



ANALISIS PENGARUH POSISI *FAIRLEAD* TERHADAP RASIO KERUSAKAN AKIBAT KELELAHAN PADA STRUKTUR TALI TAMBAT TIPE *CATENARY* FPSO AOKA MIZU

Nur Indah dan Fuad Mahfud Assidiq

Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Indonesia

*nrindh180802@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas pengaruh posisi fairlead terhadap rasio kerusakan akibat kelelahan atau fatigue damage ratio pada struktur catenary Floating Production Storage and Offloading (FPSO) Aoka Mizu selama kondisi tertambat. FPSO ini tentunya tunduk pada pengaruh gelombang laut, arus laut, dan angin yang dapat menyebabkan pergerakan yang signifikan, membahayakan sistem tambat catenary, serta mengganggu proses produksi. Penelitian ini menggunakan metode numerik berbasis Boundary Element Method serta menggunakan data lingkungan dari Blok Masela, yang mencakup data gelombang, angin, dan arus. Tiga variasi posisi fairlead (0.3T, 0.5T, dan 0.9T) yang masing-masing merujuk pada jarak fairlead dari sarat ke keel kapal, diuji dengan panjang tali 3100 m dan kedalaman laut 1000 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa posisi fairlead 0.3T menghasilkan tegangan dan tingkat kerusakan yang rendah, sementara posisi fairlead 0.5T dan 0.9T menghasilkan tegangan dan kerusakan yang lebih tinggi. Posisi fairlead berperan penting dalam menentukan stabilitas dan kinerja struktur catenary FPSO. Posisi fairlead 0.3T tampaknya menjadi pilihan yang paling menguntungkan untuk mengurangi risiko kerusakan dan tegangan pada sistem tambat catenary FPSO Aoka Mizu selama kondisi tertambat.

Kata Kunci: Catenary, Fairlead, Fatigue Damage Ratio, FPSO, Kelelahan, Tegangan

Abstract

This research discusses the effect of fairlead position on the fatigue damage ratio of the Aoka Mizu Floating Production Storage and Offloading (FPSO) catenary structure during moored conditions. The FPSO is subject to the influence of ocean waves, ocean currents, and wind that can cause significant movement, jeopardize the catenary mooring system, and disrupt the production process. This study utilizes a numerical method based on the Boundary Element Method and uses environmental data from the Masela Block, which includes wave, wind, and current data. Three variations of fairlead position (0.3T, 0.5T, and 0.9T), each referring to the fairlead distance from the laden to the ship's keel, were tested with a rope length of 3100 m and a sea depth of 1000 m. The results showed that a fairlead position of 0.3T resulted in low stress and damage levels, while fairlead positions of 0.5T and 0.9T resulted in higher stress and damage. The fairlead position plays an important role in determining the stability and performance of the FPSO catenary structure. A fairlead position of 0.3T appears to be the most favorable option to reduce the risk of damage and stress to the FPSO Aoka Mizu catenary mooring system during moored conditions.

Keyword: Catenary, Fairlead, Fatigue Damage Ratio, FPSO, Fatigue, Stress

1. PENDAHULUAN

Selama fase produksi minyak dan gas di laut, Floating Production Storage and Offloading (FPSO) tentu tidak akan terlepas dari pengaruh gelombang laut, arus laut, dan angin. Variabel lingkungan ini dapat memicu



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

gerakan yang berfluktuasi dan memberikan tekanan dinamis pada sistem tambat, yang mengakibatkan akumulasi kerusakan akibat kelelahan secara bertahap. Permasalahan ini telah mendapatkan perhatian yang cukup besar belakangan ini, dengan meningkatnya kasus-kasus yang tercatat mengenai kerusakan yang berhubungan dengan kelelahan dalam proyek-proyek nyata.

Gelombang dan kecepatan arus yang tinggi dapat berakibat pada jarak offset FPSO yang tertambat menjadi cukup besar sehingga menimbulkan respon tegangan yang tinggi pada sistem tambat, hal ini juga dapat mengganggu proses produksi bahkan dapat merusak struktur dan faktor beban operasional lainnya [1]. Tegangan pada tali tambat dapat mempengaruhi keamanan dan stabilitas kapal, serta dapat mempengaruhi umur pakai tali tambat itu sendiri [2]. Dalam perancangan sistem tambat kapal, analisis tegangan pada tali tambat sangat penting untuk memastikan bahwa tali tambat tidak mengalami kerusakan akibat kelelahan [3]. Keberhasilan pengoperasian kapal FPSO sangat bergantung pada desain dan analisis sistem tambatan yang cermat. Penelitian ini akan membahas bagaimana pengaruh dari posisi fairlead terhadap rasio kerusakan akibat kelelahan pada struktur catenary FPSO Aoka Mizu saat kondisi tertambat.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode studi literatur yaitu berdasarkan data dukung yang telah diperoleh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4. dengan memakai data lingkungan dari Blok Masela (09 07' 51" S / 130 28' 00" E) yang meliputi data gelombang, data angin dan data arus. FPSO disimulasikan dengan tiga variasi posisi *fairlead* yaitu: 0.3T, 0.5T dan 0.9T dari sarat air kemudian membandingkan bagaimana pengaruhnya terhadap rasio kerusakan akibat kelelahan pada sistem tambat. Karena sistem tambat didesain secara simetris maka dalam analisa perhitungan tegangan dan *fatigue damage* ini digunakan *mooring line* 1, 5, dan 6, sebagai sampel *mooring line* pada bagian *fore* FPSO dan *mooring line* 4, 11 dan 12 sebagai sampel untuk bagian *aft* FPSO.

