

Floating Offshore Wind Turbine dengan Platform Catamaran

Tri Tiyasmihadi¹, Yugowati Praharsi², M Rizal Fahmi³, M Danang Prakoso⁴, dan M Radhitya Dhaniswara⁵

^{1,2,3,4,5} Program Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal, Jurusan Teknik Bangunan Kapal,
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111

Email: tiyasmihadi_tri@ppns.ac.id¹, yugowati@ppns.ac.id², rizal.fahmi@ppns.ac.id³, mahasiswa^{4,5}

Abstrak

Perairan dangkal untuk ladang turbin angin dengan jenis platform struktur terapung seperti jenis *spar buoy* dan *semi submersible* dirasa kurang sesuai, karena platform terapung tersebut memerlukan kedalaman air yang lebih dalam agar tidak terdampar di dasar laut. Platform terapung jenis katamaran merupakan alternatif lain untuk menyiasati kekurangan dari kebutuhan akan sarat yang rendah untuk perairan dangkal. Turbin angin yang dipasang di atas platform katamaran bermassa 16,17 kg, tinggi tiang 1,30 m, diameter rotor 2,32 m dan kapasitas generator 30 watts. Platform katamaran dirancang dengan cara *trial and error* yang menghasilkan ukuran utama panjang 1,066 m, lebar 0,948 m, tinggi 0,258 m, sarat 0,160 m dan displacement 0,262 ton. Hasil dari turbin angin dengan kecepatan angin terendah 2,40 m/s dihasilkan tegangan 13 volts, sedangkan kecepatan angin tertinggi 9,20 m/s dihasilkan tegangan generator 44 volts.

Kata kunci: rotor, generator, spar-buoy, barge, tension-leg

Abstract

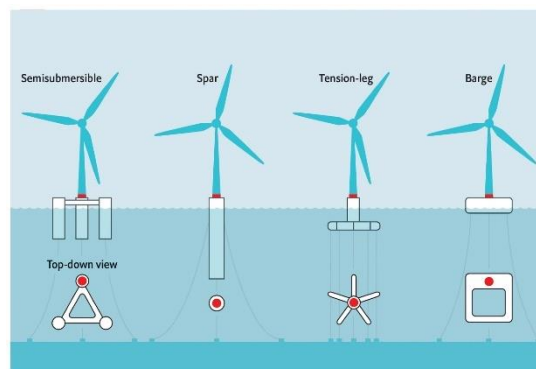
Shallow waters for wind turbine fields with floating structure platform types such as spar buoy and semi-submersible types are considered less suitable, because the floating platform requires deeper water depths so as not to be stranded on the seabed. The catamaran type floating platform is another alternative to overcome the shortcomings of the need for low draft for shallow waters. The wind turbine installed on the catamaran platform has a mass of 16.17 kg, a mast height of 1.30 m, a rotor diameter of 2.32 m and a generator capacity of 30 watts. The catamaran platform was designed by trial and error which resulted in the main dimensions of 1.066 m in length, 0.948 m in width, 0.258 m in height, 0.160 m in draft and 0.262 tons in displacement. The results of the wind turbine with the lowest wind speed of 2.40 m/s produced a voltage of 13 volts, while the highest wind speed of 9.20 m/s produced a generator voltage of 44 volts.

Keywords: rotor, generator, spar-buoy, barge, tension-leg

1. Pendahuluan

Isu semakin rusaknya masalah lingkungan dan energi hijau dimana masyarakat menyadari pentingnya mengembangkan energi bersih. Dimotori negara-negara Eropa, Amerika Serikat, Jepang, China dan negara-negara maju lainnya yang sudah berinvestasi dalam pencarian sumber-sumber energi baru terbarukan dan ada konsensus untuk mempercepat penelitian dalam pengembangan dan pemanfaatan sumber-sumber energi bersih seperti energi nuklir, angin, matahari dan lainnya. Lebih banyak peneliti yang mengabdikan diri untuk mempelajari energi bersih dan salah satu energi bersih adalah energi angin yang telah dikembangkan paling lama dan merupakan teknologi yang paling siap [1].

