

ANALISIS CFD MODIFIKASI 3 SUDU AIRFOIL FX74-CL5-140 DAN NACA 2421 PADA TURBIN ANGIN SAVONIUS

Danito Wahyu Diansyah

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: danito.22117@mhs.unesa.ac.id

Dr. A. Grummy Wailanduw, M.Pd., M.T.

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: grummywailanduw@unesa.ac.id

Abstrak

Turbin angin Savonius adalah salah satu tipe turbin angin dengan sumbu vertikal yang mampu beroperasi pada kecepatan angin yang rendah. Namun, efisiensi turbin Savonius masih tergolong rendah, sehingga diperlukan pengembangan desain bilah untuk meningkatkan kemampuan pengambilan energi angin. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis dampak penggunaan profil airfoil FX74-CL5-140 dan NACA 2421 pada turbin angin Savonius dengan tiga bilah terkait distribusi kecepatan angin dan kinerja turbin menggunakan simulasi numerik dari ANSYS Fluent. Penelitian ini dilakukan dengan metode CFD 3 dimensi dalam kondisi aliran transient. Simulasi tersebut dilakukan pada variasi kecepatan angin sebesar 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s. Analisis terfokus pada distribusi kecepatan aliran di sekitar rotor serta penilaian kinerja turbin berdasarkan nilai Koefisien Power, Koefisien Torsi, dan *Tip Speed Ratio*. Kedua model turbin memiliki geometri yang identik dengan perbedaan pada profil airfoil bilah, yaitu FX74-CL5-140 dan NACA 2421. Hasil dari simulasi mengindikasikan bahwa profil airfoil FX74-CL5-140 memberikan distribusi kecepatan aliran yang lebih baik dibandingkan NACA 2421. Selain itu, profil FX74-CL5-140 menunjukkan kinerja yang lebih unggul dengan nilai Koefisien Power sebesar 0,188 dan Koefisien Torsi 0,251 pada kondisi optimal dengan kecepatan angin 5 m/s serta TSR sebesar 0,719. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan profil airfoil FX74-CL5-140 dapat meningkatkan kemampuan turbin Savonius dalam mengambil energi angin dibandingkan profil NACA 2421, sehingga berpotensi menjadi pilihan desain bilah yang lebih efisien untuk penggunaan pembangkit listrik tenaga angin di daerah dengan kecepatan angin rendah.

Kata Kunci: turbin angin Savonius, airfoil FX74-CL5-140, airfoil NACA 2421, energi terbarukan, simulasi numerik,

Abstract

The Savonius wind turbine is designed as a vertical axis turbine that can function effectively even at low wind speeds and can harness wind from different directions. Nevertheless, its efficiency is somewhat limited, which calls for advancements in blade design to improve the capture of wind energy. This research seeks to examine how the FX74-CL5-140 and NACA 2421 airfoil shapes impact the performance and wind speed distribution of a three-bladed Savonius wind turbine through numerical simulations using ANSYS Fluent. The study employed a three-dimensional Computational Fluid Dynamics approach in unsteady flow conditions with wind speeds of 4 meters per second, 5 meters per second, and 6 meters per second. The focus was on analyzing the flow velocity around the rotor and assessing performance with metrics such as the Coefficient of Power, Coefficient of Torque, and Tip Speed Ratio. The simulation findings indicated that the FX74-CL5-140 profile achieved a more efficient velocity distribution and superior performance, resulting in a Coefficient of Power of 0.188 and a Coefficient of Torque of 0.251 at a wind speed of 5 meters per second, along with a Tip Speed Ratio of 0.719. Therefore, the FX74-CL5-140 profile represents a more efficient blade design option for areas with low wind speeds

Keywords: Savonius wind turbine, airfoil FX74-CL5-140, airfoil NACA 2421, renewable energy, numerical simulation

PENDAHULUAN

Tantangan utama pemanfaatan energi angin di Indonesia adalah karakteristik kecepatan angin yang cenderung rendah dan tidak merata sepanjang tahun, dengan rata-rata berkisar antara 2–4 m/s (Sopian et al., 2019). Kondisi ini menyulitkan penggunaan turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*/HAWT) karena jenis turbin tersebut memerlukan kecepatan awal

yang tinggi untuk dapat bekerja secara optimal (Kumar & Saini, 2020). Sebagai alternatif yang lebih sesuai dengan kondisi geografis tropis, penggunaan turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*/VAWT), khususnya tipe Savonius, menjadi pilihan yang lebih tepat karena mampu menangkap angin dari berbagai arah dan memiliki efisiensi *startup* yang baik pada kecepatan angin rendah (Saha et al., 2008). Namun demikian, turbin Savonius konvensional memiliki kelemahan mendasar berupa

efisiensi konversi energi yang relatif rendah akibat tingginya gaya hambat balik (*counter drag*) dan munculnya pemisahan aliran di area belakang rotor saat berputar (Islam et al., 2008).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, rekayasa geometri melalui modifikasi sudu menggunakan profil aerodinamis atau *airfoil* dirancang untuk meningkatkan sekaligus meminimalkan gaya hambat (*drag*) guna menaikkan nilai koefisien Power (C_p) turbin (Shamsoddin & Porté-Agel, 2016). *Airfoil* FX74-CL5-140 dikenal memiliki perbandingan *lift-to-drag ratio* yang tinggi pada bilangan Reynolds rendah, sehingga sangat ideal untuk aplikasi angin rendah (Eppler, 1990). Di sisi lain, *airfoil* non-simetris tipe NACA 2421 memiliki profil tebal dengan *camber* rendah yang memberikan kestabilan struktural serta performa aerodinamis yang baik sepanjang siklus rotasi (Loutun et al., 2021). Selain profil, jumlah sudu juga memegang peranan krusial, di mana konfigurasi tiga sudu dinilai mampu memberikan distribusi kecepatan aliran yang lebih tinggi dan momen putar yang lebih seimbang dibandingkan konfigurasi lainnya (Ridwan & Abdul Latief, 2019).

Meskipun demikian, bentuk sudu konvensional setengah silinder sejauh ini masih memicu terjadinya yang ekstrem di area belakang rotor (Kacprzak et al., 2014). Di sisi lain, pengujian secara eksperimen memerlukan waktu dan biaya yang sangat besar (Wenhehunen et al., 2015). Oleh karena itu, pendekatan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan ANSYS Fluent menjadi solusi efisien untuk mengevaluasi variasi desain secara sistematis dan terkontrol (Howell et al., 2010). Pemanfaatan profil *airfoil* FX74-CL5-140 dan NACA 2421 pada konfigurasi turbin Savonius tiga sudu untuk meningkatkan performa aerodinamis sejauh ini masih sangat terbatas dan belum dikaji secara komprehensif.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik distribusi kecepatan aliran fluida (*velocity pathline*) di sekitar rotor turbin angin Savonius vertikal 3 sudu akibat pengaruh penggunaan profil *airfoil* FX74-CL5-140 dan NACA 2421. Lebih lanjut, penelitian ini mengevaluasi performa aerodinamis berdasarkan parameter *Coefficient of Power* (C_p) dan *Coefficient of Torque* (C_t) pada variasi kecepatan angin 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s melalui simulasi numerik 3D *unsteady* ANSYS Fluent. Melalui studi komparatif ini, diharapkan dapat ditentukan jenis profil *airfoil* terbaik yang paling efektif dalam meningkatkan efisiensi ekstraksi energi angin pada kondisi angin rendah guna mendukung pemanfaatan energi terbarukan yang ramah lingkungan (Pambudi & Firdaus, 2022).

