

PENGARUH JUMLAH NOZZLE KONVERGEN PADA TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN ANGIN

Baihaqi Bintang Parikesit

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: baihaqibintang.20059@mhs.unesa.ac.id

Aris Ansori

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: arisansori@unesa.ac.id

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi dan upaya pengurangan emisi karbon mendorong pemanfaatan energi terbarukan, salah satunya energi angin. Namun, kecepatan angin yang relatif rendah di Indonesia menjadi kendala dalam optimalisasi kinerja turbin angin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan nosel konvergen terhadap performa turbin angin sumbu vertikal menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Simulasi dilakukan dengan variasi kecepatan angin sebesar 2 m/s, 4 m/s, dan 6 m/s serta variasi jumlah nosel sebanyak 3, 5, dan 7 nosel. Analisis difokuskan pada distribusi kecepatan dan tekanan aliran udara untuk mengetahui pengaruh konfigurasi nosel terhadap peningkatan kecepatan aliran udara menuju turbin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jumlah nosel memengaruhi percepatan aliran udara yang dihasilkan. Pada kecepatan angin rendah, seluruh konfigurasi menghasilkan kecepatan output yang relatif serupa. Namun, pada kecepatan angin yang lebih tinggi, konfigurasi 3 nosel menghasilkan kecepatan output terbesar karena hambatan aliran lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya. Sebaliknya, konfigurasi dengan jumlah nosel lebih banyak menghasilkan resistansi aliran yang lebih besar sehingga menurunkan kecepatan output. Berdasarkan hasil penelitian, konfigurasi 3 nosel memberikan performa terbaik dalam meningkatkan kecepatan aliran udara pada turbin angin sumbu vertikal.

Kata Kunci: energi angin, turbin angin sumbu vertikal, nosel konvergen, Computational Fluid Dynamics, kecepatan aliran udara

Abstract

The increasing demand for energy and efforts to reduce carbon emissions encourage the utilization of renewable energy, including wind energy. However, the relatively low wind speed in Indonesia remains a major challenge in optimizing wind turbine performance. This study aims to analyze the effect of convergent nozzles on the performance of a vertical axis wind turbine using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Simulations were conducted with wind speed variations of 2 m/s, 4 m/s, and 6 m/s, as well as nozzle configurations of 3, 5, and 7 nozzles. The analysis focused on the distribution of airflow velocity and pressure to evaluate the influence of nozzle configuration on airflow acceleration toward the turbine. The simulation results indicate that the number of nozzles significantly affects the resulting airflow acceleration. At low wind speeds, all configurations produced relatively similar output velocities. However, at higher wind speeds, the 3-nozzle configuration generated the highest output velocity due to lower flow resistance compared to the other configurations. In contrast, configurations with a greater number of nozzles produced higher flow resistance, resulting in lower output velocities. Based on the findings, the 3-nozzle configuration demonstrated the best performance in increasing airflow velocity in a vertical axis wind turbine system.

Keywords: wind energy, vertical axis wind turbine, convergent nozzle, Computational Fluid Dynamics, airflow velocity

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan perkembangan sektor industri. Indonesia merupakan salah satu negara dengan jumlah penduduk terbesar di dunia sehingga kebutuhan energi nasional juga semakin meningkat dari tahun ke tahun. Selama ini, kebutuhan energi masih didominasi oleh penggunaan bahan bakar fosil yang memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, seperti peningkatan emisi karbon dan penurunan cadangan energi fosil. Oleh karena itu,

pengembangan energi baru terbarukan menjadi salah satu solusi dalam memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pemerintah Indonesia terus mendorong pemanfaatan berbagai sumber energi terbarukan, seperti energi air, panas bumi, biomassa, matahari, dan angin.

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi cukup besar di Indonesia. Sebagai negara kepulauan yang terletak di wilayah khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi angin yang tersebar di berbagai wilayah, terutama daerah pesisir dan perbukitan. Berdasarkan data kecepatan angin rata-rata di beberapa wilayah Indonesia, kecepatan angin

berada pada kisaran 3,5–7 m/s. Namun demikian, sebagian besar wilayah memiliki karakteristik kecepatan angin yang relatif rendah dan tidak stabil sehingga menjadi tantangan dalam pemanfaatan energi angin sebagai sumber pembangkit listrik. Kondisi tersebut juga ditemukan di wilayah Desa Sekar Banyu, Kecamatan Sumber Manjing Wetan, Kabupaten Malang, yang memiliki potensi energi angin tetapi berada pada kategori kecepatan angin rendah.

