

ANALISIS TURBIN DARRIEUS TIPE *V-SHAPED BLADE* UNTUK APLIKASI KONVERTER ENERGI ARUS LAUT MENGGUNAKAN *SOFTWARE QBLADE*

ANALYSIS OF V-SHAPED BLADE TYPE DARRIEUS TURBINE FOR MARINE CURRENT ENERGY CONVERTER APPLICATION USING QBLADE SOFTWARE

Rizki Mendung Ariefianto, Rini Nur Hasanah, & Wijono

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang
Jl. Veteran, Ketawanggede, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia

e-mail : rizkimsahab19@gmail.com

Diterima tanggal: 3 Februari 2022; diterima setelah perbaikan: 12 Juli 2022 ; Disetujui tanggal: 15 Juli 2022

ABSTRAK

Turbin tipe Darrieus merupakan salah satu jenis turbin sumbu vertikal yang memiliki prospek menjanjikan dalam pengembangan turbin hidrokinetik, salah satunya dalam aplikasi untuk pembangkit arus laut. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performa turbin Darrieus yang pada umumnya memiliki performa efisiensi dan *self-starting* lebih rendah dibandingkan jenis turbin sumbu horisontal. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi performa turbin Darrieus yang ditinjau dari aspek efisiensi dan kemampuan *self-starting*. Skenario pengujian berupa penerapan bentuk *foil* dan *blade swept angle* (γ) pada desain turbin dipertimbangkan dalam penelitian ini. Pada evaluasi pengaruh bentuk *foil*, diterapkan *foil* NACA 63₄021 sebagai *foil* utama kemudian dibandingkan dengan *foil* lain seperti NACA 0018. Sedangkan evaluasi pengaruh *blade swept angle*, dipertimbangkan nilai $\gamma = 30^\circ$ agar menghasilkan turbin dengan bentuk *V-shaped blade* yang kemudian dibandingkan dengan turbin *Straight blade* dengan $\gamma = 0^\circ$. *Software* QBlade digunakan untuk mensimulasikan turbin *V-shaped blade* selama kondisi kerja. Hasil simulasi menunjukkan bahwa turbin *V-shaped blade* yang berbasis *foil* NACA 63₄021 mampu mencapai efisiensi terbesar yaitu 0,425 dan memiliki *self-starting* yang baik pada *cut-in speed* arus laut sebesar 1,765 m/s. Selain itu, turbin ini juga mampu menghasilkan daya sebesar 27,64 kW pada kecepatan ratingnya dengan rata-rata peningkatan daya tiap 1 m/s arus laut sebesar 2,51 kW.

Kata kunci: Turbin *V-shaped blade*, *foil* NACA 63₄021, *blade swept angle*, efisiensi, *self-starting*.

ABSTRACT

The Darrieus type turbine is a vertical axis turbine with promising prospects in developing hydrokinetic turbines, one of which is in the application of ocean currents converter. Various studies have been conducted to improve the performance of the Darrieus turbine, which generally has lower efficiency and self-starting performance than the horizontal axis turbine type. The purpose of this study was to evaluate the ability of the Darrieus turbine in terms of efficiency and self-starting capability. The test scenario in the form of applying the foil shape and blade swept angle (γ) to the turbine design is considered in this study. In evaluating the effect of foil shape, NACA 634021 foil is applied as the main foil and then compared with other foils such as NACA 0018. While evaluating the effect of the swept angle blade, the value of $\gamma = 30^\circ$ is considered to produce a turbine with a V-shaped blade which is then compared with a Straight turbine blade with $\gamma = 0^\circ$. QBlade is used to simulate a V-shaped blade turbine during working conditions. The simulation results show that the V-shaped blade turbine based on NACA 634021 foil can achieve the highest CP of 0.425 and has good self-starting at an ocean current cut-in speed of 1.765 m/s. Also, this turbine can produce 27.64 kW of power at its rated speed with an average power increase of 2.51 kW per 1 m/s speed.

Keywords: V-shaped blade turbine, NACA 63₄021 foil, blade swept angle, efficiency, self-starting.

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, proporsi energi terbarukan di setiap negara semakin ditingkatkan sebagai langkah bertahap pengurangan energi fosil. Diperkirakan pemanfaatan energi terbarukan untuk menyuplai energi listrik meningkat hingga 85% di tahun 2050, dimana sumber energi kelautan seperti gelombang laut, pasang surut, arus laut, gradien salinitas, dan gradien termal turut mengambil bagian (Shadman *et al.*, 2019).

Dari sekian sumber energi tersebut, pasang surut dan arus laut merupakan sumber yang lebih siap dimanfaatkan mengingat teknologi turbin telah dikembangkan sejak berabad-abad silam. Kesiapan teknologi turbin tidak lepas dari pemanfaatan awalnya sebagai pengkonversi energi angin, sehingga sampai saat ini sudah menjadi teknologi yang matang. Tingkat kesiapan teknologi untuk turbin angin mencapai angka 9 yang diartikan bahwa teknologi tersebut sudah bersaing untuk komersialisasi (Mazur *et al.*, 2019).

Dari berbagai macam bentuk turbin yang dikembangkan untuk konverter energi pasang surut atau arus laut, *Vertical Axis Turbine* (VAT) lebih menarik diteliti lebih lanjut dibandingkan *Horizontal Axis Turbine* (HAT). Hal ini dikarenakan turbin sumbu vertikal menawarkan berbagai keunggulan seperti desain lebih sederhana, proses fabrikasi yang lebih mudah, dan biaya produksi yang rendah (Ahmad *et al.*, 2020). Selain itu dari sisi teknis, VAT mampu mengonversi kecepatan fluida dari segala arah tanpa mekanisme *yawing* (Cho *et al.*, 2018) dan mampu bekerja baik di lingkungan dengan turbulensi besar (Krishnaraj *et al.*, 2019). Sistem elektrik 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). Selain itu, 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 efisiensi konversinya yang lebih rendah dibandingkan HAT (Rishmany *et al.*, 2017).

Untuk mendapatkan efisiensi yang optimal pada VAT dapat dilakukan dengan berbagai cara seperti memodifikasi *foil*, bentuk rotor, dan bentuk sudunya

(Satrio *et al.*, 2018). Sudut turbin merupakan bagian krusial dari sebuah turbin sehingga pemilihan bentuk *foil* dan bentuk sudu yang digunakan sangat berpengaruh terhadap performa turbin. Dalam beberapa tahun terakhir, terdapat banyak metode yang dikembangkan untuk meningkatkan kinerja turbin berdasarkan analisis yang akurat dan optimalisasi desain sudu turbin (Alaskari *et al.*, 2019).

Pada penelitian ini, dilakukan analisis terhadap VAT dengan turbin yang dipilih adalah turbin tipe Darrieus. Tipe ini dipilih karena memiliki konstruksi yang sederhana dan mudah dalam perakitannya (Kumar *et al.*, 2019). Untuk peningkatan performa, maka turbin Darrieus ini perlu didesain dengan mempertimbangkan bentuk *foil* sudu, bentuk sudu, dan jumlah sudu yang digunakan.

Penelitian tentang pengaruh bentuk *foil* sudu turbin telah banyak dilakukan. Pada umumnya jenis *foil* yang banyak diterapkan adalah *foil* NACA yang mulai dikembangkan oleh *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) dari Amerika Serikat pada tahun 1920. Selain diterapkan untuk pengembangan profil sayap pesawat, *foil* NACA juga banyak dikembangkan untuk sudu turbin. Hal ini dikarenakan *foil* ini memiliki kelebihan pada nilai koefisien *lift* tinggi dan koefisien *drag* yang rendah (Ma *et al.*, 2019). *Foil* ini juga mudah dimodifikasi karena memiliki persamaan koordinat matematis yang mudah ditemukan.

