

Pemilihan Bilah Turbin Angin Sumbu Horizontal Model Air Foil *Taperless* dan *Untwisted*

Muhammad Faisal Wicaksono^{*1}, Deny Bayu Saefudin²

^{1,2}Prodi Teknik Mesin, Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia

Email: ¹m.faisal.wicaksono@lecture.unjani.ac.id, ²deny.bayusaefudin@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Airfoil merupakan bentuk penampang bilah dari Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) yang mempengaruhi karakter aerodinamika turbin. Pemilihan bentuk *airfoil* merupakan salah satu proses awal dari perancangan TASH yang memegang peranan penting terhadap unjuk kerja TASH. Pada penelitian ini, diajukan metode pemilihan *airfoil* untuk bilah TASH dengan jenis bilah *taperless* (tanpa tirus) dan *untwisted*. Pemilihan dilakukan dengan cara membandingkan nilai *lift-to-drag ratio* beberapa *airfoil* pada beberapa kondisi bilangan Reynolds dari data polar yang didapatkan dari simulasi. *Airfoil* yang dibandingkan nilai *lift-to-drag ratio*-nya adalah 6 *airfoil* NACA 4-digit, yaitu: 4412, 4415, 5412, 5415, 6412, dan 6415. Seluruh *airfoil* tersebut disimulasikan karakter aerodinamikanya pada rentang bilangan Reynolds 50.000 hingga 300.000 menggunakan modul X-Foil yang terintegrasi dalam QBlade v0.96. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *airfoil* NACA dengan ketebalan *chord* maksimum sebesar 12% memiliki *lift-to-drag ratio* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *airfoil* lainnya. Perbandingan nilai *lift-to-drag ratio* dari beberapa *airfoil* dengan ketebalan *chord* maksimum 12% menghasilkan kesimpulan bahwa NACA 4412 sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan NACA 5412 dan NACA 6412 pada nilai bilangan Reynolds sama dengan atau lebih kecil dari 100.000. Kurva *lift-to-drag ratio* dari *airfoil* 5412 dan 6412 memiliki puncak yang lebih lebar, yang mengakibatkan puncak koefisien daya turbin terhadap rasio ujung bilah lebih lebar. Hal ini menunjukkan bahwa bilah TASH yang menggunakan *airfoil* 5412 atau 6412 dapat mempertahankan kondisi operasi yang lebih efisien pada berbagai kecepatan angin dan kecepatan rotasi generator.

Kata kunci: *Airfoil*, HAWT, *Qblade*, *Taperless Blade*, Wind Turbine

Selection of Horizontal Axis Wind Turbine Blades for Taperless and Untwisted Air Foil Models

Abstract

An *airfoil* is the cross-sectional shape of a Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) blade that affects the turbine's aerodynamic characteristics. Selecting the *airfoil* shape is a crucial initial step in HAWT design, influencing its performance. A method is proposed to choose *airfoils* for *taperless* and *untwisted* HAWT blades. The selection involves comparing *lift-to-drag ratio* values of several *airfoils* at various Reynolds numbers obtained from polar data through simulation. The study compares the *lift-to-drag ratios* of six NACA 4-digit *airfoils*: 4412, 4415, 5412, 5415, 6412, and 6415. All these *airfoils* are aerodynamically simulated across Reynolds numbers from 50,000 to 300,000 using the integrated X-Foil module within QBlade v0.96. Simulation results reveal that NACA *airfoils* with a maximum *chord* thickness of 12% exhibit higher *lift-to-drag ratios* than other *airfoils*. Calculations indicate that the L/D ratio of NACA 4412 is slightly higher than NACA 5412 and NACA 6412 at Reynolds numbers of 50,000 and 100,000. The L/D ratio curve of *airfoils* 5412 and 6412 features a broader peak, implying a wider coefficient of power peak concerning the blade tip ratio. This suggests that *airfoil* blades 5412 or 6412 can maintain more efficient operational conditions across various wind speeds and generator rotations.

Keywords: *Airfoil*, HAWT, *Qblade*, *Taperless Blade*, Wind Turbine

1. PENDAHULUAN

Tingginya kebutuhan energi dalam negeri di Indonesia, menjadi faktor pendorong dalam peningkatan sumber daya energi yang memadai seperti energi fosil dan terbarukan. Banyaknya sumber energi fosil dan kehandalannya, membuat sumber energi ini banyak dipakai di Indonesia. Namun kekurangan dari sumber energi

ini adalah gas efek rumah kaca yang terkandung pada emisi gas buang hasil pembakaran bahan bakar fosil. Dengan diberlakukannya Perjanjian Paris yang bertujuan membatasi pemanasan global hingga 2°C, menjadikan pentingnya pengembangan teknologi energi terbarukan. Diantara dari sumber energi tersebut adalah matahari, geotermal, biomassa, dan angin[1].

Potensi energi angin di Indonesia menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tercatat sebesar 9,29 GW dan baru terpasang sekitar 1,6 MW[2]. Potensi ini diwarnai dengan karakter kecepatan angin rata-rata di Indonesia yang berada pada rentang 3 – 7 m/s. Kecepatan angin tersebut merupakan kategori kecepatan angin rendah[2], [3]. Kondisi kecepatan angin rendah ini memberikan tantangan tersendiri bagi pengembangan turbin angin di Indonesia dimana daya turbin ekuivalen dengan pangkat tiga dari kecepatan angin. Selain itu, kecepatan angin di Indonesia memiliki nilai yang tidak seragam. Hal ini akan membuat desain optimal dari turbin angin untuk daerah tertentu dapat berbeda-beda pula[4].

