

DESAIN SISTEM MOORING STRUKTUR TERAPUNG MULTIFUNGSI DI LAUT BALI

Design of Mooring System of Multifunctional Floating Structure in the Bali Sea

Achmad Hasan Taherdito¹, Krisnaldi Idris²

NIM: 15513066

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132

¹hasan.taherdito@gmail.com, ²krisnaldi@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Wilayah pesisir yang dimiliki oleh Indonesia merupakan aset yang sangat berharga. Hal ini disebabkan karena Indonesia merupakan salah satu negara yang pesisir yang cukup panjang. Pada kenyataannya, masyarakat pada umumnya menganggap bahwa pesisir merupakan area perbatasan yang memisahkan tiap-tiap pulau. Hal tersebut bisa demikian karena kurangnya pemikiran bahwa lautan bukan saja merupakan pemisah, namun dapat menjadi salah satu alternative lain sebagai penghubung antar pulau.

Untuk mendukung hal ini, maka diperlukan suatu penghubung antar pulau guna membantu masyarakat Indonesia untuk dapat mengunjungi seluruh pelosok Indonesia tanpa hambatan. Namun, seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, bangunan yang terletak di pesisir pantai tidak selalu memiliki *fixed structure*, namun bisa diperbaharui dengan menggunakan sistem tali mooring untuk membantu menahan struktur dari gaya lingkungan sekitar. Selain terdapat kemudahan pada saat proses instalasi dan pembangunan, bentuk struktur seperti tali mooring ini lebih efisien dan efektif untuk jangka waktu yang cukup panjang.

Dalam tugas akhir ini, struktur terapung yang dimodelkan bersifat multifungsi, dalam artian kelak struktur ini ingin dijadikan sebagai pemecah gelombang terapung atau dermaga terapung. Cakupan penelitian ini adalah mengenai sistem mooring dari struktur terapung multifungsi tersebut yang paling optimum, berdasarkan tinjauan respon struktur akibat gaya lingkungan. Dalam proses penentuan sistem mooringnya, digunakan alat bantu perangkat lunak bernama Hydrostar dan Ariane7 yang berfungsi memudahkan pemodelan terhadap struktur terapung multifungsi ini.

Gaya lingkungan yang diterapkan pada penelitian ini adalah gaya gelombang, gaya arus, dan gaya angin. Analisis dilakukan berdasarkan standar API RP 2Sk mengenai kriteria desain untuk gaya tarik tali mooring yang diizinkan dan DRDC Toronto TR 2006-229 sebagai kriteria desain untuk percepatan translasi maksimum yang diizinkan.

Kata kunci: Struktur terapung multifungsi, sistem mooring, Gaya lingkungan, Gaya Tarik, respons

PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan yang memiliki wilayah perairan yang mendominasi teritori negaranya, dibanding wilayah daratannya. Karena kondisi tersebut, Indonesia merupakan Negara yang memiliki garis pantai yang cukup panjang, meskipun bukan dalam satu kesatuan pulau. Berdasarkan hasil survei langsung di lapangan, Badan Informasi Geospasial (BIG) menyebutkan bahwa panjang garis pantai Indonesia saat ini adalah 99.093 kilometer. Hal ini membuktikan bahwa perlu perhatian khusus oleh pemerintah Indonesia terhadap wilayah pesisir, mengingat bahwa kenyataannya garis pantai Indonesia saat ini masih banyak yang belum terjamah. Di sisi lain, persentase tingkatan jumlah penduduk Indonesia saat ini yang sangat pesat, maka wilayah tempat tinggalnya pun meluas, bahkan hingga ke wilayah pesisir. Selain menjadi wilayah residensial, kawasan pesisir pun menjadi jalur penghubung antar pulau, dimana pada wilayah pesisir tersebut dibangun sarana masyarakatnya untuk melakukan penyeberangan ke pulau lain. Sarana tersebut biasanya berbentuk dermaga atau pelabuhan, dengan kapal sebagai alat bantu penyeberangannya. Selain itu, wilayah pesisir cukup sering digunakan sebagai kawasan rekreasi bagi sebagian besar masyarakat Indonesia. Dengan kondisi ini, maka kawasan pesisir seperti pantai, memerlukan perlindungan khusus agar pantainya tidak rusak dan tidak tergerus oleh gelombang air laut, agar tetap terjaga keindahannya.

Untuk memenuhi kondisi tersebut, pihak pemerintah berupaya untuk membantu terwujudnya keinginan tersebut. Dalam hal ini diperlukan suatu fasilitas berupa struktur terapung yang dapat berfungsi ganda atau lebih, yang dimana dapat digunakan sebagai sarana bantu penyeberangan (dermaga terapung) masyarakat dan juga sebagai pemecah gelombang (*breakwater*) terapung, untuk membantu melindungi kawasan pantai dari terjangan gelombang air laut. Mengingat pada kenyataannya bahwa membangun suatu infrastruktur di perairan dengan struktur tetap (*fixed structure*) sangat memakan biaya yang cukup besar, maka penggunaan sistem mooring lah

yang merupakan solusi yang tepat untuk memenuhi kondisi ini. Namun, tentunya tidak semudah itu untuk merancangnya, karena akan ada berbagai macam faktor eksternal untuk penentuan desainnya, seperti gaya lingkungan yang akan mempengaruhi struktur, yakni gaya angin, gelombang, dan arus laut.