Penerapan *foil* NACA pada pengembangan turbin dilakukan oleh Mohamed (2012). Pada penelitian ini, *foil* simetris dan asimetris dari NACA tipe 63XXX dan NACA 00XX dibandingkan dengan *foil* lain seperti *foil* tipe A, tipe FX, dan tipe S. Hasilnya, *foil* simetris menghasilkan efisiensi tertinggi pada setiap tipe. *Foil* simetris lebih dipertimbangkan daripada *foil* asimetris karena memiliki rentang operasi rasio kecepatan (*Speed Ratio*) yang lebih lebar sehingga dapat menunda fenomena *stall* yang berupa turunnya efisiensi akibat perubahan kecepatan *fluida* dan memiliki performa yang lebih baik (Mohamed, 2012). Selain itu *foil* simetris dapat mengurangi terjadinya torsi negatif pada saat putaran pertama turbin (Wardhana & Fridayana, 2018). Khusus untuk tipe *foil* NACA 00XX yang merupakan *foil* umum digunakan pada turbin Darrieus, efisiensi terbesar dicapai pada *foil* NACA 0018 sebesar 0,2964. Studi perbandingan *foil* NACA juga dilakukan oleh Wang *et al.* (2018) yang menekankan pada modifikasi ketebalan maksimum, posisi ketebalan maksimum, *camber* maksimum, dan posisi *camber* maksimum. *Foil* NACA yang diteliti adalah *foil* NACA

4 dan 6 digit. Hasilnya, diperoleh koefisien daya berkisar antara 0,35 - 0,4.

Terdapat *foil* lain yang menarik dikembangkan yaitu tipe NACA 63₄021, yang merupakan *foil* simetris dengan rasio ketebalan maksimum terhadap *chord* sebesar 21% pada 40% panjang *chord* (Johari, 2011). *Foil* ini dikembangkan karena terinspirasi dari ikan paus bungkuk (*humpback whale*) yang memiliki sirip dengan kemampuan manuver yang baik dalam menangkap mangsa dengan cepat meskipun ukuran tubuhnya besar dan kaku (Cai *et al.*, 2015). Penelitian terhadap bentuk *foil* NACA 63₄021 yang diaplikasikan pada turbin sumbu vertikal baik secara simulasi maupun eksperimen telah sukses dilakukan. Hasilnya, turbin Darrieus yang menerapkan *foil* NACA 63₄021 mampu mencapai efisiensi sebesar 0,285 (Marsh *et al.*, 2017) dan 0,322 (Yasim *et al.*, 2021) melalui studi numerik serta 0,305 (Rawlings, 2008) melalui studi eksperimen. Oleh karena itu, *foil* ini lebih dipertimbangkan dalam penelitian ini.

Pada umumnya turbin Darrieus identik dengan bentuk sudu lurus (*straight blade*). Namun, terdapat penelitian menarik dari Zanette *et al.* (2010) yang meneliti turbin *trapezoidal blade* berbasis NACA 0018. Turbin ini memodifikasi turbin *Achard-Maitre 3* sudu dengan menambahkan sudut sapuan sudu sebesar 30°. Hasilnya koefisien daya sebesar 0,32 dapat dicapai. Turbin yang diteliti tersebut dapat dikatakan sebagai turbin *V-shaped blade* karena memiliki bentuk sudu menyerupai huruf "V". Selain itu, turbin serupa namun dengan distribusi panjang *chord* yang sama sepanjang sudu, diteliti oleh Su *et al.* (2020). Efisiensi 0,375 dicapai dengan parameter umum berupa penggunaan *foil* NACA 0021, jumlah sudu 3, kedalaman bentuk "V" optimum sebesar 0,6 kali panjang *chord*.

Desain turbin Darrieus sendiri tidak lepas dari faktor *solidity* turbin (σ) yang dipengaruhi oleh jumlah sudu yang digunakan, panjang *chord foil*, dan jari-jari turbin. Sagharichi *et al* (2018) meneliti turbin Darrieus dengan *fixed pitch* pada *solidity* antara 0,2 - 0,8 dan jumlah sudu 2, 3, dan 4. Hasilnya, koefisien daya terbesar dicapai pada *solidity* 0,6 dan jumlah sudu 4. Penelitian dengan perbandingan jumlah sudu yang sama juga dilakukan oleh Madi *et al* (2021) dengan koefisien daya terbaik juga dicapai pada jumlah sudu 4. Semakin besar *solidity* maka koefisien daya semakin bergeser ke nilai *tip speed ratio* (TSR) yang lebih rendah (Delafin *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2016). Untuk kasus turbin arus laut yang sering bekerja pada TSR rendah, meningkatkan *solidity* dengan menjadikan turbin

memiliki empat sudu dapat menjadi solusi.

Studi ini bertujuan untuk meneliti efisiensi dan *self-starting* turbin Darrieus empat sudu yang tersusun dari *foil* NACA 63₄021 dengan bentuk *V-shaped blade*. Turbin ini juga dibandingkan dengan turbin *straight blade* baik pada jenis *foil* sama maupun jenis *foil* yang berbeda. Analisis dilakukan menggunakan *software* QBlade yang berbasis teori *blade element momentum* (BEM) dan *double multiple streamtube* (DMS) untuk mensimulasikan turbin dan meningkatkan kinerjanya (Mahmuddin, 2017). QBlade yang merupakan simulator *open access* yang dapat diakses di alamat www.q-blade.org, memiliki berbagai fitur untuk desain, simulasi, optimasi, dan validasi turbin (Raut *et al.*, 2017; 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.

BAHAN DAN METODE

Pemodelan VAT Berbasis BEM dan DMS

Dalam pemodelan turbin terdapat empat metode yang digunakan meliputi model *blade element method* (BEM), model *vortex*, model *cascade*, dan model *computational fluid dynamic* (CFD). Setiap model tersebut masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 (Tchakoua *et al.*, 2015). Dari keempat model tersebut, mengingat penelitian ini pada tahap *preliminary* untuk mendapatkan gambaran umum turbin yang didesain, maka dipilihlah metode BEM yang salah satunya terdapat pada *software* QBlade. Kemudahan, kecepatan komputasi, dan akurasi yang baik terhadap hasil eksperimen merupakan aspek yang sangat dipertimbangkan pada *software* ini (Kulkarni *et al.*, 2017; Yirtici *et al.*, 2019).

Sesuai tujuan penelitian ini bahwa performa efisiensi turbin Darrieus empat sudu dengan bentuk *V-shaped blade* diinvestigasi lebih lanjut menggunakan *software* QBlade yang berbasis *blade element momentum* (BEM). Secara umum *software* QBlade memiliki langkah-langkah simulasi yaitu:

1. Menginputkan profil *foil* dan menganalisisnya menggunakan *XFOil direct analysis*
2. Mengekstrapolasi koefisien lift (CL) dan koefisien drag (CD) pada AoA 360°
3. Mendesain sudu turbin dan optimasi sudu
4. Mensimulasikan rotor turbin dengan DMS
5. Mensimulasikan produksi daya turbin

Tabel 1. Kelebihan empat metode pemodelan VAT
Table 1. The merit of four VAT modelings

Model	Kelebihan
BEM	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat memprediksi kinerja keseluruhan turbin dengan beban ringan • Prediksi komputasi sangat cepat • Tingkat akurasi relatif tinggi • Dapat memberikan korelasi yang baik antara prediksi kinerja dan data eksperimen
Vortex	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat mengatasi efek stall dinamis, sirkulasi pitching, dan efek massa tambah • Mampu memberikan informasi tentang struktur <i>wake</i> di dekat turbin karena kecepatan normal aliran udara diabaikan • Kemampuan prediksi presisi tinggi • Dapat digunakan untuk rotor dengan beban tinggi pada TSR besar • Mampu mengatasi gangguan terhadap kecepatan aliran
Cascade	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat memprediksi turbin soliditas rendah dan tinggi dengan cukup baik • Komputasi yang sangat presisi tanpa konvergensi berulang • Stall dinamis dan kelengkungan aliran dapat dipertimbangkan • Mencapai konvergensi dan akurasi yang mulus bahkan pada rasio kecepatan ujung tinggi dan VAWT soliditas tinggi dengan akurasi yang cukup masuk akal
CFD	<ul style="list-style-type: none"> • Akurasi prediksi aerodinamis sangat baik • Dapat memvisualisasikan aliran dekat <i>foil</i> • Dapat mempercepat proses desain • Mengatasi stall dinamis dan <i>wake flow</i>