Karena masalah lingkungan keberadaan turbin angin di darat sering mendapat keluhan suara yang berisik dan membahayakan hewan seperti burung maka kecenderungan saat ini penempatan turbin angin ditempatkan pada bangunan lepas pantai, yaitu berupa turbin angin terapung. Artinya turbin angin yang dipasang pada struktur bangunan terapung dan lokasi penempatannya pada daerah laut yang lebih dalam. Struktur bangunan terapung tersebut dapat berupa *Barge*, *Semi-submersible*, *Spar* dan *Tension Leg Platform*. (Gambar 1. Jenis-jenis turbin angin terapung). Struktur bangunan apung untuk turbin angin umumnya lebih dari satu atau dapat mencapai puluhan yang menempati lokasi pada laut yang agak dalam dan membentuk ladang angin terapung (*wind farm floating*).

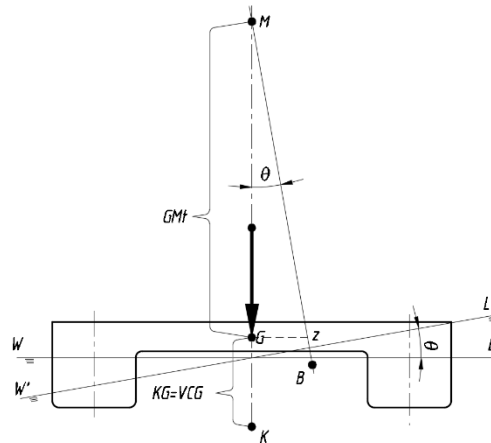


Gambar 1. Jenis-jenis turbin angin terapung

Ladang angin terapung berpotensi secara signifikan meningkatkan area luas laut yang tersedia untuk menempatkan ladang angin lepas pantai, terutama di perairan wilayah Indonesia yang wilayahnya 71% berupa air. Menempatkan ladang angin lebih jauh di lepas pantai juga dapat mengurangi polusi visual, kecepatan angin yang lebih kuat dan lebih konsisten.

Karena untuk perairan dangkal, lambung katamaran merupakan pilihan lain dari ke-empat jenis anjungan terapung untuk turbin angin. Kapal dengan lambung katamaran merupakan kapal dengan dua lambung kembar yang dihubungkan dengan struktur *bridging*. Dengan bentuk badan kapal katamaran yang memiliki dua lambung maka kapal jenis ini memiliki stabilitas yang cukup baik, selain itu luas permukaan kapal yang tercelup air relatif kecil sehingga memiliki sarat yang kecil pula. Katamaran mempunyai garis air lambung yang sangat ramping dengan tujuan untuk memperoleh hambatan yang rendah. Penentuan ketinggian struktur bagian atas badan kapal dari permukaan air merupakan fungsi dari tinggi gelombang dari rute pelayaran yang dilalui. Kombinasi luas deck yang besar dan berat kapal kosong yang rendah membuat kapal tipe ini dapat diandalkan untuk melayani transportasi muatan antar kota maupun untuk pariwisata. Katamaran memiliki beberapa kelebihan maupun kekurangan jika dibandingkan dengan kapal monohull (Alamsyah dan Nugroho, D.P., 2018).

Katamaran merupakan kapal permukaan yang terdiri dari dua badan kapal yang terpisah, ditempatkan secara kolateral pada jarak tertentu satu sama lain, disatukan dalam satu kapal dengan konstruksi kotak yang ditempatkan melintang pada badan kapal. Inti dari penerapan jenis ini adalah meningkatkan stabilitas kapal dengan menggunakan aspek bentuk stabilitas. Di sisi lain, masalah stabilitas kapal monohull diselesaikan dengan pemberian beban tambahan yang memadai ke dalam kapal (ballast)



