

OPTIMASI TURBIN ARUS LAUT TIPE *V-SHAPED BLADE* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *BLADE ASPECT RATIO* DAN *SOLIDITY*

Rizki Mendung Ariefianto^{1,*}, Rini Nur Hasanah², Wijono³

^{1,2,3}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia

*E-mail koresponden: rizkimsahab19@gmail.com

Diterima: 9 Januari 2022

Direvisi: 9 Juni 2022

Disetujui: 3 Agustus 2022

ABSTRAK

Turbin V-shaped blade merupakan salah satu model turbin dengan kemampuan self-starting yang baik meskipun efisiensinya masih standar. Berbagai penelitian berupa variasi bentuk foil dan variasi sudut sapuan sudu yang diterapkan pada turbin V-shaped blade telah banyak dilakukan untuk meningkatkan performanya. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi kemampuan turbin V-shaped blade dari sisi efisiensi dan self-starting dengan cara menginvestigasi pengaruh blade aspect ratio dan solidity melalui beberapa skenario pengujian. Foil NACA 634021 dan blade swept angle sebesar 30° digunakan untuk membentuk turbin V-shaped blade dasar. Hasil simulasi menggunakan software QBlade menunjukkan bahwa blade aspect ratio dan solidity sangat berpengaruh terhadap efisiensi dan kemampuan self-starting dari turbin V-shaped blade. Pada akhirnya konfigurasi desain yang optimal dicapai pada dimensi turbin dengan tinggi sebesar 3.1344 m, jari-jari sebesar 1.8288 m, panjang chord foil sebesar 0.2134 m, dan jumlah sudu sebanyak empat buah. Konfigurasi ini mampu mencapai efisiensi maksimum sebesar 0.441 dan memenuhi self-starting pada batas minimum tip speed ratio sebesar 0.7.

Kata kunci: *Turbin V-shaped blade; blade aspect ratio; solidity; efisiensi; self-starting*

ABSTRACT

The V-shaped blade turbine is one of the turbine models with good self-starting capability, although its efficiency is still standard. Various studies, especially of foil shape and blade swept angle variations applied to V-shaped blade turbines, have been carried out to improve its performance. This study aims to optimize the ability of a V-shaped blade turbine in terms of efficiency and self-starting by investigating the effect of blade aspect ratio and solidity through several test scenarios. NACA 634021 foil and a blade swept angle of 30° were used to create the main form of a V-shaped blade turbine. The simulation results using the QBlade software show that the blade aspect ratio and solidity significantly affect the efficiency and self-starting capability of the V-shaped blade turbine. Finally, the optimal design configuration was achieved on the turbine dimensions with a height of 3.1344 m, a radius of 1.8288 m, a chord foil length of 0.2134 m, and a total of four blades. This configuration can achieve maximum efficiency of 0.441 and fulfills self-starting at the minimum tip speed ratio limit of 0.7.

Keywords: *V-shaped blade turbine; blade aspect ratio; solidity; efficiency; self-starting*

PENDAHULUAN

Meningkatnya permintaan energi dunia menjadi faktor utama dalam eksplorasi berbagai sumber energi terbarukan, tidak terkecuali energi laut. Energi ini terdiri dari berbagai jenis sumber seperti gelombang laut, panas laut, gradien salinitas, dan arus laut/pasang surut dimana energi terakhir memiliki perkembangan teknologi pengonversi yang sangat pesat (Mukhtasor *et al.*, 2018). Hal ini dikarenakan teknologi turbin sebagai konverter utama sumber daya arus laut/pasang surut merupakan teknologi yang telah siap dan matang.

Secara umum terdapat dua tipe turbin yang sering diaplikasikan, yaitu *horizontal axis turbine* (HAT) dan *vertical axis turbine* (VAT). Jenis turbin yang kedua, khususnya yang berbentuk bilah lurus (*straight blade*) memiliki geometri yang disederhanakan tanpa mekanisme *yaw* atau pengaturan *pitch* (Cho *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2019). Selain itu, turbin ini mampu mengonversi kecepatan arus laut dari segala arah (Pope *et al.*, 2011). VAT bahkan dapat bekerja pada suatu fluida yang tidak stabil karena memiliki simetri aksial khusus sehingga dapat memperoleh energi dimana terdapat turbulensi tinggi (Armstrong *et al.*, 2012).

Pada aplikasinya, VAT terbagi menjadi tipe Savonius dan tipe Darrieus. Untuk turbin Savonius memiliki beberapa keunggulan seperti struktur yang sederhana, kemampuan menerima fluida dari berbagai arah dan besarnya torsi awal pada kecepatan rendah (Handoko *et al.*, 2021; Mereu *et al.*, 2017). Terlepas dari hal tersebut, turbin Savonius menghadapi efisiensi rendah dan beroperasi pada *tip speed ratio* yang rendah pula sehingga menjadikannya sulit terintegrasi dengan generator. Untuk turbin Darrieus merupakan tipe yang menarik karena menawarkan keunggulan pada kesederhanaan dan kekompakan geometrisnya (Khan *et al.*, 2009). Selain itu, efisiensi dari turbin ini juga lebih tinggi dibandingkan turbin Savonius (Anjum *et al.*, 2016). Namun, kelemahan dari turbin Darrieus adalah memiliki kemampuan *self-starting* yang rendah (Janon, 2020).

Telah banyak penelitian baik simulasi maupun eksperimen yang coba dilakukan untuk

meningkatkan performa turbin Darrieus. Peningkatan ini dilakukan dengan berbagai cara seperti memodifikasi foil, bentuk rotor, dan bentuk sudunya (Satrio *et al.*, 2018). Modifikasi bentuk sudu menjadi salah satu pilihan dengan munculnya turbin Gorlov yang memiliki bentuk sudu heliks namun menghasilkan efisiensi dan kemampuan *self-starting* yang baik (Gorban *et al.*, 2001). Akan tetapi, turbin ini memiliki kelemahan pada desain yang kompleks untuk keperluan fabrikasi. Modifikasi sudu juga dilakukan dengan mengembangkan turbin VAT menjadi turbin arus melintang (*cross-flow*). Selain untuk meningkatkan performanya, pengembangan turbin VAT menjadi turbin *cross-flow* bertujuan untuk mengurangi kompleksitas desain yang dibuat. Salah satu proyek turbin *cross-flow* yang telah dikembangkan adalah turbin Achard-Maitre. Turbin ini memiliki bentuk sudu seperti huruf "V" yang dimiringkan dan memiliki keunggulan utama berupa kemampuan *self-starting* meskipun efisiensinya masih standar dan bahkan cenderung rendah.