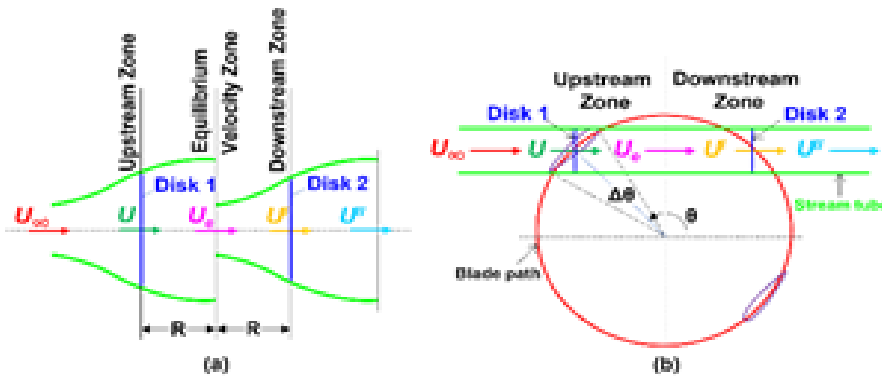
Secara detail, teori ini menggabungkan antara teori momentum dengan teori elemen bilah *blade element theory* (BET) (Zhang *et al.*, 2019). Pada teori momentum, kecepatan angin relatif dapat dihitung sehingga memungkinkan perhitungan angle of attack (AoA), koefisien *lift*, dan koefisien *drag* dari suatu profil sehingga dapat diperoleh gaya dorong dan torsi dari sebuah elemen. Sedangkan pada teori BET, sudu akan didiskritisasi menjadi sejumlah elemen terbatas di sepanjang bentangnya dan solusi 2-D pada setiap

bagian digunakan untuk memperkirakan medan aliran 3-D sehingga pembebanan sudu dapat diprediksi (Yirtici *et al.*, 2019). Pengaruh faktor induksi aksial dan tangensial terhadap gaya kerja pada turbin juga diperhitungkan dalam teori ini.

BEM dapat dibagi lagi menjadi model *single streamtube* (SS), *multiple streamtube* (MS), dan *double multiple streamtube* (DMS), dimana metode terakhir dipertimbangkan dalam penelitian ini. Pada

Tabel 1. Kelebihan empat metode pemodelan VAT
Table 1. The merit of four VAT modelings

Model	Kelemahan
BEM	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak valid untuk rasio TSR dan <i>solidity</i> rotor yang tinggi. • Tidak memberikan informasi mengenai bentuk turbin secara detail • Pengaruh gangguan tegak lurus hanya dapat ditambahkan sebagai koreksi • Tidak dapat memprediksi variasi kecepatan fluida di seluruh rotor • Beberapa masalah konvergensi
Vortex	<ul style="list-style-type: none"> • Komputasi yang mahal • Sangat bergantung pada penyederhanaan • Adanya masalah konvergensi pada beberapa kasus • Akurasi komputasi sangat bergantung pada model potensi aliran yang digunakan
Cascade	<ul style="list-style-type: none"> • Waktu simulasi yang panjang
CFD	<ul style="list-style-type: none"> • Komputasi intensif • Pada dasarnya menghalangi untuk analisis rekayasa rutin pada turbin



Gambar 1. (a) Skema 2 aktuator disk (b) model DMS.
 Figure 1. (a) Two disc actuator scheme (b) DMS model.

metode DMS daerah rotor dibagi menjadi dua wilayah yaitu hulu dan hilir dimana fluida mengalir melalui dua model piringan aktuator dalam sebuah tabung (Batista *et al.*, 2018) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Setiap tabung teori momentum digunakan untuk menghubungkan kecepatan hulu (*upstream*) dan hilir (*downstream*) rotor dengan mendefinisikan faktor induksi aksial. Untuk hulu ($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$) dan hilir ($\pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2$), kecepatan hulu induksi (U), kecepatan kesetimbangan (U_e), dan kecepatan induksi hilir (U'), akan berbeda dari kecepatan aliran bebas (U_∞) (Paraschivoiu *et al.*, 2009) yang dirumuskan oleh:

$$U = aU_\infty \dots\dots\dots 1)$$

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

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

dimana, a dan a' masing-masing adalah faktor induksi aksial di daerah hulu dan hilir dengan $a' < a$. Selanjutnya, dengan meninjau bagian hulu rotor maka diperoleh kecepatan aliran relatif (W) yaitu:

$$W = U_\infty \sqrt{1 + 2\lambda \cos \theta + \lambda^2} \dots\dots\dots 4)$$

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

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

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

Dari bentuk geometri, besar *angle of attack* (α) sangat bergantung pada sudut azimut sudu (θ) dan *tip speed ratio* sebagai berikut:

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

Nilai α merupakan variabel yang berubah terhadap waktu sejak $\theta = \omega t$. Dengan mempertimbangkan gaya normal (F_n) dan gaya tangensial (F_t) yang melibatkan koefisien *lift* (C_L), koefisien *drag* (C_D), dan AoA, maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$F_n = \frac{1}{2} \rho N c H W^2 [C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha] \dots\dots\dots 7)$$

$$F_t = \frac{1}{2} \rho N c H W^2 [C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha] \dots\dots\dots 8)$$

dimana ρ adalah massa jenis air laut (kg/m³), N adalah jumlah sudu, c adalah panjang *chord* sudu (m), dan H adalah tinggi turbin (m). Sedangkan, persamaan C_L dan C_D dirumuskan dengan:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \dots\dots\dots 9)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \dots\dots\dots 10)$$

Variabel L merupakan gaya *lift* (N), D merupakan gaya *drag* (N), dan A merupakan luas area sapuan rotor (m²).

Selanjutnya, untuk mendapatkan gaya rata-rata tangensial (F_{ta}) di sekitar rotor dan sudut azimut, maka digunakan rumus:

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \dots\dots\dots 11)$$

sehingga diperoleh torsi keseluruhan (Q_t) dan daya keseluruhan (P_t) yaitu:

$$Q_t = F_{ta} R \dots\dots\dots 12)$$

$$P_t = Q_t \omega \dots\dots\dots 13)$$

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

$$C_P = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^2} \dots\dots\dots 14)$$

$$C_Q = \frac{Q_t}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^2 R} \dots\dots\dots 15)$$

Parameter lain untuk mengekspresikan VAT adalah *solidity* yang dirumuskan oleh persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{Nc}{R} \dots\dots\dots 16)$$

Material dan Simulasi

Penelitian ini mensimulasikan dua skenario yang terbagi menjadi empat pemodelan bilah turbin dengan penekanan pada penerapan bentuk turbin dan *foil* seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.

Skenario pertama ditekankan pada penggunaan *foil* yang diterapkan pada turbin *V-shaped blade* dengan *blade sweep angle* 30° . Sudut tersebut dipilih karena menghasilkan performa yang optimal pada turbin seperti pada penelitian Mosbahi *et al* (2020). Sudut ini juga digunakan pada penelitian Zanette *et al* (2020). Sedangkan skenario kedua ditekankan pada penggunaan *foil* yang diterapkan pada turbin Darrieus konvensional dengan *Straight blade* yang memiliki *blade sweep angle* 0° . Untuk *foil* utama yang digunakan adalah tipe NACA 634021. *Foil* ini memiliki koordinat yang diinputkan pada QBlade dalam bentuk file

Tabel 3. Skenario simulasi variasi turbin
Table 3. Turbine variation simulation scenario

Skenario	Turbin	Foil NACA	γ	Bentuk Sudut
1	A	63 ₄ 021	30°	<i>V-shaped</i>
	B	0018	30°	<i>V-shaped</i>
2	C	63 ₄ 021	0°	<i>Straight</i>
	D	0018	0°	<i>Straight</i>

berekstensi .dat sehingga terbentuk profil *foil* seperti pada Gambar 2. Untuk menganalisis pengaruh *foil* pada bentuk yang diujikan, maka dilakukan perbandingan terhadap bentuk *foil* lainnya. Pada penelitian ini dipilih NACA 0018 yang merupakan *foil* dasar turbin pada penelitian Zanette *et al* (2010).

