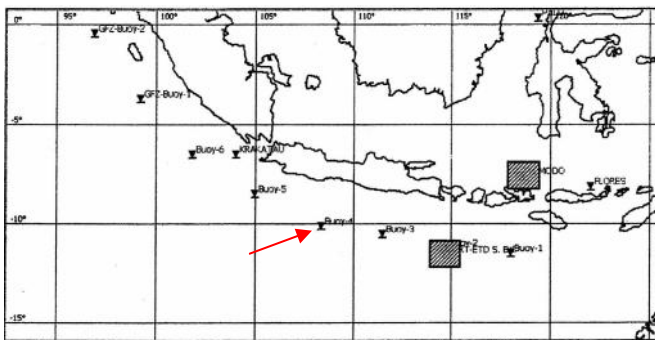


Gambar 2. Ukuran *keel buoy* dalam dua dimensi [2].

Untuk menjaga agar *surface buoy* ini tetap berada pada posisinya (tidak hanyut), *surface buoy* ini ditambatkan ke dasar laut dengan menggunakan tali tambat (*mooring line*). *Mooring line* dihubungkan dengan *surface buoy* dengan menggunakan struktur *keel* (sejenis struktur pelat berlubang). Beban siklis dan terus-menerus akibat gelombang yang bekerja pada struktur *keel buoy* dapat menimbulkan kerusakan atau retak pada struktur ini yang pada akhirnya dapat menimbulkan kegagalan struktur (*structural failure due to fatigue*) [2].

Prediksi umur kelelahan struktur *keel buoy* tsunami ini perlu dilakukan karena *keel* terbuat dari poros bekas pakai sehingga perlu diketahui berapa lama umur kelelahan struktur *keel buoy* ini, sehingga *Indonesia tsunami early warning system* dapat berfungsi dengan handal dan berkesinambungan. Adapun metode yang digunakan untuk menentukan umur kelelahan struktur *keel buoy* ini adalah *spectral fatigue analysis*. Terjadinya korosi pada struktur *keel buoy* tsunami tidak diperhitungkan.

Struktur yang dianalisis adalah *Buoy No. 4* milik BPPT yang berlokasi di selatan Pulau Jawa pada koordinat 108.3417 BT dan 10.3998 LS.



Gambar 3. Lokasi *buoy* No. 4 BPPT yang menjadi objek studi.

II. PENGUJIAN

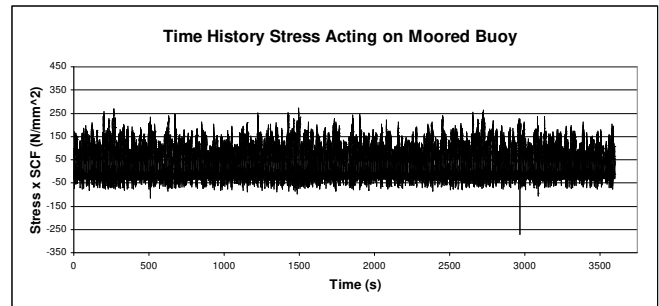
Beban yang bekerja pada struktur *keel buoy* ini hanya ditinjau dari beban akibat gelombang laut (beban yang berulang-ulang), dan beban ini diperoleh dari hasil pengukuran gaya pada tali tambat (*mooring line*) yang telah dilakukan oleh [2] di Tangki Olah Gerak dan Gelombang (MOB), IHL-BPPT, Surabaya. Model spektrum gelombang yang digunakan adalah model spektrum gelombang JONSWAP, dengan tinggi gelombang signifikan H_s sebesar 2 meter dan periode puncak gelombang T_p sebesar 6 detik.

Data Uji Hidrodinamika

Skala Model 1:16

Lama waktu pengujian: 15 menit

Waktu sebenarnya: 60 menit



Gambar 4. Grafik *stress-time* dengan lama pengujian 60 menit [2].

III. METODE SPECTRAL FATIGUE ANALYSIS

Analisis dengan menggunakan metode ini berlaku untuk struktur yang dipengaruhi oleh beban dinamis yang memiliki sifat statistik stasioner untuk sejumlah besar siklus tegangan, misalnya beban gelombang. Metode ini menggunakan spektrum gelombang untuk perhitungan spektrum tegangan untuk struktur yang berada dalam medan gelombang.

