

Analisis Efek Magnus pada Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Savonius Menggunakan Computational Fluid Dynamic (CFD)

Alberto Dafero¹, Randi Purnama Putra², Yolli Fernanda³, Fitrah Qalbina⁴
^{1,2,3,4}Universitas Negeri Padang, Indonesia

Corresponding Author: albertodafero06@gmail.com

Published: August, 2025

ABSTRAK

Penelitian ini membahas pengaruh penerapan efek Magnus pada turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius dengan menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk meningkatkan efisiensi turbin dalam kondisi kecepatan angin rendah. Efek Magnus, yang dihasilkan dari silinder berputar, dimanfaatkan untuk menghasilkan gaya angkat tambahan yang meningkatkan torsi dan daya keluaran turbin. Simulasi dilakukan pada berbagai variasi kecepatan angin untuk menganalisis parameter seperti distribusi tekanan, kecepatan aliran, koefisien daya (C_P), dan koefisien torsi (C_T). Hasil menunjukkan bahwa penerapan efek Magnus mampu meningkatkan performa turbin, dengan nilai C_P mencapai 0,523 hingga 0,529, lebih tinggi dibandingkan turbin Savonius konvensional. Dengan demikian, teknologi ini menunjukkan potensi besar untuk mendukung pengembangan energi terbarukan di daerah dengan kecepatan angin rendah seperti Indonesia.

Kata Kunci: Turbin Angin Savonius, Efek Magnus, Computational Fluid Dynamics (CFD), Koefisien Daya (C_P), Koefisien Torsi (C_T)

ABSTRACT

This research presents a numerical investigation of the Magnus effect on the performance enhancement of a vertical axis wind turbine (VAWT) of the Savonius type using Computational Fluid Dynamics (CFD). The study aims to improve turbine efficiency under low wind speed conditions, which are typical in regions such as Indonesia. The Magnus effect, induced by rotating cylinders integrated into the turbine design, generates additional lift force that enhances torque and overall power output. Simulations were carried out across various wind speed conditions to evaluate key performance indicators, including pressure distribution, flow velocity, power coefficient (C_P), and torque coefficient (C_T). The results demonstrate a notable improvement in turbine performance due to the Magnus effect, with C_P values ranging from 0.523 to 0.529—exceeding those of conventional Savonius turbines. These findings suggest that the application of the Magnus effect offers a promising approach for enhancing the efficiency of wind energy systems in low-wind environments and contributes to the broader advancement of renewable energy technologies.

Keywords: Savonius Wind Turbine, Magnus Effect, Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), Computational Fluid Dynamics (CFD), Power Coefficient (C_P), Torque Coefficient (C_T)

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik global terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan perkembangan teknologi. Di sisi lain, keterbatasan sumber energi fosil dan dampak lingkungannya mendorong pencarian solusi energi alternatif yang berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang menjanjikan adalah energi angin. Energi ini bersifat bersih, tersedia secara alami, dan tidak menghasilkan emisi karbon. Namun, karakteristik kecepatan angin di Indonesia yang relatif rendah (2–6 m/s) menjadi tantangan tersendiri dalam pemanfaatannya.

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) tipe Savonius menawarkan solusi yang sesuai untuk kondisi angin rendah. Desainnya sederhana, tidak tergantung arah angin, dan mampu menghasilkan torsi tinggi pada kecepatan rendah. Akan tetapi, efisiensi konversi energinya masih perlu ditingkatkan. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah penerapan efek Magnus melalui penggunaan silinder berputar pada turbin.

Efek Magnus adalah fenomena aerodinamik yang terjadi ketika silinder berputar menghasilkan gaya angkat akibat perbedaan tekanan di sekitarnya. Dengan prinsip ini, silinder dapat membantu menciptakan gaya tambahan yang memperbesar torsi dan daya keluaran turbin. Teknologi ini terbukti efektif pada kecepatan angin rendah dan memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi sistem turbin Savonius.

Untuk memahami secara mendalam pengaruh efek Magnus terhadap performa turbin angin, diperlukan pendekatan numerik yang akurat. Metode Computational Fluid Dynamics (CFD) memungkinkan visualisasi dan analisis perilaku aliran fluida secara detail, termasuk interaksi antara aliran udara dan geometri turbin. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh efek Magnus pada turbin angin tipe Savonius dengan menggunakan metode simulasi CFD.

KAJIAN TEORITIS

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai solusi atas keterbatasan energi fosil. Keunggulan utama dari energi angin adalah sifatnya yang bersih, tersedia secara alami, dan tidak menghasilkan emisi karbon. Di Indonesia, kecepatan angin rata-rata berkisar antara 2 hingga 6 m/s, menjadikannya ideal untuk pemanfaatan turbin angin skala kecil dan menengah yang mampu beroperasi pada kecepatan rendah.

Turbin angin dibedakan berdasarkan arah sumbu rotasinya menjadi dua jenis, yaitu turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWT). VAWT memiliki keunggulan dalam hal kemudahan instalasi, tidak bergantung pada arah angin, serta mampu bekerja pada kecepatan angin yang rendah. Turbin Savonius termasuk dalam kategori VAWT dan dikenal dengan desain sederhana serta kemampuan self-starting yang baik, meskipun efisiensinya masih tergolong rendah.

Turbin angin tipe Savonius bekerja berdasarkan prinsip gaya hambat (drag force). Rotor turbin terdiri dari dua atau tiga sudu berbentuk setengah silinder yang disusun menyerupai huruf "S". Ketika angin mengenai sudu, sisi cekung menghasilkan gaya hambat lebih besar dibandingkan sisi cembung, sehingga menciptakan momen putar. Meskipun cocok digunakan di daerah dengan kecepatan angin rendah, efisiensi turbin Savonius masih perlu ditingkatkan agar dapat bersaing dengan teknologi turbin lainnya.

Salah satu pendekatan untuk meningkatkan efisiensi turbin Savonius adalah dengan memanfaatkan fenomena aerodinamika yang disebut efek Magnus. Efek Magnus terjadi ketika sebuah benda silindris yang berputar berada dalam aliran fluida, menghasilkan gaya angkat tegak lurus terhadap arah aliran. Gaya ini muncul akibat perbedaan tekanan pada sisi silinder yang berputar, di mana sisi yang bergerak searah aliran memiliki tekanan lebih rendah dibandingkan sisi sebaliknya.

Secara fisika, efek Magnus dijelaskan menggunakan prinsip Bernoulli, yaitu bahwa peningkatan kecepatan fluida akan menurunkan tekanannya. Ketika sebuah silinder berputar dalam aliran udara, sisi yang berputar searah aliran mempercepat udara dan menyebabkan tekanan rendah, sementara sisi lainnya memperlambat aliran dan menghasilkan tekanan lebih tinggi. Perbedaan tekanan ini menghasilkan gaya lateral yang dapat digunakan untuk menambah gaya angkat pada sistem turbin.

Dalam konteks turbin angin, efek Magnus dapat diimplementasikan dengan menambahkan silinder berputar (rotor Magnus) pada struktur turbin Savonius. Rotor ini diputar menggunakan motor eksternal untuk menghasilkan gaya angkat tambahan yang meningkatkan torsi turbin, terutama saat kecepatan angin masih rendah. Kombinasi antara drag dari sudu Savonius dan lift dari silinder Magnus diharapkan dapat meningkatkan performa turbin secara signifikan.

Evaluasi kinerja turbin dengan efek Magnus biasanya mengacu pada dua parameter utama, yaitu koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_t). Koefisien daya menggambarkan efisiensi turbin dalam mengonversi energi angin menjadi energi mekanik, sementara koefisien torsi merepresentasikan seberapa besar torsi yang dihasilkan oleh turbin terhadap kecepatan angin dan kecepatan sudut rotor. Nilai C_p dan C_t dipengaruhi oleh desain turbin, kecepatan angin, serta rasio kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin (tip speed ratio/TSR).