Panjang tali yang digunakan dalam simulasi untuk masing-masing *mooring line* adalah 3.100 meter dengan kedalaman laut 1.000 meter, sudut *mooring line* dalam desain ini yaitu 34°, 45°, dan 56°. Pola tambat yang dipakai adalah pola 4x3 dengan radius *mooring* 3.000 meter, penomoran setiap *mooring line* dapat dilihat pada Gbr. 1, properti dari tali tambat [4] lebih jelasnya ditunjukkan pada Tabel.2, serta dimensi utama dari kapal FPSO Aoka Mizu dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi FPSO Aoka Mizu

Barge Hull Gas FPSO	
Length	206.75 m
Breadth	38.4 m
Height	30.08 m
Draft	21.75 m

Tabel 2. Properti tali tambat FPSO Aoka Mizu

Mooring Properties	
Description	Studdles R4
Diameter (m)	0.1588
Wet Weight (kg/m)	438.90
Maximum Breaking Load, MBL (kN)	19,563.30
Axial Stiffness, EA (kN)	1,842,397.80

Tabel 3. Data angin dan arus Blok Masela

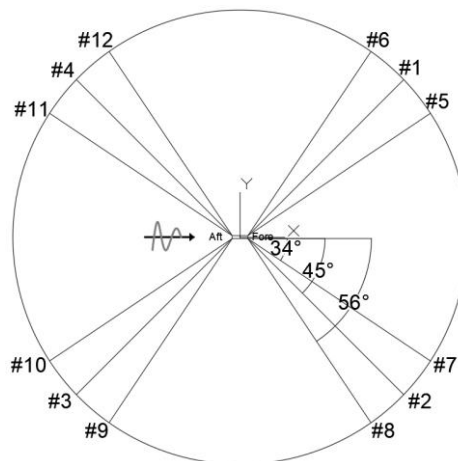
Parameter	Kecepatan (m/s)
Angin	16.91
Arus	0.50



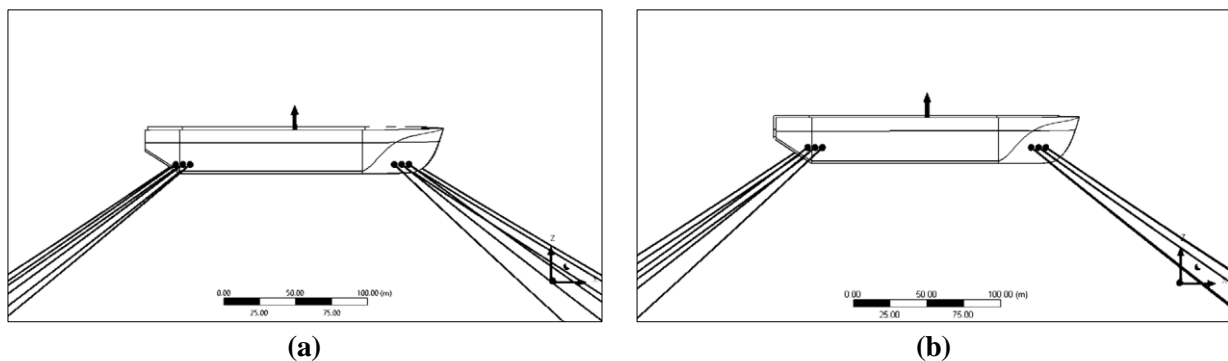
Tabel 4. Data sebaran gelombang Blok Masela

