

PREDIKSI PERFORMA *FLOATING OFFSHORE WIND TURBINE* TIPE *BARGE FLOATER* PASCA KEGAGALAN *MOORING LINE*

Fuad Mahfud Assidiq¹⁾

¹⁾Mahasiswa Pascasarjana Teknik Perancangan Bangunan Laut Departemen Teknik Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Email: fuadassidiq9@gmail.com

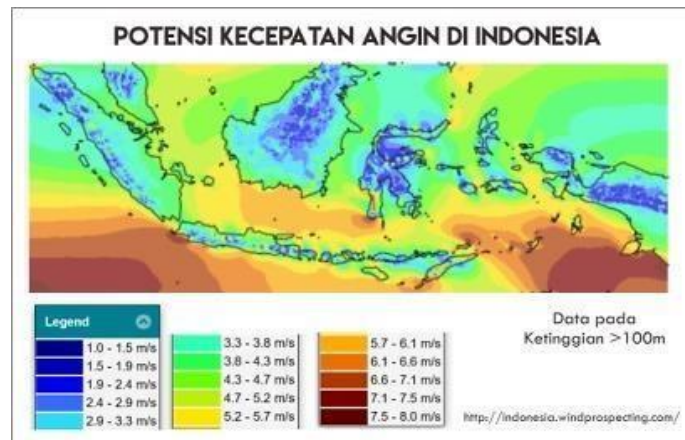
Abstrak

Potensi energi angin di Indonesia sangat besar, terutama di area lepas pantai Samudera Hindia – Barat Daya Pulau Jawa dan Laut Arafura berkisar 6,6 – 8,0 m/s pada ketinggian 50 m dari *mean sea level*. Struktur bangunan *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) tipe *barge floater* memenuhi kriteria sebagai wahana laut penunjang energi angin yang mengutamakan stabilitas *barge* sendiri dengan *draft* yang rendah. Kajian hidrodinamika *barge floater* dianalisis dalam kondisi *intact* dan *damage* setiap *mooring line*. Dalam kasus tersebut, efek kegagalan pada *mooring line* sangat berpotensi mengalami ketidakstabilan *turbine tower* FOWT saat beroperasi. Pemodelan *barge floater* berlokasi di Laut Arafura yang berdasarkan metode 3D difraksi berbasis *time domain* untuk memperoleh amplitudo respon dari gelombang reguler serta energi respon dari gelombang acak. Karakteristik FOWT masuk dalam kategori baik dimana amplitudo respon serta frekuensi puncak spektral bernilai minim. Kriteria stabilitas mode rotasi *pitch* pun diperoleh, dengan rotasi *pitch* tertinggi dalam kondisi L_1 atau L_2 *damage* senilai $0,1388^0$ termasuk dalam kondisi *operating* dimana FOWT dapat bekerja dengan normal. Sementara *tension* maksimum pada *mooring line* dalam berbagai kondisi menunjukkan *safety factor* masih dalam batas aman dengan nilai 1,73.

Kata Kunci: FOWT, Laut Arafura, *mooring line*, stabilitas

PENDAHULUAN

Angin merupakan aplikasi sumber energi terbarukan yang sangat berkembang pesat. Indonesia pun sangat berpotensi sebagai penghasil energy angin, terutama di area lepas pantai karena kecepatan angin lebih besar dan variabel penghalang (bukit, gedung, hutan,dll) lebih sedikit dibandingkan di daratan serta pengoperasian turbin angin semakin ke tengah laut, potensi energi angin semakin besar pula. Potensi kecepatan angin Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1 dimana area Samudera Hindia – Barat Daya Pulau Jawa dan Laut Arafura sekitar 6,6 sampai 8,0 m/s yang sangat memungkinkan penerapan *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) dapat terealisasi.