Beberapa penelitian lanjutan dari turbin Achard-Maitre yang selanjutnya disebut turbin *V-shaped blade* telah dilakukan. Zanette *et al* (2010) memodifikasi turbin Achard-Maitre tiga sudu menjadi turbin *V-shaped blade* yang berbasis foil NACA 0018 dan sudut sapuan sudu sebesar 30°. Hasilnya koefisien daya sebesar 0.32 dapat dicapai dan turbin memiliki *self-starting* yang baik. Selain itu, turbin serupa namun dengan distribusi panjang *chord* foil yang sama sepanjang sudu, diteliti oleh Su *et al* (2020). Efisiensi sebesar 0.375 dicapai dengan parameter umum berupa penggunaan foil NACA 0021, jumlah sudu 3, kedalaman bentuk "V" optimum sebesar 0.6 kali panjang *chord* foil. Berikutnya Tafrant dan Hendradinata (2019) menguji turbin *V-blade shape* dengan sudut sapuan 15°, 30°, dan 45°. Hasilnya sudut 45° memberikan efisiensi tertinggi sebesar 0.1924 meskipun nilainya tidak memiliki selisih yang signifikan dengan sudut 30°. Kemudian penelitian Mosbahi *et al* (2020) menyatakan bahwa turbin *V-shaped blade* berbasis NACA 0020 dan sudut sapuan sudu 30° mampu menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 0.178 dan kemampuan *self-starting* yang baik.

Dari penelitian-penelitian sebelumnya, terlihat bahwa turbin *V-shaped blade* memiliki efisiensi yang cukup tinggi dibandingkan standar efisiensi umum turbin VAT, yaitu lebih dari 0.3 (Madi *et al.*, 2021). Namun, beberapa penelitian turbin *V-shaped blade* yang lain menghasilkan efisiensi yang lebih rendah. Bahkan lebih spesifik, untuk turbin tipe *crossflow* dasar efisiensi tertinggi yang dicapai hanya sebesar 0.3 (Enawi *et al.*, 2021; Pujol *et al.*, 2018). Peningkatan performa turbin *V-shaped blade* telah banyak dibahas terkait penggunaan bentuk foil berbeda dan sudut sapuan sudu optimal. Pada penelitian lain yang mengeksplorasi turbin Darrieus sudu lurus dan heliks menyatakan bahwa efisiensi daya optimum sangat bergantung pada beberapa faktor seperti *blade aspect ratio* dan *solidity* (Ahmadi-Baloutaki *et al.*, 2014). Untuk *blade aspect ratio* dipengaruhi oleh dimensi turbin sedangkan *solidity* sangat bergantung pada jumlah sudu, panjang *chord* foil, dan radius rotor.

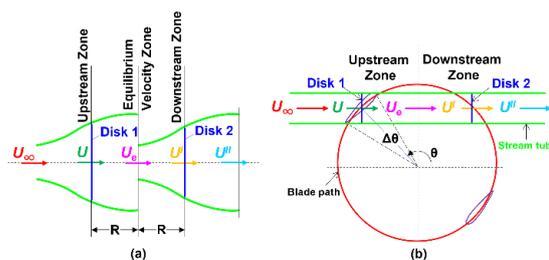
Oleh karena itu, penelitian ini menyajikan investigasi lanjutan terhadap turbin *V-shaped blade* dengan mempertimbangkan faktor *blade aspect ratio* dan *solidity* agar diperoleh peningkatan performa yang lebih baik. Variasi *blade aspect ratio* dan *solidity* dikombinasikan untuk mendapatkan dimensi turbin yang menghasilkan efisiensi sekaligus memiliki kemampuan *self-starting* yang baik. Analisis dilakukan menggunakan *software* QBlade yang berbasis teori *blade element momentum* (BEM) dan *double multiple streamtube* (DMST) untuk mensimulasikan turbin dan meningkatkan kinerjanya (Mahmuddin, 2017). *Software* ini merupakan *tools* yang sangat bermanfaat untuk tujuan desain, simulasi, optimasi, dan validasi turbin (Mahmuddin *et al.*, 2017; Islam *et al.*, 2019). *Software* ini cukup banyak diterapkan pada penelitian khususnya untuk mendapatkan gambaran performa turbin sumbu vertikal agar menghasilkan performa yang baik.

METODE PENELITIAN

Pemodelan pada QBlade

Untuk mensimulasikan sebuah VAT, QBlade menggunakan metode model tabung aliran ganda-jamak atau *double-multiple streamtube*

(DMST) (Dabachi *et al.*, 2020). Model ini membagi daerah rotor menjadi dua wilayah yaitu *upstream* dan *downstream* dimana fluida mengalir melalui dua model piringan aktuator dalam sebuah tabung (Batista *et al.*, 2018). Model DMST ini secara skematik ditunjukkan pada Gambar 1. Kecepatan *upstream* dan *downstream* dapat dihubungkan dengan suatu faktor aksial, sehingga nilai kecepatan aliran bebas (U_∞) akan berbeda dengan kecepatan *upstream* (U), kecepatan ekuilibrium (U_e), dan kecepatan *downstream* (U') (Paraschivoiu *et al.*, 2009) dengan hubungan sebagai berikut.



Gambar 1. (a) Skema 2 aktuator disk (b) model DMS

$$U = aU_\infty \quad (1)$$

$$U_e = (2a - 1)U_\infty \quad (2)$$

$$U' = a'U_e = a'(2a - 1)U_\infty \quad (3)$$

dimana, a dan a' masing-masing adalah faktor induksi aksial di daerah *upstream* dan *downstream* dengan $a' < a$.