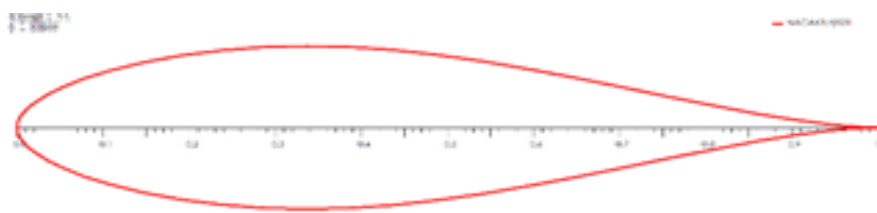
Selanjutnya, *foil* yang digunakan perlu untuk diteliti terlebih dahulu terkait performa rasio koefisien *lift* dan koefisien *drag* (CL/CD). Analisis ini dilakukan menggunakan kode *XFOil direct analysis* pada *software* QBlade. Kode ini secara umum yang digunakan secara luas dan mampu memprediksi performa *foil* dengan hasil yang akurat (Zhang *et al.*, 2019). *Foil* disimulasikan pada rentang sudut serang (*angle of attack*) antara 0° hingga 30° dan bilangan Reynolds mengacu pada persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{U_\infty c}{\nu} = \frac{\rho U_\infty c}{\mu} \dots\dots\dots 17)$$

dimana ν adalah viskositas kinematis air laut (m^2/s) dan μ adalah viskositas dinamis air laut (Ns/m^2).

Foil NACA 634021 divalidasi dengan penelitian sebelumnya untuk memastikan kesesuaian profil *foil* yang diujikan. Validasi ini dilakukan baik secara eksperimen maupun numerik pada bilangan Reynolds tertentu dengan skema yang ditunjukkan dalam Tabel 4.

Untuk dimensi turbin dasar yang digunakan mengacu pada penelitian Rawlings (2008) yang berbasis *foil* NACA 634021. Turbin ini lalu dimodifikasi jumlah

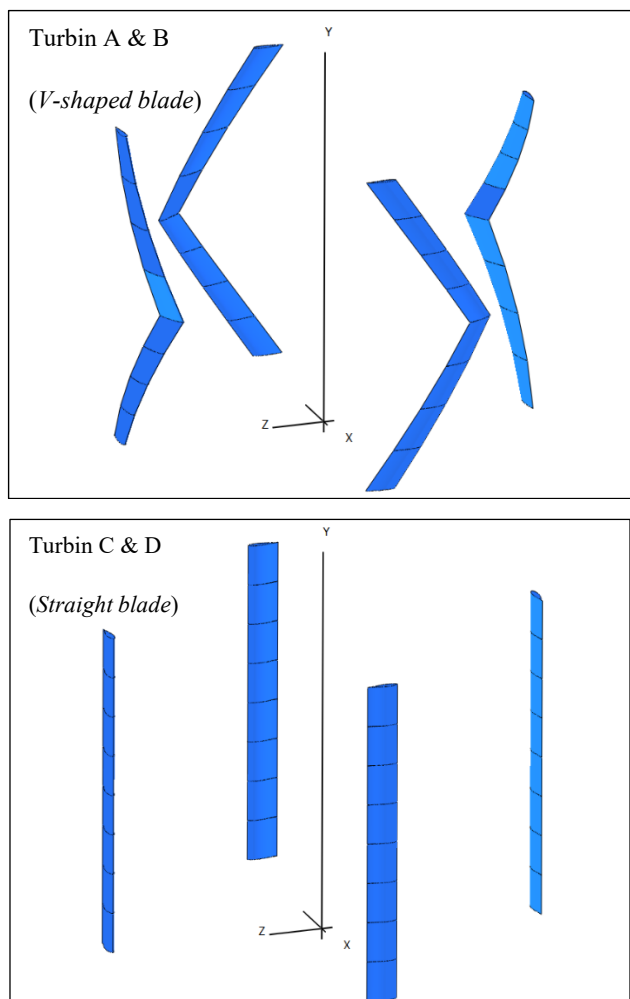


Gambar 2. Profil Foil NACA 634021.
Figure 2. The foil profile of NACA 634021.

Tabel 4. Skenario validasi foil NACA 634021
 Table 4. Validation scenario of NACA 634021 foil

Validasi Re	Referensi Validator
1	180000 Eksperimen (Dropkin <i>et al.</i> , 2012) Numerik (Dropkin <i>et al.</i> , 2012)
2	183000 Eksperimen (Johari <i>et al.</i> , 2007) Numerik (Satrio <i>et al.</i> , 2018) Numerik (Utama <i>et al.</i> , 2020)

dan bentuk sudunya serta diskala dengan *scale factor* sebesar 3 kali ukuran model dengan hasil yang ditunjukkan dalam Tabel 5. Turbin dipartisi menjadi delapan bagian untuk membentuk turbin yang diinginkan. Arah bentuk “V” pada turbin *V-shaped blade* sesuai dengan arah leading edge dari foil. Hasil desain turbin pada QBlade ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Hasil desain turbin pada QBlade.
 Figure 3. Turbine design results on QBlade.

Tabel 5. Spesifikasi umum turbin yang diteliti
 Table 5. General specifications of turbine under study

Variabel	Model	Prototipe
Jumlah sudu, N	4	4
Jari-jari turbin, R (m)	0,4572	1,3716
Tinggi turbin, H (m)	0,6858	2,0574
Panjang chord, c (m)	0,0653	0,1959
Solidity	0,57	0,57