Gambar 1. Peta Potensi Kecepatan Angin Indonesia (ESP3,2017)



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

Jenis ini memiliki karakteristik menyerupai *floating offshore structure* yang meliputi aspek sistem penambatan. Salah satu sistem penambatan yakni tipe *catenary* mempunyai *safety factor* yang lebih tinggi dibanding sistem taut *mooring* terutama pada kondisi laut yang buruk (Sun dan Wang, 2010). Tali tambat akan menerima beban dinamis tinggi dari FOWT dan komponen siklis pula dari beban tersebut saat beroperasi di lingkungan ganas sehingga tali tambat mengalami kegagalan yang mempengaruhi performa turbin angin saat menghasilkan energi. Penelitian sebelumnya juga mengenai perilaku *transient* antara tali tambat dan FPSO dalam kondisi tali tambat putus dari beberapa simulasi pada kondisi operasional FOWT (Hanetal,2011). Penelitian lainnya berupa *unsteady response* FOWT tipe *farming* dan perubahan performa turbin angin akibat *accidentally disconnected* pada tali tambat sangat mempengaruhi *shear force* pada *turbine tower* dan konfigurasi *farming* FOWT (Bae et al, 2016). Dari permasalahan tersebut, perubahan performa stabilitas mode *pitch* FOWT saat pembebanan pada tali tambat yang utuh (*intact*) sampai terputus atau mengalami kegagalan (*damage*) menjadi tujuan utama penelitian ini.

DESAIN FOWT TIPE BARGE FLOATER

Skema FOWT berdaya 5 MW referensi NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) jenis *barge floater* ini mencapai stabilitas baik yang tertambat oleh *catenary mooring system* di *station keeping* tertentu. Rincian *barge floater* beserta *mooring properties* yang dipilih penelitian ini tersaji dalam Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. *Barge Floater Properties*

Deskripsi	Nilai	Deskripsi	Nilai
Dimensi [P x L x T] (m)	40 x 40 x 8	Total Massa (kg)	6,15E+06
<i>Moonpool</i> [P x L x T] (m)	10 x 10 x 8	I_{xx} (kg.m ²)	7,29E+08
<i>Draft</i> (m)	4	I_{yy} (kg.m ²)	7,29E+08
<i>Freeboard</i> (m)	4	I_{zz} (kg.m ²)	1,45E+09

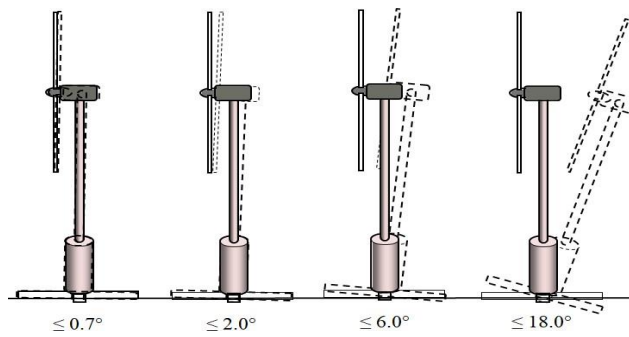
Tabel 2. *Mooring Properties*

Deskripsi	Nilai	Deskripsi	Nilai
Tipe	<i>Catenary</i>	Berat (kg/m)	130,4
Diameter (m)	8,09E-02	<i>Minimum Breaking Load</i> (kN)	4.500
Panjang (m)	473,3		

Untuk memenuhi kriteria stabilitas dari besarnya pengaruh mode *pitch* terbagi dalam empat kondisi seperti pada Gambar 2 serta definisi empat kriteria yang terjadi sesuai dengan rotasi mode *pitch* yakni (a) *Operating* $\leq 0,7^\circ$: kondisi struktur terapung masih dapat beroperasi dengan normal; (b) *Survival* $\leq 2,0^\circ$: kondisi struktur terapung masih selamat atau dapat bekerja dimana satu tingkat diatas kondisi *operating*; (c) *Stand By* $\leq 6,0^\circ$: kondisi dimana struktur terapung dihentikan pengoperasinya atau dalam posisi *stand by*, (d) *Damaged* $\leq 18,0^\circ$: kondisi struktur terapung mengalami kerusakan sehingga tidak dapat beroperasi (Rick, 2004). Untuk memeriksa faktor keamanan dari setiap *mooring line*, hasil luaran data kemudian dibandingkan dengan kriteria seperti yang dipersyaratkan oleh American Petroleum Institute (API RP 2SK, 2005) seperti dalam Tabel 3.

