Desain *Catenary Mooring Line* Pada Struktur Pemecah Gelombang Terapung dengan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Roni Aprianto[1], Anggoronadhi Dianiswara[2], Siti Rahayuningsih[3]

[1]*Jurusan Sains, Teknologi Pangan, dan Kemaritiman, Teknik Kelautan, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan*
E-mail : 14181029@student.itk.ac.id
[2]*Jurusan Sains, Teknologi Pangan, dan Kemaritiman, Teknik Kelautan, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan*
E-mail : anggoronadhi@lecturer.itk.ac.id
[3]*Jurusan Sains, Teknologi Pangan, dan Kemaritiman, Teknik Kelautan, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan*
E-mail : siti.rahayuningsih@lecturer.itk.ac.id

ABSTRAK

Pemecah gelombang atau *breakwater* berfungsi sebagai struktur untuk memecah gelombang agar saat gelombang mencapai pantai, kekuatan dari gelombang sudah berkurang. Terdapat dua jenis struktur *breakwater*, yaitu *fixed breakwater* dan *floating breakwater* di mana keduanya memiliki keuntungan masing-masing sesuai dengan kedalaman perairan. *Floating breakwater* atau pemecah gelombang terapung, selain digunakan sebagai pemecah gelombang juga dapat dimodifikasi menjadi pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL). Analisis dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* Ansys Aqwa. Analisis yang dilakukan ialah *time domain dynamic analysis* dalam kondisi *intact* atau ULS. Data lingkungan yang digunakan sesuai dengan kondisi *benign area* dengan variasi tinggi gelombang signifikan (Hs) yaitu 0,5; 1; 1,5; dan 2 meter. Dari penelitian yang dilakukan didapatkan *safety factor* terkecil dari *mooring line* yaitu sebesar 8,98 yang masih berada di atas minimum *safety factor* 1,67.

Kata Kunci
Floating breakwater, time domain, PLTGL, mooring line

1. PENDAHULUAN

Pantai merupakan daerah yang menjadi perbatasan antara daratan dan lautan dengan kondisi geografis yang berbeda-beda. Daerah pantai atau daerah pesisir sangat berguna bagi kehidupan manusia, banyak pembangunan seperti pelabuhan maupun pemukiman yang dibangun di daerah pesisir pantai. Salah satu penyebab rusaknya pantai adalah gelombang laut yang membuat pantai mengalami abrasi [8]. Daerah pesisir yang memiliki puncak gelombang tinggi tentunya memerlukan perhatian khusus agar dapat diminimalisir kerusakan yang akan terjadi. Salah satu tindakan yang dapat dilakukan yaitu dengan membangun sebuah struktur yang disebut sebagai *breakwater*. Terdapat dua jenis struktur *breakwater*, yaitu *fixed breakwater* dan *floating breakwater* di mana keduanya memiliki keuntungan masing-masing sesuai dengan kedalaman perairan. Referensi [4] mengungkapkan bahwa *floating breakwater* lebih efisien untuk digunakan dibandingkan dengan *fixed breakwater*. *Floating breakwater* atau pemecah gelombang terapung, selain digunakan sebagai pemecah gelombang juga dapat dimodifikasi menjadi pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL). Kebutuhan manusia akan energi listrik mengalami peningkatan pesat di era sekarang, namun jumlah sumber daya yang digunakan sudah menipis [7]. Tertulis dalam *US patent* nomor US10240575B2 (2019), bahwa benda terapung dapat dibuat menjadi sebuah alat yang dapat membangkitkan listrik dengan memanfaatkan tenaga dari gelombang laut. Namun, hingga saat ini belum ditemukan penelitian terkait desain *mooring line* pada pemecah gelombang terapung dengan pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