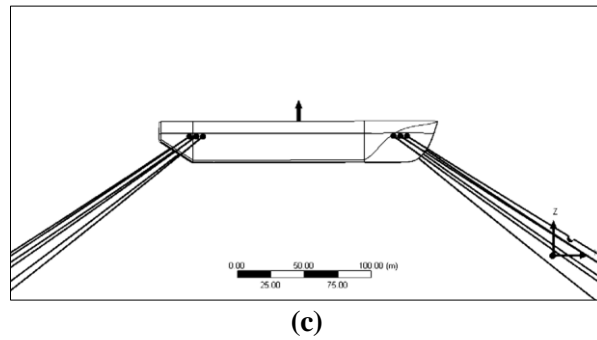
	Hs (m)					Total
	0.1 - 1	1.1 - 2	2.1 - 3	3.1 - 4	4.1 - 5	
0.1 - 2	0	0	0	0	0	0
2.1 - 4	0.58	0	0	0	0	0.58
4.1 - 6	9.51	4.43	0	0	0	13.94
6.1 - 8	5.12	6.9	4.74	0.03	0	16.79
8.1 - 10	8.2	3.5	5.6	0.78	0.04	18.12
10.1 - 12	10.8	20.8	0.15	0.01	0.01	31.77
12.1 - 14	9.3	2.68	0.02	0	0	12
14.1 - 16	2.93	2.46	0.04	0	0	5.43
16.1 - 18	0.42	0.77	0.03	0	0	1.22
18.1 - 20	0.05	0.096	0	0	0	0.146
Total	46.91	41.636	10.58	0.82	0.05	100
Kumulatif	46.9	88.5	99.1	99.9	100	

Berdasarkan Tabel 3. di atas, diinput kecepatan angin dan arus masing-masing sebesar 16.91 m/s dan 0.5 m/s pada *software* Ansys AQWA, dan dari Tabel 4. probabilitas gelombang (P_i) yang digunakan adalah yang tertinggi, yaitu 20.8 dengan tinggi gelombang signifikan (H_s) adalah 2 meter dan periode gelombang (T_p) yaitu 12 detik.



Gambar 1. Pola tambat FPSO Aoka Mizu





Gambar 2. Variasi posisi *fairlead*: (a) 0.3T, (b) 0.5T, (c) 0.9T

Tabel 5. Variasi posisi *fairlead* FPSO Aoka Mizu

Posisi <i>Fairlead</i>	from FPSO keel		from Draft	
0.3 T =	6.525	m	-15.225	m
0.5 T =	10.875	m	-10.875	m
0.9 T =	19.575	m	-2.175	m

Posisi *fairlead* yang pertama adalah 0.3T (Gbr 2.a) dimana *fairlead* dipasang pada jarak 15.225 meter yang dihitung dari sarat ke *keel* kapal, variasi kedua yaitu posisi *fairlead* berada pada 0.5T (Gbr 2.b) dengan jarak 10.875 meter dari sarat ke *keel* kapal, sedangkan untuk variasi ketiga 0.9T (Gbr 2.c) posisi *fairlead* berada pada jarak 2.175 dari sarat ke *keel* kapal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 *Hydrostatic*



Gambar 3. FPSO Aoka Mizu

Data hasil analisis hidrostatis dapat dilihat pada Tabel 6. Dimana letak *center of gravity* FPSO berada di titik (0,0,0) dalam koordinat XYZ. Sementara itu, pergerakan heave (Z) FPSO adalah sebesar 75,339,152 N/m, yang mencerminkan *response* FPSO terhadap perubahan ketinggian gelombang laut. Kemudian, data roll (RX) dan pitch (RY) menggambarkan rotasi FPSO dalam respons terhadap gelombang laut dengan masing-masing nilai $-1.20237e^8$ N.m/° dan $3.99811e^9$ N.m/°.

Tabel 6. Data *hydrostatic* dari software Ansys AQWA

Item	Aqwa Hydrostatic Results
Center of Gravity Position	
X:	0. m
Y:	0. m
Z:	0. m
Heave (Z):	75339152 N/m
Roll (RX):	-1.20237e8 N.m/°
Pitch (RY):	3.99811e9 N.m/°