Langkah awal dalam penelitian ini adalah mengumpulkan data literatur penunjang penelitian, antara lain data hasil pengujian model *Buoy TEWS* berupa data uji hidrodinamika (oleh IHL-BPPT, Surabaya), dan data gelombang untuk perairan pada koordinat 108.3417 BT dan 10.3998 LS (oleh BMKG Stasiun Meteorologi Maritim Perak, Surabaya).

Data gelombang yang diperoleh, selanjutnya disajikan ke dalam diagram sebaran gelombang (*wave scatter diagram*) dan dilakukan pembuatan spektrum untuk masing-masing kondisi perairan dengan menggunakan model spektrum gelombang JONSWAP [3].

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{320 \cdot H_{1/3}^2}{T_p^4} \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left\{\frac{-1950}{T_p^4} \cdot \omega^{-4}\right\} \cdot \gamma^A \quad (1)$$

dengan $H_{1/3}$ adalah tinggi gelombang signifikan, T_p adalah periode puncak spektrum, γ adalah faktor kenaikan puncak spektrum, dan A adalah eksponen dari γ .

Selanjutnya data uji hidrodinamika berupa *time history stress* pada *buoy* dengan kondisi tertambat (*moored buoy*), dengan kondisi pengujian $H_s = 2$ meter dan $T_p = 6$ detik, diubah ke dalam bentuk domain frekuensi (spektrum tegangan) dengan metode *Welch*. Fungsi transfer (RAO) tegangan diperoleh dari akar kuadrat rasio antara spektrum tegangan dengan spektrum gelombang [4].

$$S_{\sigma\sigma}(\omega) = [RAO]^2 S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2)$$

dengan $S_{\sigma\sigma}(\omega)$ adalah spektrum tegangan dalam ruang frekuensi dan $S_{\eta\eta}(\omega)$ adalah spektrum gelombang dalam ruang frekuensi.

Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk mendapatkan spektra rentang tegangan berdasarkan RAO dan

spektra gelombang untuk tiap-tiap mode operasi (*wave scatter diagram*). Hal ini adalah sama dengan mengubah informasi karakteristik tegangan pada gelombang reguler menjadi tegangan di gelombang acak (gelombang laut).

Pada masing-masing spektrum tegangan dilakukan perhitungan sebagai berikut [4]:

- 1) Luasan di bawah kurva spektra respon tegangan, m_0 dan momen luasan di bawah kurva spektra respon tegangan, m_2 .

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\sigma\sigma}(\omega) d\omega \quad (3)$$

$$m_2 = \int_0^{\infty} S_{\sigma\sigma}(\omega) \omega^2 d\omega \quad (4)$$

- 2) *Mean zero crossing period*, T_z dari spektrum tegangan.

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (5)$$

- 3) Jumlah *stress cycles*, n pada selang waktu T detik.

$$n = \frac{T}{T_z} \quad (6)$$

- 4) Kerusakan akibat lelah untuk masing-masing kondisi laut, D .

$$D = T \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \frac{(8m_0)^m}{A} \Gamma\left(\frac{2+m}{2}\right) \quad (7)$$

dengan A dan m mendefinisikan kurva S-N sebagai berikut:

$$N = AS^{-m} \quad (8)$$

Persamaan akhir akumulasi kerusakan untuk semua kondisi laut dapat juga ditulis sebagai berikut:

$$D = \sum \frac{n}{N} = \sum \frac{n \sigma_{ef}^m \Gamma}{A} \quad (9)$$

dengan σ_{ef} adalah *effective fatigue stress range*.

$$\sigma_{ef} = (8m_0)^{\frac{1}{2}} \left[\Gamma\left(\frac{2+m}{2}\right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

- 5) Umur kelelahan, $F.L.$

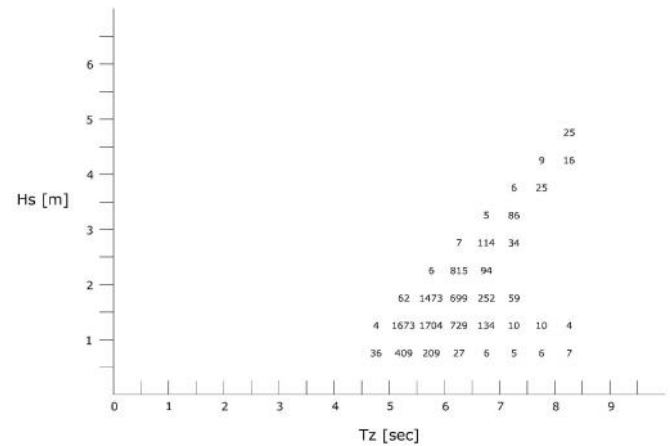
$$F.L. = \frac{1}{D} \quad (11)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Data Gelombang

Untuk memudahkan membaca karakteristik gelombang dari data gelombang yang telah diperoleh, data diolah menjadi diagram sebaran gelombang (*wave scatter diagram*) yang

menunjukkan banyaknya kejadian atau frekuensi gelombang dalam rentang tinggi gelombang signifikan (H_s) dan rata-rata periode gelombang (T_z) seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram sebaran gelombang (*wave scatter diagram*). Jumlah data gelombang total = 8760.