Selanjutnya, dengan meninjau bagian hulu rotor maka diperoleh kecepatan aliran relatif (U_R) yaitu:

$$U_R = U_\infty \sqrt{1 + 2\lambda \cos \theta + \lambda^2} \quad (4)$$

Variabel λ merupakan *tip speed ratio* (TSR) yang didefinisikan sebagai:

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

dimana R adalah jari-jari turbin (m) dan ω adalah kecepatan angular turbin (rad/s).

Nilai TSR penting untuk menentukan besar *angle of attack* (α) sebagai berikut:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + \lambda} \right) \quad (6)$$

Nilai α merupakan variabel yang berubah terhadap waktu sejak $\theta = \omega t$. Sedangkan variabel θ merupakan sudut azimut sudu. Dengan mempertimbangkan gaya normal (F_n) dan gaya tangensial (F_t) yang melibatkan

koefisien *lift* (C_L), koefisien *drag* (C_D), dan α , maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$F_n = \frac{1}{2} \rho c H U_R^2 [C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha] \quad (7)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \rho c H U_R^2 [C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha] \quad (8)$$

dimana ρ adalah massa jenis air laut (kg/m^3), c adalah panjang *chord* foil (m), H adalah tinggi turbin (m), C_L adalah koefisien *lift*, dan C_D adalah koefisien *drag*. Gaya normal dan tangensial yang diberikan oleh Persamaan (7) dan (8) adalah untuk posisi azimuth sewenang-wenang dan dianggap sebagai fungsi sudut azimuth θ . Gaya tangensial rata-rata (F_{ti}) untuk satu foil tunggal pada θ tertentu adalah:

$$F_{ti} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (9)$$

Dengan mempertimbangkan N adalah jumlah sudu, total torsi output (Q_o) dan daya output yang dihasilkan (P_o) adalah:

$$Q_o = N F_{ti} R = \frac{NR}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (10)$$

$$P_o = Q_o \omega = \frac{NR\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (11)$$

Pada akhirnya koefisien daya (C_P) dan koefisien torsi (C_Q) dapat diperoleh yaitu:

$$C_P = \frac{P_o}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} \quad (12)$$

$$C_Q = \frac{Q_o}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3 R} \quad (13)$$

dimana A merupakan luas sapuan turbin (m^2). Parameter lain untuk mengekspresikan VAT adalah *blade aspect ratio* (ψ) dan *solidity* (σ) yang masing-masing dirumuskan oleh:

$$\psi = \frac{H}{c} \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{Nc}{R} \quad (15)$$

Bilangan Reynolds digunakan untuk mengkarakterisasi rezim aliran yang dirasakan oleh sudu-sudu dimana bilangan ini dirumuskan dengan:

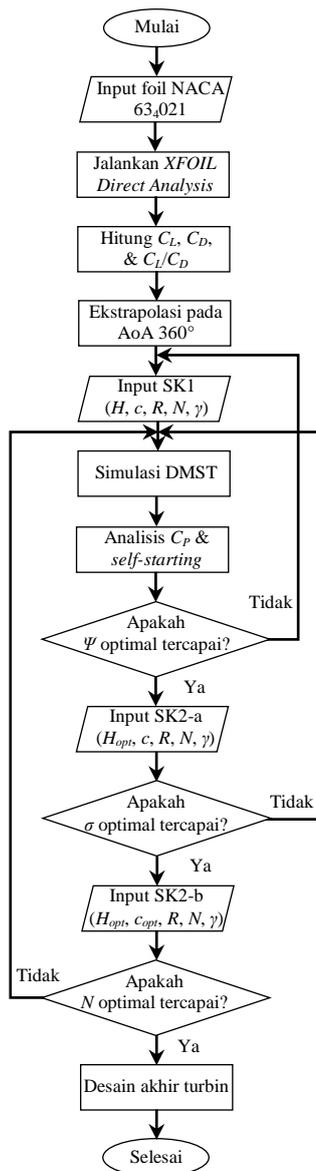
$$Re = \frac{U_\infty c}{\nu} = \frac{\rho U_\infty c}{\mu} \quad (16)$$

dimana ν adalah viskositas kinematis air laut yaitu $1.189 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dan μ adalah viskositas dinamis air laut yaitu $1.2187 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$.

Material dan Metode

Pada Gambar 2 ditunjukkan diagram alir secara detail langkah-langkah untuk mendapatkan desain turbin *V-shaped blade* yang paling optimal dengan melibatkan faktor *blade aspect ratio* dan *solidity*. Pada penelitian ini, turbin *V-shaped blade* didesain menggunakan foil NACA 634021 sebagai foil dasar yang terinspirasi dari sirip paus bungkuk (*humpback whale*) karena gerakan manuvernya yang baik. Foil ini juga menghasilkan performa yang bagus pada beberapa penelitian seperti Johari *et al.*, (2007), Satrio *et al* (2018), dan Utama *et al* (2020).

Koordinat foil NACA 634021 diinputkan pada *software* Qblade kemudian dianalisis menggunakan menu *XFOIL direct analysis* untuk mendapatkan karakteristik koefisien *lift* (C_L), koefisien *drag* (C_D), dan koefisien rasio diantara keduanya (C_L/C_D). Analisis ini dilakukan pada rentang *angle of attack* (AoA) antara 0° hingga 30° . Setelah itu, proses ekstrapolasi dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai koefisien-koefisien dalam sudut penuh 360° . Metode ekstrapolasi yang disediakan pada Qblade ada dua, yaitu metode *Montgomerie* dan metode *Viterna*. Pada penelitian ini dipilih menggunakan metode *Montgomerie* karena menghasilkan profil yang lebih baik (Mahmuddin, 2017).



Gambar 2. Diagram alir metode penelitian

Selanjutnya, dilakukan proses desain turbin dimana dimensi utama yang digunakan mengacu pada turbin sudu lurus dari (Rawlings, 2008) yang merupakan turbin berbasis foil NACA 63,021. Dimensi turbin tersebut kemudian disesuaikan untuk membentuk turbin *V-shaped blade* dasar dengan mengubah sudut sapuan sudu (γ) menjadi 30° pada sisi *leading edge* sehingga menjadi lancip pada bagian tengah sudunya. Sudut ini dipilih karena merupakan sudut paling optimal pada beberapa penelitian terkait turbin *V-shaped blade* seperti dari Zanette *et al* (2010) dan Mosbahi *et al* (2020). Dimensi turbin selanjutnya diskala agar diperoleh kondisi sesuai prototipenya di kondisi nyata.

