

Unjuk Kerja Performa Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal pada Berbagai Bentuk Sudu Unik

Rizki Mendung Ariefianto^{1*}, Rini Nur Hasanah¹, Wijono¹

¹Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jl. MT. Haryono No 167 Lowokwaru Kota Malang 65145 Jawa Timur

*rizkimsahab19@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i1.13572>

ABSTRACT

Efficiency and self-starting capability performances are the main problems in vertical axis turbines. By purposing improves its performance, vertical axis turbines have been developed with various models. One of the developments of this model is to design the turbine blades into unique shapes. This research aims to determine the performance of some unique blade vertical axis turbines conditioned on the same parameters, especially if applied in a marine environment. Turbines with helical blade (HB), eggbeater-shaped blade (ESB), diamond-shaped blade (DSB), Y-shaped blade (YSB), and arrow-shaped blade (ASB) were investigated based on efficiency and self-starting capability using QBlade software. Good performance symmetrical foils such as NACA 634021 are also applied to each turbine. The simulation results show that from the aspect of efficiency performance, turbine ASB > HB > ESB > DSB > YSB. Meanwhile, in the aspect of self-starting capability performance, the sequence is similar to efficiency performance, based on the two approaches applied. The highest efficiency achieved by the ASB turbine is 0.391 at the lowest tip speed ratio of $\lambda = 4$. The ASB turbine also achieves the best self-starting performance, which has a minimum static torque coefficient of 0.00155 and can produce the required power at the lowest marine current speed of 0.806 m/s. This performance brings the ASB turbine to produce a rated power of 52.52 kW, or more than twice the power production of the lowest efficiency turbine and has an average power gain of 3.75 kW per 0.2 m/s.

Key words : vertical axis marine current turbine, unique-shaped blade, efficiency, self-starting

PENDAHULUAN

Energi arus laut merupakan salah satu energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia yaitu sekitar 17.9 GW (Mukhtasor *et al.*, 2014). Untuk mengonversi potensi yang menjanjikan tersebut, diperlukan teknologi turbin yang salah satunya berupa turbin sumbu vertikal atau *vertical axis turbine* (VAT). Turbin ini memiliki berbagai keunggulan seperti konstruksinya sederhana dan mudah serta biaya produksi yang rendah (Ahmad *et al.*, 2020). Selain itu, VAT mampu mengonversi kecepatan fluida dari segala arah tanpa mekanisme *yaw* (Cho *et al.*, 2018) dan mampu bekerja baik di lingkungan dengan turbulensi besar (Krishnaraj *et al.*, 2019). Komponen elektrik seperti generator yang dapat diletakkan di permukaan juga menjadi kelebihan VAT lainnya dari sisi teknis (Qian *et al.*, 2019). Dari aspek lingkungan, penerapan VAT lebih ramah terhadap migrasi ikan karena lebih mudah diidentifikasi oleh pandangan ikan sehingga

meminimalkan terjadinya tabrakan ikan terhadap turbin dibandingkan HAT (Hammar *et al.*, 2015). VAT juga diperkirakan menghasilkan olakan (*wake*) yang rendah sehingga memiliki resiko yang kecil terhadap proses sedimentasi dan perubahan pola arus laut di sekitarnya. Meskipun demikian, VAT memiliki kelemahan utama berupa efisiensinya yang rendah (Hosseini & Goudarzi, 2019) dan kemampuan *self-starting* yang terbatas (Wong *et al.*, 2017).

Pada umumnya desain VAT identik dengan bentuk sudu lurus (*straight blade*) yang memiliki masalah pada rendahnya efisiensi dan kemampuan *self-starting*. Oleh karena itu, untuk meningkatkan performa yang lebih baik pada VAT, berbagai cara dilakukan oleh para peneliti seperti memodifikasi foil, bentuk rotor, dan bentuk sudunya (Satrio *et al.*, 2018). Sudut turbin merupakan bagian krusial dari sebuah turbin sehingga pemilihan bentuk sudu

Cite this as:

Ariefianto, R.M., Hasanah, R.N & Wijono. (2022). *Unjuk Kerja Performa Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal pada Berbagai Bentuk Sudut Unik*. Rekayasa 15 (1). 53-63 pp.

doi: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i1.13572>

© 2021 Ariefianto

Article History:

Received: Jan, 31st 2022; Accepted: Feb, 21st 2022

Rekayasa ISSN: 2502-5325 has been Accredited by Ristekdikti (Arjuna) Decree: No. 23/E/KPT/2019 August 8th, 2019 effective until 2023

yang digunakan sangat berpengaruh terhadap performa turbin. Berbagai modifikasi sudu telah banyak diteliti dengan tujuan utama untuk mengoptimalkan efisiensi, yang direpresentasikan oleh *coefficient of power* atau koefisien daya, dan meningkatkan kemampuan *self-starting*. Modifikasi sudut turbin salah satunya diaplikasikan pada turbin Gorlov, yang didesain dengan mengubah bentuk sudu menjadi heliks (*helical blade*).

Hasil modifikasi *helical blade* ini membawa pada performa yang lebih baik dibandingkan turbin *straight blade* (Moghimi & Motawej, 2020). Lebih jelasnya, dengan desain turbin menggunakan foil NACA 0020 dan *solidity* sebesar 0.27, penelitian Gorban et al (2001) menunjukkan bahwa turbin *helical blade* untuk aplikasi turbin hidrokinetik memiliki koefisien daya lebih besar yaitu 0.35 dibandingkan turbin *straight blade* yang hanya mencapai koefisien daya sebesar 0.3. Pada skala prototipe, Han et al (2013) melakukan eksperimen in-situ terhadap dua turbin arus *tidal* dengan sudu *helical blade* dimana turbin 1 memiliki *solidity* 0.132 dan turbin 2 memiliki *solidity* 0.14 serta sama-sama berbasis foil NACA 0020. Hasilnya, koefisien daya maksimum sebesar 0.30 dan 0.33 masing-masing dicapai oleh turbin 1 dan turbin 2.

Penelitian turbin hidrokinetik melalui eksperimen *in-situ* juga dilakukan oleh Talukdar et al (2018) dengan konfigurasi turbin skala kecil menggunakan foil NACA 0020 dan *solidity* sebesar 0.38. Koefisien daya sebesar 0.2 disertai dengan kemampuan *self-starting* yang baik diperoleh pada penelitian ini. Dari pengujian secara eksperimental di laboratorium juga ditunjukkan bahwa turbin *helical blade* dengan desain foil NACA 0018 dan *solidity* 0.3 mampu menghasilkan performa *self-starting* yang baik (Cavagnaro & Polagye, 2016).