Turbin angin merupakan perangkat yang digunakan untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik dan selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Pada kondisi kecepatan angin rendah dan arah angin yang berubah-ubah, turbin angin sumbu vertikal atau Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) dinilai lebih sesuai dibandingkan turbin angin sumbu horizontal. Turbin angin sumbu vertikal memiliki kemampuan menerima arah angin dari berbagai sudut tanpa memerlukan sistem pengarah angin sehingga lebih efektif digunakan pada wilayah dengan pola angin tidak stabil. Salah satu jenis turbin sumbu vertikal yang banyak digunakan adalah tipe darrieus karena memiliki efisiensi aerodinamis yang cukup baik pada kecepatan angin menengah hingga rendah.

Meskipun demikian, performa turbin angin sumbu vertikal masih dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama kecepatan aliran udara yang mengenai sudu turbin. Semakin tinggi kecepatan angin yang diterima turbin, maka semakin besar energi kinetik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Pada kondisi kecepatan angin rendah, daya yang dihasilkan turbin menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode untuk meningkatkan kecepatan aliran udara menuju turbin agar efisiensi pembangkitan energi dapat meningkat.

Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah penggunaan nosel konvergen sebagai pengarah dan pemercepat aliran udara menuju rotor turbin. Nosel konvergen bekerja dengan memperkecil luas penampang aliran sehingga kecepatan fluida meningkat sebelum mengenai sudu turbin. Penambahan nosel konvergen diharapkan mampu meningkatkan kecepatan angin efektif pada area turbin sehingga performa turbin angin sumbu vertikal menjadi lebih optimal. Selain itu, variasi jumlah dan geometri nosel diperkirakan memberikan pengaruh terhadap distribusi tekanan dan kecepatan aliran udara pada sistem turbin.

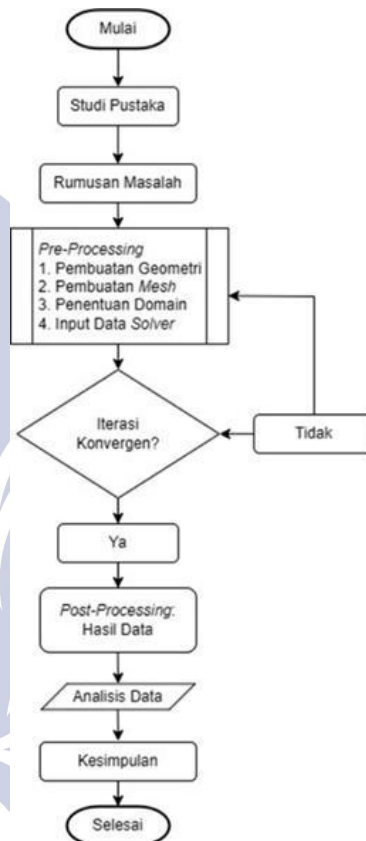
Untuk menganalisis fenomena aliran udara tersebut secara rinci, penelitian ini menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Metode CFD memungkinkan simulasi numerik terhadap perilaku aliran fluida sehingga distribusi kecepatan dan tekanan dapat dianalisis secara lebih detail tanpa harus melakukan pengujian eksperimental yang kompleks. Penggunaan simulasi CFD juga mampu memberikan visualisasi pola aliran udara pada turbin dan nosel sehingga proses optimasi desain dapat dilakukan dengan lebih efisien.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh penggunaan nosel konvergen terhadap distribusi kecepatan dan tekanan aliran udara pada turbin angin sumbu vertikal serta bagaimana pengaruh variasi jumlah nosel terhadap

performa aliran udara yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan nosel konvergen pada turbin angin sumbu vertikal menggunakan simulasi CFD serta menentukan konfigurasi jumlah nosel yang menghasilkan performa aliran udara terbaik. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan desain turbin angin yang lebih efisien dan sesuai untuk wilayah dengan karakteristik kecepatan angin rendah di Indonesia.

METODE

Flowchart Penelitian



Gambar 1 Flowchart Penelitian

Jenis Penelitian

Penelitian yang dilakukan merupakan simulasi numerik unsteady 3D untuk mengetahui aliran pada nozzle turbin sumbu vertikal.

Lokasi dan Waktu Penelitian

• Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Komputasi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya dengan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks 2022*.

• Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan mulai setelah proposal penelitian disetujui hingga seluruh proses simulasi dan analisis data selesai dilakukan.

Variabel Bebas

• Variabel Bebas

- Variasi jumlah nosel konvergen yaitu 3 nosel, 5 nosel, dan 7 nosel.