Untuk mengkaji fenomena aliran fluida secara rinci pada turbin angin dengan efek Magnus, metode numerik seperti Computational Fluid Dynamics (CFD) digunakan secara luas. CFD memungkinkan simulasi dua atau tiga dimensi dari distribusi tekanan, kecepatan, vortisitas, dan gaya-gaya aerodinamika di sekitar turbin. Dengan pendekatan ini, pengaruh variasi geometri, kecepatan angin, dan putaran rotor terhadap performa turbin dapat dianalisis tanpa harus melakukan eksperimen fisik secara langsung.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa penggunaan efek Magnus mampu meningkatkan efisiensi dan torsi turbin, khususnya pada kondisi kecepatan angin rendah. Oleh karena itu, pendekatan ini sangat relevan diterapkan di wilayah-wilayah seperti Indonesia yang memiliki potensi angin rendah namun berkelanjutan sepanjang tahun. Pemanfaatan efek Magnus tidak hanya memberikan kontribusi terhadap peningkatan efisiensi, tetapi juga membuka peluang pengembangan teknologi turbin angin dengan desain yang lebih kompak dan adaptif terhadap kondisi lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan fitur Computational Fluid Dynamics (CFD) pada perangkat lunak Ansys Fluent. CFD merupakan cabang mekanika fluida yang berfokus pada analisis dan penyelesaian masalah terkait fluida melalui pendekatan numerik dan data terstruktur. Metode ini memanfaatkan bantuan komputer untuk melakukan komputasi berbasis algoritma dan data numerik. Dalam penelitian ini, digunakan Ansys Fluent 2025 R1 Student Version, sebuah perangkat lunak yang menawarkan fleksibilitas tinggi dalam menyelesaikan permasalahan aliran fluida, termasuk yang menggunakan mesh (grid) tidak terstruktur dengan efisien. Simulasi dilakukan pada model 3D penerapan efek magnus pada turbin angin sumbu vertical tipe savonius, dengan memvariasikan kecepatan aliran udara.

Geometri turbin dirancang menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Model turbin terdiri dari rotor Savonius dan tiga buah silinder Magnus yang ditempatkan di sepanjang rotor. Silinder diputar secara aktif untuk menghasilkan gaya Magnus tambahan. Setelah desain selesai, model diekspor ke perangkat lunak ANSYS Workbench untuk proses pra-pemrosesan (pre-processing), meshing, dan setup simulasi.

Proses meshing dilakukan secara independen dengan variasi jumlah elemen mesh untuk memastikan hasil simulasi tidak bergantung pada jumlah grid (mesh independency test). Domain simulasi terdiri dari dua zona utama: zona stasioner (udara bebas) dan zona rotasi (rotor dan silinder Magnus). Interaksi antara dua zona diatur dengan pembuatan interface pada area kontakannya.

Simulasi dilakukan dengan model aliran steady-state dan turbulen menggunakan model turbulensi k-epsilon standart, karena model ini dikenal baik untuk menangani aliran dengan

gradien tekanan tinggi dan separasi aliran yang kompleks, seperti pada bilah turbin. Kecepatan angin divariasikan pada 3 m/s, 5 m/s, dan 7 m/s untuk mengetahui pengaruhnya terhadap torsi dan koefisien daya.

Parameter penting yang diukur antara lain distribusi tekanan di sekitar sudu dan silinder, kecepatan aliran, kontur kecepatan, kontur tekanan, dan torsi. Nilai torsi digunakan untuk menghitung koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_T) dengan rumus standar dalam aerodinamika. Hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk kontur tekanan dan kecepatan, serta dibandingkan secara kuantitatif berdasarkan variasi kecepatan angin.

Prosedur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur ekstensif untuk memahami parameter dan gaya yang memengaruhi desain turbin Savonius dengan efek Magnus, memastikan pendekatan desain yang optimal. Selanjutnya, desain turbin angin Savonius dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks untuk geometrinya, sementara simulasi dilakukan dengan Ansys Fluent 2025 R1 Student Version melalui pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD). Turbin ini dirancang dengan diameter 1250 mm dan tinggi 800 mm. Tahap simulasi pada Ansys Workbench diawali dengan preprocessing, meliputi impor geometri dalam format IGES, pembuatan domain fluida untuk memodelkan aliran udara, dan proses *meshing* untuk membagi domain menjadi elemen-elemen kecil. Kualitas *mesh* sangat krusial, dan setelah pengujian dengan berbagai jumlah *mesh*, Mesh 2 (196.908 *cells*) dipilih karena menghasilkan *error* terkecil sebesar 0,008% dalam Grid Independency Analysis, menjamin akurasi hasil.

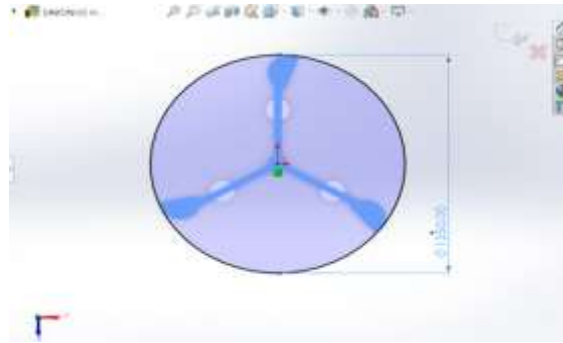
Langkah processing kemudian dilanjutkan dengan setup, di mana model fluida k-epsilon standart dipilih untuk aliran turbulen, sesuai dengan perhitungan bilangan Reynolds yang tinggi pada kecepatan angin 3, 5, dan 7 m/s. Material fluida ditetapkan sebagai udara dengan densitas 1.225 kg/m³ dan viskositas 1.7894e-05 kg/(m.s). Kondisi batas seperti *inlet*, *outlet*, dan *wall* didefinisikan secara spesifik, bersama dengan nilai referensi yang diperlukan untuk simulasi. Pengaturan *mesh interface* juga penting mengingat adanya lima domain yang terlibat dalam analisis benda berputar ini. Dalam tahap solutions, metode *coupled* dengan diskritisasi *second order upwind* digunakan untuk akurasi yang lebih tinggi. Report definitions diatur untuk menghitung kecepatan turbin, dan batas *error* atau konvergensi ditentukan untuk memastikan stabilitas hasil. Proses inisialisasi dilakukan menggunakan metode *hybrid initialization* untuk mempercepat konvergensi, dan simulasi kemudian dijalankan. Setelah perhitungan selesai, tahap post-processing dilakukan untuk analisis dan visualisasi hasil, termasuk menampilkan data dalam bentuk plot, grafik, kontur, atau animasi, serta mengekstrak nilai numerik seperti kecepatan dan tekanan untuk mendapatkan wawasan mendalam tentang kinerja turbin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

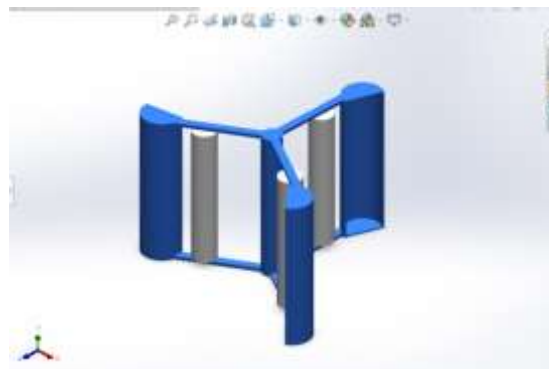
Hasil Penelitian

Desain Turbin Angin

Penelitian ini berupa desain turbin angin Savonius sumbu vertikal yang mengintegrasikan efek Magnus. Desain dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan diameter 1250 mm dan tinggi 800 mm. Visualisasi desain disajikan dalam Gambar 1 dan Gambar 2.



