



Optimalisasi Efisiensi Turbin Arus Laut Horizontal untuk Mendukung Kebutuhan Energi di Kawasan Pesisir Larantuka

Indana Zulfatun Nikmah^a, Fakhri Akbar Ayub^{a,*}

^aTeknik Perkapalan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Indonesia

Abstract

This study aims to evaluate the energy conversion efficiency of Horizontal Axis Tidal Turbines (HATT) by varying blade length and angle of attack (AoA), and to assess their potential application in the coastal region of the Larantuka Strait. Numerical simulations were performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) across nine turbine configurations to determine torque and power coefficient (Cp). The turbine with a 1 m blade and 10° AoA achieved the highest Cp value of 0,68. Meanwhile, the turbine with a 2 m blade and the same AoA, despite having a slightly lower Cp (0,66), produced the highest annual energy output of 739.307,64 kWh. With a net power output of 140,65 kW, approximately four units of this turbine are required to supply around 10% of Larantuka's annual electricity demand. The selection of the optimal turbine model is based on a multi-objective approach that balances efficiency and energy output. These findings highlight the strong potential of tidal turbines as a renewable energy solution in eastern Indonesian coastal areas.

Keywords: tidal current turbine, HATT, CFD, energy efficiency, Larantuka Strait

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi konversi energi dari turbin arus laut tipe *Horizontal Axis Tidal Turbine* (HATT) dengan memvariasikan panjang bilah dan sudut serang (*angle of attack*), serta menganalisis potensi pemanfaatannya di wilayah pesisir Selat Larantuka. Simulasi numerik dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada sembilan konfigurasi turbin untuk memperoleh nilai torsi dan koefisien daya (Cp). Hasil menunjukkan bahwa turbin dengan panjang bilah 1 m dan sudut serang 10° menghasilkan Cp tertinggi sebesar 0,68. Sementara itu, turbin dengan panjang bilah 2 m dan sudut serang 10° meskipun memiliki Cp sedikit lebih rendah (0,66), mampu menghasilkan *output* energi tahunan terbesar, yaitu 739.307,64 kWh. Dengan daya listrik bersih sebesar 140,65 kW, diperlukan empat unit turbin untuk memenuhi sekitar 10% konsumsi listrik tahunan wilayah Larantuka. Pemilihan model turbin optimal didasarkan pada pendekatan multi-objektif, yang mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi konversi dan *output* energi. Hasil ini menunjukkan potensi besar dari pemanfaatan turbin arus laut sebagai solusi energi terbarukan di kawasan Indonesia Timur.

Kata Kunci: turbin arus laut, HATT, CFD, efisiensi energi, Selat Larantuka

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi dan krisis lingkungan akibat emisi gas rumah kaca mendorong transisi global menuju energi terbarukan. Di Indonesia, permintaan listrik diproyeksikan meningkat signifikan hingga mencapai 1.491 TWh/tahun dalam 20 tahun ke depan (Firdaus, 2023). Namun, wilayah terpencil seperti Kecamatan Larantuka di Nusa Tenggara Timur masih bergantung pada pembangkit berbahan bakar fosil, yang rawan gangguan distribusi. Dengan karakteristik arus laut di Selat Larantuka yang kuat dan stabil (>3 m/s), wilayah ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai sumber energi arus laut (Orhan & Mayerle, 2017).

Horizontal Axis Tidal Turbine (HATT) dinilai efektif dalam memanfaatkan energi kinetik arus laut secara efisien dan stabil (Cao et al., 2023). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi panjang bilah dan sudut serang terhadap performa HATT menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Profil bilah yang digunakan adalah Wortmann FX 63-137, yang memiliki karakteristik *soft stall* dan rasio *lift-to-drag* tinggi pada

* Email Penulis Koresponden: fakhriakbar@upnvj.ac.id

kecepatan rendah (McGranahan & Selig, 2004). Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung pemanfaatan HATT sebagai solusi energi berkelanjutan untuk mendukung ketahanan energi di wilayah pesisir seperti Larantuka.

2. Tinjauan Pustaka

Energi pasang surut merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang stabil dan dapat diprediksi. Wilayah seperti Selat Larantuka memiliki potensi tinggi karena arus lautnya yang kuat dan sempit. *Horizontal Axis Tidal Turbine* (HATT) banyak dikembangkan karena lebih efisien dibandingkan turbin vertikal, dengan prinsip kerja mirip turbin angin, yaitu memanfaatkan gaya angkat pada bilah untuk menghasilkan torsi (Zhu et al., 2020).