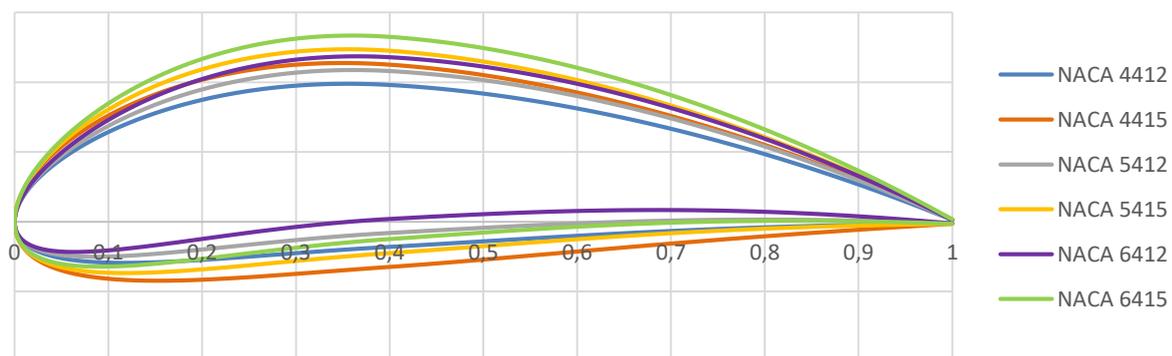
Bentuk *airfoil* sebagai penampang bilah sangat mempengaruhi kinerja TASH[3], [5]–[8]. Parameter kinerja tersebut adalah torsi, daya, efisiensi dan *Tip Speed Ratio* (TSR)[9]–[12]. Nilai parameter kinerja didapatkan melalui perhitungan berdasarkan teori Blade Element Momentum (BEM). Berdasarkan teori tersebut nilai *lift-to-drag ratio airfoil* mempengaruhi nilai torsi dan daya turbin secara signifikan[9]–[16].

Metoda pemilihan *airfoil* untuk turbin angin yang beroperasi pada kecepatan angin rendah telah dilakukan oleh V. Salgado et.al[5]. Pada penelitiannya, *airfoil* disimulasikan karakter aerodinamiknya pada X-Foil pada rentang sudut serang 0 – 10 derajat dan bilangan Reynolds 1,0e5 – 3,0e5. Karakter aerodinamika *airfoil* tersebut dipengaruhi oleh nilai bilangan Reynolds. R.K. Singh et.al[3] menjelaskan bahwa torsi dari sebuah turbin angin sangatlah dipengaruhi oleh bentuk bilah yang dapat menghasilkan nilai *lift to drag ratio* yang tinggi. Sejalan dengan itu[6], melakukan sebuah optimasi bentuk *airfoil* yang menghasilkan torsi bilah yang lebih tinggi. Kenaikan nilai torsi tersebut tentunya berbanding lurus dengan kenaikan daya turbin. Sebuah kesimpulan yang sama bahwa bentuk *airfoil* mempengaruhi kinerja turbin angin sumbu horizontal juga ditunjukkan oleh E. Douvi[7].

Secara spesifik penelitian ini menunjukkan proses pemilihan *airfoil* terbaik untuk bentuk penampang bilah TASH. Setelah proses pemilihan *airfoil*, dilakukan validasi dengan menghitung parameter kinerja TASH dari beberapa *airfoil* terpilih. Validasi ini dilakukan untuk memastikan *airfoil* terbaik yang terpilih mencerminkan kinerja TASH yang baik juga. Begitu pula dengan urutan (rangking) kinerja TASH terhadap urutan *airfoil* yang digunakan oleh TASH tersebut. Parameter kinerja TASH berupa kurva daya, torsi dan efisiensi dikaji sesuai dengan kondisi kurva *lift-to-drag ratio* dari *airfoil* yang terpilih.

2. METODE PENELITIAN

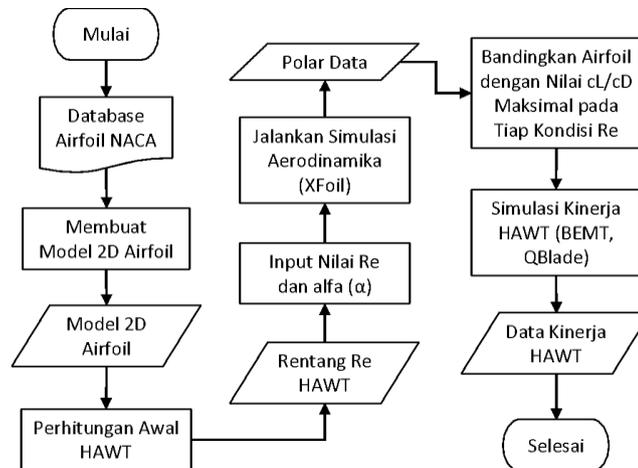
Penelitian kali ini membandingkan 6 kandidat *airfoil* dari sistem kodefikasi NACA 4-digit yang antara lain yaitu NACA 4412, 4415, 5412, 5415, 6412 dan 6415. Profil *airfoil* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1. Perbedaan dari profil *airfoil* tersebut adalah tebal *camber* maksimum, lokasi dari *camber* maksimum, dan tebal bilah maksimum.