Gambar 2. Diagram benda bebas tampak melintang kapal katamarn

Turbin Angin Terapung dengan Turbin Angin Poros Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal adalah turbin angin yang sumbu putar rotornya sejajar dengan arah angin atau sumbu rotasinya horizontal dan hampir semua sistem energi angin yang dibangun secara komersial menggunakan turbin angin tipe ini. Keuntungan utama turbin angin tipe horizontal adalah bahwa dengan menggunakan kontrol *pitch blade*, kecepatan rotor dan daya keluaran dapat dikontrol. Kontrol pitch blade juga melindungi turbin angin dari kecepatan berlebih saat kecepatan angin menjadi sangat tinggi. Prinsip dasar turbin angin sumbu horizontal didasarkan pada konsep seperti baling-baling, dengan kemajuan teknologi dalam desain baling-baling mudah digabungkan untuk mengembangkan turbin angin modern yang sangat efisien. Gambar 4.1 menunjukkan susunan skema turbin angin sumbu horizontal.



Gambar 3. Diagram benda bebas tampak melintang kapal katamarn

2. Metode Penelitian

Rancangan Turbin Angin

Untuk mendapatkan diameter rotor (*blade*) turbin angin didapatkan dari persamaan (1). Daya atau tenaga angin adalah proporsioanal dengan kerapatan udara, area daerah yang dilewati angin dan kecepatan angin. Relasi variable tersebut dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

Dimana :

P_w = daya angin (W)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

A = lingkaran rotor / swept area (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

Sebuah turbin angin tidak dapat 100% menggunakan energi angin, hal ini dikarenakan energi angin dipakai untuk menekan bilah rotor (*blade*) mengalami perubahan dan rugi-rugi daya dari sebuah turbin angin adalah C_p (*Betz limits*) 0,45, N_G (*Generator Efficiency*) 0,92 dan N_B (*Gearbox Efficiency*) 0,95, sehingga daya mekanikal yang didapat dari angin dapat ditulis sebagai berikut:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p N_G N_B \quad (2)$$

Dimana :

P_m = mechanical power (W)

ρ = massa jenis udara 1,225 (kg/m^3)

A = lingkaran rotor / swept area (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

C_p = Betz coefficient

N_G = Generator Efficiency

N_B = Gearbox Efficiency

Dari <https://id.weatherspark.com/> tahun 2025 kecepatan angin di pantai Timur Surabaya (Pantai Kenjeran) kecepatan angin rata-rata pada bulan Januari 2025 di daerah Pantai Timur Surabaya adalah 15,2 km/jam atau 4,23 m/s dan generator magnet permanen berdaya 30 W yang dilengkapi *planetary gearbox* dengan ratio 4:1, maka diameter rotor turbin angin dapat diperoleh radiusnya dengan persamaan (3). Untuk diameter rotor untuk wind turbine jenis Horizontal Axis Wind Turbine dimana $A = \pi r^2$, R adalah jari-jari rotor dan persamaan (2) menjadi :

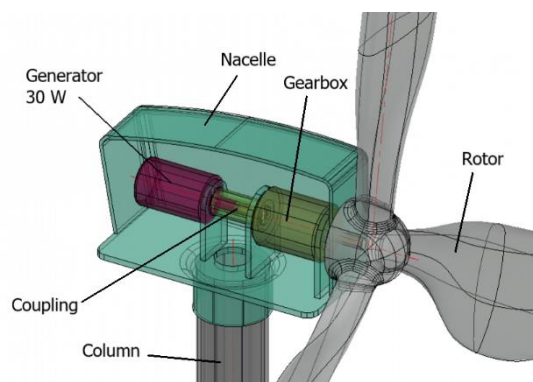
$$i P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p N_G N_B \quad (3)$$

Sehingga diameter atau radius rotor dari wind turbine adalah :

$$4.30 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 3,14 \cdot r^2 \cdot 4,23^3 \cdot 0,52 \cdot 0,97 \cdot 0,98$$

$$r = 1,29 \text{ m}$$

Setelah diketahui diameter rotor, maka langkah berikut perancangan *drive train* dengan generator diletakkan di dalam *nacelle*, seperti yang terlihat pada gambar 11. Tabel 4. Adalah komponen yang membangun turbin angin.