- Variasi kecepatan angin masuk sebesar 2 m/s, 4 m/s, dan 6 m/s.
- Variabel Terikat pada penelitian ini adalah : *Velocity contour*, *Pressure contour* dan Kecepatan angin output
 - Variabel Kontrol
 - Diameter luar nosel : 5,00 meter
 - Diameter dalam nosel : 1,38 meter
 - Tinggi nosel : 2,00 meter
 - Densitas udara : $1,184 \text{ kg/m}^3$
 - Viskositas udara : $1,849 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 - Temperatur udara : 293,15 K
 - Kondisi aliran : *steady*
 - Fluida kerja berupa udara

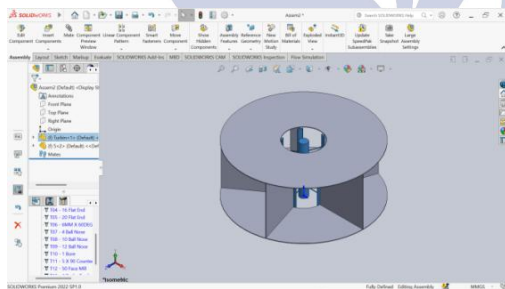
Teknik Analisa Data

Tahap Pre-Processing

Pre-processing merupakan tahap awal dalam proses pembuatan dan analisis model menggunakan metode CFD. Tahapan ini terdiri dari beberapa sub-tahapan, antara lain:

● Pembuatan geometri

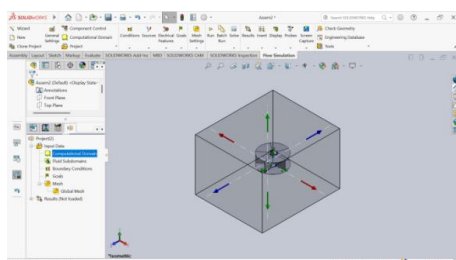
Proses pembuatan geometri dilakukan dengan menggunakan *software Solidwork 2022* untuk membuat model nozzle turbin angin sumbu vertikal.



Gambar 2 Pembuatan Geometri

● Penyetelan Simulasi

Setelah parameter simulasi ditetapkan, program akan secara otomatis membuat opsi computational domain, fluid domain, boundary condition, goals, dan Mesh.



Gambar 3 Penyetelan Simulasi

Tahap Processing

Tahap processing memproses kondisi awal untuk mencapai hasil konvergen. Jika belum konvergen, perlu perbaikan mesh dan kembali ke tahap meshing. Jika sudah konvergen, dilanjutkan ke post-processing.

Tahap Postprocessing

Tahap ini menyajikan hasil iterasi berupa data kuantitatif dan kualitatif, yang menggambarkan aliran udara dan mendukung analisis aerodinamika kendaraan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Model

Pada proses validasi, akan dibandingkan data antara hasil simulasi CFD dengan data hasil eksperimen, yaitu nilai koefisien *drag* (C_d) yang memiliki persentase error terendah serta bentuk tren grafik Koefisien Tekanan. Simulasi CFD dilakukan menggunakan beberapa model turbulensi, dilakukan juga uji *Grid Independency* untuk menentukan konfigurasi mesh yang paling optimal. Model turbulensi terbaik dipilih berdasarkan akurasi, kestabilan, dan efisiensi komputasi terhadap geometri.

- Presentase nilai error C_d dan C_p

Tabel 1 Persentase error masing-masing model turbulensi

No.	Model	Nilai C_d	Nilai C_p	Error (%)
1	Eksperimen (Vajra et al., 2021)	0.3818	0	0
2	K-Epsilon Standart	0.4733	1.007951	23.98
3	K-Epsilon Realizable	0.4733	1.007951	2.81
4	K-Epsilon RNG	0.3925	1.007672	22.36
5	K-Omega Standart	0.4671	1.020481	8.70
6	K-Omega SST	0.4150	1.008134	20.77
7	Spalart RSM	0.4382	0.998603	14.91
8	Allmaras	0.4162	1.000693	9.00
9	Laminar	0.2476	0.947523	35.15

Penentuan model turbulensi diawali dengan validasi terhadap data eksperimen Vajra et al. (2021) pada *Reynolds Number* $1,88 \times 10^6$. Untuk membandingkan nilai koefisien drag (C_D), tekanan (C_P), dan persentase error dari berbagai model turbulensi dengan data eksperimen sebagai acuan (error 0%). Model K- ϵ *Realizable* dipilih karena menunjukkan akurasi tinggi, efisiensi komputasi, serta stabilitas pada geometri kompleks nozzle turbin angin sumbu vertikal

