

GEOMETRIC MORPHOMETRIC BANANA LEAF MIDRIB AS WIND TURBINE AIRFOIL PROFILE

Firlya Rosa ^{*1,2}, **Priyono Soetikno** ^{1,3,4}, **I Wayan Suweca** ¹, **Mochammad Agoes Moelyadi** ¹

¹Mechanical Engineering Study Program, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering,
Bandung Institute of Technology, Bandung, 40132, Indonesia

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Bangka Belitung,
33172, Indonesia

³Fluid Machinery Laboratory, Faculty of Mechanical and Aerospace Engineering

⁴New and Renewable Research, Bandung Institute of Technology, Bandung, 40132, Indonesia

e-mail: ^{*1} f105a@yahoo.com

Abstrak

Profil airfoil merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja turbin angin sumbu horizontal. Sejumlah penelitian telah mengadopsi bentuk dan gerak binatang baik binatang air maupun binatang yang terbang. Anatomi alami pelepah daun pisang menjadi salah satu inspirasi untuk pemodelan profil airfoil. Profil pelepah dari tujuh sampel daun pisang dipetakan dengan menggunakan teknik morfometri geometrik berbasis landmark. Analisis sampel menggunakan metode statistik dan analisis aerodinamis airfoil menggunakan perangkat lunak QBLADE dengan perubahan bilangan Reynolds mulai dari 3E5 hingga 7E5 pada interval 1E5. Ada tujuh sampel dengan variasi profil dan variasi aerodinamis yang konstan. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa semua model memiliki koefisien angkat tinggi, koefisien hambat rendah, dan glide ratio tinggi. Sampel 1 pada bilangan Reynolds 7E5 memiliki glide ratio tertinggi dengan nilai 123,07. Dari hasil analisa aerodinamis didapatkan bahwa dalam kondisi kecepatan angin rendah, profil airfoil berdasarkan morfologi pelepah pisang dapat diterima untuk turbin angin.

Kata kunci—airfoil, pelepah daun pisang, glide ratio, morfologi

Abstract

The airfoil profile is one of the factors influencing the performance of horizontal-axis wind turbines. Numerous studies have adopted the form and motion of aquatic and aerial animals. The natural anatomy of the midrib of banana leaves is one of the inspirations for modeling the airfoil profile. The midrib profiles of seven samples of banana leaves were mapped using a landmark-based geometric morphometric technique. Sample analysis utilizing statistical methods and aerodynamic analysis of airfoils operating QBLADE software with Reynolds number changes ranging from 3E5 to 7E5 at 1E5 intervals. There are seven samples with constant aerodynamic profiles and variants. All models have high lift coefficients, low drag coefficients, and high glide ratios, according to the results. Sample 1 at Reynolds number 7E5 had the highest glide ratio with a value of 123.07. In conditions of low wind speed, an airfoil profile based on the morphology of the banana midrib may be accepted for wind turbines.

Keywords— airfoil, banana leaf midrib, glide ratio, morphology

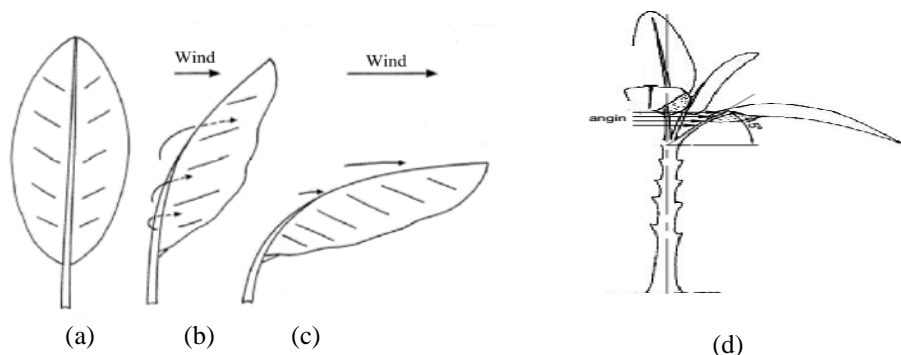
I. PENDAHULUAN

Fenomena energi yang dihasilkan dari sumber energi terbarukan semakin meningkat mengingat sumber daya fosil semakin berkurang. Beberapa energi terbarukan mulai dikembangkan dalam rangka mendukung energi yang ramah lingkungan. Pembangkit listrik yang berasal dari energi terbarukan mulai banyak dikembangkan, diantaranya bersumber pada angin, surya, biomassa dan lain sebagainya. Performansi pembangkit listrik tenaga air/bayu (PLTB) dipengaruhi berbagai aspek yang salah satunya adalah profil airfoil. Aerodinamis mempertimbangkan geometri airfoil, geometri sudu dan distribusi sudut puntir pada sudu serta massa sudu yang direncanakan. Pertimbangan-pertimbangan tersebut diharapkan mampu menghasilkan gaya angkat tinggi dan gaya hambat rendah.

Berbagai geometri airfoil didapatkan dari berbagai profil yang berasal dari alam dan terus dikembangkan, terutama morfologi airfoil dari pergerakan binatang. Beberapa pergerakan hewan yang diadaptasi diantaranya gerakan hewan di air dan di udara. Airfoil yang berasal dari morfologi dari hewan air diantaranya gerakan kepala ikan lumba-lumba yang menyerupai bentuk airfoil pada bagian ujungnya [1]. Begitu juga bentuk dari ikan sturgeon menyerupai profil airfoil [2]. Airfoil yang diadaptasi dari gerakan hewan di udara telah banyak diteliti, diantaranya morphology airfoil yang diadaptasi dari burung dan capung. Diantaranya adalah morfologi burung hantu[3][4], kepakakan sayap burung[5][6] dan morfologi sayap capung *Aeshna Cyanea*[7].