Seiring berkembangnya penelitian tentang turbin, modifikasi sudu juga dilakukan dengan berbagai desain sudu unik, seperti bentuk *eggbeater-shaped blade*, *diamond-shaped blade*, *Y-shaped blade* (Tjiu et al., 2015). Bentuk turbin *eggbeater-shaped blade* mirip dengan bentuk pengocok telur dan turbin ini juga sering disebut turbin tipe Troposkien. Turbin ini telah dikembangkan beberapa dekade lalu, salah satunya berupa instalasi turbin angin Sandia setinggi 2 meter berbasis foil NACA 0012 dan *solidity* sekitar 0.18. Berdasarkan pengujian *wind tunnel* yang dilakukan oleh Sheldahl (1981), turbin ini mampu menghasilkan koefisien daya maksimum sekitar 0.32. Dengan dimensi yang sama, hasil tersebut

kemudian ditinjau kembali oleh Bedon et al (2015) melalui metode komputasi numerik. Hasilnya, koefisien daya sekitar 0.3122 dicapai pada penelitian tersebut.

Penelitian lain tentang turbin *eggbeater-shaped blade* dilakukan oleh Battisti et al (2018) yang membandingkan performa turbin Troposkien dengan turbin *straight blade* untuk aplikasi turbin angin. Foil NACA 0021 diterapkan pada kedua turbin dan masing-masing turbin memiliki *solidity* sebesar 0.38 dan 0.25. Hasilnya, turbin Troposkien menghasilkan koefisien daya lebih besar yaitu 0.34 dibandingkan turbin *straight blade* yang hanya menghasilkan koefisien daya sebesar 0.28. Namun, untuk performa *self-starting*, pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa turbin *straight blade* lebih unggul dibandingkan turbin Troposkien. Sedangkan untuk *diamond-shaped blade* yang memiliki bentuk seperti berlian dan *Y-shaped blade* yang memiliki bentuk huruf "Y" belum banyak dikembangkan lebih lanjut. Meskipun demikian, khusus untuk *Y-shaped blade* terdapat penelitian dari Divakaran et al (2019) yang meneliti turbin Troposkien tetapi bentuknya mirip dengan huruf "Y" yang ujung atasnya dilengkungkan. Hasilnya, dengan menggunakan foil NACA 0015 dan *solidity* sebesar 0.5, turbin ini mampu mencapai koefisien daya sebesar 0.3.

Bentuk sudu unik lain adalah turbin *Achard-Maitre* yang merupakan modifikasi turbin *crossflow* dengan bentuk seperti ujung panah (*arrow-shaped blade*) (Achard & Maitre, 2004). Zanette et al (2010) yang meneliti turbin ini dengan desain menggunakan foil NACA 0018, *solidity* sebesar 1.1, dan *blade swept angle* 30°, mampu menghasilkan koefisien daya maksimum sekitar 0.32. Dari penelitian tersebut juga dinyatakan bahwa turbin *arrow-shaped blade* memiliki keunggulan utama mampu menyeimbangkan beban hidrodinamik aksial pada sudu selama satu putaran dan kemampuan *self-starting* yang baik.

Penelitian lain dari Tafrant & Faizal (2016) mendesain turbin *arrow-shaped blade* menggunakan foil NACA 0020, *solidity* sebesar 0.2, dan *blade swept angle* 30°. Hasilnya, desain turbin ini mampu menghasilkan koefisien daya maksimum sekitar 0.17. Penelitian dengan desain yang mirip dilakukan oleh Mosbahi et al (2020), dimana turbin *arrow-shaped blade* dibuat menggunakan foil NACA 0020, *solidity* sebesar 0.22, dan divariasikan pada *blade swept angle* 10°, 20°, 30°, dan 40°. Hasilnya, koefisien daya tertinggi sebesar 0.178 dan

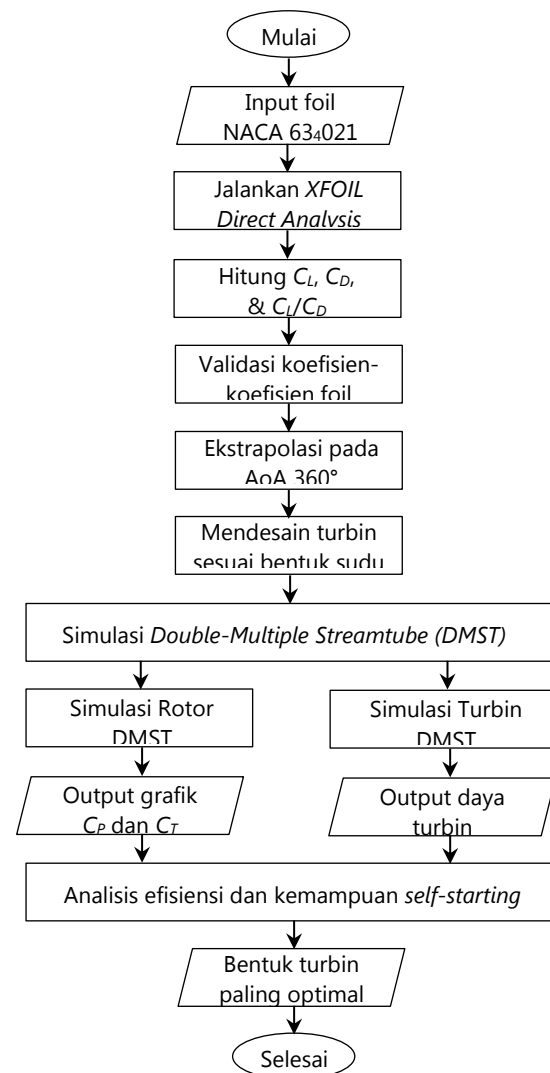
kemampuan *self-starting* yang baik dicapai pada *blade swept angle* 30° . Sedangkan penelitian dari Su *et al.* (2020), turbin *arrow-shaped blade* yang menggunakan foil NACA 0021 dan *solidity* sebesar 0.25 mampu menghasilkan koefisien daya tertinggi sebesar 0.375 atau memiliki peningkatan koefisien daya sebesar 24.1% lebih besar dibandingkan turbin *straight blade*. Hasil ini dicapai dengan konfigurasi kedalaman ujung panah sekitar 0.6 kali panjang *chord* foil.