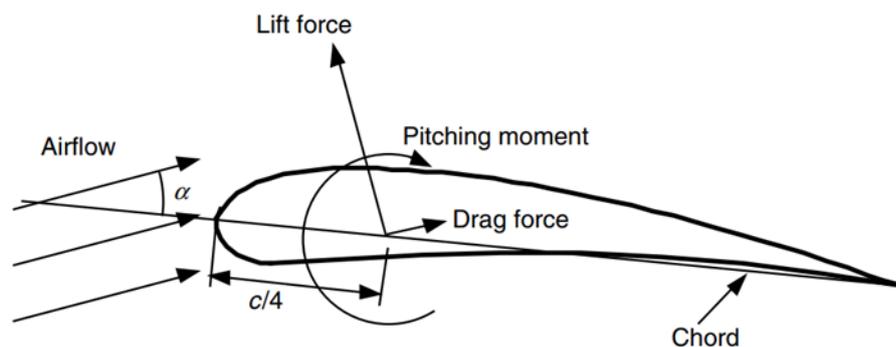
Gambar 1. Profil *Airfoil* NACA 4412, 4415, 5412, 5415, 6412, dan 6415

Seperti terlihat pada Gambar 2, alur penelitian dimulai dengan membuat model 2D dari 6 *airfoil* tersebut. Kemudian dilakukan simulasi aerodinamika *isolated airfoil* menggunakan modul X-Foil yang tersemat pada QBlade untuk menghasilkan kumpulan polar data seluruh *airfoil*. Data polar ini merupakan kumpulan data koefisien gaya aerodinamika seperti koefisien gaya angkat (Cl), gaya hambat (Cd) dan momen putar (Cm) *airfoil* saat diterpa oleh udara pada kondisi simulasi tertentu. Parameter yang menggambarkan kondisi simulasi antara

lain yaitu nilai bilangan Reynolds aliran (Re), bilangan Mach aliran (Ma), kekasaran permukaan *airfoil*, dan sudut serang udara yang menerpa *airfoil* (α).



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. Gaya angkat (L), gaya hambat (D), dan momen pada bilah *airfoil* [21]

Dapat dilihat pada Gambar 3, gaya angkat (L) dan gaya hambat (D) yang merupakan resultan dari perbedaan tekanan permukaan atas dan bawah bilah, dan gaya gesek permukaan bilah. Arah gaya angkat adalah tegak lurus terhadap arah datang angin relatif, sedangkan arah gaya hambat adalah sejajar dengan arah datang angin relatif. Sudut serang (α) adalah sudut antara arah datang angin dengan garis *chord*. Gaya angkat dan gaya hambat dapat diubah menjadi bentuk tak berdimensi C_l dan C_d . Nilai kedua gaya ini bergantung secara dominan pada sudut serang dan nilai bilangan Reynolds. Rentang nilai Re di sepanjang bilah turbin yang akan didesain perlu diperkirakan melalui proses perhitungan awal (*pre-calculation*). Dimana hal-hal yang mempengaruhi nilai bilangan Reynolds tersebut antara lain yaitu nilai distribusi nilai kecepatan relatif udara (W) yang menerpa bilah dari pangkal hingga ujung, serta rentang kecepatan angin (V) yang menerpa turbin. Distribusi nilai kecepatan relatif udara tentunya akan membesar dari pangkal hingga ujung, sebagai akibat dari membesarnya nilai kecepatan tangensial turbin (U) yang merupakan fungsi dari jari-jari (r). Sedangkan rentang nilai kecepatan angin merupakan batasan desain yang diambil dari data peta angin di Indonesia. Berdasarkan data dari peta angin tersebut, rentang nilai kecepatan angin desain ditentukan 5 hingga 8 m/s.

Nilai Ma pada simulasi aerodinamika merupakan parameter yang menentukan kondisi udara dianggap sebagai fluida *compressible* atau *incompressible*. Pada kondisi nilai Ma kurang dari 0,3 pengaruh kompresibilitas terhadap kinerja turbin dapat dianggap tidak signifikan[9]. Pada beberapa literatur nilai batas pengaruh kompresibilitas berada pada Ma sebesar 0,1, bukan 0,3. Perlu diperhatikan bahwa nilai Ma yang dihitung dipengaruhi oleh nilai kecepatan angin (V) dan nilai cepat rambat gelombang suara pada udara (cs). Cepat rambat gelombang suara selain tergantung kepada jenis fluidanya juga tergantung pada temperatur fluida. Perhitungan ini mengasumsikan temperatur udara sama dengan temperatur kamar.

Kekasaran permukaan bilah mempengaruhi nilai performa *airfoil* yang dikarenakan adanya perubahan aliran *boundary layer* pada sepanjang permukaan bilah[17]. Kekasaran ini mengakibatkan penurunan nilai C_l maksimum sepanjang blade. Kekasaran juga mengurangi kemiringan kurva C_l dan meningkatkan profil C_d yang

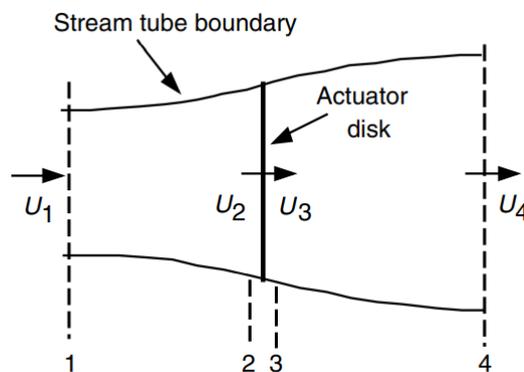
akan meningkatkan rugi-rugi aerodinamika lebih jauh lagi. Besarnya rugi-rugi aerodinamika ini berkisar dari 5-30% dari energi yang dapat dihasilkan turbin angin. Sudut *blade-root twist* yang tinggi, optimasi karakteristik *airfoil* untuk nilai Reynolds yang tepat, dan penggunaan *chord* yang lebih tebal merupakan beberapa hal yang dapat dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi energi akibat kekasaran bilah[18].