Untuk penelitian profil airfoil yang berasal dari morphology tumbuhan masih sedikit yang dilakukan, padahal Martin Ryle telah meramalkan bahwa jika blade dapat bekerja seperti pohon palem dalam kecepatan angin tinggi sehingga efisiensi konversi energi dapat ditingkatkan hingga 50%, dan material dapat dihemat sebesar 2/3[8]. Bagian dari tumbuhan memiliki karakteristik akan bergerak mengikuti gerakan arah angin dibandingkan dengan gerakan hewan yang mengikuti pergerakan naluri hewan itu sendiri.

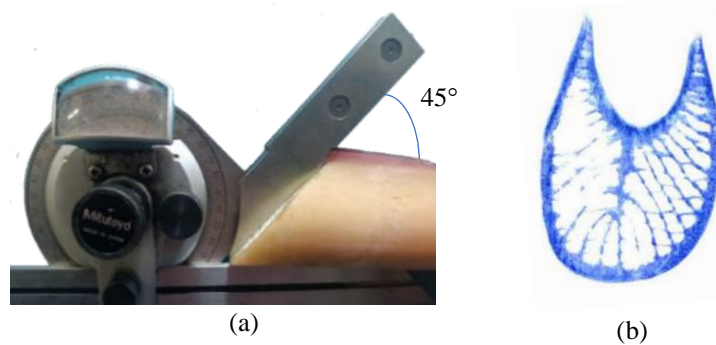
Pelepah daun pisang merupakan salah satu morfologi tumbuhan yang dapat dijadikan profil airfoil. Beberapa penampang melintang daun yang diteliti, salah satunya adalah penampang berbentuk U yang sebanding dengan pelepah daun pisang dengan jenis *Musa-x paradisiaca*. Dengan menggunakan metode numerik terhadap pengaruh bentuk penampang struktur penahan beban utama pada fungsionalitas mekanis, didapatkan susunan penampang pelepah daun pisang mempunyai kekakuan lentur yang lebih baik dibandingkan tangkai daun lainnya[9]. Selain itu, kombinasi bentuk dan struktur bagian dalam pelepah daun pisang juga mengurangi kekakuan torsi yang menyebabkan rasio puntir kelengkungan yang sangat tinggi dibandingkan dengan tangkai daun dari berbagai spesies pohon sehingga kemampuan pelepah daun pisang dalam menerima torsi berpotensi untuk dapat dijadikan bentuk profil airfoil.



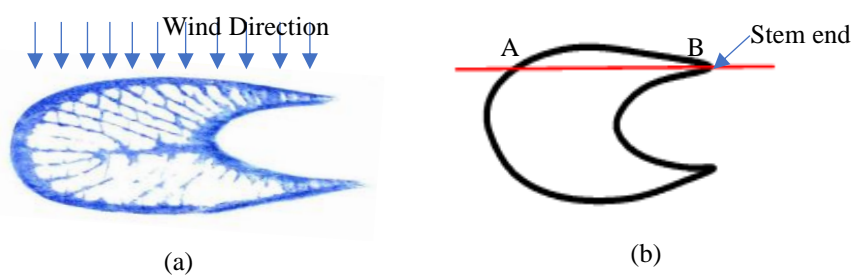
Gambar 1 Arah penekungan pelepah pisang dikarenakan angin (A) pandangan atas tangkai daun (B) peningkatan kecepatan angin daun membelok menjauh dari angin (C) penekukan daun akibat penambahan kecepatan angin[10][11] (D) rekonstruksi aliran angin pada penampang pelepah daun pisang

Selain itu, pemilihan penampang pelepah daun pisang dikarenakan kecenderungan pelepah mengikuti pergerakan angin. Kondisi pelepah angin yang mengalami penekukan mengikuti gerakan angin [10][11] menyebabkan pelepah tidak mudah patah seperti terlihat pada Gambar 1. Umumnya, daun lebar akan mengalami penekukan dan berkibaryang disebabkan oleh angin berkecepatan 5 m/s sebesar 46.54° dan 52.56° pada kecepatan angin 1 m/s[12]. Oleh karena itu, penampang pelepah pisang yang digunakan dalam penelitian ini difokuskan menggunakan pelepah yang dipotong pada sudut 45° dengan asumsi gaya angin yang terjadi akan tegak lurus terhadap permukaan penampang pelepah. Adapun penampang pelepah yang terpotong terlihat seperti pada Gambar 2.

Tidak semua morfologi pelepah daun pisang yang dijadikan profil airfoil. Hal ini diasumsikan bahwa gaya angin hanya mengenai salah satu sisi pelepah daun pisang mulai dari tangkai daun pisang (stem end) sampai dengan bagian yang sejajar dengan tangkai daun seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3(a). Oleh karena itu, pemotongan profil yang dijadikan profil airfoil dimulai dari stem end sampai dengan daerah yang sejajar dengan sumbu pelepah (titik A sampai dengan titik B) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(b).



Gambar 2 (a) Metode pemotongan 45° longitudinal profil airfoil berdasarkan morfologi pelepah pisang (b) Profil penampang pelepah daun pisang



Gambar 3 (a) Profil airfoil pelepah daun pisang (a) penentuan daerah pemotongan (b) profil permukaan yang dijadikan airfoil

2. METODE PENELITIAN

Pemetaan profil dan ukuran tumbuhan umumnya menggunakan landmark-based geometric morphometric methods (GMMs)[13]–[18] dengan menggunakan 7 sampel dari pohon pisang yang sama dengan profil pelepah seperti pada Gambar 4.