• Grid Independence Test

Setelah menentukan model turbulensi yang sesuai, dilakukan uji *grid independence* untuk memilih mesh yang menghasilkan simulasi konvergen dan mendekati hasil eksperimen. Pengujian ini melibatkan variasi ukuran mesh guna menemukan konfigurasi optimal yang tetap efisien secara komputasi. Acuan validasi berasal dari data eksperimen Vajra et al. (2021), dengan *Reynolds Number* sebesar $1,88 \times 10^6$, untuk memastikan hasil simulasi memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

Tabel 2 hasil *grid independence test*

No	Nodes	Elemen	Nilai Cd	Eksperimen	Error (%)
1	201,577	125,434	0,431	0,414	4,1
2	201,880	125,624	0,427		3,2
3	202,184	125,812	0,425		2,7
4	202,487	126,003	0,426		2,9
5	202,790	126,136	0,427		3,1

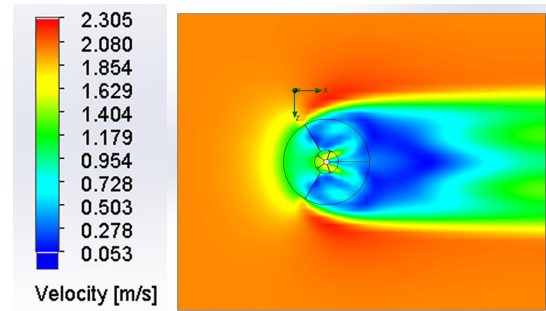
Dari hasil uji, error terkecil terhadap nilai koefisien drag (C_D) tercatat sebesar 2,8%, yang menunjukkan konvergensi terbaik. Ketika mesh dibuat lebih kasar, error meningkat secara signifikan, mengindikasikan penurunan

akurasi. Sebaliknya, saat jumlah elemen ditingkatkan melewati titik optimal, error justru naik tipis menjadi 3,0%, kemungkinan disebabkan oleh distribusi mesh yang kurang merata.

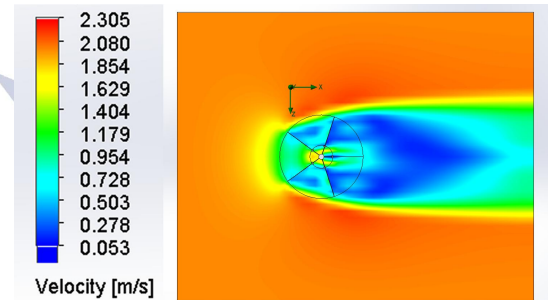
Hasil Penelitian

Velocity Contour kondisi *Steady*

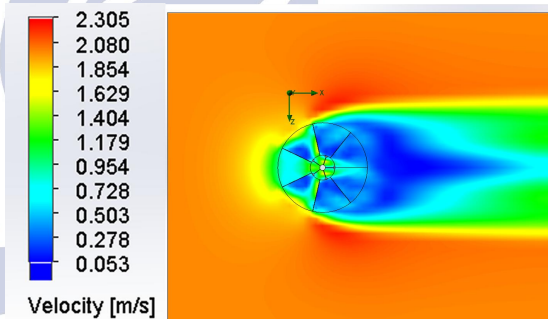
Berikut adalah hasil *velocity contour* pada model nozzle turbin angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah nozzle 3, 5, dan 7



Gambar 4 *Velocity Countour* pada Model Nozzle Turbin Angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah 3 nozzle



Gambar 5 *Velocity Countour* pada Model Nozzle Turbin Angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah 5 nozzle



Gambar 6 *Velocity Countour* pada Model Nozzle Turbin Angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah 7 nozzle

Tabel 3 hasil Kecepatan angin Output nozzle Pada 2 m/s

Jumlah Nozzle	Kec. Angin Output (m/s)
3	1,448
5	1,473
7	1,301

Tabel 4 hasil Kecepatan angin Output nozzle Pada 4 m/s

Jumlah Nozzle	Kec. Angin Output (m/s)
3	2,856
5	2,435
7	2,239

Tabel 5 hasil Kecepatan angin Output nozzle Pada 6 m/s

Jumlah Nozzle	Kec. Angin Output (m/s)
3	4,272
5	3,675
7	3,306

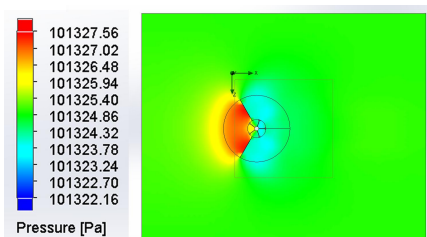
Terlihat bahwa variasi jumlah nosel pada turbin angin sumbu vertikal memengaruhi distribusi kecepatan aliran udara di sekitar turbin. Area berwarna biru pada bagian belakang turbin menunjukkan daerah dengan kecepatan aliran rendah (*velocity deficit*), yang mengindikasikan terjadinya penurunan kecepatan udara setelah melewati nosel dan sudu turbin. Variasi 3 nosel menghasilkan area defisit kecepatan yang paling kecil dibandingkan variasi lainnya, menandakan bahwa aliran udara dapat melewati turbin dengan hambatan yang lebih rendah sehingga penurunan kecepatan aliran tidak terlalu signifikan.

