

Analisis Pengaruh Variasi Sudut Kopling Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius *Single Stage* Menggunakan Metode CFD

Moh Habibi Abyaz¹, Alviani Hesthi Permata Ningtyas²

^{1,2)} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik

Jalan Sumatera No. 101, Gresik Kota Baru (GKB), Randuagung, Kecamatan Kebomas, Kabupaten Gresik, Jawa Timur 61121

Email: habibiabyaz65@gmail.com, alvianahesthi@umg.ac.id

ABSTRAK

Turbin angin Savonius merupakan salah satu turbin angin sumbu vertikal yang memiliki keunggulan dalam kemampuan beroperasi secara mandiri (*self-starting*) pada kondisi kecepatan angin rendah. Namun demikian, dibandingkan dengan beberapa tipe turbin angin lainnya, efisiensi aerodinamiknya masih relatif rendah sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan performanya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi sudut kopling terhadap karakteristik kinerja turbin angin Savonius single stage tipe S dengan memanfaatkan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Variasi sudut kopling yang ditinjau meliputi 0°, 30°, dan 60°, sedangkan kondisi operasi menggunakan kecepatan angin 2,5 m/s dan 3,5 m/s dengan variasi *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 0,5 dan 0,81. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 2023 dengan menerapkan model turbulensi *k- ω Shear Stress Transport* (SST). Parameter performa yang dianalisis meliputi *coefficient of power* (Cp), *coefficient of moment* (Cm), serta efisiensi turbin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan nilai TSR dari 0,5 menjadi 0,81 mampu meningkatkan performa turbin pada seluruh variasi sudut kopling yang diuji. Pada kecepatan angin 2,5 m/s, konfigurasi sudut kopling 60° menghasilkan performa terbaik dengan nilai Cp sebesar 0,74 dan Cm sebesar 0,91. Sementara itu, pada kecepatan angin 3,5 m/s, kinerja optimum dicapai oleh konfigurasi sudut kopling 30° dengan nilai Cp sebesar 1,25, Cm sebesar 1,24, serta efisiensi sebesar 124,8%. Selain itu, analisis distribusi kontur kecepatan, tekanan, dan pola aliran menunjukkan bahwa konfigurasi sudut kopling 30° mampu menghasilkan karakteristik aerodinamika yang lebih baik sehingga proses konversi energi angin menjadi energi mekanik berlangsung lebih efektif dibandingkan konfigurasi lainnya.

Kata kunci: Turbin Savonius, Computational Fluid Dynamics, Sudut Kopling, Tip Speed Ratio, Coefficient of Power, Coefficient of Moment.

ABSTRACT

The Savonius wind turbine is a vertical-axis wind turbine with the advantage of self-starting at low wind speeds. However, compared to other wind turbine types, its aerodynamic efficiency is relatively low, necessitating efforts to improve its performance. This study aims to analyze the effect of varying the coupling angle on the performance characteristics of a single-stage S-type Savonius wind turbine using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The coupling angle variations examined included 0°, 30°, and 60°, while operating conditions used wind speeds of 2.5 m/s and 3.5 m/s with Tip Speed Ratio (TSR) variations of 0.5 and 0.81. The simulation was conducted using ANSYS Fluent 2023 software, applying the k- ω Shear Stress Transport (SST) turbulence model. The performance parameters analyzed included the coefficient of power (Cp), the coefficient of moment (Cm), and turbine efficiency. The simulation results show that increasing the TSR value from 0.5 to 0.81 can improve turbine performance at all tested clutch angle variations. At a wind speed of 2.5 m/s, the 60° clutch angle configuration produces the best performance with a Cp value of 0.74 and a Cm of 0.91. Meanwhile, at a wind speed of 3.5 m/s, the optimum performance is achieved by the 30° clutch angle configuration with a Cp value of 1.25, a Cm of 1.24, and an efficiency of 124.8%. In addition, analysis of the distribution of velocity, pressure, and flow pattern contours shows that the 30° clutch angle configuration is able to produce better aerodynamic characteristics so that the process of converting wind energy into mechanical energy takes place more effectively than other configurations.

Keywords: Savonius Wind Turbine, Computational Fluid Dynamics, Coupling Angle, Tip Speed Ratio, Coefficient of Power, Coefficient of Moment.

Pendahuluan

Penerapan sistem energi yang berkelanjutan dengan tingkat emisi karbon yang rendah menjadi salah satu langkah strategis dalam mendukung pembangunan yang berwawasan lingkungan. Upaya tersebut mendorong pemanfaatan energi terbarukan sebagai solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, yang hingga saat ini masih menjadi

penyebab utama peningkatan emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim secara global. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi angin menunjukkan perkembangan yang cukup pesat karena mampu menghasilkan energi listrik secara berkelanjutan dengan dampak lingkungan yang relatif kecil. Atas dasar tersebut, berbagai penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan teknologi konversi energi angin sehingga mampu memberikan efisiensi, keandalan, dan performa yang lebih optimal [1], [2], [3], [4].

Dalam sistem konversi energi angin, energi kinetik yang terkandung dalam aliran udara dimanfaatkan oleh turbin angin untuk menghasilkan energi mekanik berupa putaran poros. Energi mekanik tersebut selanjutnya diteruskan ke generator untuk diubah menjadi energi listrik. Oleh karena itu, turbin angin merupakan komponen utama dalam sistem konversi energi karena karakteristik rotor sangat memengaruhi kemampuan penyerapan energi angin, performa aerodinamika, serta daya listrik yang dapat dihasilkan [5], [6].

Berdasarkan orientasi sumbu rotasinya, turbin angin secara umum dibedakan menjadi dua kategori, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Dibandingkan dengan HAWT, VAWT memiliki beberapa keunggulan, di antaranya mampu menangkap aliran angin dari berbagai arah tanpa memerlukan sistem pengarah (*yaw system*), memiliki desain konstruksi yang lebih sederhana, serta mampu beroperasi secara optimal pada wilayah dengan kecepatan angin yang relatif rendah. Keunggulan tersebut menjadikan VAWT sebagai alternatif yang sesuai untuk diaplikasikan di kawasan perkotaan maupun daerah yang memiliki karakteristik arah dan kecepatan angin yang berubah-ubah [7], [8], [9].