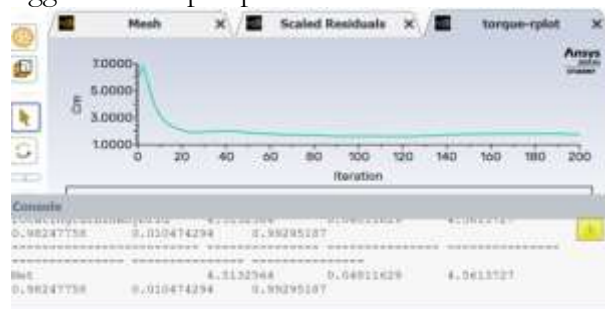
Gambar 1 Diameter Turbin Angin



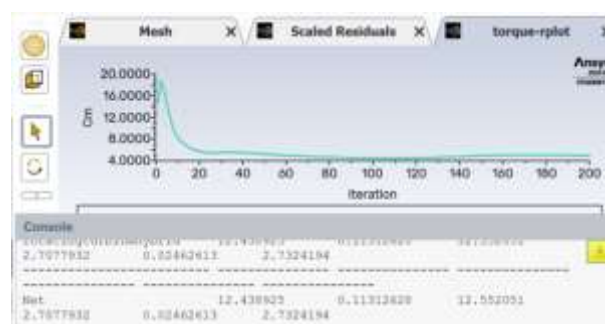
Gambar 2 Tinggi Turbin Angin

Hasil Simulasi

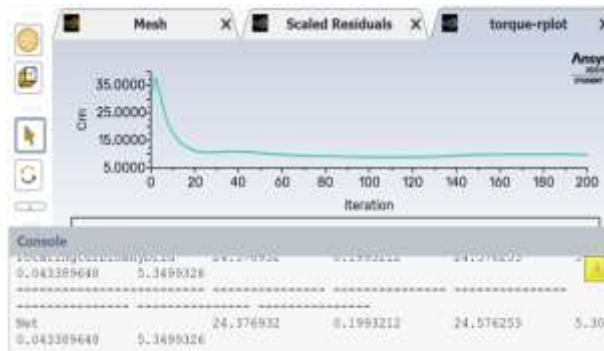
Simulasi menggunakan Ansys Fluent R1 Student Version menghasilkan nilai torsi untuk variasi kecepatan udara 3 m/s, 5 m/s, dan 7 m/s. Grafik torsi (Gambar 3, 4, 5) menunjukkan konvergensi pada kriteria 10^{-5} dengan 200 iterasi. Meskipun *Scaled Residuals* untuk *continuity* tidak sepenuhnya konvergen (stagnan di atas 10^{-2}), stabilitas nilai residual dan torsi menunjukkan kondisi *pseudo-steady*, sehingga hasil tetap dapat dianalisis.



Gambar 3. Grafik Torsi Pada Kecepatan Angin 3 M/s



Gambar 4. Grafik Torsi Pada Kecepatan Angin 5 M/s



Gambar 5. Grafik Torsi Pada Kecepatan Angin 7 M/s

Tabel 2. Hasil Nilai CP dan CP

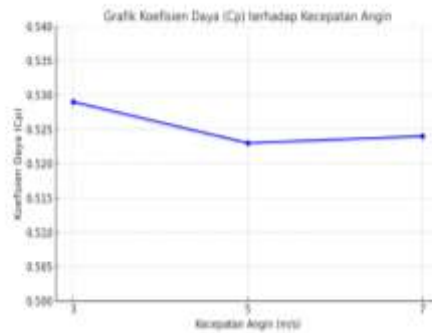
No	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Torsi	Koefisien Daya (C_p)	TSR	Koefisien Torsi (C_T)
1	3	4,561	0,529	3	0,176
2	5	12,552	0,523	3	0,174
3	7	24,576	0,524	3	0,175

Analisis Koefisien Daya

Koefisien daya (C_p) merupakan parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa efisien turbin angin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros. Nilai C_p dihitung dari rasio daya mekanik keluaran terhadap daya angin yang masuk ke sistem. Rumus umum yang digunakan untuk menentukan nilai C_p adalah:

$$C_p = \frac{P_{\text{turbin}}}{P_{\text{angin}}} = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan pada turbin angin vertikal tipe Savonius yang dimodifikasi dengan penambahan silinder Magnus pada sisi rotor. Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan gaya angkat melalui efek Magnus, sehingga dapat meningkatkan torsi dan, pada akhirnya, daya yang dihasilkan oleh turbin.

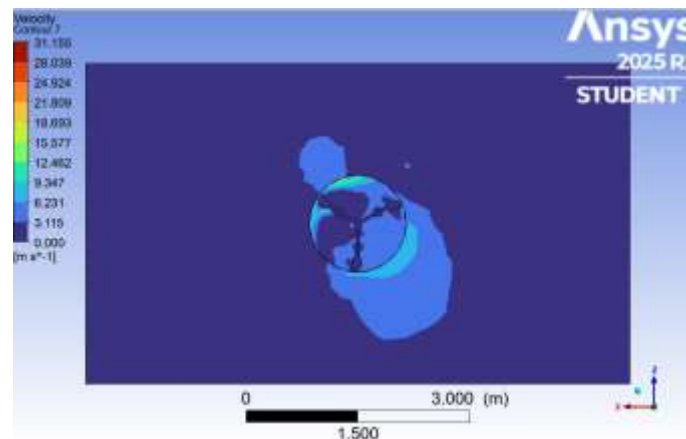


Gambar 6 Grafik Koefisien Daya (C_p)

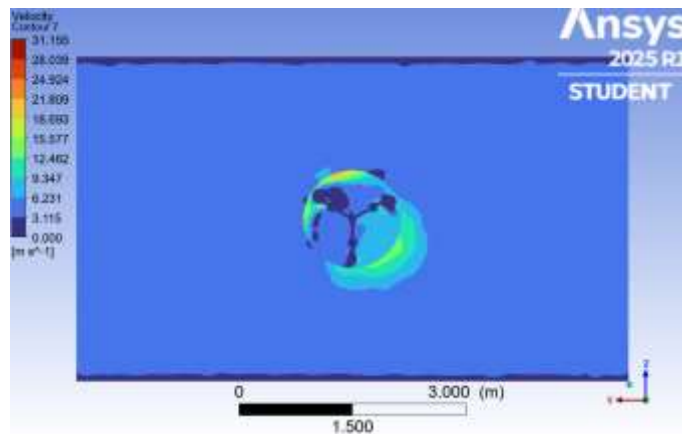
Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai koefisien daya tertinggi dicapai pada kecepatan angin 3 m/s, yaitu sebesar 0,529. Nilai ini kemudian sedikit menurun menjadi 0,523 pada kecepatan 5 m/s dan naik tipis menjadi 0,524 pada 7 m/s. Fluktuasi nilai C_p ini sangat kecil dan menunjukkan kestabilan performa turbin di berbagai kecepatan angin. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem turbin yang dirancang memiliki kinerja konversi energi yang cukup konsisten terhadap variasi kecepatan aliran udara.

Secara teoritis, batas maksimum efisiensi konversi energi angin ditetapkan oleh Hukum Betz sebesar 0,593. Nilai C_p hasil simulasi yang berkisar antara 0,523 hingga 0,529 menunjukkan bahwa turbin ini telah bekerja mendekati efisiensi maksimum yang mungkin dicapai oleh sebuah sistem turbin angin. Peningkatan efisiensi ini kemungkinan besar berasal dari pengaruh efek Magnus yang mampu menambah gaya angkat pada silinder berputar, sehingga menghasilkan torsi tambahan.