Dalam penelitian tugas akhir ini, dilakukan analisis dan penentuan konfigurasi mooring yang tepat untuk struktur terapung multifungsi ini, dengan meninjau perpindahan dari struktur terapung tersebut terhadap gaya lingkungan yang diberikan, dimana gaya lingkungan yang digunakan adalah gaya lingkungan pada perairan tenggara pulau Bali, Indonesia.

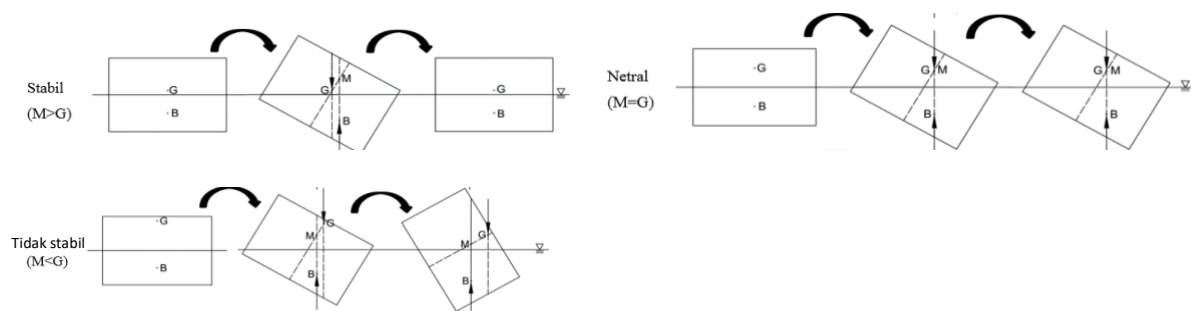
Tujuan dari penyusunan penelitian ini adalah untuk menganalisis respon gerak dari struktur terapung multifungsi akibat pembebanan gaya lingkungan tertentu, yang kemudian dianalisis sistem mooring yang bagaimana yang cocok untuk menghadapi gaya lingkungan tersebut. Selain respon struktur, gaya tarik efektif beserta perpindahan struktur juga ditinjau dalam penelitian tugas akhir ini.

Adapun aspek yang dikaji pada penyusunan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan sistem mooring pada struktur terapung multifungsi ini terdiri dari tiga (3) desain sistem mooring, yang akan ditunjukkan pada bagian metodologi.
2. Pemodelan untuk penentuan sistem mooring yang optimal yang akan digunakan selama penelitian ini dilakukan pada pemodelan dengan gaya lingkungan gelombang reguler saja. Kemudian, dilanjutkan dengan analisis menggunakan gaya lingkungan gelombang acak dengan sistem mooring terpilih. Adapun untuk arah datang gaya lingkungan pada pemodelan ini dilakukan dari arah 0° struktur (utara) dan arah 90° struktur (timur).
3. Analisis dilakukan terhadap respon gerak struktur, gaya tarik efektif tali mooring, dan perpindahan serta percepatan struktur. Untuk kriteria desainnya mengacu pada API RP 2SK "Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures". Kemudian mengacu pula pada Technical Report DRDC Toronto TR 2006-229 "A Review on the Effects of Frequency of Oscillation on Motion Sickness" sebagai syarat batas percepatan struktur demi kenyamanan penggunaan apabila hendak dijadikan sebagai dermaga terapung.

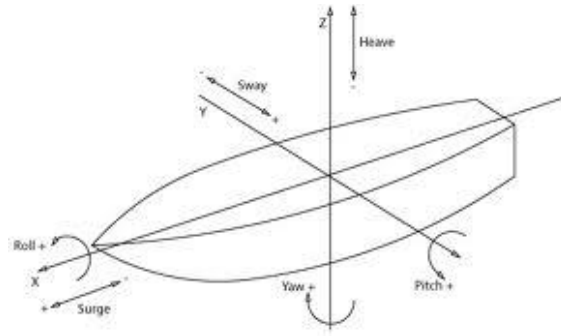
TEORI DAN METODOLOGI

Kestabilan struktur terapung terbagi dalam tiga jenis kondisi, yang ditinjau dari titik penting, seperti posisi titik metasentris (M) terhadap titik pusat gravitasi (G). Adapun tiga kondisi tersebut adalah 1) stabil; 2) netral; dan 3) tidak stabil.



Gambar 1 Stabilitas Struktur Terapung

Terdapat pula enam derajat kebebasan (sic degree of freedom) pada struktur terapung.