Penelitian ini akan membahas mengenai desain *catenary mooring line* pada pemecah

gelombang terapung dengan pembangkit listrik tenaga gelombang laut, di mana sistem pembangkit listrik hanya dimodelkan bagian lubang untuk dilalui air yang akan menggerakkan turbin. Pemecah gelombang terapung atau *floating breakwater* dipilih dalam penelitian ini karena memiliki kelebihan dibandingkan *fixed breakwater*. Kelebihan ini antara lain ialah lebih ekonomis jika diaplikasikan pada perairan dengan kedalaman lebih dari 10 ft, tidak menimbulkan sedimentasi, lebih mudah dimodifikasi dan dipindahkan, serta dapat diaplikasikan pada tanah dengan kondisi buruk [6]. Dalam penelitian akan dilakukan analisis terhadap respons dinamis dari pemecah gelombang terapung dan *mooring line* serta tegangan maksimum *mooring line* untuk mengetahui bahwa tegangan tidak melebihi batas kriteria maksimum *breaking load*. Dalam menganalisis, penulis akan menggunakan bantuan *software* Maxsurf dan Ansys Aqwa.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Gaya Angin

Angin tercipta karena adanya perbedaan tekanan udara antara dua tempat berbeda, angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara lebih rendah. Pergerakan angin juga dipengaruhi oleh adanya gerak rotasi bumi dan pemanasan suatu wilayah yang disebabkan oleh matahari. Gaya yang ditimbulkan angin sangat berpengaruh terhadap kinerja suatu bangunan apung, gaya angin dapat diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut [1]:

$$F_w = C_w \Sigma (C_s C_h A) V_{w^2} \quad (1)$$

Keterangan:
F_w = Gaya angin pada struktur (kN)
C_w = 0.615 N.s^2/m^4
C_s = Koefisien bentuk
C_h = Koefisien tinggi
A = Luas penampang yang terkena angin (m^2)
V_w = Kecepatan angin (m/s)

2.1.2 Gaya Gelombang

Gelombang adalah pergerakan naik turun air laut yang disebabkan oleh angin. Energi dari angin berpindah ke permukaan air yang menyebabkan terciptanya riak-riak air hingga menjadi sebuah gelombang. Dalam metode sederhana periode puncak gelombang (Tp) dapat diperhitungkan sebagai berikut [3]:

$$\sqrt{13.H_s} < T_p < \sqrt{30.H_s} \quad (2)$$

Keterangan:
T_p = Periode puncak gelombang (s)
H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

2.1.3 Gaya Arus

Arus adalah pergerakan massa air secara horizontal maupun vertikal yang disebabkan oleh adanya perbedaan densitas dan tekanan air. Gaya arus dapat diperhitungkan dengan persamaan berikut [5]:

$$F_d = C_d A \left(\frac{\rho u^2}{2}\right) \quad (3)$$

Keterangan:
F_d = Gaya arus pada struktur (kN)
C_d = Koefisien drag
A = Luas penampang yang terkena arus (m^2)
ρ = Massa jenis air (1025 Kg/m^3)
u = Kecepatan arus (m/s)

2.2 Tinjauan Pustaka

Referensi [6] mengungkapkan bahwa *floating breakwater* memerlukan sistem *mooring* agar struktur dapat tetap berada pada lokasi yang diinginkan. Dengan menggunakan *catenary mooring line* dan konfigurasi *spread mooring*, didapatkan *tension maximum* sebesar 10,31 – 10,53 kn untuk ketinggian gelombang 0,5 m dan 10,32 – 10,54 kN untuk ketinggian gelombang 1 m. *Offset maximum* yang didapatkan ketika kondisi pasang dengan sudut gelombang 0 derajat pada ketinggian 1,5 m yaitu sebesar 0,010 – 0,019 m. Diameter *chain* yang digunakan sebesar 12,5 mm dengan *minimum breaking load* sebesar 92,2 kN.