METODE

Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan studi berbasis simulasi numerik tak tunak (*unsteady*) yang bertujuan untuk menganalisis karakteristik aliran fluida.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Aerodinamika dan Otomotif, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Negeri Surabaya, meliputi proses perancangan model, simulasi numerik menggunakan ANSYS.

Objek Penelitian

Objek yang digunakan saat penelitian adalah turbin angin Savonius, dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Jenis turbin : Turbin angin sumbu vertikal
- Jumlah Sudu : 3 Sudu
- Diameter (D) : 436mm
- Tinggi (t) : 370mm
- Jenis *Airfoil* : *Airfoil* FX74CL5 140 dan NACA 2421

Variabel Penelitian

Variabel Bebas

1. *Airfoil* FX74CL5 140
2. *Airfoil* NACA 2421

Variabel Terikat

1. Distribusi Kecepatan angin *velocity pathline*
2. Koefisien Power (C_p)
3. Koefisien Torsi (C_t)
4. *Tip Speed Ratio* (TSR)

Variabel Kontrol

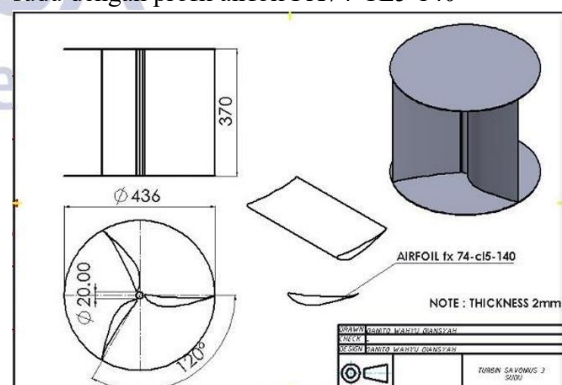
1. Fluida mengalir pada turbin angin adalah udara
2. Menggunakan turbin Savonius vertical
3. Aliran fluida *unsteady*
4. *Airfoil* FX74-CL5-140
5. *Airfoil* NACA 2421
6. Kecepatan angin 4m/s, 5m/s, dan 6m/s

Teknik Pengumpulan Data

Tahap Pre- Processing

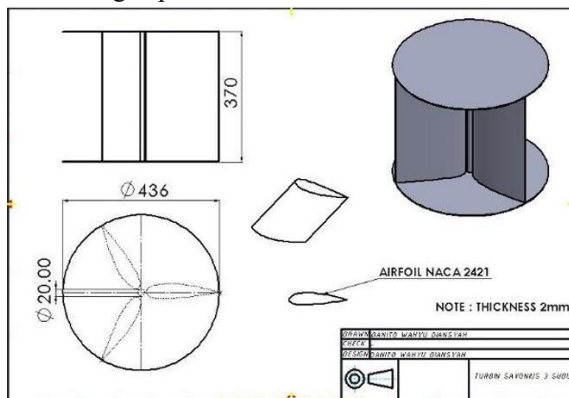
1. Pembuatan Geometri

Model Turbin angin Savonius vertical dengan 3 sudu dengan profil *airfoil* FX74-CL5-140



Gambar 1. Sudu profil FX74-CL5-140

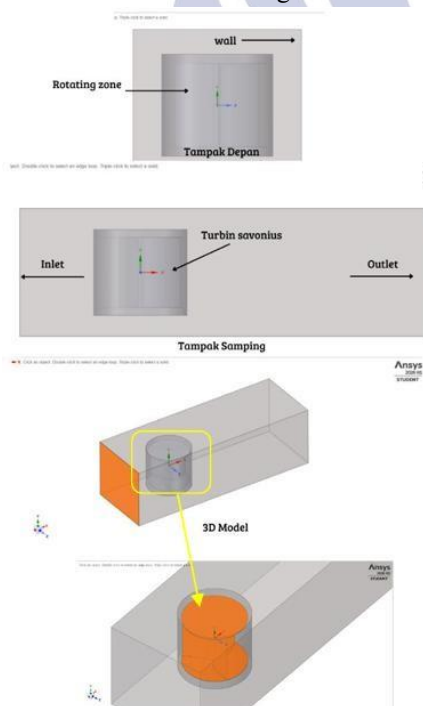
Model Turbin angin Savonius vertical dengan 3 sudu dengan profil airfoil NACA 2421



Gambar 2. Sudu profil NACA 2421

2. Pembuatan Domain

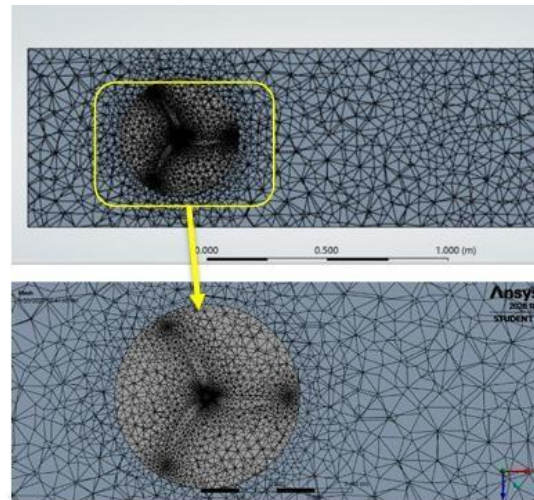
Pembuatan domain CFD (Computational Fluid Dynamic) adalah proses yang melibatkan menentukan area ruang dimana solusi simulasi CFD dihitung.



Gambar 3. Pembuatan domain

3. Pembuatan Mesh

Menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent dengan fitur *Fluent Meshing*. Metode *polyhedra* dipilih karena mampu menghasilkan *mesh* yang efisien, stabil, dan akurat.



Gambar 4. Detail meshing tampak atas

4. Penentuan Solver

Solver yang digunakan adalah *frequency-based, transient* (3D unsteady), Inlet berupa velocity inlet 4m/s, 5m/s dan 6m/s Skema numerik menggunakan *second order* untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi

Tahap Processing

Semua parameter dieksekusi sampai mencapai konvergensi. Jika belum mencapai konvergensi, dilakukan penilaian dan perbaikan *meshing* sebelum simulasi diteruskan.