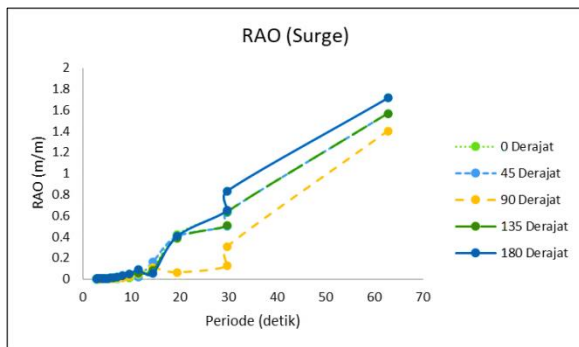


copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

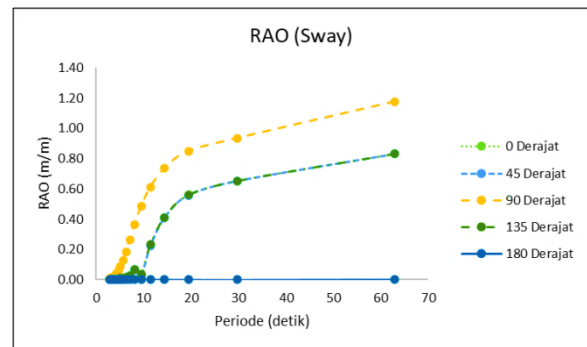
Actual Volumetric Displacement:	150587.77 m ³
Equivalent Volumetric Displacement:	150586.34 m ³
Centre of Buoyancy Position:	
X:	-3.6413188 m
Y:	-8.8326e-5 m
Z:	-10.41728 m
Cut Water Plane Area:	7495.0781 m ²
C.O.G. to C.O.B.(BG):	10.41728 m
Metacentric Heights:	
GMX:	-4.5512137 m
GMY:	149.88493 m
COB to Metacentre:	
BMX:	5.8660665 m
BMY:	160.30222 m
Restoring Moments:	
MX:	-2098534.8 N.m/°
MY:	69110960 N.m/°

3.2 Response Amplitude Operator

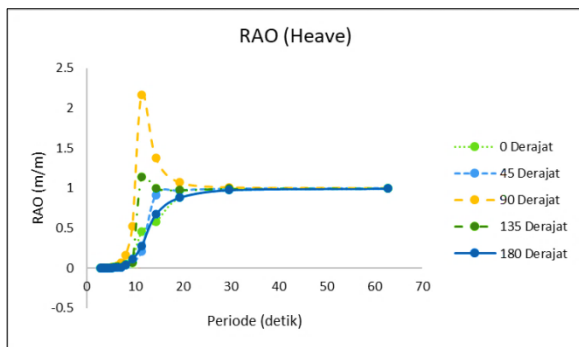
Dengan memperoleh *Response Amplitude Operator* (RAO) menggunakan *software* Ansys maka kita dapat melihat karakteristik gerakan pada FPSO. Kondisi mooring yang digunakan untuk perhitungan karakteristik gerakan struktur ini adalah pada kondisi *full load*. Dimana kondisi *full load* struktur yaitu berada pada sarat maksimum 21.75 m dengan kedalaman laut 1000 m. Berikut ini adalah grafik dari RAO pada FPSO yang dibedakan dalam lima arah pembebanan gelombang, yaitu pembebanan gelombang pada sudut 0°, 45°, 90°, 135° dan 180° untuk gerakan surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw.



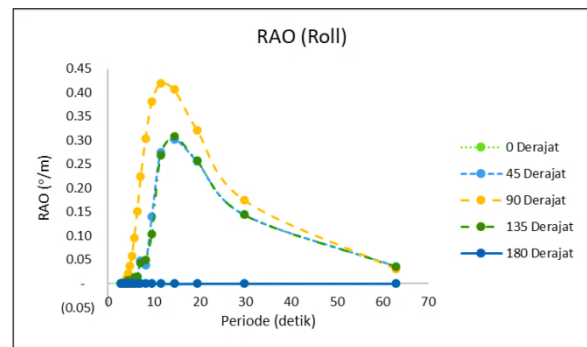
(a)



(b)



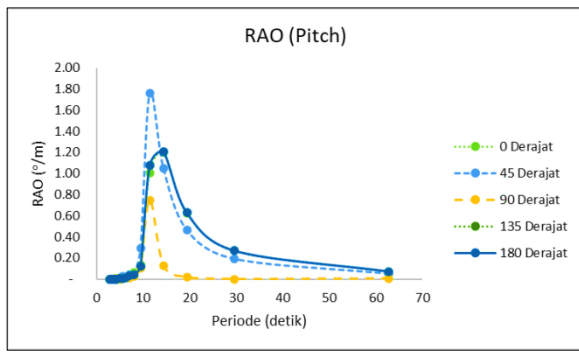
(c)



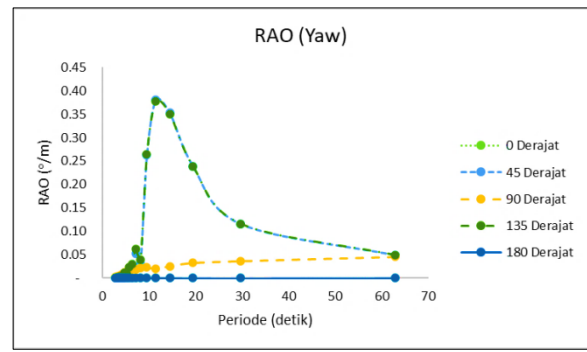
(d)



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



(e)



(f)

Gambar 4. Grafik RAO gerakan pada FPSO saat *mooring* dengan *heading* pembebanan 0°, 45°, 90°, 135° dan 180° ; a) gerakan surge, b) gerakan sway, c) gerakan heave, d) gerakan roll, e) gerakan pitch, f) gerakan yaw.