Gambar. 11. Drive train sederhana turbine angin

Tabel 4. 1 Data wind turbine

Komponen	Dimensi	Satuan
Rotor (3 blade)	1,16	m
Tower Height	1,45	m
Total mass rotor	3,30	kg
Hub rotor	1,15	kg
Gearbox (ratio 4:1)	1,30	kg
Coupling	0,76	kg
Generator (30 watts)	1,45	kg
Dudukan generator	2,15	kg
Nacelle	1,44	kg
Tower	3,80	kg
Cabling, voltmeter & LED lamp	0,82	kg
Weight total wind turbine	16,17	kg

Rancangan Ponton Katamaran

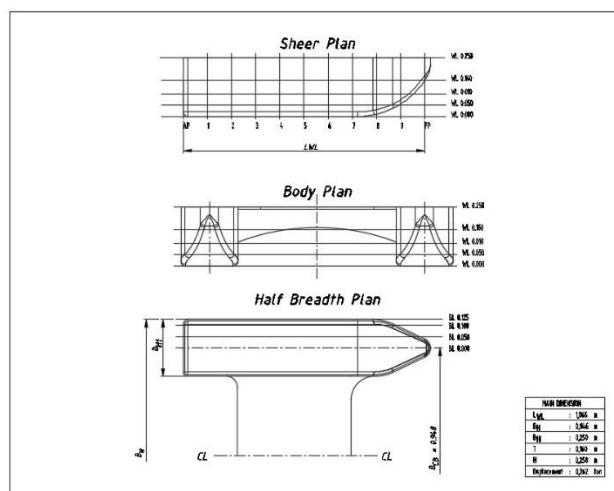
Tahap ini merupakan tahap dimana membuat model dari floating platforms dengan ukuran yang didapatkan dari hasil *trial and error*. Dari table pemodelan wind turbine dengan massa 16,17 kg dengan tinggi tower 1,30 m, maka ukuran dari floating platforms seperti terlihat pada tabel .

Tabel 4. 2 Ukuran utama *floating platforms*

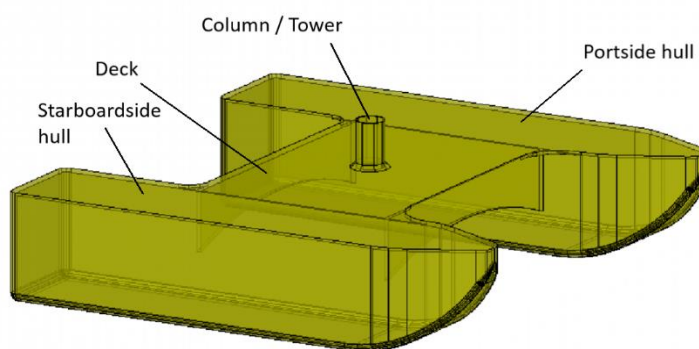
Parameter	Hasil	Satuan
<i>Length (L_{WL})</i>	1,066	m
<i>Breadth (B_H)</i>	0,948	m
<i>Depth (T)</i>	0,160	m
<i>Height (H)</i>	0,258	m
<i>Breadth of Deck (B_{HD})</i>	0,250	m
<i>Coefficient Block (Cb)</i>	0.906	
<i>Volume Hull (2 hull)</i>	0,128	m ³
<i>Displacement (ton) each</i>	0,131	ton

Sedangkan untuk gambar rencana garis dari *floating platforms* dapat terlihat pada gambar 4.

