

ANALISIS RESPON TURBIN ANGIN LEPAS PANTAI TIPE TERAPUNG

Dega Damara Aditramulyadi¹ dan Rildova²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan,

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

¹degadamara@gmail.com dan ²rildova@ocean.itb.ac.id

Kata Kunci : turbin angin terapung, gerak, gaya tarik efektif tali, pengaruh, gaya lingkungan

ABSTRAK

Selama turbin angin terapung beroperasi, struktur bukan hanya harus tahan terhadap gaya-gaya lingkungan, namun juga pergerakan dan kestabilannya harus tetap terjaga. Mengacu pada kondisi tersebut, pada tugas akhir ini akan dibahas respon struktur turbin angin terapung tipe penyangga jenis spar terhadap pengaruh pengujian variasi kondisi lingkungan, dalam hal ini angin, gelombang, dan arah datang gaya lingkungan. Proses simulasi dilakukan menggunakan dua perangkat lunak, satu untuk memodelkan struktur dan satu lagi untuk mensimulasikan tali mooring dan kondisi lingkungan. Durasi simulasi dilakukan selama tiga jam sesuai dengan standar DNV-OS-J101. Selanjutnya dilakukan analisis respon terhadap enam derajat kebebasan pergerakan struktur dan gaya tarik efektif tali mooring. Respon-respon tersebut dibandingkan pula dengan kriteria pada API RP 2SK, DNV-OS-E301, dan DNV-OS-J103 untuk melihat apakah struktur masih layak beroperasi pada kondisi lingkungan yang diujikan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa struktur memiliki kondisi stabil dan memenuhi kriteria kestabilan DNV-OS-J103. Peningkatan tinggi gelombang memberikan pengaruh pada peningkatan semua respon dari struktur turbin angin terapung, dengan nilai terbesar dialami gerak *heave* yaitu 2,2% per 1 persen perubahan tinggi gelombang. Angin memberi pengaruh yang sangat signifikan pada gaya tarik efektif tali mooring terutama pada tali yang tertekan, *Line 1* untuk sudut arah datang 180°, dengan besar perubahan gaya tarik menurun 1,93% per 1 persen pertambahan kecepatan angin. Konfigurasi tali *mooring* kritis saat gaya lingkungan datang dari arah sudut 240°.

PENDAHULUAN

Meningkatnya kesadaran akan sumber daya energi yang ramah lingkungan, membuat perkembangan dan penelitian akan energi terbarukan semakin cepat. Salah satu sumber daya energi terbarukan yang saat ini banyak dikembangkan yaitu sumber daya energi angin. Dengan beragam kelebihan yang sudah banyak terbukti, kini pengaplikasian turbin angin terapung mulai merambat ke wilayah lepas pantai dengan struktur penyangga jenis terapung. Hanya saja permasalahan terkait ketahanan struktur terhadap daya rusak lingkungan menjadi lebih kompleks. Selain itu juga turbin angin sendiri haruslah tetap stabil agar dapat menangkap gaya angin dengan optimal. Untuk itu dibutuhkan sistem tambatan (*mooring*) sebagai penyangga dan pengendali gerak struktur turbin angin supaya tetap stabil pada tempatnya. Maka demi menjamin optimalnya turbin angin dalam membangkitkan energi, dibutuhkan analisis respon pada struktur turbin angin lepas pantai tipe terapung.

TEORI DAN METODOLOGI

Pada pelaksanaan studi ini digunakan dua buah perangkat lunak. Pertama yaitu perangkat lunak hidrodinamika struktur. Digunakan untuk memodelkan struktur turbin angin dan mencari tahu deskripsi gerak struktur yang diwakili oleh *Respons Amplitude Operator (RAO)*. RAO yang telah didapatkan kemudian

digunakan sebagai inputan pada perangkat lunak hidrodinamika *mooring*. Perangkat lunak yang kedua ini digunakan untuk memodelkan sistem *mooring* dan gaya-gaya lingkungan yang diujikan pada studi kasus. Struktur turbin angin terapung kemudian diujikan dengan variasi tinggi dan perioda gelombang, kecepatan angin, dan arah datang gaya lingkungan.