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya terlihat bahwa bentuk sudu yang berbeda-beda memberikan performa turbin yang berbeda pula. Selain itu pada bentuk sudu turbin yang sama, jika konfigurasi seperti jenis foil dan *solidity* yang diterapkan berbeda, maka juga menghasilkan performa yang berbeda. *Solidity* berpengaruh pada konfigurasi turbin karena dipengaruhi oleh variabel-variabel seperti jumlah sudu turbin, panjang *chord foil*, dan jari-jari turbin. Turbin yang didesain untuk mengonversi energi angin juga menghasilkan performa yang berbeda dengan turbin yang didesain untuk mengonversi energi air. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan perbandingan performa pada beberapa turbin dengan sudu unik yang disamakan pada beberapa parameter seperti tinggi turbin, bentuk foil, dan *solidity* serta diaplikasikan di laut. Harapannya dengan parameter yang sama, maka bentuk sudu turbin terbaik dapat diketahui. Tinjauan parameter yang dianalisis adalah performa efisiensi dan kemampuan *self-starting*. Analisis dilakukan menggunakan *software* QBlade (Marten *et al.*, 2013) yang berbasis teori *blade element momentum* (BEM) dan *double multiple streamtube* (DMS) untuk memsimulasikan turbin dan meningkatkan kinerjanya (Mahmuddin, 2017). *Software* ini merupakan yang sering digunakan dalam rangka memvalidasi performa turbin (Akour *et al.*, 2018). *Software* ini cukup banyak diterapkan pada penelitian khususnya untuk mendapatkan gambaran performa turbin sumbu vertikal agar menghasilkan performa yang baik.

METODE PENELITIAN

Sesuai dengan tujuan penelitian ini bahwa akan dilakukan investigasi terhadap performa efisiensi dan kemampuan *self-starting* dari beberapa bentuk sudu turbin yang unik. Bentuk turbin yang diinvestigasi antara lain *helical blade* (HB), *eggbeater-shaped blade* (ESB), *diamond-shaped*

blade (DSB), *Y-shaped blade* (YSB), dan *arrow-shaped blade* (ASB). Pada penelitian sebelumnya, sebagian besar desain turbin menggunakan foil simetris dalam bentuk NACA 00XX. Oleh karena itu, penggunaan foil simetris juga diterapkan pada penelitian ini dimana pada turbin-turbin yang dievaluasi menggunakan foil NACA 634021. Foil ini dibuat karena terinspirasi dari bentuk sirip ikan paus bungkuk (*humpback whale*) yang memiliki kemampuan manuver yang baik dalam membantu menangkap mangsa (Cai *et al.*, 2015). Tujuan turbin untuk mengonversi arus laut juga menjadi alasan penggunaan foil ini sehingga sesuai dengan aktifitas ikan paus bungkuk yang memiliki habitat di laut. Untuk mendapatkan hasil yang diharapkan, maka dilakukan pemodelan numerik menggunakan *software* QBlade. Adapun langkah-langkah yang dilakukan ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Langkah pertama yang dilakukan adalah menginputkan koordinat foil NACA 63₄021 dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 2 kemudian menganalisisnya menggunakan XFOIL *direct analysis*. Analisis ini bertujuan untuk mendapatkan koefisien *lift* (C_L), koefisien *drag* (C_D), dan rasio antara keduanya (C_L/C_D). Koefisien-koefisien tersebut nantinya digunakan untuk menghitung gaya normal (F_n) dan gaya tangensial (F_t) pada turbin sesuai formulasi sebagai berikut (Dabachi et al., 2020):

$$F_n = \frac{1}{2} \rho c H W^2 (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \quad (1)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \rho c W^2 (C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha) \quad (2)$$

Dimana ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3), c adalah panjang *chord* foil (m), H adalah tinggi sudu turbin (m). Variabel W adalah kecepatan relatif aliran (dalam m/s) dan α adalah *angle of attack* (AoA) yang masing-masing dirumuskan sebagai berikut:

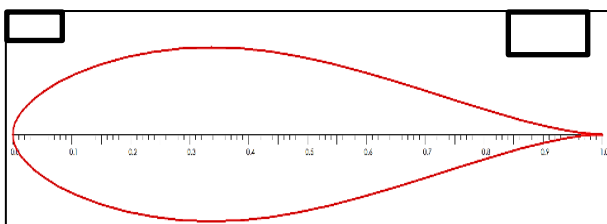
$$W = \sqrt{((1 - a_i) \sin \theta)^2 + (\lambda + (1 - a_i) \cos \theta)^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{(1 - a_i) \sin \theta}{\lambda + (1 - a_i) \cos \theta} \right) \quad (4)$$

Dimana a_i adalah faktor induksi aksial, θ adalah sudut azimut sudu, dan λ adalah *tip speed ratio* yang dihitung dengan:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_\infty} \quad (5)$$

Variabel ω adalah kecepatan angular turbin (rad/s), R adalah jari-jari turbin, dan U_∞ adalah kecepatan fluida (m/s).



Gambar 2. Profil Foil NACA 63₄021

Langkah selanjutnya adalah memvalidasi karakteristik foil dengan penelitian terdahulu pada bilangan Reynolds yang sama untuk menegaskan kesesuaian performa foil. Selanjutnya, foil diekstrapolasi pada AoA penuh pada rentang sudut 0° hingga 360° menggunakan metode Montgomerie atau Viterna. Pada penelitian ini dipilih menggunakan metode Montgomerie karena menghasilkan profil yang lebih baik (Mahmuddin,

2017). Langkah selanjutnya adalah mendesain masing-masing bentuk turbin dengan menginputkan dimensi tinggi turbin, panjang *chord* foil, jari-jari turbin, sudut *twist*, dan sudut melingkar. Desain ini juga mempertimbangkan agar turbin menghasilkan nilai *solidity* yang sama. Nilai *solidity* (σ) ini ditentukan oleh persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{N c}{R} \quad (5)$$

dengan N adalah jumlah sudu turbin.