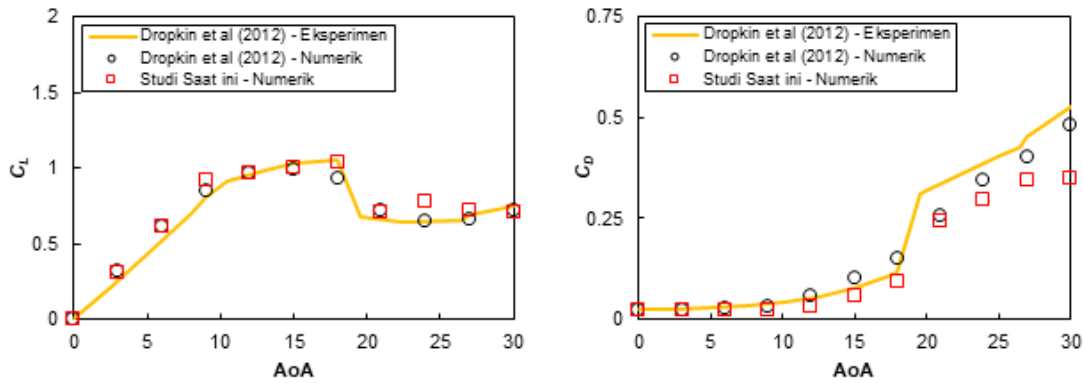
HASIL DAN PEMBAHASAN

Performa Rasio Koefisien Lift dan Drag

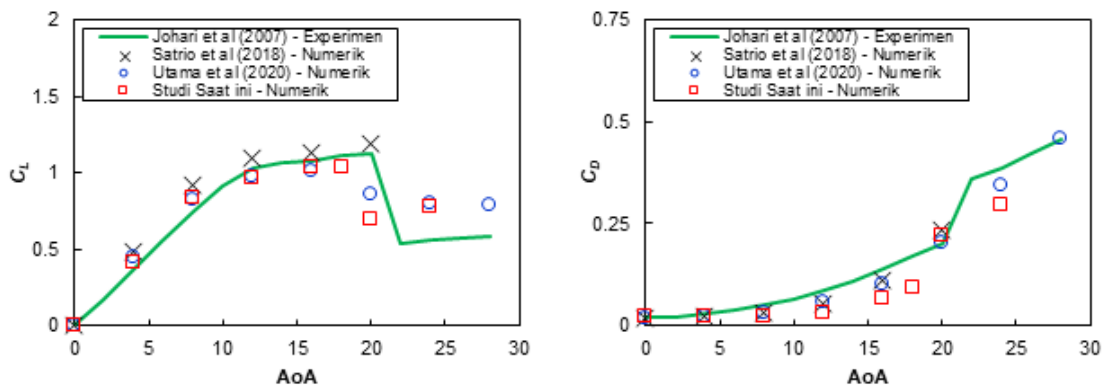
Pada bagian ini, terlebih dahulu dilakukan validasi karakteristik foil NACA 63₄021. Validasi mengacu pada hasil eksperimen oleh Dropkin *et al.* (2012) pada bilangan Reynolds yang sama yaitu 1.80×10^5 dan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, karakteristik foil NACA 63₄021 yang disimulasikan 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 ini 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 terhadap eksperimen ini memang cukup jauh tetapi masih dalam tren peningkatan yang sama. Perbedaan ini tidak terlalu menjadi masalah karena pada penelitian NACA 63₄021 yang lain. Pada penelitian yang menerapkan bilangan Reynolds sebesar 183.000, koefisien lift dan drag dari studi numerik berbasis CFD memiliki karakteristik yang dapat diterima meskipun menghasilkan nilai yang cukup berbeda dengan hasil studi eksperimen seperti yang ditunjukkan pada.

Pada kondisi awal terlihat bahwa semua penelitian menunjukkan tren yang sesuai dan nilai koefisien yang hampir sama. Namun, setelah mencapai AoA 18°,



Gambar 4. Validasi karakteristik foil NACA 63,021 dengan $Re = 180.000$ (a) AoA vs CL, (b) AoA vs CD.
 Figure 4. Validation of NACA 63,021 with $Re = 180.000$ (a) AoA vs CL, (b) AoA vs CD.



Gambar 5. Validasi karakteristik foil NACA 63,021 dengan $Re = 183.000$ (a) AoA vs CL, (b) AoA vs CD.
 Figure 5. Validation of NACA 63,021 characteristic with $Re = 183.000$ (a) AoA vs CL, (b) AoA vs CD.

terjadi *stall* yang lebih awal dibandingkan penelitian eksperimen Johari *et al.* (2007) dan Satrio *et al.* (2018). Pada penelitian Utama *et al.* (2020) juga dimungkinkan terjadi *stall* di sekitar sudut 18° , karena pada sudut 20° sudah menuju ke arah post-*stall*. Pada nilai koefisien *drag* juga terlihat sedikit ketidaksesuaian khususnya pada kondisi pre-*stall* yang tidak segaris dengan hasil eksperimen Johari *et al.* (2007). Namun, pada AoA 20° justru menghasilkan koefisien *drag* yang sama dibandingkan hasil sebelumnya pada Gambar 4. Secara detail, hasil validasi dapat dianalisis tingkat akurasinya berdasarkan *mean absolute percentage error* (MAPE) yang dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Aswad *et al.*, 2021):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{|y_i - x_i|}{y_i} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots 18)$$

dimana n merupakan jumlah data, x_i merupakan data yang diperoleh, dan y_i merupakan data pembanding. Sedangkan untuk kriteria MAPE ditunjukkan pada Tabel 6. Sedangkan hasil kalkulasi MAPE foil NACA 634021 pada $Re = 180000$ dan $Re = 183000$ terhadap penelitian lain ditunjukkan dalam Tabel 7 dan 8.

Berdasarkan validasi MAPE, dapat ditunjukkan bahwa nilai CL hasil simulasi QBlade memiliki kriteria MAPE sangat tinggi, baik jika dibandingkan dengan studi numerik CFD maupun eksperimen pada bilangan $Re = 180000$. Hal ini juga dibuktikan dari keselarasan tren pada grafik yang memiliki nilai saling mendekati. Sedangkan pada nilai CD, hasil validasi berdasarkan kriteria MAPE tergolong cukup. Hal ini dikarenakan nilai selisih nilai CD yang dibandingkan sangat kecil sehingga hasil operasi terhadap bilangan penyebut akan menghasilkan error yang besar. Padahal saat dibandingkan secara grafik, khususnya pada area pre-*stall* menunjukkan tren yang sangat mendekati.

Tabel 6. Kriteria MAPE
 Table 6. MAPE criterion

Nilai MAPE	Interpretasi
<10%	Sangat tinggi
10% – 20%	Tinggi
20% – 50%	Cukup
>50%	Buruk

Tabel 7. Validasi MAPE NACA 63₄021 pada Re = 1,8x10⁵
 Table 7. MAPE validation of NACA 63₄021 with
 Re=1.8x10⁵

AoA (°)	Numerik CFD Dropkin et al (2012)		Uji Eksperimen Dropkin et al (2012)	
	εR CL	εR CD	εR CL	εR CD
0	0,00%	10,96%	0,00%	5,43%
3	4,03%	0,77%	23,70%	10,08%
6	0,39%	12,71%	17,92%	26,36%
9	8,55%	38,20%	15,07%	47,66%
12	0,24%	43,02%	0,55%	37,30%
15	2,32%	41,55%	1,78%	23,12%
18	11,10%	37,94%	1,44%	18,39%
21	1,61%	5,40%	4,82%	28,24%
24	18,89%	13,19%	19,99%	34,04%
27	8,49%	14,81%	4,31%	23,81%
30	1,61%	27,74%	5,11%	34,05%
Rata-rata	5,20%	22,39%	8,61%	26,23%

Tabel 8. Validasi MAPE NACA 63₄021 pada Re = 1,83x10⁵
 Table 8. MAPE validation of NACA 63₄021 with Re =
 1.83x10⁵

AoA (°)	CFD Satrio et al. (2018)		CFD Utama et al. (2020)		Eksp Johari et al. (2007)	
	εR CL	εR CD	εR CL	εR CD	εR CL	εR CD
0	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	13,7%	9,7%	8,2%	15,3%	24,9%	7,6%
4	13,7%	4,1%	8,2%	14,5%	12,4%	17,6%
6	10,7%	12,2%	2,3%	12,2%	12,3%	39,1%
8	9,1%	27,9%	1,0%	30,3%	10,9%	59,6%
12	11,9%	39,0%	0,9%	45,3%	6,5%	62,7%
16	8,9%	38,5%	2,0%	34,3%	4,7%	51,6%
20	41,7%	4,0%	19,1%	5,2%	38,6%	10,6%
Rata-rata	13,71%	16,93%	5,21%	19,64%	13,79%	1,10%

Hasil yang sedikit berbeda dicapai saat *foil* disimulasikan pada Re = 183000. Pada nilai CL, validasi yang sangat tinggi dihasilkan terhadap penelitian CFD Utama et al. (2020), sedangkan saat dibandingkan dengan CFD Satrio et al. (2018) dan eksperimen Johari et al. (2007), validasi MAPE menunjukkan hasil yang masih tinggi. Pada validasi nilai CD, hanya saat dibandingkan dengan penelitian CFD saja yang memiliki MAPE tinggi, sedangkan saat dibandingkan dengan hasil eksperimen validasi MAPE bernilai cukup. Secara umum, berdasarkan validasi secara statistik *foil*

NACA 63₄021 saat disimulasikan menggunakan QBlade menunjukkan hasil yang memuaskan baik saat dibandingkan dengan studi numerik berbasis CFD maupun dengan studi eksperimen pada bilangan Reynolds yang sama.