Terlihat bahwa konfigurasi 3 nosel mampu menjaga aliran udara tetap stabil dan terakselerasi dengan baik ketika melewati celah nosel menuju rotor turbin. Celah antar nosel yang lebih lebar menyebabkan aliran udara tetap melekat pada permukaan nosel lebih lama sebelum akhirnya mengalami separasi. Distribusi kecepatan yang lebih merata juga menyebabkan proses pemulihan aliran di bagian hilir berlangsung lebih cepat sehingga pembentukan *wake* menjadi lebih kecil.

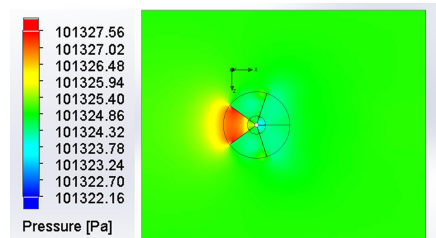
Sebaliknya, pada variasi 7 nosel terlihat area defisit kecepatan yang lebih luas di belakang turbin. Hal ini menunjukkan bahwa bertambahnya jumlah nosel menyebabkan hambatan aerodinamis semakin besar sehingga aliran udara mengalami perlambatan lebih signifikan. Celah antar nosel yang semakin sempit juga menyebabkan aliran lebih cepat mengalami separasi dan menghasilkan *wake* yang lebih panjang dibandingkan variasi lainnya.

Velocity Contour kondisi Steady

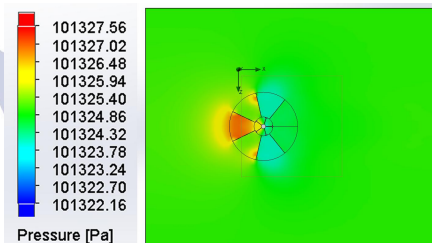
Berikut adalah hasil *pressure contour* pada model nozzle turbin angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah nozzle 3, 5, dan 7.



Gambar 7 *Pressure Countour* pada Model Nozzle Turbin Angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah 3 nozzle



Gambar 8 *Pressure Countour* pada Model Nozzle Turbin Angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah 3 nozzle



Gambar 9 *Pressure Countour* pada Model Nozzle Turbin Angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah 3 nozzle

Dari hasil pengamatan, terlihat bahwa perbedaan *pressure contour* pada variasi jumlah nosel 3, 5, dan 7 tidak menunjukkan perubahan yang terlalu ekstrem, namun distribusi tekanan di sekitar turbin mengalami perbedaan pada luas area stagnasi dan pola tekanan di bagian hilir turbin. Pada gambar yang diperlihatkan, konfigurasi 3 nosel menunjukkan area stagnasi yang lebih kecil pada bagian depan nosel dibandingkan variasi lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa konfigurasi tersebut memiliki hambatan aliran yang lebih rendah sehingga aliran udara dapat bergerak lebih lancar menuju rotor turbin.

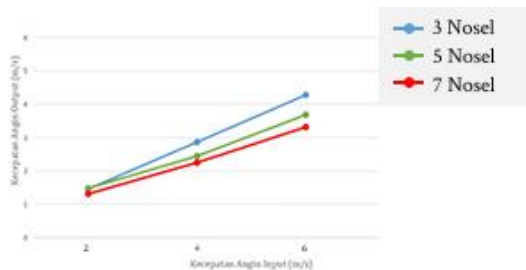
Konfigurasi 3 nosel juga menunjukkan distribusi tekanan yang lebih stabil dengan perbedaan tekanan antara sisi hulu dan hilir yang tidak terlalu besar. Kondisi tersebut menandakan bahwa aliran udara masih mampu mempertahankan energi kinetiknya setelah melewati nosel sehingga pembentukan *wake* di belakang turbin menjadi lebih kecil. Selain itu, celah antar nosel yang lebih lebar membantu menjaga aliran udara tetap melekat lebih lama pada permukaan nosel sebelum mengalami separasi aliran.