Pada studi kali ini, baling-baling dari turbin angin terapung tidak dimodelkan karena keterbatasan perangkat lunak. Untuk itu digunakan gaya angin pada *Rotor Nacelle Assembly (RNA)* sebagai gaya lateral pengganti. Gaya RNA dirumuskan sebagai berikut.^[1]

$$F_{thrust} = \frac{1}{2} \rho_a C_T A_{thrust} V_{hub}^2 \quad (1)$$

Dimana

F_{thrust} = gaya seret (*drag*) angin (N)

ρ_a = massa jenis udara (1,29 kg/m³)

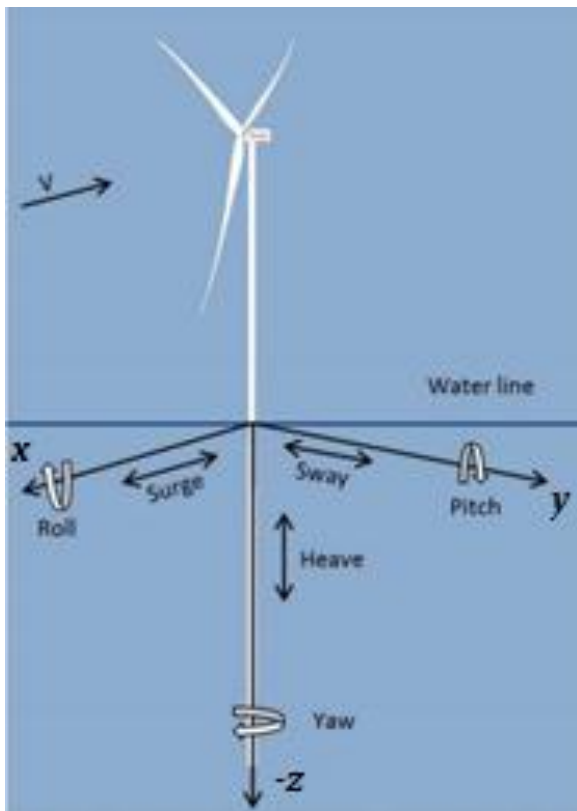
C_T = *thrust coefficient* = 8/9 (Manwell et al. 2002)

A_{thrust} = luas area sapuan baling-baling (m²)

V_{hub} = kecepatan angin rata-rata 10 menit pada ketinggian *hub* baling-baling (m/s)

Keluaran dari perangkat lunak hidrodinamika *mooring* berupa respon gerak struktur dalam enam arah gerak,, diilustrasikan dalam

Gambar 1, serta gaya tarik efektif tali *mooring*.

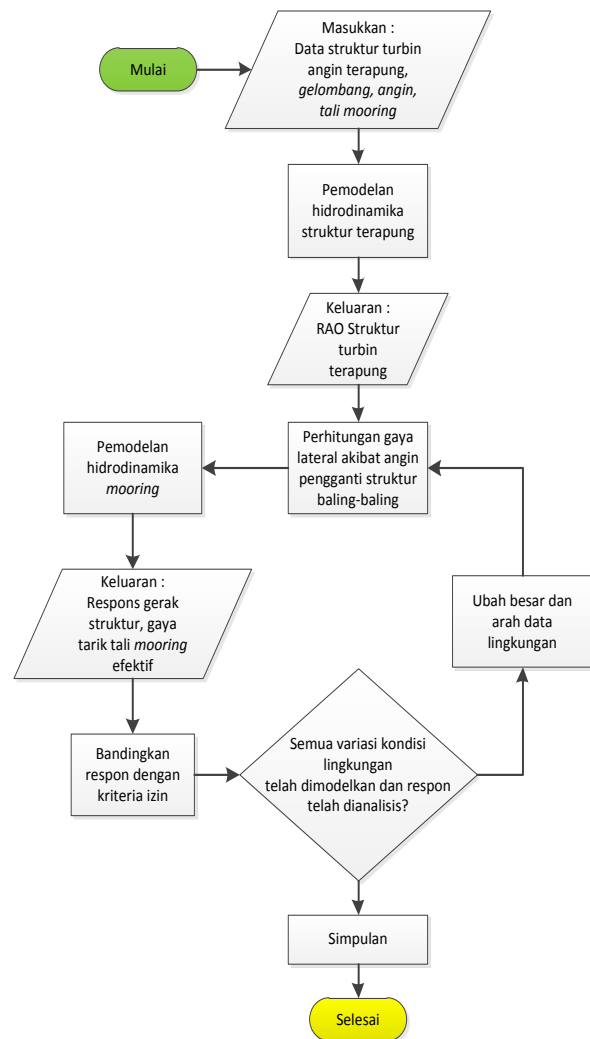


Gambar 1. Enam Arah gerak turbin angin terapung.