Perbandingan Performa Foil

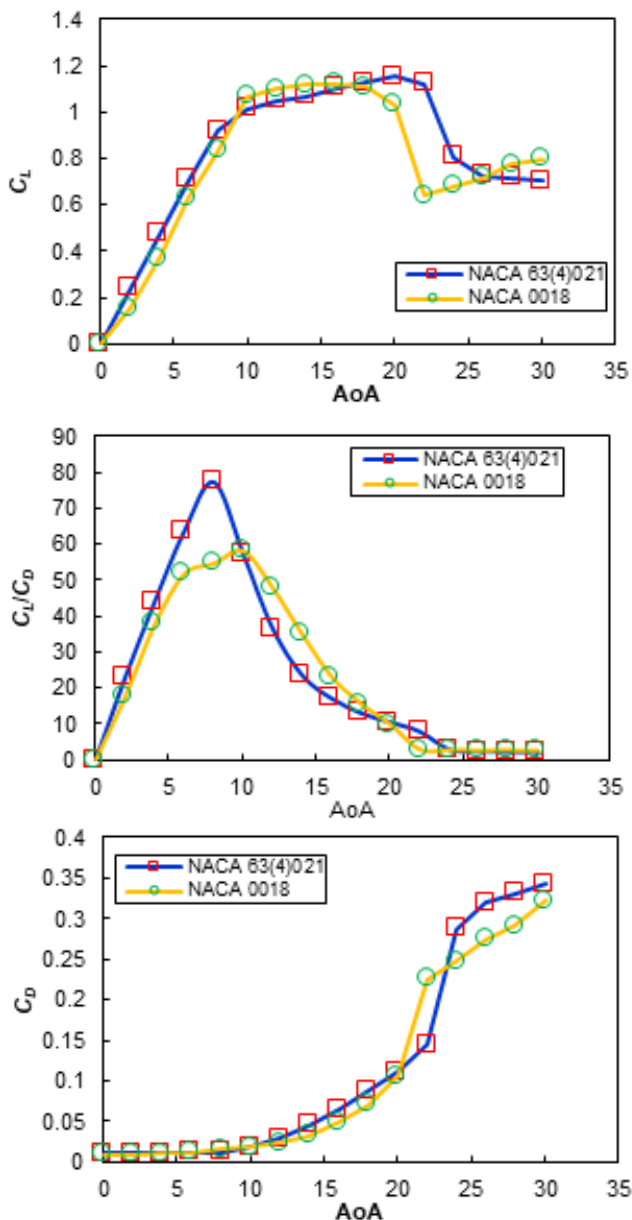
Profil NACA63₄021 yang disimulasikan dengan QBlade menghasilkan validasi yang baik. Oleh karena itu, desain turbin *V-shaped blade* berbasis *foil* tersebut dapat dilakukan. Performa *foil* NACA 63₄021 dibandingkan dengan NACA 0018 yang merupakan *foil* dasar turbin *V-shaped blade* pada penelitian Zanette et al (2010). Simulasi dilakukan pada kondisi batas kecepatan arus laut maksimum di Selat Flores sebesar 3,8 m/s (Syahputra et al., 2014). Kecepatan arus laut untuk rating turbin dihitung dari 75% kecepatan maksimum arus laut eksisting (Okoli et al., 2017), sehingga diperoleh kecepatan sebesar 2.85 m/s. Dengan nilai viskositas kinematis air laut sekitar 1.189 x 10⁻⁶ m²/s (pada suhu 15 °C dan salinitas 35 g/kg), maka bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{U_{\infty} c}{\nu} = \frac{2.85 \times 0.1959}{1.189 \times 10^{-6}} \approx 470.000$$

Nilai tersebut dikategorikan dalam kisaran bilangan Reynolds yang rendah (*low Reynolds number*) karena memiliki nilai kurang dari 10⁶ (Winslow et al., 2018), sehingga penggunaan analisis XFOil menjadi tepat.

Dengan input bilangan Reynolds di atas, diperoleh karakteristik koefisien *lift* dan koefisien *drag* dari *foil* NACA 63₄021 dan NACA 0018 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Untuk koefisien *lift* NACA 63₄021 pada Gambar 6a, pada kondisi pre-stall terlihat bahwa koefisien *lift* meningkat secara linier dari AoA 0° hingga 7°, lalu mengalami pertumbuhan yang agak lambat dari AoA 8° hingga saat terjadinya *stall* pada AoA 20° yang mencapai nilai terbesar 1,153. Berbeda halnya pada *foil* NACA 0018 dimana fenomena *stall* sudah mulai terjadi di AoA 18° hingga mencapai puncaknya pada AoA 20°. Pada kondisi pre-stall, nilai koefisien *lift foil* NACA 0018 cenderung konstan dengan nilai terbesar yaitu 1,121 dan pada akhirnya terjadi *stall* yang terlalu dini. Bahkan, nilai koefisien *lift* saat penurunan *stall* pada NACA 0018 jauh lebih besar hingga mencapai 0,64 dibandingkan NACA 63₄021 yang hanya sebesar 0,8. Untuk kondisi post-stall karakteristiknya tidak dapat diprediksi karena profil tidak konvergen.

Pada Gambar 6b terlihat bahwa karakteristik koefisien *drag* dari kedua *foil* memiliki nilai yang sama hingga AoA 12°. Selanjutnya, *foil* NACA 63₄021 memiliki koefisien *drag* yang lebih besar dibandingkan NACA 0018 hingga AoA 22° yang merupakan sudut terjadinya *stall* terbesar pada kedua *foil*. Meskipun menghasilkan koefisien *drag* yang lebih besar, namun hal ini dikompensasi oleh nilai koefisien *lift* yang cukup besar sehingga *foil* NACA 63₄021 menghasilkan performa rasio CL/CD yang jauh lebih besar dibandingkan NACA 0018, khususnya pada rentang AoA antara 0 hingga 12° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6c.



Gambar 6. Perbandingan karakteristik antara NACA 63₄021 dan NACA 0018 (a) CL (b) CD, dan (c) CL/CD.

Figure 6. Characteristic comparison between NACA 63₄021 and NACA 0018 (a) CL (b) CD, and (c) CL/CD.

Selain itu, terlihat bahwa sudut serang optimum pada NACA 634021 dicapai pada AoA 8° yang terlihat dari besarnya rasio CL/CD maksimum sebesar 77,30.

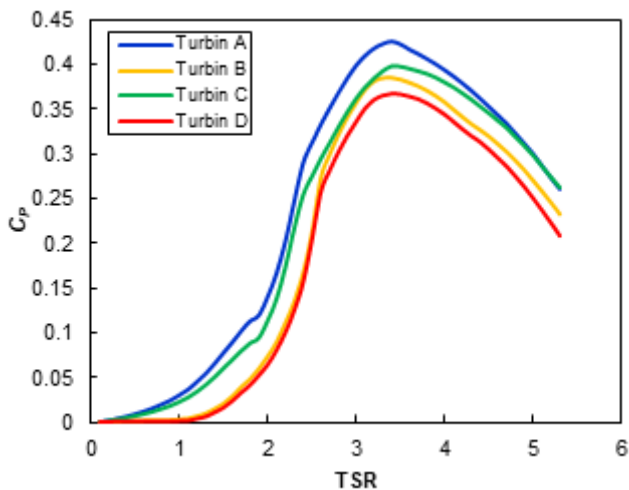
Khusus untuk *foil* NACA 0018, jika divalidasi dengan penelitian lain dari Timmer (2008), maka telah menghasilkan nilai koefisien yang sesuai. Pada penelitian tersebut NACA 0018 yang diterapkan pada bilangan Reynolds sebesar 500.000 menghasilkan nilai koefisien *lift* maksimum, koefisien *drag* minimum, dan sudut terjadinya *stall* masing-masing yaitu 1,086, 0,00942, dan 21,5°. Sedangkan pada penelitian saat ini yang menggunakan bilangan Reynolds sebesar 470.000 menghasilkan nilai koefisien *lift* maksimum, koefisien *drag* minimum, dan sudut terjadinya *stall* masing-masing yaitu 1,121; 0,00843; dan 22°. Oleh karena itu, hasil simulasi *foil* NACA 0018 sebagai pembandingan dapat dilakukan.

