

Numerical Simulation of the Effect of Blade Shape on Vertical Axis Wind Turbine Using NACA 0015, NACA 4415, and NACA 7510

Rezki Alhakim^{1*}, Randi Purnama Putra¹, Yolli Fernanda¹, Fitriah Qalbina¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author: rezkialhakim99@gmail.com

Received January 27th 2026; Revised February 4th 2026; Accepted February 13th 2026

Abstract

Energy is a resource that can be used to perform various tasks, including fuel, electricity, mechanical energy, and heat. With technological advances and global economic development, the demand for electricity will continue to increase. This drives various research efforts towards alternative energy sources, ranging from the development of existing tools to the creation of new innovations. Wind turbines work by utilizing the kinetic energy of the wind flow to rotate the blades, which are then converted into electrical energy through a generator system. The purpose of this study is to analyze the effect of curvature shape on the Lift Coefficient (C_l), Drag Coefficient (C_d), and Power Coefficient (C_p) of vertical axis wind turbine blades. Simulations were carried out in 3D using ANSYS Fluent software and the $k-\omega$ SST turbulence model, with wind speeds ranging from 4 to 7 m/s. The aerodynamic profiles analyzed were NACA 0015, NACA 4415, and NACA 7510. Aerodynamic simulations of vertical axis wind turbines were carried out using a steady-state approach with a multi-reference frame (MRF) rotation model to obtain the average aerodynamic characteristics of the rotor. The simulation results show that NACA 4415 produces the best C_l value with relatively controlled C_d , while NACA 0015 shows the worst aerodynamic performance. NACA 7510 produces the highest C_p value at all wind speed variations, despite low C_l and high C_d values, indicating that the drag mechanism dominates torque generation at low speeds. The conclusion of this study shows that the selection of the NACA 7510 airfoil is most effective for improving the performance of vertical axis wind turbines at low wind speeds.

Keywords: Vertical Axis Wind Turbine, Airfoil, CFD, Drag and Lift Coefficient, Power Coefficient

Simulasi Numerik Pengaruh Bentuk Sudu pada Turbin Angin Sumbu Vertical Dengan Menggunakan NACA 0015, NACA 4415, dan NACA 7510

Abstrak

Energi merupakan sumber daya yang dapat digunakan untuk melakukan berbagai pekerjaan, termasuk bahan bakar, listrik, energi mekanik, dan panas. Dengan kemajuan teknologi dan perkembangan ekonomi global, permintaan listrik akan terus meningkat. Hal ini mendorong berbagai upaya penelitian ke arah sumber energi alternatif, mulai dari pengembangan alat yang sudah ada hingga penciptaan inovasi baru. Turbin angin bekerja dengan memanfaatkan energi kinetik aliran angin untuk memutar sudu, yang selanjutnya dikonversikan menjadi energi listrik melalui sistem generator. Tujuan penelitian ini adalah untuk analisis pengaruh bentuk kelengkungan terhadap Koefisien Angkat (Cl), Koefisien Hambat (Cd), dan Koefisien Daya (Cp) dari bilah turbin angin sumbu vertikal. Simulasi dilakukan dalam 3D menggunakan *software* ANSYS Fluent dan model turbulensi $k-\omega$ SST, dengan kecepatan angin berkisar antara 4 hingga 7 m/s. Profil aerodinamis yang dianalisis adalah NACA 0015, NACA 4415, dan NACA 7510. Simulasi aerodinamis turbin angin sumbu vertikal dilakukan menggunakan pendekatan steady-state dengan model rotasi multi-reference frame (MRF) untuk mendapatkan karakteristik aerodinamis rata-rata rotor. Hasil simulasi menunjukkan bahwa NACA 4415 menghasilkan nilai Cl terbaik dengan Cd yang relatif terkontrol, sedangkan NACA 0015 menunjukkan kinerja aerodinamis terburuk. NACA 7510 menghasilkan nilai Cp tertinggi di semua variasi kecepatan angin, meskipun nilai Cl rendah dan Cd tinggi, menunjukkan bahwa mekanisme hambatan mendominasi pembangkitan torsi pada kecepatan rendah. Kesimpulan dari studi ini menunjukkan bahwa pemilihan airfoil NACA 7510 paling efektif untuk meningkatkan kinerja turbin angin sumbu vertikal pada kecepatan angin rendah.

Kata kunci: Turbin Angin Vertikal Axis, Airfoil, CFD, Koefisien Drag dan Lift; Koefisien Daya

I. PENDAHULUAN

Energi adalah sumber daya yang bisa dipakai untuk beberapa fungsi, seperti bahan bakar, listrik, dan kebutuhan rumah tangga maupun industri. Sebagian dari Sumber daya alam termasuk bahan bakar, listrik, mekanik, dan panas (Choudhury, 2025). Sumber Daya Alam tersebut dapat digunakan sebagai energi secara tidak langsung atau langsung. Sumber daya alam dapat terbagi dua kategori: terbarukan dan tak terbarukan

Sumber energi tak terbarukan tidak selalu tersedia, tidak dibentuk kembali di alam, dan memerlukan waktu yang lama. Akibatnya, sumber energi ini mungkin tidak akan bertahan lama jika digunakan secara terus menerus. Contoh dari energi fosil Adalah gas alam, minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Sumber energi terbarukan Adalah sumber energi yang proses pembentukannya berkesinambungan sehingga melimpah dan tidak pernah habis. Contoh dari sumber energi terbarukan termasuk matahari, biomasa, angin, air, panas bumi, gelombang laut, dan sebagainya (Solikah, 2024).

Seiring perkembangan teknologi dan pertumbuhan ekonomi di seluruh dunia, kebutuhan akan energi listrik akan terus meningkat. Hal ini menyebabkan banyak penelitian tentang sumber energi alternatif dilakukan. Inovasi baru atau pengembangan alat yang sudah ada adalah semua contohnya. Mulai dari pengembangan untuk alat yang sudah ada hingga menciptakan suatu inovasi baru (Sumarno et al., 2020). Karena cadangan minyak bumi Indonesia semakin menipis, pemerintah membuat kebijakan untuk memanfaatkan sumber energi lokal alternatif seperti hydro, matahari, panas bumi, biomassa, dan angin. Karena turbin angin tidak menghasilkan emisi CO₂ selama produksi energi listrik, energi angin dapat berkontribusi pada pengurangan emisi yang signifikan (Andi Mulkan, 2022).

Energi angin merupakan energi yang bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbon dioksida (CO₂) dan tidak menyebabkan *global warming*. Energi angin dapat dimanfaatkan dengan memakai teknologi turbin. Teknologi turbin angin dapat menghasilkan listrik dari angin (Pambudi & Firdaus, 2022). Indonesia memiliki ruang yang cukup untuk pengembangan lebih lanjut tentang energi

angin. Daerah pesisir Indonesia memiliki potensi angin yang sangat besar, akan tetapi sistem konversi energi angin saat ini hanya menghasilkan 800 kilowatt (Syaifudin et al., 2019).

Generator memungkinkan turbin angin menghasilkan energi listrik dari angin proses terjadinya, di mana sudu-sudu turbin diputar oleh angin dengan kecepatan tertentu sehingga membuat poros turbin turut bergerak, lalu putaran poros turbin meneruskannya ke pembangkit listrik agar dapat dikonversi sebagai energi listrik (Salvador-gutierrez et al., 2025). Saat ini, turbin angin jenis horizontal lebih banyak digunakan dan dikembangkan daripada turbin angin jenis vertical (Lee et al., 2024). Namun, turbin angin jenis vertical memiliki beberapa keuntungan daripada turbin angin jenis horizontal, salah satunya turbin angin jenis vertical memiliki sistem yaw, turbin tersebut dapat bergerak tanpa tergantung pada arah angin, yang berarti bahwa transmisi dan generator ditempatkan diground dan dapat mengurangi berat turbin angin dan dapat perawatan dengan mudah (Iksan et al., 2025).

Sudu adalah komponen utama yang menangkap angin yang kemudian diubah menjadi energi mekanik (Herlambang et al., 2019). Dengan kemajuan teknologi saat ini, sudu turbin angin yang dapat dibuat dari berbagai bahan, ukuran, jenis airfoil, jumlah sudu, dan factor lainnya. Salah satu Lembaga yang telah menyelidiki bentuk airfoil adalah *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA), yang dimiliki oleh Amerika Serikat. NACA telah menerbitkan dokumen dengan seri airfoil 4, 5, 6, 7, 8, dan 16. Airfoil memiliki beberapa karakteristik, seperti pengaturan aliran terikat, pengaturan aliran tinggi/pengembangan stall, dan pengaturan plat rata/penuh stall (Ira H. Abbott & Albert E. Von Doenhoff, 1959).