Tabel 3. *Safety Factor* pada *Mooring Line*

Kondisi	Metode Analisis	<i>TensionLimit</i> (%)	<i>Safety Factor</i>
<i>Intact</i> (ULS)	<i>Dynamic</i>	60	1,67
<i>Damaged</i> (ALS)	<i>Dynamic</i>	80	1,25



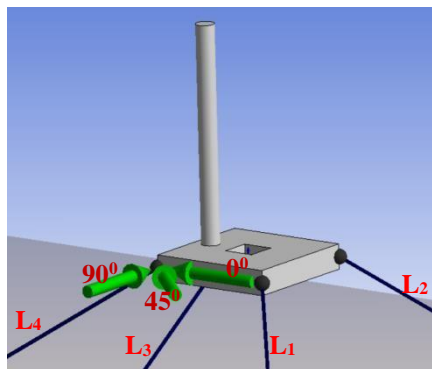
Gambar 2. Kriteria Stabilitas yang terjadi pada Mode Rotasi *Pitch*

PEMODELAN HIDRODINAMIKA FWT

Pemodelan hidrodinamika ini menggunakan software ANSYS AQWA yang terintegrasi berdasarkan metode 3D Difraksi untuk permasalahan interaksi gelombang permukaan stasioner berbasis *time domain*. Analisis hidrodinamika untuk *barge floater* FOWT ketika *mooring line* dalam kondisi *intact* dan *damage* setiap *mooring line* dengan tiga arah *wave heading* yang berbeda untuk memperoleh respon gerakan dan struktur FOWT serta stabilitas turbin angin ditinjau berdasarkan mode rotasi *pitch*. Parameter dan pemodelan FOWT dalam analisis ini tercantum dalam Tabel 4 dan Gambar 3.

Tabel 4. Parameter Hidrodinamika

Deskripsi	Nilai	Deskripsi	Nilai
Lokasi	Laut Arafura	T_p (detik)	10,5
Kedalaman Laut (m)	150	Sudut <i>Wave Heading</i> (derajat)	0, 45 & 90
H_s (m)	1,25		