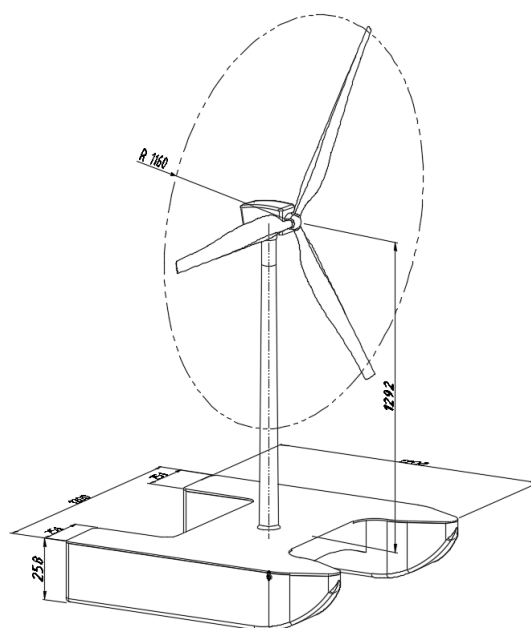
Xtable



Gambar. 11. Drive train sederhana turbine angin



Gambar. 11. Drive train sederhana turbine angin



Gambar. 11. Drive train sederhana turbine angin

3. Hasil dan Diskusi

Analisis Stabilitas

Analisis stabilitas dilakukan dengan bantuan software Maxsurf Stability. Kegiatan analisis dilakukan guna memastikan stabilitas platform dalam keadaan stabil dan memenuhi kriteria yang ditetapkan oleh IMO untuk Multihull. Fokus pembahasan yang akan dianalisis adalah intact stability yang menganalogikan kapal dalam keadaan normal (tidak terjadi kerusakan atau kebocoran). Untuk melakukan analisis stabilitas dalam skala software diperlukan data LWT platform dan komponen titik berat LCG, TCG, VCG, serta ukuran kompartemen dan tangki pada kapal.

Kriteria pengujian stabilitas yang digunakan pada software Maxsurf Stability adalah IMO section A.749(18) Ch 3 - Design criteria Applicable to all Ships dengan ketentuan sebagai berikut :

Nilai luasan kurva Gz pada kondisi 00 - 300 tidak boleh kurang dari 3.15 m.deg.

Nilai luasan kurva GZ pada kondisi 00 - 400 tidak boleh kurang dari atau sama dengan 5.16 m.deg.

Nilai luasan kurva GZ pada kondisi 300 - 400 tidak boleh kurang dari 1,719 m.deg. d. Max Gz pada kondisi 300 lebih.

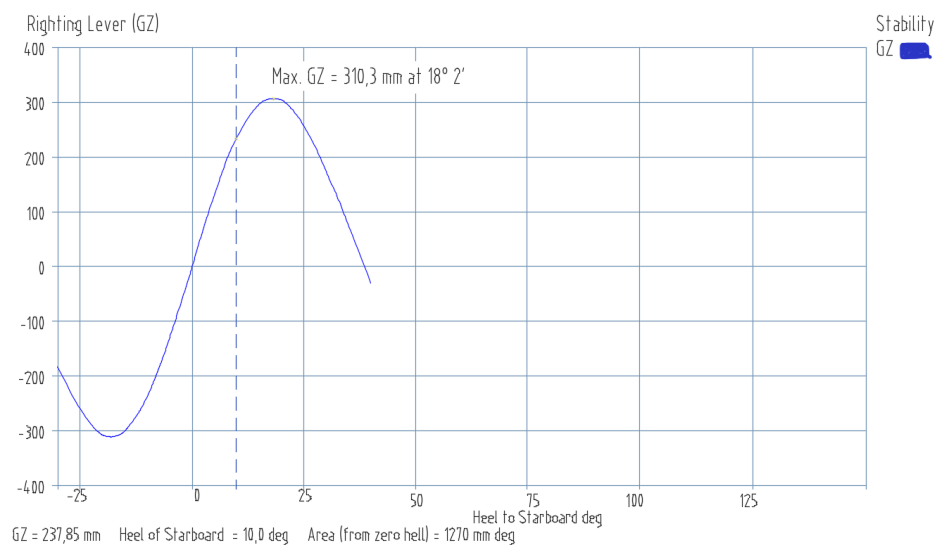
Sudut maximum Gz, untuk kapal dengan lambung tipe Catamaran penentuan nilai sudut maksimum Gz menggunakan kriteria pengujian HSC 2000 Annex 7 Multihull Intact (HSC multi. Intact 1.2) dengan ketentuan sudut pada nilai GZ maksimum tidak boleh kurang atau sama dengan 100 (deg).

