

# REKONSTRUKSI BLADE TURBIN ANGIN DI DAERAH PEDESAAN JENEPONTO

<sup>1</sup>Viktus Kolo Koten, <sup>2</sup>Jeremias Leda, <sup>3</sup>Inong Oskar, <sup>4</sup>Ignasius Igo Asin

<sup>1</sup>victus\_koten@yahoo.com, <sup>2</sup>jeremias\_leda@yahoo.com,

<sup>3</sup>inong\_oskar@lecturer.uajm.ac.id, <sup>4</sup>asisggmucf@gmail.com.

<sup>1,3,4</sup>Jurusan Mesin, <sup>2</sup>Jurusan Elektro, <sup>1-4</sup>Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Makassar.

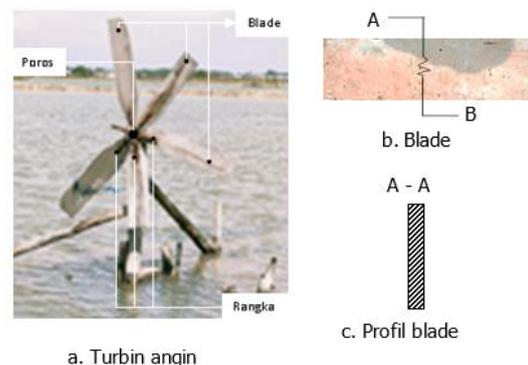
**Abstract:** *The profile of the wind turbine blade used by salt farmers in Paccelang Village, Jeneponto Regency, South Sulawesi Province is rectangular shape, certain size, and made of wood. Although wood is easy to shape and can be found in the village, the blade size is too large which causes the blade to bend and break easily. In addition, the rectangular blade profile produces static characteristics that are not optimal. This article aims to review and recommend blade profile shapes with certain sizes according to the needs of salt farmers. The method used is numerical. The blade profiles in Paccelang Village, NACA 0010, and NACA 0020 blade profiles were formed to the appropriate size and assessed for their characteristics numerically. The results of the review recommend an applicable NACA 0010 blade profile.*

**Keywords:** *Blade profile; Aerodynamic characteristics; Reconstruction numerically.*

## 1. PENDAHULUAN.

Profil blade persegi panjang merupakan bentuk profil blade pertama yang digunakan ketika turbin angin multi blade ditemukan pada tahun 1900-an. Untuk peningkatan kinerja turbin angin dan perbaikan karakteristik aerodinamik static blade, profil blade persegi panjang diubah bentuknya menjadi profil setengah lingkaran. Kajian tentang profil blade persegi panjang dan setengah lingkaran telah dilakukan oleh V. H. Morcos [1] yang memperlihatkan bahwa profil blade setengah lingkaran lebih baik dari pada profil blade persegi panjang. Seiring dengan perkembangan teknologi, profil blade persegi panjang dan setengah lingkaran telah dikembangkan menjadi profil-profil blade standar seperti *the National Renewable Energy Laboratory (NREL), National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Delft University of Technology (DELFT), Riso, Joukowski, Wortman FX* dan lain-lain. Kajian tentang penggunaan profil blade standar tersebut telah dilakukan oleh M. Serdar Genc dkk [2 - 20]. Meskipun demikian, para petani garam di Desa Paccelang, Kabupaten Jeneponto, Propinsi Sulawesi Selatan masih menggunakan profil persegi panjang. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji dan merekomendasikan bentuk

dan ukuran profil blade turbin angin untuk kebutuhan masyarakat petani garam di Desa Paccelang.