Penelitian ini, akan dilakukan simulasi numerik menggunakan type turbin angin vertical axis dengan variasi sudu menggunakan profil NACA 0015, NACA 4415, dan NACA 7510. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan simulasi numerik guna menganalisis pengaruh bentuk sudu berbasis NACA 0015, NACA 4415, dan NACA 7510 terhadap kinerja aerodinamika angin dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Simulasi turbin angin sumbu vertikal dilakukan menggunakan pendekatan steady-state dengan model rotasi Multiple Reference Frame (MRF), di mana sudu didefinisikan dalam kerangka acuan berotasi dan fluida sekitarnya berada pada kerangka diam. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh karakteristik aerodinamika rata-rata rotor secara efisien (Colley et al., 2010).

II. METODE PENELITIAN

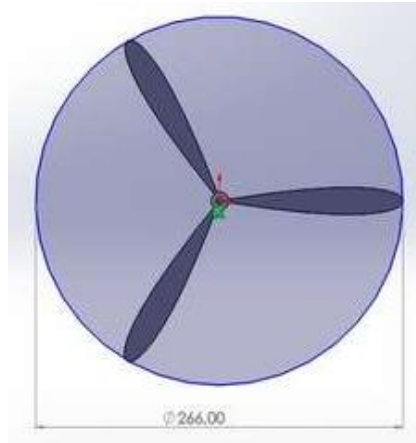
Penelitian ini merupakan penelitian numerik berbasis simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang bertujuan untuk menganalisis performa aerodinamika turbin angin sumbu vertikal dengan menggunakan profil sudu NACA 0015, NACA 4415, dan NACA 7510. Metode ini dipilih karena mampu menggambarkan karakteristik aliran udara dan gaya-gaya aerodinamika secara detail tanpa perlu melakukan pengujian fisik secara langsung.

1. Desain Sudu Turbin

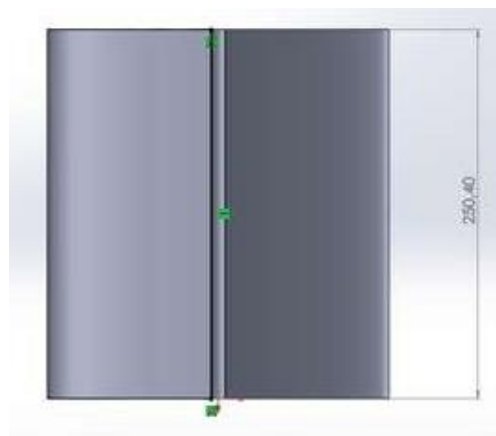
Desain sudu merupakan komponen krusial dalam kinerja turbin angin karena secara langsung menentukan seberapa efektif energi angin dapat dikonversi menjadi energi mekanik. Pembuatan desain sudu turbin menggunakan *software solidwork*, parameter desain sudu turbin ini merujuk pada desain sudu turbin yang telah dibuat oleh (Rahman et al., 2017). Dalam penelitian ini, peneliti memvariasikan model sudu NACA untuk melihat pengaruh aerodinamikanya, dapat dilihat ukuran dan model gambar pada Tabel 1 dan Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3.

Tabel 1 Dimensi Turbin Angin

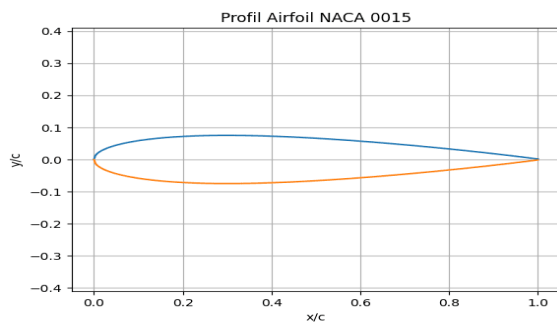
Parameter	Dimensi (mm)
Diameter	266
Tinggi	250.40



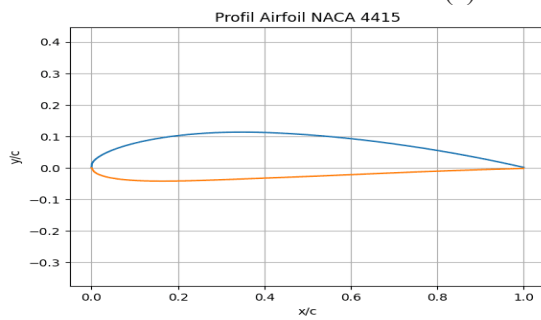
Gambar 1 Diameter Turbin Angin



Gambar 2 Tinggi Turbin Angin

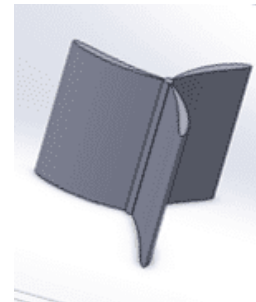
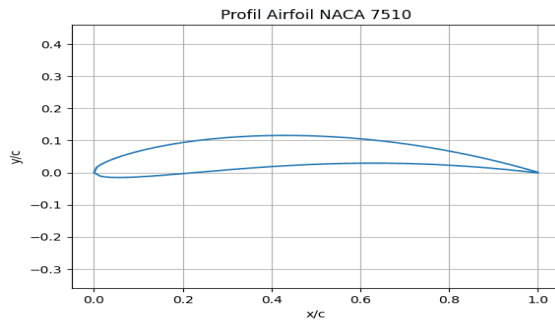


(a)



(b)





(c)

Gambar 3 Pandangan Isometrik dari Tiga Model Turbin Angin Menggunakan Airfoil (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, dan NACA 7510

2. Simulasi Turbin Angin

Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan *fluid* domain sebagai *boundary condition* untuk menganalisis aliran udara yang melewati turbin di domain. *boundary condition* dari model ini mencakup *body*, *wall* (*top*, *bottom*, *right*, dan *left*), inlet sebagai tempat masuknya aliran udara, serta outlet sebagai batas akhir analisis. Pada Tabel 2 terdapat parameter-parameter kondisi batas, serta gambar 4 menunjukkan pembuatan domain fluida.

Tabel 2 Boundary Condition

No	Nama	Type Body	Keterangan
1	Inlet	Velocity Inlet	Velocity Magnitude: 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s dan 7 m/s
2	Outlet	Pressure Outlet	Gauge pressure: 0 Pa
3	Body	Wall	Shear condition: specified shear
4	Top	Wall	Shear condition: specified shear
5	Bottom	Wall	Shear condition: specified shear
6	Right	Wall	Shear condition: specified shear
7	Left	Wall	Shear condition: specified shear

III. HASIL PENELITIAN

Pada Tabel 3 Menampilkan hasil simulasi menunjukkan nilai Koefisien Daya (C_p), Koefisien Drag (C_d), Koefisien Lift (C_l), dan *Tip Speed Ratio* (TSR) terhadap beberapa kecepatan aliran udara sebesar 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, dan 7 m/s.

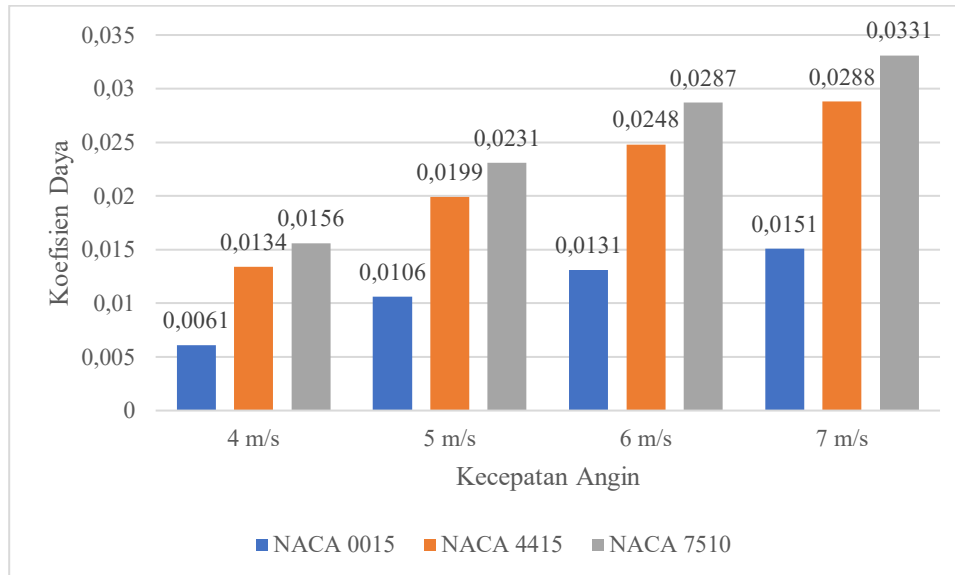
Tabel 3 Hasil Simulasi

No	Profil Airfoil	Kecepatan (m/s)	Tip Speed Ratio (TSR)	Koefisien Daya (C_p)	Koefisien Drag (C_d)	Koefisien Lift (C_l)
1	NACA 0015	4	0.098	0.0061	0.7908	0.0002
2	NACA 4415	4	0.098	0.0134	0.7760	0.0063
3	NACA 7510	4	0.098	0.0156	0.8030	0.0001
4	NACA 0015	5	0.124	0.0106	0.8175	0.0002
5	NACA 4415	5	0.124	0.0199	0.7958	0.0065
6	NACA 7510	5	0.124	0.0231	0.8227	0.0001
7	NACA 0015	6	0.142	0.0131	0.8372	0.0004
8	NACA 4415	6	0.142	0.0248	0.8108	0.0065
9	NACA 7510	6	0.142	0.0287	0.8379	0.0001
10	NACA 0015	7	0.155	0.0151	0.8535	0.0004
11	NACA 4415	7	0.155	0.0288	0.8227	0.0066
12	NACA 7510	7	0.155	0.0331	0.8488	0.0001