Gambar 2 enam derajat kebebasan struktur terapung

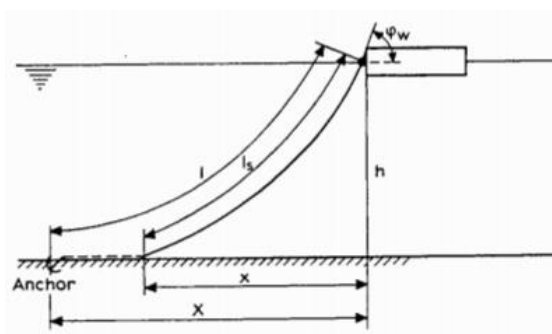
Respon pergerakan struktur dianalisis melalui pendekatan hidrodinamika. Menurut Faltinsen (1990) bahwa respon struktur terjadi akibat beberapa gaya yang bekerja pada struktur, seperti gaya apung, gaya eksitasi, dan gaya radiasi. Persamaan struktur dapat ditulis dalam persamaan berikut.

$$F = M\ddot{X} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{\theta} \{(M_{jk} + A_{jk})\ddot{X}_k + B_{jk}\dot{X}_k + C_{jk}X_k\} = F_j e^{i\omega t} \quad (2)$$

Terdapat pula RAO (Response Amplitude Operator) yang merupakan fungsi transfer yang digunakan untuk menentukan pengaruh gaya lingkungan terhadap respon struktur terapung. Spektrum dari respon merupakan suatu densitas energi struktur akibat adanya suatu spektrum densitas energi gelombang.

Sistem mooring yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sistem catenary, dimana sistem catenary bentuknya tidak tegang, namun kendur seperti kurva. Untuk mengetahui panjang horizontal tali mooring (x) yang digunakan, dapat menggunakan persamaan (3), yang kemudian gaya tarik mooring dapat ditentukan dengan persamaan (4) setelah mengetahui panjang horizontal mooring tersebut. Dimana $a = \frac{T_H}{w}$.

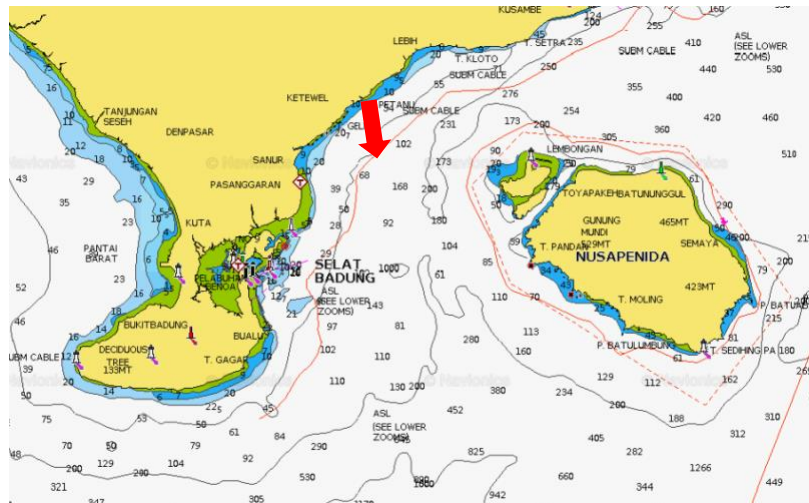


$$l_s = a \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (3)$$

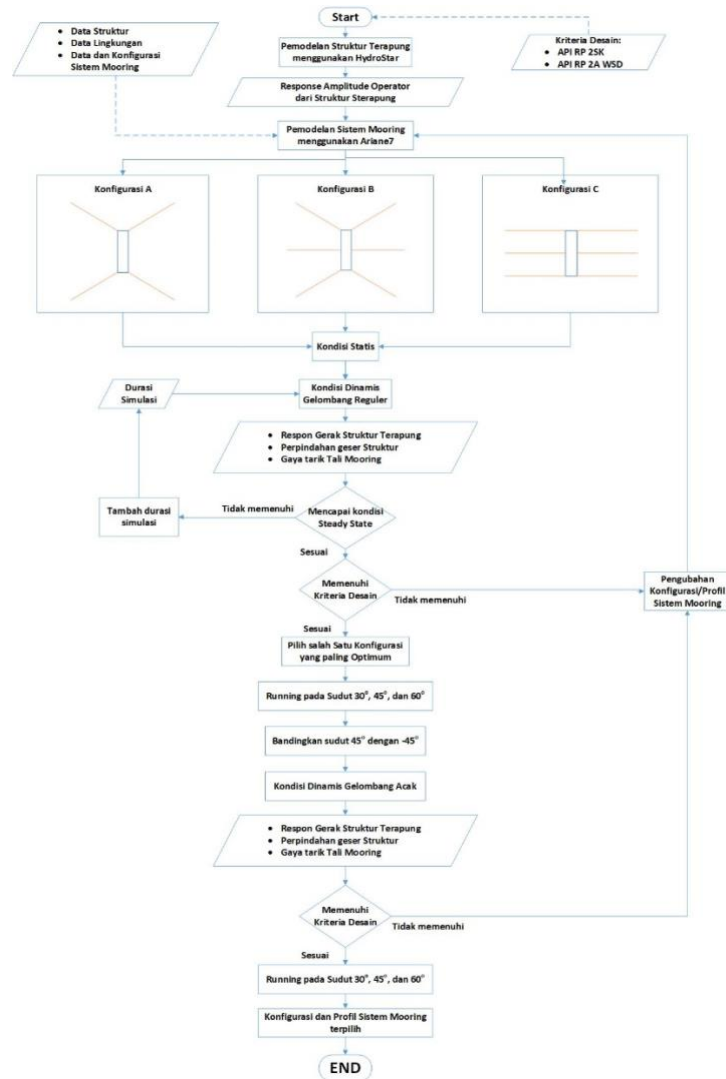
$$T = T_H \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (4)$$