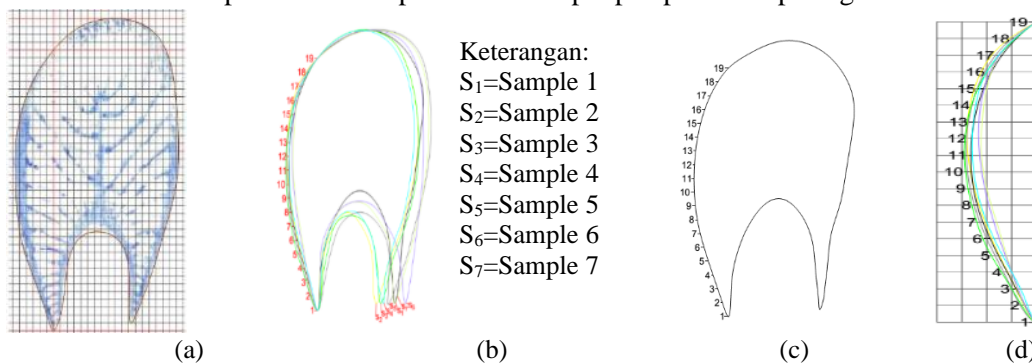
Metode landmark akan memetakan titik-titik terluar pada bagian pelepah daun pisang yang berbentuk 3 dimensi untuk dijadikan profil 2 dimensi. Penentuan tinggi profil penampang

pelepah pisang untuk semua sampel sama yang mulai dari stem end di titik A sampai dengan titik B. Dengan menempatkan koordinat x,y dijadikan sebagai acuan dengan titik arah koordinat y yang berjarak tetap. Jarak masing-masing koordinat pada arah sumbu yang sama, memastikan tinggi dari profil akan sama mulai dari titik awal sampai dengan stem end. Namun, jarak koordinat masing-masing profil arah sumbu x akan berbeda dikarenakan lebar profil pelepah daun pisang yang berbeda-beda. Arah sumbu y akan menandakan panjang chord profil airfoil dan arah sumbu x akan mengindikasikan tinggi camber dari profil airfoil.

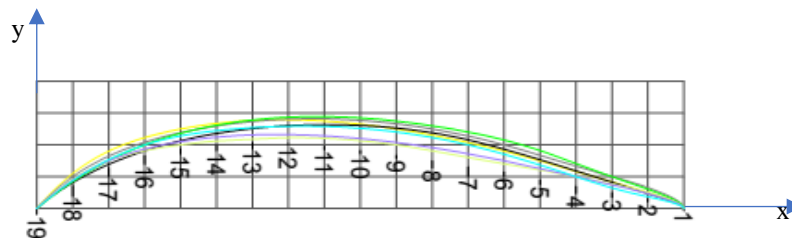
Ada 19 titik landmark yang terpilih pada pelepah daun pisang. Landmark 1 dan 19 merupakan titik stem end pelepah daun pisang. Landmark 2 – 18 merupakan titik pada jarak yang tetap pada koordinat y dengan tahapan proses pemetaan seperti pada Gambar 5. Hasil pemetaan, didapatkan bentuk awal profil airfoil dari 7 sampel pelepah daun pisang seperti terlihat pada Gambar 6. Koordinat-koordinat yang didapatkan terdapat pada Tabel 1 yang kemudian akan dilanjutkan analisa hubungan antara satu sampel dengan sampel yang lain dengan menggunakan metode statistik.



Gambar 4 Ilustrasi sampel pelepah daun pisang (a) Penamaan pelepah daun pisang (b) Proses pemilihan dan penamaan sampel pelepah daun pisang



Gambar 5 Tahapan proses pemetaan masing-masing morfologi pelepah daun pisang (a) penyamaan tinggi profil (b) hasil pemetaan profil (c) penetapan koordinat y (d) penampang yang terpotong