Pengaturan parameter pada Qblade ditentukan sedemikian rupa agar simulasi yang dijalankan sesuai dengan keadaan penggunaan turbin angin. Profil *airfoil* pada Gambar 1 dihasilkan dari modul "design" pada Qblade dengan jumlah titik 159 koordinat. Setelah itu pengaturan Ma pada modul X-Foil diatur pada nilai 0 karena kecepatan angin jauh di bawah 0,3. Nilai $N_{crit}=9$ untuk menyatakan kecenderungan aliran laminar di sekitar bilah. *Trip location* nilainya 1 untuk memaksa tidak terjadinya transisi dari laminar ke turbulen sepanjang *airfoil* bilah[19].

Rentang nilai sudut serang udara terhadap *airfoil* (α) pada proses simulasi ditentukan pada kisaran -20° hingga 35° . Diharapkan, fenomena *stall* dari 6 geometri *airfoil* (pada Gambar 3) dapat terlihat pada rentang ini. Fenomena *stall* tersebut merupakan kondisi dimana nilai C_l mulai tidak signifikan penambahannya atau bahkan berkurang seiring bertambahnya nilai C_d pada nilai α yang tinggi. Pada kurva $C_l/C_d - \alpha$, kondisi *stall* terjadi pada daerah nilai α yang lebih besar dari nilai α saat kondisi C_l/C_d maksimum tercapai[20].

Setelah data polar seluruh *airfoil* didapatkan, proses pemilihan *airfoil* dilakukan dengan melihat nilai *lift-to-drag ratio*. Menurut teori Blade Element-Momentum (BEMT) nilai *lift-to-drag ratio* sangat berpengaruh terhadap nilai torsi TASH[20]. Nilai *lift-to-drag ratio* yang tinggi akan menghasilkan nilai torsi yang tinggi pula dengan meminimalisir gaya dorong yang membebani turbin dalam arah aksial[17], [21]. Hubungan C_l dan C_d terhadap gaya arah aksial dapat dilihat sesuai dengan Persamaan 3. Sebagai upaya validasi proses pemilihan *airfoil*, maka *airfoil* terpilih diaplikasikan ke simulasi perhitungan parameter kinerja TASH. Hal tersebut dilakukan untuk melihat korelasi antara bentuk kurva *lift-to-drag ratio airfoil* terhadap kurva daya, torsi dan efisiensi TASH.

Perhitungan parameter kinerja turbin angin sumbu horizontal pada Qblade dilakukan berdasarkan *Blade Element-Momentum Theory* (BEMT). Teori ini merupakan gabungan antara teori konservasi momentum dan teori elemen bilah, atau juga disebut teori *strip*. Bilah sudu dibagi menjadi beberapa bagian segmen, yang nantinya performa keseluruhan bilah merupakan penjumlahan dari segmen-segmen penyusunnya. Parameter kinerja yang dihitung antara lain yaitu torsi, gaya aksial, daya, dan *tip speed ratio*.



Gambar 4. Ilustrasi kontrol volume aliran angin pada area (sweep) turbin angin.

Jika turbin angin diasumsikan berada pada kontrol volume dengan jumlah tak hingga dan gaya aksial angin yang merata pada seluruh area (*Sweep*) turbin (A), koefisien daya dan torsi dapat dihitung. Nilai maksimum dari koefisien ini juga dikenal sebagai *Betz limit*. Asumsi lainnya adalah tidak ada hambatan friksi, fluida *incompressible*, homogen, dan tunak. Kecepatan angin (U) berubah dari titik 1 hingga titik 4 sesuai dengan Gambar 4. Dengan menggunakan teori konservasi momentum satu dimensi gaya aksial angin dapat dihitung. Koefisien daya adalah perbandingan antara daya turbin dengan daya potensial angin, yang ditunjukkan pada persamaan 1. Koefisien torsi merupakan perbandingan antara torsi turbin dengan gaya terpa angin, yang ditunjukkan pada persamaan 2. Begitu pula dengan besar koefisien gaya aksial dapat dilihat pada persamaan 3, adalah perbandingan antara gaya aksial angin dengan gaya dinamik angin tersebut. Sedangkan koefisien gaya tangensial dapat dilihat pada persamaan 4, yang merupakan perbandingan gaya tangensial angin dengan gaya dinamik angin tersebut.