Untuk aturan penyekalaan dilakukan menggunakan aturan Froude dengan asumsi bahwa kecepatan arus laut pada kondisi nyata sebesar 3 m/s. Model turbin (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 perhitungan skalanya adalah sebagai berikut:

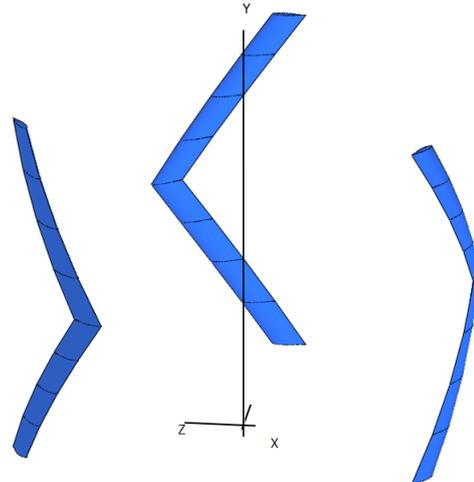
$$\text{Rasio Kecepatan} = \delta^{0.5}$$

$$\frac{U_{\text{prototipe}}}{U_{\text{model}}} = \delta^{0.5}$$

$$\frac{3.0}{1.5} = \delta^{0.5}$$

$$\delta = 2^2 = 4$$

Dapat disimpulkan bahwa dimensi prototipe turbin akan diskala sebesar empat kali dari dimensi modelnya mengingat nilai faktor skala untuk panjang adalah δ^1 . Adapun hasil penyekalaan dari turbin *V-shaped blade* dasar ditunjukkan pada Tabel 1 dan hasil desainnya ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Bentuk dasar turbin yang diteliti

Tabel 1. Spesifikasi turbin *V-shaped blade* dasar

Variabel	Model	Prototipe
Foil NACA	63,021	63,021
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
Sudut sapuan sudu, γ	30°	30°

Tabel 2. Skenario pengujian turbin *V-shaped blade*

Turbin	<i>R</i>	<i>c</i>	<i>H</i>	<i>N</i>	ψ	σ
Skenario 1 (SK1)						
Basis	1.8288	0.2612	2.7426	3	10.5	0.43
A1	1.8288	0.2612	5.2240	3	20	0.43
A2	1.8288	0.2612	3.9180	3	15	0.43
A3	1.8288	0.2612	3.1344	3	12	0.43
A4	1.8288	0.2612	1.9590	3	7.5	0.43
A5	1.8288	0.2612	1.3060	3	5	0.43
Skenario 2 (SK2-a)						
Basis	1.8288	0.2612		3		0.43
B1	1.8288	0.0914		3		0.15
B2	1.8288	0.1524	<i>H</i> terbaik	3	ψ terbaik	0.25
B3	1.8288	0.2134	dari SK1	3	dari SK1	0.35
B4	1.8288	0.3353		3		0.55
B5	1.8288	0.3962		3		0.65
Skenario 2 (SK2-b)						
Basis	1.8288		<i>H</i>	3	ψ	σ_{basis}
C1	1.8288	<i>c</i> terbaik	terbaik	2	terbaik	σ_{C1}
C2	1.8288	dari SK2	dari SK1	4	dari SK1	σ_{C2}
C3	1.8288			5		σ_{C3}

Setelah mendapatkan dimensi dasar yang sesuai, maka selanjutnya dapat digunakan untuk mencari bilangan Reynolds yang diterapkan pada foil sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} c}{\mu} = \frac{1025 \times 3 \times 0.2612}{1.2187 \times 10^{-3}} \approx 660.000$$

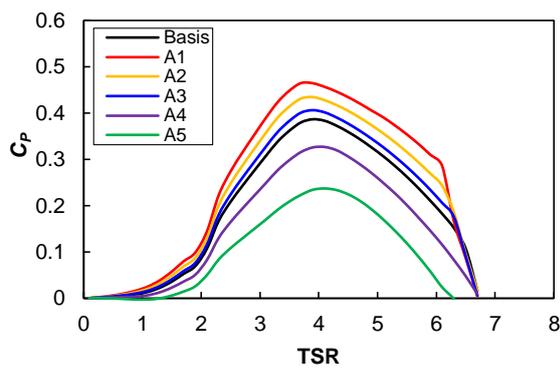
Selanjutnya untuk mendapatkan konfigurasi desain turbin yang optimal, dilakukan beberapa pengujian dengan skenario yang ditunjukkan pada Tabel 2. Pertama-tama turbin *V-shaped blade* dasar diuji dengan Skenario 1 (SK1) berupa evaluasi pengaruh *blade aspect ratio* (ψ) yang merupakan perbandingan antara tinggi turbin dengan panjang *chord* foil. Pada skenario ini jari-jari turbin, panjang *chord* foil, dan jumlah sudu dibuat tetap. Sedangkan untuk tinggi turbin dibuat berbeda-beda agar menghasilkan ψ sebesar 5, 7.5, 10.5, 12, 15, dan 20. Untuk nilai $\psi = 10.5$ merupakan rasio basis dari dimensi turbin pada Tabel 1 yang akan dioptimasi. Setelah diperoleh konfigurasi yang menghasilkan koefisien daya dan *self-starting* terbaik, selanjutnya turbin diuji dengan

Skenario 2. Pada skenario ini dievaluasi pengaruh *solidity* (σ) melalui konfigurasi panjang *chord* foil yang berbeda-beda sehingga menghasilkan nilai *solidity* sebesar 0.15, 0.25, 0.35, 0.43, 0.55, dan 0.65. Untuk nilai $\sigma = 0.43$ merupakan *solidity* dari turbin basis yang dioptimasi. Pada skenario ini nilai jari-jari turbin dan jumlah sudu dibuat tetap sedangkan tinggi turbin diambil dari hasil Skenario 1 yang menghasilkan performa terbaik. Skenario berikutnya adalah masih berkaitan dengan *solidity* dimana variabel yang ditinjau adalah penggunaan jumlah sudu turbin sebanyak 2, 3, 4, dan 5. Pada skenario ini jari-jari turbin tetap sedangkan panjang *chord* foil dan tinggi turbin diambil dari skenario sebelumnya yang menghasilkan performa terbaik. Pada akhirnya dimensi akhir turbin yang menghasilkan performa terbaik dapat diketahui.