Tahap Post-Processing

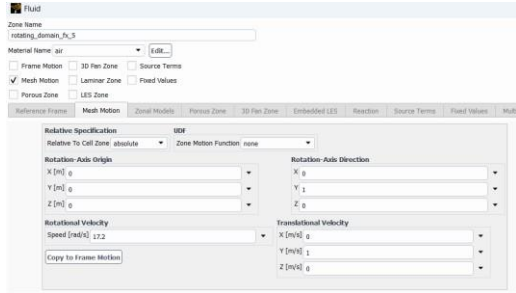
Post-processing adalah tahap akhir dalam sebuah simulasi dimana *solver* telah menyelesaikan perhitungan. Hasil simulasi akan ditampilkan dalam bentuk visualisasi berupa kontur dan data numerik.

Metode Analisis Data

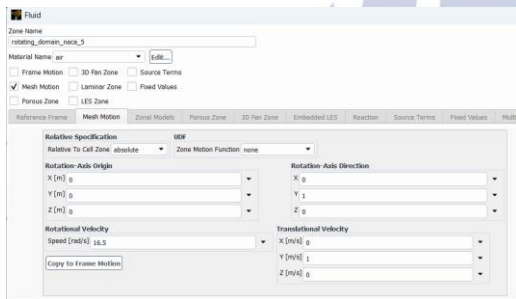
Metode analisis data yang digunakan adalah analisis deskriptif kuantitatif dan komparatif. Analisis deskriptif digunakan untuk menginterpretasikan distribusi kecepatan aliran berdasarkan hasil visualisasi velocity pathline, sedangkan analisis komparatif digunakan untuk membandingkan nilai Koefisien Power (C_p), Koefisien Torsi (C_t), dan *Tip Speed Ratio* (TSR) antara airfoil FX74-CL5-140 dan NACA 2421 pada setiap variasi kecepatan angin. Hasil analisis disajikan dalam bentuk table dan kontur simulasi sehingga dapat ditentukan profil airfoil dengan performa terbaik..

Persamaan Kinerja Turbin Angin Savonius Hasil Omega dari Simulasi

Nilai kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s diperoleh dari hasil simulasi *ANSYS Fluent* pada kecepatan angin 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s. Data tersebut digunakan untuk membandingkan kemampuan putaran rotor pada turbin Savonius dengan profil *airfoil* FX74-CL5-140 dan NACA 2421 sebagai dasar analisis TSR, C_t , dan C_p .



Gambar 5. Omega *airfoil* FX74-CL5-140 5m/s



Gambar 6. Omega *airfoil* NACA 2421 5m/s

Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio ialah rasio kecepatan sudu terhadap kecepatan udara. Di mana semakin tinggi nilai tip speed ratio turbin angin maka semakin tinggi pula efisiensi dari turbin angin tersebut. (Pambudi & Firdaus, 2022)

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (2.1)$$

Keterangan :

ω = kecepatan sudut (rad/detik)

R = Jari-jari (m)

V = kecepatan angin m/s

Luas Sapuan

Luas sapuan menunjukkan area yang dilalui sudu turbin dan menentukan banyaknya energi angin yang dapat ditangkap. (Pambudi & Firdaus, 2022)

$$A = D \times H \quad (2.2)$$

Keterangan :

D = diameter (m)

H = tinggi (m)

Koefisien Torsi (C_t)

Koefisien Torsi menunjukkan kemampuan turbin menghasilkan momen puntir pada poros akibat gaya angin. Hansen (2015)

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V^2 A R} \quad (2.3)$$

Keterangan :

C_t = Koefisien Torsi

T = Torsi Turbin angin (Nm)

ρ = Masa jenis udara (kg/m³)

V = kecepatan angin m/s

A = Luas sapuan (m²)

R = Jari-jari (m)

Koefisien Power (C_p)

Koefisien Power (C_p) ialah bilangan tak berdimensi yang merupakan hasil perbandingan Power keluaran dan masukan pada turbin angin. Hansen (2015)

$$C_p = C_t \times \lambda \quad (2.4)$$

Keterangan :

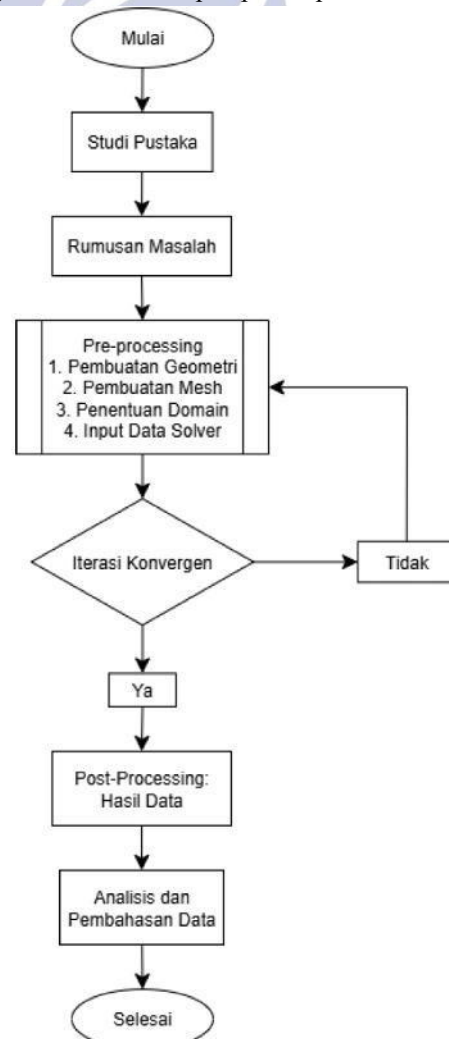
C_p = Koefisien Power

C_t = Koefisien Torsi

λ = Tip Speed Ratio

Flowchart Penelitian

Berikut merupakan diagram alir (*flowchart*) yang menunjukkan urutan tahapan proses penelitian.



Gambar 6. Flowchart Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Data

Viscous Model

Tabel 1. Penentuan *Viscous model*

No	Penelitian	Actual torques (Nm) / Moment	Error
1.	Penelitian Wenehenubun et al. (2015) (Eksperimen)	0.08 Nm	-
2.	$k-\varepsilon$ (Standart)	0.10922199 Nm	36.53 %
3.	$k-\varepsilon$ (Realizable)	0.06659946 Nm	16.75 %
4.	$k-\varepsilon$ (RNG)	0.08497482 Nm	6.22 %
5.	$k-\omega$ (Standart)	0.09351699 Nm	16.90 %
6.	$k-\omega$ (SST)	0.07349125 Nm	8.14 %

Persentase error terkecil di peroleh di angka 6.22 % dengan model $k-\varepsilon$ (RNG) dengan hasil sebesar 0.084974821 Nm. model $k-\varepsilon$ (RNG) merupakan paling banyak digunakan dalam simulasi numerik karena mampu memprediksi aliran turbulen secara cukup akurat dengan biaya komputasi yang relatif rendah.

