ANALISIS NUMERIK KINERJA TURBIN ANGIN DARRIEUS TIPE H TERHADAP VARIASI JUMLAH BLADE DAN KECEPATAN ANGIN DENGAN PENDEKATAN SIMULASI CFD

Diki Afrianto, Andre Kurniawan, Yolli Fernanda, Fitrah Qalbina

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

E-mail : dikiafrianto071021@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to analyze the aerodynamic performance of an H-type Darrieus wind turbine by varying the number of blades and wind speeds using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The turbine geometry was modeled using SolidWorks 2022 and numerically simulated with ANSYS Fluent 2025. The models consist of three-blade and four-blade configurations employing the NACA 0012 airfoil profile, tested under three different freestream wind velocities: 7 m/s, 9 m/s, and 11 m/s. The simulations were conducted within static and rotating domains to examine the fluid flow characteristics around the rotor, including velocity distribution, pressure field, torque, and power efficiency. The results show that increasing wind speed leads to more complex and turbulent flow behavior, characterized by the emergence of vortex shedding behind the blades. The torque coefficient (Ct) and power coefficient (Cp) increased with higher wind speeds in the three-blade configuration, indicating greater energy conversion efficiency compared to the four-blade configuration. Conversely, the four-blade turbine exhibited reduced efficiency at higher wind speeds due to increased drag forces and inter-blade interactions, which caused energy losses. Overall, the findings demonstrate that the three-blade H-type Darrieus turbine provides superior aerodynamic efficiency and rotational stability at medium to high wind speeds, whereas the four-blade configuration performs better at lower wind speeds by generating higher starting torque. These results are expected to serve as a reference for the development of efficient vertical-axis wind turbine designs suitable for wind conditions in Indonesia.

Keywords: *Darrieus wind turbine, Computational Fluid Dynamics (CFD), ANSYS Fluent, NACA 0012 airfoil, aerodynamic efficiency.*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja aerodinamis turbin angin Darrieus tipe H dengan variasi jumlah bilah dan kecepatan angin menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak *SolidWorks 2022* untuk mendesain geometri turbin dan *ANSYS Fluent 2025* untuk simulasi numerik. Model turbin yang digunakan memiliki konfigurasi tiga dan empat bilah dengan profil *airfoil* NACA 0012 serta diuji pada tiga variasi kecepatan angin, yaitu 7 m/s, 9 m/s, dan 11 m/s. Simulasi dilakukan pada domain *static* dan *rotating* untuk menganalisis karakteristik aliran fluida di sekitar rotor, termasuk distribusi kecepatan, tekanan, torsi, dan efisiensi daya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin menyebabkan aliran udara menjadi lebih kompleks dan turbulen, ditandai dengan munculnya fenomena *vortex shedding* di belakang bilah. Nilai koefisien torsi (Ct) dan koefisien daya (Cp) meningkat seiring kenaikan kecepatan angin pada turbin tiga bilah, menunjukkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi empat bilah. Sebaliknya, turbin empat bilah menunjukkan

penurunan efisiensi pada kecepatan tinggi akibat peningkatan gaya hambat (*drag*) dan interaksi antarbilah yang menyebabkan kehilangan energi. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa turbin Darrieus tipe H dengan konfigurasi tiga bilah lebih efisien dan stabil pada kecepatan angin sedang hingga tinggi, sedangkan konfigurasi empat bilah lebih optimal pada kecepatan rendah karena menghasilkan torsi awal yang besar. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan desain turbin angin vertikal yang efisien untuk kondisi kecepatan angin di Indonesia.
Kata kunci: Turbin angin Darrieus, *Computational Fluid Dynamics (CFD)*, ANSYS Fluent, *airfoil* NACA 0012, efisiensi aerodinamis.

PENDAHULUAN

Energi yang paling banyak digunakan serta setiap tahunnya selalu meningkat sesuai perkembangan zaman yaitu energi listrik. Energi listrik merupakan kebutuhan vital bagi umat manusia. Dengan energi listrik manusia dapat memenuhi berbagai kebutuhan sehari-hari seperti untuk hiburan, sosial, ekonomi dan lain-lain. Kebutuhan-kebutuhan tersebut memaksa manusia untuk menggunakan atau mengkonsumsi energi listrik secara berlebihan. Hal ini tentunya mengakibatkan timbulnya krisis energi. Selain itu krisis energi juga ditimbulkan oleh jumlah populasi manusia yang terus meningkat (Saputra,2021).

Di sebabkan Kebutuhan sumber energi yang cukup besar untuk keperluan pembangunan, tidak hanya untuk memproduksi dan mendistribusikan barang kebutuhan hidup sehari hari tetapi juga untuk membangun industri yang meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan bangsa.

Meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan bangsa. Untuk itu Pemerintah telah mengukuhkan Program Pembangunan Listrik 35.000 MW dalam Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2015-2019. Proyek 35.000 MW ini merupakan respon pemerintah terhadap perkiraan kebutuhan listrik pada 2019/2020, yaitu permintaan listrik tumbuh 8,7% per tahun serta rasio elektrifikasi yang ingin dicapai 97,8%. Dalam penyediaan energi secara besar-besaran inilah timbul persoalan yang tidak mudah untuk diselesaikan, antara lain dana, pembebasan lahan, AMDAL, perizinan, waktu, jenis pembangkit (Suhaemi, 2016).