Referensi [2] melakukan penelitian pada *crane barge* terhadap respons dinamis gerakan dan tali tambat akibat gelombang *irregular*, didapatkan bahwa respons dinamis pada arah *surge* dan *sway* sudah cukup aman jika diberi jarak sebesar 1 m. Nilai *safety factor* tali tambat yang didapatkan paling rendah ialah sebesar 8.17, di mana nilai ini masih terbilang aman sesuai dengan standar yang berlaku dan tali tambat masih mampu menahan beban yang diberikan

3. METODE PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

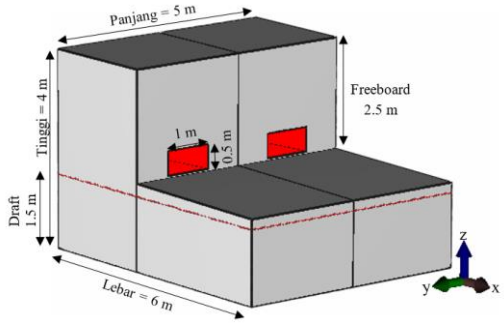
Pada tahapan studi literatur, dilakukan tinjauan pustaka dan dasar teori yang dibutuhkan untuk menunjang penelitian ini. Peninjauan dilakukan terhadap buku dan jurnal yang berkaitan serta pada *rules* API RP 2SK sebagai acuan untuk mengevaluasi *safety factor* juga pada DNVGL-ST-N001 yang digunakan sebagai standar dalam memodelkan beban lingkungan.

3.2 Pengumpulan Data

Pada tahapan pengumpulan data, peneliti mengumpulkan data yang dibutuhkan dalam penelitian ini, kemudian data tersebut dianalisis sehingga hasil penelitian diharapkan dapat dijadikan acuan untuk menyelesaikan permasalahan penelitian. Adapun data yang digunakan dalam penelitan ini adalah data awal struktur pemecah gelombang terapung dan data lingkungan berupa data gelombang, arus, dan angin.

3.3 Pemodelan Struktur Pemecah Gelombang Terapung Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

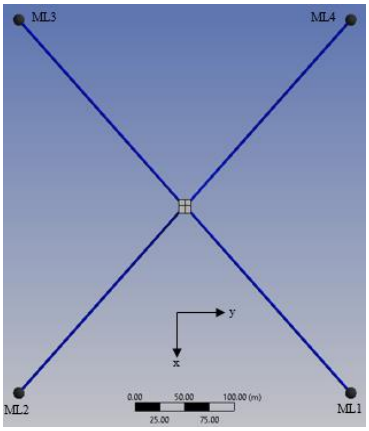
Pada tahap ini peneliti melakukan pemodelan struktur dengan menggunakan data yang telah didapat, pemodelan struktur pemecah gelombang terapung dengan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dimodelkan dengan menggunakan *software* Maxsurf. Penelitian ini menggunakan pemecah gelombang terapung dengan dimensi panjang 5 m, lebar 6 m, tinggi 4 m dan *draft* 1,5 m serta *freeboard* 2,5 m. Struktur juga dilengkapi dengan lubang berbentuk persegi panjang dengan dimensi panjang 1 meter dan lebar 0,5 meter yang berfungsi mengalirkan air sebagai penggerak turbin.



Gambar 1. Desain Pemecah Gelombang Terapung Dengan pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

3.4 Pemodelan *Catenary Mooring Line* dan Beban Lingkungan

Pemodelan *mooring line* dengan menggunakan bantuan *software* Ansys Aqwa. Properti *mooring line* diambil dari Balmoral Marine Equipment Handbook yang bertipe *wire rope* dengan diameter 83 mm, *minimum breaking load* sebesar 4640 kN, panjang 105.5 meter, *stiffness* sebesar 390 MN dengan massa 26 kg/m dan *initial tension* sebesar 19.34 kN.



Gambar 2. Konfigurasi *Mooring Line*

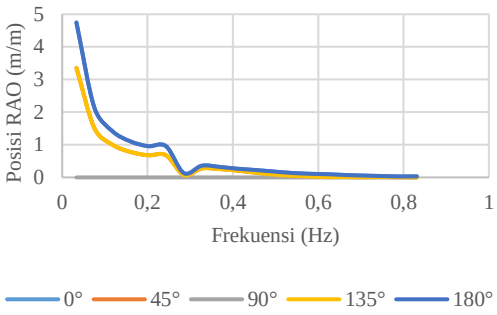
Setelah itu melakukan input beban lingkungan, adapun data beban lingkungan yang digunakan ialah gelombang yang divariasikan menjadi 4 variasi serta arus dan angin berdasarkan DNVGL-ST-N001 pada *benign area* dengan data sebagai berikut [2]:

Tabel 1. Data Lingkungan

Data	Variasi				Unit
	1	2	3	4	
Kedalaman	10	10	10	10	m
Hs	0,5	1	1,5	2	m
Tp	3,211	4,541	5,562	6,422	s
Gamma	1,7	1,56	1,46	1,48	-
Vc	0,5				m/s
Vw	15				m/s
Headin (derajat)	0, 45, 90, 135, 180				°

4. PEMBAHASAN

4.1 *Response Amplitude Operator* (RAO) Struktur Pemecah Gelombang Terapung Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

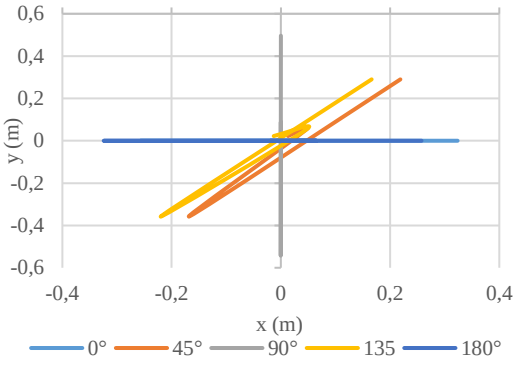


Gambar 3. RAO Struktur Saat *Free Floating*

Berdasarkan Gambar 3, nilai RAO struktur terbesar terjadi saat *heading* 180° dengan besar gerakan yang terjadi yaitu 4,75 m/m pada sumbu x.

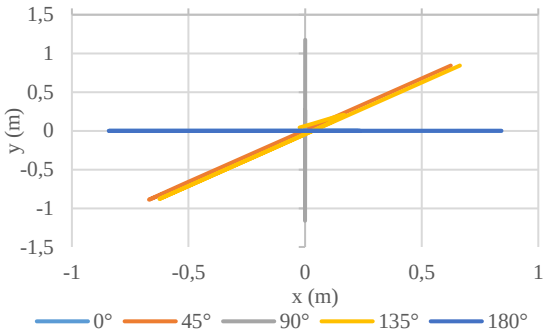
4.2 Respons Dinamis Pemecah Gelombang Terapung Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Akibat adanya beban lingkungan, membuat struktur pemecah gelombang terapung merespon dengan gerakan searah dengan datangnya beban lingkungan tersebut. Arah pembebanan 0° dan 180° membuat struktur bergerak dominan ke arah sumbu x, arah pembebanan 90° mengakibatkan struktur bergerak ke arah sumbu y, sedangkan untuk arah pembebanan 45° dan 135° mengakibatkan struktur bergerak dominan ke arah sumbu x dan y secara bergantian.



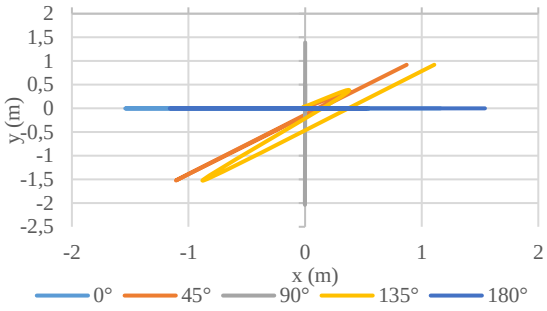
Gambar 4. Pola Gerakan Respons Dinamis Struktur Akibat Hs 0,5 m

Nilai respon dinamis struktur pada Hs 0,5 m terbesar yaitu 0,5 meter ke arah sumbu y, di mana gerakan ini disebabkan oleh arah beban lingkungan 90°.