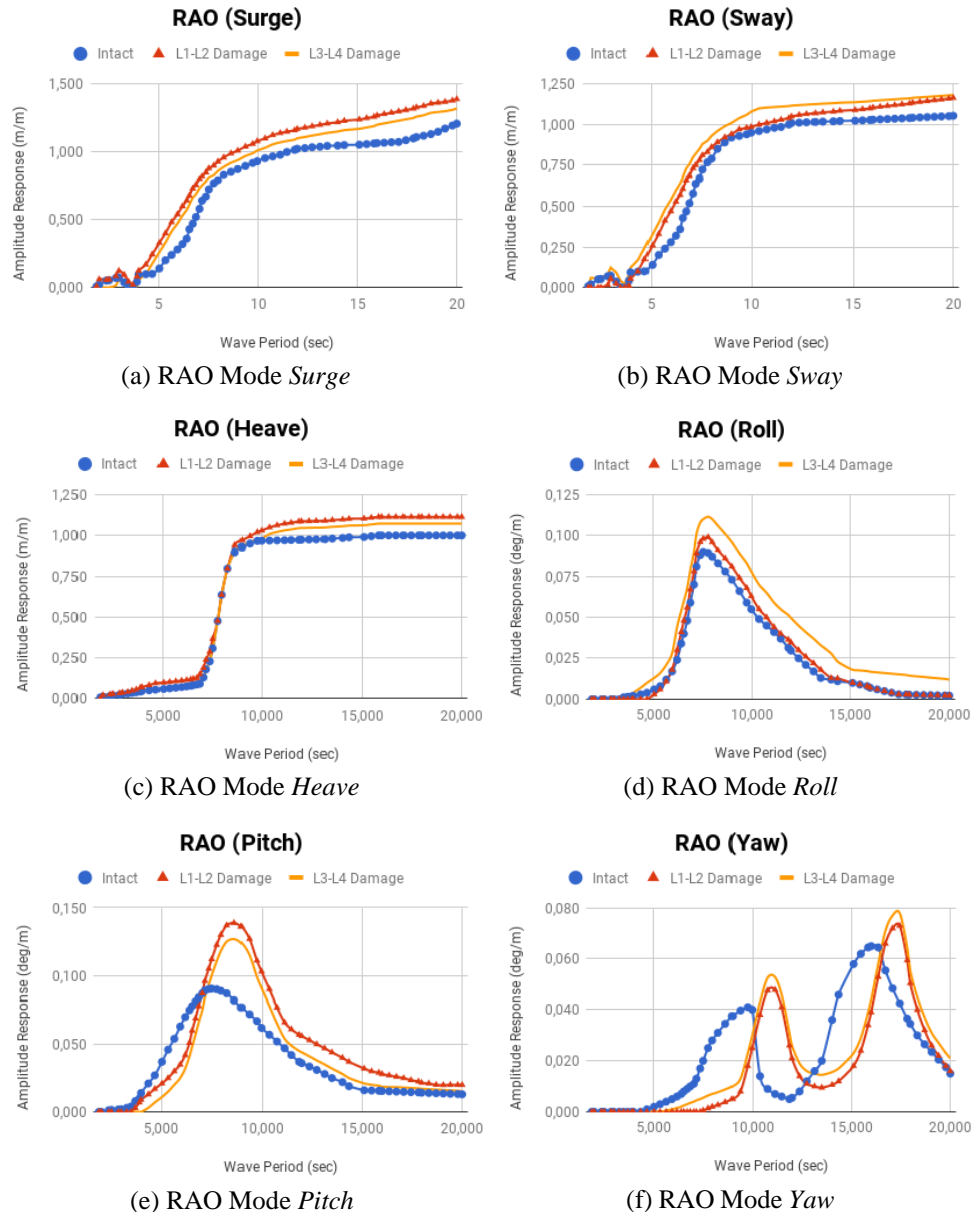


Gambar 3. Pemodelan FOWT

Perbandingan *Response Amplitude Operator* (RAO) FOWT

Hasil RAO ini mengenai komparasi *mooring line* pada *barge floater* masih utuh, serta L_1 – L_2 – L_3 secara bergiliran mengalami kegagalan (*damage*) disimulasikan saat kondisi tertambat dengan memperhatikan semua enam mode gerakan pada gelombang reguler disajikan pada Gambar 4 dengan sudut *wave heading* berinterval 0° , 45° , serta 90° . Kurva RAO yang tersaji dibawah ini merupakan rangkuman amplitudo respon terbesar dari 3 arah *wave heading*.

Konfigurasi desain *mooring line* bersimetris sehingga L_1 senilai L_2 , serta L_3 senilai L_4 . Dari Gambar 4 terlihat bahwa semua gerakan FOWT pada kondisi *intact* memiliki amplitudo respon lebih kecil dibandingkan dengan kondisi *damage*.



Gambar 4. Perbandingan RAO FOWT pada *Mooring Lines* saat kondisi *Intact* dan *Damage*