Gambar 6 Profile 7 sampel airfoil

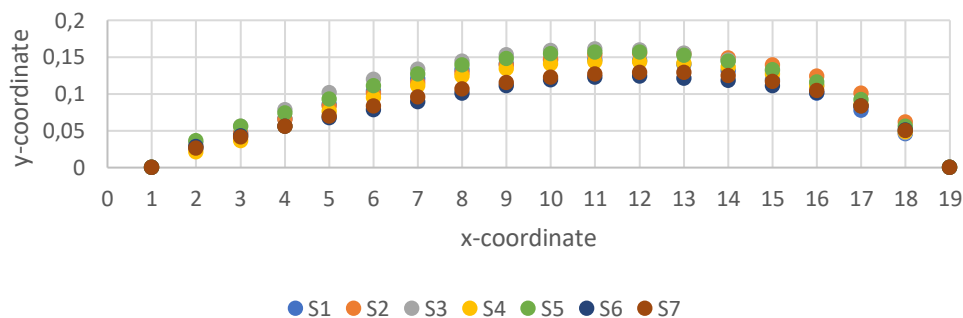
Tabel 1. Koordinat (x,y) hasil pemetaan

| Posisi Titik | Koordinat Tetap | Posisi Titik | | | | | | |
|--------------|-----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.9444 | 0.0261 | 0.0279 | 0.0335 | 0.0206 | 0.0364 | 0.028 | 0.0259 |
| 3 | 0.8889 | 0.0458 | 0.0466 | 0.0556 | 0.0359 | 0.0556 | 0.0427 | 0.0413 |
| 4 | 0.8333 | 0.0657 | 0.0648 | 0.0785 | 0.0556 | 0.0739 | 0.0556 | 0.0556 |
| 5 | 0.7778 | 0.0854 | 0.0833 | 0.1012 | 0.076 | 0.0929 | 0.0672 | 0.0695 |
| 6 | 0.7222 | 0.1037 | 0.1003 | 0.1198 | 0.0948 | 0.1111 | 0.0779 | 0.0833 |
| 7 | 0.6667 | 0.1199 | 0.1152 | 0.1335 | 0.1111 | 0.1266 | 0.0891 | 0.0955 |
| 8 | 0.6111 | 0.1323 | 0.1281 | 0.1444 | 0.1241 | 0.1389 | 0.1009 | 0.1064 |
| 9 | 0.5556 | 0.1406 | 0.1389 | 0.1527 | 0.1337 | 0.148 | 0.1111 | 0.1153 |
| 10 | 0.5 | 0.1452 | 0.1472 | 0.1582 | 0.1401 | 0.154 | 0.1185 | 0.1222 |
| 11 | 0.4444 | 0.1465 | 0.1528 | 0.1606 | 0.1434 | 0.1567 | 0.1227 | 0.1269 |
| 12 | 0.3889 | 0.1447 | 0.1551 | 0.1595 | 0.1437 | 0.1561 | 0.124 | 0.1292 |
| 13 | 0.3333 | 0.1397 | 0.1539 | 0.1546 | 0.1412 | 0.152 | 0.121 | 0.1286 |
| 14 | 0.2778 | 0.1311 | 0.1486 | 0.1453 | 0.1359 | 0.1442 | 0.118 | 0.1247 |
| 15 | 0.2222 | 0.1184 | 0.1389 | 0.1313 | 0.1268 | 0.1325 | 0.1111 | 0.1168 |
| 16 | 0.1667 | 0.1009 | 0.1238 | 0.1111 | 0.1111 | 0.1157 | 0.1011 | 0.104 |
| 17 | 0.1111 | 0.0772 | 0.1003 | 0.0834 | 0.0854 | 0.0916 | 0.0833 | 0.0833 |
| 18 | 0.0556 | 0.0452 | 0.0612 | 0.0469 | 0.0486 | 0.0556 | 0.0509 | 0.0499 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Analisa Data

Penyebaran data untuk masing-masing koordinat titik tetap mulai posisi 1 sampai dengan 19 berdasarkan Tabel 1 yang terlihat pada grafik di Gambar 7. Dari Gambar 7 terlihat perbedaan titik koordinat pada arah sumbu y yang menandakan adanya variasi bentuk profil masing-masing sampel. Umumnya puncak kurva berada pada posisi titik 11 dan 12 dengan camber tertinggi pada sampel 3 dan sampel 6 mempunyai nilai camber terendah.



Gambar 7 Sebaran titik koordinat arah sumbu y untuk masing-masing sampel

Langkah awal dengan melakukan uji korelasi menggunakan metode Pearson Correlation. Hasil uji korelasi dengan membandingkan hasil hitung statistik dengan nilai koefisien korelasi yang dinotasikan dengan huruf r. Uji korelasi akan diterima jika hasil uji korelasi, nilai r_{tabel} 0.034 untuk tingkat kepercayaan 99% lebih kecil dibandingkan dengan r_{hitung} . Selain itu dengan melihat nilai signifikansi yang dihasilkan. Jika nilai signifikansi yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan nilai tingkat kepercayaan sebesar 0.01 maka uji korelasi tersebut dapat diterima.

Uji korelasi dalam penelitian ini menghasilkan nilai r_{tabel} lebih kecil dibandingkan dengan nilai r_{hitung} dan nilai signifikansi lebih kecil dibandingkan dengan nilai tingkat kepercayaan. Hasil uji korelasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Test of correlation

| | | Sampl e1 | Sampl e2 | Sampl e3 | Sampl e4 | Sampl e5 | Sampl e6 | Sampl e7 |
|---------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Sample1 | Pearson Correlation | 1 | .983** | .999** | .991** | .998** | .978** | .982** |
| | Sig. (2-tailed) | | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 |
| | N | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Sample2 | Pearson Correlation | .983** | 1 | .978** | .997** | .991** | .999** | 1.000* * |
| | Sig. (2-tailed) | .000 | | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 |
| | N | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Sample3 | Pearson Correlation | .999** | .978** | 1 | .985** | .996** | .973** | .977** |
| | Sig. (2-tailed) | .000 | .000 | | .000 | .000 | .000 | .000 |
| | N | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Sample4 | Pearson Correlation | .991** | .997** | .985** | 1 | .994** | .993** | .996** |
| | Sig. (2-tailed) | .000 | .000 | .000 | | .000 | .000 | .000 |
| | N | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Sample5 | Pearson Correlation | .998** | .991** | .996** | .994** | 1 | .988** | .991** |
| | Sig. (2-tailed) | .000 | .000 | .000 | .000 | | .000 | .000 |
| | N | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Sample6 | Pearson Correlation | .978** | .999** | .973** | .993** | .988** | 1 | .999** |
| | Sig. (2-tailed) | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 | | .000 |
| | N | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Sample7 | Pearson Correlation | .982** | 1.000* * | .977** | .996** | .991** | .999** | 1 |
| | Sig. (2-tailed) | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 | .000 | |
| | N | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Uji normalitas dengan menggunakan uji Kolmogorov Smirnov didapatkan bahwa nilai signifikan berada di atas tingkat kepercayaan sehingga koordinat titik y di posisi tersebut terdistribusi normal untuk masing-masing sampel seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Dari uji kecukupan data dengan menggunakan uji nilai Kaiser-Mayer-Olkin of sampling Adequacy (KMO MSA) dan hubungan korelasi yang kuat antar variabel menunjukkan nilai KMO MSA lebih besar dibandingkan dengan nilai tingkat kepercayaan dan nilai Bartlett's test Sphericity lebih kecil dari 0.05 serta didapatkan nilai anti-image correlation antar variabel lebih besar dari nilai tingkat

kepercayaan. Dari hasil tersebut dapat dinyatakan bahwa data sampel memiliki nilai kecukupan dan berkorelasi antar variabel sehingga dapat dianalisa lebih lanjut.