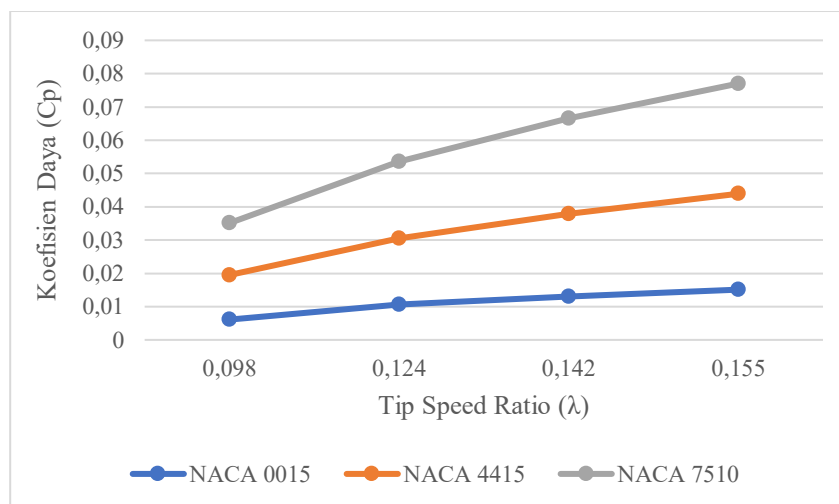
IV. PEMBAHASAN

1. Analisis Koefisien Daya (C_p)

Koefisien Daya (C_p) merupakan perbandingan daya yang diserap oleh rotor dan daya angin yang masuk ke area sapuan turbin. Menunjukkan efisiensi turbin angin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi daya mekanik pada poros. Pada Gambar 4 dan Gambar 5 terlihat bahwa peningkatan kecepatan angin dari 4 hingga 7 m/s menyebabkan kenaikan C_p untuk seluruh profil NACA.



Gambar 4 Grafik Koefisien Daya (C_p)



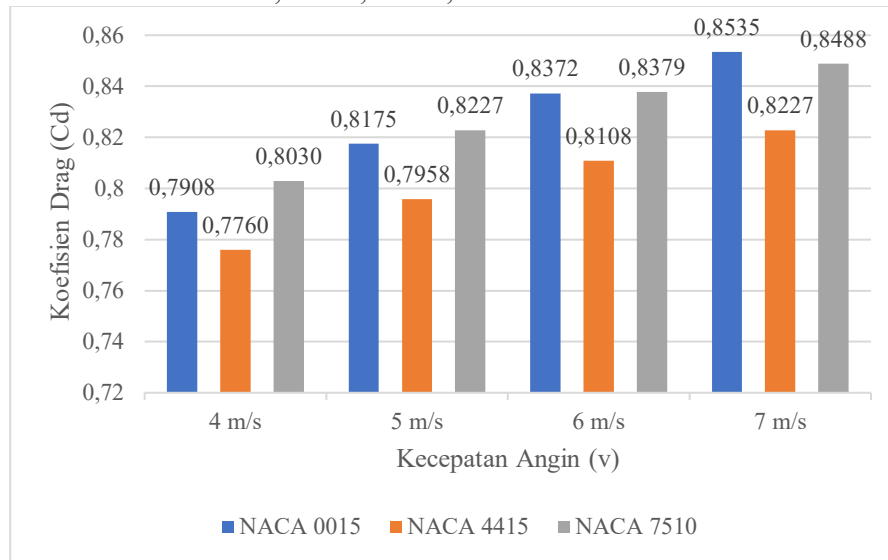
Gambar 5 Koefisien Daya (C_p) vs Tip Speed Rasio (λ) untuk ketiga model turbin

Berdasarkan nilai koefisien daya (C_p) yang diperoleh, dapat dijelaskan bahwa peningkatan kecepatan angin menyebabkan bertambahnya energi kinetik aliran yang berinteraksi dengan bilah, sehingga kemampuan turbin dalam mengekstraksi energi juga meningkat. Nilai C_p masih rendah pada kecepatan rendah (4–5 m/s) karena sudut serang efektif dan gaya angkat airfoil yang belum optimal. Namun, ketika kecepatan meningkat hingga 6–7 m/s, aliran menjadi lebih energik dan gaya aerodinamis pada bilah meningkat, sehingga efisiensi konversi energi meningkat dan C_p meningkat (Burton et al., 2011).

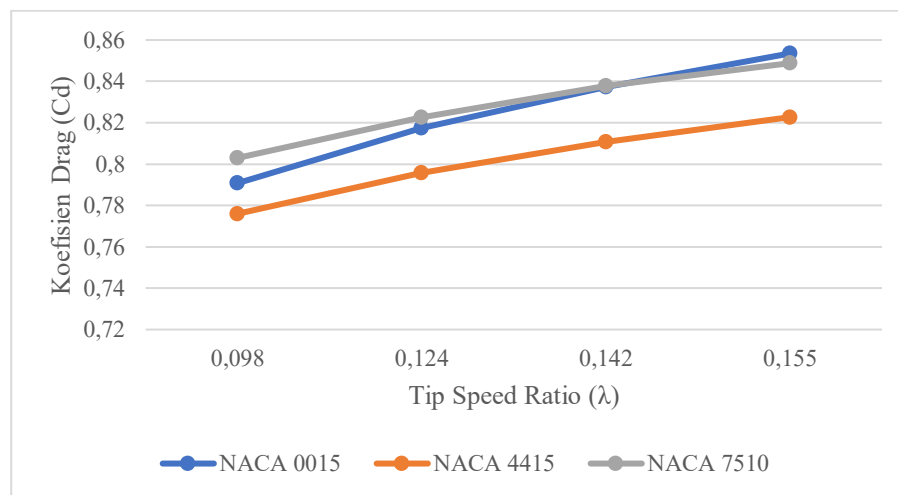
Profil bercamber seperti NACA 4415 dan terutama NACA 7510 menunjukkan C_p yang lebih tinggi dibandingkan profil simetris NACA 0015. Karena camber menghasilkan gaya angkat lebih besar pada sudut serang yang sama, sehingga torsi dan daya turbin meningkat (Rezaeiha., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik geometri airfoil sangat memengaruhi kinerja aerodinamis turbin, terutama dalam kondisi kecepatan angin menengah dan hampir ideal (Bintoro, 2025).

2. Koefisien Hambat (C_d)

Koefisien drag (C_d) bisa dibilang angka yang menunjukkan seberapa besar suatu benda “ditahan” oleh angin ketika angin lewat di sekitarnya. Pada Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan data perbandingan nilai C_d pada NACA 0015, NACA 4415 dan NACA 7510 untuk kecepatan aliran udara 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, dan 7 m/s.



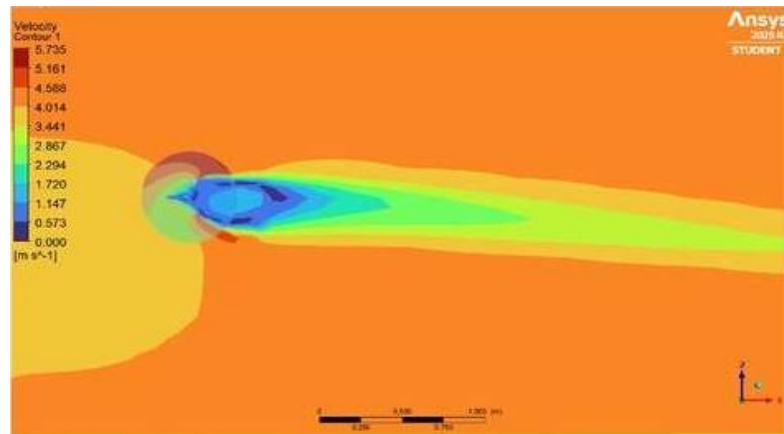
Gambar 6 Grafik Koefisien Drag (C_d)