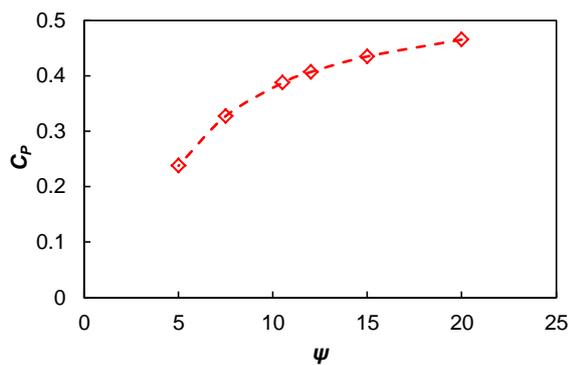
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh *Blade Aspect Ratio* (ψ)

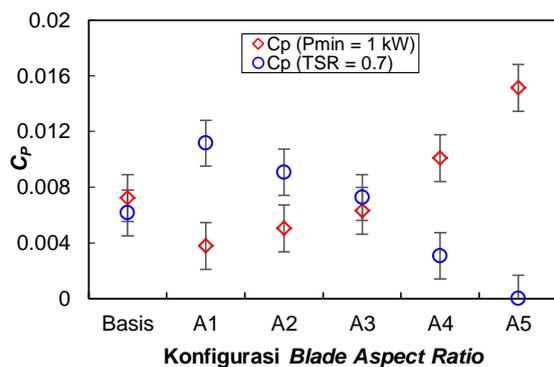
Parameter pertama yang diinvestigasi adalah *blade aspect ratio* dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat dengan jelas bahwa terdapat peningkatan koefisien daya maksimum seiring bertambahnya *blade aspect ratio* (ψ). Semakin besar nilai ψ maka koefisien daya maksimum yang dicapai juga semakin tinggi dan rentang kinerja *tip speed ratio* turbin juga semakin lebar. Nilai koefisien daya maksimum (C_{Pmax}) berturut-turut pada konfigurasi Basis, A1, A2, A3, A4, dan A5 adalah 0.387, 0.465, 0.435, 0.407, 0.327, dan 0.238. Konfigurasi A3 dipandang cukup ideal karena mampu menghasilkan nilai C_P yang tinggi. Untuk konfigurasi A1 dan A2 meskipun memiliki C_P yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi A3, konfigurasi tersebut memiliki kelemahan secara teknis dimana penggunaan sudu dengan ψ yang relatif tinggi menyebabkan penambahan bobot turbin yang semakin besar



Gambar 4. Grafik koefisien daya pada semua konfigurasi skenario 1



Gambar 5. Grafik koefisien daya maksimum terhadap *blade aspect ratio*



Gambar 6. Grafik koefisien daya pada semua konfigurasi skenario 1

sehingga meningkatkan biaya produksi dan pemeliharaan serta memerlukan komponen *bearing* yang lebih kompleks (Ahmadi-Baloutaki *et al.*, 2014). Selain itu, sudu akan lebih mudah terkena momen lentur yang lebih besar sehingga meningkatkan risiko patah sudu. Kemudian, pada Gambar 5 terlihat bahwa laju peningkatan C_{pmax} berkurang ketika nilai ψ melebihi nilai 15. Oleh karena itu, nilai ψ optimal untuk turbin *V-shaped blade* adalah dalam kisaran $10 < \psi < 20$ dengan konfigurasi

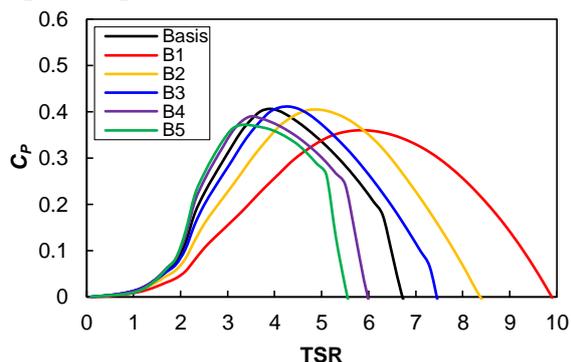
A3 yang dapat dipertimbangkan. Pada penelitian lain seperti Islam *et al* (2008) bahkan menyarankan bahwa nilai ψ yang lebih rendah dari 7.5 harus dihindari untuk mencapai koefisien daya yang lebih tinggi serta desain rentang *tip speed ratio* yang lebih lebar.

Untuk karakteristik *self-starting* salah satunya dapat didefinisikan jika sebuah turbin dapat berakselerasi dari keadaan diam ke titik dimana daya yang signifikan dihasilkan (Kirke, 1998). Pada penelitian ini ditetapkan daya signifikan yang dipertimbangkan adalah sebesar 1 kW. Teknisnya, daya ini dihitung secara matematis untuk mendapatkan nilai C_p minimum yang dapat mencapainya. Nilai C_p pada titik tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai C_p hasil simulasi pada TSR tertentu. Menurut Bos (2012) batas minimal untuk *self-starting* adalah pada $TSR = 1$. Namun, pada penelitian saat ini digunakan batas $TSR = 0.7$ agar performa *self-starting* lebih terlihat. Jika C_p pada $TSR = 0.7$ lebih besar dibandingkan C_p yang menghasilkan daya 1 kW, maka konfigurasi desain dianggap layak. Secara ringkas karakteristik *self-starting* pada semua variasi ditunjukkan pada Gambar 6. Terlihat bahwa konfigurasi A1, A2, dan A3 memenuhi kriteria *self-starting* yang ditentukan sehingga menjadi kandidat konfigurasi yang sesuai. Dengan mengorelasikan karakteristik koefisien daya dan *self-starting*, maka konfigurasi A3 dapat dipertimbangkan untuk analisis selanjutnya.