Kinerja HATT dinilai dari beberapa parameter utama. Efisiensi konversi energi kinetik ke daya mekanik ditentukan oleh koefisien daya (C_p):

$$C_p = \frac{P_{\text{Kinetik Turbin}}}{P_{\text{Arus}}} \quad (2.1)$$

$$C_p = \frac{\tau \cdot \omega}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (2.2)$$

Tip Speed Ratio (TSR), yaitu rasio kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan fluida, ditentukan dengan:

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (2.3)$$

Daya mekanik yang dihasilkan turbin:

$$P_{\text{turbin}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p \quad (2.4)$$

Kemudian dikonversi menjadi daya listrik dengan efisiensi sistem (η_{tan}):

$$P_{\text{listrik}} = P_{\text{turbin}} \times \eta_g \quad (2.5)$$

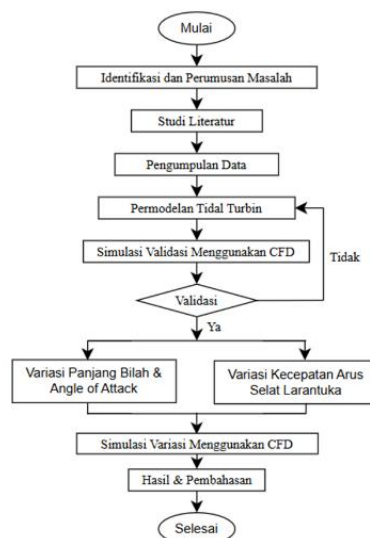
Output energi tahunan dihitung dengan mempertimbangkan durasi operasi efektif (*capacity load factor*, CF):

$$E_{\text{tahunan}} = P_{\text{listrik}} \times 8760 \times CF \quad (2.6)$$

Rangkaian rumus ini digunakan dalam simulasi dan perhitungan performa turbin, untuk menentukan desain bilah terbaik berdasarkan variasi panjang dan sudut serang. Simulasi CFD digunakan untuk memvisualisasikan distribusi gaya (*lift*, *drag*, *thrust*) dan menilai efisiensi pada kondisi aliran khas Selat Larantuka.

3. Metodologi Penelitian

Diagram alir penelitian menggambarkan alur atau langkah-langkah dalam proses penelitian secara sistematis. Diagram ini bertujuan untuk mempermudah pemahaman tentang tahapan penelitian, mulai dari perencanaan hingga kesimpulan, dengan menunjukkan hubungan antar tahap secara terstruktur. Untuk alur pengerjaan penelitian ini secara berurutan dapat dilihat di diagram alir pada gambar di bawah ini.



Gambar 1 Diagram Alir

Data dari spesifikasi geometri turbin yang menggunakan Wortmann FX 63-137, sebagai berikut :

Tabel 1 Dimensi Rotor

<i>Wortmann FX 63 – 137</i>	<i>Dimension</i>
<i>Blade Profile</i>	
<i>Max chord length</i>	<i>109,6 mm</i>
<i>r/R</i>	<i>0,382</i>
<i>Blade length</i>	<i>385 mm</i>
<i>Blade twist</i>	<i>19°</i>
<i>Rotor diameter</i>	<i>0,9 m</i>
<i>Hub diameter</i>	<i>0,14 m</i>

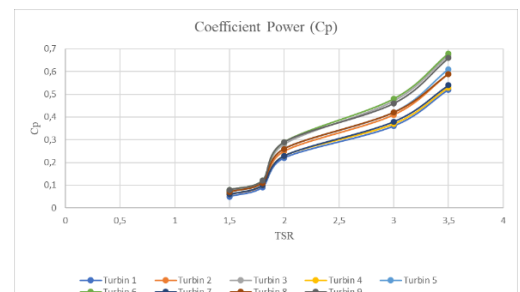
Variasi geometri menggunakan jenis *airfoil* yang sama namun dengan panjang bilah dan sudut serang (*angle of attack*) yang berbeda. Variasi panjang bilah yang digunakan sebesar 0,385 m; 1 m; 2 m, dan variasi *angle of attack* yang digunakan adalah sebesar 6°; 8°; dan 10° pada setiap ukuran panjang bilah. Lalu variasi geometri tersebut dianalisis dengan variasi kecepatan arus yang menyesuaikan kecepatan arus di selat Larantuka.

4. Hasil dan Pembahasan

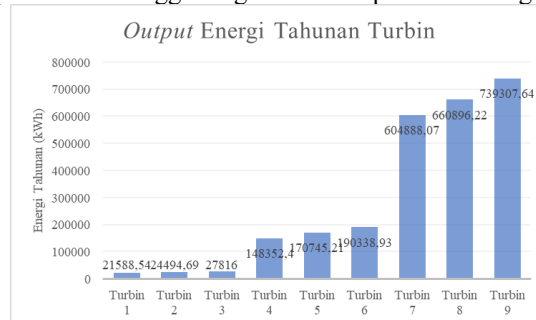
Simulasi CFD dilakukan pada sembilan variasi turbin arus horizontal dengan perbedaan panjang bilah dan sudut serang (AoA) guna mengetahui pengaruhnya terhadap performa turbin. Hasil utama dianalisis berdasarkan nilai torsi, koefisien daya (C_p), dan estimasi energi listrik tahunan.