(Sumber : DNV-OS-J103, 2013)

Hasil respon dari beragam pengujian kemudian dibandingkan satu sama lain untuk mengetahui seberapa besar pengaruh dari variasi gelombang, angin, dan arah datangnya gaya. Selain itu juga dibandingkan dengan kriteria izin respon, untuk mengecek apakah dengan variasi kondisi lingkungan tersebut struktur dan tali *mooring* masih layak atau tidak.

Alur pengerjaan studi Tugas Akhir ini diilustrasikan pada **Gambar 2**.

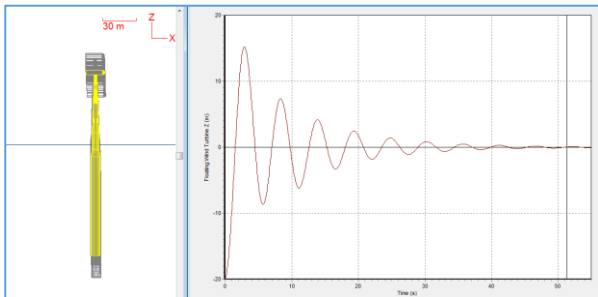


Gambar 2. Metodologi pengerjaan

HASIL DAN ANALISIS

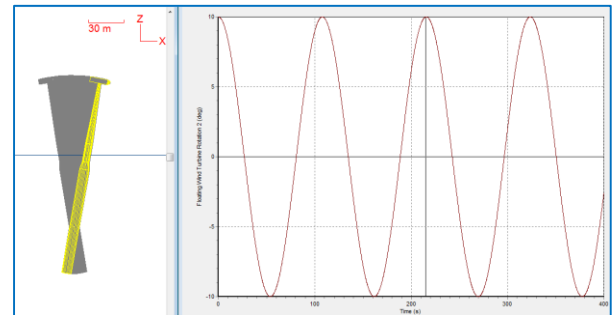
Sebelum memulai simulasi dinamik, pertama-tama dilakukan pengujian kondisi statik. Tahapan ini dilakukan untuk memferivikasi apakah struktur sudah benar dimodelkan dan mengecek kestabilan struktur tanpa tali *mooring*. Ada dua pengujian kestabilan statik yang dilakukan. Pertama yaitu kestabilan vertikal dengan memberi simpangan awal kearah bawah sebesar 20 m. Hasilnya, struktur beresilasi hingga kembali ke posisi semula

dalam waktu 50 s. Ilustrasi hasil ditunjukkan oleh **Gambar 3**.



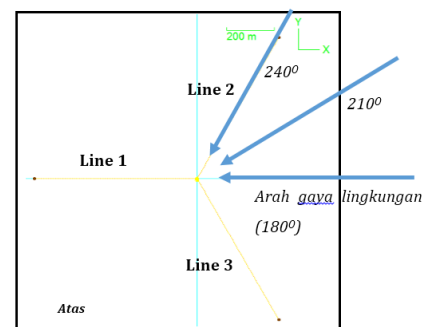
Gambar 3. Hasil pengujian kestabilan vertikal model

Pengujian kedua yaitu kestabilan anguk. Dilakukan dengan dua metode yaitu analitik dan pemodelan. Metode analitik dilakukan dengan menghitung tinggi metacenter. Hasil perhitungan menghasilkan nilai 16,46 m. Karena nilai bernilai positif, maka struktur dinyatakan stabil. Selain itu juga dengan memiliki nilai >1 m, struktur memenuhi syarat kestabilan dari DNV-OS-J103. Sementara hasil pemodelan pada **Gambar 4** semakin membuktikan bahwa struktur memiliki kondisi stabil. Hal ini ditunjukkan dengan struktur yang diberi simpangan anguk kembali pada posisi awal sebesar simpangan yang diberikan.