Pemanfaatan tenaga angin sebagai sumber energi di Indonesai bukan tidak mungkin dikembangkan lebih lanjut. Ditengah potensi angin yang melimpah di kawasain pesisir Indonesia, total kapasitas terpasang dalam sistem energi saat ini kurang dari 800 kW.
Potensi energi angin indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 meter per detik (m/d). Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi menunjukkan beberapa wilayah memilik kecepatan angin di atas 3 m/detik, masing – masing Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, Pantai Selatan Jawa. Adapun kecepatan angin 3 m/s hingga 4 m/s tergolong skala menengah dengan potensi kapasitas 10 – 100 Kilowatt (Arifin et al., 2018).

Dengan analisis numerik, peneliti dan insinyur dapat melakukan studi perilaku aliran fluida dan perpindahan energi tanpa harus langsung membangun prototipe fisik. Ini memungkinkan eksplorasi berbagai desain dan parameter operasi secara efisien, hemat biaya, dan akurat. Analisis numerik sangat penting terutama untuk turbin dengan geometri kompleks seperti turbin *Darrieus* vertikal, karena aliran fluida yang melingkupi bilahnya bersifat tidak stasioner dan non-linier.(Rezaeiha et al., 2017).

Simulasi numerik menggunakan

Computational Fluid Dynamics (CFD) memungkinkan analisis detail terhadap aliran fluida di sekitar bilah turbin. Dengan metode rotating blade, simulasi ini dapat menggambarkan kondisi nyata saat turbin berputar, sehingga dapat memberikan gambaran performa turbin secara lebih akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa turbin *Darrieus* jenis H menggunakan simulasi CFD dengan pendekatan *rotating blade,* sebagai upaya peningkatan efisiensi desain turbin angin vertikal.

Analisis numerik turbin adalah metode pemodelan matematis yang digunakan untuk memahami dan memprediksi kinerja turbin (baik turbin uap, gas, maupun turbin angin) melalui penyelesaian persamaan fisika secara numerik menggunakan bantuan komputer. Analisis ini biasanya dilakukan menggunakan metode seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yang mampu menghitung distribusi tekanan, kecepatan, suhu, dan turbulensi di sekitar bilah turbin.

Dengan analisis numerik, peneliti dan insinyur dapat melakukan studi perilaku aliran fluida dan perpindahan energi tanpa harus langsung membangun prototipe fisik. Ini memungkinkan eksplorasi berbagai desain dan parameter operasi secara efisien, hemat biaya, dan akurat. Analisis numerik sangat penting terutama untuk turbin dengan geometri kompleks seperti turbin *Darrieus* vertikal, karena aliran fluida yang melingkupi bilahnya bersifat tidak stasioner dan non-linier.(Rezaeiha et al., 2017)

Turbin Darrieus jenis H adalah variasi dari turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine/VAWT*) yang memiliki bilah lurus menempel secara tegak pada poros utama, membentuk struktur mirip huruf “H”. Tata letak ini memudahkan instalasi dan mendorong operasi dari segala arah tanpa perlu penyesuaian orientasi terhadap arah angin.

Turbin angin sumbu vertikal (VAWT) memiliki karakteristik berbeda, seperti rotor Darrieus yang tidak memiliki torsi awal, sementara rotor *Savonius* memiliki torsi awal yang baik tetapi kurang efisien, sehingga mendorong penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja VAWT. (Valdes et al., 2024) Dalam beberapa tahun terakhir, desain ini banyak dipelajari menggunakan simulasi CFD untuk menganalisis performa aerodinamis dan interaksi fluida- bilah. Simulasi numerik tersebut mencakup domain rotasi dan statis yang diselesaikan dengan model turbulensi seperti URANS/SST atau LES.(Ridho &Prabowo 2025)

METODE PENELITIAN

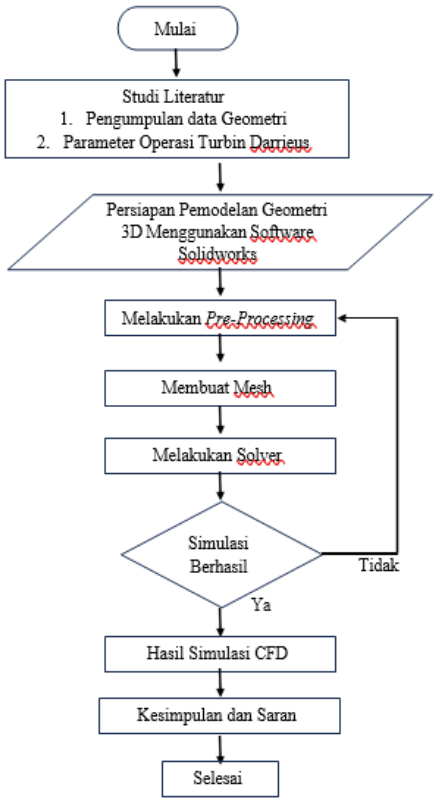
Penelitian ini menggunakan metode numerik dengan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan software ANSYS 2025, khususnya bagian ANSYS Fluent, yang berfungsi untuk memodelkan dan menganalisis aliran fluida pada objek tiga dimensi secara virtual. Melalui ANSYS Fluent, simulasi dapat dilakukan dengan fleksibilitas tinggi, bahkan pada kondisi mesh yang tidak terstruktur, sehingga memungkinkan pengamatan performa sudu turbin tanpa perlu membuat prototipe fisik terlebih dahulu. Simulasi ini difokuskan pada model tiga dimensi sudu turbin angin tipe Darrieus. Penelitian dilaksanakan pada bulan September hingga Oktober di Laboratorium Konversi Energi Universitas Negeri Padang, tempat dilakukan desain serta analisis simulasi. Perangkat yang digunakan berupa laptop dengan spesifikasi Nitro AN515-58, prosesor Intel Core i5-12500H (12th Gen, 3.1 GHz), RAM 8 GB, dan SSD 512 GB, sedangkan bahan penelitian berupa desain sudu turbin angin Darrieus dan basin sebagai domain yang dibuat menggunakan software SolidWorks 2022.