Gambar 3 Bentang Tali Mooring (Faltinsen, 1990)

Adapun untuk lokasi tinjauan pada penelitian tugas akhir ini terletak di perairan tenggara pulau Bali, berdekatan dengan pulau Nusa Penida.



Gambar 4 Lokasi letak struktur dan arah tinjauannya



Gambar 5 Skema Metodologi Pengerjaan Penelitian Tugas Akhir

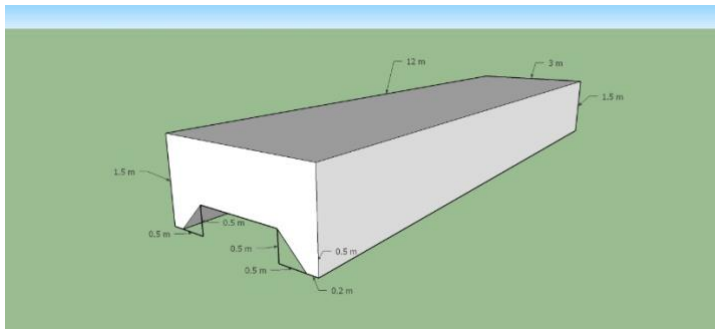
Data Lingkungan yang digunakan pada pemodelan tugas akhir ini.

Tabel 1 Data Lingkungan yang digunakan

Data Lingkungan			
Kedalaman Perairan	10	Meter	Periode ulang 100 tahun
Tinggi Gelombang	0.8	Meter	
Periode Gelombang	6	Detik	
Kecepatan Arus	1.7	m/s	
Kecepatan Angin	24.3	m/s	

Profil Struktur Terapung

Tabel 2 Dimensi Struktur



Bagian	Ukuran
Panjang total (P)	12 meter
Lebar total (L)	3 meter
Lebar a (L_a)	0.2 meter
Tinggi total (t_{tot})	1.5 meter
Tinggi b (t_b)	0.5 meter
Sisi miring	1:1

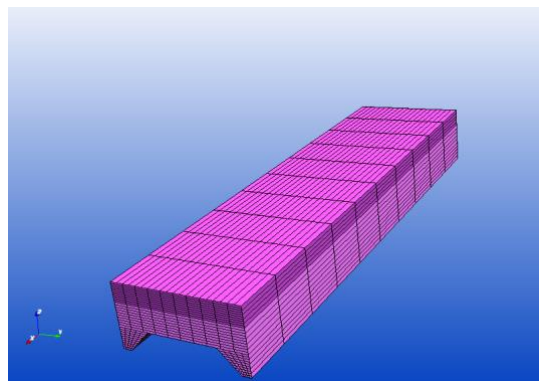
Gambar 6 Visualisasi Struktur Tampak 3-D

Massa dari struktur tersebut adalah 25000 Kilogram, dengan beban tambahan diatasnya sebesar 1000 kilogram, sehingga berat keseluruhan dari struktur tersebut adalah 26000 kilogram atau 26 ton. Draft struktur tersebut adalah 1,0546 meter.

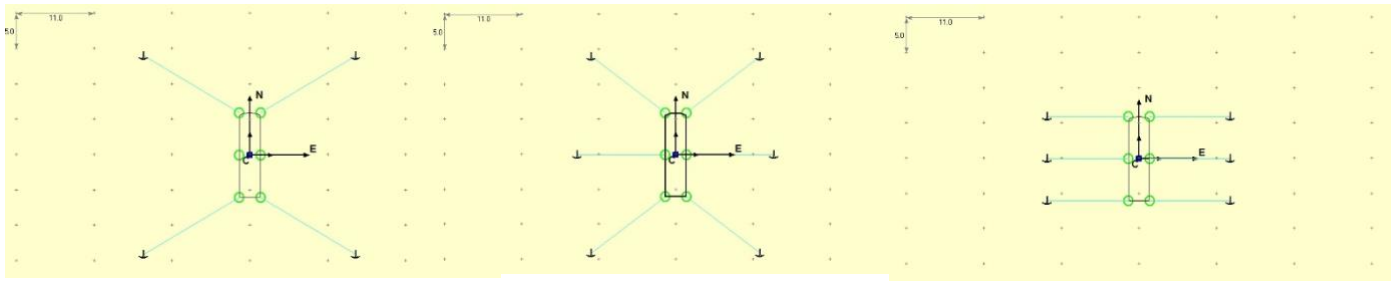
Tabel 3 Profil Tali Mooring yang Digunakan pada Penelitian

Jenis Tali Tambat	<i>Studless Mooring Chain</i>
Diameter	100 mm
Massa di udara bebas	202.000 kg/m
Massa di dalam air	175.598 kg/m
Breaking Load	9864 kN

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software* Hydrostar dan Ariane7, dimana Hydrostar digunakan untuk mendapatkan nilai RAO dari struktur dan Ariane7 untuk memodelkan sistem mooringnya.