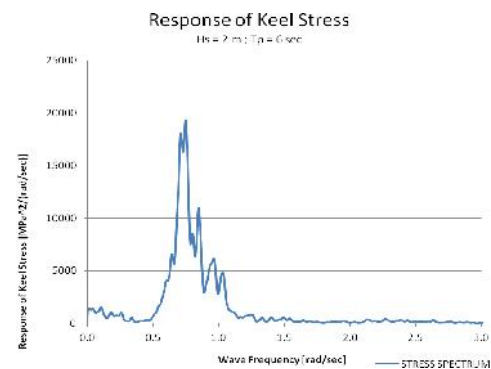
Selanjutnya data gelombang tersebut digunakan untuk menghasilkan spektrum gelombang, sehingga respon tegangan untuk berbagai kondisi gelombang dapat dihitung.

B. Penentuan Fungsi Transfer Tegangan

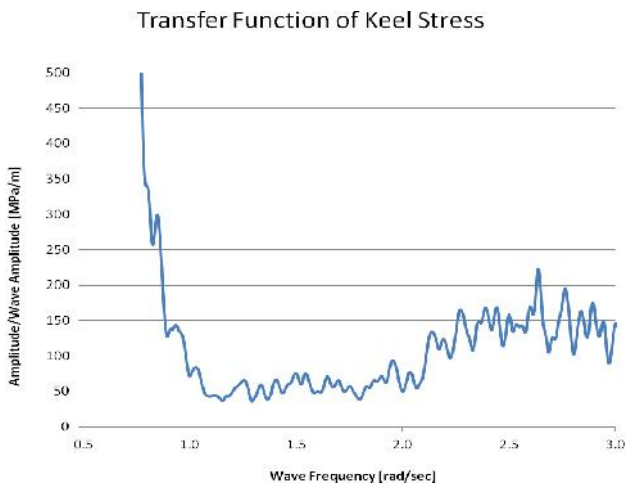
Untuk menentukan fungsi transfer tegangan, data uji hidrodinamika berupa *time history stress* pada *buoy* dengan kondisi tertambat (lihat Gambar 4), diubah ke dalam bentuk domain frekuensi (spektrum tegangan) dengan metode *Welch*. Berikut adalah hasil transformasi domain waktu menjadi domain frekuensi seperti terlihat pada Gambar 6.

Fungsi transfer tegangan diperoleh dari akar kuadrat rasio antara spektrum tegangan dengan spektrum gelombang. Berikut adalah hasil perhitungan fungsi transfer tegangan seperti terlihat pada Gambar 7.

Fungsi transfer tegangan yang digunakan sebagai perhitungan adalah pada rentang frekuensi 0.86 rad/sec sampai 2.02 rad/sec, karena pada frekuensi tersebut, frekuensi puncak dari spektrum gelombang dapat diakomodasi. Selain itu, pada rentang frekuensi 0.86 rad/sec sampai 2.02 rad/sec, fungsi transfer tegangan memiliki *trend* yang relatif konstan.

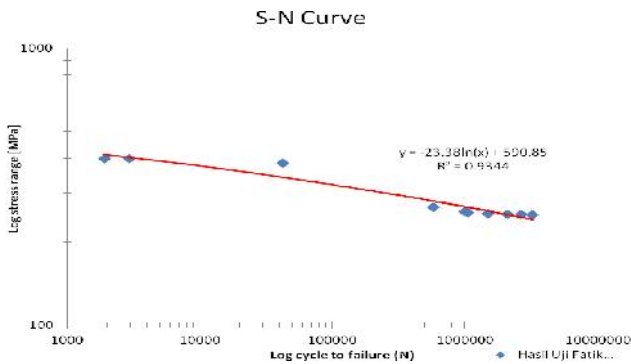


Gambar 6. Spektrum tegangan untuk kondisi perairan dengan $H_s = 2$ meter dan $T_p = 6$ detik.