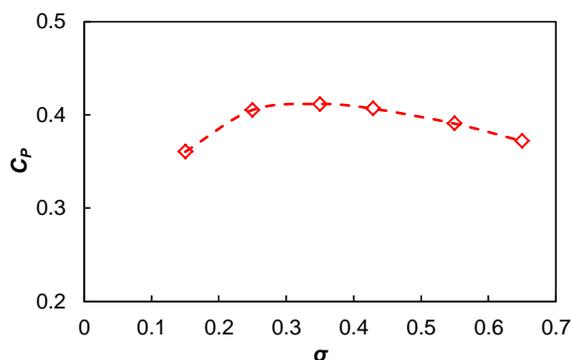
Pengaruh *Solidity* Karena Panjang *Chord* Foil

Parameter berikutnya yang ditinjau adalah *solidity*. Parameter ini utamanya dipengaruhi oleh jumlah sudu, panjang *chord* foil, dan jari-jari turbin. Pada kasus ini dipilih pengaruh *solidity* yang disebabkan oleh panjang *chord* foil sehingga luas sapuan turbin dapat dijaga tetap. Nilai tinggi turbin optimal dari skenario sebelumnya dicapai pada $H = 3.1344$ m dan nilai ini kemudian diterapkan pada semua variasi SK2-a. Hasil simulasi pengaruh *solidity* akibat perubahan panjang *chord* ditunjukkan pada Gambar 7. Terlihat bahwa C_p tertinggi dicapai pada nilai *solidity* optimal yaitu pada variasi B3. Variasi Basis sebenarnya memiliki C_p yang cukup besar pula namun variasi ini memiliki kelemahan pada rentang kinerja TSR yang sempit. Skenario SK2-a ini memberikan

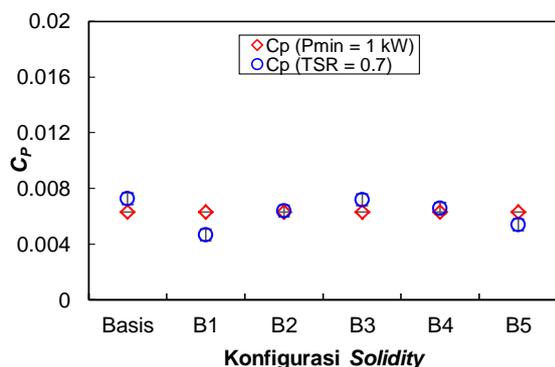
peningkatan C_{Pmax} terpilih menjadi 0.412 dibandingkan C_{Pmax} Basis sebesar 0.407 yang diperoleh pada SK1.



Gambar 7. Grafik koefisien daya pada semua konfigurasi SK2-a



Gambar 8. Grafik koefisien daya maksimum terhadap *solidity*



Gambar 9. Grafik koefisien daya pada semua konfigurasi SK2-a

Variasi *solidity* karena efek panjang *chord* foil yang berbeda-beda dapat menggambarkan rentang *solidity* yang optimal dalam mendesain suatu turbin. Hal ini lebih jelasnya terlihat pada kurva hubungan antara C_p dan *solidity* yang ditunjukkan Gambar 8. Terlihat bahwa pada $\sigma = 0.15$, nilai C_p meningkat hingga mencapai nilai terbesar pada $\sigma = 0.35$

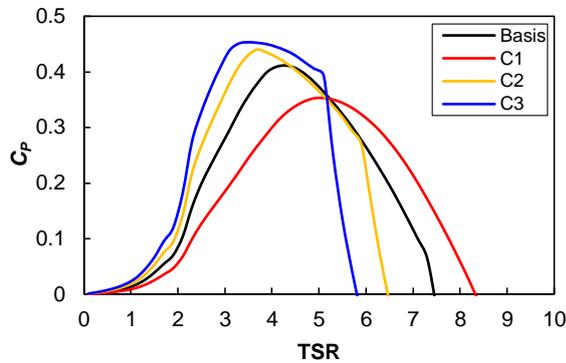
kemudian menurun seiring bertambahnya *solidity*. Hal ini dapat diartikan bahwa desain *solidity* optimal untuk turbin antara 0.25 – 0.45. Beberapa penelitian lain pada kasus turbin VAT sudu lurus menunjukkan desain *solidity* optimum terjadi pada kisaran $0.2 < \sigma < 0.6$ (Ahmadi-Baloutaki *et al.*, 2014). Bahkan *solidity* optimal dengan batas $0.2 < \sigma < 0.8$ dicapai pada nilai $\sigma = 0.6$ (Sagharichi *et al.*, 2018). Hal ini dapat dijadikan referensi untuk digunakan sebagai batas atas *solidity* optimal untuk mendesain turbin, khususnya turbin *V-shaped blade*.

Selanjutnya, untuk karakteristik *self-starting* ditentukan dengan cara yang sama dengan sub-bab sebelumnya dimana jika C_p pada $TSR = 0.7$ lebih besar dibandingkan C_p yang menghasilkan daya 1 kW, maka konfigurasi desain dianggap layak. Secara ringkas karakteristik *self-starting* pada semua variasi ditunjukkan pada Gambar 9. Terlihat bahwa konfigurasi Basis, B3, dan B4 memenuhi kriteria *self-starting* yang ditentukan sehingga menjadi kandidat konfigurasi yang dapat diterapkan. Dengan mengorelasikan karakteristik koefisien daya dan *self-starting*, maka konfigurasi B3 yang memiliki panjang *chord* foil sebesar 0.2134 m merupakan konfigurasi yang dipilih sebagai langkah optimasi pada analisis selanjutnya.