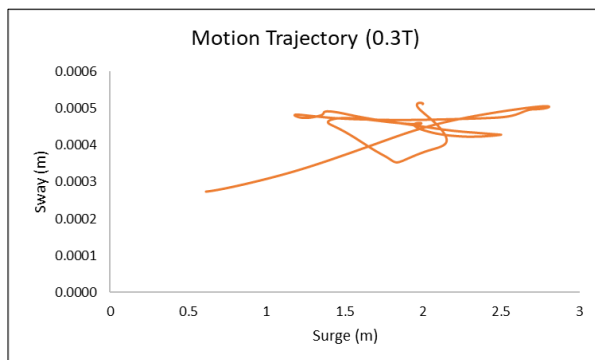
Tabel 7. Nilai maksimum RAO FPSO Aoka Mizu

Gerakan	Satuan	RAO Maximum					Max
		0 deg	45 deg	90 deg	135 deg	180 deg	
Surge	m/m	1.716565	1.567544	1.402151	1.567817	1.716904	1.716904
Sway	m/m	0.000025	0.830290	1.175307	0.830294	0.000026	1.175307
Heave	m/m	0.997777	0.998895	2.166739	1.145228	0.997814	2.166739
Roll	°/m	0.000022	0.302473	0.418748	0.307806	0.000022	0.418748
Pitch	°/m	1.201371	1.759610	0.748979	1.203069	1.203069	1.759610
Yaw	°/m	0.000017	0.380306	0.045448	0.377453	0.000022	0.380306

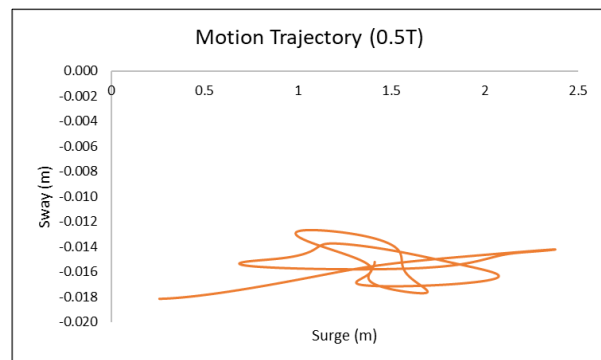
Tabel 7. menunjukkan bahwa gerakan translasi, surge yang tertinggi yaitu 1.716904 (m/m) pada *heading* 0°, sway tertinggi yaitu 1.175307 (m/m) pada *heading* 90°, sedangkan untuk heavy tertinggi yaitu 2.166739 (m/m) pada *heading* 90°. Untuk gerakan rotasi, roll yang tertinggi yaitu 0.418748 (°/m) pada *heading* 90°, pitch tertinggi yaitu 1.759610 (°/m) pada *heading* 45°, dan yaw tertinggi yaitu 0.380306 (°/m) pada *heading* 45°.

3.3 Motion Trajectory

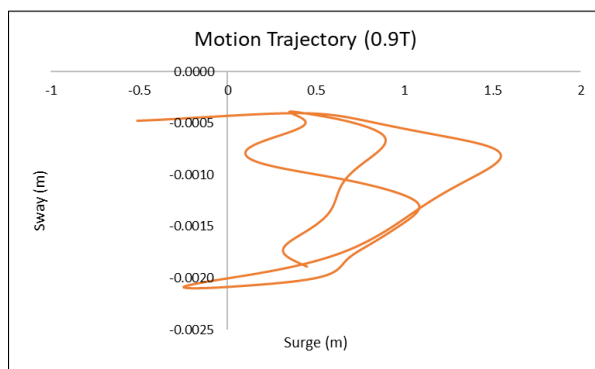
Motion trajectory kapal merupakan representasi visual dari jalur yang diikuti oleh kapal dalam pergerakannya. Mengetahui *motion trajectory* kapal dapat membantu dalam memprediksi posisi kapal, memperkirakan kecepatan kapal, dan jarak offset dari pada saat *mooring*. Selain itu, informasi ini juga dapat membantu dalam merencanakan rute pelayaran yang lebih efisien dan aman. Berikut adalah grafik *motion trajectory* (Gbr.9.) dari FPSO Aoka Mizu selama kondisi tertambat.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. Grafik *motion trajectory* pada FPSO saat *mooring*; a) *motion trajectory* pada posisi *fairlead* 0.3T, b) *motion trajectory* pada posisi *fairlead* 0.5T, c) *motion trajectory* pada posisi *fairlead* 0.9T.