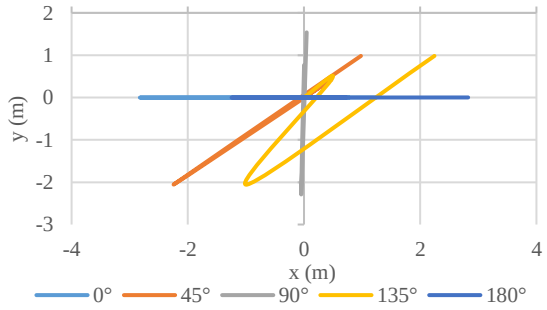
Gambar 5. Pola Gerakan Respons Dinamis Struktur Akibat Hs 1 m

Nilai respon dinamis struktur pada Hs 1 m terbesar yaitu 1,18 meter ke arah sumbu y, di mana gerakan ini disebabkan oleh arah beban lingkungan 90°.



Gambar 6. Pola Gerakan Respons Dinamis Struktur Akibat Hs 1,5 m

Nilai respon dinamis struktur pada Hs 1,5 m terbesar yaitu 2.03 meter dengan arah yang sama dengan Hs 0 dan 1 m yaitu ke arah sumbu y, di mana gerakan ini disebabkan oleh arah beban lingkungan 90°.



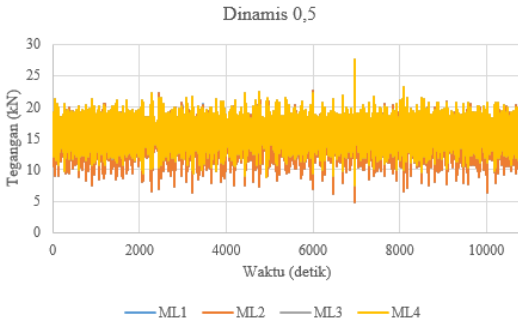
Gambar 7. Pola Gerakan Respons Dinamis Struktur Akibat Hs 2 m

Nilai respon dinamis struktur pada Hs 2 m terbesar yaitu 2.82 meter ke arah sumbu x, di

mana gerakan ini disebabkan oleh arah beban lingkungan 180°.

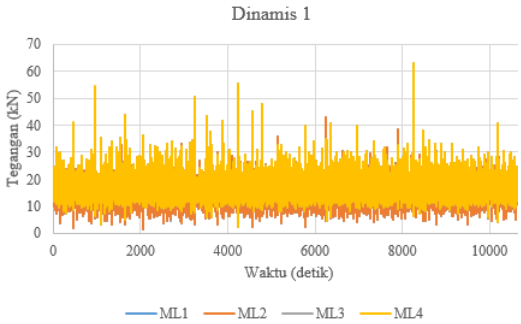
4.3 Respons Dinamis Mooring Line

Akibat adanya gerakan struktur pemecah gelombang terapung yang diakibatkan oleh beban lingkungan menyebabkan *mooring line* juga mengalami gerakan respons dinamis, adapun respons dinamis dari *mooring line* sebagai berikut:



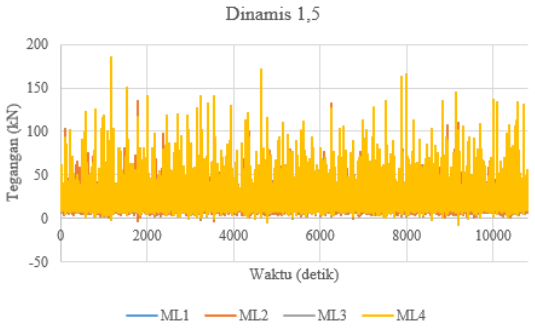
Gambar 8. Pola respons dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat Hs 0,5 m

Gambar 8 merupakan pola gerakan respon dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat gelombang signifikan 0,5 meter. Tegangan terbesar terjadi diwaktu 6.957,3999 detik dengan nilai tegangan sebesar 27,59 kN pada *mooring line* ML3.