Grid Independence Test

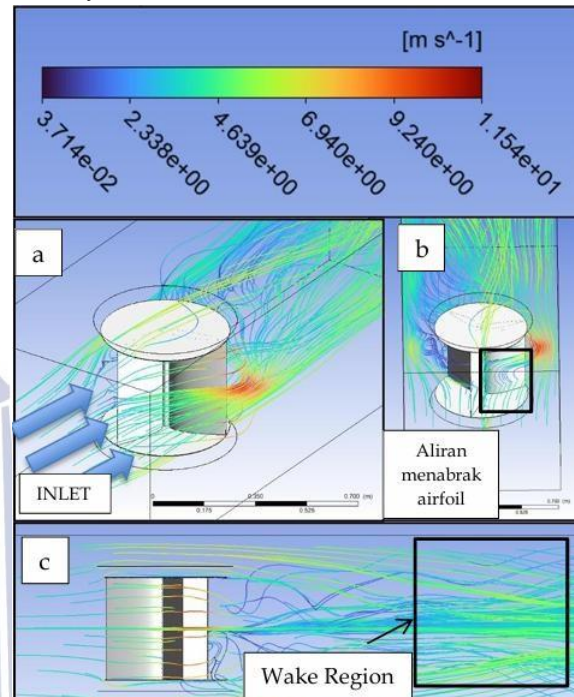
Tabel 2. Penentuan *Grid Independence Test*

Mesh Element (cells)	Mesh nodes (Total)	Mesh faces (Total)	Actual torques (Nm)	Error
Penelitian Wenehenubun et al. (2015) (Eksperimen)	-	-	0.08	-
492967	1917606	257736	0.07	6.04 %
562903	2205457	295971	0.06	13.8 %
581377	2301441	307419	0.08	12.0 %
594172	2375557	315887	0.08	5.48 %
614139	2444568	325384	0.08	0.57 %
637999	2259855	332297	0.09	13.9 %

Variasi mesh ke-6 dengan 614.139 *cells* dipilih sebagai konfigurasi optimal karena menghasilkan nilai torsi sebesar 0,080452513 Nm dengan tingkat galat (*error*) hanya 0,57%. Nilai ini menunjukkan kondisi yang telah konvergen dengan perbedaan tidak signifikan dibanding variasi mesh yang lebih halus.

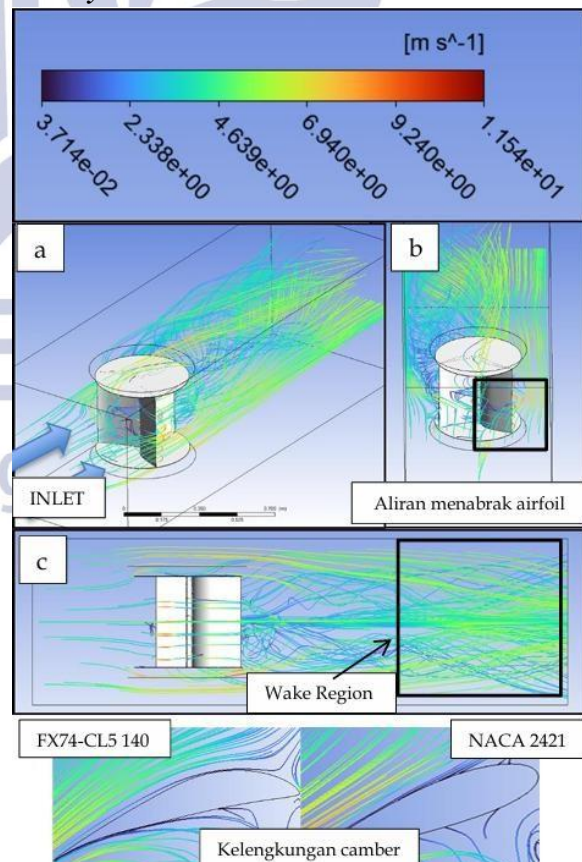
Distribusi kecepatan angin *airfoil* NACA 2421 dan FX74-CL5-140

Velocity Pathline NACA 2421 4m/s



Gambar 7. a. Origin, b. Tampak Depan c. Tampak Samping

Velocity Pathline FX74-CL5-140 4m/s

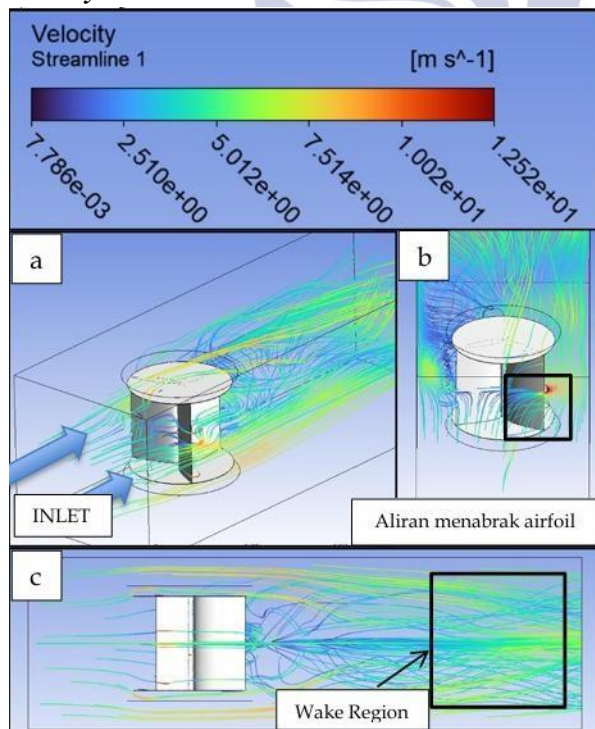


Gambar 8. a. Origin, b. Tampak Depan c. Tampak Samping

Hasil visualisasi pathline velocity menunjukkan bahwa penggunaan 3 sudu berbasis airfoil FX74-CL5-140 menghasilkan distribusi kecepatan angin yang lebih merata dibandingkan NACA 2421. Airfoil FX74-CL5-140 membentuk zona percepatan aliran yang lebih luas pada permukaan sudu serta menghasilkan daerah wake yang lebih panjang di belakang rotor, sedangkan NACA 2421 menunjukkan percepatan aliran yang lebih terlokalisasi dengan wake yang lebih pendek. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh karakteristik geometri kedua airfoil, terutama nilai camber, tingkat cekungan, dan ketebalan profil.