Variabel penelitian terdiri atas: (1) variabel bebas, yaitu kecepatan angin sebesar 7 m/s, 9 m/s, dan 11 m/s; (2) variabel terikat, yaitu velocity hasil simulasi; serta (3) variabel kontrol, yang meliputi jumlah bilah turbin (3 dan 4 bilah), profil bilah (airfoil NACA 0012), panjang chord bilah, diameter rotor, sudut pitch bilah (tetap), ketinggian pemasangan turbin, jenis generator yang digunakan, serta kondisi lingkungan pengujian seperti penggunaan wind tunnel.

Pembuatan desain 3D sudu turbin angin Darrieus dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks dengan menyesuaikan profil bilah sesuai spesifikasi yang telah ditentukan. Dalam penelitian ini digunakan konfigurasi empat bilah dengan profil *airfoil* NACA 0012, yang dirancang untuk mengoptimalkan kinerja turbin pada berbagai variasi kecepatan angin. Proses perancangan dimulai dengan pembuatan desain turbin berdasarkan rancangan gambar menggunakan format CGS (centimeter, gram, second). Langkah awal melibatkan penentuan profil *airfoil* NACA 0012 sebagai bentuk bilah utama, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan desain *scor* atau penahan bilah yang berfungsi menopang bilah saat turbin beroperasi. Setelah itu, dilakukan pembuatan desain poros turbin dan kedudukan atau penahan turbin sebagai struktur pendukung utama. Seluruh komponen yang telah selesai dirancang kemudian digabungkan melalui proses *assembly* untuk membentuk desain akhir turbin angin Darrieus tiga dimensi secara utuh, yang selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk gambar guna memperlihatkan konfigurasi dan bentuk keseluruhan turbin.

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui metode observasi visual dan pencatatan hasil pengujian menggunakan *wind tunnel*. Metode ini dilaksanakan secara sistematis untuk memastikan keakuratan serta validitas data yang diperoleh sesuai dengan tujuan penelitian. Data yang dikumpulkan meliputi nilai torsi, daya efektif, daya potensial, dan efisiensi turbin pada setiap variasi kecepatan angin, yaitu 7 m/s, 9 m/s, dan 11 m/s. Pengambilan data dilakukan dalam dua kondisi, yaitu pengujian pada turbin angin statis dan turbin angin dengan bilah berputar (rotating blade), masing-masing dengan parameter pengukuran yang sama agar hasil perbandingan dapat dianalisis secara objektif dan konsisten.

Penelitian ini dimulai dari studi literatur dan pengumpulan data geometri serta parameter operasi turbin Darrieus, tahapan selanjutnya pemodelan geometri turbin dalam 2D dan 3D menggunakan perangkat lunak CAD Solidworks, melakukan analisis hasil kinerja aerodinamis serta pengolahan data hingga kesimpulan.



Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan *software* CAD SolidWorks untuk pembuatan model dan ANSYS 2023 untuk simulasi.

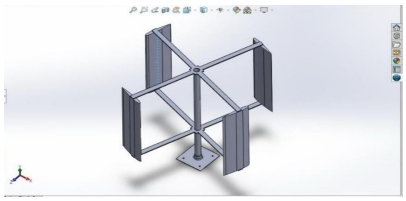
Metode numerik ini mencakup tiga tahapan utama, yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Model yang digunakan berupa geometri dua dimensi dari turbin angin Darrieus dengan sumbu vertikal, memiliki variasi jumlah sudu sebanyak empat bilah, serta diuji pada tiga variasi kecepatan angin bebas (*freestream*) yaitu 7 m/s, 9 m/s, dan 11 m/s. Setiap variasi kecepatan digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa turbin, meliputi torsi, daya, dan efisiensi aerodinamis, dengan mempertimbangkan bentuk geometri dan konfigurasi bilah yang telah dirancang sebelumnya menggunakan profil *airfoil* NACA 0012.

Domain simulasi dalam penelitian ini terdiri dari static domain dan rotating domain. *Static domain* merupakan area terluar berbentuk persegi panjang yang berfungsi sebagai area aliran fluida dan bersifat diam, sedangkan *rotating domain* berbentuk lingkaran yang mengelilingi sudu serta poros turbin angin Darrieus. *Rotating domain* ini berfungsi sebagai area rotasi yang bergerak dengan kecepatan sudut tertentu sesuai dengan waktu (*time step*) yang telah ditetapkan dalam simulasi. Pembagian domain ini penting untuk memastikan bahwa interaksi antara fluida dan sudu turbin dapat disimulasikan dengan akurat, di mana fluida bergerak melewati batas antar domain melalui *interface* tanpa hambatan, sehingga hasil analisis aliran udara dan gaya yang bekerja pada bilah turbin dapat dihitung dengan lebih realistis.