Salah satu jenis VAWT yang terus dikembangkan adalah turbin angin Savonius. Turbin ini bekerja berdasarkan prinsip gaya hambat (*drag force*), sehingga memiliki kemampuan *self-starting* yang baik meskipun dioperasikan pada kondisi kecepatan angin rendah. Selain memiliki rancangan yang sederhana, turbin Savonius juga menawarkan biaya manufaktur yang relatif rendah serta proses fabrikasi yang mudah, sehingga banyak dimanfaatkan pada sistem pembangkit listrik skala kecil dan berbagai aplikasi di lingkungan perkotaan. Meskipun demikian, performa aerodinamika turbin Savonius masih lebih rendah dibandingkan beberapa jenis turbin angin lainnya. Salah satu penyebab utama kondisi tersebut adalah timbulnya *negative torque* pada sudu yang bergerak berlawanan dengan arah aliran angin, sehingga energi angin yang tersedia belum dapat dimanfaatkan secara maksimal. Oleh sebab itu, berbagai penelitian telah difokuskan pada upaya peningkatan performa turbin Savonius melalui optimasi geometri rotor, modifikasi bentuk sudu, maupun penyesuaian parameter operasi untuk memperoleh efisiensi yang lebih tinggi [10], [11], [12], [13].

Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa optimasi geometri rotor berperan penting dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Mohammed *et al.* [14] melaporkan bahwa pengaturan *overlap ratio* yang optimal mampu memperbaiki karakteristik aliran di sekitar rotor, sehingga berdampak pada peningkatan nilai *coefficient of power* (C_p). Sejalan dengan temuan tersebut, Velasquez *et al.* [15] menyatakan bahwa perubahan parameter geometri rotor memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik aerodinamika turbin Savonius. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Mrigua *et al.* [16] menunjukkan bahwa optimasi beberapa parameter geometri, seperti *twist angle*, *aspect ratio*, dan *overlap ratio*, dapat meningkatkan nilai *coefficient of power* (C_p) maupun *coefficient of moment* (C_m). Meskipun berbagai aspek geometri rotor telah banyak diteliti, kajian yang secara khusus membahas pengaruh variasi sudut sudu terhadap kinerja turbin Savonius masih tergolong terbatas. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut mengenai parameter tersebut masih diperlukan untuk memperoleh konfigurasi yang mampu memberikan performa aerodinamika yang lebih optimal.

Analisis terhadap pengaruh perubahan geometri rotor memerlukan metode yang mampu merepresentasikan fenomena aerodinamika secara mendetail. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yaitu pendekatan numerik yang memungkinkan simulasi perilaku aliran fluida di sekitar rotor. Melalui metode ini, distribusi tekanan, distribusi kecepatan, serta pola aliran dapat divisualisasikan sehingga karakteristik performa turbin dapat dievaluasi dengan lebih efektif dibandingkan melalui pengujian eksperimental. Selain menghasilkan analisis yang komprehensif, simulasi CFD juga mempermudah proses evaluasi berbagai alternatif desain dan kondisi operasi sebelum tahap fabrikasi dilaksanakan. Dengan demikian, waktu pengembangan serta biaya penelitian dapat ditekan tanpa mengurangi kualitas hasil analisis [17], [18].

Berdasarkan hasil telaah terhadap berbagai penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa optimasi geometri rotor yang dikombinasikan dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) mampu memberikan peningkatan terhadap performa turbin angin Savonius. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi *overlap ratio*, modifikasi bentuk sudu, maupun penggunaan *wind deflector* sebagai upaya meningkatkan kinerja turbin. Sementara itu, kajian yang secara khusus membahas pengaruh variasi sudut sudu terhadap karakteristik aerodinamika serta parameter performa, seperti *coefficient of power* (C_p) dan *coefficient of moment* (C_m), pada turbin angin Savonius *single stage* masih relatif terbatas. Oleh sebab itu, penelitian ini difokuskan pada analisis variasi sudut sudu menggunakan metode CFD untuk mengidentifikasi konfigurasi yang mampu menghasilkan performa turbin paling optimal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut sudu terhadap karakteristik kinerja turbin angin Savonius *single stage* melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Variasi sudut sudu yang dianalisis terdiri atas 0° , 30° , dan 60° , dengan kondisi operasi pada kecepatan angin 2,5 m/s dan 3,5 m/s serta *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 0,5 dan 0,81. Evaluasi kinerja dilakukan berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu *coefficient of power* (C_p), *coefficient of moment* (C_m), distribusi tekanan, distribusi kecepatan, serta pola aliran fluida di sekitar rotor. Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh konfigurasi sudut sudu yang

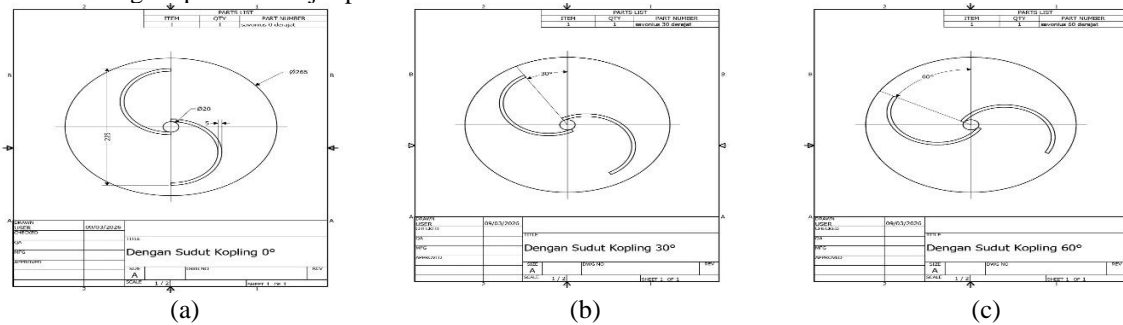
paling efektif dalam meningkatkan karakteristik aerodinamika dan performa turbin Savonius, sehingga hasilnya dapat menjadi referensi dalam pengembangan turbin angin yang dioperasikan pada wilayah dengan potensi kecepatan angin rendah.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk menganalisis pengaruh variasi sudut kopling terhadap karakteristik performa turbin angin Savonius *single stage* tipe S. Tahap awal penelitian diawali dengan pembuatan model geometri turbin menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2026. Selanjutnya, model tersebut dianalisis melalui simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent 2023 untuk mengevaluasi karakteristik aliran fluida di sekitar rotor. Penggunaan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) memungkinkan proses pemodelan dilakukan secara sistematis dengan tingkat ketelitian yang tinggi, sehingga geometri yang dihasilkan mampu merepresentasikan kondisi sebenarnya dan menjadi dasar yang andal dalam pelaksanaan simulasi CFD guna memperoleh hasil analisis yang lebih akurat dan representatif [19], [20].