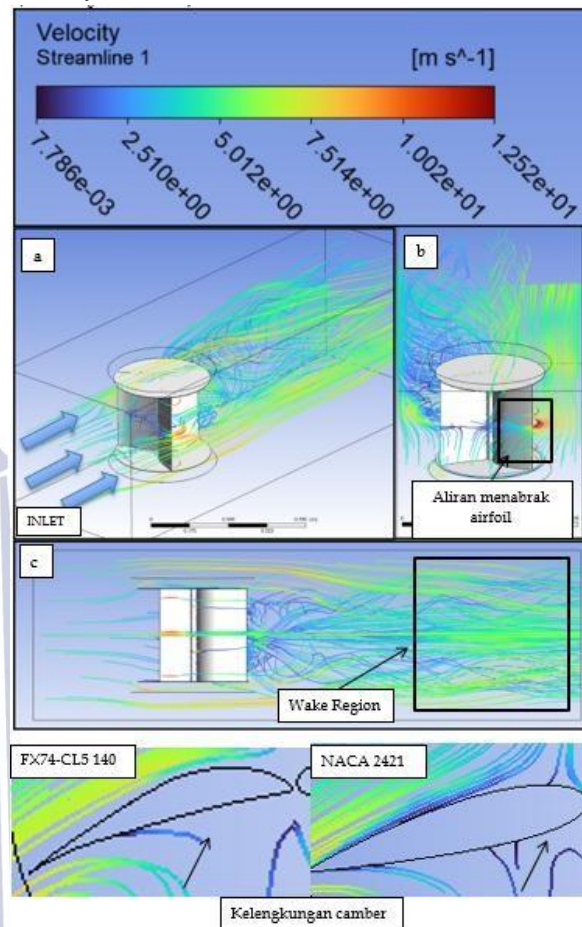
Airfoil FX74-CL5-140 memiliki camber yang lebih besar dengan permukaan cekung yang lebih dalam sehingga mampu menangkap, menahan, dan mengarahkan aliran angin secara lebih efektif. Kondisi ini meningkatkan transfer momentum fluida ke sudu dan memperbesar ekstraksi energi angin, yang ditunjukkan oleh distribusi kecepatan yang lebih merata dan pembentukan wake yang lebih berkembang. Sebaliknya, airfoil NACA 2421 memiliki camber yang lebih rendah dengan cekungan yang lebih dangkal sehingga aliran udara cenderung mengikuti kontur sudu tanpa mampu menahan momentum angin secara optimal. Akibatnya, distribusi kecepatan lebih terkonsentrasi pada daerah tumbukan dan energi yang diekstraksi rotor relatif lebih kecil dibandingkan airfoil FX74-CL5-140.

Velocity Pathline NACA 2421 5m/s



Gambar 9. a.Origin,b. Tampak Depan c. Tampak Sampling

Velocity Pathline FX74-CL5-140 5m/s



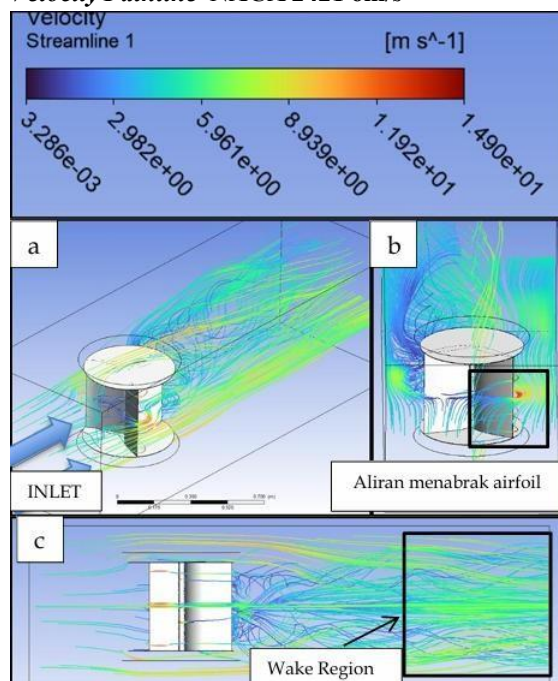
Gambar 10. a.Origin,b.TampakDepan c. Tampak Sampling

Hasil visualisasi pathline velocity pada kecepatan angin 5 m/s menunjukkan bahwa penggunaan tiga sudu berbasis airfoil FX74-CL5-140 menghasilkan distribusi kecepatan aliran yang lebih merata dibandingkan NACA 2421. Airfoil FX74-CL5-140 membentuk zona percepatan aliran yang lebih luas pada seluruh permukaan cekung sudu serta menghasilkan wake region yang lebih panjang dan dipenuhi pusaran di belakang rotor. Sebaliknya, NACA 2421 memperlihatkan percepatan aliran yang lebih terlokalisasi pada bagian ujung permukaan cekung dengan wake yang lebih sempit dan cepat kembali stabil.

Perbedaan karakteristik distribusi kecepatan tersebut dipengaruhi oleh geometri airfoil, terutama besarnya *camber*, kedalaman cekungan (*concavity*), dan ketebalan profil. *Camber* yang lebih besar dengan cekungan yang lebih dalam pada FX74-CL5-140 meningkatkan kemampuan sudu menangkap, menahan, dan mengarahkan aliran angin sehingga transfer momentum fluida ke rotor menjadi lebih efektif. Akibatnya, energi kinetik angin yang diekstraksi lebih besar, yang ditunjukkan oleh distribusi kecepatan yang lebih luas serta pembentukan wake yang lebih berkembang dibandingkan NACA 2421. Sementara itu, *camber* yang

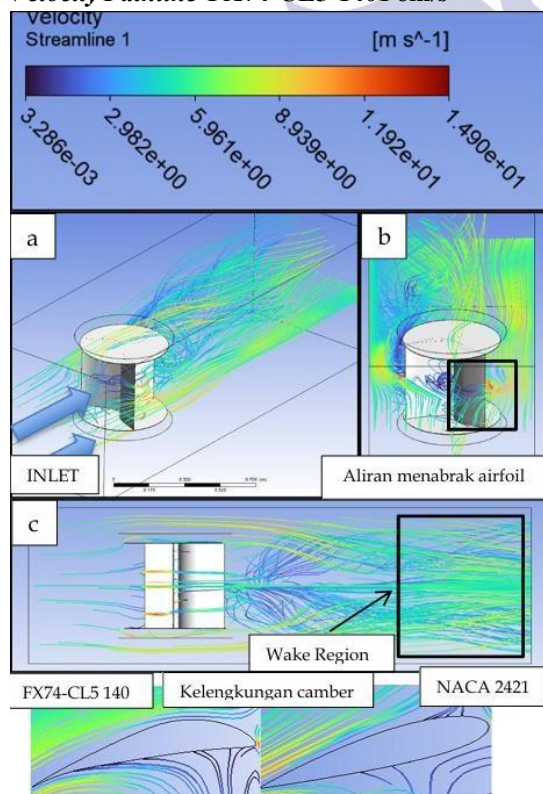
lebih rendah dan cekungan yang lebih dangkal pada NACA 2421 menyebabkan aliran lebih mudah keluar dari permukaan sudu sehingga distribusi kecepatan menjadi kurang merata dan kemampuan ekstraksi energi relatif lebih rendah.