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} \tag{1}$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \tag{2}$$

Gaya aksial (F_N) dan gaya torsional (Q) turbin dapat diproyeksikan pada sumbu arah angin relatif, dimana gaya-gaya tersebut adalah gaya angkat dan gaya hambat *airfoil*. Gaya angkat adalah gaya yang tegak lurus terhadap arah datangnya angin, sedangkan gaya hambat adalah gaya yang berlawanan arah dengan arah datangnya angin. Dengan mempertimbangkan segitiga kecepatan sudu pada turbin dan sudut puntir bilah, maka sudut gaya angkat dengan gaya hambat *airfoil* dapat ditentukan. Koefisien gaya angkat adalah perbandingan antara gaya angkat dengan gaya dinamik angin; begitu pula dengan koefisien gaya hambat. Hubungan antara koefisien gaya turbin dengan koefisien gaya aerodinamika *airfoil* dapat dijelaskan dengan persamaan berikut:

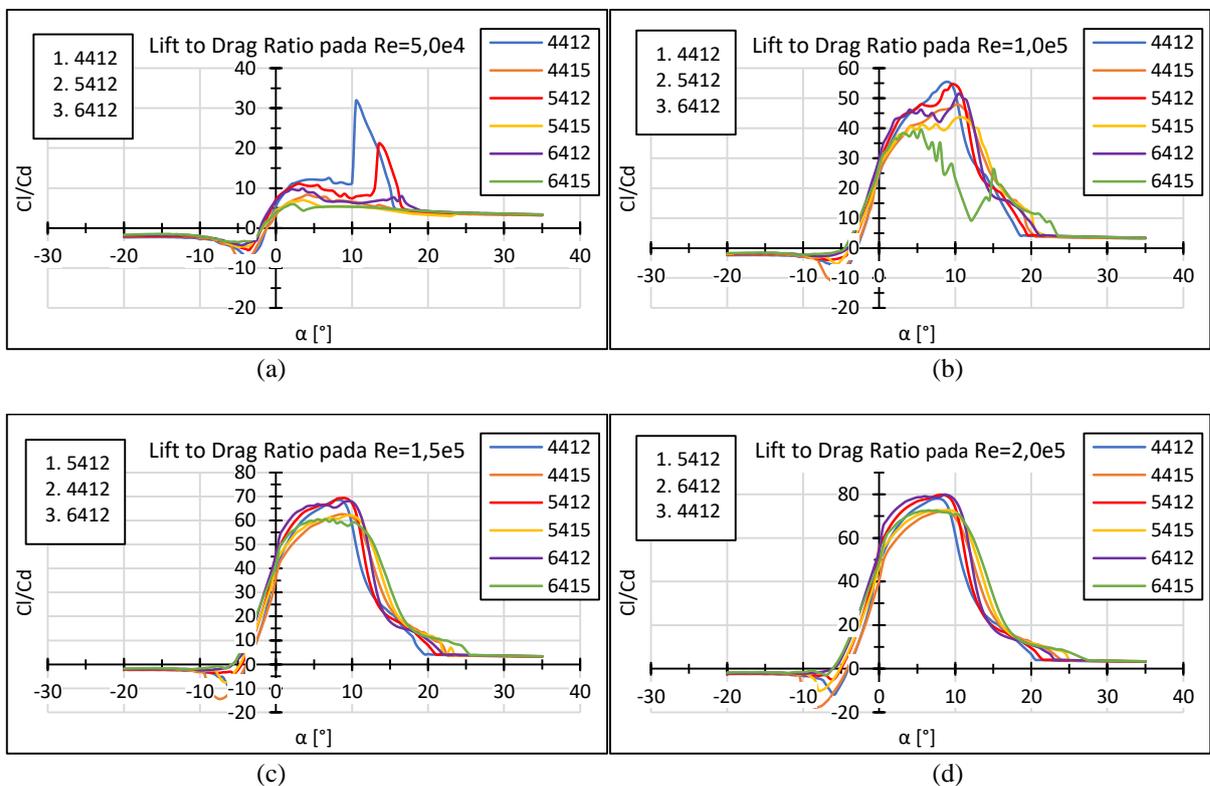
$$dF_N = \sigma' \pi \rho \frac{U^2(1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) r dr \tag{3}$$

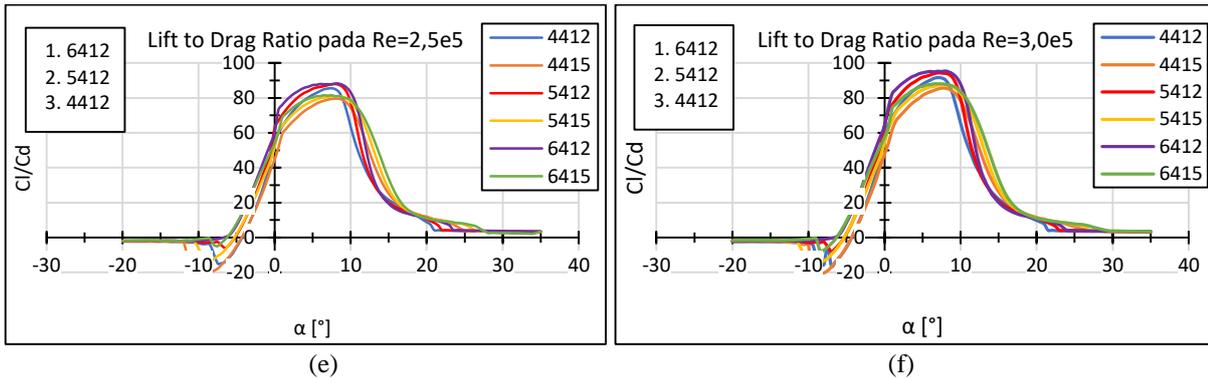
$$dQ = \sigma' \pi \rho \frac{U^2(1-a)^2}{\sin^2 \varphi} (C_l \sin \varphi + C_d \cos \varphi) r^2 dr \tag{4}$$