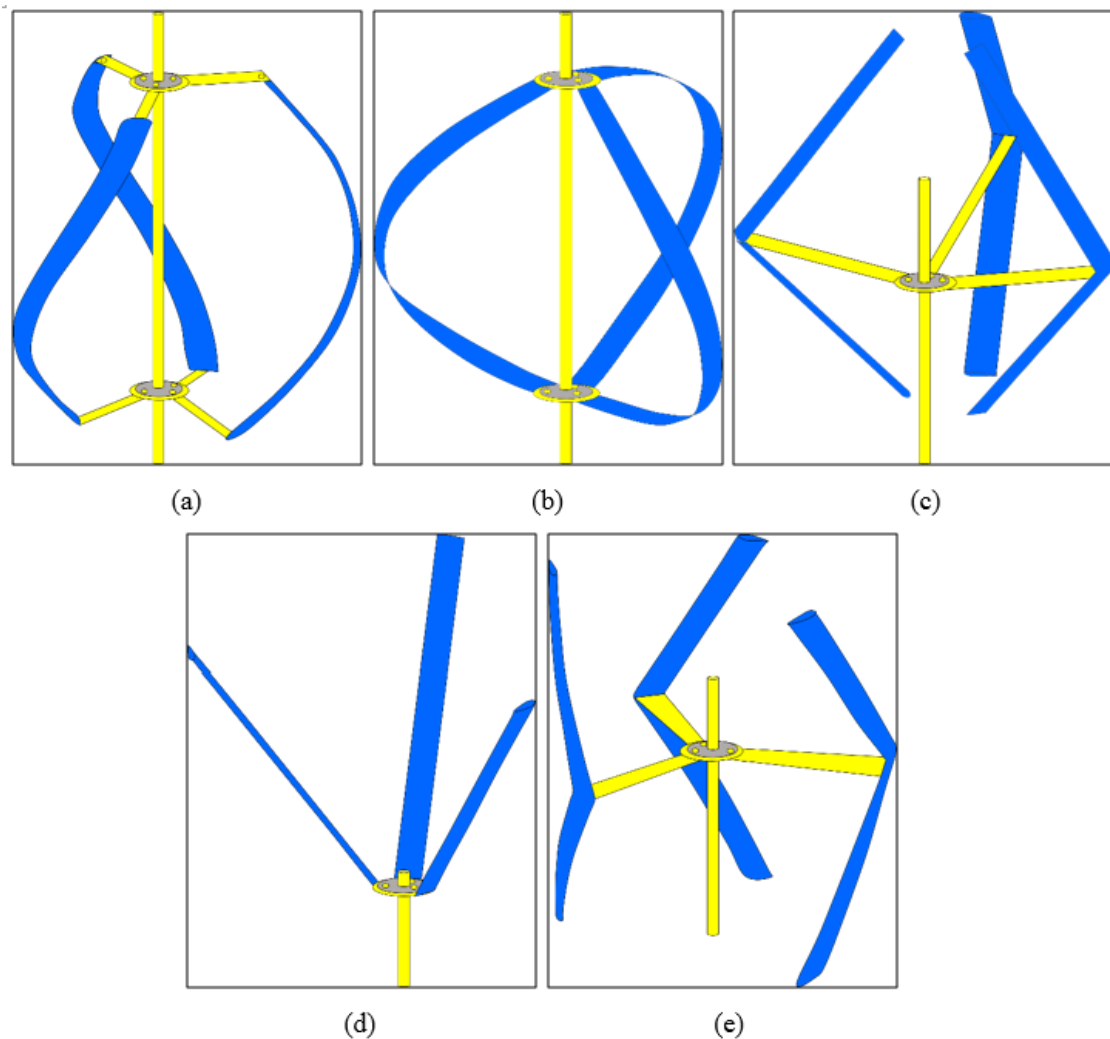
Pada penelitian ini dipilih dimensi dasar untuk turbin *straight blade* mengacu pada penelitian Rawlings (Rawlings, 2008) yang merupakan dimensi turbin berbasis foil NACA 63₄021. Dimensi turbin tersebut selanjutnya diskala agar diperoleh kondisi sesuai prototipenya di kondisi nyata. Untuk aturan penyekalaan dilakukan menggunakan bilangan Froude dengan asumsi bahwa kecepatan arus laut pada kondisi nyata sebesar 3 m/s. Model turbin Rawlings (Rawlings, 2008) menghasilkan performa optimal saat diuji pada kecepatan arus sebesar 1.5 m/s. Dengan mempertimbangkan gaya dominan yang bekerja adalah gaya inersia dan gaya gravitasi, maka diperoleh perhitungan skala yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Rasio Kecepatan} &= \delta^{0.5} \\ \frac{U_{\text{prototipe}}}{U_{\text{model}}} &= \frac{3.0 \text{ m/s}}{1.5 \text{ m/s}} = \delta^{0.5} \\ \delta &= 2^2 = 4 \end{aligned}$$

Dapat disimpulkan bahwa dimensi prototipe turbin akan diskala sebesar empat kali dari dimensi modelnya mengingat nilai faktor skala untuk panjang adalah δ^1 . Dari nilai skala tersebut jika diterapkan pada turbin dasar, maka akan menghasilkan dimensi baru untuk prototipe seperti yang ditunjukkan Tabel 1. Berdasarkan dimensi tersebut kemudian disusunlah bentuk turbin dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 1. Spesifikasi Umum Turbin Yang Diteliti

Variabel	Model	Prototipe
Foil NACA	63 ₄ 021	63 ₄ 021
Jumlah sudu, N	3	3
Panjang <i>chord</i> , c (m)	0.0653	0.2612
Jari-jari turbin, R (m)	0.4572	1.8288
Tinggi turbin, H (m)	0.6858	2.7432
<i>Solidity</i> , σ	0.43	0.43



Gambar 3. Desain Turbin yang diteliti pada Qblade; (a) Helical Blade; (b) Eggbeater Shaped Blade; (c) Diamod-Shaped Blade; (d) Y-Shaped Blade; (e) Arrow-Shaped Blade

Setelah turbin telah didesain, maka selanjutnya dilakukan simulasi *double-multiple streamtube* (DMST). Simulasi ini terdiri atas dua jenis, yaitu simulasi rotor atau sudu dan simulasi turbin. Untuk simulasi rotor DMST diterapkan pada kecepatan arus laut konstan sebesar 3 m/s dan pada rentang *tip speed ratio* yang bervariasi. Simulasi ini difokuskan untuk mendapatkan dua parameter utama yang ditinjau yaitu efisiensi yang direpresentasikan oleh koefisien daya (C_p) dan kemampuan *self-starting* yang direpresentasikan oleh koefisien torsi (C_T). Kedua parameter ini secara matematis memiliki formulasi sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AU_\infty^3} = \lambda C_T \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho AU_\infty^2 R} \quad (2)$$

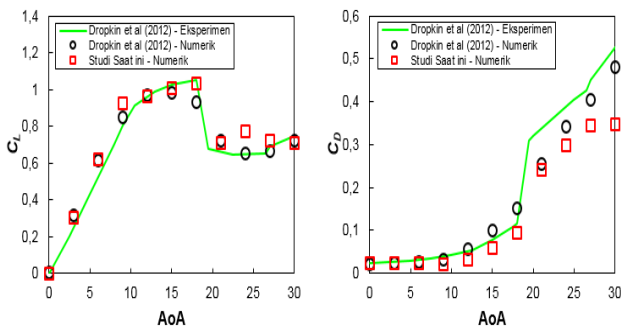
A adalah luas sapuan turbin VAT (m^2), P adalah daya turbin (W), dan T adalah torsi turbin (N.m). Sedangkan untuk simulasi turbin DMST dilakukan pada kecepatan arus laut yang bervariasi dan mengondisikan turbin pada rentang putaran tertentu (ω). Simulasi turbin DMST ini akan menghasilkan kurva daya turbin terhadap kecepatan arus laut yang bervariasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Performa Foil