Tabel 3 Normality distribution test

| Position Y | Kolmogorov-Smirnova | | | Shapiro-Wilk | | |
|--|---------------------|----|-------|--------------|----|------|
| | Statistic | Df | Sig. | Statistic | df | Sig. |
| Position2 | .241 | 7 | .200* | .947 | 7 | .703 |
| Position3 | .193 | 7 | .200* | .922 | 7 | .484 |
| Position4 | .251 | 7 | .200* | .862 | 7 | .159 |
| Position5 | .135 | 7 | .200* | .961 | 7 | .829 |
| Position6 | .137 | 7 | .200* | .977 | 7 | .941 |
| Position7 | .167 | 7 | .200* | .955 | 7 | .774 |
| Position8 | .192 | 7 | .200* | .931 | 7 | .559 |
| Position9 | .198 | 7 | .200* | .911 | 7 | .404 |
| Position10 | .197 | 7 | .200* | .906 | 7 | .370 |
| Position11 | .192 | 7 | .200* | .911 | 7 | .404 |
| Position12 | .206 | 7 | .200* | .902 | 7 | .343 |
| Position13 | .216 | 7 | .200* | .897 | 7 | .316 |
| Position14 | .208 | 7 | .200* | .939 | 7 | .628 |
| Position15 | .178 | 7 | .200* | .958 | 7 | .801 |
| Position16 | .179 | 7 | .200* | .918 | 7 | .453 |
| Position17 | .265 | 7 | .146 | .886 | 7 | .255 |
| Position18 | .235 | 7 | .200* | .917 | 7 | .444 |
| *. This is a lower bound of the true significance. | | | | | | |
| a. Lilliefors Significance Correction | | | | | | |

Selanjutnya, uji MANOVA digunakan untuk menganalisis garis sampel dengan variabel terikat y. Uji statistik MANOVA (Multivariate Analysis of Variance) umumnya digunakan untuk menentukan keteraturan geometrik morfologi tumbuhan [13], [17]–[21]. Berdasarkan hasil uji MANOVA pada Tabel 4, nilai signifikansi yang dicapai lebih besar dari nilai tingkat kepercayaan 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa koordinat sumbu y antar sampel memiliki hubungan bentuk profil.

Tabel 4 Tes MANOVA

| Tests of Between-Subjects Effects | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|-----|-------------|---------|-------|---------------------|
| Source | Dependent Variable | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. | Partial Eta Squared |
| Corrected Model | X | .000a | 6 | .000 | .000 | 1.000 | .000 |
| | Y | .010b | 6 | .002 | .665 | .678 | .031 |
| Intercept | X | 33.250 | 1 | 33.250 | 340.214 | .000 | .730 |
| | Y | 1.155 | 1 | 1.155 | 479.623 | .000 | .792 |
| Sample | X | .000 | 6 | .000 | .000 | 1.000 | .000 |
| | Y | .010 | 6 | .002 | .665 | .678 | .031 |
| Error | X | 12.314 | 126 | .098 | | | |

| | | | | | | | |
|--|---|--------|-----|------|--|--|--|
| | Y | .304 | 126 | .002 | | | |
| Total | X | 45.564 | 133 | | | | |
| | Y | 1.469 | 133 | | | | |
| Corrected Total | X | 12.314 | 132 | | | | |
| | Y | .313 | 132 | | | | |
| a. R Squared = .000 (Adjusted R Squared = -.048) | | | | | | | |
| b. R Squared = .031 (Adjusted R Squared = -.015) | | | | | | | |

3.2. Analisa Aerodinamis

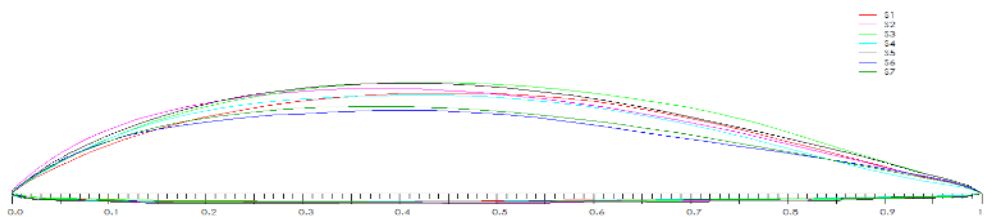
Dari analisis data statistik didapatkan bahwa semua sampel dapat digunakan sebagai profil airfoil, dan gaya aerodinamis yang terukur. Gaya aerodinamis diwakili oleh koefisien angkat, koefisien hambat, glide ratio, dan variabel distribusi tekanan pada permukaan airfoil. Perangkat lunak QBLADE open source digunakan untuk melakukan analisis aerodinamis dengan bentuk profil yang akan dievaluasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Parameter airfoil yang diperoleh tercantum pada Tabel 5.