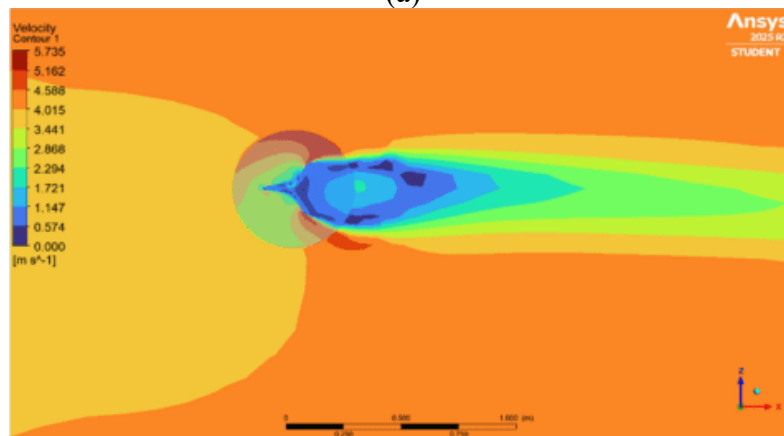
Gambar 7 Koefisien Drag (C_d) vs Tip Speed Rasio (λ) untuk ketiga model turbin

Berdasarkan grafik koefisien drag (C_d), terlihat bahwa pada seluruh profil terjadi peningkatan C_d seiring bertambahnya kecepatan angin dari 4 hingga 7 m/s. pada kecepatan 4 m/s, nilai C_d masih relatif rendah, dengan NACA 4415 memiliki drag paling kecil, diikuti NACA 0015, dan NACA 7510 yang paling besar. Ketika kecepatan meningkat menjadi 5 dan 6 m/s, C_d seluruh profil bertambah akibat meningkatnya gaya gesek dan tekanan pada permukaan bilah, namun urutan kecenderungan tetap sama, yaitu profil bercamber besar (NACA 7510) menghasilkan drag lebih tinggi dibandingkan NACA 4415 dan profil simetris NACA 0015.

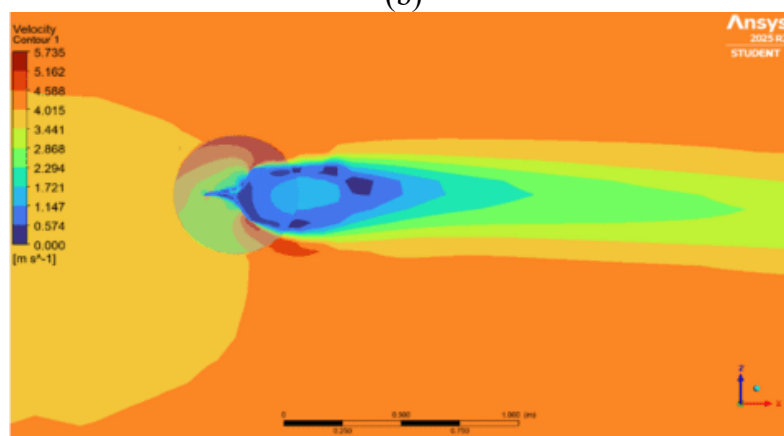
Pada kecepatan 7 m/s, nilai C_d mencapai maksimum untuk semua profil, yang menunjukkan bahwa intensitas interaksi aliran dengan bilah semakin kuat sehingga rugi-rugi aerodinamis juga meningkat. Secara teoritis, profil dengan camber lebih besar cenderung menghasilkan gaya angkat yang lebih tinggi, tetapi juga diikuti oleh peningkatan drag. Oleh karena itu, meskipun NACA 7510 memberikan nilai C_p tertinggi, profil ini juga memiliki C_d terbesar, sedangkan NACA 4415 menunjukkan kompromi yang lebih baik antara gaya angkat dan drag, sehingga lebih efisien secara aerodinamis dibandingkan profil simetris NACA 0015. Hal ini diperkuat dengan kontur kecepatan, pada Gambar 8 dapat dilihat kontur kecepatan pada kecepatan 4m/s, kemudian pada Gambar 9 kontur kecepatan pada kecepatan 5m/s, pada Gambar 10 kontur kecepatan pada kecepatan 6m/s, dan pada Gambar 11 kontur kecepatan pada kecepatan 7 m/s.



(a)

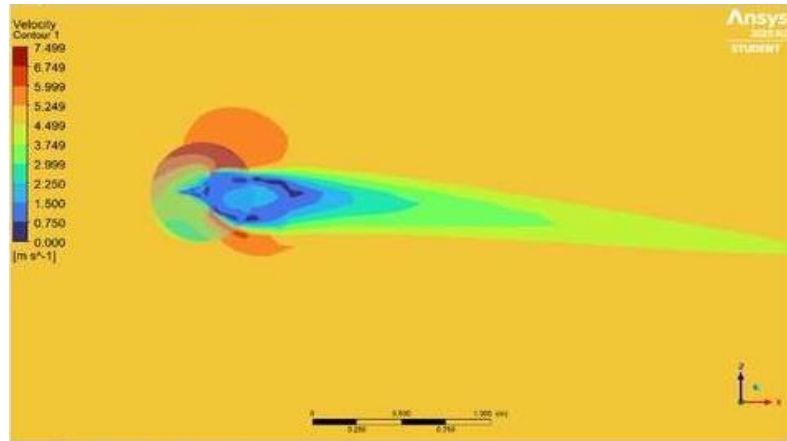


(b)

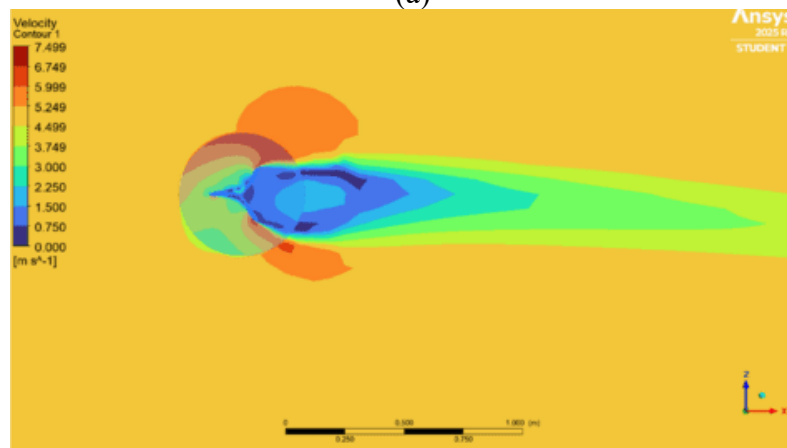


(c)

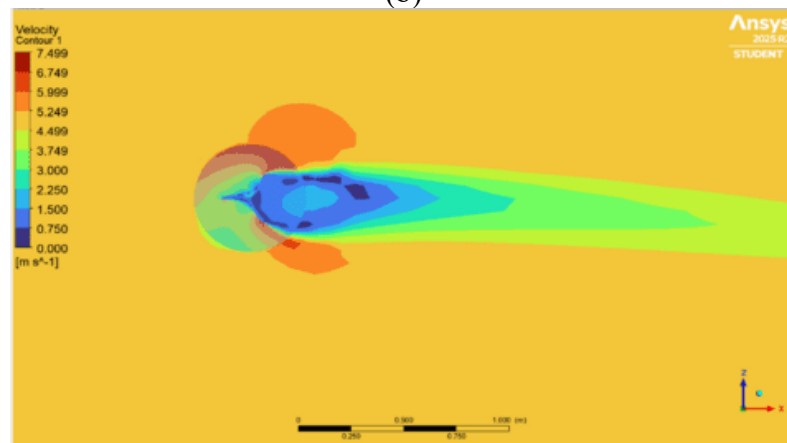
Gambar 8 Velocity contour pada kecepatan 4 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510



(a)

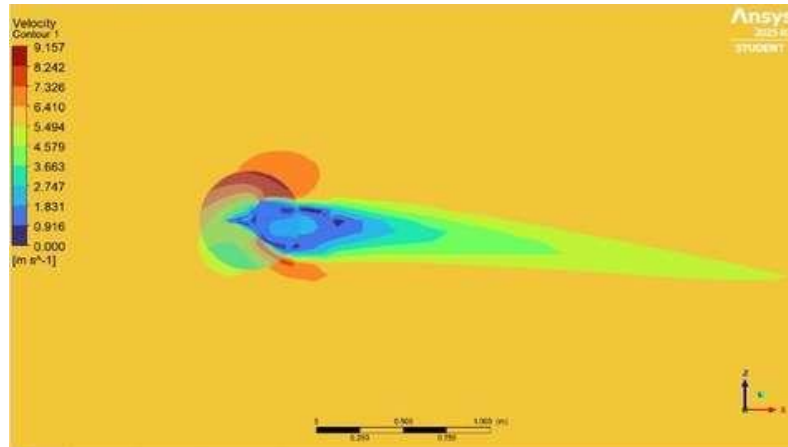


(b)