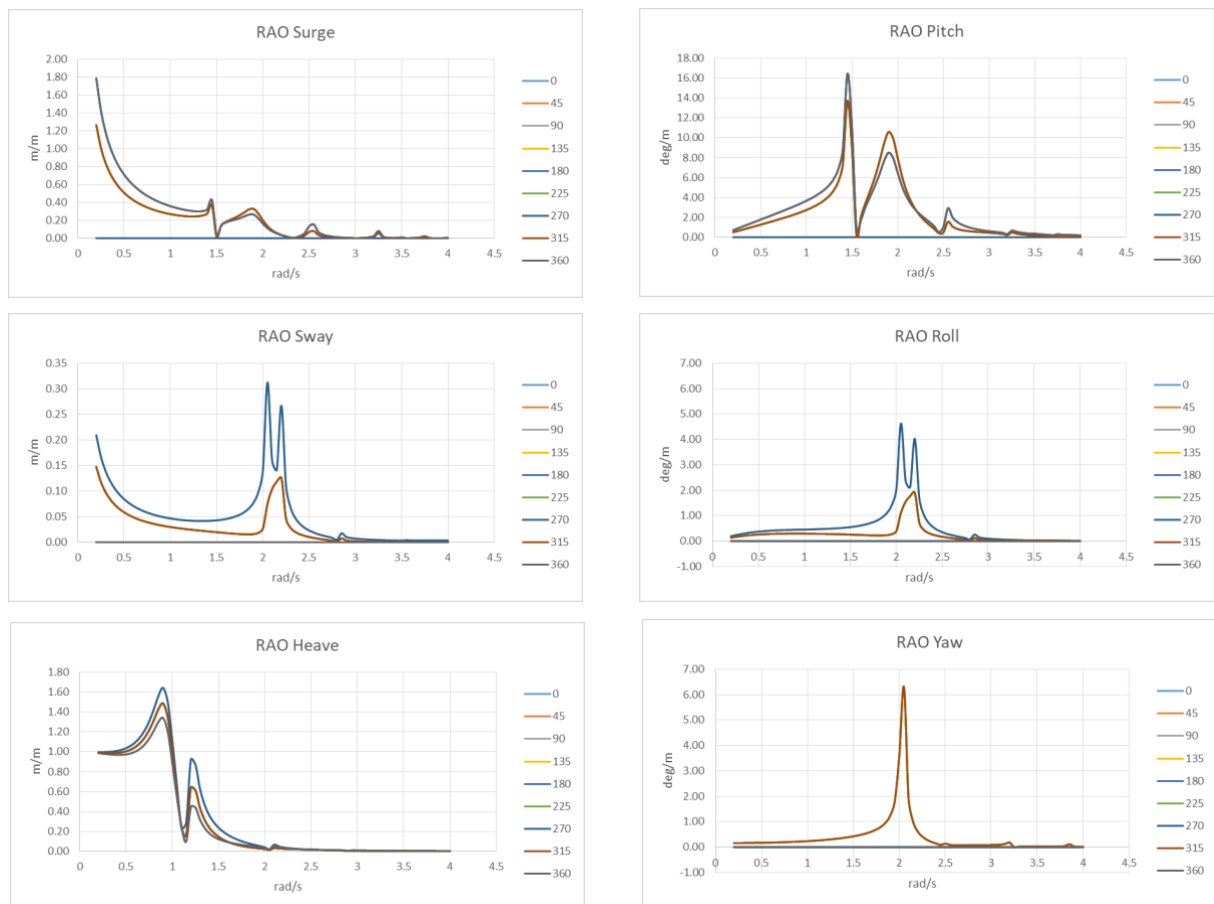
Gambar 7 Visualisasi dari pemodelan Hydrostar



Gambar 8 Bentuk Sistem Mooring hasil pemodelan Ariane7:
kiri) Konfigurasi A; tengah) Konfigurasi B; dan kanan)
Konfigurasi C

HASIL DAN ANALISIS

Output pemodelan dari perangkat lunak Hydrostar adalah RAO dari struktur terapung. RAO itu sendiri terdiri dari respon gerak arah translasi berupa gerakan Surge, sway, dan heave, serta respon gerak arah rotasi berupa Roll, Pitch, dan Yaw.