Tabel 5 Specification of Samples

| Airfoil | Thickness (%) | Camber (%) | Point |
|---------|---------------|------------|-------|
| S1 | 14.91 | 6.38 | 99 |
| S2 | 15.75 | 6.58 | 99 |
| S3 | 16.38 | 7.1 | 99 |
| S4 | 14.64 | 6.21 | 99 |
| S5 | 16.6 | 6.9 | 99 |
| S6 | 12.58 | 5.16 | 99 |
| S7 | 13.11 | 5.41 | 99 |

Analisa aerodinamis menggunakan XFOIL Direct Analysis dengan numerical set sebagai berikut bilangan mach sebesar 0, free transition menggunakan method Ncrit: 9 dan force transition sebesar 1 pada top dan bottom. Untuk penentuan bilangan Reynolds didasarkan pada beberapa variabel yang diasumsikan, yaitu panjang chord airfoil sebesar 1500 mm, freestream density (ρ) sebesar 1.225 kg/m³, dynamic viscosity (μ) sebesar 0.17894x10⁻⁴ kg/ms. Bilangan Reynolds yang didapatkan pada kecepatan angin mulai dari 3 m/s sampai dengan 7 m/s berdasarkan rumus:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1)$$



Gambar 8 The output of each sample QBLADE software profile

Tabel 6 menyajikan bilangan Reynolds yang diperoleh pada kecepatan angin berkisar antara 2,92 m/s hingga 6,82 m/s, sedangkan Tabel 7 menyajikan hasil uji dinamis.

Tabel 6 Convert wind speed to the Reynolds number.

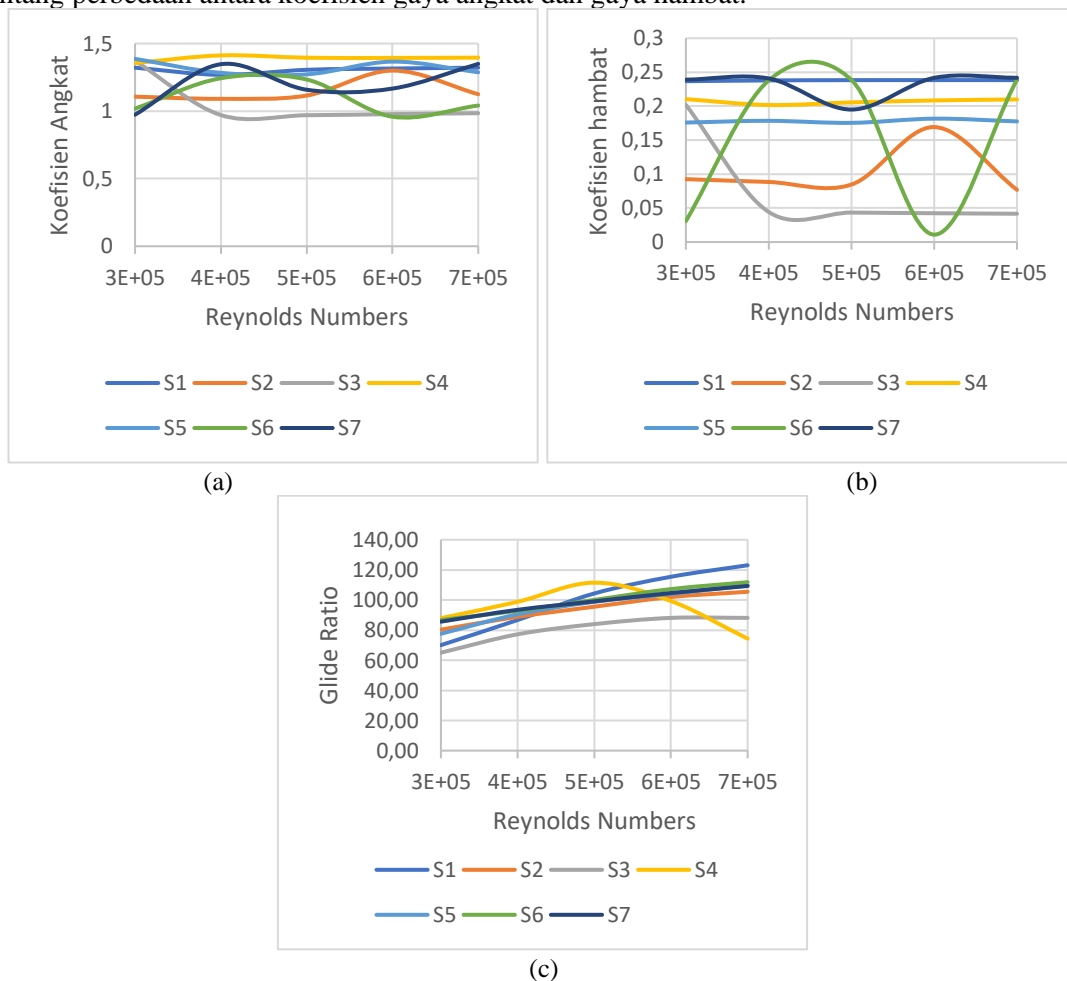
| Freestream Velocity (V) (m/s) | Reynolds Numbers (Re) |
|----------------------------------|-----------------------|
| 2.92 | 3E5 |
| 3.90 | 4E5 |
| 4.87 | 5E5 |
| 5.84 | 6E5 |
| 6.82 | 7E5 |