Berikut pada Tabel 4. 3 merupakan loadcase yang terdapat pada platform sesuai dengan perhitungan komponen titik berat kapal dan rancangan general arrangement pada **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan..**

Tabel 4. 3 Loadcase

<i>Hull Stbd</i>	50%	33,7	16,8	12026631,7	448,9	409,0	50,0	7 004,0
<i>Hull Port</i>	50%	33,7	16,8	12026631,7	448,9	409,0	50,0	
<i>W add</i>	1	19,0	19,0		600,0	0,0	230,0	7 004,0
<i>Total Load</i>			92,7	24053255,5	493,7	0,0	108,5	14 008,0
<i>FR Correction</i>							151,2	
<i>VCG Fluid</i>							259,6	

Sumber: Maxsurf Stability (2023)



Gambar 4. 1 Grafik Stabilitas
 (Maxsurf Stability)

Dari Gambar 4. 1 dapat diketahui panjang lengan GZ maksimum pada platform dengan kondisi normal bernilai 310,3 mm dan sudut GZ 13 derajat. Jika ditinjau berdasarkan IMO 749 (18) dan HSC 2000 Annex 7 Multihull Intact

(HSC multi. Intact 1.2) maka nilai tersebut memenuhi kriteria yang mensyaratkan bahwa minimal panjang lengan GZ adalah 0,2 m dengan sudut yang dibentuk pada saat GZ maksimum adalah 10 derajat atau lebih. Dengan mengetahui besar nilai GZ maksimum dan sudut yang dibentuk maka dapat diketahui kondisi stabilitas kapal apakah kapal dalam kondisi stabil atau tidak.

Tabel 4. 4 Criteria

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
HSC multi. Intact	1.2: Angle of maximum GZ	10,0	deg	13,6	Pass	+36,36
IMO A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships	3.1.2.1: Area 0 to 30	3,1513	m.de g	690,8414	Pass	+21822,42
	3.1.2.1: Area 0 to 40	5,1566	m.de g	923,3184	Pass	+17805,57
	3.1.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.de g	232,4771	Pass	+13424,76
	3.1.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	24,413	Pass	+12106,50
	3.1.2.4: Initial GMt	0,150	m	444,935	Pass	+296523,33

Sumber: Maxsurf Stability (2025)

Dari hasil analisa yang terangkum dalam Tabel 4. 4 dari keenam kriteria yang disyaratkan oleh IMO A.749(18) Ch3 - Design criteria applicable to all ships dan HSC 2000 Annex 7 Multihull Intact (HSC multi. Intact 1.2) dapat diketahui stabilitas kapal memenuhi kriteria sesuai dengan acuan rules yang

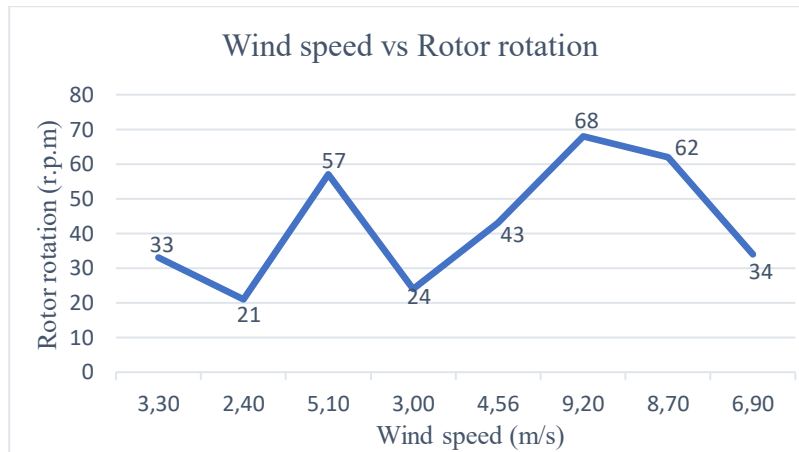


Gambar 4. Pengujian katamaran wind turbin di Pantai Timur Surabaya

Tabel 1. Definisi Notasi

Kecepatan angin (m/s)	Putaran rotor (r.p.m)	Putaran generator (r.p.m)	Tegangan (volt)
3.30	33	330	21
2.40	21	210	13
5.10	57	570	36