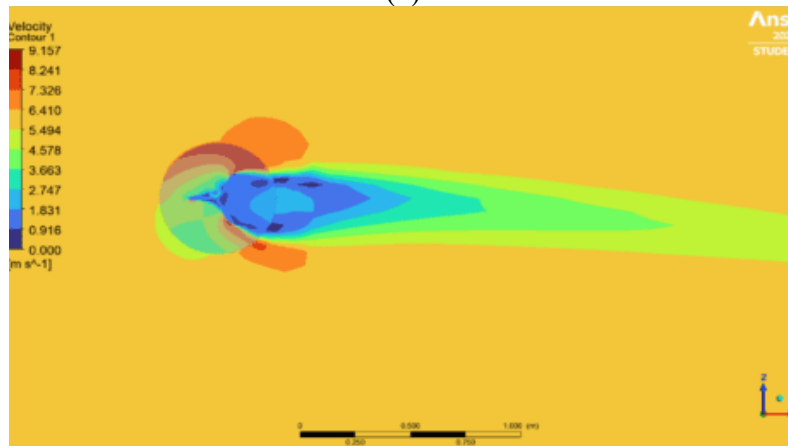


(c)

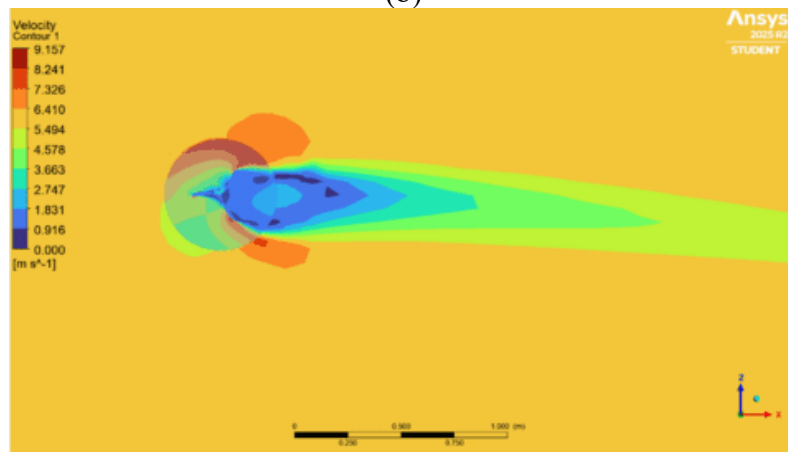
Gambar 9 Velocity Contour Pada Kecepatan 5 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510



(a)

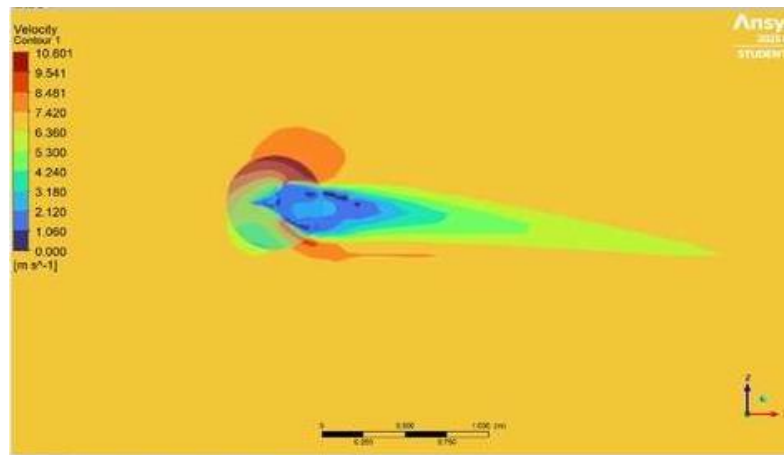


(b)

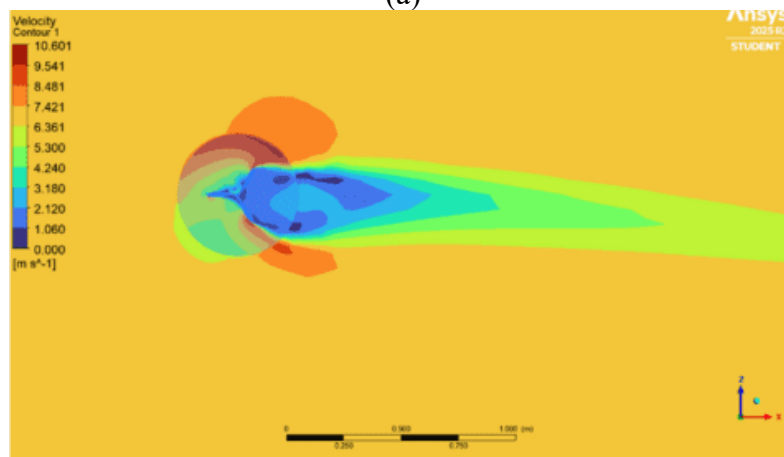


(c)

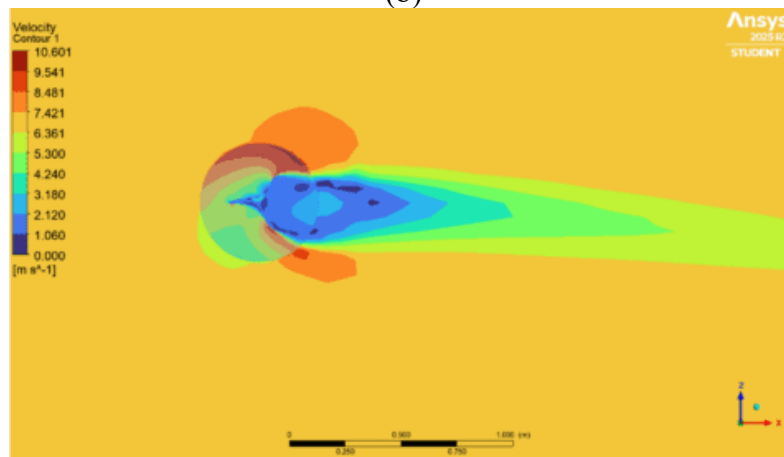
Gambar 10 Velocity contour pada kecepatan 6 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510



(a)



(b)



(c)

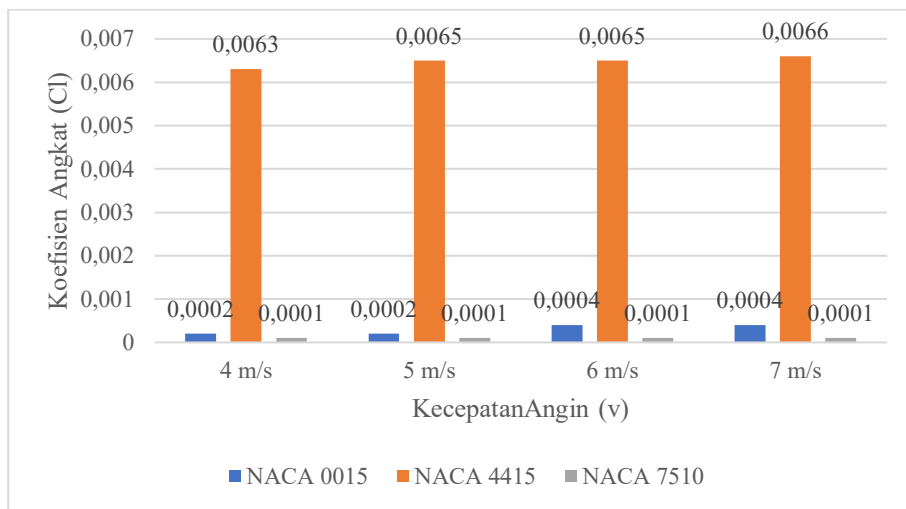
Gambar 11 Velocity contour pada kecepatan 7 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510

Secara umum, dapat diamati bahwa Gambar 8 menunjukkan kontur kecepatan pada kecepatan angin 4m/s, menunjukkan bahwa ketiga profil NACA memiliki daerah kecepatan rendah yang berwarna biru dibelakang sudu. Profil NACA 7510 memiliki zona kecepatan tinggi yang membuat aliran lebih sempit daripada NACA 0015 dan NACA 4415 yang menunjukkan distribusi aliran yang lebih merata disekitar sudu. Ketika kecepatan meningkat menjadi 5m/s, wake dibelakang sudu menjadi lebih panjang yang ditunjukkan pada Gambar 9. Zona kecepatan tinggi pada warna hijau-kuning disekitar sudu menjadi lebih dominan. Profil NACA 4415 dan NACA 7510 adalah yang paling menonjol. Hal ini menunjukkan percepatan aliran yang lebih tinggi, yang dapat meningkatkan gaya aerodinamika pada sudu.