Tabel 7 Aerodynamic Result of Samples

| Sample | Criteria | Reynolds Number | | | | |
|--------|-------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| | | 3.00E+05 | 4.00E+05 | 5.00E+05 | 6.00E+05 | 7.00E+05 |
| S1 | CL | 1.3215 | 1.2685 | 1.3058 | 1.3152 | 1.3215 |
| | CD | 0.23678 | 0.23794 | 0.23831 | 0.23839 | 0.23837 |
| | Glide Ratio | 70.02 | 86.71 | 104.32 | 115.41 | 123.07 |
| | AOA | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S2 | CL | 1.1069 | 1.0911 | 1.1154 | 1.3001 | 1.1252 |
| | CD | 0.09258 | 0.08844 | 0.08464 | 0.16924 | 0.07686 |
| | Glide Ratio | 80.31 | 88.83 | 95.54 | 101.95 | 105.47 |
| | AOA | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| S3 | CL | 1.3724 | 0.9709 | 0.9697 | 0.9779 | 0.9846 |
| | CD | 0.20186 | 0.04427 | 0.04337 | 0.04242 | 0.04164 |
| | Glide Ratio | 65.03 | 77.22 | 83.98 | 88.12 | 88.12 |
| | AOA | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S4 | CL | 1.356 | 1.4123 | 1.3952 | 1.3938 | 1.3959 |
| | CD | 0.21038 | 0.20176 | 0.20558 | 0.20844 | 0.20998 |
| | Glide Ratio | 87.94 | 98.79 | 111.50 | 99.32 | 74.32 |
| | AOA | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| S5 | CL | 1.3869 | 1.2834 | 1.2721 | 1.3663 | 1.2874 |
| | CD | 0.1759 | 0.17848 | 0.17545 | 0.18165 | 0.17761 |
| | Glide Ratio | 77.58 | 90.47 | 98.76 | 104.07 | 109.65 |
| | AOA | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| S6 | CL | 1.0187 | 1.2434 | 1.2338 | 0.9588 | 1.0415 |
| | CD | 0.03086 | 0.23789 | 0.23865 | 0.01088 | 0.23917 |
| | Glide Ratio | 86.70 | 92.84 | 100.06 | 107.24 | 111.82 |
| | AOA | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| S7 | CL | 0.9736 | 1.3473 | 1.1584 | 1.1669 | 1.3497 |
| | CD | 0.23904 | 0.24082 | 0.19506 | 0.24175 | 0.24183 |
| | Glide Ratio | 85.63 | 93.49 | 99.08 | 104.62 | 109.31 |
| | AOA | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |

Simulasi aerodinamis menunjukkan bahwa koefisien angkat rata-rata yang terjadi lebih besar dari 1. Kecuali untuk sampel nomor 3, nilai koefisien angkat rata-rata untuk bilangan Reynolds $4E5$ hingga $7E5$ berkisar antara 0,96 dan 0,98. Seperti digambarkan pada Gambar 9(a), nilai rata-rata koefisien angkat pada sampel 7 dengan bilangan Reynolds $3E5$ adalah 0,9736. Gambar menunjukkan bagaimana koefisien angkat maksimum bervariasi dengan bilangan Reynolds yang berbeda. Profil airfoil sampel 4 menghasilkan koefisien angkat tertinggi, sedangkan profil airfoil sampel 6 menghasilkan koefisien angkat terendah. Namun, nilai koefisien angkat sampel 1 lebih konsisten dibandingkan dengan koefisien angkat sampel yang lain.

Berdasarkan Gambar 9(b), koefisien hambat kurang dari 0,25. Sampel 1, 4, dan 5 memiliki distribusi nilai koefisien hambat yang lebih seragam. Sampel nomor 6 memiliki koefisien hambat terendah pada bilangan Reynolds $6E7$. Hasil koefisien angkat dan koefisien hambat menunjukkan bahwa glide ratio akan lebih kecil jika selisih antara nilai koefisien angkat dan nilai koefisien hambat kecil. Glide ratio akan semakin baik jika semakin besar signifikan rentang perbedaan antara koefisien gaya angkat dan gaya hambat.



Gambar 9 Hasil analisa aerodinamis (a) koefisien angkat tiap sampel (b) koefisien hambat tiap sampel (c) glide ratio tiap sampel

Nilai glide ratio meningkat seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds, dengan sudut serang biasanya berkisar antara 2 dan 4 derajat. Glide ratio tertinggi didapatkan pada sampel 1 sebesar 123,07 dengan bilangan Reynolds $7E5$. Sampel dengan glide ratio terendah sebesar 70,02 pada bilangan Reynolds $3E5$. Distribusi tekanan akan menjadi lebih ekspansif dari glide ratio

yang tinggi. Hasil glide ratio menunjukkan bahwa semua sampel cocok untuk digunakan sebagai profil airfoil turbin angin sumbu horizontal untuk mencapai nilai torsi yang tinggi.

4. KESIMPULAN

Beberapa studi biologi mendapatkan bahwa profil airfoil dari binatang dan tumbuhan dapat diadaptasi menjadi profil airfoil turbin angin. Geometri morfologi tumbuhan memberikan solusi alternatif untuk profil sudu turbin angin sumbu horizontal. Uji statistik menunjukkan bahwa profil pelepah daun pisang memiliki bentuk yang seragam.