Gambar 7. Fungsi transfer keel stress.

C. Penentuan Nilai m dan A dari Kurva S-N



Gambar 8. Kurva S-N data uji fatik spesimen keel buoy.

Material poros bekas yang digunakan sebagai keel pada buoy tsunami telah dilakukan pengujian fatik untuk memperoleh kurva S-N [2]. Kurva S-N pada umumnya ditampilkan ke dalam skala log-log. Nilai m diperoleh dari kemiringan kurva S-N seperti terlihat pada Gambar 8.

Dari Gambar 8 diperoleh kemiringan kurva S-N sebesar -0.0944 , sehingga diperoleh nilai $m = -\text{slope}^{-1} = 10.5928$. Nilai A diperoleh dari (8), diperoleh hasil sebesar $1.36E+31$.

D. Perhitungan Luasan dan Momen Luasan di Bawah Kurva Spektra Respon Tegangan untuk Berbagai Kondisi Laut

Perhitungan spektrum tegangan dilakukan dengan cara mengalikan spektrum gelombang untuk berbagai kondisi laut dengan kuadrat dari fungsi transfer tegangan.

Berikut adalah hasil perhitungan luasan (m_0) dan momen luasan (m_2) di bawah kurva spektra respon tegangan untuk berbagai kondisi laut seperti dalam (3) dan (4).

Tabel 1.

Nilai m_0 [MPa²] Spektra Respon Tegangan untuk Berbagai Kondisi Laut

H_S [m]	T_Z [sec]							
	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25
0.75	196	305	264	151	104	85	70	58
1.25	546	847	733	418	290	235	195	161
1.75		1661	1436	820	569	461		
2.25			2375	1356	940			
2.75				2025	1404	1139		
3.25					1962	1591		
3.75						2118	1752	
4.25							2251	1858
4.75								2320

Tabel 2.

Nilai m_2 [MPa².sec⁻²] Spektra Respon Tegangan untuk Berbagai Kondisi Laut

H_S [m]	T_Z [sec]							
	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25
0.75	227	298	244	145	103	83	68	56
1.25	631	827	677	402	286	230	188	154
1.75		1621	1328	789	560	451		
2.25			2195	1304	925			
2.75				1948	1382	1113		
3.25					1930	1555		
3.75						2070	1696	
4.25							2179	1786
4.75								2231

E. Perhitungan Mean Zero Crossing Period Spektra Respon Tegangan untuk Berbagai Kondisi Laut

Setelah nilai m_0 dan m_2 spektra respon tegangan untuk berbagai kondisi laut telah ditentukan, selanjutnya mean zero crossing period (T_Z) spektra respon tegangan dari buoy tsunami dapat dihitung dengan menggunakan (5).

Tabel 3.

Nilai T_Z [sec] Spektra Respon Tegangan untuk Berbagai Kondisi Laut

H_S [m]	T_Z [sec]							
	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25
0.75	5.84	6.36	6.54	6.41	6.33	6.36	6.39	6.41
1.25	5.84	6.36	6.54	6.41	6.33	6.36	6.39	6.41
1.75		6.36	6.54	6.41	6.33	6.36		
2.25			6.54	6.41	6.33			
2.75				6.41	6.33	6.36		
3.25					6.33	6.36		
3.75						6.36	6.39	
4.25							6.39	6.41
4.75								6.41

F. Perhitungan Jumlah Stress Cycles untuk Berbagai Kondisi Laut

Untuk menghitung jumlah stress cycles (n) dapat dihitung dengan menggunakan (6). Nilai T yang digunakan adalah lama kejadian masing-masing kondisi laut. Nilai T total merupakan waktu kumulatif kejadian masing-masing spektrum.

Tabel 4.
Lama Waktu Kejadian T [hour] untuk Berbagai Kondisi Laut

H_s [m]	T_z [sec]							
	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25
0.75	36	409	209	27	6	5	6	7
1.25	4	1673	1704	729	134	10	10	4
1.75		62	1473	699	252	59		
2.25			6	815	94			
2.75				7	114	34		
3.25					5	86		
3.75						6	25	
4.25							9	16
4.75								25

Tabel 5.
Nilai n untuk Berbagai Kondisi Laut

H_s [m]	T_z [sec]							
	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25
0.75	22184	231488	115133	15170	3410	2832	3383	3932
1.25	2465	946893	938694	409602	76165	5665	5638	2247
1.75		35091	811442	392746	143236	33421		
2.25			3305	457922	53429			
2.75				3933	64797	19260		
3.25					2842	48715		
3.75						3399	14094	
4.25							5074	8988
4.75								14044

G. Perhitungan Effective Fatigue Stress Range untuk Berbagai Kondisi Laut

Untuk menghitung effective fatigue stress range (σ_{efr}) untuk berbagai kondisi laut dapat ditentukan dengan menggunakan (10).