**Gambar 1.** Turbin angin multi blade

Gambar 1a memperlihatkan sebuah turbin angin multi blade yang digunakan oleh para petani di Desa Paccelang, Kabupaten Jeneponto, Propinsi Sulawesi Selatan. Blade turbin dari gambar 1a diperlihatkan pada Gambar 1b. Gambar 1c memperlihatkan potongan atau penampang (profil) blade dari Gambar 1b. Dalam aplikasinya, profil blade seperti ini mudah bengkok karena efek gaya angkat (*lift*), gaya seret (*drag*), dan momen yang terjadi akibat interaksinya dengan fluida sekitar. Selain itu, profil blade dan *pitch angle* yang diterapkan pada turbin

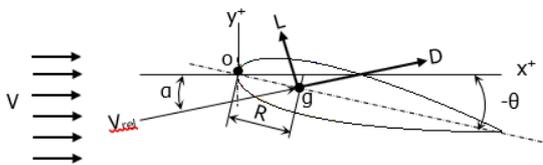
tidak dapat menghasilkan karakteristik aerodinamik static yang maksimal. Berdasarkan Gambar 2, persamaan gaya angkat, gaya seret, dan momen yang terjadi pada profil blade dapat ditulis dalam bentuk koefisien tanpa satuan berturut-turut seperti persamaan (1), (2), dan (3).

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho AV^2 R} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho VC}{\mu} \quad (4)$$



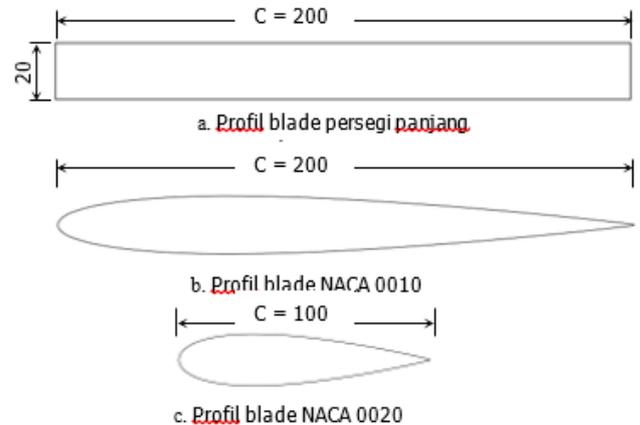
**Gambar 2.** Gaya-gaya yang terjadi pada profil blade

L, D, M,  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$ ,  $\rho$ , A, V,  $V_{rel}$ , R, C, g,  $\mu$ , o,  $\alpha$ , dan  $\theta$  berturut-turut adalah gaya angkat, gaya drag, momen, koefisien lift, koefisien drag, koefisien momen, densitas udara, luas penampang, kecepatan fluida, kecepatan relative, jari-jari, chord blade, pusat grafitasi, viskositas dinamik, pusat perputaran, angle of attack, dan pitch angle.

**2. METODE**

Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah numerik. Gambar 3a memperlihatkan profil blade persegi panjang dan ukuran yang ada pada petani garam di Desa Paccelang, Kabupaten Jeneponto, Propinsi Sulawesi Selatan. Gambar 3b dan 3c memperlihatkan profil standar NACA 0010 dan NACA 0020 beserta ukurannya masing-masing. Profil persegi panjang, NACA 0010, dan NACA 0020 memiliki ketebalan yang sama. Panjang chord profil persegi panjang sama dengan panjang chord profil NACA 0010. Panjang chord profil NACA 0020 adalah setengah dari panjang chord NACA 0010. Ketebalan profil dan Panjang chord disesuaikan dengan ukuran papan yang tersedia di pasar-pasar tradisional agar lebih mudah dalam proses pengadaan.

Profil persegi panjang dibentuk secara numerik menggunakan software Autodesk Inventor versi edukatif. Profil blade persegi panjang dimasukan pada domain seperti yang dilakukan oleh Viktus Kolo Koten dkk [21]. Domain dibagi-bagi (*meshing*) menjadi beberapa elemen yang sangat kecil. Profil blade persegi panjang dan domain yang telah dibagi-bagi dieksport ke ANSYS Fluent versi edukatif untuk dianalisis karakteristik aerodinamik statiknya. Sifat aliran ditentukan berdasarkan bilangan Reynolds. Besarnya bilangan Reynolds ditentukan dari persamaan (4). Karakteristik profil blade yang dapat dilihat dan didokumentasikan meliputi koefisien lift, koefisien drag, koefisien momen, dan distribusi tekanan sepanjang chord blade. Proses pembentukan dan analisis profil blade NACA 0010 dan NACA 0020 dilakukan dengan cara yang sama seperti proses pembentukan dan analisis profil persegi panjang. Untuk menentukan pitch angle optimal terhadap sumbu poros turbin, profil blade yang sebelumnya pada 0° diatur lagi pada posisi 4°, -4°, 8°, -8°, 16°, dan -16°.