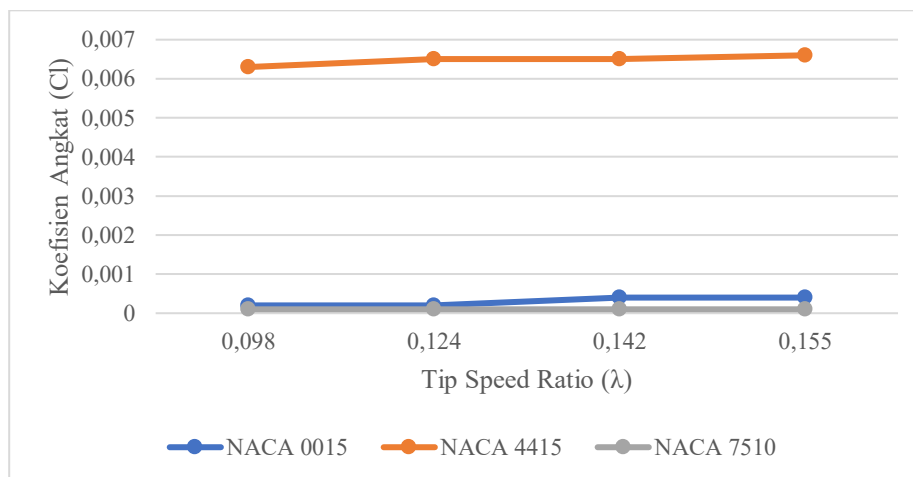
Kontur kecepatan pada kecepatan angin 6m/s, intensitas kontur kecepatan meningkat yang ditunjukkan pada Gambar 10. Dibelakang sudu, gradien kecepatan lebih tajam menunjukkan interaksi aliran yang lebih kuat jika dibandingkan kedua profil lainnya, profil NACA 7510 menunjukkan wake yang lebih stabil dan menunjukkan karakteristik aliran yang lebih terkontrol. Wake dibelakang sudu menjadi paling panjang dan kuat pada Gambar 11 pada kecepatan angin 7m/s. Semua profil NACA pada zona kecepatan tinggi mendominasi aliran sekitar sudu. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin secara signifikan meningkatkan percepatan aliran dan mungkin juga meningkatkan gaya hambat aerodinamis

3. Koefisien Angkat (Cl)

Koefisien lift adalah ukuran seberapa besar gaya angkat yang dibuat oleh profil bilah ketika terkena aliran udara. Nilai Cl dipengaruhi oleh bentuk airfoil, sudut serang, kecepatan udara relatif, serta kondisi aliran seperti turbulensi. Berdasarkan grafik koefisien lift (Cl) pada Gambar 12 dan Gambar 13, terlihat bahwa profil NACA 4415 menghasilkan nilai Cl yang paling tinggi pada seluruh variasi kecepatan angin, yaitu sekitar 0,0063–0,0066, dan cenderung meningkat seiring bertambahnya kecepatan dari 4 hingga 7 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa airfoil bercamber sedang mampu menghasilkan gaya angkat yang lebih besar dan stabil, sehingga efektif dalam menghasilkan torsi pada turbin.



Gambar 12 Grafik Koefisien Lift

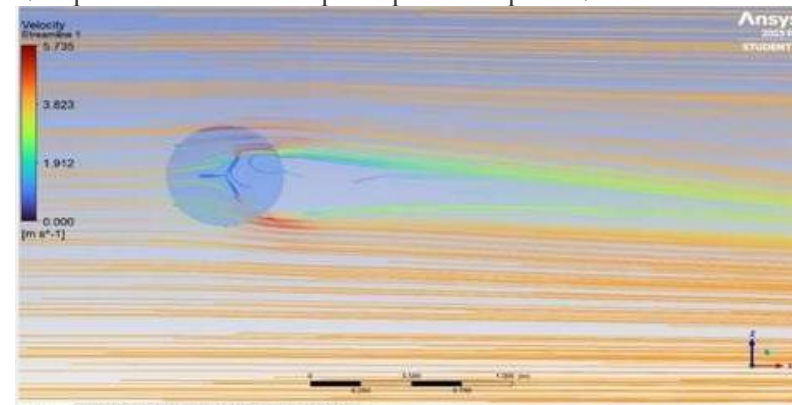


Gambar 13 Koefisien Lift (Cl) vs Tip Speed Rasio (λ) untuk ketiga model turbin

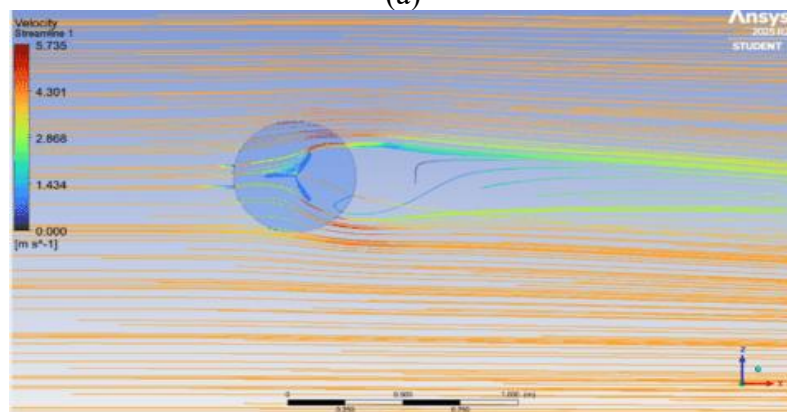
Profil NACA 0015 menunjukkan nilai Cl yang jauh lebih kecil dibandingkan NACA 4415, namun mengalami peningkatan dari sekitar 0,0002 pada 4–5 m/s menjadi sekitar 0,0004 pada 6–7 m/s, yang

menandakan bahwa gaya angkat mulai meningkat seiring bertambahnya energi aliran. Sementara itu, NACA 7510 memiliki nilai C_l yang paling rendah dan relatif konstan di sekitar 0,0001 pada seluruh kecepatan, yang mengindikasikan bahwa meskipun camber besar dapat meningkatkan torsi dan C_p , distribusi tekanan yang terbentuk pada kondisi sudut serang dan kecepatan ini belum menghasilkan gaya angkat efektif setinggi NACA 4415.

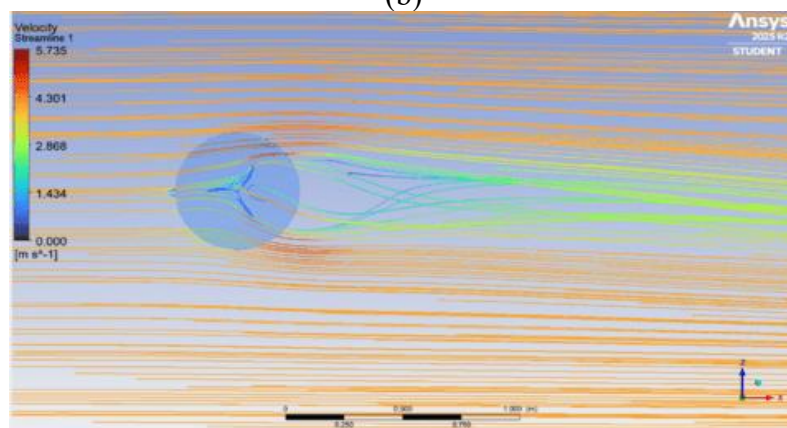
Secara teoritis, peningkatan kecepatan angin akan meningkatkan diferensiasi tekanan antara bagian bawah dan bagian atas airfoil, sehingga gaya angkat bertambah. Perbedaan karakteristik geometri, terutama besar camber (Marciniuk et al., 2024). Hal ini diperkuat dengan visualisasi streamline turbin angin, pada Gambar 14 dapat dilihat kontur kecepatan 4 m/s, kemudian pada Gambar 15 dapat dilihat kontur kecepatan pada kecepatan 5m/s, pada Gambar 16 dapat dilihat kontur kecepatan pada kecepatan 6m/s, dan pada Gambar 17 dapat dilihat kontur kecepatan pada kecepatan 7 m/s.



(a)

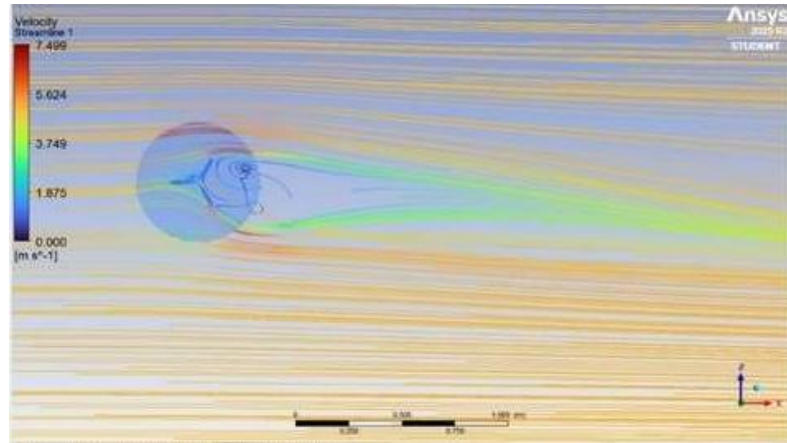


(b)