Sebelum menganalisis performa turbin, terlebih dahulu dilakukan validasi karakteristik foil NACA 63₄021. Validasi mengacu pada hasil eksperimen dan numerik Dropkin *et al* (Dropkin *et al.*, 2012) pada bilangan Reynolds yang sama sebesar 1.80×10^5 dengan hasil ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, karakteristik foil NACA 63₄021 yang

disimulasikan menggunakan fitur XFOIL *direct analysis* pada QBlade sudah mengikuti *trackline* kurva koefisien *lift* dan koefisien *drag* dengan baik. Terlihat bahwa koefisien *lift* meningkat secara linier dari AoA 0° hingga 12°, lalu mengalami pertumbuhan yang cukup lambat dari AoA 12° hingga 18°. Kondisi *stall* terjadi di sekitar AoA 20°, dengan kerugian besar dalam gaya *lift* dan peningkatan besar pada gaya *drag*. Hasil simulasi numerik yang dilakukan telah sesuai dengan hasil eksperimen, terutama di wilayah *pre-stall*. Selanjutnya, untuk koefisien *drag* juga terlihat mengalami peningkatan secara linier dengan karakteristik yang sama mulai dari AoA 0° hingga 18° kemudian mengalami peningkatan yang pesat seiring terjadinya kondisi *stall*. Setelah melewati AoA 18°, karakteristik menjadi sedikit berbeda dimana hasil simulasi QBlade memiliki nilai koefisien *drag* yang lebih rendah dibandingkan hasil studi eksperimen dan numerik lain pada daerah *post-stall*. Perbedaan ini tidak menjadi masalah karena masih dalam tren peningkatan yang



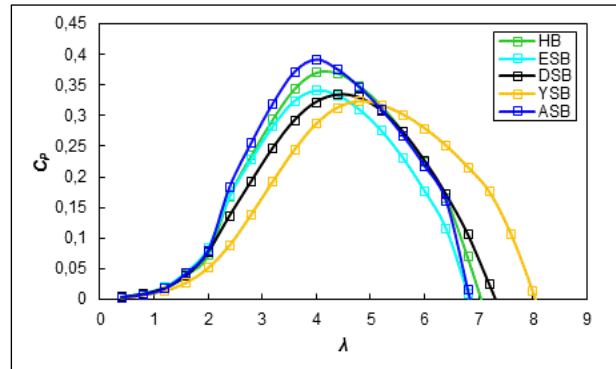
(a) (b)

Gambar 4. Validasi Karakteristik Foil NACA 634021 dengan $Re = 180.000$ (a) AoA Vs C_L , (b) AoA Vs C_D

Analisis Efisiensi Berdasarkan Koefisien Daya

Performa efisiensi turbin arus laut dengan berbagai bentuk sudu unik dapat ditinjau dari karakteristik koefisien daya turbin (C_p) yang diperoleh. Koefisien daya ini umumnya dibandingkan dengan *tip speed ratio* (λ) yang merepresentasikan hubungan antara jari-jari turbin, kecepatan fluida, dan kecepatan rotasi turbin. Pada simulasi ini performa turbin ditinjau dengan mempertimbangkan *tip losses* untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat (Zahariea et al., 2019). Untuk mendapatkan koefisien daya, setiap turbin disimulasikan pada kondisi air laut yang memiliki densitas sebesar 1025 kg/m^3 , koefisien dinamis sebesar $1.2187 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$, dan kecepatan arus

laut tetap sebesar 3 m/s. Hasil simulasi nilai C_p pada bentuk turbin HB, ESB, DSB, YSB, dan ASB ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Karakteristik C_p vs λ pada Berbagai Turbin dengan Bentuk Sudu Unik

Pada gambar tersebut terlihat bahwa turbin ASB memiliki C_p puncak tertinggi sedangkan turbin YSB memiliki C_p puncak terendah diantara bentuk sudu turbin lainnya. Nilai C_p puncak dari turbin HB, ESB, DSB, YSB, dan ASB berturut-turut adalah 0.373, 0.341, 0.334, 0.323, dan 0.391. Setiap turbin juga terlihat bekerja pada rentang *tip speed ratio* (λ) yang berbeda-beda. Untuk turbin HB dimana pada penelitian ini digunakan *inclination angle* sebesar 60°, terlihat memiliki C_p yang tergolong besar. Hal ini juga menjadi bukti bahwa dengan memiringkan bentuk sudu pada kemiringan tertentu mampu meningkatkan performa turbin (Marsh et al., 2015; Divakaran et al., 2021).

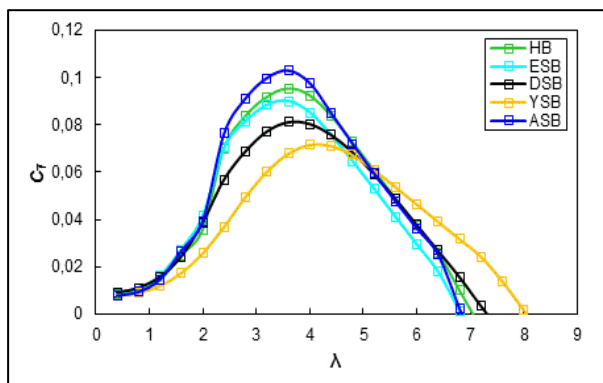
Meskipun demikian, desain turbin HB merupakan bentuk yang paling rumit untuk keperluan fabrikasi dibandingkan keempat turbin lainnya. Untuk bentuk turbin ESB memiliki bentuk kurva koefisien daya yang mirip dengan ASB dimana mampu bekerja pada nilai λ terendah. Namun, pada nilai $\lambda = 2.4$ hingga $\lambda = 6.4$, turbin ESB memiliki koefisien daya yang jauh lebih rendah dibandingkan turbin ASB. Performa koefisien daya dari turbin ESB sangat dipengaruhi oleh tingkat kelengkungan berupa rasio antara panjang penampang yang relatif lurus di ekuator (z_e) terhadap tinggi rotor (H) (Scheurich et al., 2010). Semakin besar z_e/H maka koefisien daya semakin besar meskipun hal ini juga memperbesar gaya sentrifugal pada turbin, sehingga rasio optimal perlu untuk dipertimbangkan.