Gambar 9 RAO Gerakan Translasi dan gerak Rotasi dari
Struktur Terapung Multifungsi

RAO sendiri menggambarkan pergerakan struktur saat dikenai oleh gaya gelombang dengan kondisi tertentu. Pada gerakan sway dan surge, nilai RAO dapat tinggi pada frekuensi gelombang rendah dan mendekati nol pada frekuensi gelombang tinggi. Hal tersebut menjelaskan bahwa struktur akan mengalami pergerakan sway dan surge yang besar apabila terkena gelombang dengan frekuensi rendah atau gelombang panjang. Untuk gerakan heave, pergerakan struktur yang terjadi di awal memiliki nilai yang sama dengan amplitudo gelombang sehingga nilai RAO gerakan heave pada frekuensi nol adalah satu. Sedangkan untuk gerakan arah rotasi, yaitu roll, pitch, dan yaw, nilai RAO memiliki puncak-puncak pada frekuensi tertentu, dimana hal tersebut menunjukkan frekuensi puncak pergerakan struktur yang akan terjadi apabila dikenai gelombang pada frekuensi tertentu.

Pemodelan dengan Beban Lingkungan Gelombang Reguler

Pada pemodelan ini dilakukan dengan dua kondisi gelombang yaitu gelombang dari arah utara dan arah timur struktur. Berdasarkan Tabel berikut dapat dilihat bahwa konfigurasi sistem mooring yang optimal adalah konfigurasi B (yang ditandai pada tabel). Hal ini ditunjukkan dengan perpindahan struktur yang terjadi paling minimum di antara struktur dengan konfigurasi yang lain.

Tabel 4 Perpindahan Struktur pada Kondisi Gelombang Reguler

Konfigurasi	Arah Datang Gaya Lingkungan	Perpindahan Struktur					
		Sway [m]	Surge [m]	Heave [m]	Roll [deg]	Pitch [deg]	Yaw [deg]
A	Utara	-0,1164	0,70356	1,085556	1,64E-06	0,175167	0,009589
	Timur	0,07339	1,224158	0,993753	-0,00382	0,01003	6,339318
B	Utara	-0,07232	0,519077	1,079686	6,98E-07	0,153324	0,005029
	Timur	-0,04484	1,025607	0,988849	-0,00243	0,00876	6,501058
C	Utara	-0,06337	0,680884	1,005823	1,02E-06	0,232907	0,003319
	Timur	-0,10742	1,560773	0,943169	-0,0023	0,009548	8,850024

Pada pemodelan ini, kondisi seluruh gaya tarik tali mooring sudah sesuai dengan syarat kriteria desain.

Setelah itu, struktur dimodelkan dengan kondisi gelombang dengan arah khusus, yaitu 30°, 45°, dan 60°. yang kemudian dilanjutkan dengan running -45° untuk membandingkan dengan hasil pemodelan 45°.

Pemodelan dengan Beban Lingkungan Gelombang Acak

Pemodelan dilakukan pada konfigurasi terpilih pada gelombang reguler, yaitu struktur dengan konfigurasi sistem mooring B. pemodelan dilakukan dengan menggunakan spektrum gelombang acak JONSWAP dengan nilai gamma yang digunakan adalah 3,3. Pemodelan dilakukan dengan data gelombang yang sama, dalam tiga kondisi, yaitu arah 0°, 60°, dan 180° struktur.

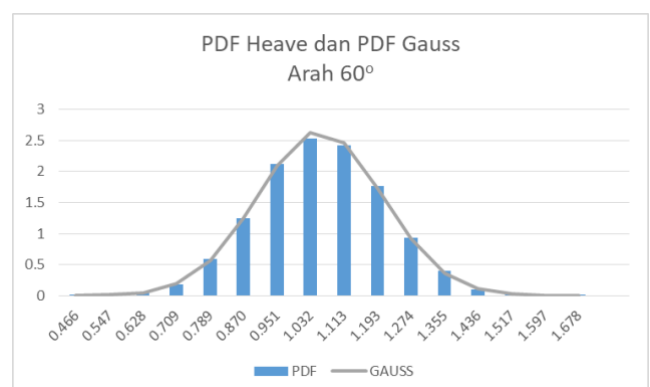
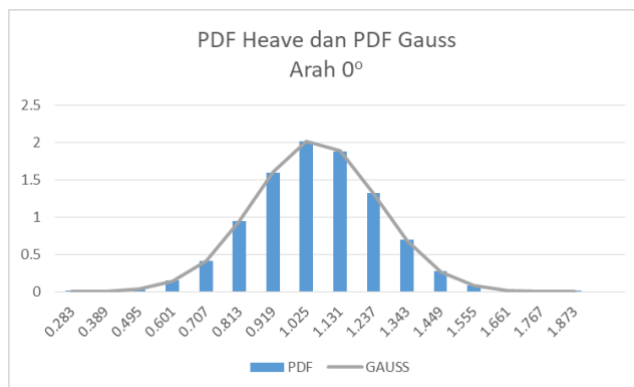
Tabel 5 Perpindahan Struktur pada Masing-masing Arah