Velocity Pathline NACA 2421 6m/s



Gambar 11. a. Origin, b. Tampak Depan c. Tampak Sampling

Velocity Pathline FX74-CL5-140 6m/s

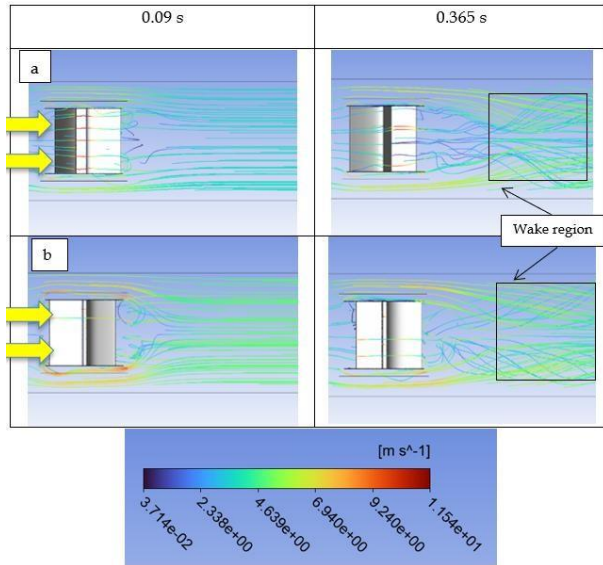


Gambar 12. a. Origin, b. Tampak Depan c. Tampak Sampling

Hasil visualisasi *pathline velocity* pada kecepatan angin 6 m/s menunjukkan bahwa penggunaan tiga sudu berbasis airfoil FX74-CL5-140 menghasilkan distribusi kecepatan aliran yang lebih merata dibandingkan NACA 2421. Airfoil FX74-CL5-140 membentuk zona percepatan aliran yang lebih luas mengikuti kontur permukaan cekung sudu serta menghasilkan *wake region* yang lebih panjang, melebar, dan dipenuhi pusaran di belakang rotor. Sebaliknya, NACA 2421 menunjukkan percepatan aliran yang lebih terlokalisasi pada bagian ujung permukaan sudu dengan *wake region* yang lebih sempit dan cepat kembali stabil.

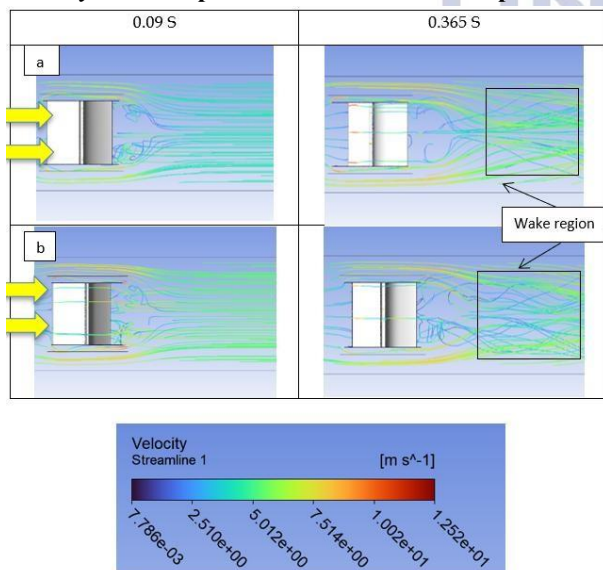
Perbedaan distribusi kecepatan tersebut dipengaruhi oleh karakteristik geometri kedua airfoil, terutama besarnya *camber*, kedalaman cekungan (*concavity*), dan ketebalan profil. Airfoil FX74-CL5-140 memiliki *camber* yang lebih besar dengan cekungan yang lebih dalam sehingga mampu menangkap, menahan, dan mengarahkan aliran angin secara lebih efektif meskipun momentum angin meningkat pada kecepatan 6 m/s. Kondisi ini meningkatkan transfer momentum fluida ke rotor sehingga ekstraksi energi menjadi lebih optimal, yang ditunjukkan oleh distribusi kecepatan yang lebih luas serta pembentukan *wake region* yang lebih berkembang. Sebaliknya, airfoil NACA 2421 yang memiliki *camber* lebih rendah dan cekungan lebih dangkal menyebabkan aliran lebih mudah terlepas dari permukaan sudu, sehingga distribusi kecepatan kurang merata dan kemampuan ekstraksi energi relatif lebih rendah dibandingkan FX74-CL5-140.

Secara keseluruhan, hasil visualisasi *pathline velocity* pada variasi kecepatan angin 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s menunjukkan bahwa airfoil FX74-CL5-140 secara konsisten memberikan karakteristik distribusi kecepatan aliran yang lebih baik dibandingkan NACA 2421. Hal ini ditunjukkan oleh distribusi percepatan aliran yang lebih merata pada permukaan cekung sudu, pembentukan *wake region* yang lebih panjang dan berkembang, serta kemampuan mempertahankan transfer momentum fluida ke rotor pada setiap variasi kecepatan angin. Kinerja tersebut dipengaruhi oleh geometri airfoil FX74-CL5-140 yang memiliki *camber* lebih besar dan cekungan (*concavity*) lebih dalam sehingga mampu menangkap, menahan, dan mengarahkan aliran angin secara lebih efektif dibandingkan NACA 2421. Dengan demikian, berdasarkan analisis distribusi kecepatan angin menggunakan visualisasi *pathline velocity*, airfoil FX74-CL5-140 merupakan profil yang paling optimal untuk diterapkan pada turbin angin Savonius tiga sudu pada rentang kecepatan angin 4–6 m/s yang diteliti.

Velocity Pathline pada kondisi transient kecepatan 4m/s**Gambar 13.** (a) NACA 2421, (b) FX74 CL5 140

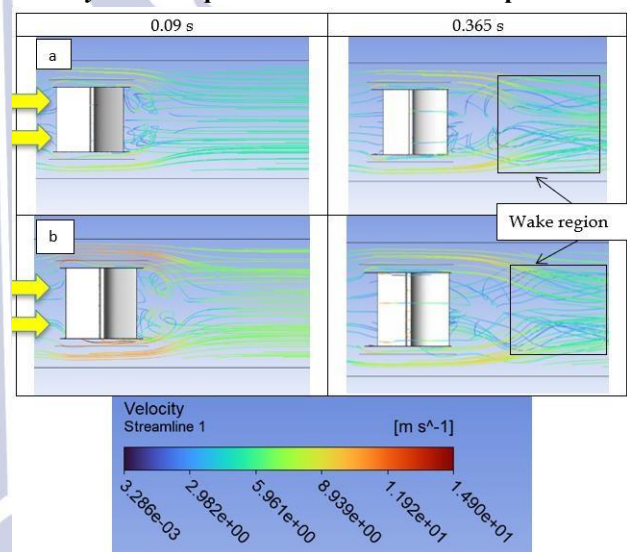
Pada waktu 0,09 s, aliran pada kedua turbin masih dalam tahap awal masuk, namun FX74-CL5-140 sudah menunjukkan zona kecepatan lebih tinggi yang ditandai warna oranye di sekitar sudu, sementara NACA 2421 masih memperlihatkan aliran yang relatif seragam. Ini menunjukkan bahwa FX74-CL5-140 lebih cepat merespons aliran masuk dibanding NACA 2421.