Gambar 4. Hasil pengujian kestabilan anguk model

Dalam analisis dinamik, struktur turbin angin terapung diujikan pada berbagai variasi kondisi lingkungan serta arah datang gaya lingkungan. Ilustrasi dari pemodelan konfigurasi struktur dan arah datang gaya lingkungan ditunjukkan oleh **Gambar 5**.



Gambar 5. Pemodelan konfigurasi turbin angin terapung dan arah datang gaya lingkungan

Tabel 1. Perbandingan Nilai Maksimum Absolut Respon Akibat Pengaruh Gelombang

Kondisi	Tinggi dan Periode Gelombang	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll ($^{\circ}$)	Pitch ($^{\circ}$)	Yaw ($^{\circ}$)	Line 1 (kN)	Line 2 (kN)	Line 3 (kN)
Moderate	$H_s = 2,44$ m dan $T_p = 8,1$ s	0,3345	0,0231	3,05	$1,9E-20$	0,001295	0,001037	164,39	1130,186	1132,733
Rough/Acuhan	$H_s = 3,66$ m dan $T_p = 9,7$ s	0,8228	0,0656	11,412	$3,9E-20$	0,002808	0,003332	408,51	2103,189	2181,206
Severe	$H_s = 5,49$ m dan $T_p = 11,3$ s	1,5233	0,1226	18	$6,8E-20$	0,006246	0,008242	810,34	2724,585	2726,508

Tabel 2. Perbandingan Nilai Maksimum Absolut Respon Akibat Pengaruh Angin

[Kondisi Angin] Kecepatan dan Gaya Lateral	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)	Line 1 (kN)	Line 2 (kN)	Line 3 (kN)
[1] $V_{hub} = 21,25 \text{ m/s}$, $V_{wind} = 20,553 \text{ m/s}$, $F_{thrust} = 117,07 \text{ kN}$	0,8187	0,0807	11,4168	4,15E-20	0,00282	0,003321	802,82	1292,28	1328,92
[2 / Acuan] $V_{hub} = 42,5 \text{ m/s}$, $V_{wind} = 42,322 \text{ m/s}$, $F_{thrust} = 468,28 \text{ kN}$	0,8228	0,0656	11,4120	3,9E-20	0,002808	0,003332	408,51	2103,19	2181,21
[3] $V_{hub} = 63,75 \text{ m/s}$, $V_{wind} = 65,337 \text{ m/s}$, $F_{thrust} = 1053,63 \text{ kN}$	0,8319	0,04915	11,4086	1,87E-20	0,002802	0,003336	293,33	3374,86	3292,62

Tabel 3. Perbandingan Nilai Maksimum Absolut Respon Akibat Pengaruh Arah Datang Gaya Lingkungan

Arah Datang Gaya	Surge (m)	Sway (m)	Heave (m)	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)	Line 1 (kN)	Line 2 (kN)	Line 3 (kN)
Acuan (180°)	0,8228	0,0656	11,4120	3,9E-20	0,002808	0,003332	408,51	2103,19	2181,21
210°	0,8244	0,0769	11,4151	3,64E-20	0,002815	0,002832	470,87	2516,95	1513,27
240°	0,8262	0,0811	11,4154	3,66E-20	0,002817	0,002869	824,82	2568,15	754,91

Pada **Tabel 1** disajikan hasil perbandingan nilai maksimum untuk kondisi perubahan tinggi dan perioda gelombang. Hasil menunjukkan bahwa ada peningkatan besar nilai pada semua jenis respon seiring dengan peningkatan tinggi dan perioda gelombang. Hal ini diakibatkan oleh gaya yang bekerja pada struktur yang semakin membesar diiringi dengan RAO dari struktur turbin angin terapung yang semakin tinggi seiring dengan meningkatnya perioda gelombang yang menumbuk struktur.

Lalu pada **Tabel 2** menunjukkan perbandingan nilai maksimum absolut dari respon akibat variasi angin. Terlihat bahwa gaya tarik efektif tali *mooring* naik cukup signifikan, namun diiringi dengan penurunan pada beberapa arah gerak. Hanya gerak *surge* dan *yaw* saja yang mengalami peningkatan. Kondisi tersebut terjadi karena akibat gaya angin, struktur bergerak namun dalam posisi yang nyaris selalu tegak ke arah maju dan mundur (*surge*). Sehingga mengurangi besar pergerakan translasi dan rotasi lainnya.