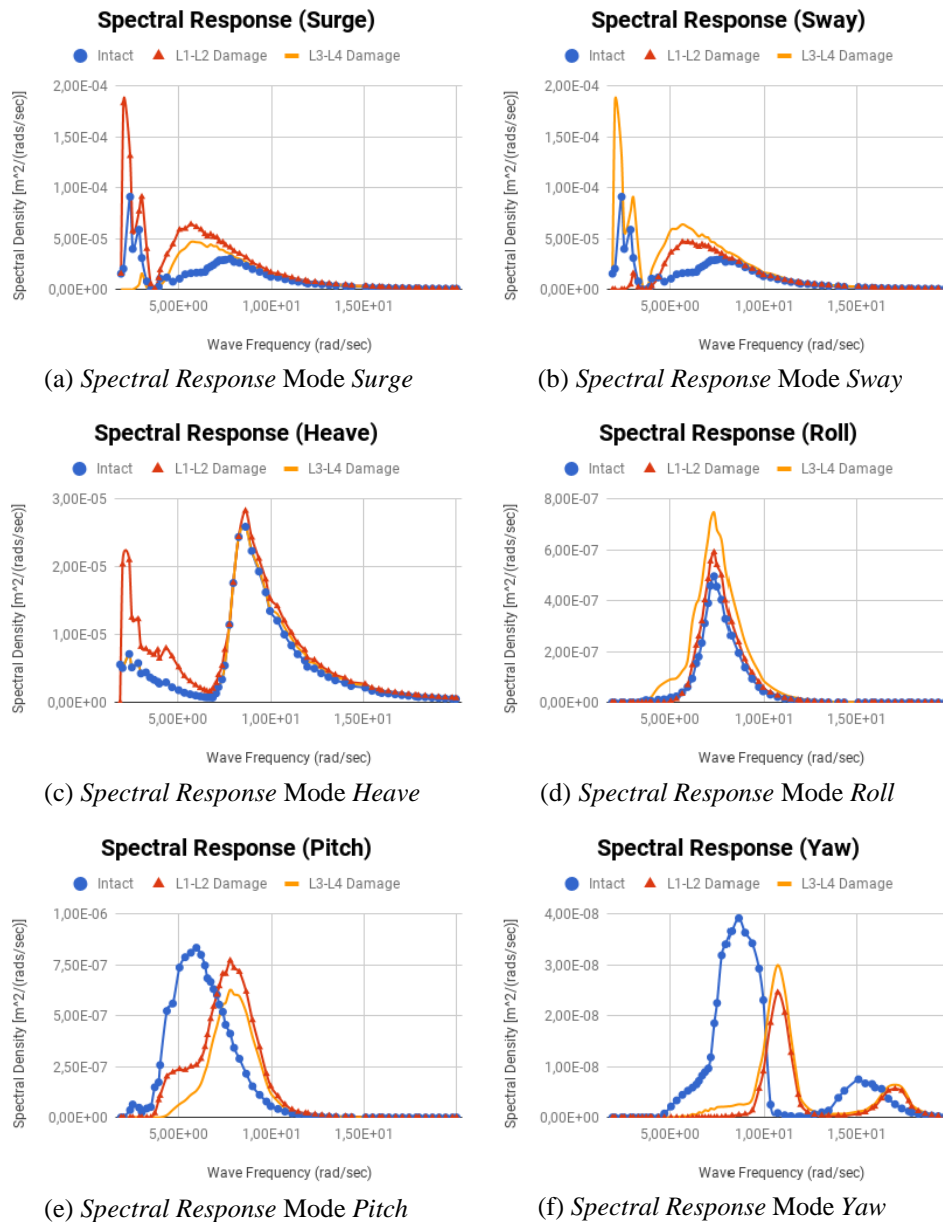
Gambar 4(a) terlihat trend kurva identik pada setiap kondisi dimana nilai amplitudo respon *surge* sebanding dengan penambahan periode serta terjadi sekali resonansi kecil pada periode 0,00 – 3,49 detik. Amplitudo respon tertinggi senilai pada kondisi *intact*, $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage* senilai 1,246 m/m, 1,400 m/m, dan 1,331 m/m. Gambar 4(b) sama halnya dengan kurva amplitudo respon *surge*, dengan nilai tertinggi senilai 1,056 m/m, 1,170 m/m, 1,186 m/m, yang membedakan hanya kondisi $L_3 - L_4$ *damage* paling tinggi amplitudo respon dari kurva *sway* ini. Gambar 4(c) kurva *heave* memiliki trend sama saat periode 7,50 – 8,64 detik, sementara periode lainnya kondisi *intact* bernilai lebih kecil dari *damage*. Amplitudo respon tertinggi senilai pada kondisi *intact*, $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage*

senilai 1,000 m/m, 1,115 m/m, dan 1,073 m/m. Gambar 4(d) kurva *roll* memiliki trend sama yang memiliki puncak yang tajam dan curam, perbedaan kecil terjadi saat periode 5,95 – 7,06 detik, sementara perbedaan tertinggi signifikan terjadi saat periode 7,18 – 20,00 detik dimana amplitudo respon tertinggi senilai pada kondisi $L_3 - L_4$ *damage* senilai 0,112 %/m. Gambar 4(e) kurva *pitch* memiliki perbedaan dari trend kenaikan menuju resonansi utama. Secara umum, kondisi *intact* yang mengalami perbedaan mendasar dari kedua kondisi dimana amplitudo tertinggi hanya 0,090 %/m, sementara kondisi $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage* senilai 0,139 %/m, dan 0,127 %/m sehingga kondisi $L_1 - L_2$ *damage* menjadi amplitudo respon tertinggi dalam kurva *pitch* ini. Trend kenaikan kurva ini terjadi perbedaan signifikan ketika periode 3,99 – 7,18 detik dimana amplitudo respon kondisi *intact* lebih besar daripada amplitudo respon kondisi $L_1 - L_2$ *damage* serta $L_3 - L_4$ *damage*. Trend penurunan kurva ini terjadi perbedaan signifikan saat periode 7,38 – 11,12 detik. Gambar 4(f) kurva *yaw* memiliki trend kurva yang identik, dua kali resonansi yang terjadi, meski permulaan nilai amplitudo respon berbeda. Secara umum, nilai amplitudo respon tertinggi terjadi saat kondisi $L_3 - L_4$ *damage*. Permulaan nilai beramplitudo respon kondisi *intact*, $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage* dimulai berurutan saat periode 4,35 detik, 7,38 detik, dan 5,34 detik. Nilai amplitudo respon puncak pertama resonansi kondisi *intact*, $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage* yakni 0,041 %/m periode 9,73 detik, 0,048 %/m periode 10,74 detik, serta 0,053 %/m periode 10,74 detik. Nilai amplitudo respon tertinggi puncak kedua resonansi kondisi *intact*, $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage* yakni 0,065 %/m periode 15,84 detik, 0,073 %/m periode 17,08 detik, serta 0,078 %/m periode 17,08 detik.