HASIL PENELITIAN

1. Desain Turbin

Pada penelitian ini berupa desain turbin angin sumbu vertical tipe savonius yang bisa diterapkan efek magnus dibuat mengguanakan software Solidworks.



Gambar 4. 1 Turbin Angin

2. Hasil Simulasi

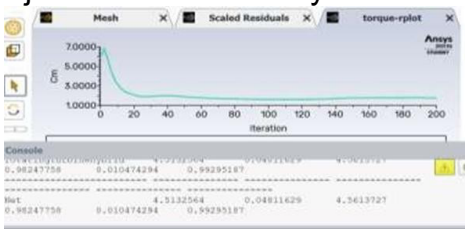
Setelah dilakukan tahap *solution* menggunakan *Ansys Fluent* versi 2025 R2 pada blade turbin, diperoleh hasil simulasi berupa nilai torsi terhadap variasi kecepatan angin sebesar 7m/s, 9m/s, dan 11m/s pada turbin dengan 3 bilah dan 4 bilah dengan parameter sesuai tabel dibawah.

Tabel 4. 1 parameter analisis

Parameter	Nilai
Diameter rotor	1,5 m
Tinggi bilah	1,0 m
Profil bilah	NACA 0012
Media fluida	Udara
Densitas udara	1,18415 kg/m³
Viskositas dinamis	$1{,}855\times10^{-5}$ Pa·s
Variasi kecepatan angin	7 m/s, 9 m/s, 11 m/s
Metode penyelesaian	CFD – Steady State
Kriteria konvergensi	Residual error < 10^{-4}

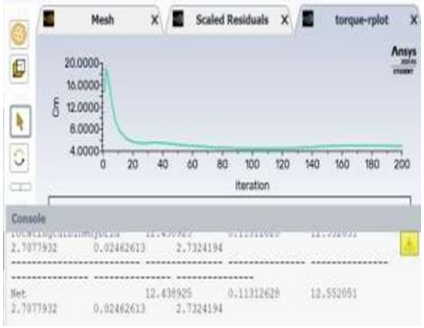
Proses meshing dilakukan dengan skema *fine mesh* pada area sekitar bilah untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih akurat, serta *inflation layer* digunakan untuk menangkap *gradien* kecepatan di dinding bilah. Hasil tersebut disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.2, gambar 4.3, dan gambar 4.4 untuk nilai torsi.

Pada gambar 4.2 menunjukan hasil dari simulasi yang memperoleh nilai torsi pada kecepatan aliran udara 7 m/s dalam bentuk grafik yang berhasil terkonvergensi pada kriteria konvergensi 10-5 dengan mencapai konvergensi pada jumlah iterasi sebanyak 200.



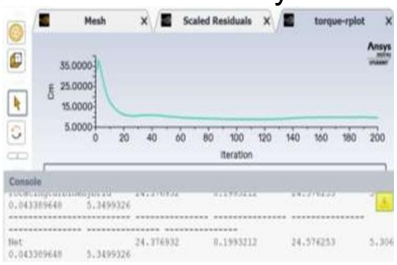
Gambar 4. 2 Grafik torsi turbin 3 bilah pada kecepatan angin 7 m/s

Pada gambar 4.3 menunjukan hasil dari simulasi yang memperoleh nilai torsi pada kecepatan aliran udara 9 m/s dalam bentuk grafik yang berhasil terkonvergensi pada kriteria konvergensi 10-5 dengan mencapai konvergensi pada jumlah iterasi sebanyak 200.



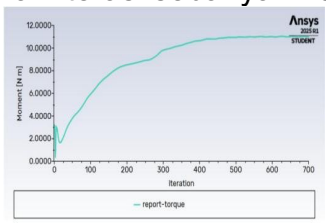
Gambar 4. 3 Grafik torsi turbin 3 bilah pada kecepatan angin 9 m/s

Pada gambar 4.4 menunjukan hasil dari simulasi yang memperoleh nilai torsi pada kecepatan aliran udara 11 m/s dalam bentuk grafik yang berhasil terkonvergensi pada kriteria konvergensi 10-5 dengan mencapai konvergensi pada jumlah iterasi sebanyak 200.



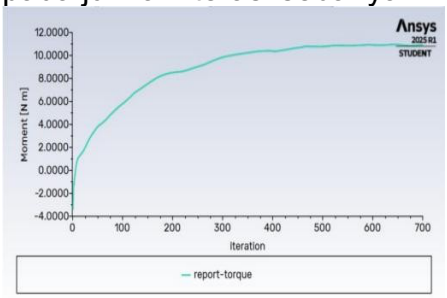
Gambar 4. 4 Grafik torsi turbin 3 bilah pada kecepatan angin 9 m/s

Pada gambar 4.5 menunjukan hasil dari simulasi yang memperoleh nilai torsi pada kecepatan aliran udara 7 m/s dalam bentuk grafik yang berhasil terkonvergensi pada kriteria konvergensi 10-5 dengan mencapai konvergensi pada jumlah iterasi sebanyak 700.