**Gambar 3.** Profil blade turbin angin yang dikaji.

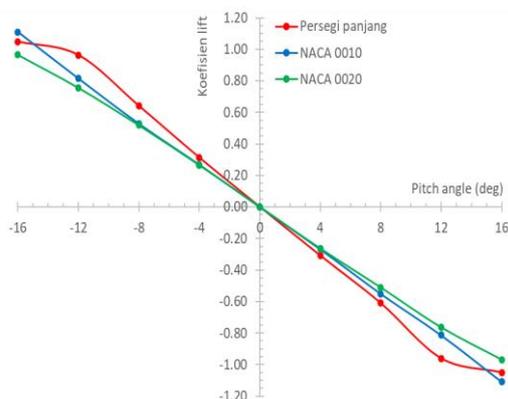
**3. HASIL DAN PEMBAHASAN.**

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah besaran-besaran standar dalam karakteristik aerodinamik static yang meliputi koefisien lift, koefisien drag, perbandingan koefisien lift dengan koefisien drag ( $C_L/C_D$ ), pitch angle optimal, koefisien momen, dan distribusi tekanan. Secara numerik, beberapa karakteristik seperti ini juga pernah dilakukan oleh Taehwan Cho dkk [22 - 30]. Meskipun demikian, kajian-kajian tersebut dilakukan pada profil blade,

ukuran, parameter input, dan parameter lainnya yang berbeda dengan parameter kajian ini. Karakteristik dari tiap besaran aerodinamik static dalam kajian ini diuraikan sebagai berikut.

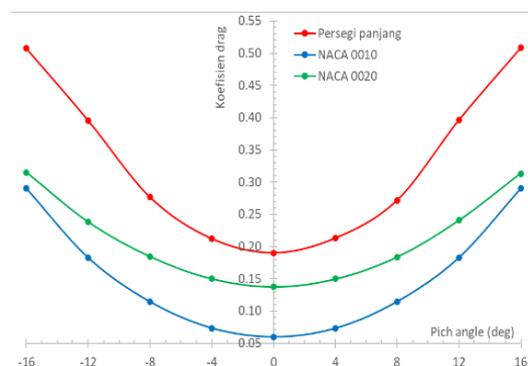
**Koefisien Lift.** Gambar 4 memperlihatkan grafik hubungan antara *pitch angle* dengan koefisien *lift* untuk ketiga bentuk profil blade. Grafik pada gambar tersebut memperlihatkan bahwa koefisien *lift* yang terjadi pada profil blade persegi panjang lebih besar dari pada koefisien *lift* yang terjadi pada profil blade NACA 0010 dan NACA 0020. Pada *pitch angle* 0° sampai 14°, koefisien *lift* yang terjadi pada profil blade persegi panjang rata-rata lebih besar 39,11 % dari pada profil blade NACA 0010 dan 2,11 % lebih besar dari profil NACA 0020. Pada *pitch angle* 0° sampai -14°, koefisien *lift* yang terjadi pada profil blade persegi panjang rata-rata lebih besar 36,89 % dari pada profil blade NACA 0010 dan 3,57 % lebih besar dari pada profil NACA 0020.