Tabel 8. Nilai maksimum gerakan surge dan sway pada posisi *fairlead* 0.3T, 0.5T, dan 0.9T

Gerakan	Posisi <i>Fairlead</i>					
	0.3T		0.5T		0.9T	
	Surge (m)	Sway (m)	Surge (m)	Sway (m)	Surge (m)	Sway (m)
Offset _{max}	2.8	0.0005	2.37	-0.013	1.5	-0.0004
Offset _{min}	0.61	0.0003	0.27	-0.018	-0.5	-0.0021
ΔOffset	2.2	0.0002	2.1	0.005	2.0	0.002

3.4 Mooring Line Stress

Tegangan pada sistem tali tambat atau *mooring line stress* perlu diketahui sebab merupakan salah satu faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam perancangan sistem tambat kapal. Hasil analisis menunjukkan bahwa *mooring line stress* terendah berada pada posisi *fairlead* 0.3T sedangkan *mooring line stress* tertinggi terjadi pada posisi *fairlead* 0.5T dan 0.9T. Hasil perhitungan pada *mooring line stress* di hitung menggunakan persamaan berikut:

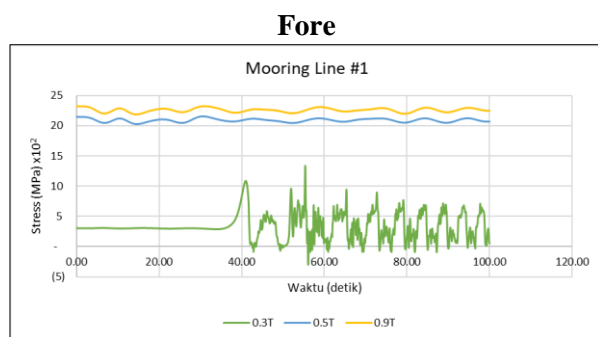
$$HSS = \frac{F}{A}$$

Dimana:

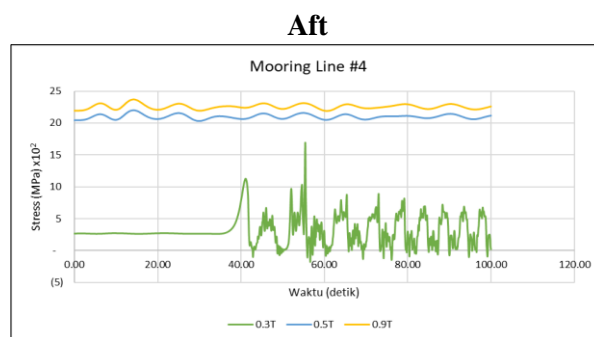
HSS = hotspot stress (N/m²)

F = gaya tegangan tali (N)

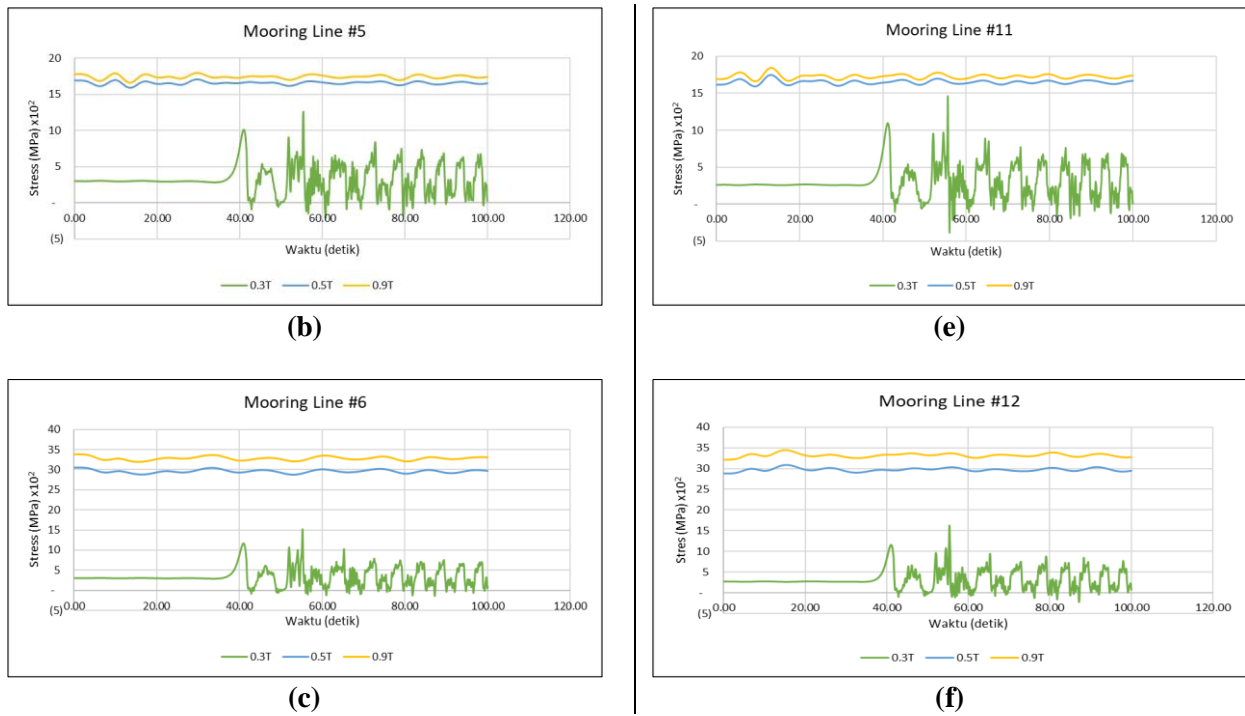
A = luas penampang *mooring line* (m²)