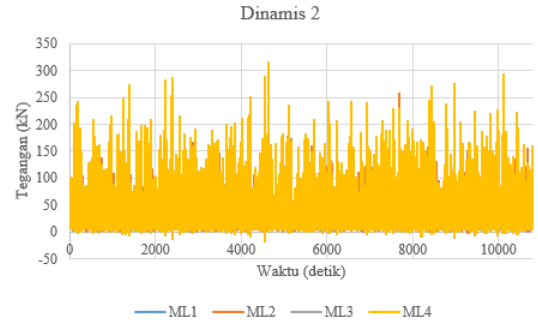
Gambar 9. Pola respons dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat Hs 1 m

Gambar 9 merupakan pola gerakan respon dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat gelombang signifikan 1 meter. Tegangan terbesar terjadi diwaktu 8.256,7998 detik dengan nilai tegangan sebesar 62,85 kN pada *mooring line* ML4.



Gambar 10. Pola respons dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat Hs 1,5 m

Gambar 10 merupakan pola gerakan respon dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat gelombang signifikan 1,5 meter. Tegangan terbesar terjadi diwaktu 1.157 detik dengan nilai tegangan sebesar 185,09 kN pada *mooring line* ML4.



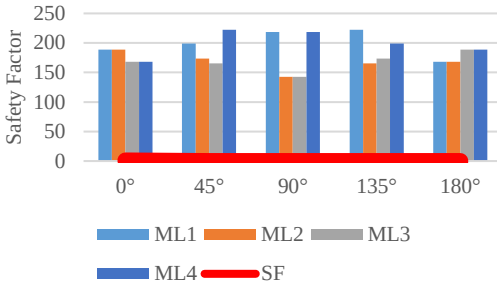
Gambar 11. Pola respons dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat Hs 2 m

Gambar 11 merupakan pola gerakan respon dinamis *mooring line* terhadap waktu akibat gelombang signifikan 2 meter. Tegangan terbesar terjadi diwaktu 4.630,5 detik dengan nilai tegangan sebesar 314,61 kN pada *mooring line* ML4.

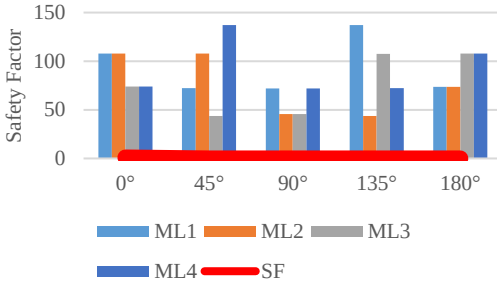
4.4 Tegangan Maksimum *Mooring Line* Terhadap Nilai *Safety Factor*

Setelah dilakukan analisis menggunakan *software* Ansys Aqwa didapatkan hasil tegangan dari masing-masing *mooring line* dengan arah pembebanan 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180° pada Hs 0,5 m, 1 m, 1,5 m dan 2 m. Kemudian dilakukan perhitungan *safety factor* dengan menggunakan persamaan 4 dan dilakukan perbandingan *safety factor mooring line* dengan standar *safety factor* yang mengacu pada API RP2SK (2005) untuk *time domain dynamic analysis* saat kondisi *intact* yaitu 1,67.

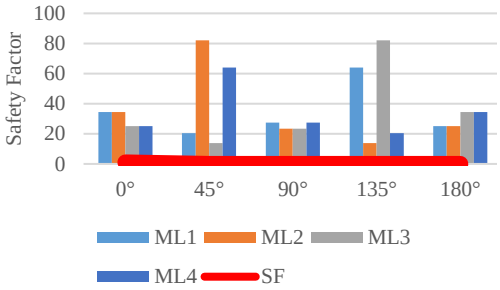
$$Safety\ Factor = \frac{minimum\ breaking\ load}{tegangan\ maksimum} \quad (4)$$



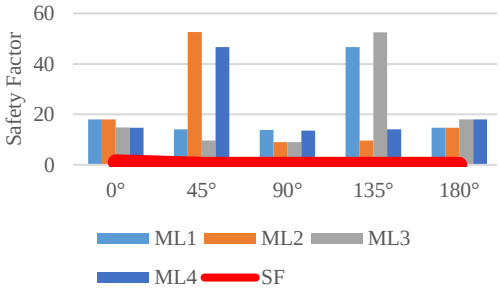
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 12. Perbandingan Nilai-nilai Tegangan Maksimum *Mooring Line* Dengan Batas *Safety Factor* saat Hs: (a) 0,5 m, (b) 1 m, (c) 1,5 m,
(d) 2 m