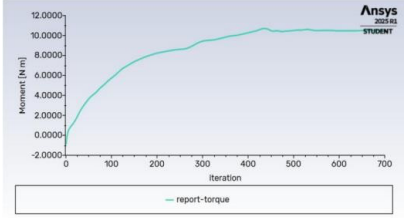
Gambar 4. 5 Grafik torsi turbin 4 bilah pada kecepatan angin 7 m/s

Pada gambar 4.6 menunjukan hasil dari simulasi yang memperoleh nilai torsi pada kecepatan aliran udara 9 m/s dalam bentuk grafik yang berhasil terkonvergensi pada kriteria konvergensi 10-5 dengan mencapai konvergensi pada jumlah iterasi sebanyak 700.



Gambar 4. 6 Grafik torsi turbin 4 bilah pada kecepatan angin 9 m/s

Pada gambar 4.7 menunjukan hasil dari simulasi yang memperoleh nilai torsi pada kecepatan aliran udara 11 m/s dalam bentuk grafik yang berhasil terkonvergensi pada kriteria konvergensi 10-5 dengan mencapai konvergensi pada jumlah iterasi sebanyak 700.



Gambar 4. 7 Grafik torsi turbin 4 bilah pada kecepatan angin 11 m/s

Dari grafik tersebut terlihat peningkatan kecepatan relatif di sisi luar

bilah dan perlambatan di sisi dalam akibat efek rotasi, yang menghasilkan perbedaan tekanan antara dua sisi bilah. Untuk nilai torsi, koefisien daya dan koefisien torsi pada variasi kecepatan aliran udara 3 m/s, 5 m/s, dan 7 m/s yang diperoleh dari hasil simulasi yang dilakukan sebelumnnya dimasukkan ke persamaan rumus pada BAB II untuk mendapatkan nilai CP dan CT yang dapat dilihat pada tabel berikut :

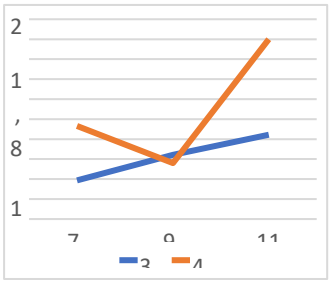
Tabel 4. 2 Hasil Nilai C_P dan C_T

No	Jumlah bilah	Kecepatan Aliran Udara (m/s)	Torsi	Koefisien Daya (C_P)	TSR	Koefisien Torsi (C_T)
1	3	7	4,561	0,387	3	1,161
2	3	9	12,55	0,644	3	1,932
3	3	11	24,58	0,844	3	2,532
4	4	7	11	0,933	3	2,799
5	4	9	10,91	0,56	3	1,68
6	4	11	10,47	0,36	3	1,08

Hasil simulasi numerik menunjukkan variasi nilai torsi, Koefisien Daya, dan koefisiensi Toesi pada setiap kecepatan angin dan jumlah bilah. Nilai torsi diperoleh dari hasil simulasi *ANSYS Fluent* melalui integrasi gaya pada permukaan bilah. Peningkatan kecepatan angin secara umum meningkatkan nilai torsi dan daya. Turbin empat bilah memiliki torsi lebih besar dibanding tiga bilah karena luas sapuan udara yang lebih besar.

3. Analisis Koefisien Daya

Koefisien daya (CP) merupakan parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa efisien turbin angin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros. Nilai Cp dihitung dari rasio daya mekanik keluaran terhadap daya angin yang masuk ke sistem.



Gambar 4. 8 Koefisien Daya

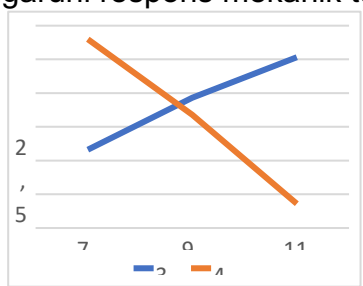
Pada konfigurasi tiga bilah, nilai Cp meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Ketika kecepatan udara sebesar 7 m/s, diperoleh nilai Cp sebesar 1,161. Nilai ini meningkat menjadi 1,932 pada kecepatan 9 m/s dan mencapai 2,532 pada kecepatan 11 m/s. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin yang mengenai bilah, semakin besar pula energi kinetik yang dikonversi menjadi energi mekanik,

sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin meningkat secara signifikan. Hal ini juga mengindikasikan bahwa desain tiga bilah memiliki efisiensi aerodinamis yang baik dalam memanfaatkan energi angin pada rentang kecepatan sedang hingga tinggi.

Sementara itu, pada konfigurasi empat bilah, nilai Cp menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Pada kecepatan 7 m/s, Cp mencapai nilai tertinggi sebesar 2,799, namun ketika kecepatan meningkat menjadi 9 m/s dan 11 m/s, nilai Cp menurun masing-masing menjadi 1,680 dan 1,080. Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya gaya hambat (drag) akibat jumlah bilah yang lebih banyak, sehingga sebagian energi angin tidak termanfaatkan secara optimal untuk menghasilkan daya mekanik. Dengan demikian, penambahan jumlah bilah menyebabkan efisiensi turbin menurun pada kecepatan tinggi, meskipun pada kecepatan rendah dapat membantu menangkap energi angin dengan lebih baik.