(a)



(d)



Gambar 6. Grafik *mooring line stress*; (a) *Mooring line 1*, (b) *Mooring line 5*, (c) *Mooring line 6*, (d) *Mooring line 4*, (e) *Mooring line 11*, (f) *Mooring line 12*

Tabel 9. Hasil perhitungan *mooring line stress*

<i>Mooring Line</i>	Letak	HSS_{maks}		
		0.3T	0.5T	0.6T
#1		1.34E+09	2.16E+09	2.32E+09
#5	Fore	1.71E+09	1.80E+09	1.53E+10
#6		1.52E+09	3.05E+09	3.38E+09
#4		1.69E+09	2.20E+09	2.37E+09
#11	Aft	1.46E+09	1.75E+09	1.84E+09
#12		1.63E+09	3.09E+09	3.44E+09

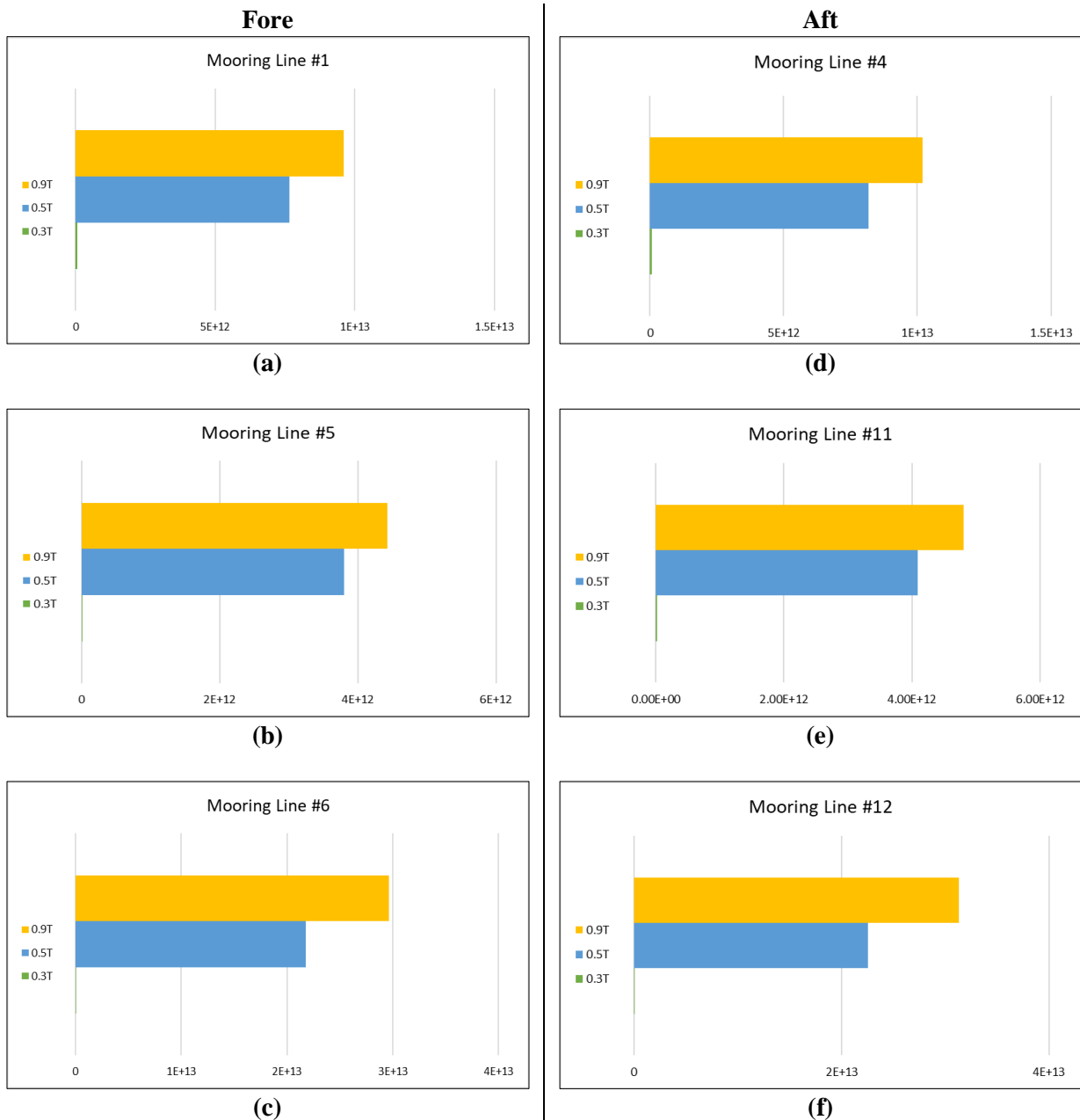
3.5 *Fatigue Damage Ratio*

Rasio kerusakan akibat kelelahan (*fatigue damage ratio*) memproyeksikan kapabilitas struktur catenary FPSO dalam menahan beban dari luar tanpa mengalami kerusakan yang berarti. Perhitungan tingkat kerusakan kelelahan merupakan hal yang sangat penting dalam merancang struktur *catenary* FPSO agar dapat memastikan keamanan dan kinerja optimal selama masa penggunaannya. Perhitungan *fatigue damage* dihitung dengan persamaan berikut:

$$D = \frac{P_i}{N_i \times T_i}$$

Dimana:

- D = rasio kerusakan akibat kelelahan
- P_i = probabilitas gelombang tertentu
- N_i = jumlah kejadian gelombang setiap stress range
- T_i = Periode gelombang (detik)



Gambar 7. Rasio kerusakan akibat kelelahan (*fatigue damage ratio*); (a) Mooring line 1, (b) Mooring line 5, (c) Mooring line 6, (d) Mooring line 4, (e) Mooring line 11, (f) Mooring line 12

Tabel 10. Hasil perhitungan *fatigue damage*

Mooring Line	Letak	D		
		0.3T	0.5T	0.6T
#1		7.04E+10	7.66E+12	9.59E+12
#5	Fore	1.53E+10	3.80E+12	4.43E+12
#6		2.69E+10	2.18E+13	2.96E+13
#4		7.35E+10	8.16E+12	1.02E+13
#11	Aft	2.40E+10	4.09E+12	4.80E+12
#12		3.30E+10	2.25E+13	3.13E+13