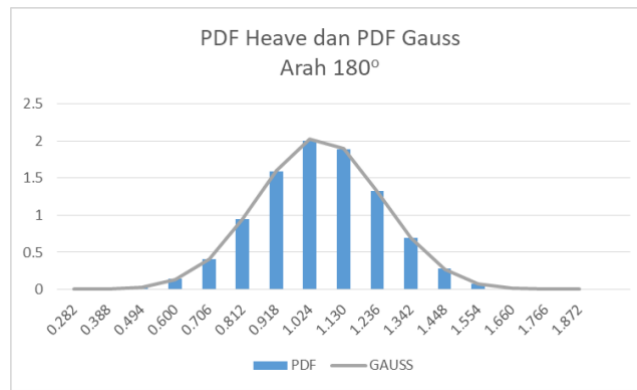
Konfigurasi B							
Arah		Surge	Sway	Heave	Pitch	Roll	Yaw
Arah 0°	Mean	0,0952	0,0021	1,0550	-4,18E-05	1,05E-09	-3,81E-05
	Standard Deviation	0,0741	0,0463	0,1947	0,5293	6,49E-07	0,0007
	Minimum	-0,2205	-0,3632	0,2302	-2,2401	-1,23E-05	-0,0011
	Maximum	0,3917	0,0699	1,8518	1,9603	1,13E-05	0,0052
Arah 60°	Mean	0,1574	-0,0317	1,0550	-2,35E-05	5,04E-06	0,8267
	Standard Deviation	0,0561	0,1149	0,1503	0,4033	0,0332	0,8059
	Minimum	0,0312	-0,4442	0,4258	-1,7951	-0,1184	-0,0830
	Maximum	0,5477	0,2668	1,6625	1,6102	0,1122	6,0105
Arah 180°	Mean	0,0543	0,0712	1,0550	3,58E-05	-9,84E-10	-0,0007
	Standard Deviation	0,0837	0,0003	0,1947	0,5291	4,83E-07	0,0005
	Minimum	-0,5241	0,0696	0,2292	-1,9652	-9,06E-06	-0,0012
	Maximum	0,2505	0,0728	1,8515	2,2392	8,61E-06	0,0035

Tabel 6 Gaya Tarik Maksimum Tali Mooring pada Masing-masing Arah

Konfigurasi B							
Arah		Line 1	Line 2	Line 3	Line 4	Line 5	Line 6
Arah 0°	Mean	326,381	326,549	331,993	332,323	328,834	328,630
	Standard Deviation	9,102	9,069	13,907	47,382	10,630	10,669
	Minimum	297,767	280,523	264,585	288,952	275,108	299,132
	Maximum	370,384	358,897	382,529	5634,825	361,755	393,304
Arah 60°	Mean	323,173	327,484	330,214	338,131	328,274	329,122
	Standard Deviation	6,840	7,064	10,992	102,656	8,746	8,241
	Minimum	289,373	293,619	272,645	310,463	285,628	305,250
	Maximum	352,589	357,439	363,388	9512,556	356,535	375,613
Arah 180°	Mean	324,952	330,892	333,568	327,800	332,242	325,206
	Standard Deviation	21,205	32,340	8,941	8,948	10,379	10,387
	Minimum	278,230	284,248	294,831	289,126	291,718	284,731
	Maximum	2226,956	3837,096	367,073	361,302	379,196	372,057

Pada pemodelan gelombang acak, dilakukan analisis tambahan berupa analisis sebaran amplitudo perpindahan struktur dengan membuat grafik Probability Density Function (PDF) dari data statistik perpindahan kapal yang didapatkan, yang kemudian dibandingkan dengan PDF Distribusi Normal.

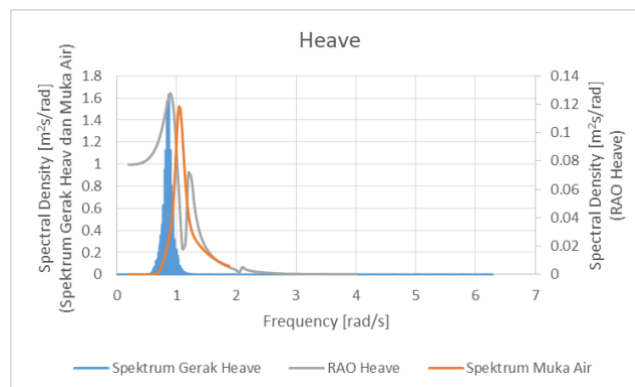




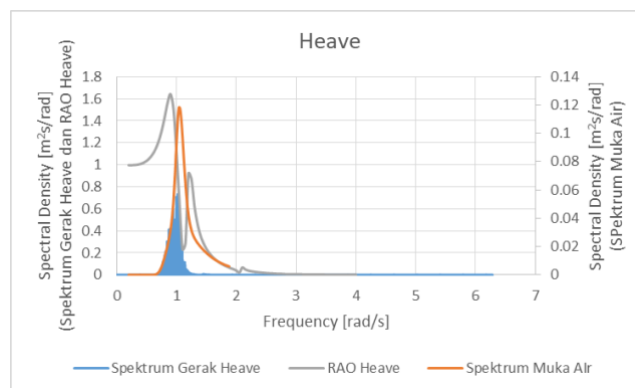
Gambar 10 Grafik PDF Heave dan PDF Gauss pada masing-masing arah

Gambar 10 menunjukkan bahwa PDF gerak Heave dan PDF Gauss sehingga berlaku karakteristik distribusi normal. Nilai tiga kali standar deviasi dari data lebih kecil nilai maksimum amplitudo yang terjadi sehingga kemungkinan terjadi simpangan yang melebihi amplitudo sangat kecil dan struktur tetap aman.