4. Analisis Koefisien Torsi

Koefisien torsi (Ct) menggambarkan kemampuan turbin dalam menghasilkan gaya puntir (torsi) akibat energi kinetik angin yang bekerja pada permukaan bilah. Nilai Ct yang tinggi menunjukkan bahwa turbin mampu menghasilkan gaya puntir besar terhadap gaya dinamis angin yang tersedia. Analisis Ct ini penting untuk memahami sejauh mana perubahan kecepatan angin dan jumlah bilah memengaruhi respons mekanik turbin.



Gambar 4. 9 Koefisien Torsi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada konfigurasi tiga bilah, nilai Ct meningkat secara signifikan dengan bertambahnya kecepatan angin. Pada kecepatan 7 m/s, nilai Ct diperoleh sebesar 0,387, kemudian meningkat menjadi 0,644 pada kecepatan 9 m/s, dan mencapai 0,844 pada kecepatan 11 m/s. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin, semakin kuat gaya puntir yang dihasilkan oleh turbin. Hal ini berkaitan dengan peningkatan momentum fluida yang menumbuk bilah sehingga menghasilkan momen puntir yang lebih besar terhadap poros turbin. Dengan demikian, konfigurasi tiga bilah menunjukkan kemampuan torsi yang stabil dan efisien terhadap variasi kecepatan aliran udara.

Berbeda dengan hasil tersebut, pada konfigurasi empat bilah, nilai Ct justru mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Pada kecepatan 7 m/s, nilai Ct tertinggi diperoleh sebesar 0,933, namun menurun menjadi 0,560 pada 9 m/s, dan kembali turun menjadi 0,360 pada 11 m/s. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah bilah menyebabkan efek drag yang lebih dominan dibandingkan gaya angkat (lift), terutama pada kecepatan tinggi. Akibatnya, sebagian besar energi angin digunakan untuk mengatasi gaya hambat daripada menghasilkan torsi, sehingga efisiensi konversi energi menurun.

5. Analisis Rasio antara Koefisien Daya dan Koefisien Torsi

Rasio antara CP dan CT, yang direpresentasikan oleh parameter TSR (Tip Speed Ratio), menunjukkan hubungan antara kecepatan ujung bilah dan kecepatan angin. Dalam kasus ini, nilai TSR dianggap konstan. Berikut adalah perbandingan rasio tersebut:

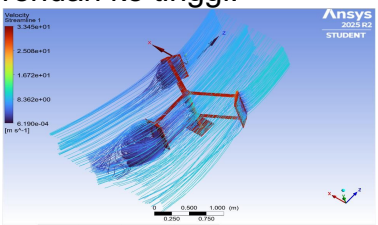
Tabel 4. 3 Rasio antar C_P/ C_T

Jumlah Bilah	Kecepatan Angin	C_P	C_T	C_P/C_T
3	7	0,387	1,161	0,33
3	9	0,644	1,932	0,33
3	11	0,844	2,532	0,33
4	7	0,933	2,799	0,33
4	9	0,56	1,68	0,33
4	11	0,36	1,08	0,33

Nilai rasio CP/CT 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.

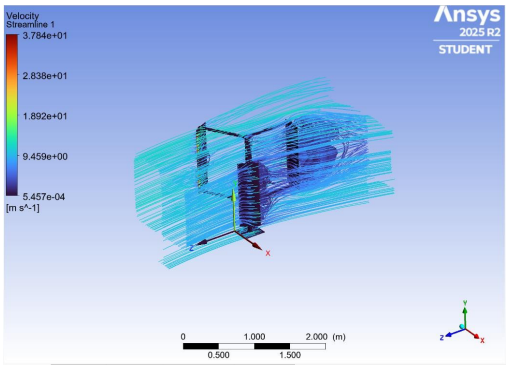
6. Analisis *Velocity Streamline*

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 7 m/s, 9 m/s, dan 11 m/s. Warna pada garis-garis *streamline* menunjukkan *magnitude* kecepatan, di mana warna biru tua hingga merah menunjukkan gradasi dari kecepatan rendah ke tinggi.



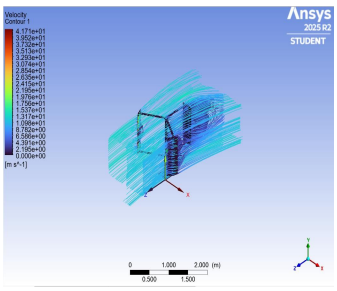
Gambar 4. 10 *Velocity Streamline* pada turbin 3 bilah kecepatan angin 7 m/s

Pada kecepatan angin 7 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. Mulai tampak adanya deviasi aliran di sisi rotor akibat rotasi silinder.



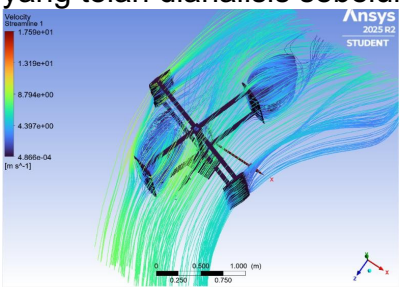
Gambar 4. 11 *Velocity Streamline* pada turbin 3 bilah kecepatan angin 9 m/s

Untuk kecepatan angin 9 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, 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.