Nilai koefisien *lift* yang besar mengindikasikan bahwa gaya dorong yang terjadi pada blade turbin juga besar. Sebaliknya, nilai koefisien *lift* yang kecil mengindikasikan bahwa gaya dorong yang terjadi pada blade juga kecil. Selain itu, tanda positif pada koefisien *lift* mengindikasikan bahwa profil blade dapat mengubah arah gaya angkat menjadi gaya dorong pada blade. Sebaliknya, tanda negatif pada koefisien *lift* mengindikasikan bahwa profil blade tidak dapat mengubah gaya angkat menjadi gaya dorong. Tanda negatif pada koefisien *lift* mengindikasikan bahwa profil blade mengubah gaya angkat menjadi gaya hambat atau gaya *drag* pada blade.



**Gambar 4.** Hubungan antara *pitch angle* dengan koefisien *lift*.

**Koefisien Drag.** Gambar 5 memperlihatkan grafik hubungan antara *pitch angle* dengan koefisien *drag* untuk ketiga bentuk profil blade. Grafik dari gambar tersebut memperlihatkan bahwa koefisien *drag* yang terjadi pada profil blade persegi panjang lebih besar dari pada koefisien *drag* yang terjadi pada profil blade NACA 0010 dan NACA 0020. Pada *pitch angle* 0° sampai 14°, koefisien *drag* yang terjadi pada profil blade persegi panjang rata-rata lebih besar 148,235 % dari pada profil blade NACA 0010 dan 51,04 % lebih besar dari pada profil NACA 0020. Pada *pitch angle* 0° sampai -14°, koefisien *drag* yang terjadi pada profil blade persegi panjang rata-rata lebih besar 148,489 % dari pada profil blade NACA 0010 dan 51,31 % lebih besar dari pada profil NACA 0020.

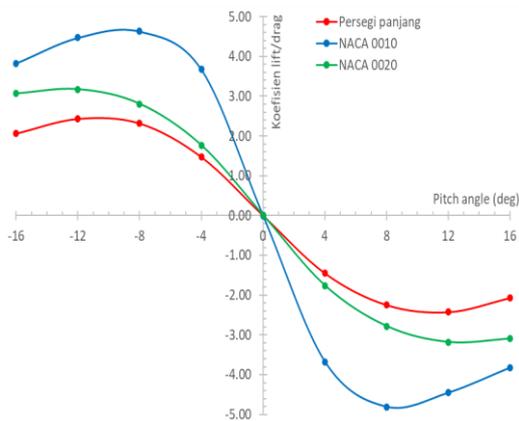


**Gambar 5.** Hubungan antara *pitch angle* dengan koefisien *drag*.

Nilai koefisien *drag* yang besar mengindikasikan bahwa gaya hambat yang terjadi pada blade turbin juga besar. Sebaliknya, nilai koefisien *drag* yang kecil mengindikasikan bahwa gaya hambat yang terjadi pada blade juga kecil. Gaya *drag* merupakan suatu besaran dalam karakteristik aerodinamik static yang menghambat pergerakan maju blade turbin. Grafik pada gambar 5 juga memperlihatkan bahwa konstruksi keseluruhan profil blade pada jenis turbin ini tidak dapat mengubah gaya hambat menjadi gaya dorong.

**Perbandingan Koefisien Lift dan Drag (C<sub>L</sub>/C<sub>D</sub>).** Gambar 6 memperlihatkan grafik hubungan antara *pitch angle* dengan C<sub>L</sub>/C<sub>D</sub> untuk ketiga bentuk profil blade. Grafik pada gambar tersebut memperlihatkan bahwa C<sub>L</sub>/C<sub>D</sub> yang terjadi pada profil blade NACA 0010 lebih besar dari pada C<sub>L</sub>/C<sub>D</sub> yang terjadi

profil blade NACA 0020 dan profil blade persegi panjang. Pada *pitch angle*  $0^\circ$  sampai  $14^\circ$ ,  $C_L/C_D$  yang terjadi pada profil blade NACA 0010 rata-rata lebih besar 15,269 % dari pada profil blade NACA 0020 dan 19,873 % lebih besar dari pada profil blade persegi panjang. Pada *pitch angle*  $0^\circ$  sampai  $-14^\circ$ ,  $C_L/C_D$  yang terjadi pada profil blade NACA 0010 rata-rata lebih besar 13,904 % dari pada profil blade NACA 0020 dan 16,049 % lebih besar dari pada profil blade persegi panjang.