Geometri Turbin

Objek penelitian yang digunakan adalah turbin angin Savonius *single stage* tipe S dengan konfigurasi rotor dua sudu (*two-bladed rotor*). Variabel penelitian difokuskan pada variasi sudut kopling yang terdiri atas 0°, 30°, dan 60°. Ketiga variasi tersebut dipilih untuk menganalisis pengaruh perubahan konfigurasi rotor terhadap karakteristik aliran fluida serta performa aerodinamika turbin. Geometri turbin yang digunakan sebagai model dalam simulasi numerik ditampilkan pada Gambar 1 sebagai representasi objek penelitian.



Gambar 1. Geometri turbin Savonius *single stage* tipe S dengan variasi sudut kopling (a) 0°, (b) 30°, dan (c) 60°

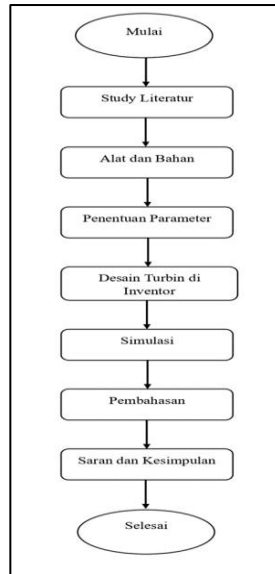
Spesifikasi geometri turbin yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi geometri turbin Savonius

Parameter	Nilai
Profil Savonius	Tipe S
Diameter rotor	225 mm
Tebal sudu	5 mm
Jarak antar sudu	20 mm
Jarak antar rotor	134 mm

Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai energi angin, karakteristik turbin angin Savonius, serta penerapan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sebagai landasan teoritis. Selanjutnya, dilakukan pemodelan geometri turbin menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor Professional 2026. Model yang telah dibuat kemudian digunakan sebagai input pada proses simulasi numerik di ANSYS Fluent 2023 untuk menganalisis karakteristik aliran fluida di sekitar rotor. Data yang diperoleh dari hasil simulasi selanjutnya diolah dan dianalisis untuk menentukan nilai *coefficient of power* (C_p) dan *coefficient of moment* (C_m). Kedua parameter tersebut dijadikan indikator utama dalam mengevaluasi pengaruh variasi sudut kopling terhadap performa turbin angin Savonius [21], [22]. Rangkaian tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.

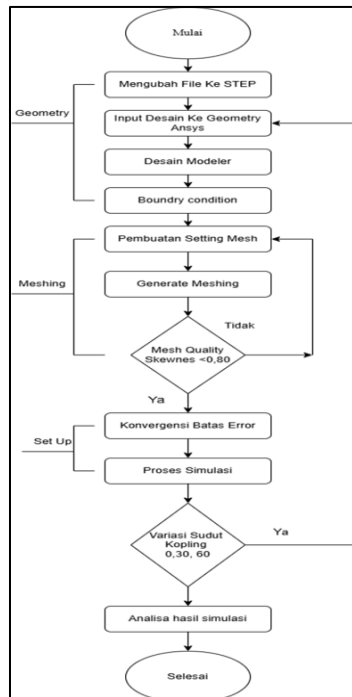


Gambar 2. Diagram alir penelitian

Pemodelan dan Simulasi CFD

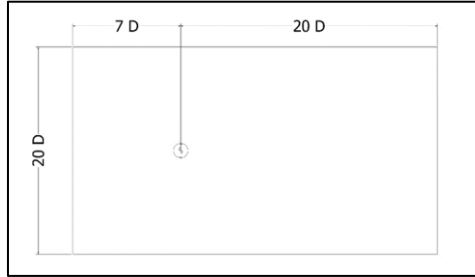
Simulasi numerik pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent 2023 dengan pendekatan dua dimensi (2D). Analisis dilakukan melalui metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memprediksi karakteristik aliran fluida yang terjadi di sekitar rotor turbin secara numerik. Penerapan metode ini memungkinkan evaluasi performa aerodinamika dilakukan secara lebih efisien sehingga kebutuhan terhadap pengujian eksperimental dapat dikurangi. Proses simulasi meliputi beberapa tahapan, yaitu pembuatan model geometri, proses *meshing*, penentuan sifat-sifat fluida, penerapan *boundary condition*, inisialisasi simulasi, proses perhitungan numerik (*running calculation*), serta analisis hasil melalui tahapan *post-processing* [23].

Model turbulensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah *k- ω Shear Stress Transport* (SST). Pemilihan model tersebut didasarkan pada kemampuannya dalam memprediksi karakteristik aliran secara akurat, baik pada daerah yang berada di dekat permukaan dinding (*near-wall region*) maupun pada daerah aliran bebas (*free-stream region*). Keunggulan tersebut menjadikan model turbulensi *k- ω SST* sebagai salah satu model yang banyak diterapkan dalam simulasi aerodinamika, terutama untuk menganalisis performa turbin angin sumbu vertikal. Rangkaian tahapan simulasi CFD yang diterapkan pada penelitian ini disajikan secara lengkap pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir simulasi CFD

Domain simulasi yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Domain simulasi CFD yang digunakan pada penelitian

Kondisi Batas Simulasi

Pada simulasi ini, udara digunakan sebagai fluida kerja dengan asumsi bahwa sifat-sifat fisisnya tetap konstan selama proses analisis berlangsung. Simulasi numerik dilakukan pada dua kondisi kecepatan angin, yaitu 2,5 m/s dan 3,5 m/s. Seluruh kondisi batas (boundary condition) ditetapkan sedemikian rupa agar dapat merepresentasikan kondisi operasional turbin angin pada wilayah yang memiliki kecepatan angin relatif rendah. Adapun parameter boundary condition yang digunakan dalam proses simulasi dirangkum secara rinci pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter *boundary condition* simulasi CFD

Parameter	Nilai
Fluida	Udara
Massa jenis udara	1,225 kg/m ³
Viskositas dinamis	1,7894 × 10 ⁻³ kg/m·s
Temperatur	30 °C
Velocity inlet	2,5 m/s dan 3,5 m/s
Pressure outlet	0 Pa
Model turbulensi	k- ω SST

Variasi Simulasi

Variabel yang dianalisis dalam penelitian ini terdiri atas sudut kopling rotor, kecepatan angin, dan *Tip Speed Ratio* (TSR). Variasi sudut kopling ditetapkan dalam tiga konfigurasi, yaitu 0°, 30°, dan 60°. Simulasi numerik selanjutnya dilakukan pada dua kondisi kecepatan angin, masing-masing sebesar 2,5 m/s dan 3,5 m/s, dengan nilai TSR yang digunakan yaitu 0,5 dan 0,81. Kombinasi dari seluruh variasi parameter tersebut menghasilkan 12 skenario simulasi yang selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi serta membandingkan karakteristik kinerja turbin angin Savonius pada setiap kondisi operasi yang ditinjau.