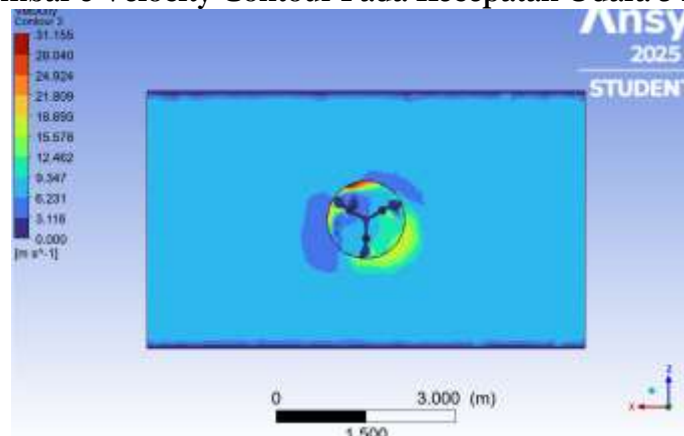
Visualisasi kontur (Velocity Countour) kecepatan menunjukkan bagaimana aliran udara berubah di sekitar rotor turbin Magnus pada kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, dan 7 m/s. Warna pada kontur menunjukkan kecepatan aliran—semakin merah, semakin tinggi kecepatannya.



Gambar 7 Velocity Contour Pada Kecepatan Udara 3 M/s



Gambar 8 Velocity Contour Pada Kecepatan Udara 5 M/s



Gambar 9 Velocity Contour Pada Kecepatan Udara 7 M/s

Pada kecepatan 3 m/s, terlihat bahwa udara di sekitar silinder Magnus mengalami percepatan hingga mencapai 13,34 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa efek Magnus sudah mulai bekerja, meskipun kecepatan angin masih rendah. Udara di atas silinder berputar lebih cepat dibandingkan di bawahnya.

Saat kecepatan angin dinaikkan menjadi 5 m/s, kecepatan maksimum aliran meningkat menjadi 22,23 m/s. Aliran menjadi lebih tidak simetris dan lebih cepat di sekitar silinder, yang artinya efek Magnus semakin kuat. Ini membantu turbin menghasilkan daya dan torsi yang lebih besar.

Pada kecepatan 7 m/s, percepatan aliran mencapai puncaknya dengan kecepatan maksimum 31,15 m/s. Aliran sangat kuat dan membentuk pusaran di belakang turbin, yang menandakan energi angin dimanfaatkan dengan baik. Efek Magnus sangat dominan, sehingga torsi dan koefisien daya juga ikut meningkat.

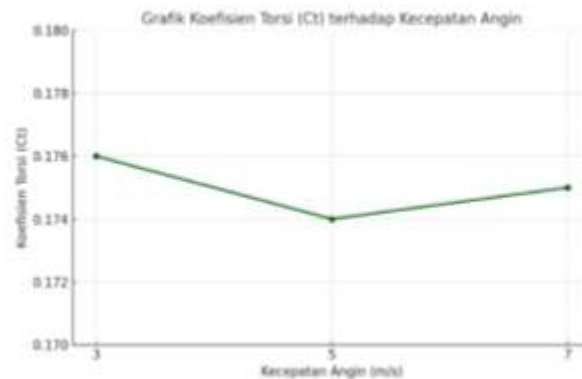
Analisis Koefisien Torsi

Koefisien torsi (C_T) merupakan parameter penting yang menunjukkan efisiensi turbin dalam menghasilkan torsi dari energi kinetik angin. Nilai C_T dihitung berdasarkan perbandingan antara torsi aktual terhadap energi angin yang tersedia. Dalam penelitian ini, nilai C_T dihitung untuk tiga variasi kecepatan angin: 3 m/s, 5 m/s, dan 7 m/s.

$$C_T = \frac{C_P}{\lambda}$$

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan pada turbin angin vertikal tipe Savonius yang dimodifikasi dengan penambahan silinder Magnus pada sisi rotor. Modifikasi ini bertujuan untuk

meningkatkan gaya angkat melalui efek Magnus, sehingga dapat meningkatkan torsi dan, pada akhirnya, daya yang dihasilkan oleh turbin.

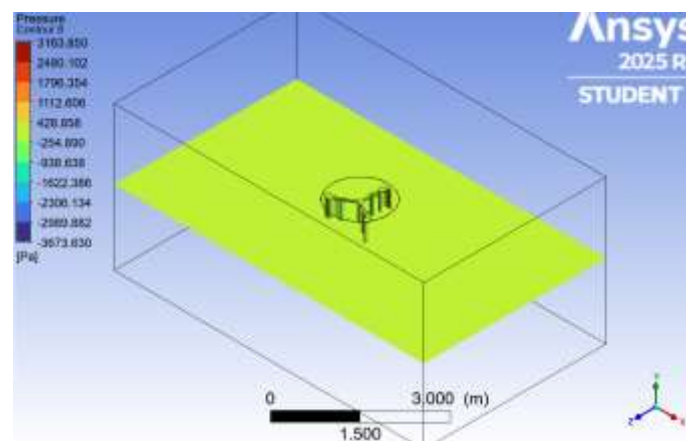


Gambar 10 Grafik Koefisien Torsi (C_T)

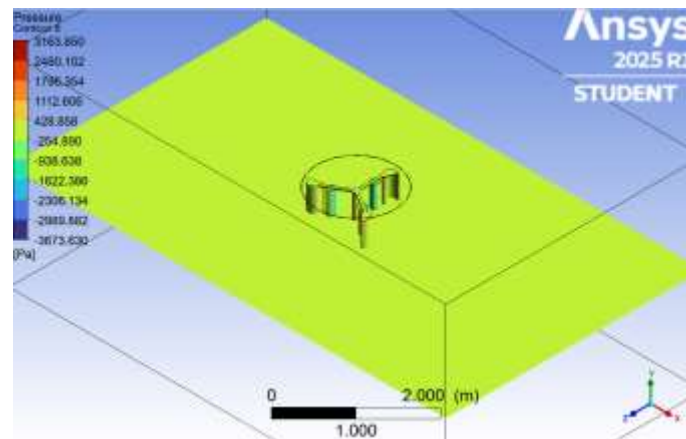
Pada kecepatan angin 3 m/s, nilai C_T diperoleh sebesar 0,176. Nilai ini cukup tinggi untuk kecepatan rendah, yang menandakan bahwa turbin mampu menghasilkan torsi secara efektif meskipun energi angin terbatas. Efek Magnus berperan penting dalam membantu pembentukan gaya putar sejak awal.

Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 5 m/s, nilai C_T sedikit menurun menjadi 0,174. Meskipun torsi total meningkat, penurunan kecil pada C_T menunjukkan bahwa efisiensi torsi relatif terhadap energi angin sedikit berkurang. Ini bisa disebabkan oleh peningkatan gaya hambat atau perubahan pola aliran di sekitar rotor.

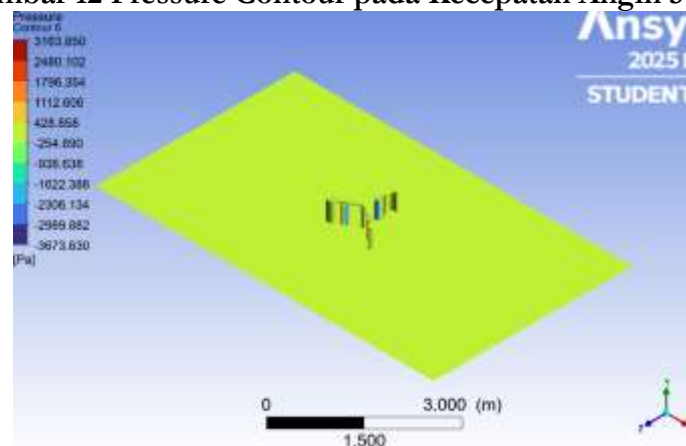
Pada kecepatan angin 7 m/s, nilai C_T tercatat 0,175, sedikit naik dibandingkan pada 5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa turbin mulai kembali efisien dalam menghasilkan torsi pada kecepatan tinggi, kemungkinan karena efek Magnus yang semakin dominan mengarahkan aliran dengan lebih baik. Secara umum, nilai C_T cenderung stabil pada ketiga kecepatan angin yang diuji. Hal ini menunjukkan bahwa desain turbin Magnus yang digunakan mampu mempertahankan efisiensi torsi dalam rentang kecepatan angin rendah hingga tinggi, sehingga cocok diterapkan pada kondisi angin yang bervariasi.