Pada waktu 0,365 s, perbedaan keduanya semakin jelas. NACA 2421 menghasilkan *wake region* yang lebih sempit dengan aliran *downstream* yang lebih teratur, sedangkan FX74-CL5-140 menghasilkan *wake region* yang lebih lebar dengan pola aliran yang lebih menyebar. Sesuai dengan Anderson (2011), *wake* yang lebih lebar pada FX74-CL5-140 menunjukkan bahwa profil ini berinteraksi dengan volume udara yang lebih besar, sehingga potensi pemanfaatan energi anginnya pun lebih besar dibanding NACA 2421

Velocity Pathline pada kondisi transient kecepatan 5m/s**Gambar 14.** (a) NACA 2421, (b) FX74 CL5 140

Pada waktu 0,09 s, aliran pada kedua turbin mulai menunjukkan percepatan, namun *airfoil* FX74-CL5-140 membentuk zona kecepatan tinggi lebih awal dan lebih luas dibandingkan NACA 2421. Hal ini menunjukkan bahwa camber yang lebih besar dan cekungan yang lebih dalam pada FX74-CL5-140 meningkatkan kemampuan sudu dalam menangkap dan mengarahkan aliran angin.

Pada waktu 0,365 s, NACA 2421 menghasilkan *wake region* yang lebih sempit dan aliran di belakang rotor lebih cepat kembali stabil. Sebaliknya, FX74-CL5-140 membentuk *wake region* yang lebih lebar dan lebih turbulen, menunjukkan bahwa momentum aliran yang diekstraksi lebih besar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa FX74-CL5-140 memiliki kemampuan penyerapan energi angin yang lebih tinggi dibandingkan NACA 2421 pada kecepatan angin 5 m/s.

Velocity Pathline pada kondisi transient kecepatan 6m/s**Gambar 15.** (a) NACA 2421, (b) FX74 CL5 140

Pada waktu 0,09 s, aliran pada kedua turbin menunjukkan percepatan yang lebih tinggi dibandingkan kondisi kecepatan 4 m/s dan 5 m/s. *Airfoil* FX74-CL5-140 kembali membentuk zona kecepatan tinggi yang lebih cepat dan lebih luas di sekitar permukaan sudu dibandingkan NACA 2421, menunjukkan bahwa camber yang lebih besar dan cekungan yang lebih dalam meningkatkan kemampuan sudu dalam menangkap serta mengarahkan aliran angin pada kecepatan inlet yang lebih tinggi.

Pada waktu 0,365 s, NACA 2421 menghasilkan *wake region* yang relatif lebih sempit dengan aliran *downstream* yang lebih cepat kembali stabil. Sebaliknya, FX74-CL5-140 membentuk *wake region* yang paling lebar dan paling turbulen dibandingkan seluruh variasi kecepatan yang diteliti. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin memperkuat interaksi antara aliran dan geometri *airfoil* FX74-CL5-140 sehingga transfer momentum dan ekstraksi energi menjadi semakin optimal. Dengan demikian, pada kecepatan 6 m/s, *airfoil* FX74-CL5-140 menunjukkan kemampuan pemanfaatan energi angin yang lebih tinggi dibandingkan NACA 2421.

Performa Koefisien Power dan Koefisien Torsi**Airfoil FX74-CL5-140**

Diketahui :

D = 0.436 m

H = 0.37 m

R = 0,218 m

T = 0,135

 $\omega = 17,2 \text{ rad/s}$

V = 5 m/s

 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ **Tip Speed Ratio**

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} = \frac{17.2 \times 0.218}{5} = \frac{3.7496}{5} = 0.750$$

Luas Sapuan

$$A = D \times H = 0.436 \times 0.37 = 0.16132 \text{ m}^2$$

Koefisien Torsi

$$C_t = \frac{0.135}{\frac{1}{2} \cdot (1.225) \cdot (0.16132) \cdot (5^2) \cdot (0.218)}$$

$$C_t = \frac{0.135}{0.02154 \times 25} = \frac{0.135}{0.5385} = 0.251$$

Koefisien Power

$$C_p = C_t \times \lambda$$

$$C_p = 0.251 \times 0.750 = 0.188 \text{ (Efisiensi 18,8)}$$

Tabel 3. Hasil performa airfoil FX74-CL5-140

V m/s	Omega rad/s	TSR λ	T Nm	Ct	Cp	Efisiensi %
4	12.8	0.698	0.075	0.218	0.152	15,2%
5	17.2	0.750	0.135	0.251	0.188	18,8%
6	19.2	0.701	0.165	0.213	0.149	14,9%

Airfoil NACA 2421

Diketahui :

D = 0.436 m

H = 0.37 m

R = 0,218 m

T = 0,122 Nm

 $\omega = 16,5 \text{ rad/s}$

V = 5 m/s

 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ **Tip Speed Ratio**

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} = \frac{16.5 \times 0.218}{5} = \frac{3.597}{5} = 0.719$$

Luas Sapuan

$$A = D \times H = 0.436 \times 0.37 = 0.16132 \text{ m}^2$$

Koefisien Torsi

$$C_t = \frac{0.122}{\frac{1}{2} \cdot (1.225) \cdot (0.16132) \cdot (5^2) \cdot (0.218)}$$

$$C_t = \frac{0.122}{0.02154 \times 25} = \frac{0.122}{0.5385} = 0.227$$

Koefisien Power

$$C_p = C_t \times \lambda$$

$$C_p = 0.227 \times 0.719 = 0.163 \text{ (Efisiensi 16,3)}$$

Tabel 4. Hasil performa airfoil NACA 2421

V m/s	Omega rad/s	TSR λ	T Nm	Ct	Cp	Efisiensi %
4	11.5	0.627	0.068	0.197	0.124	12,4%
5	16.5	0.719	0.122	0.227	0.163	16,3%
6	18.2	0.661	0.148	0.191	0.126	12,6%

Pengujian dilakukan pada turbin angin Savonius tiga sudu dengan dua jenis profil *airfoil*, yaitu FX74-CL5-140 dan NACA 2421, pada variasi kecepatan angin 4, 5, dan 6 m/s. Parameter yang dianalisis meliputi Koefisien Power (C_p), Koefisien Torsi (C_t), dan efisiensi turbin pada setiap variasi kecepatan angin dan *Tip Speed Ratio* (TSR). Karena kedua konfigurasi menggunakan jumlah sudu yang sama, yaitu tiga buah, maka perbedaan performa yang diperoleh sepenuhnya dipengaruhi oleh karakteristik geometri *airfoil*.