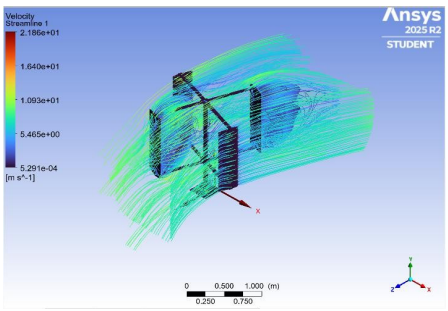
Gambar 4. 12 *Velocity Streamline* pada turbin 3 bilah kecepatan angin 11 m/s

Pada kecepatan 11 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.



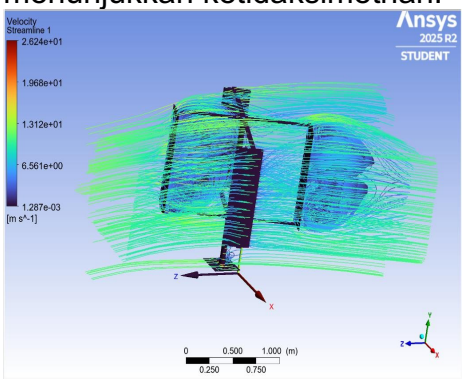
Gambar 4. 13 *Velocity Streamline* pada turbin 4 bilah kecepatan angin 7 m/s

Pada kecepatan angin 7 m/s, aliran udara tampak mengalir secara stabil dan teratur dengan pola *streamline* yang menyebar serta hanya mengalami sedikit gangguan di sekitar rotor. Di bagian belakang rotor terlihat terbentuknya *wake region* yang ditandai oleh penurunan kecepatan aliran secara signifikan, dengan gradasi warna dari biru ke hijau. Selain itu, mulai terlihat adanya penyimpangan arah aliran di sisi rotor sebagai akibat dari efek rotasi silinder.



Gambar 4. 14 *Velocity Streamline* pada turbin 4 bilah kecepatan angin 9 m/s

Pada kecepatan angin 9 m/s, pola aliran streamline tampak semakin kompleks dengan peningkatan gradien kecepatan di sekitar permukaan rotor. Warna merah yang muncul pada bagian atas rotor menandakan terjadinya percepatan aliran, sedangkan bagian bawah menunjukkan adanya perlambatan aliran. Kondisi ini menimbulkan perbedaan tekanan yang berperan dalam menghasilkan gaya angkat serta torsi pada rotor. Selain itu, fenomena vortex shedding di area belakang rotor terlihat semakin jelas, menandakan dinamika aliran yang mulai menunjukkan ketidaksimetrian.



Gambar 4. 15 *Velocity Streamline* pada turbin 4 bilah kecepatan angin 11 m/s

Pada kecepatan angin 11 m/s, aliran udara menunjukkan tingkat turbulensi yang lebih kuat. Pola *streamline* tampak semakin rapat dan melengkung tajam di sekitar rotor. Area berwarna merah yang meluas menandakan peningkatan kecepatan di bagian atas rotor akibat interaksi yang intens antara rotasi rotor dan kecepatan angin. Sementara itu, *wake region* di belakang rotor terlihat memanjang dan melebar, menunjukkan adanya

pelepasan energi yang lebih besar. Fenomena ini sejalan dengan peningkatan nilai torsi dan koefisien daya yang telah dibahas pada analisis sebelumnya.

PEMBAHASAN

Distribusi kecepatan dan tekanan pada turbin angin tipe Darrieus merupakan aspek penting untuk memahami bagaimana gaya aerodinamik terbentuk dan memengaruhi kinerja turbin. Berdasarkan hasil simulasi CFD menggunakan *ANSYS Fluent 2025 R2*, diketahui bahwa pola aliran udara di sekitar bilah mengalami perubahan signifikan pada setiap variasi kecepatan angin dan jumlah bilah.

Pada kecepatan angin rendah (7 m/s), aliran udara di sekitar bilah masih relatif stabil. Terlihat adanya percepatan aliran di sisi luar bilah akibat bentuk profil NACA 0012 yang menyebabkan udara mengalir lebih cepat di permukaan cembung. Kondisi ini menghasilkan penurunan tekanan statis di sisi luar, sementara di sisi dalam terjadi peningkatan tekanan, sehingga timbul gaya angkat (lift) yang berkontribusi langsung terhadap torsi pada rotor.

Ketika kecepatan angin meningkat menjadi 9 m/s, gradien tekanan antara sisi luar dan sisi dalam bilah menjadi lebih besar. Hal ini meningkatkan gaya angkat dan memperbesar torsi yang dihasilkan. Namun, pada beberapa titik *trailing edge* mulai muncul indikasi pemisahan aliran (*flow separation*), terutama pada bilah dengan sudut serang lokal yang besar akibat rotasi. Fenomena ini masih dalam batas wajar dan belum menurunkan efisiensi secara signifikan.

Pada kecepatan angin 11 m/s, pola aliran menunjukkan pembentukan vortex besar di belakang *trailing edge* bilah. Vortex ini merupakan hasil dari peningkatan efek inersia fluida dan perbedaan kecepatan yang tajam di sekitar permukaan bilah. Kondisi ini menunjukkan adanya separasi aliran yang kuat, yang dapat menyebabkan fluktuasi tekanan dan peningkatan gaya hambat (drag). Meskipun demikian, pada kondisi ini nilai torsi dan daya tetap meningkat, menandakan bahwa efek positif peningkatan gaya angkat masih lebih dominan dibandingkan peningkatan drag.