Bentuk selanjutnya adalah turbin DSB yang memiliki C_p maksimum hampir sama dengan turbin ESB. Namun, turbin DSB memiliki rentang λ lebih lebar dibandingkan turbin ESB. Setelah melewati $\lambda = 4.4$ atau daerah *post-stall* dari turbin ESB, terlihat

koefisien daya turbin DSB secara konsisten lebih besar dibandingkan turbin ESB. Untuk bentuk turbin YSB terlihat mampu bekerja pada rentang λ yang lebih lebar meskipun memiliki efisiensi puncak terendah dan pada wilayah *pre-stall* memiliki kenaikan yang lambat. Untuk bentuk ASB meskipun memiliki *range* λ sempit, bentuk ini mampu mencapai C_p maksimumnya di nilai λ yang paling rendah, sama dengan turbin ESB. Hal ini sangat menguntungkan mengingat untuk aplikasi turbin arus laut, kecepatan arus laut maksimum hanya sekitar 4 m/s, sehingga turbin bekerja pada λ yang rendah. Selain itu, nilai C_p turbin ASB secara konsisten lebih besar dibandingkan turbin lain pada wilayah *pre-stall* dan mencapai nilai C_p tertinggi dibandingkan turbin lainnya. Dari performa efisiensi dapat disimpulkan bahwa turbin ASB > HB > ESB > DSB > YSB.

Analisis Self-Starting Turbin Berdasarkan Koefisien Torsi

Koefisien torsi (C_T) berfungsi untuk mengetahui seberapa besar torsi minimum yang diperlukan untuk memutar turbin. Nilai C_T pada Gambar 6 merupakan hasil dari torsi rata-rata yang dihasilkan turbin dan dikorelasikan dengan *tip speed ratio* (λ). Terlihat bahwa kurva C_T vs λ yang dihasilkan sangat mirip dengan kurva C_p vs λ karena antara koefisien daya dan koefisien torsi memiliki hubungan $C_p = \lambda C_T$. Besarnya torsi rata-rata ini dapat digunakan untuk meninjau turbin yang mampu menghasilkan daya terbesar berdasarkan nilai C_T maksimum yang diperoleh.

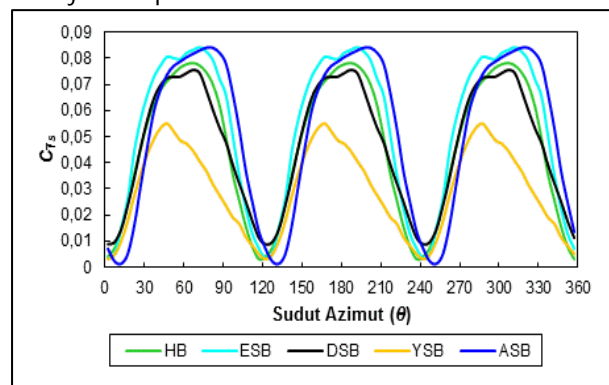


Gambar 6. Karakteristik Koefisien Torsi pada Berbagai Turbin dengan Bentuk Sudu Unik

Diantara turbin lainnya, terlihat jelas bahwa nilai C_T tertinggi dicapai oleh turbin ASB sebesar 0.103, diikuti oleh turbin HB, ESB, DSB, dan YSB dengan nilai koefisien masing-masing sebesar 0.095, 0.090, 0.081, dan 0.072. Namun, besarnya C_T pada turbin

tidak dapat secara langsung digunakan untuk menganalisis kemampuan *self-starting* dari turbin. Hal ini dikarenakan C_T maksimum yang dicapai akan menghasilkan λ optimum yang kemungkinan besar tidak merepresentasikan kecepatan fluida dan rotasi minimum turbin. Oleh karena itu, dilakukan beberapa pendekatan untuk mengevaluasi performa *self-starting* pada turbin-turbin sudu unik didesain.

Pendekatan pertama yang digunakan adalah turbin dinilai memiliki kemampuan *self-starting* yang baik jika nilai koefisien torsi statisnya (C_{Ts}) bernilai positif di semua sudut azimut (Mosbahi et al., 2020). Torsi statis merupakan torsi minimal yang dibutuhkan turbin untuk mulai berputar dari kondisi diamnya (Hafid dan Kurniawan, 2019). Untuk menganalisis parameter tersebut, mengadopsi hasil penelitian Satrio & Utama (2021) bahwa turbin memiliki *self-starting* yang baik jika mampu berputar 2.25 rpm pada kecepatan air 0.2 m/s untuk skala modelnya. Oleh karena itu, referensi tersebut dijadikan asumsi untuk mengitung putaran dan kecepatan skala prototipe ($\delta = 4$) sehingga diperoleh putaran sebesar 4.5 rpm dan kecepatan arus laut sebesar 0.4 m/s. Nilai $\lambda = 2.15$ kemudian diperoleh yang diterapkan untuk mengevaluasi *self-starting* pada semua turbin dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 7.

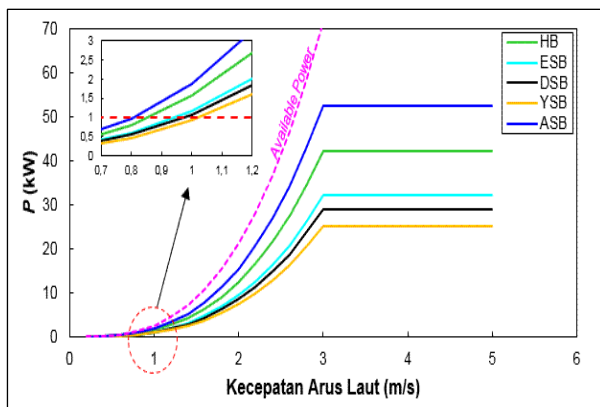


Gambar 7. Karakteristik Koefisien Torsi Statis untuk Semua Turbin pada $\lambda = 2.15$

Terlihat bahwa berdasarkan asumsi yang diterapkan pada $\lambda = 2.15$, semua turbin menghasilkan performa *self-starting* yang baik karena memiliki nilai C_{Ts} bernilai positif di semua sudut azimut. Saat disimulasikan pada $\lambda \leq 2$, diperoleh nilai C_{Ts} minimum berada pada region negatif sehingga semua turbin tidak terjadi *self-starting*. Hal ini sesuai dengan pernyataan Victor dan Paraschivoiu (2018) bahwa turbin sumbu vertikal tidak memiliki kemampuan *self-starting*

pada $0 \leq \lambda \leq 2$ karena menghasilkan torsi negatif. Kemudian, terlihat pula bahwa nilai C_{T5} minimum dari setiap turbin juga berada pada rentang sudut azimuth yang sama yaitu pada perulangan periodik sekitar 120° . Turbin ASB tercatat memiliki C_{T5} terendah sebesar 0.00155 sehingga memiliki kemampuan *self-starting* terbaik. Turbin HB, ESB, dan YSB memiliki performa *self-starting* yang hampir sama dengan nilai C_{T5} masing-masing 0.0030, 0.0032, dan 0.0034. Sedangkan turbin DSB memiliki kemampuan *self-starting* terburuk dibandingkan keempat turbin lainnya karena memiliki C_{T5} minimum dengan nilai yang cukup jauh yaitu 0.0091. Dari kemampuan *self-starting* dengan pendekatan pertama dapat disimpulkan bahwa turbin $ASB > HB > ESB > YSB > DSB$.