Dimana σ' adalah soliditas lokal, a adalah rasio penurunan kecepatan masuk dengan kecepatan angin bebas, dan φ adalah sudut relatif datang angin.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan awal mengenai perkiraan rentang nilai Re yang akan dialami turbin ditunjukkan oleh Gambar 3. Nilai Re yang dipakai adalah: $Re=5,0e4$, $Re=1,0e5$, $Re=1,5e5$, $Re=2,0e5$, $Re=2,5e5$, dan $Re=3,0e5$. Setiap profil *airfoil* lalu disimulasikan pada Qblade untuk setiap bilangan Reynolds yang dipakai.

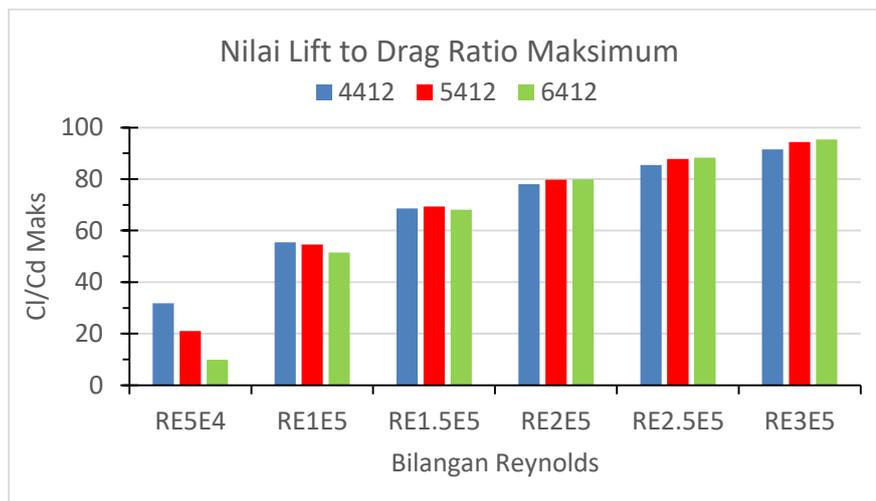




Gambar 5. Nilai Lift to Drag Ratio pada Sudut Serang Tertentu (a) $Re = 5,0e4$, (b) $Re = 1,0e5$, (c) $Re = 1,5e5$, (d) $Re = 2,0e5$, (e) $Re = 2,5e5$, dan (f) $Re = 3,0e5$

Hasil simulasi aerodinamika pada Gambar 5 menunjukkan kurva Cl/Cd terhadap nilai α pada beberapa nilai bilangan Reynolds. Dapat disimpulkan pada Gambar 5, bahwa nilai Cl/Cd pada *airfoil* XX15 memiliki nilai yang lebih rendah dari *airfoil* XX12 pada semua rentang bilangan Reynolds. Hal ini menunjukkan ketebalan *airfoil* mempengaruhi secara negatif terhadap performa Cl/Cd *airfoil* [17], [22]. Kecenderungan yang berbeda ditunjukkan ukuran *camber* yang lebih besar. Pada nilai bilangan Reynolds yang tinggi ($2,5e5$ dan $3,0e5$) *airfoil* NACA 6412 menempati urutan yang terbaik, disusul oleh ukuran *camber* yang lebih mengecil. Terlihat pada gambar tersebut bahwa NACA 4412 memiliki nilai Cl/Cd yang paling tinggi pada rentang bilangan Reynolds $5,0e4-1,5e5$, walaupun puncak yang dihasilkan memiliki rentang α yang sempit. Sedangkan pada rentang bilangan Reynolds lebih dari $2,0e5$, nilai Cl/Cd dari NACA 4412 sedikit lebih kecil dari NACA 5412 serta NACA 6412. Begitu pula nilai Cl/Cd untuk NACA 4415, NACA 5415, dan 6415, tidak lebih tinggi dari NACA seri XX12. Oleh karena itu, pada Gambar 6 ditunjukkan perbandingan nilai Cl/Cd pada NACA XX12 saja.