Gambar 11 Pressure Contour pada Kecepatan Angin 3 m/s



Gambar 12 Pressure Contour pada Kecepatan Angin 5 m/s



Gambar 13 Pressure Contour pada Kecepatan Angin 7 m/s

Pada kecepatan angin 3 m/s, distribusi tekanan menunjukkan perbedaan yang masih tergolong rendah. Tekanan maksimum tercatat sebesar 598,67 Pa, sedangkan tekanan minimumnya mencapai -699,66 Pa. Warna pada kontur memperlihatkan bahwa sisi turbin yang berlawanan arah terhadap putaran menghasilkan tekanan lebih tinggi, sedangkan sisi searah menghasilkan tekanan lebih rendah. Perbedaan tekanan inilah yang menghasilkan gaya Magnus, yang mendorong turbin untuk berputar. Namun, karena kecepatan aliran masih rendah, distribusi tekanan di sekitar turbin juga masih terbatas.

Saat kecepatan angin dinaikkan menjadi 5 m/s, terjadi peningkatan yang signifikan pada nilai tekanan. Tekanan maksimum tercatat 1646,43 Pa, dan tekanan minimumnya mencapai -1581,84 Pa. Dari kontur, terlihat bahwa gradien tekanan antara sisi depan dan belakang turbin semakin besar. Peningkatan ini menandakan bahwa gaya angkat akibat efek Magnus juga semakin kuat, sehingga turbin menghasilkan torsi yang lebih besar. Daerah tekanan tinggi dan rendah mulai terlihat lebih menyebar di sekitar permukaan bilah, menunjukkan bahwa aliran mulai membentuk vortex yang lebih kompleks.

Pada kecepatan angin tertinggi dalam simulasi ini, yaitu 7 m/s, distribusi tekanan menunjukkan pola yang sangat ekstrem. Tekanan maksimum yang terbentuk mencapai 3163,85 Pa, sementara tekanan minimumnya berada di angka -3673,63 Pa. Hal ini mencerminkan peningkatan drastis dalam perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah bilah turbin. Visualisasi kontur memperlihatkan daerah warna merah terang dan biru gelap yang sangat tajam, mencerminkan adanya vortex besar dan kuat akibat peningkatan kecepatan relatif terhadap permukaan bilah. Fenomena ini memperjelas pengaruh kecepatan terhadap besarnya gaya Magnus yang dihasilkan.

Analisis Rasio antara Koefisien Daya dan Koefisien Torsi

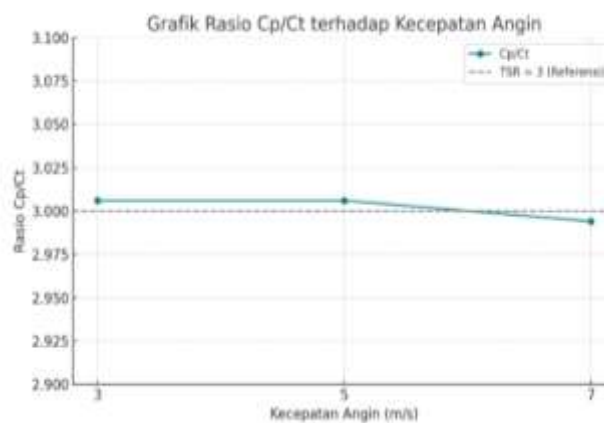
Rasio antara C_p dan C_T , yang direpresentasikan oleh parameter TSR (Tip Speed Ratio), menunjukkan hubungan antara kecepatan ujung bilah dan kecepatan angin. Dalam kasus ini, nilai TSR dianggap konstan sebesar 3, sehingga:

Dengan menggunakan data dari hasil simulasi, diperoleh nilai berkisar antara 2,994 hingga 3,006 yang menunjukkan konsistensi terhadap nilai TSR yang ditetapkan. Berikut adalah perbandingan rasio tersebut:

Tabel 3 Rasio antar C_p/C_T

Kecepatan Angin (m/s)	C_p	C_T	C_p / C_T
3	0,529	0,176	3,005
5	0,523	0,174	3,006
7	0,524	0,175	2,994

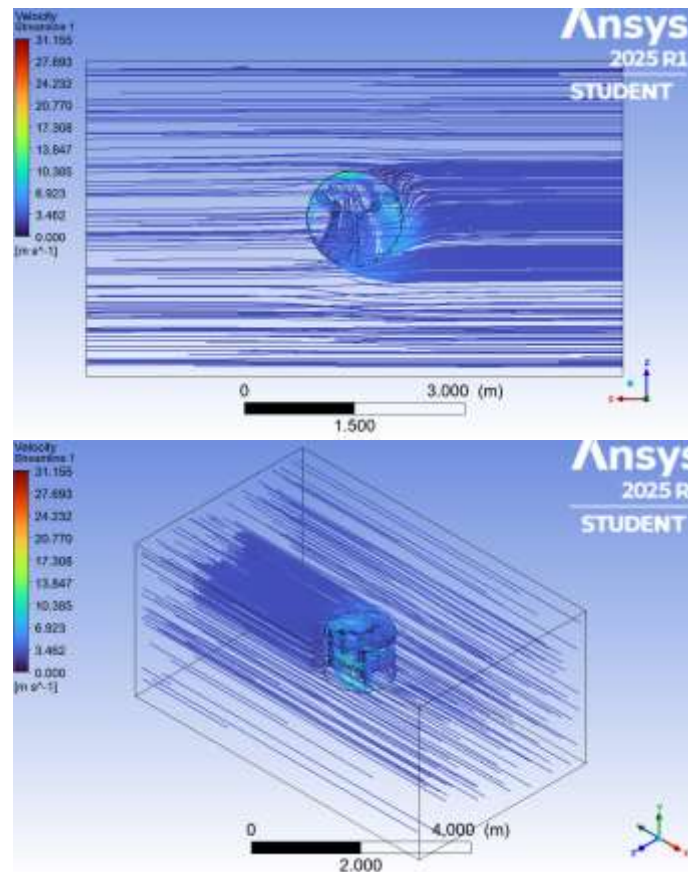
Nilai rasio C_p / C_T yang sangat mendekati nilai TSR menunjukkan bahwa turbin bekerja secara efisien dan hasil simulasi dapat dipercaya. Hubungan ini juga memperkuat kesesuaian antara teori dasar turbin angin dan hasil simulasi CFD yang telah dilakukan. Dengan kestabilan rasio ini, dapat disimpulkan bahwa desain dan konfigurasi turbin sudah cukup optimal.