Tabel 3. Variasi simulasi penelitian

Sudut Kopling (°)	Kecepatan Angin (m/s)	TSR
0	2,5	0,5
0	2,5	0,81
0	3,5	0,5
0	3,5	0,81
30	2,5	0,5
30	2,5	0,81
30	3,5	0,5
30	3,5	0,81
60	2,5	0,5
60	2,5	0,81
60	3,5	0,5
60	3,5	0,81

Parameter Kinerja Turbin

Kinerja turbin dievaluasi menggunakan parameter *Tip Speed Ratio* (TSR), *Coefficient of Power* (Cp), dan *Coefficient of Moment* (Cm). Nilai TSR menunjukkan perbandingan antara kecepatan ujung sudu terhadap kecepatan angin bebas, sedangkan Cp dan Cm digunakan untuk mengevaluasi kemampuan turbin dalam menghasilkan daya dan torsi [24], [25]. Persamaan TSR ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$TSR = \omega R / V$$

dengan (ω) merupakan kecepatan sudut rotor (rad/s), (R) merupakan jari-jari rotor (m), dan (V) merupakan kecepatan angin (m/s).

Daya turbin dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$P = T\omega$$

dengan (P) merupakan daya turbin (W), (T) merupakan torsi rotor (N·m), dan (ω) merupakan kecepatan sudut rotor (rad/s).

Nilai coefficient of power dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

dengan (ρ) merupakan massa jenis udara (kg/m^3), (A) merupakan luas sapuan rotor (m^2), dan (V) merupakan kecepatan angin (m/s).

Nilai *coefficient of moment* dihitung menggunakan Persamaan (4).

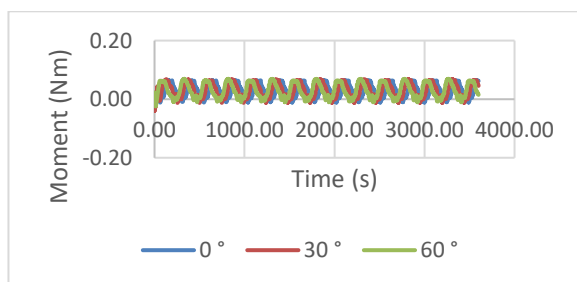
$$C_m = \frac{T}{0.5 \rho A R V^2}$$

dengan (T) merupakan torsi rotor (N·m) dan (R) merupakan jari-jari rotor (m).

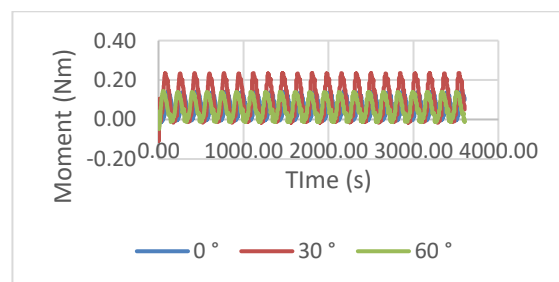
Nilai C_p dan C_m yang diperoleh dari setiap variasi simulasi kemudian dibandingkan untuk menentukan konfigurasi sudut kopling yang menghasilkan performa optimum pada turbin angin Savonius *single-stage* tipe S.

Hasil Dan Pembahasan

Grafik hubungan antara momen terhadap waktu digunakan untuk menganalisis karakteristik torsi yang dihasilkan oleh rotor selama proses simulasi berlangsung. Nilai momen yang diperoleh mencerminkan perubahan gaya aerodinamika yang bekerja pada sudu sebagai akibat interaksi antara rotor dan aliran udara di sekitarnya. Pengambilan data momen dilakukan setelah kondisi aliran mencapai keadaan stabil (*steady state*), sehingga hasil yang diperoleh mampu menggambarkan karakteristik performa rotor secara lebih representatif dan akurat.



Gambar 5. Grafik moment terhadap waktu TSR 0,81 pada 2,5 m/s



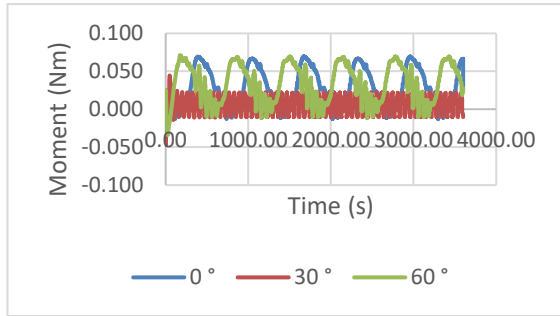
Gambar 6. Grafik moment terhadap waktu TSR 0,81 pada 3,5 m/s

Gambar 5 menyajikan grafik hubungan antara momen dan waktu pada kondisi *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,81 dengan kecepatan angin sebesar 2,5 m/s. Berdasarkan grafik tersebut, seluruh variasi sudut kopling menunjukkan pola fluktuasi momen yang cenderung stabil dan berulang selama proses simulasi. Pola tersebut mengindikasikan bahwa rotor telah mencapai kondisi operasi yang stabil, sehingga data momen yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kinerja turbin.

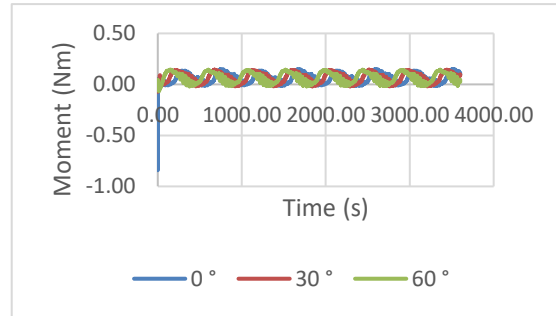
Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi sudut kopling 60° menghasilkan nilai rata-rata momen tertinggi, yaitu sebesar 0,02989 Nm. Selanjutnya, sudut kopling 30° menghasilkan rata-rata momen sebesar 0,02967 Nm, sedangkan konfigurasi 0° memberikan nilai rata-rata terendah, yaitu 0,02808 Nm. Meskipun terdapat perbedaan nilai momen pada setiap variasi sudut kopling, selisih yang diperoleh relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan sudut kopling belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa rotor pada kondisi operasi dengan TSR 0,81 dan kecepatan angin 2,5 m/s. Namun demikian, konfigurasi sudut kopling 60° tetap menunjukkan kinerja yang paling baik karena mampu menghasilkan nilai momen rata-rata tertinggi dibandingkan dengan dua variasi lainnya.