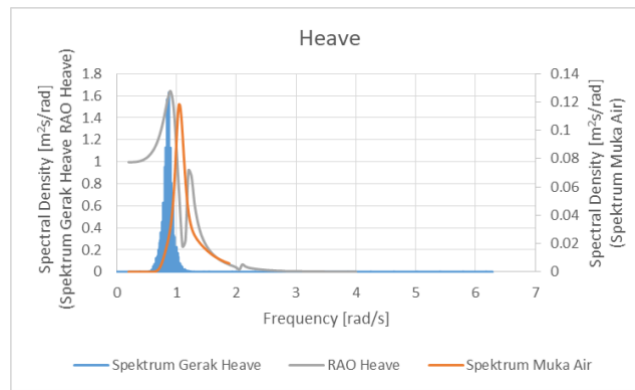
Analisis lainnya yang dilakukan pada pemodelan gelombang acak adalah membuat spektrum kerapatan untuk masing-masing respon untuk gelombang dan perpindahan struktur.



Gambar 11 Perbandingan Spektrum Gerak Heave dengan Spektrum Muka Air dan RAO Heave Arah 0°



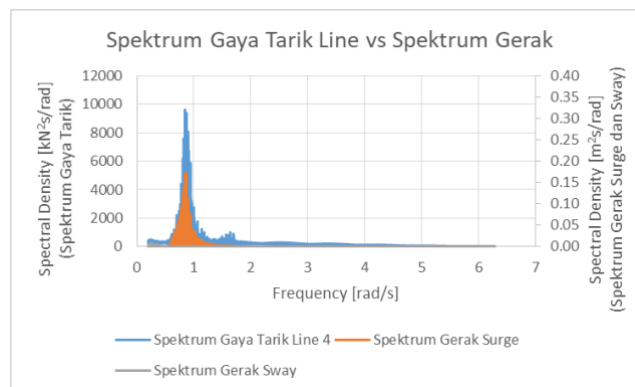
Gambar 12 Perbandingan Spektrum Gerak Heave dengan Spektrum Muka Air dan RAO Heave Arah 60°



Gambar 13 Perbandingan Spektrum Gerak Heave dengan Spektrum Muka Air dan RAO Heave Arah 180°

Dari gambar 11, 12, dan 13, menunjukkan bahwa respon pada gerakan heave, baik pada arah 0°, 60°, maupun 180°, gerak struktur terjadi pada frekuensi 1,1 rad/s, yang merupakan puncak dari frekuensi spektrum muka air. Hal ini mengindikasikan bahwa pada gerakan *heave*, spektrum muka air lebih berpengaruh ketimbang RAO *heave*-nya.

Selain perpindahan, dilakukan juga pengecekan terhadap gaya tarik mooring dengan prosedur yang sama seperti mengolah perpindahan struktur. Berikut adalah gambar perbandingan Spektrum Gaya Tarik *Line 4* terhadap spektrum gerak struktur *surge* dan *sway*.



Gambar 14 Perbandingan Spektrum Gaya Tarik *Line 4* dengan Spektrum gerak *surge* dan *sway*

Line 4 merupakan tali mooring yang gaya tariknya paling maksimum dibanding 5 tali lainnya. Pada gambar 14 tersebut, dapat dilihat bahwa puncak spektrum gaya tarik *Line 4* memiliki frekuensi yang dengan frekuensi puncak Spektrum Muka gerak *surge*. Hal ini mengindikasikan bahwa gerak *surge* mempengaruhi pergerakan struktur sehingga *Line 4* yang mengalami gaya tarik maksimum.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Hasil analisis pemodelan dinamik gelombang reguler menunjukkan bahwa Konfigurasi B yang merupakan konfigurasi yang paling optimal dibanding konfigurasi lainnya. Kemudian pada pemodelan gelombang acak, konfigurasi B masih sesuai dengan syarat kriteria desain yang aman, dengan adanya sedikit modifikasi.

Saran

Saran yang dapat dilakukan untuk penelitian serupa selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Pengubahan dimensi struktur ke ukuran yang lebih besar, dengan mempertimbangkan jarak *clearance* tepi atas struktur dengan posisi draft, sehingga aman dari hempasan gelombang.
2. Melakukan analisis pada kondisi sistem mooring damage atau terdapat salah satu tali terputus.

DAFTAR PUSTAKA

American Petroleum Institute. (2005). *API RP 2SK Design and Analysis of Stationkeeping System for Floating Structures*. Washington: API.

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineer and Scientist*. Danvers: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Faltinsen, O. (1999). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.