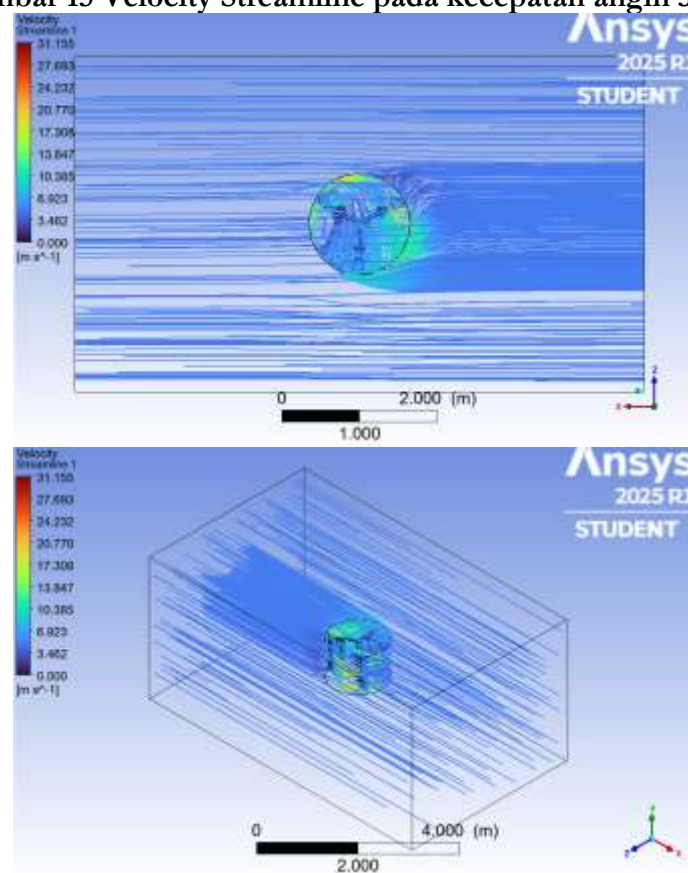
Gambar 14 Grafik Rasio antara C_p / C_T

Analisis Velocity Streamline

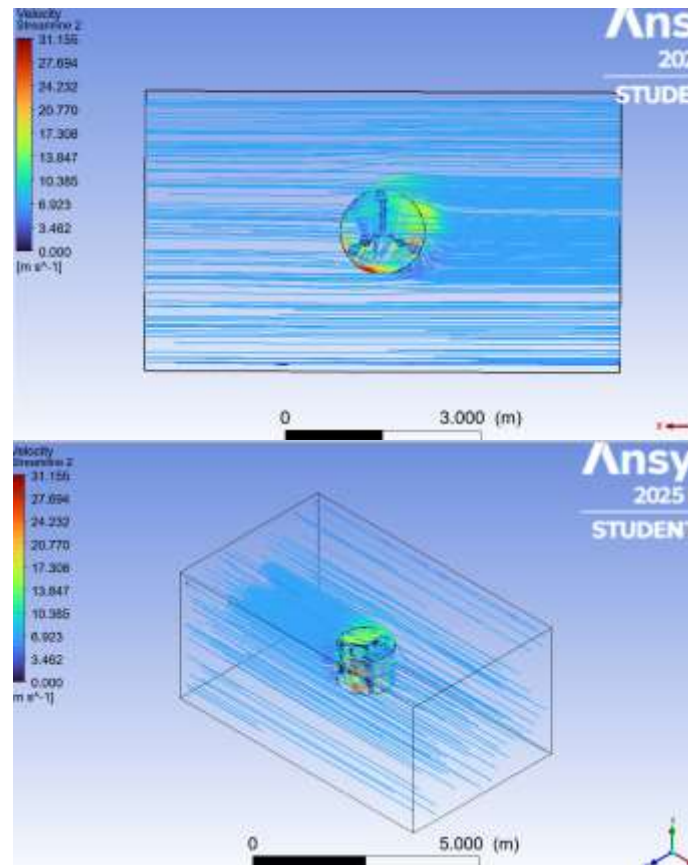
Visualisasi streamline kecepatan pada gambar-gambar hasil simulasi CFD menunjukkan distribusi aliran udara di sekitar rotor turbin Magnus. Gambar tersebut menggambarkan bagaimana aliran udara berinteraksi dengan permukaan turbin pada berbagai variasi kecepatan angin, yaitu 3 m/s, 5 m/s, dan 7 m/s. Warna pada garis-garis streamline menunjukkan magnitude kecepatan, di mana warna biru tua hingga merah menunjukkan gradasi dari kecepatan rendah ke tinggi.



Gambar 15 Velocity Streamline pada kecepatan angin 3 m/s



Gambar 16 Velocity Streamline pada kecepatan angin 5 m/s



Gambar 17 Velocity Streamline pada kecepatan angin 7 m/s

Pada kecepatan angin 3 m/s, terlihat bahwa aliran udara relatif teratur dan streamline menyebar dengan gangguan kecil di sekitar rotor. Distribusi kecepatan di belakang rotor menunjukkan terbentuknya wake region dengan penurunan kecepatan yang tajam, ditandai oleh warna biru ke hijau. Efek Magnus mulai tampak dengan adanya deviasi aliran di sisi rotor akibat rotasi silinder.

Untuk kecepatan angin 5 m/s, distribusi streamline menjadi lebih kompleks. Terlihat adanya peningkatan gradien kecepatan di sekitar permukaan rotor. Warna merah pada bagian atas rotor menunjukkan adanya percepatan aliran akibat efek Magnus, sementara bagian bawah menunjukkan perlambatan aliran. Ini menciptakan perbedaan tekanan yang berkontribusi terhadap pembangkitan gaya angkat dan torsi. Efek vortex shedding di belakang rotor juga mulai terlihat lebih jelas, menunjukkan dinamika aliran yang semakin tidak simetris.

Pada kecepatan 7 m/s, aliran udara menunjukkan fenomena turbulensi yang lebih intens. Streamline menjadi lebih padat dan melengkung tajam di sekitar rotor. Warna merah yang lebih luas menunjukkan kecepatan tinggi di sisi atas rotor akibat interaksi kuat antara rotasi dan kecepatan angin. Wake yang terbentuk di belakang rotor menjadi lebih panjang dan lebar, menandakan pelepasan energi yang lebih besar. Fenomena ini sesuai dengan peningkatan torsi dan koefisien daya yang telah dianalisis sebelumnya.

Pembahasan

Hasil simulasi CFD terhadap turbin angin sumbu vertikal tipe Magnus menunjukkan nilai koefisien daya (C_p) berkisar antara 0,523 hingga 0,529 untuk variasi kecepatan angin 3 m/s, 5 m/s, dan 7 m/s. Nilai C_p yang relatif tinggi ini mengindikasikan efisiensi konversi energi angin menjadi energi mekanik yang cukup baik, terlebih untuk jenis turbin sumbu vertikal yang secara umum memiliki efisiensi lebih rendah dibandingkan turbin horizontal. Keberadaan nilai C_p yang stabil terhadap perubahan kecepatan angin juga menunjukkan bahwa desain turbin memiliki

performa yang konsisten dan dapat diandalkan dalam berbagai kondisi lingkungan, sehingga cocok diaplikasikan pada wilayah dengan variasi angin yang dinamis.

Koefisien torsi (C_T) pada simulasi ini dihitung menggunakan pendekatan matematis dari hubungan C_p terhadap Tip Speed Ratio (TSR), yaitu $C_T = C_p / \text{TSR}$. Dengan nilai TSR sebesar 3, diperoleh nilai C_T berkisar antara 0,174 hingga 0,176. Hasil ini menunjukkan konsistensi yang baik antara pendekatan matematis dan hasil simulasi CFD, yang memperlihatkan bahwa pemodelan telah dilakukan dengan parameter dan kondisi batas yang tepat. Hubungan antara C_p dan C_T juga menunjukkan rasio yang mendekati nilai TSR, yaitu rasio $C_p / C_T \approx 3$, yang menandakan adanya keselarasan antara daya mekanik yang dihasilkan dan torsi yang bekerja pada rotor. Ini menunjukkan bahwa sistem mampu memanfaatkan gaya puntir secara optimal untuk menghasilkan daya, sekaligus mendukung efisiensi desain dari sisi aerodinamika maupun mekanika.