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara moment terhadap waktu pada TSR 0,81 dengan kecepatan angin 3,5 m/s. Grafik menunjukkan bahwa fluktuasi momen pada kondisi tersebut memiliki amplitudo yang lebih besar dibandingkan dengan seluruh variasi simulasi lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kombinasi antara kecepatan angin dan nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) yang digunakan mampu meningkatkan interaksi aerodinamika antara aliran udara dan rotor, sehingga menghasilkan torsi yang lebih tinggi.

Berdasarkan hasil simulasi, variasi sudut kopling 30° menghasilkan nilai rata-rata momen terbesar, yaitu sebesar $0,09877$ Nm. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi sudut kopling 60° yang menghasilkan momen rata-rata sebesar $0,06255$ Nm maupun sudut kopling 0° sebesar $0,05813$ Nm. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi sudut kopling 30° mampu menciptakan distribusi tekanan dan gaya aerodinamika yang lebih efektif pada permukaan rotor. Kondisi tersebut meningkatkan kemampuan rotor dalam memanfaatkan energi kinetik angin sehingga proses konversinya menjadi energi mekanik berlangsung lebih optimal dibandingkan konfigurasi lainnya. Oleh karena itu, berdasarkan nilai momen yang dihasilkan, konfigurasi sudut kopling 30° pada kondisi TSR $0,81$ dan kecepatan angin $3,5$ m/s merupakan konfigurasi dengan performa paling baik pada penelitian ini.



Gambar 7. Grafik moment terhadap waktu TSR 0,5 pada 2,5 m/s



Gambar 8. Grafik moment terhadap waktu TSR 0,5 pada 3,5 m/s

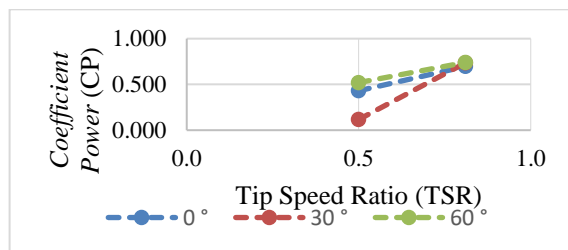
Gambar 7 menyajikan grafik hubungan antara momen terhadap waktu pada kondisi *Tip Speed Ratio* (TSR) $0,5$ dengan kecepatan angin $2,5$ m/s untuk tiga variasi sudut kopling, yaitu 0° , 30° , dan 60° . Berdasarkan hasil simulasi, nilai momen yang dihasilkan menunjukkan pola fluktuasi periodik selama rotor berputar. Fluktuasi tersebut terjadi akibat perubahan orientasi sudu terhadap arah datangnya aliran angin, yang menyebabkan distribusi gaya aerodinamika pada permukaan rotor berubah secara terus-menerus selama proses rotasi.

Hasil analisis menunjukkan bahwa konfigurasi sudut kopling 60° menghasilkan nilai rata-rata momen tertinggi, yaitu sebesar $0,03398$ Nm. Sementara itu, konfigurasi sudut kopling 0° dan 30° masing-masing menghasilkan nilai rata-rata momen sebesar $0,02821$ Nm dan $0,00768$ Nm. Nilai momen yang lebih besar pada sudut kopling 60° mengindikasikan bahwa konfigurasi tersebut mampu menghasilkan torsi yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan sudut kopling sebesar 60° memberikan karakteristik interaksi aliran udara yang lebih optimal pada rotor, sehingga proses konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik dapat berlangsung dengan lebih efektif.

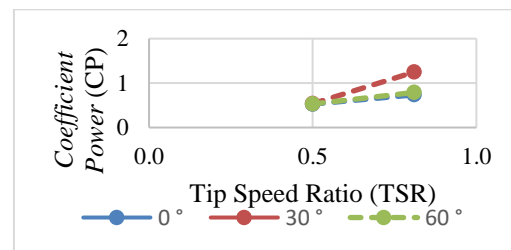
Gambar 8 menyajikan grafik hubungan antara momen terhadap waktu pada kondisi *Tip Speed Ratio* (TSR) $0,5$ dengan kecepatan angin $3,5$ m/s. Apabila dibandingkan dengan kondisi kecepatan angin $2,5$ m/s, fluktuasi momen yang dihasilkan pada kondisi ini memiliki amplitudo yang lebih besar. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin menyebabkan energi kinetik yang diterima rotor semakin besar, sehingga torsi yang dihasilkan juga mengalami peningkatan.

Berdasarkan hasil simulasi, konfigurasi sudut kopling 30° menghasilkan nilai rata-rata momen tertinggi, yaitu sebesar $0,06884$ Nm. Nilai tersebut sedikit lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi sudut kopling 60° yang menghasilkan rata-rata momen sebesar $0,06798$ Nm maupun sudut kopling 0° sebesar $0,06742$ Nm. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa sudut kopling 30° mampu menghasilkan distribusi gaya aerodinamika yang lebih efektif pada permukaan rotor, sehingga torsi yang dihasilkan menjadi lebih tinggi dibandingkan konfigurasi lainnya. Selain itu, peningkatan nilai momen pada seluruh variasi sudut kopling menunjukkan bahwa kecepatan angin merupakan salah satu faktor yang memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja turbin angin Savonius.

Selain dianalisis berdasarkan nilai momen, performa turbin angin Savonius juga dievaluasi melalui parameter *coefficient of power* (C_p). Parameter ini menggambarkan kemampuan turbin dalam mengubah energi kinetik yang terkandung dalam aliran angin menjadi daya mekanik pada poros rotor. Oleh karena itu, analisis nilai C_p dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi sudut kopling dan *Tip Speed Ratio* (TSR) terhadap efisiensi konversi energi yang dihasilkan oleh turbin.