Selanjutnya, dalam sebagian besar kasus, koefisien kinerja pada sudut serang yang tinggi di luar kondisi *stall* tidak dapat dilakukan menggunakan XFOIL karena masalah konvergensi (Muratoğlu & Demir, 2019), sehingga penting untuk diketahui ekstrapolasi performa turbin pada sudut serang penuh yaitu 360° dengan rentang antara -180° sampai 180° dimana *airfoil* berdiri pada posisi azimuth yang berbeda (Zahariea *et al.*, 2019). Untuk melakukan hal tersebut, perlu dilakukan ekstrapolasi pada QBlade dimana ekstrapolasi ini dapat dilakukan menggunakan metode *Montgomerie* atau *Viterna*. Pada penelitian saat ini, dilakukan fitting berbasis metode ekstrapolasi *Montgomerie* agar dihasilkan grafik koefisien yang lebih sinusoidal (Mahmuddin *et al.*, 2017).

Performa Daya V-Shaped blade

Koefisien daya (CP) memiliki peranan penting terhadap performa turbin. Pada simulasi ini performa turbin ditinjau dengan mempertimbangkan *tip losses* untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat (Zahariea *et al.*, 2019). Turbin A, B, C, dan D disimulasikan pada kondisi air laut yang memiliki densitas sebesar 1025 kg/m³ dan koefisien dinamis sebesar 1,2187 x 10⁻³ kg/ms untuk mendapatkan koefisien daya. Adapun hasilnya direpresentasikan pada Gambar 7.

Berdasarkan gambar tersebut, nilai CP tertinggi dari Turbin A, B, C, dan D masing-masing adalah 0,425, 0,385, 0,399, dan 0,367 yang terjadi pada TSR sekitar 3,4. Selain itu, terlihat juga bahwa Turbin A dan C yang berbasis *foil* NACA 63₄021 memiliki kinerja turbin pada rentang TSR yang lebih lebar dibandingkan Turbin B dan D yang berbasis *foil* NACA 0018. Pada turbin yang



Gambar 7. Perbandingan koefisien daya (CP) antara NACA 63₄021 dan NACA 0018.

Figure 7. Power coefficient (CP) comparison between NACA 63₄021 dan NACA 0018.

sama-sama berbentuk *V-shaped blade*, Turbin A yang berbasis *foil* NACA 63₄021 mampu meningkatkan nilai CP 10,25% lebih besar dibandingkan Turbin B yang berbasis *foil* NACA 0018. Sedangkan pada turbin yang sama-sama berbentuk *Straight blade*, penggunaan *foil* NACA 63₄021 pada Turbin C mampu memberikan peningkatan CP sebesar 8,67% dibandingkan Turbin D yang berbasis *foil* NACA 0018. Hal ini dapat diartikan bahwa penggunaan *foil* NACA 63₄021 dapat meningkatkan performa turbin, khususnya berupa peningkatan efisiensinya. Peningkatan performa turbin ini tidak lepas dari karakteristik *foil* NACA 63₄021 yang menghasilkan rasio CL/CD lebih besar dibandingkan NACA 0018.

Selanjutnya, pada turbin yang menggunakan *foil* sama, Turbin A dibandingkan dengan Turbin C, dan Turbin B dibandingkan dengan Turbin D. Hasilnya, turbin A dan B yang merupakan turbin *V-shaped blade* dengan $\gamma = 30^\circ$ masing-masing menghasilkan performa CP yang lebih baik dibandingkan Turbin C dan D yang merupakan turbin *Straight blade* ($\gamma = 0^\circ$). Peningkatan CP pada turbin *V-shaped blade* terhadap turbin *Straight blade* adalah 6,6% untuk turbin yang berbasis *foil* NACA 63₄021 dan 5% untuk turbin yang berbasis *foil* NACA 0018. Hasil ini juga sesuai dengan penelitian lain seperti dari Su *et al* (2020) dimana penggunaan turbin *V-shaped blade* mampu memberikan peningkatan CP dibandingkan turbin *Straight blade*.

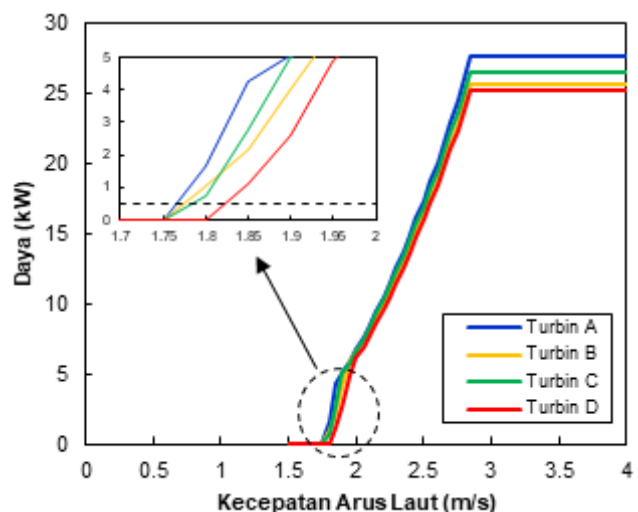
Selanjutnya, simulasi berbasis DMS dilakukan untuk mengetahui daya yang dihasilkan turbin. Kecepatan angular turbin dihitung dari nilai TSR yang

menghasilkan CP tertinggi pada kecepatan arus laut ratingnya menggunakan Persamaan (5). Selain itu, pada simulasi juga ditetapkan bahwa turbin diatur pada posisi sudut *pitch* yang menghasilkan daya terbesar saat kecepatan ratingnya. Pengaturan untuk semua turbin secara ringkas ditunjukkan dalam Tabel 9, sedangkan hasil karakteristik daya yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 8.

Pada Gambar 8, terlihat bahwa ketika rotor berputar pada kecepatan arus laut ratingnya, Turbin A, B, C, dan D masing-masing menghasilkan daya sebesar 27,64 kW; 25,62 kW; 26,5 kW; dan 25,17 kW. Artinya ada selisih sekitar 2,5 kW antara turbin yang menghasilkan daya tertinggi dengan turbin yang menghasilkan daya terendah. Turbin A secara konsisten menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan turbin lainnya pada kecepatan arus laut lebih dari 1,75 m/s. Jika daya sebesar 0,5 kW digunakan sebagai batas daya minimum, maka Turbin A, B, C, dan D masing-masing akan mencapai daya tersebut pada kecepatan arus sebesar 1,765 m/s; 1,775 m/s; 1,785 m/s; dan 1,825 m/s. Artinya, turbin

Tabel 9. Putaran optimum turbin
Table 9. Optimum rotation of turbine

Variabel	Turbin A	Turbin B	Turbin C	Turbin D
U_∞ (m/s)	2,85	2,85	2,85	2,85
TSR	3,4	3,4	3,45	3,45
ω (rpm)	70,31	70,31	71,35	71,35
<i>Pitch angle</i>	0°	1°	0°	1°



Gambar 8. Perbandingan daya yang dihasilkan pada semua turbin.

Figure 8. Comparison of the power generated on all turbines.

A memiliki *self-starting* yang terbaik karena mampu menghasilkan daya yang sesuai pada *cut-in speed* yang rendah. Jika dibandingkan berdasarkan bentuk *foil*nya, maka Turbin A dan C yang berbasis *foil* NACA 63₄021 memiliki *self-starting* yang lebih baik dibandingkan Turbin B dan D yang berbasis *foil* NACA 0018. Sedangkan jika dilakukan perbandingan berdasarkan bentuk turbin, maka Turbin A dan B yang memiliki bentuk *V-shaped blade* memiliki *self-starting* yang lebih baik dibandingkan bentuk *Straight blade* pada Turbin C dan D.

Pada saat turbin mencapai kecepatan arus laut untuk ratingnya sebesar 2,85 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. Prosedur ini juga penting dilakukan untuk memperkirakan biaya operasional dan *maintenance*. Kemudian pada Gambar 8 pula, ketika arus laut bertambah sebesar 1 m/s dimulai pada kecepatan 1,75 m/s, Turbin A, B, C, dan D masing-masing memiliki rata-rata pertambahan daya sebesar 2,51 kW; 2,33 kW; 2,41 kW; dan 2,29 kW. Oleh karena itu ditegaskan bahwa konfigurasi Turbin A merupakan desain yang paling optimal diantara turbin yang dibandingkan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan simulasi pada skenario turbin Darrieus yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pada perbandingan bentuk *foil* yang sama, turbin yang berbasis *foil* NACA 63₄021 mampu menghasilkan efisiensi tertinggi dan memiliki *self-starting* terbaik dibandingkan turbin yang berbasis NACA 0018. Sedangkan pada perbandingan *blade swept angle* yang mempengaruhi bentuk sudu, turbin dengan bentuk *V-shaped blade* menghasilkan efisiensi tertinggi dan memiliki *self-starting* terbaik dibandingkan turbin *Straight blade*.