Untuk pendekatan kedua, performa *self-starting* juga dapat ditinjau dari kemampuan turbin untuk melakukan akselerasi dari kondisi diam hingga mencapai daya minimum yang disyaratkan (Hill et al., 2009). Pendekatan ini dapat melengkapi pendekatan pertama yang tidak meninjau terkait perolehan daya turbin yang dapat dipertimbangkan pada kondisi *cut-in speed*. Pada kasus ini ditetapkan bahwa turbin dianggap memiliki *self-starting* yang baik jika mampu menghasilkan daya minimal 1 kW pada *cut-in speed* arus laut seminimal mungkin.



Gambar 8. Perbandingan Kemampuan *Self-Starting* Turbin pada Batas Daya Minimum yang Sama (Gambar insert) dan Produksi Daya pada Semua Turbin

Simulasi daya turbin dilakukan dengan mengondisikan setiap turbin bekerja pada kecepatan arus mulai 0.4 m/s, yang merupakan batas awal terjadinya *self-starting* sesuai pendekatan pertama, hingga 3 m/s yang merupakan rating kecepatan arus sebagai batas *cut-off speed* turbin. Pada simulasi ini juga ditentukan bahwa turbin berotasi sebesar 4.5 rpm

(sesuai putaran *self-starting* pada pendekatan pertama) hingga 90 rpm yang merupakan batas secara *arbitrary*.

Hasil simulasi performa *self-starting* semua turbin dengan pendekatan kedua ini ditunjukkan pada Gambar 8. Terlihat jelas bahwa turbin ASB memiliki kemampuan *self-starting* yang terbaik dibandingkan turbin lainnya. Pada masing-masing turbin, daya 1 kW dapat dicapai pada *cut-in speed* arus 0.806 m/s untuk turbin ASB, 0.853 m/s untuk turbin HB, 0.937 m/s untuk turbin ESB, 0.974 m/s untuk turbin DSB, dan 1.025 m/s untuk turbin YSB. Dengan memiliki *self-starting* yang baik, maka turbin ASB dapat secara konsisten menghasilkan daya tertinggi sejak turbin menghasilkan daya minimum pada nilai *cut-in speed* hingga menghasilkan daya ratingnya. Dari kemampuan *self-starting* dengan pendekatan kedua dapat disimpulkan bahwa turbin $ASB > HB > ESB > DSB > YSB$.

Berdasarkan segi gambaran produksi daya di lapangan bahwa turbin HB, ESB, DSB, YSB, dan ASB masing-masing mampu menghasilkan daya pada kecepatan rating sebesar 42.17 kW, 32.03 kW, 28.95 kW, 25.19 kW, dan 52.52 kW. Artinya ada selisih lebih dari 25 kW antara turbin yang menghasilkan daya tertinggi yaitu ASB dengan turbin yang menghasilkan daya terendah yaitu YSB sehingga terlihat bahwa bentuk sudu sangat berpengaruh terhadap daya yang dihasilkan. Semakin bagus efisiensi turbin maka akan menghasilkan daya yang semakin dekat dengan *available power* atau daya tersedia yang dapat dikonversi oleh turbin. Kemudian, ketika turbin mencapai kecepatan arus laut untuk ratingnya sebesar 3 m/s, maka turbin berada pada titik *cut-off speed* sehingga pada kecepatan yang lebih besar dari nilai tersebut daya turbin akan konstan sesuai rating masing-masing. Hal ini dilakukan sebagai upaya agar komponen turbin lebih *sustainable* sehingga mengurangi resiko kerusakan. Selain itu, ketika arus laut bertambah sebesar 0.2 m/s dimulai pada kecepatan 1.85 m/s, turbin HB, ESB, DSB, YSB, dan ASB masing-masing memiliki rata-rata pertambahan daya sebesar 3.01 kW, 2.29 kW, 2.07 kW, 1.80 kW, dan 3.75 kW. Oleh karena itu, ditegaskan bahwa konfigurasi turbin ASB memiliki bentuk sudu yang paling optimal diantara turbin yang dibandingkan.

KESIMPULAN

Telah diteliti turbin sumbu vertikal dengan berbagai bentuk sudu unik. Turbin sudu unik HB, ESB, DSB, YSB, dan ASB diinvestigasi performanya berdasarkan efisiensi dan kemampuan *self-starting*. Foil NACA 63,4021 sebagai foil dasar untuk peningkatan performa turbin, menunjukkan validasi yang memuaskan baik terhadap studi eksperimen maupun numerik. Dengan konfigurasi *solidity* yang sama, perbedaan bentuk sudu terbukti dapat berpengaruh terhadap efisiensi turbin yang direpresentasikan oleh koefisien daya. Semakin besar koefisien daya, maka semakin baik pula performa efisiensi turbin.

Untuk performa *self-starting* dapat direpresentasikan oleh koefisien torsi dimana turbin yang memiliki torsi *start* paling minimum merupakan turbin dengan kemampuan *self-starting* yang baik. Efisiensi yang baik dari turbin akan membawa pada semakin besarnya daya yang diproduksi saat turbin bekerja pada kecepatan arus laut ratingnya. Sedangkan *self-starting* yang baik akan mampu membuat turbin mencapai daya minimal yang disyaratkan dengan kecepatan arus laut seminimal mungkin. Diantara turbin sudu unik yang diteliti, turbin ASB merupakan desain yang terbaik dibandingkan keempat turbin sudu unik yang diteliti, baik ditinjau dari aspek efisiensi dan *self-starting*.