Tabel 2 Hasil Nilai Torsi

	<i>Torque (Nm)</i>				
	TSR 1,5	TSR 1,8	TSR 2	TSR 3	TSR 3,5
Turbin 1	52,63	67,69	119,09	161,27	197,04
Turbin 2	59,35	76,4	134,6	183,39	223,5
Turbin 3	66,25	85,29	150,85	207,34	252,38
Turbin 4	1022,99	1302,56	2162,41	2916,77	3555,11
Turbin 5	1144,12	1457,39	2430,1	3293,86	4017,88
Turbin 6	1276,35	1622,96	2713,88	3701,01	4521,51
Turbin 7	8301,52	10579,05	17474,31	23382,64	28818
Turbin 8	9235,31	11735,7	19396,3	26145,11	31344,06
Turbin 9	10157,27	12941,61	21529,52	28669,83	35130,21

Gambar 2 Grafik Hasil Nilai C_p

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan panjang bilah dan optimalisasi sudut serang mampu meningkatkan torsi serta koefisien daya secara signifikan. Turbin 6 (panjang bilah 1 m, AoA 10°) mencapai efisiensi konversi tertinggi sebesar 68% ($C_p = 0,68$) pada TSR 3,5. Namun, dari segi output energi tahunan, turbin 9 (panjang bilah 2 m, AoA 10°) menunjukkan performa tertinggi dengan estimasi produksi energi 739.307 kWh per tahun.

Gambar 3 Grafik *Output Energi Tahunan*

Selain itu, peningkatan panjang bilah dan sudut serang yang tepat tidak hanya meningkatkan nilai C_p , tetapi juga memperbesar luas sapuan turbin, sehingga mampu menangkap lebih banyak energi dari aliran. Kombinasi ini menghasilkan peningkatan torsi dan daya yang signifikan, terutama pada kecepatan arus konstan. Meskipun C_p turbin 6 sedikit lebih tinggi, faktor geometris seperti torsi maksimum dan luas sapuan menjadikan turbin 9 sebagai pilihan optimal karena mampu menggabungkan efisiensi yang kompetitif dengan kapasitas daya dan energi yang jauh lebih besar.

Berdasarkan daya mekanik dan efisiensi sistem, diperkirakan diperlukan 4 unit turbin 9 untuk memenuhi sekitar 10% kebutuhan energi tahunan wilayah Larantuka, menjadikannya solusi potensial untuk sistem pembangkit tenaga laut berskala menengah.

5. Penutup

Berdasarkan hasil simulasi CFD terhadap sembilan variasi desain Horizontal Axis Tidal Turbine (HATT), diketahui bahwa konfigurasi dengan panjang bilah 1 meter dan sudut serang 10° menghasilkan nilai koefisien daya (C_p) tertinggi sebesar 0,68 pada kondisi TSR 3,5. Meskipun demikian, output energi tahunan tertinggi dicapai oleh model turbin dengan diameter rotor 17,156 meter, yakni sebesar 739.307,64 kWh/tahun. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi konversi energi fluida (C_p) perlu dikombinasikan dengan parameter geometris seperti diameter dan torsi maksimum untuk menghasilkan output daya optimal.

Selain itu, hasil estimasi menunjukkan bahwa untuk memenuhi kebutuhan listrik tahunan wilayah Larantuka sebesar 27,37 GWh, dibutuhkan sekitar 38 unit turbin serupa. Namun, untuk tahap awal pengembangan energi terbarukan, target penyediaan 10% dari kebutuhan listrik dinilai realistis dan hanya memerlukan sekitar 4 unit turbin. Dengan demikian, teknologi HATT berpotensi besar sebagai solusi pembangkit energi laut yang berkelanjutan dan dapat diandalkan untuk wilayah pesisir seperti Larantuka.

Referensi

- Abida, R. F., Pranowo, W. S., & Kisanarti, E. A. (2013). Identification of Ocean Currents Potential Energy in Lombok Strait Based on Electric Turbine Scenarios. In *International Journal of Science and Research* (Vol. 5). www.ijsr.net
- Arzu, F., Darvishi, H. H., Hashim, R. Bin, Ghazvinei, P. T., & Soeb, M. R. (2017). Numerical investigation on the hydrodynamic performance of variable length blade tidal turbine: An attribute to enhance energy capture. *IET Renewable Power Generation*, 11(3), 347–352. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0479>
- Bai, G., Li, W., Chang, H., & Li, G. (2016). The effect of tidal current directions on the optimal design and hydrodynamic performance of a three-turbine system. *Renewable Energy*, 94, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.009>
- Benelghali, S., Benbouzid, M., Frédéric Charpentier, J., Ben Elghali, S., Member, S., Benbouzid, M., Member, S., & Charpentier, J. (2007). Marine Tidal Current Electric Power Generation Technology: State of the Art and Current Status. <https://hal.science/hal-00531255v1>
- Borg, M. G., Xiao, Q., Allsop, S., Incecik, A., & Peyrard, C. (2020). A numerical performance analysis of a ducted, high-solidity tidal turbine. *Renewable*
- Ordóñez-Sánchez, S., Allmark, M., Porter, K., Ellis, R., Lloyd, C., Santic, I., O'Doherty, T., & Johnstone, C. (2019). Analysis of a horizontal-axis tidal turbine performance in the presence of regular and irregular waves using two control strategies. *Energies*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/en12030367>