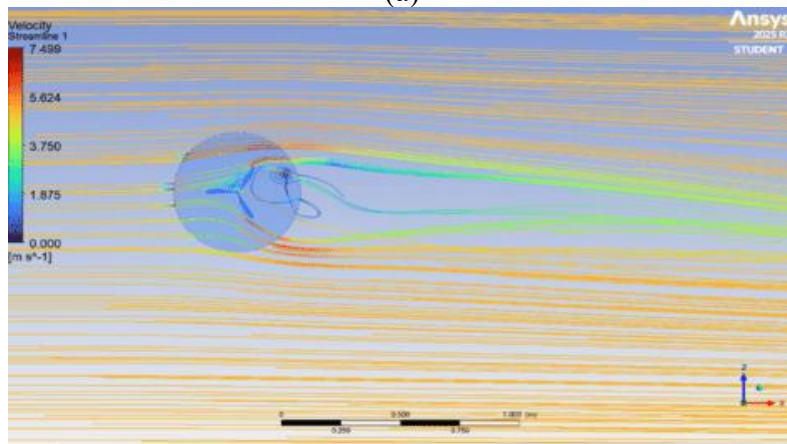


(c)

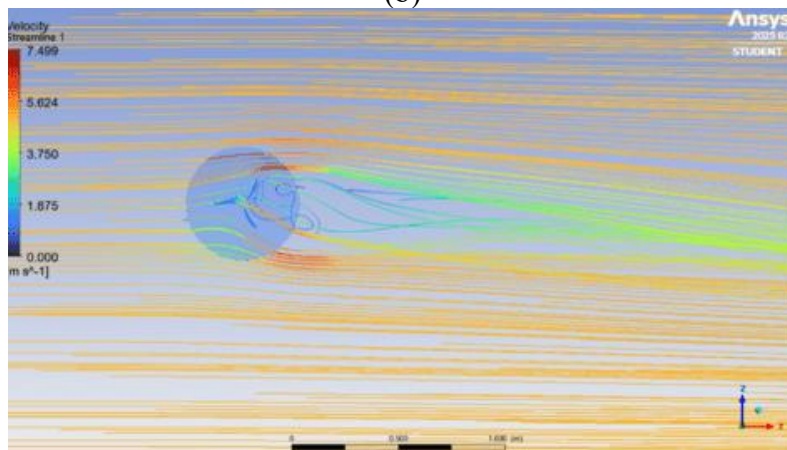
Gambar 14 Velocity streamline pada kecepatan 4 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510



(a)



(b)

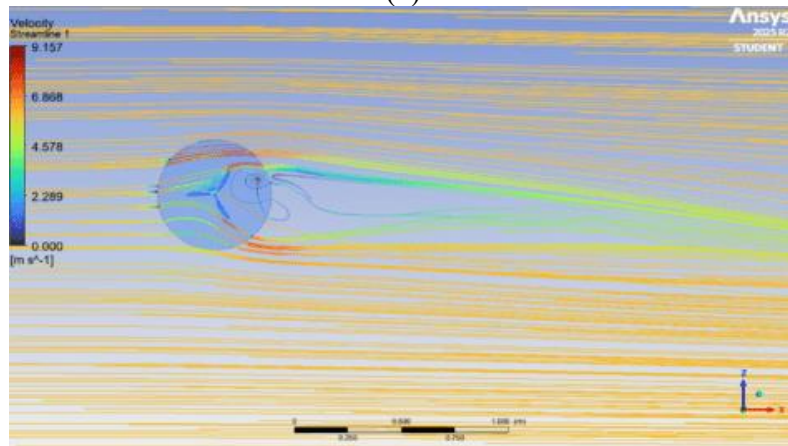


(c)

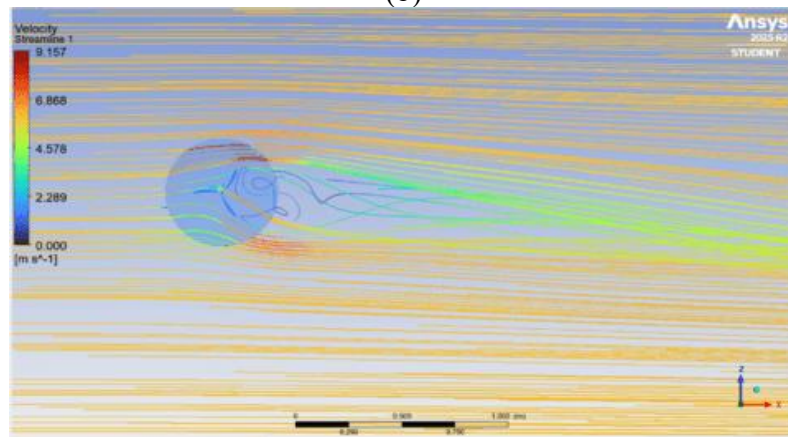
Gambar 15 Velocity Steamline pada Kecepatan 5 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510



(a)

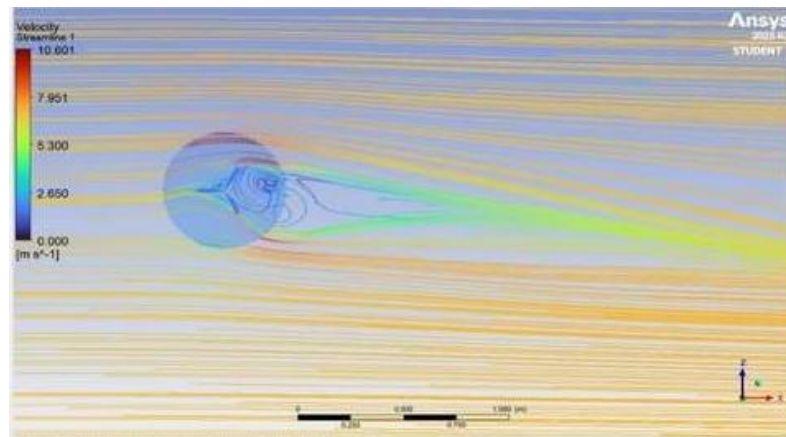


(b)

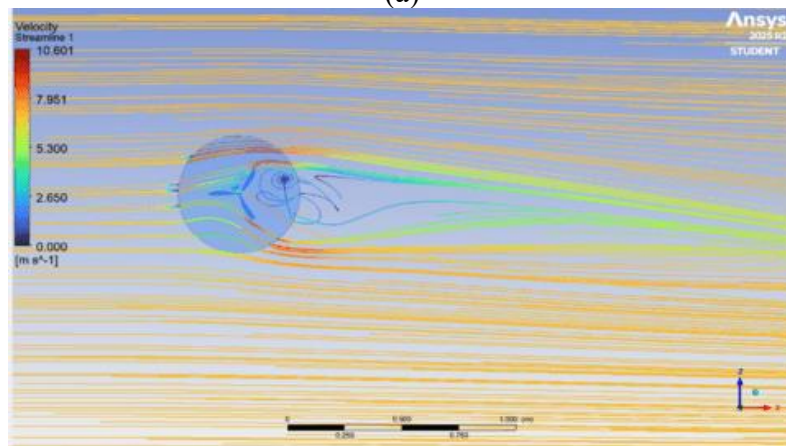


(c)

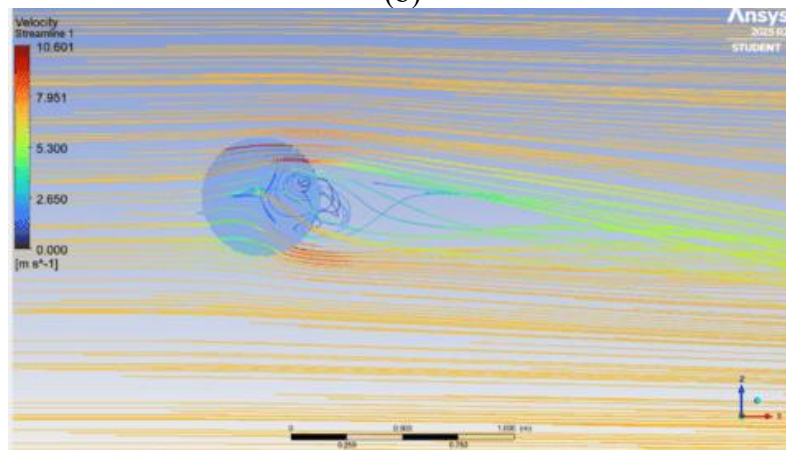
Gambar 16 Velocity Steamline pada Kecepatan 6 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510



(a)



(b)



(c)

Gambar 17 Velocity Steamline pada Kecepatan 7 m/s untuk (a) NACA 0015, (b) NACA 4415, (c) NACA 7510

Steamline memberikan gambaran yang lebih jelas tentang kestabilan aliran. Pada gambar 14 menunjukkan steamline pada kecepatan 4 m/s, aliran tetap relative teratur pada ketiga profil NACA. Akan tetapi karena sudut serang efektif yang terbentuk, terlihat pembelokan aliran dan daerah recirculation kecil dibelakang sudu, terutama pada profil NACA 0015. Pada gambar 15 yang menunjukkan steamline pada kecepatan angin 5 m/s, daerah recirculation dibelakang sudu menjadi lebih jelas dibelakang sudu. Khususnya pada NACA 4415, sebaliknya NACA 7510 menunjukkan aliran yang lebih halus dengan pola steamline yang mengikuti kontur sudu.