Sebaliknya, pada variasi 7 nosel terlihat area tekanan tinggi yang lebih luas pada bagian depan turbin serta daerah tekanan rendah yang lebih besar di bagian belakang turbin. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah nosel menyebabkan hambatan aerodinamis semakin besar sehingga aliran udara mengalami perlambatan dan separasi lebih

cepat. Akibatnya, terbentuk *wake region* yang lebih panjang dan distribusi tekanan menjadi kurang stabil dibandingkan konfigurasi 3 nosel.

Data Kecepatan Angin Output

Berikut ini merupakan data kecepatan angin output yang dijelaskan dalam bentuk grafik untuk melihat perubahan yang terjadi pada turbin angin sumbu vertikal dengan variasi jumlah nosel konvergen berdasarkan variasi kecepatan angin masuk.



Gambar 17 Grafik data kecepatan Angin Output pada model nozzle angin sumbu vertikal

Kecepatan angin output menggambarkan kemampuan nosel konvergen dalam mempercepat aliran udara sebelum mengenai rotor turbin. Semakin tinggi nilai kecepatan output yang dihasilkan, maka semakin besar energi kinetik aliran udara yang dapat dimanfaatkan oleh turbin angin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah nosel memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kecepatan aliran udara. Konfigurasi 3 nosel menghasilkan kecepatan output tertinggi pada hampir seluruh variasi kecepatan angin masuk. Pada kecepatan input 4 m/s dan 6 m/s, konfigurasi 3 nosel menghasilkan kecepatan output masing-masing sebesar 2,856 m/s dan 4,272 m/s. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah nosel yang lebih sedikit menghasilkan hambatan aliran yang lebih rendah sehingga proses percepatan fluida dapat berlangsung lebih optimal.

Pada konfigurasi 5 nosel, kecepatan output yang dihasilkan mengalami penurunan dibandingkan konfigurasi 3 nosel. Bertambahnya jumlah nosel menyebabkan celah antar nosel menjadi lebih sempit sehingga aliran udara mengalami perlambatan akibat meningkatnya hambatan aerodinamis. Sementara itu, konfigurasi 7 nosel menghasilkan kecepatan output terendah pada seluruh variasi kecepatan angin. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah nosel secara berlebihan dapat menyebabkan terbentuknya zona henti dan *wake region* yang lebih besar sehingga menghambat percepatan aliran udara menuju turbin.

Pada kecepatan angin rendah sebesar 2 m/s, seluruh konfigurasi nosel masih menunjukkan nilai output yang relatif berdekatan. Namun, seiring meningkatnya kecepatan angin masuk, perbedaan performa antar konfigurasi menjadi semakin jelas. Fenomena ini menunjukkan bahwa konfigurasi 3 nosel memiliki kemampuan terbaik dalam menjaga kestabilan aliran dan meminimalkan kehilangan energi akibat hambatan aliran.

Berdasarkan hasil analisis kecepatan angin output, konfigurasi 3 nosel memberikan performa terbaik pada turbin angin sumbu vertikal. Konfigurasi ini mampu menghasilkan percepatan aliran udara yang lebih optimal dengan hambatan aerodinamis yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi 5 dan 7 nosel, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi angin pada kondisi kecepatan angin rendah hingga menengah.

Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi CFD mengenai pengaruh variasi jumlah nosel konvergen terhadap performa turbin angin sumbu vertikal, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Variasi jumlah nosel memengaruhi distribusi kecepatan aliran (*velocity contour*) dan distribusi tekanan (*pressure contour*) di sekitar turbin angin sumbu vertikal. Konfigurasi 3 nosel menghasilkan distribusi kecepatan yang lebih merata, zona *wake* yang lebih kecil, serta percepatan aliran yang lebih optimal dibandingkan variasi lainnya. Celah antar nosel yang lebih lebar menyebabkan aliran udara tetap stabil dan mampu melewati turbin dengan hambatan aerodinamis yang lebih rendah.
- Penambahan jumlah nosel secara umum meningkatkan hambatan aliran di sekitar turbin. Konfigurasi 5 nosel menunjukkan distribusi tekanan yang lebih merata dengan keseimbangan yang baik antara proses ekstraksi energi dan hambatan aerodinamis. Sementara itu, konfigurasi 7 nosel menghasilkan zona stagnasi dan *wake region* yang lebih besar akibat celah antar nosel yang semakin sempit sehingga aliran udara mengalami perlambatan dan separasi lebih cepat.
- Pada kecepatan angin rendah, seluruh konfigurasi nosel menghasilkan nilai kecepatan output yang relatif berdekatan. Namun, pada kecepatan angin yang lebih tinggi, perbedaan performa antar konfigurasi menjadi semakin jelas. Konfigurasi 3 nosel menghasilkan kecepatan output tertinggi pada hampir seluruh variasi kecepatan angin karena

hambatan aliran yang lebih kecil memungkinkan proses percepatan fluida berlangsung lebih efektif.