Gambar 9. Grafik *Coefficient Power* (C_p) pada Kecepatan Angin $2,5$ m/s

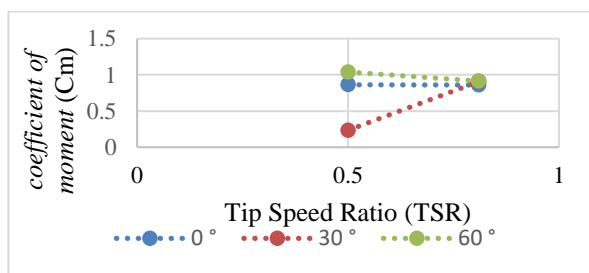


Gambar 10. Grafik *Coefficient Power* (C_p) pada Kecepatan Angin $3,5$ m/s

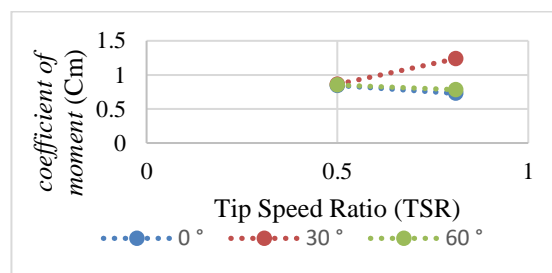
Gambar 9 menyajikan hubungan antara *Tip Speed Ratio* (TSR) dan *Coefficient of Power* (Cp) pada kondisi kecepatan angin 2,5 m/s. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa nilai Cp mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya nilai TSR dari 0,5 menjadi 0,81 pada seluruh variasi sudut kopling yang diuji. Pada kondisi TSR sebesar 0,5, konfigurasi sudut kopling 60° menghasilkan nilai Cp tertinggi, yaitu sebesar 0,52, sedangkan nilai terendah diperoleh pada sudut kopling 30° dengan Cp sebesar 0,12. Ketika nilai TSR ditingkatkan menjadi 0,81, konfigurasi sudut kopling 60° tetap menunjukkan performa terbaik dengan menghasilkan nilai Cp sebesar 0,74. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan *Tip Speed Ratio* berpengaruh positif terhadap kemampuan turbin dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik, sehingga efisiensi konversi energi yang dihasilkan menjadi lebih tinggi.

Gambar 10 menyajikan hubungan antara *Tip Speed Ratio* (TSR) dan *coefficient of power* (Cp) pada kondisi kecepatan angin 3,5 m/s. Berdasarkan grafik, terlihat bahwa peningkatan nilai TSR diikuti oleh kenaikan nilai Cp pada seluruh variasi sudut kopling yang dianalisis. Pada kondisi TSR sebesar 0,5, ketiga konfigurasi sudut kopling menghasilkan nilai Cp yang relatif serupa, yaitu berada di kisaran 0,53. Namun, ketika TSR meningkat menjadi 0,81, terjadi peningkatan nilai Cp yang lebih nyata, terutama pada konfigurasi sudut kopling 30° yang menghasilkan nilai tertinggi sebesar 1,25. Temuan ini menunjukkan bahwa konfigurasi sudut kopling 30° memiliki kemampuan paling baik dalam memanfaatkan energi angin menjadi daya mekanik pada kondisi kecepatan angin 3,5 m/s.

Selain menggunakan parameter *coefficient of power* (Cp), evaluasi kinerja turbin angin Savonius juga dilakukan melalui analisis *coefficient of moment* (Cm). Parameter ini mencerminkan kemampuan rotor dalam menghasilkan torsi sebagai akibat interaksi aerodinamika antara sudu dan aliran udara yang mengenainya. Oleh karena itu, analisis nilai Cm dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi sudut kopling dan *Tip Speed Ratio* (TSR) terhadap karakteristik torsi yang dihasilkan oleh turbin.



Gambar 11 Grafik *Coefficient Moment* (Cm) pada Kecepatan Angin 2,5 m/s

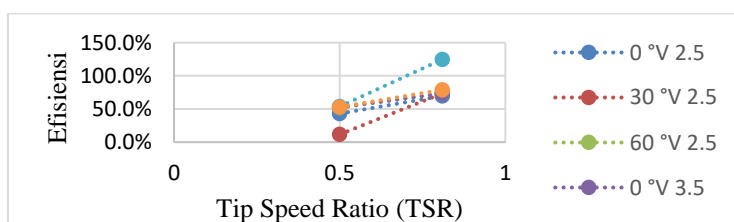


Gambar 12. Grafik *Coefficient Moment* (Cm) pada Kecepatan Angin 3,5 m/s

Gambar 11 menyajikan hubungan antara *Tip Speed Ratio* (TSR) dan *coefficient of moment* (Cm) pada kondisi kecepatan angin 2,5 m/s. Berdasarkan grafik, pada TSR sebesar 0,5 nilai Cm tertinggi dihasilkan oleh konfigurasi sudut kopling 60°, yaitu sebesar 1,04, sedangkan nilai terendah diperoleh pada sudut kopling 30° dengan nilai 0,24. Ketika nilai TSR meningkat menjadi 0,81, nilai Cm pada seluruh variasi sudut kopling menunjukkan kecenderungan yang semakin seragam, dengan rentang antara 0,86 hingga 0,91. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan *Tip Speed Ratio* memberikan pengaruh positif terhadap kemampuan rotor dalam menghasilkan torsi. Pengaruh tersebut terlihat paling nyata pada konfigurasi sudut kopling 30°, yang mengalami peningkatan nilai Cm lebih besar dibandingkan kondisi sebelumnya.

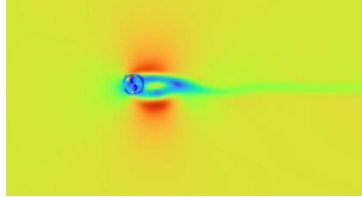
Gambar 12 menyajikan hubungan antara *Tip Speed Ratio* (TSR) dan *coefficient of moment* (Cm) pada kondisi kecepatan angin 3,5 m/s. Berdasarkan hasil simulasi, nilai Cm pada konfigurasi sudut kopling 0° dan 60° menunjukkan sedikit penurunan ketika nilai TSR meningkat dari 0,5 menjadi 0,81. Berbeda dengan kedua konfigurasi tersebut, sudut kopling 30° mengalami peningkatan nilai Cm yang cukup signifikan, yaitu dari 0,86 menjadi 1,24. Nilai tersebut merupakan nilai Cm tertinggi yang diperoleh selama penelitian, sehingga mengindikasikan bahwa konfigurasi sudut kopling 30° memiliki kemampuan paling baik dalam menghasilkan torsi pada kondisi kecepatan angin 3,5 m/s.