Mengacu pada Gambar 12 secara berturut (a), (b), (c), dan (d) nilai *safety factor* terkecil untuk Hs 0,5 m yaitu sebesar 142,37, Hs 1 m sebesar 43,59, Hs 1,5 m sebesar 13,93, dan Hs 2 m sebesar 8,98. Nilai-nilai *safety factor* terkecil tersebut jika dibandingkan dengan standar minimal *safety factor* memiliki selisih yang sangat jauh, hal ini disebabkan oleh penggunaan *mooring line* yang berdiameter besar. Penggunaan *mooring line* berdiameter besar dikarenakan sistem *catenary mooring line* mengandalkan massa dari *mooring line* untuk menahan struktur akibat adanya beban lingkungan. Alternatif untuk perbaikan pada masalah selisih yang terlalu jauh ini dapat dilakukan dengan menggunakan *mooring line* berdimeter lebih kecil. Dengan melihat nilai *safety factor mooring line* terkecil yaitu 8,98, maka dapat disimpulkan bahwa *mooring line* masih aman dan berada di atas standar.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan di atas, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai RAO struktur terbesar terjadi saat *heading* 180° dengan besar gerakan yang terjadi yaitu 4,75 m/m pada sumbu x.
2. Nilai respons dinamis pemecah gelombang terapung dengan pembangkit listrik tenaga gelombang laut terbesar yaitu 2,82 meter ke arah sumbu x akibat Hs 2 m dari arah pembebanan 180°.
3. Nilai *safety factor mooring line* terkecil yaitu sebesar 8,98 yang masih berada di atas batas *safety factor* untuk *time domain dynamic analysis* pada kondisi *intact* dalam API RP 2SK yaitu 1,67.

6. SARAN

Berikut beberapa saran yang dapat dilakukan untuk penelitian selanjutnya:

1. Penelitian dapat dilakukan dengan menggunakan *software* lain seperti ORCAFLEX untuk dijadikan perbandingan.
2. Optimasi *mooring line* dengan modifikasi properti *mooring line* seperti diameter, panjang, dan juga *stiffness*.
3. Menghitung *life design* agar diketahui jangka waktu penggunaan struktur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak berikut:

1. Orang tua yang senantiasa mendukung dalam melakukan penelitian serta penulisan.

2. Teman-teman yang terlibat dalam penyediaan perangkat penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

[1] API RP 2SK 3rd *Edition*. 2005. *Design and Analysis of Station keeping Systems for Floating Structures*. API Publishing Services. Washington, D.C.

[2] Disaniswara, A. 2021. Analisis Respon Dinamis Gerakan Dan Tali Tambat Crane Barge. JURNAL INOVTEK POLBENG, VOL. 11, NO. 1.

[3] DNVGL-ST-N001 Rev 6. 2016. *TECHNICAL STANDART COMMITTEE GUIDLINES FOR MARINE TRANSPORTATIONS*. Noble Denton Group Limited. Norwegia.

[4] Manan, M.H., 2017. Desain Tali Tambat pada Struktur Floating Breakwater dengan Konfigurasi *Taut Mooring System*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

[5] PIANC. 1994. *Floating Breakwater A Practical Guide for Design and Construction.* Report of Working Group No.13 of The Permanent. Technical Comitte II. Brussel. Belgium.

[6] Putra, I.A.I.D.R.P., 2017. Desain *Mooring line* Pada Struktur Pantai *Floating Breakwater* Menggunakan *Catenary Mooring line*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.

[7] Saragih, M.B.R., 2017. Analisis Potensi Gelombang Laut Sebagai Sumber Energi Alternatif Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Dengan Sistem *Ocillating Water Column* (OWC) Di Perairan Selatan Bali. Universitas Brawijaya. Malang.

[8] Wibowo, A. Yudha. 2012. Dinamika Pantai (Abrasi dan Sedimentasi). Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan. Universitas Hang Tuah. Surabaya.