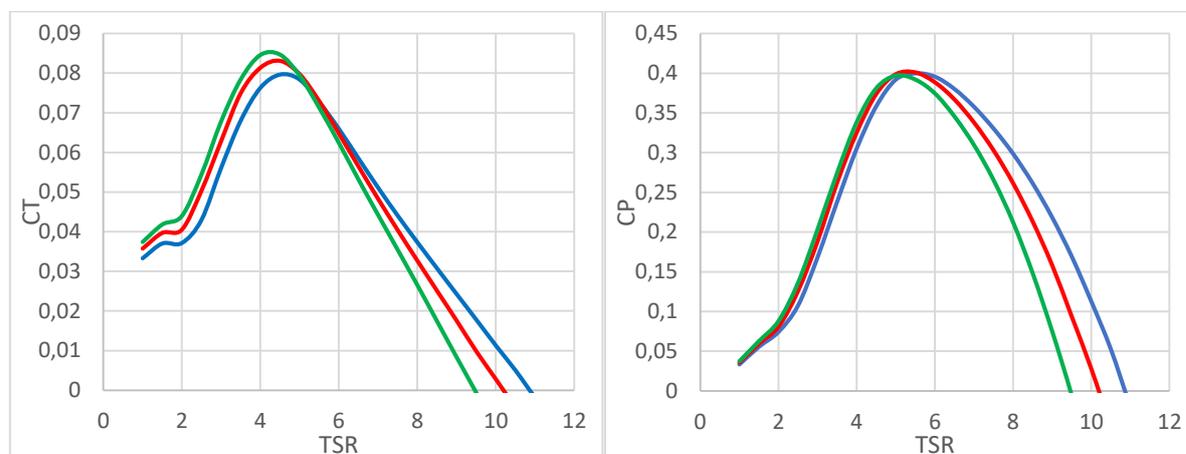
Dominasi nilai Cl/Cd dari NACA 4412 terlihat lebih jelas pada Gambar 6 dan Gambar 7. Terlihat pada nilai Re antara $2,0e5$ hingga $3,0e5$ nilai Cl/Cd dari NACA 4412 meski tidak lebih tinggi dari NACA 5412 dan 6412, namun selisih nilai antar ketiga *airfoil* tersebut tidaklah besar. Tebal *airfoil* NACA sebesar 12% menghasilkan nilai Cl/Cd yang lebih besar dibandingkan dengan tebal 15%. Sehingga, NACA 4412, 5412 dan 6412 akan digunakan sebagai profil bilah pada perhitungan performa turbin angin menggunakan QBlade.



Gambar 6. Nilai Lift to Drag Ratio Maksimum Airfoil NACA 4412, 5412 dan 6412

Berikutnya adalah proses ekstrapolasi nilai Cl dan Cd untuk sudut serang hingga 360° pada bilangan Reynolds $5,0e4$ hingga $3,0e5$. Metoda ekstrapolasi yang digunakan adalah metode ekstrapolasi Montgomery. Pengaturan $A+/B+$ dan $A-/B-$ disesuaikan agar tercapai garis Cl dan Cd yang kontinu pada sudut α positif dan negatif. Begitu pula pengaturan *slope* disesuaikan agar memiliki garis Cl dan Cd yang kontinu dan memiliki kemiringan garis Cl dan Cd yang serupa antara hasil ekstrapolasi dengan nilai data polarnya. Hasil ekstrapolasi Cl dan Cd digunakan untuk perhitungan pada elemen bilah dari pangkal hingga ujung. Kemudian nilai torsi per elemen bilah (dr) pada Persamaan 3 dapat diintegrasikan pada seluruh elemen bilah yang disimulasikan

menggunakan QBlade. Hasil simulasi tersebut adalah diantaranya nilai koefisien torsi dan koefisien performa (CP) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR).



Gambar 7. Nilai koefisien torsi (CT) koefisien performa (CP) terhadap TSR

Tampak pada Gambar 7 hasil perhitungan performa turbin berupa kurva koefisien torsi (CT) terhadap TSR. Untuk turbin dengan bilah NACA 6412 lebih baik untuk nilai TSR lebih dari 5 dibandingkan dua varian yang lain karena memiliki nilai koefisien torsi yang lebih besar pada rentang TSR yang lebih rendah. Hal ini baik untuk kondisi kecepatan angin yang rendah. Koefisien torsi (CT) untuk nilai TSR dibawah 5 memiliki nilai yang lebih besar. Hal ini berkaitan dengan nilai Cl/Cd yang besar pada bilangan Reynolds yang kecil pada bilah NACA 4412, dan nilai Cl/Cd yang rendah pada bilangan Reynolds yang tinggi untuk NACA 6412. Dapat disimpulkan bahwa besar nilai Cl/Cd terhadap bilangan Reynolds berkorelasi lurus dengan nilai koefisien torsi (CT) terhadap TSR.

Sedangkan pada koefisien performa (CP), nilai maksimum diantara ketiga *airfoil* tidak memiliki banyak perbedaan. NACA 5412 memiliki CP yang sedikit lebih tinggi jika dibandingkan dengan bilah yang lain pada nilai TSR di bawah 5. Sedangkan NACA 4412 memiliki nilai koefisien performa yang lebih tinggi pada nilai TSR di atas 5. Hal ini berkorelasi langsung terhadap koefisien torsi (CT) NACA 4412 yang memiliki torsi yang lebih besar pada TSR di atas 5. Namun demikian, besarnya perbedaan nilai CP pada TSR yang lebih tinggi jauh lebih signifikan jika dibandingkan dengan besarnya perbedaan pada nilai TSR di bawah 5. Nilai CP yang lebih tinggi pada nilai TSR yang tinggi akan lebih menguntungkan kerja generator. Penggunaan TSR yang lebih tinggi akan berpengaruh pada jumlah polar generator yang lebih sedikit dan ukuran generator yang lebih kecil. Oleh karena itu bilah NACA 4412 lebih diinginkan, karena memiliki cakupan operasi yang lebih luas dan memiliki nilai CP yang lebih besar pada nilai TSR di atas 5.