Hasil perhitungan *fatigue damage* menunjukkan bahwa posisi *fairlead* 0.3T menghasilkan tingkat rasio kerusakan yang rendah. Sebaliknya, posisi *fairlead* 0.5T dan 0.9T menghasilkan tingkat rasio kerusakan yang lebih tinggi.



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Assidiq. F. M, dkk. Fatigue Analysis of Catenary Mooring System due to Harsh Environment in Head Seas. Ocean Engineering, Faculty of Engineering, Hasanuddin University, Hlm. 30-38, 2018.
- [2] Weicheng Cui, Shixiao Fu, Zhiqiang Hu. Fatigue of Mooring Lines. Hlm. 527–533, 2022.
- [3] Rafliansyah Azhar Puteraa, Eko Budi Djatmikoa, dan Murdjitoa. Local Stress Analysis in the Chain Link of Mooring Line That Had Diameter Degradation. Department of Ocean Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Hlm. 1-9, 2021.
- [4] DNV OS E304. Offshore Mooring Steel Wire Ropes. Norway: Det Norske Veritas. Hlm. 26-27, 2015.
- [5] Denny, E., & Lenggoro, I. Analisis Posisi Fairlead Terhadap Karakteristik Dinamis Sistem Tali Tambat Pada FPSO. Jurnal Teknik Kelautan, 7(1), 45-54, (2020)
- [6] Suparno, A., & Nugroho, S. Studi Posisi Optimal Fairlead Pada Sistem Tali Tambat Tipe Catenary FPSO Menggunakan Metode Simulasi Dinamika Fluida Komputasional. Jurnal Rekayasa Kelautan, 5(2), 87-95, (2018).
- [7] Hidayatullah, A., & Wardhana, K. P. Pengaruh Perubahan Posisi Fairlead Terhadap Distribusi Beban Pada Tali Tambat FPSO. Jurnal Teknik Perkapalan, 5(2), 67-74, (2019).
- [8] Nasution, R. A., & Sinulingga, A. M. Analisis Pengaruh Posisi Fairlead Terhadap Ketegangan Tali Tambat Pada FPSO Aoka Mizu Menggunakan Metode Finite Element Analysis. Jurnal Teknik Sipil dan Kelautan, 8(2), 101-110, (2021).
- [9] Aditya, B., & Lestari, D. Analisis Rasio Kerusakan Akibat Kelelahan pada Struktur Tali Tambat FPSO Aoka Mizu Menggunakan Metode Simulasi Monte Carlo. Jurnal Teknologi Kelautan, 4(1), 23-32, (2017).