Kategori stabilitas struktur FOWT tipe *barge floater* dengan melihat mode rotasi *pitch* dari struktur, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Pada Gambar 4 (e) Struktur FOWT NREL 5 MW ini memiliki mode rotasi *pitch* senilai 0,0903° saat kondisi *intact*, 0,1388° saat kondisi L_1 atau L_2 *damage* dan 0,1268° saat kondisi L_3 atau L_4 *damage*. Mode rotasi *pitch* terbesar terjadi pada kondisi $L_1 - L_2$ mengalami kegagalan (*damage*) $\leq 0,7^\circ$, sehingga struktur tersebut dikategorikan dalam kondisi *operating*. Stabilitas *barge floater* secara umum termasuk kategori baik, dimana struktur FOWT yang besar serta *draft* rendah membuat dengan pengaruh *restoring moment* terhadap *water plane* secara signifikan. Sementara itu, kehadiran penambahan *moonpool* mengurangi gerakan mode tertentu dibandingkan tanpa *moonpool* seperti mengurangi pengaruh mode *pitch* 50% dari *wave heading* 0°, dan 70% dari *wave heading* 45° (Vijayakumar dan Panneer, 2012). Dengan demikian, penambahan *moonpool* bervolume 800 m³ sangat berperan penting dalam kualitas RAO FOWT tipe *barge floater*.

Perbandingan Spectral Response FOWT

Pembahasan RAO sebelumnya hanya berdasarkan hasil dari gelombang reguler. Pada kenyataannya FOWT akan beroperasi di gelombang acak, sehingga RAO hanya memberikan informasi dini tentang kualitas gerakan FOWT (Djarmiko, 2012). Parameter lebih lengkap berdasarkan gelombang acak tersaji pada analisis spektral terhadap hasil RAO. Pada Gambar 5 terlihat posisi letak kontribusi energi tiap gelombang acak berdasarkan frekuensinya. Seperti pada Gambar 5 terlihat bahwa semua kurva menghasilkan *spectral density* lebih kecil dari amplitudo respon RAO sebelumnya. Pada Gambar 5(a) dimana $L_1 - L_2$ *damage* mengalami 3 kali resonansi yang berbeda secara signifikan serta memiliki nilai spektral tertinggi 1,83E-04 m²/(rad/detik) pada frekuensi 1,88 rad/detik. Sama halnya dengan kurva spektral respon *surge*, spektral respon *sway* pada Gambar 5(b) nilai kurva spektral tertinggi terjadi saat kondisi $L_3 - L_4$ *damage* senilai 1,83E-04 m²/(rad/detik) pada frekuensi 1,88 rad/detik. Gambar 5(c) pada kurva spektral respon *heave* kondisi $L_1 - L_2$ *damage* mengalami dua kali resonansi tertinggi dengan puncak yang tajam dan curam. Resonansi pertama senilai 2,10E-05 m²/(rad/detik) pada frekuensi 2,01 rad/detik. Resonansi kedua senilai 2,83E-05 m²/(rad/detik) pada frekuensi 8,27 rad/detik. Gambar 5(d) trend kurva spektral *roll* cenderung tajam di bagian puncak resonansinya. Nilai kurva spektral *roll* tertinggi terjadi saat kondisi $L_3 - L_4$ *damage* senilai 7,48E-07 m²/(rad/detik) pada frekuensi 7,18 rad/detik. Trend kurva kondisi *intact* dengan $L_1 - L_2$ *damage* cenderung sama dengan selisih perbedaan kecil. Gambar 5(e) kurva spektral respon *pitch* memiliki perbedaan dari trend kenaikan menuju resonansi utama. Secara umum, kondisi *intact* yang mengalami *spectral density* tertinggi dibanding kondisi lainnya senilai 8,35E-07 m²/(rad/detik) pada frekuensi 5,60 rad/detik, sementara kondisi $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage* senilai 7,72E-07 m²/(rad/detik), dan 6,29E-07 m²/(rad/detik). Trend kenaikan kurva ini terjadi perbedaan signifikan pada frekuensi 2,10 – 5,00 rad/detik. Trend penurunan kurva ini terjadi perbedaan signifikan saat frekuensi 6,72 – 9,96 rad/detik. Gambar 5(f) kurva spektral respon *yaw* memiliki perbedaan dari trend kenaikan menuju resonansi utama. Secara umum, kondisi *intact* yang mengalami *spectral density* tertinggi dibanding kondisi lainnya senilai 3,92E-08 m²/(rad/detik) pada frekuensi 8,27 rad/detik, sementara kondisi $L_1 - L_2$ *damage*, dan $L_3 - L_4$ *damage* senilai 2,64E-08 m²/(rad/detik), dan 3,00E-08 m²/(rad/detik). Trend kenaikan kurva ini terjadi perbedaan signifikan pada frekuensi 5,04 – 8,64 rad/detik. Trend penurunan kurva ini terjadi perbedaan signifikan saat frekuensi 9,96 – 12,7 rad/detik.