Dengan panjang chord yang sama yaitu 1500 mm dan rentang bilangan Reynolds yang mewakili kecepatan angin dari 2,92 hingga 6,82 m/s, diperoleh nilai koefisien angkat yang tinggi, nilai koefisien hambat yang rendah, dan nilai glide ratio yang tinggi untuk semua sampel pelepah daun pisang. Menurut analisis aerodinamis yang dilakukan dengan perangkat lunak QBLADE, glide ratio pada kecepatan angin 6,82 m/s dengan nilai di atas 100 lebih baik dibandingkan kecepatan angin yang lebih rendah untuk enam sampel. Berdasarkan pemodelan airfoil dari sampel morfologi pelepah daun pisang, ditemukan bahwa morfologi tanaman memiliki profil yang dapat digunakan sebagai profil airfoil turbin angin sumbu horizontal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami berterima kasih kepada LPDP Kementerian Keuangan RI yang telah memberikan beasiswa penuh kepada penulis pertama sebagai mahasiswa pasca sarjana di Institut Teknologi Bandung. Juga ucapan terima kasih kepada Institut Teknologi Bandung yang telah mendanai sepenuhnya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Huang, Y. Hu, and Y. Wang, "Research on aerodynamic performance of a novel dolphin head-shaped bionic airfoil," *Energy*, vol. 214, p. 118179, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118179.
- [2] H. Yan et al., "Design approach and hydrodynamic characteristics of a novel bionic airfoil," *Ocean Eng.*, vol. 216, no. July, p. 108076, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108076.
- [3] L. Xinyu, S. Bifeng, Y. Wenqing, and S. Wenping, "Aerodynamic performance of owl-like airfoil undergoing bio-inspired flapping kinematics," *Chinese J. Aeronaut.*, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.cja.2020.10.017.
- [4] W. Tian et al., "Bionic Design of Wind Turbine Blade Based on Long-Eared Owl's Airfoil," *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/8504638.
- [5] W. Tian, F. Liu, Q. Cong, Y. Liu, and L. Ren, "Study on aerodynamic performance of the bionic airfoil based on the swallow's wing," *J. Mech. Med. Biol.*, vol. 13, no. 6, pp. 1–10, 2013, doi: 10.1142/S0219519413400228.
- [6] L. Hao, Y. Gao, B. Wei, and K. Song, "Numerical Simulation of Flow over Bionic Airfoil," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2021, pp. 1–17, Sep. 2021, doi: 10.1155/2021/5556463.
- [7] M. I. Ansari, M. H. Siddique, A. Samad, and S. F. Anwer, "On the optimal morphology and performance of a modeled dragonfly airfoil in gliding mode," *Phys. Fluids*, vol. 31, no. 5, p. 051904, May 2019, doi: 10.1063/1.5093230.
- [8] W. Liu and J. Gong, "Adaptive Bend-Torsional Coupling Wind Turbine Blade Design Imitating the Topology Structure of Natural Plant Leaves," in *Wind Turbines*, 2011.

- [9]S. Wolff-Vorbeck, M. Langer, O. Speck, T. Speck, and P. Dondl, “Twist-To-Bend Ratio: An Important Selective Factor For Many Rod-Shaped Biological Structures,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-52878-z.
- [10]A. R. Ennos, “Compliance in plants,” *Compliant Struct. Nat. Eng.*, vol. 20, pp. 21–37, 2005, doi: 10.2495/978-1-85312-941-4/02.
- [11]A. R. Ennos, H. Spatz, and T. Speck, “The functional morphology of the petioles of the banana, *Musa textilis*,” *J. Exp. Bot.*, vol. 51, no. 353, pp. 2085–2093, Dec. 2000, doi: 10.1093/jexbot/51.353.2085.
- [12]A. R. Kothari and N. P. Burnett, “Herbivores alter plant–wind interactions by acting as a point mass on leaves and by removing leaf tissue,” *Ecol. Evol.*, vol. 7, no. 17, pp. 6884–6893, 2017, doi: 10.1002/ece3.3249.
- [13]V. Viscosi, P. Fortini, D. E. Slice, A. Loy, and C. Blasi, “Geometric morphometric analyses of leaf variation in four oak species of the subgenus *Quercus* (Fagaceae),” *Plant Biosyst.*, vol. 143, no. 3, pp. 575–587, 2009, doi: 10.1080/11263500902775277.
- [14]M. Webster and H. D. Sheets, “Webster_and_Sheets_2010 A practical Introduction to Landmark-Based Geometric Morphometrics.pdf,” *Paleontol. Soc. Pap.*, vol. 16, pp. 163–188, 2010.
- [15]M. Vieira, S. J. Mayo, and I. M. de Andrade, “Geometric morphometrics of leaves of *Anacardium microcarpum* Ducke and *A. occidentale* L. (Anacardiaceae) from the coastal region of Piauí, Brazil,” *Rev. Bras. Bot.*, vol. 37, no. 3, pp. 315–327, 2014, doi: 10.1007/s40415-014-0072-3.
- [16]Y. Savriama, “A Step-by-step guide for geometric morphometrics of floral symmetry,” *Front. Plant Sci.*, vol. 9, p. 1433, Oct. 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.01433.
- [17]V. Viscosi and A. Cardini, “Leaf morphology, taxonomy and geometric morphometrics: A simplified protocol for beginners,” *PLoS One*, vol. 6, no. 10, p. 25630, Oct. 2011, doi: 10.1371/journal.pone.0025630.
- [18]E. M. Demmings et al., “Quantitative Trait Locus Analysis of Leaf Morphology Indicates Conserved Shape Loci in Grapevine,” *Front. Plant Sci.*, vol. 10, p. 1373, Nov. 2019, doi: 10.3389/fpls.2019.01373.
- [19]J. Ren, X. Ji, C. Wang, J. Hu, G. Nervo, and J. Li, “Variation and genetic parameters of leaf morphological traits of eight families from *populus simonii* × *p. nigra*,” *Forests*, vol. 11, no. 12, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/f11121319.
- [20]K. N. Blazakis, M. Kosma, G. Kostelenos, L. Baldoni, M. Bufacchi, and P. Kalaitzis, “Description of olive morphological parameters by using open access software,” *Plant Methods*, vol. 13, no. 1, p. 111, Dec. 2017, doi: 10.1186/s13007-017-0261-8.
- [21]T. M. Francoy, F. de Faria Franco, and D. W. Roubik, “Integrated landmark and outline-based morphometric methods efficiently distinguish species of *Euglossa* (Hymenoptera, Apidae, Euglossini),” *Apidologie*, vol. 43, no. 6, pp. 609–617, Nov. 2012, doi: 10.1007/s13592-012-0132-2.
-