**Gambar 6.** Hubungan antara *pitch angle* dengan  $C_L/C_D$

Nilai  $C_L/C_D$  yang besar mengindikasikan bahwa gaya dorong yang terjadi pada blade turbin juga besar. Sebaliknya, nilai  $C_L/C_D$  yang kecil mengindikasikan bahwa gaya dorong yang terjadi pada blade juga kecil. Selain itu, tanda positif pada  $C_L/C_D$  mengindikasikan bahwa profil blade dapat mengubah gaya angkat menjadi gaya dorong pada blade. Sebaliknya, tanda negatif pada  $C_L/C_D$  mengindikasikan bahwa profil blade tidak dapat mengubah gaya angkat menjadi gaya dorong. Tanda negatif pada  $C_L/C_D$  mengindikasikan bahwa profil blade mengubah gaya angkat menjadi gaya seret atau gaya hambat.

Karakteristik aerodinamik static  $C_L/C_D$  merupakan salah satu karakteristik utama dalam penentuan jenis profil blade yang digunakan atau diterapkan pada suatu konstruksi turbin. Meskipun gaya *lift* yang terjadi pada profil blade persegi panjang lebih besar, gaya *drag* yang dihasilkan pada profil ini juga besar. Hal ini mengindikasikan bahwa profil blade persegi panjang dapat mengubah gaya *lift* menjadi gaya dorong pada suatu kondisi tetapi pada kondisi yang

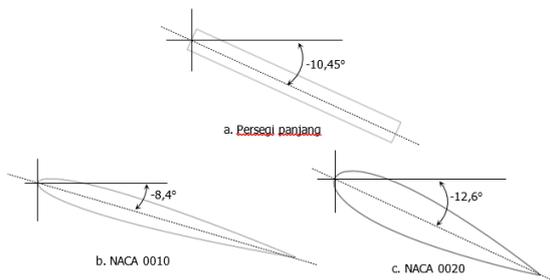
lain, gaya hambat atau gaya seret yang terjadi pada profil blade ini juga besar; nilai perbandingan maksimum  $C_L/C_D$  dari profil blade persegi panjang hanya mencapai 2,517. Profil blade persegi panjang tidak dapat direkomendasikan penggunaan dan pemasangannya pada turbin angin yang ada pada petani.

Meskipun gaya *lift* yang terjadi pada profil blade NACA 0010 lebih kecil 27,558 % dari pada profil persegi panjang, gaya *drag* yang terjadi pada profil NACA 0010 juga lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa profil blade NACA 0010 dapat mengubah gaya *lift* menjadi gaya dorong yang lebih besar karena gaya hambat yang kecil; nilai perbandingan maksimum  $C_L/C_D$  dari profil blade NACA 0010 mencapai 4,664. Profil blade NACA 0010 dapat direkomendasikan penggunaan dan pemasangannya pada turbin angin yang ada pada petani.

Meskipun gaya *lift* yang terjadi pada profil blade NACA 0020 lebih kecil 2,928 % dari pada profil persegi panjang, gaya *drag* yang terjadi pada profil blade NACA 0020 juga lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa profil blade NACA 0020 dapat mengubah gaya *lift* menjadi gaya dorong yang lebih besar; nilai perbandingan maksimum  $C_L/C_D$  dari profil blade NACA 0020 mencapai 3,173. Profil blade NACA 0020 dapat direkomendasikan penggunaan dan pemasangannya pada turbin angin yang ada pada petani.