Berdasarkan hasil pengujian, *airfoil* FX74-CL5-140 secara konsisten menghasilkan nilai C_p , C_t , dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan NACA 2421 pada seluruh variasi kecepatan angin. Performa optimum kedua *airfoil* dicapai pada kecepatan angin 5 m/s, dengan FX74-CL5-140 memperoleh C_p sebesar 0,188, C_t sebesar 0,251, dan efisiensi sebesar 18,8%

$$\eta = 0,188 \times 100\% = 18,8\%$$

$$\eta = 0,163 \times 100\% = 16,3\%$$

sedangkan NACA 2421 menghasilkan C_p sebesar 0,163, C_t sebesar 0,227, dan efisiensi sebesar 16,3%. Pada kecepatan 6 m/s sehingga dan selisih sehingga selisih peningkatan C_p pada kondisi optimal ini mencapai sekitar 15,3%.

$$\frac{0.188 - 0.163}{0.163} \times 100\% = \frac{0.025}{0.163} \times 100\% = 15.3\%$$

nilai C_p dan C_t kedua *airfoil* mengalami penurunan. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin tidak selalu diikuti oleh peningkatan performa turbin, karena rotor tidak mampu mempertahankan TSR pada kondisi optimum. Akibatnya, sudut interaksi antara aliran udara dan permukaan sudu menjadi kurang ideal sehingga kemampuan turbin dalam mengonversi energi angin menjadi power mekanis menurun.

Analisis karakteristik C_p - λ dan C_t - λ menunjukkan bahwa kedua *airfoil* mencapai performa terbaiknya pada kecepatan angin yang sama, namun pada nilai TSR optimum yang berbeda. *Airfoil* FX74-CL5-140 mencapai kondisi optimum pada TSR 0,750, sedangkan

NACA 2421 pada TSR 0,719. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa karakteristik geometri masing-masing *airfoil* memengaruhi kecepatan putar rotor yang diperlukan untuk memperoleh rasio kecepatan ujung sudu terhadap kecepatan angin yang paling efisien.

Keunggulan FX74-CL5-140 dipengaruhi oleh karakteristik geometrinya yang memiliki *camber* lebih besar dan cekungan yang lebih dibandingkan NACA 2421. Geometri tersebut meningkatkan kemampuan sudu dalam menangkap, dan mengarahkan aliran angin sehingga menghasilkan distribusi tekanan yang lebih besar pada permukaan sudu. Kondisi ini meningkatkan gaya tangensial yang bekerja pada rotor, sehingga torsi, power, dan efisiensi turbin menjadi lebih tinggi. Temuan ini juga sejalan dengan hasil visualisasi *pathline velocity*, di mana FX74-CL5-140 secara konsisten membentuk zona percepatan aliran yang lebih luas dan *wake region* yang lebih berkembang pada seluruh variasi kecepatan angin. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *airfoil* FX74-CL5-140 merupakan profil yang paling optimal untuk turbin angin Savonius tiga sudu pada rentang kecepatan angin 4–6 m/s, karena mampu menghasilkan distribusi aliran yang lebih efektif sekaligus memberikan nilai C_p , C_t , dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan *airfoil* NACA 2421.

Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dengan variasi modifikasi bentuk *blade* pada turbin angin Savonius. Simulasi yang dijalankan dengan beberapa kecepatan antara lain 4m/s, 5m/s dan 6m/s, Berdasarkan hasil simulasi CFD *velocity pathline*, profil *airfoil* FX74-CL5-140 menghasilkan distribusi kecepatan angin yang lebih optimal dibandingkan NACA 2421 pada seluruh variasi kecepatan yang diuji (4, 5, dan 6 m/s), dengan distribusi aliran lebih luas, *wake region* lebih besar, serta benturan aliran lebih merata pada sisi cekung sudu akibat nilai *camber* dan luas permukaan sisi cekung sudu yang lebih besar. Pengujian perbandingan *airfoil* FX74 CL5 140 dan NACA 2421 pada turbin angin Savonius menunjukkan bahwa FX74 CL5 140 secara konsisten unggul di seluruh kondisi pengujian, dengan nilai C_p maksimum 0,188 dan C_t maksimum 0,251 pada TSR 0,750 di kecepatan angin 5 m/s, dibandingkan NACA 2421 yang hanya mencapai C_p 0,163 dan C_t 0,227 pada TSR 0,719 di kecepatan angin yang sama. Keunggulan ini dipengaruhi oleh geometri FX74 CL5 140 yang memiliki *camber* lebih besar sehingga menghasilkan perbedaan tekanan, gaya tangensial, dan *lift-to-drag ratio* yang lebih tinggi, sementara NACA 2421 dengan profil lebih tipis dan simetris menghasilkan gaya tangensial yang relatif lebih kecil. Oleh karena itu, *airfoil* FX74 CL5 140 direkomendasikan sebagai profil sudu yang lebih efektif untuk meningkatkan efisiensi turbin angin Savonius pada kondisi kecepatan angin rendah hingga menengah.

DAFTAR PUSTAKA

Anderson, J. D. (2011). *Fundamentals of aerodynamics* (5th ed.). McGraw-Hill.

- Eppler, R. (1990). *Airfoil design and data*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02646-5>
- Hansen, M. O. L. (2015). *Aerodynamics of wind turbines* (3rd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315769981>
- Howell, R., Qin, N., Edwards, J., & Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(2), 412–422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>
- Islam, M., Ting, D. S. K., & Fartaj, A. (2008). Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 1087–1109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.02.006>
- Kacprzak, K., Lipecki, T., & Sobczak, K. (2014). The influence of the number of blades on the performance of a Savonius wind turbine. *Renewable Energy*, 66, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.040>
- Kumar, R., & Saini, R. P. (2020). Performance analysis of vertical axis wind turbine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133, 110301. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110301>
- Loutun, M. J. T., Didane, D. H., Batcha, M. F. M., Abdullah, K., Mohd Ali, M. F., Mohammed, A. N., & Afolabi, L. O. (2021). 2D CFD simulation study on the performance of various NACA airfoils. *CFD Letters*, 13(4), 38–50. <https://doi.org/10.37934/cfdl.13.4.3850>
- Pambudi, N. A., & Firdaus, R. A. (2022). *Energi baru dan terbarukan (EBT): Turbin angin untuk mahasiswa Pendidikan Teknik Mesin* (Edisi I, Cetakan 1). UNS Press.
- Ridwan, M., & Abdul Latief, A. (2019). Simulasi numerik pengaruh variasi jumlah sudu 2, 3, dan 4 terhadap distribusi kecepatan turbin angin Savonius. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 7(2), 122–130.
- Saha, U. K., Thotla, S., & Maity, D. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8–9), 1359–1375. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.001>
- Shamsoddin, S., & Porté-Agel, F. (2016). LES of VAWT wakes. *Energies*, 9(11), 902. <https://doi.org/10.3390/en9110902>
- Sopian, K., Othman, M. Y. H., Yatim, B., & Daud, W. R. W. (2019). Wind energy potential in Southeast Asia. *Renewable Energy*, 139, 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.024>
- Wenehenubun, F., Saputra, A., & Sutanto, H. (2015). An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades.

Energy Procedia, 68, 297–304 .
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>