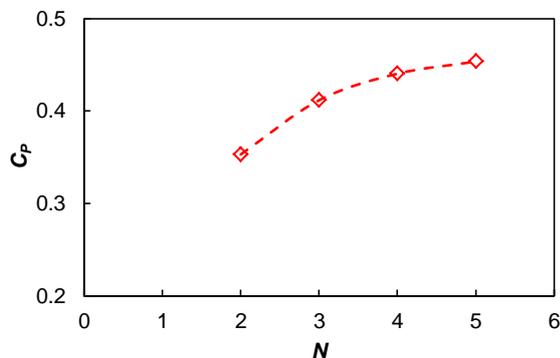
Pengaruh *Solidity* Karena Jumlah Sudu

Jumlah sudu juga merupakan faktor penting lainnya untuk menentukan nilai *solidity*. Pada analisis ini dilakukan evaluasi pada SK2-b dengan variasi jumlah sudu sebanyak 2, 3, 4, dan 5. Variabel yang telah dioptimasi sebelumnya berupa tinggi turbin sebesar 3.1344 m dan panjang *chord foil* sebesar 0.2134 m diterapkan pada semua konfigurasi. Adapun hasilnya ditunjukkan pada Gambar 10. Terlihat bahwa nilai C_p semakin meningkat seiring bertambahnya jumlah sudu. Selain itu, penambahan sudu menyebabkan kinerja turbin bergeser ke nilai TSR yang lebih rendah dimana hal ini sinkron dengan penelitian-penelitian terdahulu seperti dari Delafin *et al* (2016) dan Li *et al* (2016). Nilai C_{Pmax} pada sudu 2, 3, 4, dan 5 berturut-turut adalah 0.353, 0.412, 0.441, dan 0.453 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Pada konfigurasi C2 dengan $N = 4$, terlihat memiliki peningkatan C_p yang signifikan terhadap

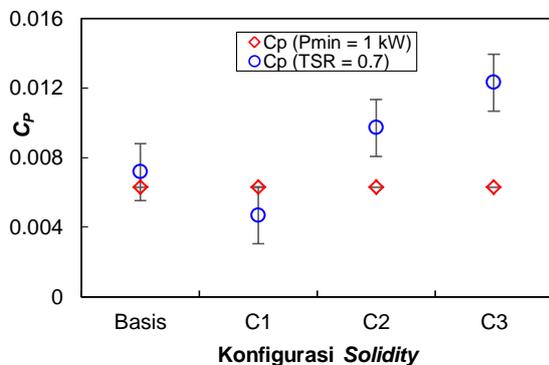
konfigurasi basisnya dan memiliki rentang TSR yang masih cukup lebar. Bahkan terlihat bahwa konfigurasi C2 ini juga memiliki selisih C_p yang kecil dibandingkan konfigurasi C3 dengan $N = 5$. Artinya, konfigurasi C2 menunjukkan hasil desain yang paling optimal dibandingkan konfigurasi lain.



Gambar 10. Grafik koefisien daya pada semua konfigurasi SK2-b



Gambar 11. Grafik koefisien daya maksimum terhadap jumlah sudu



Gambar 12. Grafik koefisien daya pada semua konfigurasi SK2-b

Penggunaan empat sudu tentu meningkatkan nilai *solidity* pada turbin. Nilai *solidity* akhir yang dihitung pada optimasi desain ini adalah

sebesar 0.47 yang masih dalam rentang *solidity* optimum untuk desain turbin. Selain itu, penelitian dari Sagharichi *et al* (2018) dan Madi *et al* (2021) menunjukkan bahwa turbin dengan empat sudu mampu menghasilkan performa terbaik. Penambahan jumlah sudu ini tentu akan meningkatkan torsi dari turbin sehingga putaran turbin menjadi lebih halus (Fedak *et al.*, 2017). Dari aspek *self-starting* yang ditunjukkan pada Gambar 12 menjelaskan bahwa konfigurasi C2 juga memenuhi syarat nilai C_p pada $TSR = 0.7$ lebih besar dibandingkan C_p yang menghasilkan daya 1 kW. Oleh karena itu, konfigurasi ini merupakan desain optimasi akhir untuk meningkatkan performa turbin *V-shaped blade* yang ditinjau berdasarkan koefisien daya atau efisiensi dan kemampuan *self-starting*.