Gambar 5. Perbandingan Respon Spektral FOWT pada Mooring Line Kondisi Intact dan Damage

Perbandingan Tension Mooring Line FOWT

Berdasarkan hasil sebagaimana ditampilkan pada Tabel 5 dapat diketahui bahwa pada sudut *wave heading* 0° , *tension* maksimum yang terjadi pada *mooring line* L_1 dan L_2 kondisi *damage* lebih besar dibanding *mooring line* L_3 dan L_4 kondisi *damage*. Hal tersebut dikarenakan *mooring line* yang berada di depan menahan pergerakan FOWT akibat gelombang yang datang dari arah haluan FOWT. Konfigurasi FOWT yang simetris menerima arah datang pembebanan secara tidak langsung menghasilkan *tension* yang seragam tiap *mooring line* di berbagai kondisi simulasi. Adapun pada kondisi *damage* terbesar yang terjadi pada *mooring line* L_1 dan L_2 akibat L_2 maupun L_1 kondisi *damage* menyebabkan penambahan *tension* pada *mooring line* L_1 maupun L_2 sebesar $\pm 52,63\%$. Pada kasus *wave heading* 45° , terjadi peningkatan *tension* maksimum yang terjadi dari kondisi *intact* menuju *damaged*. Adapun hasil simulasi pada

kondisi *damage* yaitu kondisi dimana *mooring line* L₁ mengalami penambahan *tension* tertinggi setiap kegagalan *mooring line* lainnya.

Tabel 5. Hasil Simulasi *Tension* Maksimum FOWT

Max Tension (kN)	L₁	L₂	L₃	L₄
Kondisi		Wave Heading 0°		
<i>Intact</i>	1.294,84	1.294,84	827,46	827,46
<i>L₁ Damage</i>	-	2.460,46	787,82	996,32
<i>L₂ Damage</i>	2.460,46	-	996,32	787,82
<i>L₃ Damage</i>	1.524,45	1.791,96	-	928,19
<i>L₄ Damage</i>	1.791,96	1.524,45	928,19	-
Kondisi		Wave Heading 45°		
<i>Intact</i>	1.329,87	1.028,64	701,23	1.184,86
<i>L₁ Damage</i>	-	1.574,58	836,11	1.833,91
<i>L₂ Damage</i>	2.059,27	-	749,52	1.435,81
<i>L₃ Damage</i>	2.028,02	1.070,24	-	1.146,34
<i>L₄ Damage</i>	2.095,87	1.407,19	741,54	-
Kondisi		Wave Heading 90°		
<i>Intact</i>	1.232,76	800,52	861,92	1.349,40
<i>L₁ Damage</i>	-	898,73	833,95	2.511,92
<i>L₂ Damage</i>	1.765,67	-	787,18	1.691,75
<i>L₃ Damage</i>	1.496,97	799,8	-	1.947,83
<i>L₄ Damage</i>	2.604,12	712,65	927,83	-