Jika dibandingkan dengan turbin angin tipe Savonius yang umumnya memiliki nilai C_p sekitar 0,2–0,35 dan C_T sekitar 0,2–0,3, maka performa turbin Magnus ini menunjukkan peningkatan yang signifikan. Efek Magnus berperan penting dalam menghasilkan gaya angkat tambahan yang memperbesar torsi tanpa menyebabkan gangguan aliran yang berlebihan. Stabilitas nilai C_p dan C_T pada berbagai kecepatan angin menunjukkan bahwa turbin ini memiliki potensi untuk digunakan secara luas pada aplikasi energi angin skala kecil hingga menengah, terutama di wilayah dengan intensitas angin yang tidak terlalu tinggi.

Visualisasi aliran fluida dari hasil simulasi memperkuat interpretasi numerik tersebut. Pola streamline menunjukkan bahwa aliran di sekitar rotor mengalami perubahan signifikan akibat rotasi silinder Magnus. Pada kecepatan angin 3 m/s, aliran masih tergolong stabil dengan wake yang kecil di belakang rotor. Namun, saat kecepatan meningkat menjadi 5 m/s dan 7 m/s, terbentuk vortex dan wake yang lebih besar, menandakan terjadinya pelepasan energi dari aliran fluida ke rotor. Pola aliran asimetris akibat rotasi silinder menyebabkan percepatan aliran di satu sisi dan perlambatan di sisi lainnya, yang menciptakan beda tekanan sesuai prinsip Bernoulli dan menghasilkan gaya angkat yang signifikan.

Kontur tekanan memperlihatkan distribusi tekanan tinggi di salah satu sisi silinder dan tekanan rendah di sisi berlawanan. Pada kecepatan angin yang lebih tinggi, perbedaan tekanan ini semakin mencolok, mencerminkan peningkatan efek Magnus. Tekanan tinggi terjadi pada sisi yang berlawanan arah dengan rotasi terhadap aliran, sedangkan tekanan rendah terjadi di sisi yang searah, menghasilkan diferensial tekanan yang mendorong rotor untuk berputar. Sementara itu, kontur kecepatan menunjukkan percepatan fluida di sisi yang searah rotasi dan perlambatan di sisi lainnya, serta penurunan kecepatan di daerah wake yang mengindikasikan konversi energi kinetik menjadi energi mekanik secara efisien.

Visualisasi ini juga menunjukkan bahwa aliran di sekitar rotor tetap stabil tanpa terjadi separation atau turbulensi berlebihan, bahkan pada kecepatan tinggi. Keadaan ini menunjukkan bahwa desain turbin tidak hanya efisien dalam menghasilkan torsi, tetapi juga mampu menjaga kestabilan aliran, yang penting untuk menjamin kontinuitas dan keandalan putaran rotor dalam berbagai kondisi operasi. Ketahanan ini menjadi salah satu keunggulan utama dari penerapan efek Magnus dalam sistem turbin angin.

Untuk mendukung validitas simulasi, hasil ini dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Limpot et al. (2023), yang memperoleh nilai C_p maksimum sebesar 0,58 pada $\text{TSR} = 2$ dengan rasio putaran silinder terhadap rotor sebesar 1,5. Hasil simulasi ini memiliki kesesuaian tren, meskipun nilai C_p sedikit lebih rendah. Perbedaan ini masih dapat diterima mengingat adanya variasi dalam desain geometri, rasio rotasi, dan parameter simulasi yang digunakan. Selain itu, jika dihitung secara teoritis, nilai C_T dari penelitian Limpot sebesar $0,58/2 = 0,29$, sedangkan pada simulasi ini diperoleh 0,174–0,176. Penurunan C_T seiring meningkatnya TSR sesuai dengan konsep bahwa pada kecepatan sudut yang lebih tinggi, torsi relatif terhadap energi total akan menurun.

Distribusi tekanan yang ditampilkan dalam kontur simulasi ini juga menunjukkan kesesuaian dengan studi literatur lainnya, seperti oleh Hendaryati (2020), yang menunjukkan adanya tekanan tinggi di sisi depan dan tekanan rendah di sisi belakang silinder Magnus, akibat rotasi terhadap arah aliran. Pola tekanan ini memperkuat dugaan bahwa gaya angkat dominan sebagai penyumbang torsi utama. Kesamaan distribusi tekanan tersebut menunjukkan bahwa model simulasi yang digunakan telah mencerminkan fenomena fisik yang realistis dan sesuai dengan hasil studi terdahulu.

Penelitian ini memiliki Keterbatasan teknis seperti pemilihan mesh berukuran sedang akibat keterbatasan perangkat keras dan waktu komputasi. Hal ini mungkin menyebabkan detail interaksi fluida seperti fenomena mikro pada lapisan batas belum tergambarkan secara penuh. Selain itu, kecepatan rotasi silinder Magnus dalam simulasi ini bersifat konstan dan belum dimodelkan secara dinamis, padahal pada kondisi nyata kecepatan rotasi bisa berubah tergantung pada strategi kontrol dan kondisi lingkungan sekitar.

Meskipun demikian, desain turbin yang digunakan sudah menunjukkan performa aerodinamika yang menjanjikan dan memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut. Untuk penelitian lanjutan pendekatan transien sangat direkomendasikan untuk mendapatkan gambaran yang lebih realistis. Penambahan jumlah silinder, optimasi bentuk rotor, dan pengaturan rotasi dinamis juga menjadi opsi peningkatan performa yang potensial. Yang tidak kalah penting, uji eksperimental secara langsung di laboratorium atau di lapangan akan sangat membantu dalam memverifikasi hasil simulasi CFD ini secara menyeluruh.

Dengan mempertimbangkan hasil perhitungan, visualisasi aliran, dan validasi dari literatur, dapat disimpulkan bahwa desain turbin Magnus yang digunakan dalam penelitian ini memiliki performa yang efisien dan stabil. Efek Magnus terbukti mampu meningkatkan torsi dan efisiensi konversi daya secara signifikan dibandingkan dengan desain turbin vertikal konvensional. Penelitian ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk pengembangan turbin Magnus lebih lanjut, baik secara komputasional maupun melalui pendekatan eksperimental.

KESIMPULAN

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) yang dilakukan pada turbin angin Savonius vertikal dengan modifikasi silinder Magnus menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan. Efek Magnus terbukti efektif dalam meningkatkan koefisien daya (C_p) antara 0,523 hingga 0,529 dan koefisien torsi (C_T) antara 0,174 hingga 0,176 pada kecepatan angin 3, 5, dan 7 m/s, melampaui performa turbin Savonius konvensional. Visualisasi aliran memperlihatkan bahwa rotasi silinder Magnus menciptakan perbedaan tekanan besar, menghasilkan gaya angkat yang memperkuat torsi rotor. Performa turbin juga tetap stabil terhadap variasi kecepatan angin, dengan nilai C_p dan C_T yang konsisten. Rasio C_p / C_T yang mendekati Tip Speed Ratio (TSR) lebih lanjut mengindikasikan bahwa sistem bekerja sesuai prinsip teori dasar. Validasi dengan literatur ilmiah mengonfirmasi keakuratan model simulasi dan pemodelan efek Magnus yang realistis. Desain ini menunjukkan potensi efisiensi tinggi dengan struktur sederhana, menjadikannya cocok untuk wilayah berangin rendah hingga sedang. Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa penggunaan silinder Magnus dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dan torsi turbin angin vertikal, menjadikannya konsep yang layak untuk pengembangan lebih lanjut.