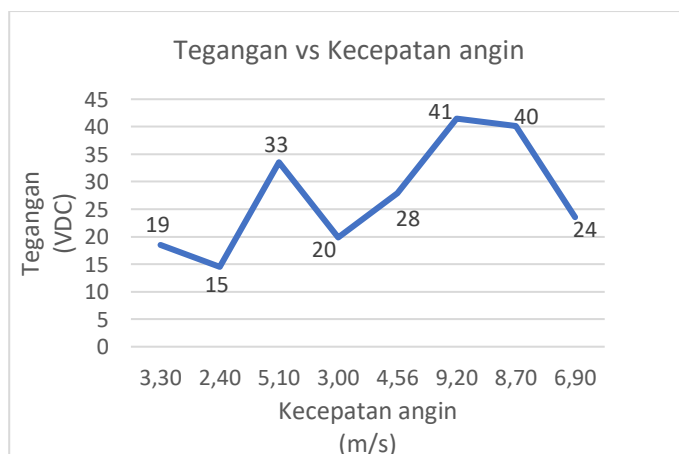
3.00	24	240	15
4.56	43	430	27
9.20	68	680	44
8.70	62	620	40
6.90	34	340	22



Gambar 1. Grafik kecepatan angin dengan putaran rotor turbin angin

Terlihat pada grafik gambar 5, kecepatan angin terendah adalah 2,40 m/d menghasilkan putaran rotor sebesar 21 r.p.m

Dari gambar 3 diketahui hasil pada kecepatan angin terendah adalah 2,40 m/dt dan putaran generator



Gambar 1. VOS Network Visualization for Bibliometric

Sedangkan pada gambar 6 kecepatan angin 2,4 m/dt menghasilkan tegangan 15 volts dan pada kecepatan tertinggi 9,2 m/s menghasilkan tegangan 41 volts.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil uji langsung yaitu pengujian dilakukan di laut Pantai Timur Surabaya (Pantai Kenjeran) turbin angin apung katamaran terlihat stabil, pada gerak rolling dan pitching

RAO lambung floating platform pada kondisi free floating, maka dapat disimpulkan bahwa gerakan lambung floating platform mengalami peredaman pada selang beberapa saat setelah nilai respon mencapai titik paling tinggi. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan mooring system dan pemilihan rantai/tali tambat yang akan dipakai pada bangunan apung sehingga diharapkan dapat mengurangi gerakan yang diakibatkan oleh pembebanan. Untuk selanjutnya dapat dilakukan analisis berupa pemodelan Mooring System yang digunakan supaya mendapatkan kondisi yang optimal selama operasional Floating Tidal Energy Converter.

Bagian kesimpulan harus dapat menjawab tujuan penelitian. Jelaskan hasil-hasil penting yang didapatkan yang terkait dengan tujuan penelitian. Selain itu, bagian ini juga menjelaskan keterbatasan penelitian yang dilakukan dan gagasan penelitian berikutnya. Bagian ini ditulis dalam bentuk paragraf dan tidak diperbolehkan ditulis dalam poin-poin.

3. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya untuk Dana Penelitian tahun anggaran 2024, rekan-rekan anggota peneliti dan mahasiswa yang terlibat sehingga hasil akhir penelitian ini dapat diuji coba di pantai Timur Surabaya atau pantai Kenjeran yang dekat jembatan Suramadu. Tak lupa untuk berterima kasih kepada nelayan di Jl. Kedung Cowek, kecamatan Bulak, Surabaya atas kerelaannya meminjamkan perahunya untuk uji coba turbin angin terapung platform katamaran ini guna mengambil data.

4. Daftar Pustaka

T Vanelli, J Rinker and D S Zalkind. Aeroservoelastic stability of a floating wind turbine. *The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2022)*. Journal of Physics: Conference Series 2265 (2022) 042001 IOP Publishing doi:10.1088/1742-596/2265/4/042001

Serdjo Kos, David Brčić, Vlado Frančić. Comparative Analysis of Conventional and SWATH Passenger Catamaran. <https://www.researchgate.net/publication/229034772>.

Htet Khaing, Yin Mar Lwin, Ye Lwin. Design Calculation of Wind Turbine Blade (100W). *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR) Volume 8, Issue 8, August 2019, ISSN: 2278 -7798*