Tabel 6.
Nilai σ_{efr} [MPa] untuk Berbagai Kondisi Laut

H_s [m]	T_z [sec]							
	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25
0.75	65	81	76	57	48	43	39	35
1.25	109	136	126	95	79	72	65	59
1.75		190	177	134	111	100		
2.25			227	172	143			
2.75				210	175	157		
3.25					207	186		
3.75						215	195	
4.25							221	201
4.75								225

H. Perhitungan Kerusakan Akibat Kelelahan untuk Berbagai Kondisi Laut

Kerusakan akibat kelelahan (D) untuk semua kondisi laut dapat dihitung dengan menggunakan (7) atau (9).

Tabel 7.
Nilai D untuk Berbagai Kondisi Laut

H_s [m]	T_z [sec]							
	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	7.25	7.75	8.25
0.75	3.E-08	3.E-06	7.E-07	5.E-09	2.E-10	4.E-11	2.E-11	8.E-12
1.25	7.E-07	3.E-03	1.E-03	3.E-05	8.E-07	2.E-08	7.E-09	1.E-09
1.75		4.E-03	4.E-02	1.E-03	5.E-05	4.E-06		
2.25			2.E-03	2.E-02	3.E-04			
2.75				1.E-03	3.E-03	3.E-04		
3.25					7.E-04	4.E-03		
3.75						1.E-03	2.E-03	
4.25							3.E-03	2.E-03
4.75								8.E-03

I. Penentuan Umur Kelelahan Struktur Keel Buoy Tsunami

Dari Tabel 7 diperoleh nilai akumulasi kerusakan sebesar 0.00898 selama satu tahun, sehingga akan diperoleh umur struktur keel buoy tsunami sebagai berikut:

$$\text{Umur kelelahan (F.L.)} = \frac{1}{8.98 \cdot 10^{-2}} \text{ selama 1 tahun}$$

$$\text{Umur kelelahan (F.L.)} = 11.14 \text{ tahun}$$

Jadi umur kelelahannya adalah 11 tahun.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

- 1) Umur kelelahan struktur keel buoy tsunami akibat beban gelombang dengan metode spectral fatigue analysis yang berada di koordinat 108.3417 BT dan 10.3998 LS adalah sekitar 11 tahun, dengan asumsi kejadian beban berulang setelah satu tahun.
- 2) Umur kelelahan struktur keel buoy dalam penelitian ini adalah untuk koordinat 108.3417 BT dan 10.3998 LS saja. Untuk lokasi buoy tsunami selain di lokasi ini, sebaiknya dilakukan perhitungan ulang untuk lokasi yang dimaksud.
- 3) Metode spektral dapat mengakomodasi terjadinya gelombang acak yang merupakan sifat alami gelombang di laut.
- 4) Untuk mendapatkan umur kelelahan yang lebih akurat sebaiknya memperhitungkan beban akibat interaksi gelombang dan arus serta beban angin yang mengenai struktur buoy.
- 5) Pengaruh korosi pada struktur keel buoy sebaiknya diperhitungkan karena korosi dapat menyebabkan timbulnya korosi retak tegang (SCC). Hal ini sangat penting dan berpengaruh pada perhitungan umur efektif karena buoy dioperasikan di lingkungan yang korosif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. W. H. Nugroho selaku Group Leader M.V. Design& Analisis InaTEWS Buoy, IHL-BPPT, Surabaya, atas data dan diskusi yang bermanfaat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, *InaTEWS (Indonesia Tsunami Early Warning System): Konsep dan Implementasi*. Jakarta: BMKG (2010).
- [2] Sahlan, "Prediksi Umur Kelelahan Struktur Keel Buoy Tsunami Akibat Beban Gelombang," Tesis MT, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia (2011)
- [3] J. M. J. Journee and W. W. Massie, *Offshore Hydromechanics*, 1st ed., Delft University of Technology (2001).
- [4] N. D. P. Barltrop and A. J. Adams, *Dynamics of Fixed Marine Structures*, 3rd ed., Oxford: Butterworth-Heinemann (1991).