Sementara itu, *mooring line* L₂ hanya mengalami perubahan *tension* tidak signifikan setiap kegagalan *mooring line* lainnya. Hasil analisa kasus *wave heading* 90°, penambahan *tension* maksimum secara signifikan terjadi pada *mooring line* L₁ dan L₄. konfigurasi yang asimetris menyebabkan besaran *tension* maksimum L₁ dan L₄ tidak sama karena adanya struktur *turbine tower* di buritan FOWT. Dalam kondisi lainnya, kasus *mooring line* L₁ mengalami *tension* maksimum ketika *mooring line* L₄ dalam kondisi *damage*. Hal ini disebabkan *mooring line* tersebut menahan pergerakan bangunan yang datang dari samping kanan FOWT. Bila *tension* maksimum yang terjadi pada setiap *mooring line* dibandingkan dengan *minimum breaking loads*, maka *tension* tersebut masih berada dalam batas aman karena harga *safety factor* (SF) material *mooring line* masih cukup memenuhi yaitu SF=1,73.

KESIMPULAN

Studi telah tuntas dilakukan untuk mengevaluasi performa FOWT tipe *barge floater* saat pembebanan pada tali tambat yang utuh (*intact*) serta L₁-L₂-L₃ secara bergiliran mengalami kegagalan (*damage*) disimulasikan saat kondisi tertambat dengan memperhatikan semua enam mode gerakan dengan sudut *wave heading* berinterval 0°, 45°, serta 90°. Desain ini referensi dari FOWT NREL 5 MW yang disimulasikan di Laut Arafura. Mengacu pada hasil analisis yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang dapat ditarik, sebagai berikut:

1. Karakteristik gerak di gelombang reguler untuk FOWT tipe *barge floater* dengan kondisi *mooring line* saat *intact* maupun *damage* adalah baik karena mempunyai nilai RAO maksimum kurang dari 1,5 m/m. Hal ini berarti amplitudo respon akan selalu lebih kecil dari amplitudo gelombang yang datang.
2. Karakteristik energi respon di gelombang acak untuk FOWT tipe *barge floater* dengan kondisi *mooring line* saat *intact* maupun *damage* adalah baik karena frekuensi puncak spektral relatif jauh dari frekuensi natural.
3. Hasil *tension* maksimum dari berbagai kondisi yang dikaji masih menunjukkan *safety factor* pada *mooring line* berada dalam batas aman dengan nilai 1,73 sesuai aturan API RP 2SK.

4. Kriteria stabilitas mode rotasi *pitch* tertinggi saat kondisi L_1 atau L_2 *damage* senilai $0,1388^\circ$ masih dikategorikan dalam kondisi *operating* yang dapat bekerja dengan normal.

DAFTAR PUSTAKA

- API RP 2 SK, 2005, Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures, America Petroleum Institute.
- Bae, Y.H., Kim, M.H., and Kim, H.C., 2016, Performance Changes of a Floating Offshore Wind Turbine with Broken Mooring Line, International Renewable Energy Journal.
- Djarmiko, E.B., 2012, Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di atas Gelombang Acak, ITS Press, Surabaya.
- ESP3, 2017, Danish – Indonesian Environmental Support Programme: Wind Energy Resources of Indonesia.
- Han, J.S., Son, Y.J., Choi, H.S., and Rho, J.B., 2011, The Transient Behavior of Mooring Systems in Line-Broken Condition, The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Rick, M., 2004, Technology Issues with Deepwater Wind Energy Systems, Offshore Technology Research Center, USA.
- Sun, J.W., and Wang, S.Q., 2010, Study on Motion Performance of Deepwater Spar Platform under Different Mooring Methods, Period of Ocean University of China.
- Vijayakumar, G., and Panneer, S.R., 2012, Hydrodynamic Analysis of Barge Floater with Moonpool for 5 MW Wind Turbine using WAMIT, International Conference on Marine Technology, Kuala Terengganu, Malaysia.