REFERENSI

- Abdullah, A. (2017). *Desain Flettner Rotor Pada Kapal Kontainer 4000 DWT Dengan Metode CFD*.
- Afidah, Z., Yushardi, Y., & Sudarti, S. (2023). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dengan Turbin Angin Sumbu Vertikal di Kecamatan Sangkapura Kabupaten Gresik. *Jurnal*

<https://doi.org/10.30588/jecemm.v7i1.1325>

- Arsad, A. M., Hartono, F., Jeans, G., & Darrieus, M. (2005). Pembuatan Kode Desain Dan Analisis Turbin Angin Sumbu Vertikal Darrieus Tipe-H. *Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 7 No. 2 Desember 2009:93-100*, 1, 93–100.
- Bernoulli, P., Bernoulli, P., & Bernoulli, D. (n.d.). *Bernoulli Aliran Tak-termampatkan*.
- Chen, X. X. X. X., Tsai, M. Y., Wolynes, P. G., da Rosa, G., Grille, L., Calzada, V., Ahmad, K., Arcon, J. P., Battistini, F., Bayarri, G., Bishop, T., Carloni, P., Cheatham, T. E., Collepardo-Guevara, R., Czub, J., Espinosa, J. R., Galindo-Murillo, R., Harris, S. A., Hospital, A., ... Crothers, D. M. (2018). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析Title. *Nucleic Acids Research*, 6(1), 1–7.
- David, J., Rhakasywi, D., Studi, P., Mesin, T., Teknik, F., Pembangunan, U., Veteran, N., Studi, P., Mesin, T., Teknik, F., Pembangunan, U., Veteran, N., Studi, P., Mesin, T., Teknik, F., Pembangunan, U., & Veteran, N. (2023). *Analisis Computational Fluid Dynamic (CFD) Turbin Angin Savonius Bilah Berlapis*. 26(4), 6–12.
- Demidova, G. L., Anuchin, A., Lukin, A., Lukichev, D., Rassolkin, A., & Belahcen, A. (2020). Magnus wind turbine: Finite element analysis and control system. *2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2020*, 59–64. <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161922>
- Energi, K., & Mineral, S. D. (2016). *Potensi Energi Terbarukan di Indonesia Mencapai 810 Ribu MW*. 0–2.
- Ferrari, G., Federici, D., Schito, P., Inzoli, F., & Mereu, R. (2017). CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. *Renewable Energy*, 105, 722–734. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.077>
- Halek, A. (2022). Pengaruh Sudut Pengarah Angin pada Turbin Angin Sumbu Vertikal terhadap Unjuk Kerja Turbin. *DINAMIKA Jurnal Teknik Mesin*, 7(2), 37–42. <https://doi.org/10.33387/dinamik.v7i2.6053>
- Hendaryati, R. H., Soegiharto, A. F. H., Salwansyah, D., Rahmandika, A., & Jalaali, B. (2024). Savonius-Magnus Hybrid Turbine Design Performance Based on Computational Fluid Dynamics. *CFD Letters*, 16(10), 43–53. <https://doi.org/10.37934/cfdl.16.10.4353>
- Ismail Nahkoda, Y., & Saleh, C. (2015). Rancang Bangun Kincir Angin Pembangkit Tenaga Listrik Sumbu Vertikal Savonius Portabel Menggunakan Generator Magnet Permanen. *Industri Inovatif: Jurnal Teknik Industri*, 5(2), 19–24.

- Ismail, Pane, E., & Triyanti. (2017). Optimasi Perancangan Turbin Angin Vertikal Tipe Darrieus Untuk Penerangan Di Jalan Tol. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, 1(November), 12.
- Ito, A., Kawashima, S., Nishizawa, Y., Ushiyama, I., & Komatinovic, N. (2007). A study on savonius type magnus wind turbine. *European Wind Energy Conference and Exhibition 2007, EWEC 2007*, 3, 1953–1960.
- Karunia. (2016). *No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における 健康関連指標に関する共分散構造分析* Title. 4(June), 2016.
- Keifer, G., & Effenberger, F. (1967). Konversi Energi Angin Menjadi Energi Listrik Skala Laboratorium. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Kenyon, K. E. (2016). On the Magnus Effect. *Natural Science*, 08(02), 49–52. <https://doi.org/10.4236/ns.2016.82006>
- Khadir, L., & Mrad, H. (2015). Numerical investigation of aerodynamic performance of darrieus wind turbine based on the magnus effect. *International Journal of Multiphysics*, 9(4), 383–396. <https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.4.383>
- Laili, N. M., & Jember, U. (2024). *Pemanfaatan turbin angin savonius sebagai sumber energi terbarukan*. 8(6), 683–687.
- Latif, M. (2013). Efisiensi Prototipe Turbin Savonius pada Kecepatan Angin Rendah. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 10(3). <https://doi.org/10.17529/jre.v10i3.1030>
- Lestari, N. D., Nasbey, H., & Sunaryo, S. (2023). *Desain Turbin Angin Savonius Sumbu Horizontal Tipe-U Untuk Kecepatan Angin Rendah*. XI, 13–20. <https://doi.org/10.21009/03.1101.fa03>
- Magnus, E., Magnus, E., Magnus, E., Magnus, H. G., Kutta, M., & Zhukovsky, N. (n.d.). *Efek Magnus*.
- Maiti, & Bidinger. (1981). Jenis-Jenis Turbin Angin. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Maruyama, Y. (2011). Study on the physical mechanism of the magnus effect. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 54(185–186), 173–181. <https://doi.org/10.2322/tjsass.54.173>
- Muhamad Falah D S. (2016). *Numerical Study of Savonius Wind Turbine With Variation of the Number of Blade and Wind Velocity*.
- Muhammad, I. (2022). Simulasi Dan Perancangan Bilah Turbin Angin Savonius Heliks Dengan Memanfaatkan Fenomena Angin Pada Gedung Tinggi. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 7(1), 9–26. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v7i1.211>
- Nugroho, A. S., Sadewa P, Y., Farid, M. M., Putra Sanjaya, A., Hidayat Purwono, A., &

- Musabbikhah, M. (2023). Pengaruh Bahan Blade Terhadap Output Turbin Jenis Savonius. *Mechonversio: Mechanical Engineering Journal*, 6(1), 11–15. <https://doi.org/10.51804/mmej.v6i1.14108>
- Pane, M. W., Andreas, & Samosir, R. (2023). Perancangan Turbin Angin Vertikal Modifikasi Darrieus Menggunakan Geometri Airfoil Naca 2414. *Journal of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy*, 7(2), 178–187. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v7i2.9456>
- Pangestu, R. (2017). *Turbin Angin Vertikal Savonius Bertingkat Membentuk Helix Savonius Bertingkat Dengan Variasi Blade “ Savonius Helical L Rotor ” Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu tugas Operasi Sistem Energi II Program Studi Diploma III Teknik Konversi Energi D. June*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14852.73600>
- Perković, L., Silva, P., Ban, M., Kranjčević, N., & Duić, N. (2013). Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus’ effect. *Applied Energy*, 101, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.061>
- Prasetyo, A. D. (2023). *Cerita Menarik Tentang " Magnus Effect "*.
- Putri, S. S. (2023). *1356-Article Text-3744-1-10-20231207*. 2(4), 2021–2023.
- Saputra, C. I., Rustana, C. E., & Nasbey, H. (2015). Pengembangan Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Triple-Stage Savonius dengan Poros Ganda. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 4, 43–46.
- Suska, U. (2016). BAB II Dasar Teori. *UIN Suska*, 5(1), 1689–1699.
- Tipe-u, T. A. S. (2025). *Analisis Pengaruh Kecepatan Angin Dan Overlap Ratio Terhadap Kinerja*. 6(1), 1–7.
- Tonadi, E. (2021). *Pengaruh Sudu dan Kecepatan Angin Terhadap Koefisien Torsi dan Koefisien Daya Serta Efisiensi Turbin Angin Savonius Sumbu Vertikal*. 15(1), 41–45.
- Zhang, H., Zhu, B., & Chen, W. (2024). Enhancing Energy Harvesting Efficiency of Flapping Wings with Leading-Edge Magnus Effect Cylinder. *Biomimetics*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/biomimetics9050293>