Analisis terhadap *coefficient of power* (Cp) dan *coefficient of moment* (Cm) memberikan gambaran mengenai kemampuan turbin dalam menghasilkan daya serta torsi selama proses konversi energi. Namun, untuk memperoleh evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kinerja turbin, diperlukan analisis efisiensi. Parameter efisiensi digunakan untuk menilai seberapa optimal energi kinetik angin dapat dimanfaatkan dan dikonversi menjadi energi mekanik pada setiap kombinasi variasi sudut kopling dan *Tip Speed Ratio* (TSR).

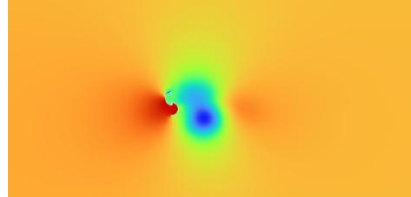


Gambar 13. Grafik Efisiensi Keseluruhan Turbin

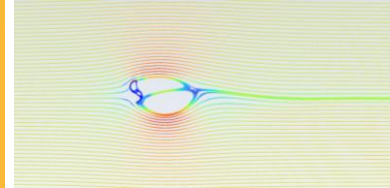
Gambar 13 menyajikan hubungan antara *Tip Speed Ratio* (TSR) dan efisiensi turbin pada berbagai variasi sudut kopling serta kecepatan angin. Berdasarkan grafik, efisiensi turbin secara umum menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya nilai TSR dari 0,5 menjadi 0,81 pada seluruh konfigurasi yang dianalisis. Pada kondisi kecepatan angin 2,5 m/s, efisiensi tertinggi dicapai oleh konfigurasi sudut kopling 60° dengan nilai sebesar 74,0%. Sementara itu, pada kecepatan angin 3,5 m/s, nilai efisiensi maksimum diperoleh pada sudut kopling 30°, yaitu sebesar 124,8%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi sudut kopling dan *Tip Speed Ratio* (TSR) memberikan pengaruh terhadap kemampuan turbin dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Dari seluruh kondisi simulasi yang dilakukan, konfigurasi sudut kopling 30° pada TSR 0,81 dengan kecepatan angin 3,5 m/s menghasilkan performa paling optimal. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan nilai TSR yang dipadukan dengan pengaturan sudut kopling yang tepat dapat meningkatkan kemampuan turbin dalam mengekstraksi energi dari aliran angin. Untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme aerodinamika yang menyebabkan perbedaan performa pada setiap konfigurasi, analisis selanjutnya difokuskan pada distribusi kecepatan aliran (*velocity contour*), distribusi tekanan (*pressure contour*), serta pola aliran udara (*streamline*) di sekitar rotor, khususnya pada kondisi yang menghasilkan performa terbaik.



Gambar 14. *Velocity Contour* pada TSR 0,81 Sudut 30



Gambar 15. *Pressure Contour* pada TSR 0,81 Sudut 30



Gambar 16. *Streamline* pada TSR 0,81 Sudut 30

Gambar 14 menyajikan kontur distribusi kecepatan aliran udara di sekitar rotor turbin angin Savonius pada kondisi *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,81 dengan konfigurasi sudut kopling 30°. Berdasarkan hasil simulasi, area yang didominasi warna kuning hingga hijau merepresentasikan daerah dengan kecepatan aliran yang relatif normal, sedangkan zona berwarna merah hingga oranye menunjukkan terjadinya peningkatan kecepatan aliran akibat percepatan fluida ketika melewati bagian sekitar rotor. Di sisi hilir (*downstream*) rotor tampak daerah berwarna biru yang mengindikasikan penurunan kecepatan aliran atau *wake flow*. Fenomena tersebut terjadi karena sebagian energi kinetik angin telah diekstraksi oleh rotor dan dikonversi menjadi torsi serta daya mekanik, sehingga kecepatan aliran udara setelah melewati rotor mengalami penurunan.

Gambar 15 menunjukkan distribusi tekanan aliran udara di sekitar rotor turbin Savonius pada TSR 0,81 dan sudut kopling 30°. Warna merah menunjukkan daerah dengan tekanan lebih tinggi, sedangkan warna biru menunjukkan daerah dengan tekanan lebih rendah. Perbedaan tekanan di sekitar rotor menghasilkan gaya aerodinamis yang menyebabkan rotor berputar dan menghasilkan torsi. Selain itu, terlihat daerah tekanan rendah di belakang rotor yang menunjukkan terbentuknya *wake flow* akibat interaksi aliran udara dengan rotor.

Gambar 16 menyajikan pola aliran udara (*streamline*) di sekitar rotor turbin angin Savonius pada kondisi *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,81 dengan konfigurasi sudut kopling 30°. Berdasarkan hasil simulasi, aliran udara mengalami perubahan arah ketika melewati rotor, kemudian membentuk daerah *wake flow* pada bagian hilir (*downstream*) rotor. Terbentuknya daerah tersebut mengindikasikan terjadinya penurunan energi aliran karena sebagian energi kinetik angin telah diserap oleh rotor dan dikonversi menjadi energi mekanik. Selain itu, pola *streamline* yang terbentuk memperlihatkan interaksi aerodinamika yang berlangsung secara efektif antara aliran udara dan permukaan rotor, sehingga mampu mendukung peningkatan kinerja turbin dalam proses konversi energi.

Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dapat disimpulkan bahwa variasi sudut kopling memberikan pengaruh terhadap karakteristik kinerja turbin angin Savonius *single stage* tipe S. Secara umum, peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) dari 0,5 menjadi 0,81 diikuti oleh kenaikan nilai *coefficient of power* (C_p), *coefficient of moment* (C_m), serta efisiensi turbin pada seluruh konfigurasi yang dianalisis. Pada kondisi kecepatan angin 2,5 m/s, konfigurasi sudut kopling 60° menunjukkan performa terbaik dengan menghasilkan nilai C_p sebesar 0,74 dan C_m sebesar 0,91. Sementara itu, pada kecepatan angin 3,5 m/s, kinerja optimum dicapai oleh konfigurasi sudut kopling 30° pada TSR 0,81, yang menghasilkan nilai C_p sebesar 1,25, C_m sebesar 1,24, serta efisiensi tertinggi sebesar 124,8%.

Hasil analisis aerodinamika melalui kontur kecepatan (*velocity contour*), kontur tekanan (*pressure contour*), dan pola aliran (*streamline*) menunjukkan bahwa konfigurasi sudut kopling 30° mampu menghasilkan distribusi kecepatan dan tekanan yang lebih efektif di sekitar rotor. Perbedaan tekanan yang lebih besar antara sisi depan dan sisi belakang rotor, disertai terbentuknya daerah *wake flow* yang jelas pada bagian hilir, menunjukkan bahwa proses ekstraksi energi dari aliran angin berlangsung secara lebih optimal. Kondisi tersebut meningkatkan

kemampuan rotor dalam menghasilkan torsi sehingga berkontribusi terhadap peningkatan performa turbin secara keseluruhan.