- Konfigurasi 3 nosel terbukti sebagai konfigurasi terbaik dalam meningkatkan kecepatan aliran udara menuju rotor turbin angin sumbu vertikal. Konfigurasi ini menghasilkan percepatan aliran paling optimal dengan hambatan aerodinamis yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya. Sementara itu, konfigurasi 5 nosel memberikan keseimbangan terbaik antara percepatan aliran dan distribusi tekanan sehingga berpotensi memberikan performa aerodinamis yang lebih stabil pada kondisi angin rendah hingga menengah.

Saran

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan variasi bentuk dan sudut nosel konvergen agar dapat diperoleh informasi yang lebih rinci mengenai pengaruh geometri nosel terhadap karakteristik aliran udara dan efisiensi turbin angin.
- Penelitian berikutnya dapat menggunakan rentang kecepatan angin yang lebih luas serta mempertimbangkan kondisi aliran unsteady agar fenomena aerodinamika yang terjadi dapat dianalisis lebih mendalam dan realistis.
- Penggunaan perangkat komputer dengan spesifikasi yang lebih tinggi perlu dipertimbangkan untuk mempercepat proses simulasi CFD sehingga variasi parameter yang lebih banyak dapat dianalisis secara lebih efisien.
- Penelitian selanjutnya sebaiknya melakukan pengujian eksperimental secara langsung untuk memvalidasi hasil simulasi CFD sehingga hasil penelitian memiliki tingkat akurasi dan reliabilitas yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, F., Yanto, A., & Prihatin, M. (2019). Optimasi pembangkitan energi angin pada kecepatan rendah. Malang: Penerbit Maju.
- Adam, M., Hasan Basri, M., & Arif, R. (2019). Efisiensi dan analisis kinerja turbin angin pada berbagai kondisi topografi. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*, 12(2), 45–53.
- Adistia, R., Pratama, H., & Nurhadi, D. (2020). Pengaruh kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin sumbu vertikal. *Jurnal Teknik Mesin*, 8(1), 22–29.
- Adistia, R., Subari, A., & Haryanto, W. (2020). Perancangan turbin angin dan efisiensinya dalam pembangkit listrik tenaga bayu. Bandung: Penerbit Matahari.
- Akbar, A., Yuliana, R., & Santosa, T. (2020). Analisis CFD pemanfaatan nosel konvergen pada turbin angin sumbu vertikal. *Jurnal Teknologi Energi*, 15(4), 123–131.
- Anderson, J. D. (1995). *Computational fluid dynamics: The basics with applications*. McGraw-Hill.
- Arif, M., Rahman, T., & Fauzan, N. (2019). Pengenalan jenis turbin angin dan prinsip kerjanya. *Prosiding Seminar Nasional Energi Terbarukan*, 7, 67–74.
- Aris, M. A., Harahap, Y., & Putra, A. (2023). Desain turbin angin sumbu horizontal dan implementasinya di wilayah pesisir. *Jurnal Rekayasa Energi dan Mesin*, 10(1), 15–22.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*. McGraw-Hill Education.
- Diaurahman, D., & Siswanto, J. (2016). Analisis performa turbin angin sumbu vertikal pada kecepatan angin rendah. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 4(3), 320–327.
- Effendi, I. (2019). Pengaruh jumlah blade terhadap efisiensi turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus. *Jurnal Energi dan Manufaktur*, 11(1), 15–20.
- Fachrudin, R., & Asuti, M. (2021). Pengaruh variasi kecepatan angin terhadap daya keluaran turbin angin sumbu vertikal. *Jurnal Mekanikal*, 6(2), 100–106.
- Fauzan, A., & Widodo, S. (2021). Simulasi aliran udara pada turbin angin dengan CFD menggunakan SolidWorks. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 9(1), 45–52.
- Firdaus, A. (2022). Peran energi angin dalam pengembangan energi terbarukan di Indonesia. *Jurnal Energi Terbarukan*, 8(2), 121–128.
- Furqani, I. (2022). Pengenalan dan penggunaan SolidWorks untuk desain teknik. (Sumber publikasi tidak dicantumkan).
- Gonçalves, A. M., Silva, J. R., & Mendes, J. M. (2022). Vertical axis wind turbines as a renewable energy solution: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111987.
- Hasibuan, A. F., Santosa, S., & Prasetyo, A. (2020). Perancangan turbin angin sumbu vertikal sebagai pembangkit listrik alternatif di daerah pesisir. *Jurnal Teknik Energi*, 9(1), 1–6.
- Jamsheed, S. (2015). *Introduction to computational fluid dynamics*. (Sumber publikasi tidak dicantumkan).
- Kadang, A., & Windarta, I. (2021). Penerapan CFD dalam pengembangan desain turbin angin sumbu vertikal untuk daerah berangin rendah. *Jurnal Teknologi Energi*, 4(2), 75–83.
- Kadang, R., & Windarta, E. (2021). Kecepatan angin di Indonesia dan potensinya untuk pembangkit energi terbarukan. Denpasar: Penerbit Kita.
- Kadang, R., & Windarta, R. (2021). Potensi pemanfaatan teknologi augmentasi pada

- pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia. *Jurnal Rekayasa Energi*, 9(2), 89–96.
- Kaputra, Y., Hidayat, M., & Anwar, S. (2022). Analisis pemanfaatan energi baru dan terbarukan untuk ketahanan energi nasional. *Jurnal Energi Alternatif*, 6(1), 30–38.
- Kurniawan, R. (2016). Pemanfaatan turbin angin sebagai alternatif penghasil listrik di daerah terpencil. *Jurnal Rekayasa Energi*, 2(1), 1–8.
- Kurniawan, R. (2016). Pengaruh faktor geografis terhadap kecepatan angin di Indonesia. Surabaya: Penerbit ABC.
- Mahar, W., Suryanto, B., & Hadi, D. (2018). Skala Beaufort: Penilaian kecepatan angin untuk PLTB. Solo: Penerbit Maju Sejahtera.
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The finite volume method in computational fluid dynamics*. Springer.
- Muhajir, I., & Sinaga, S. (2021). Pengaruh hambatan fisik terhadap arah dan kecepatan angin di wilayah perkotaan. Palembang: Penerbit Maju.
- Muklis, M., Ramadhan, H., & Suprpto, H. (2018). Analisis potensi energi angin di Indonesia untuk mendukung program EBT. *Jurnal Teknologi Energi*, 5(3), 99–106.
- Murniati, D. (2022). Tantangan pemenuhan kebutuhan energi di Indonesia dalam konteks pertumbuhan penduduk. *Jurnal Sosial Ekonomi Energi*, 3(2), 55–62.
- Murniati, S. (2022). Karakteristik angin dan pemanfaatannya sebagai energi terbarukan. Jakarta: Penerbit XYZ.
- Nallasamy, M. (1987). Turbulence models and their applications to the prediction of internal flows: A review. NASA TP 86869.
- Ningrum, S. (2020). Simulasi sistem dan pemodelan komputer. (Sumber publikasi tidak dicantumkan).
- Nurdiyanto, D. (2020). Potensi energi angin dalam konversi energi terbarukan. Yogyakarta: Penerbit Delta.
- Nusyirwan, F. (2019). Daya angin dan potensinya di Indonesia. Medan: Penerbit Pintar.
- Pranoto, Y., Astuti, R., & Nurhayati, E. (2014). Rancang bangun turbin angin sumbu vertikal untuk daerah berkecepatan angin rendah. *Jurnal Mekanika*, 3(1), 12–18.
- Putra, R. D., & Hermawan, A. (2019). Pengaruh nosel konvergen terhadap kecepatan aliran pada turbin angin vertikal. *Jurnal Teknik Mesin dan Energi*, 7(2), 88–94.
- Sukmana, D., Wijaya, A., & Nugroho, B. (2021). Sistem konversi energi angin menjadi listrik dengan rotor turbin. *Jurnal Teknik Energi*, 5(2), 40–47.
- Surdia, A., & Shinroku, T. (1999). Perhitungan daya angin berdasarkan kecepatan angin dan luas penampang turbin. Tokyo: Penerbit Hiroshi.
- Syahputra, D. (2022). Pemodelan 3D dan simulasi teknik dengan SolidWorks. (Sumber publikasi tidak dicantumkan).
- Teja, R. (2017). Perbandingan performa rotor Darrieus dan Savonius pada turbin angin sumbu vertikal. *Jurnal Rancang Bangun Mesin*, 6(1), 20–27.
- Tuakia, Y. (2008). *Dasar-dasar computational fluid dynamics*. (Sumber publikasi tidak dicantumkan).
- Utama, H., Nugroho, R., & Wahyudi, D. (2021). Pemilihan tipe turbin angin sumbu vertikal berdasarkan kondisi geografis. *Jurnal Energi Hijau*, 2(3), 101–107.
- Wilcox, D. C. (1994). *Turbulence modeling for CFD* (2nd ed.). DCW Industries.
- Yakhot, V., & Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. *Journal of Scientific Computing*, 1(1), 3–5.