Perbandingan antara konfigurasi tiga bilah dan empat bilah menunjukkan bahwa turbin empat bilah memiliki pola aliran yang lebih padat dengan interaksi antar bilah yang lebih kuat. Hal ini menghasilkan peningkatan gaya total (torsi), tetapi juga meningkatkan distorsi aliran antar bilah yang dapat menurunkan efisiensi aerodinamik global. Sebaliknya, konfigurasi tiga bilah menunjukkan pola aliran yang lebih bersih dengan jarak antar bilah lebih besar, sehingga turbulensi yang dihasilkan lebih rendah.

Secara umum, hasil simulasi memperlihatkan bahwa efisiensi aerodinamik optimum terjadi pada kondisi di mana keseimbangan antara lift dan drag tercapai, yaitu pada kecepatan 9–11 m/s. Distribusi tekanan dan kecepatan ini juga memperlihatkan karakteristik khas turbin Darrieus, yaitu kombinasi gaya tangensial dan radial yang kompleks akibat gerak rotasi non-uniform setiap bilah terhadap arah aliran angin

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis terhadap turbin angin Darrieus tipe H yang dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dapat disimpulkan bahwa variasi kecepatan angin dan jumlah bilah memiliki pengaruh signifikan terhadap performa turbin. Karakteristik aliran fluida di sekitar rotor menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin menyebabkan aliran menjadi lebih kompleks dan turbulen. Pada kecepatan rendah sebesar 7 m/s, aliran udara masih relatif stabil dengan *wake region* yang pendek di belakang rotor, namun pada kecepatan 9 m/s dan 11 m/s, pola aliran memperlihatkan peningkatan gradien

kecepatan di sekitar bilah serta munculnya fenomena *vortex shedding* akibat interaksi kuat antara rotasi rotor dan aliran udara, yang secara langsung meningkatkan gaya aerodinamis, torsi, serta efisiensi daya turbin. Nilai koefisien torsi (Ct) menunjukkan bahwa turbin tiga bilah mampu menghasilkan gaya puntir yang lebih stabil dibandingkan konfigurasi empat bilah. Pada turbin tiga bilah, peningkatan kecepatan angin diikuti dengan kenaikan nilai Ct yang menunjukkan peningkatan gaya puntir akibat bertambahnya momentum fluida yang menumbuk bilah, sedangkan pada turbin empat bilah, nilai Ct menurun pada kecepatan tinggi akibat meningkatnya gaya hambat (*drag*) yang mengurangi efektivitas bilah dalam menghasilkan torsi. Nilai koefisien daya (Cp) juga menunjukkan tren serupa, di mana konfigurasi tiga bilah mengalami peningkatan Cp seiring bertambahnya kecepatan angin, menandakan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, sedangkan turbin empat bilah mengalami penurunan Cp karena efek turbulensi dan interaksi antarbilah yang menimbulkan kehilangan energi. Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi tiga bilah memberikan kinerja aerodinamis yang lebih efisien dan stabil pada kecepatan angin sedang hingga tinggi, sedangkan konfigurasi empat bilah lebih optimal pada kecepatan rendah karena mampu menghasilkan torsi awal yang lebih besar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa turbin angin Darrieus tipe H dengan konfigurasi tiga bilah merupakan desain paling optimal dalam menghasilkan efisiensi daya dan kestabilan rotasi rotor.

DAFTAR PUSTAKA

Arifin, Z., Ramadhan, F., & Irawan, D. (2018). *Analisis Potensi Energi Angin di Kawasan Pesisir Indonesia*. Jurnal Teknik Energi, 14(1), 35–42.

Admiral, Y. (2023). *Penerapan Perangkat Lunak ANSYS dalam Bidang Rekayasa Versi 25*. Jurnal Teknologi dan Aplikasi Teknik, 10(2), 55–63.

Saputra, A. (2021). *Krisis Energi Akibat Kenaikan Konsumsi Energi Listrik dan Pertumbuhan Populasi Manusia*. Jurnal Energi dan Lingkungan, 9(2), 45–51.

Suhaemi, T. (2016). *Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Menopang Kebutuhan Energi Listrik Nasional*. Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, 17(1), 12–19

Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2017). *Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and blade number*. *Energy*, 118, 867–879.

Ridho, M. & Prabow, A. (2025). *Simulasi Numerik CFD untuk Menganalisis Interaksi Fluida dan Bilah Turbin Darrieus dengan Model URANS/SST/LES*. Jurnal Teknologi Energi Baru, 11(1), 1–12.

Furqani, A., Hidayat, M., & Prasetyo, T. (2022). *Pemanfaatan SolidWorks dalam Desain dan Simulasi Teknik Mesin*. Jurnal Rekayasa Desain, 8(1), 34–41.

Kartiko, W. K. (2024). *Penerapan Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk Simulasi Aliran Fluida pada Turbin Angin Vertikal*. Tugas Akhir, Universitas Negeri Yogyakarta.

Rahmawaty, A., & Dharma, Y. (2021). *Pengantar Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk Analisis Sistem Fluida*. Jurnal Mekanika dan Energi, 14(2), 22–30.

Sumiati, D., Wibowo, H., & Rachman, A. (2013). *Rancang Bangun Turbin Angin Sumbu Horizontal Sebagai Energi Alternatif*. Jurnal Teknik Mesin, 9(1), 11–17.