Sementara **Tabel 3** menunjukkan arah datang gaya gelombang sangat berpengaruh terhadap respon karena mengubah konfigurasi tali mana yang mengalami tekan atau tarik. Terlihat bahwa dengan perubahan arah datang gaya gelombang mengakibatkan distribusi gaya tarik tali berubah diantara ketiga tali. Sementara gerak struktur meningkat karena peran dari tali tarik berkurang pada arah datang gaya 210° dan 240° .

Berdasarkan ketiga skema pengujian tersebut, didapat kondisi ekstrem yaitu pada saat gelombang dalam kondisi *severe* dan kecepatan angin kondisi 3 datang dari sudut arah 240° . Hasilnya tali *mooring Line 2* mengalami kegagalan karena gaya tarik efektif tali mencapai 5074,62 kN melebihi batas izin yaitu 3403,2 kN.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada pembahasan tugas akhir ini dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu :

1. Struktur turbin angin terapung akan beresonansi pada arah gerak *heave* bila dikenai gelombang dengan perioda 16,5 s. Sementara untuk lima arah gerak lainnya belum diketahui kapan akan beresonansi.
2. Struktur turbin angin terapung sendiri, tanpa *mooring*, sudah stabil baik untuk gerak vertikal maupun angguk (*pitch*) dan memenuhi kriteria kestabilan DNV-OS-J103.

3. Besar tinggi dan perioda gelombang mempengaruhi semua respon gerak struktur, dengan besar perubahan tertinggi dialami gerak *heave* yaitu 2,2% per 1 persen perubahan tinggi gelombang.
4. Besar kecepatan angin sangat berpengaruh pada gaya tarik efektif tali *mooring* dengan nilai terbesar dialami oleh tali yang tertekan, *Line 1* untuk sudut arah datang 180° , dengan besar perubahan gaya tarik menurun 1,93% per 1 persen penambahan kecepatan angin.
5. Sudut arah datang gaya lingkungan 240° paling kritis dengan meningkatkan gaya tarik efektif *Line 2* menjadi 89,46% MBL, jauh melebihi dari kriteria izin API RP 2SK yaitu 60% MBL.
6. Perubahan besar gerak rotasi tidak berpengaruh untuk semua pengujian, dengan besar pergerakan maksimal 0,006246 derajat yang terjadi pada pengujian kondisi acuan dengan gelombang *severe*.
7. Semua kondisi pengujian yang dilakukan memenuhi kriteria besar pergerakan horizontal yang diatur oleh DNV-OS-E301 yaitu $<5,25$ m.

Untuk studi lebih lanjut dapat dilakukan beberapa saran sebagai berikut :

1. Agar mendapatkan hasil respon yang lebih akurat, baling-baling turbin angin terapung sebaiknya ikut dimodelkan.
2. Mengombinasikan material tali *mooring* kabel baja dengan rantai untuk mengurangi pergerakan dan optimasi panjang tali *mooring*.
3. Studi variasi *pretension* pada sistem *catenary mooring*.
4. Studi menggunakan sistem tambatan *taut mooring*.
5. Studi tentang pengaruh arus terhadap respon dari turbin angin terapung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] American Bureau of Shipping. 2013. *Guide For Building And Classing - Floating Offshore Wind Turbine Installations*. Houston : American Bureau of Shipping
- [2] American Petroleum Institute. 2005. *API RP 2SK : Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*. Washington D.C. : American Petroleum Institute
- [3] Bergsma, Jorrit R. 2015. *Hydrodynamic Behaviour of Floating Wind Turbines*. Delft : Technical University Delft
- [4] Det Norske Veritas AS. 2013. *Offshore Standard DNV-OS-J103 : Design of Floating Wind Turbine Structures*.
- [5] Det Norske Veritas AS. 2014. *Offshore Standard DNV-OS-J101 : Design of Offshore Wind Turbine Structures*
- [6] Det Norske Veritas AS. 2013. *Offshore Standard DNV-OS-E301 : Position Mooring*
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC). 2005. *Wind turbines Part 1: Design requirements, IEC 61400-1, 3rd edition*. Geneva : IEC
- [8] Savenije, Laurens B. 2009. *Modeling The Dynamics of A Spar-type Floating Offshore Wind Turbine*. Delft : Technical University Delft