4. KESIMPULAN

Metoda pemilihan bilah turbin angin poros horizontal bilah tanpa tirus dan puntir telah dilakukan. Metoda ini disimulasikan menggunakan modul X-foil pada program Q-Blade v0.96. Enam bilah yang dibandingkan adalah NACA 4412, 4415, 5412, 5415, 6412, dan 6415. Setelah dihitung nilai Cl/Cd , tiga bilah dipilih (NACA 4412, 5412, dan 6412) untuk dilanjutkan menggunakan simulasi performa TASH. Ketiga bilah ini memiliki titik balik koefisien torsi dan performa pada nilai TSR 5, dimana NACA 4412 memiliki nilai CT dan CP yang lebih tinggi pada TSR di atas 5. NACA 4412 dipilih menjadi bilah terbaik karena memiliki karakteristik cakupan operasi yang lebih luas dengan nilai CP yang lebih besar pada cakupan TSR di atas 5.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Renewable Energy Agency, *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, vol. 1. 2023. [Online]. Available: www.irena.org
- [2] S. Martosaputro and N. Murti, "Blowing the Wind Energy in Indonesia," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 273–282. doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.225.
- [3] R. K. Singh and M. R. Ahmed, "Blade Design and Performance Testing of a Small Wind Turbine Rotor for Low Wind Speed Applications," *Renew Energy*, vol. 50, pp. 812–819, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.08.021.

-
- [4] D. Nongdhar and B. Goswami, "Design of Micro Wind Turbine for Low Wind Speed Areas: A Review," *ADB Journal of Electrical and Electronics Engineering (AJEEE)*, vol. 2, 2018, [Online]. Available: www.tinyurl.com/ajeee-adbu
- [5] S. Fuentes, V. Salgado, C. Troya, G. Moreno, and J. Molina, "Airfoil Selection Methodology for Small Wind Turbines," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 6, no. 4, pp. 1410–1415, 2016.
- [6] M. Mohammadi, A. Mohammadi, and S. Farahat, "A New Method for Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Optimization," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, Feb. 2016, doi: 10.14710/ijred.5.1.1-8.
- [7] E. Douvi, D. P. Margaritis, and E. C. Douvi, "Aerodynamic Characteristics of S809 VS . NACA 0012 Airfoil for Wind Turbine Applications," in *International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering*, 2012, pp. 4–7. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/257652217>
- [8] R. Kumar Gupta, V. Warudkar, R. Purohit, and S. Singh Rajpurohit, "Modeling and Aerodynamic Analysis of Small Scale, Mixed Airfoil Horizontal Axis Wind Turbine Blade," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 5370–5384. doi: 10.1016/j.matpr.2017.05.049.
- [9] D. B. Saefudin, W. Pisenso, D. R. Hakim, J. T. Mesin, U. Jenderal, and A. Yani, "Kajian Keserupaan Parameter Kinerja Miniatur dan Prototipe Turbin Angin Sumbu Horizontal," *Jurnal Teknik Unjani*, vol. 17, no. 02, pp. 60–68, 2018, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- [10] P. Sutikno, U. Jenderal, A. Yani, and D. B. Saepudin, "Design and Blade Optimization of Contra Rotation Double Rotor Wind Turbine," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, vol. 11, no. 01, pp. 115301–7474, 2011, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228900747>
- [11] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajaya, and V. H. Krishna, "A Review on Small Scale Wind Turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1351–1371, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.027.
- [12] M. A. Alfaridzi and R. Setiawan, "Analisis Performa Bilah Taperless Dengan Airfoil NACA 4412 Pada Horizontal Axis Wind Turbine TSD 500 Di PT Lentera Bumi Nusantara," *Jurnal Teknik Mesin dan Pembelajaran*, vol. 3, no. 2, pp. 64–73, 2020, [Online]. Available: <http://journal2.um.ac.id/index.php/jtmp>
- [13] H. Yang, W. Shen, H. Xu, Z. Hong, and C. Liu, "Prediction of the Wind Turbine Performance by Using BEM with Airfoil Data Extracted from CFD," *Renew Energy*, vol. 70, pp. 107–115, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.05.002.
- [14] M. T. Velázquez, M. V. Del Carmen, J. A. Francis, L. A. M. Pacheco, and G. T. Eslava, "Design and Experimentation of a 1 MW Horizontal Axis Wind Turbine," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 02, no. 01, pp. 9–16, 2014, doi: 10.4236/jpee.2014.21002.
- [15] V. Dehouck, M. Lateb, J. Sacheau, and H. Fellouah, "Application of the Blade Element Momentum Theory to Design Horizontal Axis Wind Turbine Blades," *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 140, no. 1, Feb. 2018, doi: 10.1115/1.4038046.
- [16] M. K. Chaudhary and A. Roy, "Design and Optimization of a Small Wind Turbine Blade for Operation at Low Wind Speed," *World Journal of Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 83–94, Feb. 2015, doi: 10.1260/1708-5284.12.1.83.
- [17] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, vol. 9783642271519. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-27151-9.
- [18] J. L. Tangier and D. M. Somers, "NREL Airfoil Families for HAWTs," 1995.
- [19] S. V. K. Murugan, "QUANTIFYING ERRORS IN PITCH ANGLE POSITION USING BEM THEORY," Uppsala Universitet, Uppsala, 2021.
- [20] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2nd ed. Wiley, 2010.
- [21] N. Buckman, "Wind Turbine Aerodynamics: Theory of Drag and Power," Mar. 2015.
- [22] J. Winslow, H. Otsuka, B. Govindarajan, and I. Chopra, "Basic understanding of airfoil characteristics at low Reynolds numbers (104–105)," *J Aircr*, vol. 55, no. 3, pp. 1050–1061, 2018, doi: 10.2514/1.C034415.