Berdasarkan seluruh hasil yang diperoleh, konfigurasi sudut kopling 30° pada kondisi TSR 0,81 dan kecepatan angin 3,5 m/s dapat diidentifikasi sebagai konfigurasi operasi yang memberikan performa terbaik dalam penelitian ini. Temuan tersebut menunjukkan bahwa optimasi sudut kopling merupakan salah satu strategi yang berpotensi meningkatkan kinerja turbin angin Savonius, khususnya untuk aplikasi pada wilayah dengan karakteristik kecepatan angin rendah.

Daftar Pustaka

- [1] M. Bošnjakovi, "The Future of Vertical-Axis Wind Turbines : Opportunities , Challenges , and Sustainability Perspectives," pp. 1–28, 2025.
- [2] E. Chavero-navarrete, "A Systematic Review of Technological Strategies to Improve Self-Starting in H-Type Darrieus VAWT," pp. 1–41, 2025.
- [3] B. Salvador-gutierrez *et al.*, "Vertical-Axis Wind Turbines in Emerging Energy Applications (1979 – 2025): Global Trends and Technological Gaps Revealed by a Bibliometric Analysis and Review," pp. 1–31, 2025.
- [4] A. Fazylova, K. Alipbayev, A. Aden, F. Oraz, T. Iliev, and I. Stoyanov, "A Comparative Review of Vertical Axis Wind Turbine Designs : Savonius Rotor vs . Darrieus Rotor," pp. 1–29, 2025.
- [5] R. D. James, "A Machine Learning Optimized Vertical-Axis Wind Turbine," vol. 92, no. August, pp. 1–9, 2025, doi: 10.1115/1.4068443.
- [6] L. Fouest and K. Mulleners, "The dynamic stall dilemma for vertical-axis wind turbines," vol. 198, no. July, pp. 505–520, 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.07.071.
- [7] V. W. Turbines, A. C. Review, D. H. Didane, M. R. Behery, and M. Al-ghriybah, "Recent Progress in Design and Performance Analysis of," 2024.
- [8] K. Lee, A. Cruden, J. Ng, and K. Wong, "Variable designs of vertical axis wind turbines — a review," vol. 2024, no. August, pp. 1–27, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1437800.
- [9] S. Stratila and D. Glasberg, "Performance Analysis of a New Vertical Axis Turbine Design for Household Usage," vol. 14, no. 1, pp. 12536–12542, 2024.
- [10] J. Cabrera-escobar *et al.*, "CFD Simulation of a Vertical-Axis Savonius-Type Micro Wind Turbine Using Meteorological Data from an Educational Environment," pp. 1–20, 2026.
- [11] F. Ghafoorian, S. R. Mirmotahari, S. Farajyar, and M. Mehrpooya, "Performance Optimization of Savonius VAWTs Using Wind Accelerator and Guiding Rotor House for Enhanced Rooftop Urban Energy Harvesting," pp. 1–29, 2025.
- [12] S. Farajyar, F. Ghafoorian, M. Mehrpooya, and M. Asadbeigi, *CFD Investigation and Optimization on the Aerodynamic Performance of a Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Its Installation in a Hybrid Power Supply System : A Case Study in Iran*. 2023.
- [13] T. Method, T. Zhang, and S. Xu, "A Novel Wind Energy Gathering Structure for the Savonius Wind Turbine and Its Parameter Optimization Based on," 2024.
- [14] M. Mohammed, S. Sarip, and A. Aziz, "CFD-Based Performance Optimization of Overlap Ratio in Savonius Hydrokinetic Turbines for Riverine Energy Systems," vol. 122, no. July, pp. 259–264, 2025, doi: 10.3303/CET25122044.
- [15] L. Velásquez, J. Rengifo, A. Saldarriaga, and A. Rubio-clemente, "Geometric Optimization of Savonius Vertical-Axis Wind Turbines Using Full Factorial Design and Response Surface Methodology," pp. 1–19, 2025.
- [16] K. Mrigua, M. Zemamou, and M. Aggour, "Numerical Investigation of a New Modified Savonius Wind Turbines," vol. 11, no. 4, pp. 1113–1123, 2022.
- [17] N. Erizon *et al.*, "Optimizing vertical-axis wind turbine designs : A comparative CFD analysis of savonius , darrieus , and savonius-darrieus configurations," vol. 8, no. 2, pp. 211–222, 2025.
- [18] D. Glasberg, "A Numerical Analysis on the Performance and Optimization of the Savonius Wind Turbine for Agricultural Use," vol. 14, no. 1, pp. 12621–12627, 2024.
- [19] A. Fazlizan, W. K. Muzammil, and N. A. Al-khawliani, "A Review of Computational Fluid Dynamics Techniques and Methodologies in Vertical Axis Wind Turbine Development," 2025, doi: 10.32604/cmes.2025.067854.
- [20] D. F. Fletcher, V. Chaugule, L. Gomes, P. M. Young, D. Traini, and J. Soria, "On the Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling to Design Improved Dry Powder Inhalers Accepted : Pharmaceutical Research (2021) Accepted : Pharmaceutical Research (2021)," no. 2021, pp. 1–24.
- [21] A. Khasani, "Modeling And Analysis Of The Savonius Type L Wind Turbine With Variations In Geometry And Number Of Blades On Airflow Using CFD (Computational Fluid Dynamics) Method,"

- vol. 3, no. 4, pp. 167–173, 2026.
- [22] D. Devin, L. Halim, B. Made, and J. Chandra, “Journal of Mechatronics , Electrical Power , Design and CFD simulation of guide vane for multistage Savonius wind turbine,” vol. 14, no. 2, pp. 186–197, 2023.
- [23] P. Das, “Enhanced Aerodynamic Performance of Savonius Wind Turbines Through Blade Design Modifications : A CFD Study,” pp. 1–13, 2025, doi: 10.1002/we.70042.
- [24] M. Tata *et al.*, “Aerodynamic Performance Investigations of Savonius Twin-rotor Wind Turbines,” vol. 17, no. 2, pp. 442–460, 2024.
- [25] K. Nasr, “Heliyon Computational fluid dynamics investigations over conventional and modified Savonius wind turbines,” *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e16876, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16876.