KESIMPULAN

Telah dilakukan optimasi pada turbin *V-shaped blade* dengan mempertimbangkan *blade aspect ratio* dan *solidity* untuk meningkatkan performanya dari segi nilai koefisien daya dan kemampuan *self-starting*. Turbin yang memiliki konfigurasi optimal dihasilkan pada parameter *blade aspect ratio* dengan nilai $\psi = 12$. Sedangkan untuk parameter *solidity* dicapai pada $\sigma = 0.35$ ketika hanya mempertimbangkan panjang *chord foil* dan dicapai pada $\sigma = 0.47$ ketika mempertimbangkan jumlah sudu empat. Dimensi akhir dari turbin *V-shaped blade* setelah dioptimasi adalah memiliki tinggi sebesar 3.1344 m, jari-jari sebesar 1.8288 m, panjang *chord foil* 0.2134 m, dan jumlah sudu sebanyak empat buah. Konfigurasi ini mampu mencapai koefisien daya maksimum sebesar 0.441 dan karakteristik *self-starting* pada nilai TSR minimum sebesar 0.7. Dengan adanya optimasi ini, maka selanjutnya dapat digunakan sebagai *preliminary study* untuk tinjauan hasil secara eksperimental.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama sebagai *corresponding author* menyampaikan banyak terimakasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan dukungan finansial dan *sponsorship* yang berarti sehingga penelitian ini terlaksana sesuai yang diharapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi-Baloutaki, M., Carriveau, R., Ting, D.S.K., 2014. Straight-bladed vertical axis wind turbine rotor design guide based on aerodynamic performance and loading analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy* 228, 742–759.
- Anjum, Z., Najmi, L.A., Fahad, A., Ashraf, R., Ehsan, S., Aslam, W., 2016. Common Vertical Axis Savonius-Darrieus Wind Turbines for Low Wind Speed Highway Applications. *Tech. Journal* 21, 85–90.
- Armstrong, S., Fiedler, A., Tullis, S., 2012. Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences. *Renewable Energy* 41, 13–22.
- Batista, N., Melicio, R., Mendes, V., 2018. Darrieus-type vertical axis rotary-wings with a new design approach grounded in double-multiple streamtube performance prediction model. *AIMS Energy* 6, 673–694.
- Bos, R., 2012. Self-Starting of a Small Urban Darrieus Rotor Strategies to Boost Performance in Low Reynolds Number Flows. *Master Thesis*. Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- 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. *Adv. Mech. Eng.* 10, 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.
- Delafin, P.L., Nishino, T., Wang, L., Kolios, A., 2016. Effect of the number of blades and solidity on the performance of a vertical axis wind turbine. *J. Phys. Conf. Ser.* 753.
- Enawi, H.H., Kadhun, H.H., Al-Anbary, K.M., 2021. The Effects of Blades Number , Blade Thickness , Blade Tip Angle , and Twist Angle on the Performance of the Rotor Wind Turbines. *J. Univ. Babylon Eng. Sci.* 29, 1–17.
- Fedak, W., Anweiler, S., Gancarski, W., Ulbrich, R., 2017. Determination of the number of Vertical Axis Wind Turbine blades based on power spectrum. *E3S Web Conf.* 19.
- Gorban, A.N., Gorlov, A.M., Silantyev, V.M., 2001. Limits of the turbine efficiency for free fluid flow. *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME* 123, 311–317.
- Handoko, R., Hadi, S., Danardono, Ubaidillah, Arifin, Z., 2021. Parameters of Savonius Type Hydrokinetic Turbine to Enhance Efficiency. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1096, 012039.
- Islam, M., Ting, D.S.K., Fartaj, A., 2008. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12, 1087–1109.
- Islam, M.R., Bin Bashar, L., Rafi, N.S., 2019. Design and Simulation of A Small Wind Turbine Blade with Qblade and Validation with MATLAB. 2019 4th Int. Conf. Electr. Inf. Commun. Technol. *EICT 2019* 3, 20–22.
- Janon, A., 2020. Torque coefficient analysis of a novel direct-drive parallel-stream counter-rotating darrieus turbine system. *Renew. Energy* 147, 110–117.
- Johari, H., Henoeh, C., Custodio, D., Levshin, A., 2007. Effects of leading-edge protuberances on airfoil performance. *AIAA J.* 45, 2634–2642.
- Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E., 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Appl. Energy* 86, 1823–1835.
- Kirke, B.K., 1998. Evaluation of Self-Starting Vertical Axis Wind Turbines for Stand-Alone Applications. *Thesis*. School of Engineering, Griffith University, Nathan, QLD, Australia.
- Kumar, P.M., Sivalingam, K., Narasimalu, S., Lim, T.-C., Ramakrishna, S., Wei, H., 2019. A Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Small Wind Turbines. *J. Power Energy Eng.* 7, 27–44.
- Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Shimizu, K., Ogasawara, T., Nakai, A., Kasuya, T., 2016. Effect of solidity on aerodynamic forces around straight-bladed vertical axis wind turbine by wind

- tunnel experiments (depending on number of blades). *Renew. Energy* 96, 928–939.
- Madi., Rahmawati, S., Mukhtasor., Satrio, D., Yasim, A., 2021. Variation Number of Blades for Performance Enhancement for Vertical Axis Current Turbine in Low Water Velocity in Indonesia, in: *Proceedings of the 7th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management. SCITEPRESS - Science and Technology Publications*, pp. 47–53.
- Madi, M., Tuswan, T., Arirohman, I.D., Ismail, A., 2021. Comparative Analysis of Taper and Taperless Blade Design for Ocean Wind Turbines in Ciheras Coastline, West Java. *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.* 18, 8–17.
- Mahmuddin, F., 2017. Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory. *Energy Procedia* 105, 1123–1129.
- Mahmuddin, F., Klara, S., Sitepu, H., Hariyanto, S., 2017. Airfoil Lift and Drag Extrapolation with Viterna and Montgomerie Methods. *Energy Procedia* 105, 811–816.
- Mereu, R., Federici, D., Ferrari, G., Schito, P., Inzoli, F., 2017. Parametric numerical study of Savonius wind turbine interaction in a linear array. *Renew. Energy* 113, 1320–1332.
- 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. *Renew. Energy* 162, 1087–1103.
- Mukhtasor., Junianto, S., Prastianto, R.W., 2018. On Offshore Engineering Rules for Designing Floating Structure of Tidal Current Energy Conversion System. *Appl. Mech. Mater.* 874, 71–77.
- Paraschivoiu, I., Trifu, O., Saeed, F., 2009. H-Darrieus wind turbine with blade pitch control. *Int. J. Rotating Mach.* 2009.
- Pope, K., Naterer, G.F., Dincer, I., Tsang, E., 2011. Power correlation for vertical axis wind turbines with varying geometries. *Int. J. Energy Res.* 35, 423–435.
- Pujol, T., Massaguer, A., Massaguer, E., Montoro, L., Comamala, M., 2018. Net power coefficient of vertical and horizontal wind turbines with crossflow runners. *Energies* 11, 1–24.
- Rawlings, G.W., 2008. Parametric Characterization of an Experimental Vertical Axis Hydro Turbine. *Thesis.* Faculty of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Sagharichi, A., Zamani, M., Ghasemi, A., 2018. Effect of solidity on the performance of variable-pitch vertical axis wind turbine. *Energy* 161, 753–775.
- Satrio, D., Utama, I.K.A.P., Mukhtasor, 2018. Numerical Investigation of Contra Rotating Vertical-Axis Tidal-Current Turbine. *J. Mar. Sci. Appl.* 17, 208–215.
- 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. *Appl. Energy* 260, 114326.
- Tafrant, D., Hendradinata, 2019. Pengaruh Sudut Kemiringan Sudu Terhadap Kinerja Turbin Achard Yang Digabung Dengan Deflektor 30°. *J. PETRA* 6, 33–38.
- Utama, I.K.A.P., Satrio, D., Mukhtasor, M., Atlar, M., Shi, W., Hantoro, R., Thomas, G., 2020. Numerical simulation of foil with leading-edge tubercle for vertical-axis tidal-current turbine. *J. Mech. Eng. Sci.* 14, 6982–6992.
- Zanette, J., Imbault, D., Tourabi, A., 2010. A design methodology for cross flow water turbines. *Renew. Energy* 35, 997–1009.