Pada gambar 16 dengan kecepatan angin 6 m/s, pola streamline aliran yang lebih kuat dibagian belakang sudu. Panjang lintasan aliran yang berputar, juga dikenal sebagai zona recirculation, meningkatnya aliran menunjukkan bahwa kecepatan aliran yang lebih besar mempengaruhi kestabilan aliran disekitar sudu. Pada gambar 17, pola streamline menunjukkan pola aliran yang palong kompleks, dengan daerah separasi dan recirculation yang semakin luas terutama pada profil NACA 0015 dan NACA 4415. Sementara itu, profil NACA 7510 masih menunjukkan aliran yang relative lebih terarah, yang mengindikasikan peforma aerodinamika yang lebih stabil pada kecepatan angin tinggi

4. Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio adalah parameter utama yang menghubungkan respons mekanik turbin dengan fenomena aerodinamika sudu turbin angin sumbu vertikal. Secara definisi, nilai TSR dipengaruhi secara langsung oleh kecepatan putar turbin (RPM) antara kecepatan tangensial ujung sudu dan kecepatan angin bebas. Berdasarkan penelitian ini, RPM yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada (Malau & Hamid, 2022).

Kecepatan (v)	Tip Speed Rasio (λ)
4	$\lambda = \frac{2\pi Rn}{v} = \frac{2 \times 3,14 \times 0,133 \times 28,18}{60 \times 4}$ $\lambda = \mathbf{0,098}$
5	$\lambda = \frac{2\pi Rn}{v} = \frac{2 \times 3,14 \times 0,133 \times 44,88}{60 \times 5}$ $\lambda = \mathbf{0,125}$
6	$\lambda = \frac{2\pi Rn}{v} = \frac{2 \times 3,14 \times 0,133 \times 61,58}{60 \times 6}$ $\lambda = \mathbf{0,143}$
7	$\lambda = \frac{2\pi Rn}{v} = \frac{2 \times 3,14 \times 0,133 \times 78,28}{60 \times 7}$ $\lambda = \mathbf{0,156}$

Tabel 4 Perhitungan RPM

Kondisi ini menyebabkan kecepatan relatif aliran yang mengenai sudu masih didominasi oleh kecepatan angin bebas, sementara kontribusi kecepatan tangensial sudu masih terbatas (Didane et al., 2024). Akibatnya, sudut serang efektif menjadi besar dan berfluktuasi signifikan terhadap posisi azimuthal sudu. Menurut (Buchner et al., 2018), pada TSR rendah, sudu VAWT cenderung mengalami separasi aliran dini dan fenomena dynamic stall parsial, yang secara signifikan menurunkan efektivitas pembangkitan gaya angkat.

V. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, hasil simulasi tiga dimensi pada kecepatan angin rendah, airfoil NACA 7510 direkomendasikan sebagai profil sudu yang paling sesuai untuk turbin angin sumbu vertikal. Meskipun airfoil ini menghasilkan nilai koefisien lift yang relatif rendah dan koefisien drag yang tinggi, nilai koefisien daya yang dihasilkan merupakan yang tertinggi dibandingkan profil lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pembentukan torsi pada kondisi kecepatan rendah lebih didominasi oleh gaya drag dibandingkan gaya lift. Efek tiga dimensi, seperti distribusi tekanan sepanjang bentang sudu dan pembentukan vorteks ujung, berkontribusi terhadap kestabilan torsi yang dihasilkan oleh NACA 7510. Oleh karena itu, dalam aplikasi turbin angin sumbu vertikal tanpa variasi sudut serang dan beroperasi pada kecepatan angin rendah, pemilihan airfoil dengan camber besar lebih efektif dibandingkan airfoil simetris maupun camber sedang.

Saran untuk peneliti selanjutnya lakukan optimalisasi desain turbin angin sumbu vertical yang mampu menghasilkan torsi maksimum. Dan penelitian lanjutan disarankan melakukan validasi eksperimental serta pengembangan model numerik tiga dimensi yang mempertimbangkan efek transien, sehingga fenomena aerodinamika tidak tunak dapat direpresentasikan dengan lebih baik

VI. REFERENSI

- Andi Mulkan. (2022). Analisis Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Sumber Pembangkit Energi Listrik. *Jurnal Ilmiah Teknik Unida*, 3(1), 74–83. <https://doi.org/10.55616/jitu.v3i1.308>
- Bintoro, C. (2025). *Karakteristik Aerodinamika Airfoil Naca 0015 Dan Naca 4415 Melalui Kajian Eksperimental Dan Simulasi*. 06(02), 58–69.
- Buchner, A., Soria, J., & Honnery, D. (2018). *Dynamic stall in vertical axis wind turbines : scaling and topological considerations*. 746–766. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.112>
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*.
- Choudhury, S. N. (2025). *Review of Energy Sources (Renewable and Non-Renewable)*. XII(2321), 827–833. <https://doi.org/10.51244/IJRSI>
- Colley, G., Mishra, R., Rao, H. V., & Woolhead, R. (2010). *Effect of rotor blade position on Vertical Axis Wind Turbine performance Key words 2 . Computational Parameters*. 1(8), 719–724.
- Didane, D. H., Behery, M. R., & Al-ghriybah, M. (2024). *Recent Progress in Design and Performance Analysis of*.
- Herlambang, Y. D., Prasetyo, B., & Mulud, T. H. (2019). *Model Turbin Angin Airfoil Naca 4418 Terhadap Variasi Buka-an Sudut Sudu Pada Kecepatan Angin Berbeda*. 11(2), 97–102.
- Iksan, M. N., Alia, D., Sitepu, F., & Nurdiansari, H. (2025). *Turbin Angin Vertikal Model Savonius sebagai Alternatif Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan 2022*). *Turbin angin jenis horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine) lebih banyak digunakan dan dikembangkan saat ini dibandingkan dengan turbin angin jenis vertikal (Vertical Axis Wind Turbine)*. Akan tetapi turbin vertikal memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan turbin angin horizontal , yaitu dapat bergerak tanpa tergantung arah angin (Masykur et al ., 2021 ; 4(September).
- Ira H. Abbott & Albert E. Von Doenhoff. (1959). *Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data*. Dover Publications.
- Lee, K., Cruden, A., Ng, J., & Wong, K. (2024). *Variable designs of vertical axis wind turbines — a review*. 2024(August), 1–27. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1437800>
- Malau, F. T., & Hamid, A. (2022). *Rancang bangun tiga susun turbin angin sumbu vertical dengan jumlah sembilan bilah menggunakan metode VDI 2222*. 1(2), 19–28.
- Marciniuk, M., Piskur, P., Kiszkiowiak, Ł., Malicki, Ł., Sibilski, K., Strzelecka, K., Kachel, S., & Kitowski, Z. (2024). *Aerodynamic Analysis of Variable Camber-Morphing Airfoils with Substantial Camber Deflections*. 1–22.
- Pambudi, N. A., & Firdaus, R. A. (2022). *Buku Ajar Energi Baru dan Terbarukan (EBT) Turbin Angin*.
- Rahman, M., Ahmed, M., Bashar, M., Mitra, A., & Salyers, T. (2017). Numerical and Experimental Investigations on Vertical Axis Wind Turbines of Different Models. *OALib*, 04(01), 1–37. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103273>
- Rezaeiha., A. (2019). *Characterization and improvement of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines using computational fluid dynamics* (Issue 2019).
- Salvador-gutierrez, B., Sanchez-cortez, L., Hinojosa-manrique, M., Lozada-pedraza, A., Ninaquispe-soto, M., Montaño-pisfil, J., Gutiérrez-tirado, R., Chávez-sánchez, W., Romero-goytendia, L., Díaz-aliaga, J., & Vigo-roldán, A. (2025). *Vertical-Axis Wind Turbines in Emerging Energy Applications (1979 – 2025): Global Trends and Technological Gaps Revealed by a Bibliometric Analysis and Review*. 1–31.
- Solikah, A. A. (2024). *Systematic Indonesia Literature Review Kajian Potensi dan Pemanfaatan Sumber Daya Energi Baru dan Terbarukan Di*. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.21742>
- Sumarno, F. G., Supriyo, S., Kristian, A. V., Noorendrassari, V. A., Nurul Falah, M., & Hilmawan, M. L. (2020). *Rancang Bangun Turbin Angin Archimedes Dengan Dua Sudu*. *Eksergi*, 16(2), 49. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v16i2.2206>
- Syaifudin, I., Yunanda, A. B., & Kridoyono, A. (2019). *Simulasi Alat Pemantau Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Mikrokontroler Melalui Monitor Pc*. *Konvergensi*, 15(1). <https://doi.org/10.30996/konv.v15i1.2832>