Oleh karena itu, hasil ini dapat digunakan sebagai *preliminary study* performa turbin sudu unik sehingga dapat dipertimbangkan untuk ekstraksi potensi energi arus laut yang lebih komprehensif. Untuk mendapatkan perbandingan yang lebih akurat, pemodelan numerik berbasis *computational fluid dynamics* (CFD) baik berupa 2D maupun 3D serta studi eksperimen dari fisik turbin dapat menjadi pertimbangan untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Achard, J.-L., & Maitre, T. (2004). *Hydraulic Turbo-machine, Applicant: INPG (FR)*. French patent number: FR 04.50209.
- Ahmad, A., Loya, A., Ali, M., Iqbal, A., Baig, F. M., & Afzal, A. M. (2020). Roadside Vertical Axis Wind Turbine (VAWT): An Effective Evolutionary Design for Australian Highway Commuters with Minimum Dynamic Stall. *Engineering*, 12(09), 601–616.
- Akour, S. N., Al-Heymari, M., Ahmed, T., & Khalil, K. A. (2018). Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions. *Renewable Energy*, 116, 215–223.
- Battisti, L., Persico, G., Dossena, V., Paradiso, B., Castelli, M. R., Brighenti, A., & Benini, E. (2018). Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures. *Renewable Energy*, 125, 425–444.
- Bedon, G., De Betta, S., & Benini, E. (2015). A computational assessment of the aerodynamic performance of a tilted Darrieus wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145, 263–269.
- Cai, C., Zuo, Z., Liu, S., & Wu, Y. (2015). Numerical investigations of hydrodynamic performance of hydrofoils with leading-edge protuberances. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(7), 1–11.
- Cavagnaro, R. J., & Polagye, B. (2016). Field performance assessment of a hydrokinetic turbine. *International Journal of Marine Energy*, 14, 125–142.
- Cho, S. Y., Choi, S. K., Kim, J. G., & Cho, C. H. (2018). An experimental study of the optimal design parameters of a wind power tower used to improve the performance of vertical axis wind turbines. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(9), 1–10.
- Dabachi, M. A., Rahmouni, A., Rusu, E., & Bouksour, O. (2020). Aerodynamic simulations for floating darrieus-type wind turbines with three-stage rotors. *Inventions*, 5(18), 1–18.
- Divakaran, U., Kishore, V. R., & Ramesh, A. (2019). Effect of Wind Speed on the Performance of Troposkein Vertical Axis Wind Turbine. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(3), 1–12.
- Divakaran, U., Ramesh, A., Mohammad, A., & Velamati, R. K. (2021). Effect of helix angle on the performance of helical vertical axis wind turbine. *Energies*, 14(2).
- Dropkin, A., Custodio, D., Henoeh, C. W., & Johari, H. (2012). Computation of flowfield around an airfoil with leading-edge protuberances. *Journal of Aircraft*, 49(5), 1345–1355. 5
- Gorban', A. N., Gorlov, A. M., & Silantyev, V. M. (2001). Limits of the turbine efficiency for free

- fluid flow. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 123(4), 311–317.
- Hammar, L., Eggertsen, L., Andersson, S., Ehnberg, J., Arvidsson, R., Gullström, M., & Molander, S. (2015). A probabilistic model for hydrokinetic turbine collision risks: Exploring impacts on fish. *PLoS ONE*, 10(3),
- Han, S. H., Park, J. S., Lee, K. S., Park, W. S., & Yi, J. H. (2013). Evaluation of vertical axis turbine characteristics for tidal current power plant based on in situ experiment. *Ocean Engineering*, 65, 83–89.
- Hill, N., Dominy, R., Ingram, G., & Dominy, J. (2009). Darrieus turbines: The physics of self-starting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(1), 21–29.
- Hosseini, A., & Goudarzi, N. (2019). Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. *Energy Conversion and Management*, 189(November 2018), 49–59.
- Krishnaraj, J., Ellappan, S., & Kumar, M. A. (2019). Additive Manufacturing of a Gorlov Helical Type Vertical Axis Wind Turbine. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(2), 2639–2644.
- Mahmuddin, F. (2017). Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory. *Energy Procedia*, 105, 1123–1129.
- Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., & Thomas, G. (2015). Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines. *Renewable Energy*, 81, 926–935.
- Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C. N., & Paschereit, C. O. (2013). QBLADE: An Open Source Tool for Design and Simulation of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3), 264–269.
- Moghimi, M., & Motawej, H. (2020). Developed DMST model for performance analysis and parametric evaluation of Gorlov vertical axis wind turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37.
- Mosbahi, M., Ayadi, A., Chouaibi, Y., Driss, Z., & Tucciarelli, T. (2020). Experimental and numerical investigation of the leading edge sweep angle effect on the performance of a delta blades hydrokinetic turbine. *Renewable Energy*, 162, 1087–1103.
- Mukhtasor, Susilohadi, Erwandi, Pandoe, W., Iswadi, A., Firdaus, A. M., Prabowo, H., Sudjono, E., Prasetyo, E., & Ilahude, D. (2014). *Potensi Energi Laut Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia and Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI)/Indonesian Ocean Energy Association (INOCEAN), Jakarta.
- Qian, P., Feng, B., Liu, H., Tian, X., Si, Y., & Zhang, D. (2019). Review on configuration and control methods of tidal current turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 125–139.
- Rawlings, G. W. (2008). Parametric Characterization of an Experimental Vertical Axis Hydro Turbine. *Master Thesis*. Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Satrio, D., & Utama, I. K. A. P. (2021). Experimental investigation into the improvement of self-starting capability of vertical-axis tidal current turbine. *Energy Reports*, 7, 4587–4594.
- Satrio, D., Utama, I. K. A. P., & Mukhtasor. (2018). Numerical Investigation of Contra Rotating Vertical-Axis Tidal-Current Turbine. *Journal of Marine Science and Application*, 17(2), 208–215.
- Scheurich, F., Fletcher, T. M., & Brown, R. E. (2010). The influence of blade curvature and helical blade twist on the performance of a vertical-axis wind turbine. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January*, 1–16.
- Sheldahl, R. E. (1981). *Comparison of field and wind tunnel Darrieus wind turbine data*. http://infoserve.sandia.gov/sand_doc/1980/802469.pdf
- Su, J., Chen, Y., Han, Z., Zhou, D., Bao, Y., & Zhao, Y. (2020). Investigation of V-shaped blade for the performance improvement of vertical axis wind turbines. *Applied Energy*, 260, 114326.
- Tafrant, D., & Faizal, M. (2016). The Effect of Fluid Flow Current To 30° Blades Achard Turbine. *Journal of Mechanical Science and Engineering (JMSE)*, 3(1), 7–12.

- Talukdar, P. K., Kulkarni, V., & Saha, U. K. (2018). Field-testing of model helical-bladed hydrokinetic turbines for small-scale power generation. *Renewable Energy*, 127, 158–167.
- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development. *Renewable Energy*, 75, 560–571.
- Victor, S., & Paraschivoiu, M. (2018). Performance of a Darrieus turbine on the roof of a building. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 42(4), 341–349.
- Wong, K. H., Chong, W. T., Sukiman, N. L., Poh, S. C., Shiah, Y. C., & Wang, C. T. (2017). Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 904–921.
- Zahariea, D., Husaru, D. E., & Husaru, C. M. (2019). Aerodynamic and structural analysis of a small-scale horizontal axis wind turbine using QBlade. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 595(1).
- Zanette, J., Imbault, D., & Tourabi, A. (2010). A design methodology for cross flow water turbines. *Renewable Energy*, 35(5), 997–1009.