**Pitch Angle Optimal.** Gambar 7a sampai 7c memperlihatkan *pitch angle* optimal pada profil blade persegi panjang, NACA 0010, dan NACA 0020 secara berturut-turut sebesar  $-10.45^\circ$ ,  $-8.4^\circ$ , dan  $12.6^\circ$ . *Pitch angle* optimal yang terlalu besar pada suatu profil blade mengindikasikan adanya pengecilan luas penampang blade pemanen energi angin. Pengecilan luas penampang pemanen energi menyebabkan berkurangnya energi kinetik pada angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik pada poros turbin. Sebaliknya, *pitch angle* optimal yang kecil pada suatu profil blade mengindikasikan adanya perluasan penampang yang menyebabkan bertambahnya energi yang dapat dipanen. Perluasan penampang pemanen energi menyebabkan bertambahnya energi kinetik

pada angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik pada poros turbin.

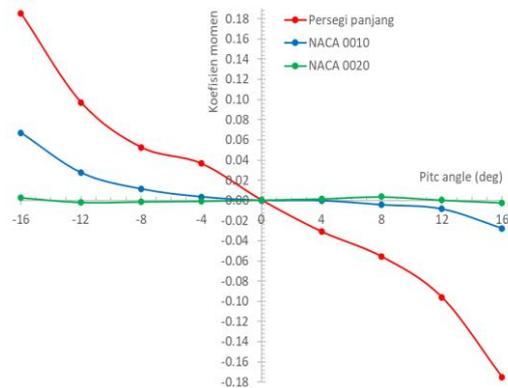


**Gambar 7.** *Pitch angle* optimal pada berbagai profil blade.

Hasil kajian *pitch angle* optimal tersebut menunjukkan bahwa profil blade NACA 0010 menghasilkan *pitch angle* optimal yang lebih kecil besar dari pada profil blade persegi panjang dan NACA 0020. Profil blade NACA 0010 dapat direkomendasikan untuk diterapkan pada petani.

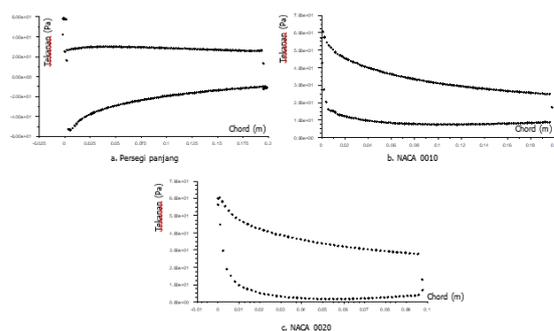
**Koefisien Momen.** Gambar 8 memperlihatkan grafik hubungan antara *pitch angle* dengan koefisien momen untuk ketiga bentuk profil blade. Grafik pada gambar 8 tersebut memperlihatkan bahwa koefisien momen yang terjadi pada profil blade persegi panjang lebih besar dari pada koefisien momen yang terjadi pada profil blade NACA 0010 dan NACA 0020. Pada *pitch angle*  $-14^{\circ} \leq 0^{\circ} \geq 14^{\circ}$ , koefisien momen yang terjadi pada profil blade persegi panjang rata-rata lebih besar 46,633 % dari profil NACA 0010 dan 96,534 % lebih besar dari profil NACA 0020.

Nilai koefisien momen yang besar mengindikasikan besarnya gaya geser atau jari-jari (jarak antara gaya geser dengan pusat perputaran profil) yang terjadi pada blade. Momen yang besar dapat menyebabkan pembengkokan pada profil blade. Sebaliknya, momen yang kecil dapat meminimalisir pembengkokan yang terjadi pada profil blade. Hasil kajian koefisien momen tersebut menunjukkan bahwa blade berprofil NACA 0020 menghasilkan koefisien momen yang lebih kecil; profil blade NACA 0020 dapat direkomendasikan penggunaan dan pemasangannya pada turbin angin yang ada pada petani.