Oleh karena itu, konfigurasi turbin yang berbasis *foil* NACA 63₄021 dan bentuk *V-shaped blade* dengan $\gamma = 30^\circ$ merupakan konfigurasi yang menghasilkan performa paling optimal karena juga mampu menghasilkan daya tertinggi pada saat *cut-off speed* atau saat kecepatan ratingnya serta menghasilkan rata-rata peningkatan daya terbesar dibandingkan konfigurasi turbin yang lain. Pada akhirnya, sebagai preliminary study performa turbin *V-shaped blade* dapat diketahui dan dapat dipertimbangkan untuk ekstraksi potensi energi

arus laut yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama sebagai *corresponding author* mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan *sponsorship* dan dukungan finansial yang berarti sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- Alaskari, M., Abdullah, O., & Majeed, M. H. (2019). Analysis of Wind Turbine Using QBlade Software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(3).
- Aswad, I. A. H., Armono, H. D., Rahmawati, S., Ridlwan, A., & Ariefianto, R. M. (2021). Pemodelan Tinggi Gelombang Untuk Kajian Energi Gelombang Laut Di Perairan Barat Provinsi Lampung. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 15(2), 75-84.
- 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(5), 673-694.
- 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.
- 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.
- 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. *Journal of Physics: Conference*

Series, 753(2).

- Dropkin, A., Custodio, D., Henoch, C. W., & Johari, H. (2012). Computation of flowfield around an airfoil with leading-edge protuberances. *Journal of Aircraft*, 49(5), 1345–1355.
- 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), 1–25.
- Islam, M. R., Bin Bashir, L., & Rafi, N. S. (2019). Design and Simulation of A Small Wind Turbine Blade with Qblade and Validation with MATLAB. Proceedings of the International Conference on Electrical Information and Communication Technology, *EICT 2019*, 3, 20–22.
- Johari, H., Henoch, C., Custodio, D., & Levshin, A. (2007). Effects of leading-edge protuberances on airfoil performance. *AIAA Journal*, 45(11), 2634–2642.
- Johari, H., & Perez, S. (2011). *Applications Of Hydrofoils With Leading Edge*. Final Technical Report for Office of Naval Research contract N00014-08-1-1043. 818.
- 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.
- Kulkarni, P. A., Hu, W., Dhoble, A. S., & Padole, P. M. (2017). Statistical wind prediction and fatigue analysis for horizontal-axis wind turbine composite material blade under dynamic loads. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(9), 1–26.
- 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. *Journal of Power and Energy Engineering*, 7(4), 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). *Renewable Energy*, 96, 928–939.
- Ma, J., Duan, Y., Zhao, M., Lv, W., Wang, J., Ke, Q. M., & Ren, Y. (2019). Effect of Airfoil Concavity on Wind Turbine Blade Performances. *Shock and Vibration*, 2019, 1–11.
- 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. Proceedings of the 7th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, *Environmental and Natural Disaster Management, Isoceen 2019*, 47–53.
- 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.
- Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., & Thomas, G. (2017). The influence of turbulence model and two and three-dimensional domain selection on the simulated performance characteristics of vertical axis tidal turbines. *Renewable Energy*, 105, 106-116.
- Mazur, C., Hall, S., Hardy, J., & Workman, M. (2019). Technology is not a barrier: A survey of energy system technologies required for innovative electricity business models driving the low carbon energy revolution. *Energies*, 12(428), 1–13.
- Mohamed, M. H. (2012). Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, 47(1), 522-530.
- 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.
- Muratoğlu, A., & Demir, M. S. (2019). Numerical Analyses of a Straight Bladed Vertical Axis

- Darrieus Wind Turbine: Verification of Dms Algorithm and Qblade Code. *European Journal of Technic*, 9(2), 195-208.
- Okoli, C., Uhunmwangho, R., & Nwogu, H. (2017). A simulation model for tidal energy extraction in Nigeria using tidal current turbine. *Proceedings of the 2017 IEEE PES-IAS PowerAfrica Conference: Harnessing Energy, Information and Communications Technology (ICT) for Affordable Electrification of Africa, PowerAfrica 2017*, 500–505.
- Paraschivoiu, I., Trifu, O., & Saeed, F. (2009). H-Darrieus wind turbine with blade pitch control. *International Journal of Rotating Machinery*, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/505343>
- 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.
- Raut, S., Srivash, S., Sanas, R., Sinnarkar, N., & Chaudhary, M. K. (2017). Simulation of micro wind turbine blade in Q-Blade. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5(4), 256-262.
- Rawlings, G. W. (2008). *Parametric Characterization of an Experimental Vertical Axis Hydro Turbine*. Thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Rishmany, J., Daaboul, M., Tawk, I., & Saba, N. (2017). Optimization of a Vertical Axis Wind Turbine Using FEA, Multibody Dynamics and Wind Tunnel Testing. *Athens Journal of Technology and Engineering*, 4(3), 1-21.
- 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. *Journal of Marine Science and Application*, 17(2), 208-215.
- Satrio, D., Utama, I. K. A. P., & Mukhtasor. (2018). Performance Enhancement Effort for Vertical-Axis Tidal Current Turbine in Low Water Velocity. *Proceedings of the 4th Asian Wave and Tidal Energy Conference (AWTEC)*, Taipei, Taiwan.
- Shadman, M., Silva, C., Faller, D., Wu, Z., de Freitas Assad, L. P., Landau, L., Levi, C., & Estefen, S. F. (2019). Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: A case study of Brazil. *Energies*, 12(19), 3658.
- 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. <https://doi.org/10.3390/en12193658>
- Syahputra, H., Prasetyawan, I. B., Ismunarti, D. H., & Adhitya, R. B. (2014). Kajian Potensi Arus Laut Sebagai Energi Pembangkit Listrik Di Selat Larantuka, Flores Timur, Nusa Tenggara Timur. *Buletin Oseanografi Marina*, 3(1), 1-8.
- Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrouche, M., Tameghe, T. A., & Ekemb G. (2015). A New Approach for Modeling Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotors Using Electrical Equivalent Circuit Analogy: Basis of Theoretical Formulations and Model Development. *Energies*, 8, 10684-10717.
- Timmer, W. A. (2008). Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018. *Wind Engineering*, 32(6), 525-537.
- 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. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(3), 6982–6992.
- Wardhana, W., & Fridayana, E. N. (2018). Aerodynamic Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Darrieus Type H-Rotor using Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach. *Proceedings of the 3rd International Conference on Marine Technology, Senta 2018*, 5–11.
- Winslow, J., Otsuka, H., Govindarajan, B., & Chopra, I. (2018). Basic understanding of airfoil characteristics at low Reynolds numbers (104–105). *Journal of Aircraft*, 55(3), 1050-1061.

- Yasim, A., Mukhtasor, Rahmawati, S., Widodo., & Madi. (2021). Numerical Modeling of Vertical Axis Hydro Turbine with Experimental Validation. *Proceedings of the 7th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management, ISOCEEN 2019*, 22–29.
- Yirtici, O., Cengiz, K., Ozgen, S., & Tuncer, I. H. (2019). Aerodynamic validation studies on the performance analysis of iced wind turbine blades. *Computers and Fluids*, 192, 1-9.
- Zaharica, 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).
- Zhang, D.-H., Ding, L., Huang, B., Chen, X.-M., & Liu, J.-T. (2019). Optimization Study on the Blade Profiles of A Horizontal Axis Tidal Turbine Based on BEM-CFD Model. *China Ocean Engineering*, 33(4), 436–445.