**Gambar 8.** Hubungan antara *pitch angle* dengan koefisien momen.

**Distribusi Tekanan.** Gambar 9a sampai 9c memperlihatkan distribusi tekanan total pada profil blade persegi panjang, NACA 0010, dan NACA 0020 secara berturut-turut pada *pitch angle* optimal  $-10.45^{\circ}$ ,  $-8.4^{\circ}$ , dan  $-12.6^{\circ}$ . Hasil kajian memperlihatkan bahwa tekanan dalam satuan Pascal (Pa) pada sisi bawah profil lebih besar dari pada sisi atas profil blade. Besarnya tekanan yang terjadi pada profil blade NACA 0010 dan NACA 0020 lebih besar dari pada tekanan yang terjadi pada profil blade persegi panjang. Besarnya tekanan yang terjadi pada sisi bawah dapat menghasilkan gaya angkat yang lebih besar dari pada tekanan yang lebih kecil. Blade berprofil NACA 0010 dan NACA 0020 dapat direkomendasikan penggunaan dan pemasangannya pada turbin angin yang ada pada petani.



**Gambar 9.** Distribusi tekanan sepanjang *chord*.

#### 4. KESIMPULAN

Sesuai dengan hasil penelitian yang diperoleh dan kajian yang dilakukan maka blade berprofil NACA 0020 dengan chord 100 mm adalah blade yang direkomendasikan untuk diterapkan pada

turbin angin yang ada pada petani garam di Desa Paccelang, Kabupaten Jeneponto, Propinsi Sulawesi Selatan.

##### 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Atma Jaya Makassar (LPPM-UAJM) yang telah membiayai penelitian dan pembuatan artikel ini.

##### DAFTAR PUSTAKA.

- [1] V. H. Morcos, "Aerodynamic performance analysis of horizontal axis wind turbines," *Renew. Energy*, vol. 4, no. 5, pp. 505–518, 1994, doi: 10.1016/0960-1481(94)90213-5.
- [2] M. S. Genç, I. Karasu, and H. Hakan Açikel, "An experimental study on aerodynamics of NACA2415 aerofoil at low Re numbers," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 39, pp. 252–264, 2012, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.029.
- [3] M. Moshfeghi, S. Shams, and N. Hur, "Aerodynamic performance enhancement analysis of horizontal axis wind turbines using a passive flow control method via split blade," *Jnl. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 167, no. April, pp. 148–159, 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.04.001.
- [4] C. Bai and W. Wang, "Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 63, pp. 506–519, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.078.
- [5] A. K. Wright and D. H. Wood, "The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 92, no. 14–15, pp. 1265–1279, 2004, doi: 10.1016/j.jweia.2004.08.003.
- [6] N. Buckney, A. Pirrera, S. D. Green, and P. M. Weaver, "Structural efficiency of a wind turbine blade," *Thin-Walled Struct.*, vol. 67, pp. 144–154, 2013, doi: 10.1016/j.tws.2013.02.010.
- [7] A. Sedaghat, M. El Haj Assad, and M. Gaith, "Aerodynamics performance of continuously variable speed horizontal axis wind turbine with optimal blades," *Energy*, vol. 77, pp. 752–759, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.09.048.
- [8] H. M. Lee and Y. Wu, "An experimental study of stall delay on the blade of a horizontal-axis wind turbine using tomographic particle image velocimetry," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 123, pp. 56–68, 2013, doi: 10.1016/j.jweia.2013.10.005.
- [9] T. Kim, S. Oh, and K. Yee, "Improved actuator surface method for wind turbine application," *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 16–26, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.11.002.
- [10] A. M. Abdelsalam, K. Boopathi, S. Gomathinayagam, S. S. Hari Krishnan Kumar, and V. Ramalingam, "Experimental and numerical studies on the wake behavior of a horizontal axis wind turbine," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 128, pp. 54–65, 2014, doi: 10.1016/j.jweia.2014.03.002.
- [11] K. A. R. Ismail, T. Canale, and F. A. M. Lino, "Parametric analysis of Joukowski airfoil for 10-kW horizontal axis windmill," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 40, no. 4, 2018, doi: 10.1007/s40430-018-1119-3.
- [12] R. Lanzafame and M. Messina, "Design and performance of a double-pitch wind turbine with non-twisted blades," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 1413–1420, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.09.004.
- [13] U. M. Mamadaminov, "Review of Airfoil Structure for Wind Turbine Blades," *Dep. Electr. Eng. Renew. Energy REE*, 515., vol. 1, no. September 2013, pp. 1–8, 2013.
- [14] S. Rajakumar and D. Ravindran, "Iterative approach for optimising coefficient of power coefficient of lift and drag of wind turbine rotor," *Renew. Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 83–93, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.07.006.
- [15] J. Johansen and N. N. Sørensen, "Aerofoil characteristics from 3D CFD rotor computations," *Wind Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 283–294, 2004, doi: 10.1002/we.127.

- [16] G. R. Fischer, T. Kipouros, and A. M. Savill, "Multi-objective optimisation of horizontal axis wind turbine structure and energy production using aerofoil and blade properties as design variables," *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 506–515, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.08.009.
- [17] F. Bin Hsiao, C. J. Bai, and W. T. Chong, "The performance test of three different horizontal axis wind turbine (HAWT) blade shapes using experimental and numerical methods," *Energies*, vol. 6, no. 6, pp. 2784–2803, 2013, doi: 10.3390/en6062784.
- [18] P. Malhotra, R. W. Hyers, J. F. Manwell, and J. G. McGowan, "A review and design study of blade testing systems for utility-scale wind turbines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 284–292, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.154.
- [19] M. Ge, L. Fang, and D. Tian, "Influence of Reynolds number on multi-objective aerodynamic design of a wind turbine blade," *PLoS One*, vol. 10, no. 11, pp. 1–25, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0141848.
- [20] S. Rehman, M. Mahbub Alam, L. M. Alhems, and M. Mujahid Rafique, "Horizontal Axis Wind Turbine Blade Design Methodologies for Efficiency Enhancement, A Review," *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018, doi: 10.3390/en11030506.
- [21] V. K. Koten, S. Himran, N. Salam, and L. Sule, "Numerical Study of Darrieus Wind Turbine Blade Characteristic with Shape Changes of Trailing," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res. Vol.*, vol. 9, no. 8, pp. 1088–1096, 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.8.1088-1096.
- [22] T. Cho and C. Kim, "Wind tunnel test results for a 2/4.5 scale MEXICO rotor," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 152–156, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.08.031.
- [23] Z. Y. Liu, X. D. Wang, and S. Kang, "Stochastic performance evaluation of horizontal axis wind turbine blades using non-deterministic CFD simulations," *Energy*, vol. 73, pp. 126–136, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.05.107.
- [24] M. Akash Mohokar and M. N. W. Kale, "Effect of Angle of Twist on Small Horizontal Axis Wind Turbine Blade," *IJSRD-International J. Sci. Res. Dev.*, vol. 5, no. 09, pp. 2321–0613, 2017, [Online]. Available: [www.ijrsrd.com](http://www.ijrsrd.com)
- [25] S. Liu and I. Janajreh, "Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2012, doi: 10.1186/2251-6832-3-30.
- [26] I. Meccanica, P. Meccanica, and C. E. Carcangiu, "CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbines," Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, *Meccanica*, no. January, p. 141, 2008, [Online]. Available: <http://veprints.unica.it/84/>
- [27] B. Akay, D. Ragni, C. S. Ferreira, and G. J. W. Van Bussel, "Investigation of the root flow in a Horizontal Axis," *Wind Energy*, no. June 2011, pp. 1–20, 2013, doi: 10.1002/we.
- [28] T. D. Ashwill, "Materials and innovations for large blade structures: Research opportunities in wind energy technology," *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Dyn. Mater. Conf.*, no. May, 2009, doi: 10.2514/6.2009-2407.
- [29] I. Aer, "Static pressure measurements on a rotating and a non-rotating 2.375 m wind turbine blade. Comparison with 2D calculations," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 39, pp. 105–118, 1992.
- [30] R. Lanzafame, S. Mauro, and M. Messina, "HAWT design and performance evaluation: Improving the BEM theory mathematical models," *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 172–179, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.015.