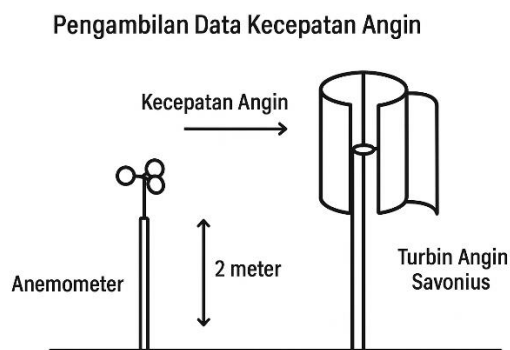


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengambilan Data Kecepatan Angin

Pada studi ini, pengumpulan data kecepatan angin merupakan langkah krusial dalam menentukan parameter utama yang diperlukan untuk menguji performa turbin angin tipe Savonius. Penggunaan anemometer digital yang telah dikalibrasi secara akurat menjadi alat utama dalam pengukuran langsung di lapangan. Pengukuran dilakukan di area terbuka tanpa hambatan seperti bangunan atau vegetasi, sehingga aliran angin yang diukur mencerminkan kondisi alami dan minim turbulensi yang dapat mempengaruhi hasil.



Gambar 4.1 Skema Pengambilan Data Kecepatan Angin

Penempatan anemometer dilakukan pada ketinggian yang setara dengan posisi poros turbin, biasanya sekitar 2 meter dari permukaan tanah. Tujuan dari penempatan ini adalah untuk memastikan bahwa data kecepatan angin yang diperoleh benar-benar merepresentasikan kondisi yang akan mempengaruhi sudu turbin secara langsung. Pengukuran dilakukan secara berurutan dengan interval waktu tertentu, misalnya setiap satu detik, untuk memantau variasi kecepatan angin dari waktu ke waktu secara akurat.

Hasil pengukuran kemudian dicatat dalam bentuk tabel dan disimpan dalam format digital untuk memudahkan analisis data. Untuk meningkatkan keandalan data, pengukuran dilakukan dalam beberapa sesi berbeda, seperti pagi, siang, dan sore hari, guna mengidentifikasi pola variasi kecepatan angin yang terjadi di lokasi penelitian. Data kecepatan angin yang dikumpulkan kemudian dibandingkan dengan data sekunder dari Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG) Semarang sebagai langkah validasi, memastikan bahwa data lapangan sesuai dengan data resmi dan kondisi aktual di lapangan.

Data kecepatan angin yang diperoleh digunakan untuk menghitung berbagai parameter performa turbin, termasuk rasio kecepatan tip ($\text{Tip Speed Ratio/TSR}$), koefisien daya (C_p), dan torsi yang dihasilkan oleh turbin Savonius. Proses pengukuran ini sangat penting untuk memastikan validitas dan akurasi hasil penelitian, karena parameter-parameter tersebut menjadi indikator utama dalam menilai efisiensi dan efektivitas turbin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik dan listrik.

Secara keseluruhan, pengumpulan data kecepatan angin yang sistematis dan terukur secara tepat merupakan fondasi utama dalam analisis performa turbin angin, serta menjadi dasar dalam pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Keakuratan data ini juga mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam desain dan implementasi turbin angin di berbagai kondisi lingkungan yang berbeda.

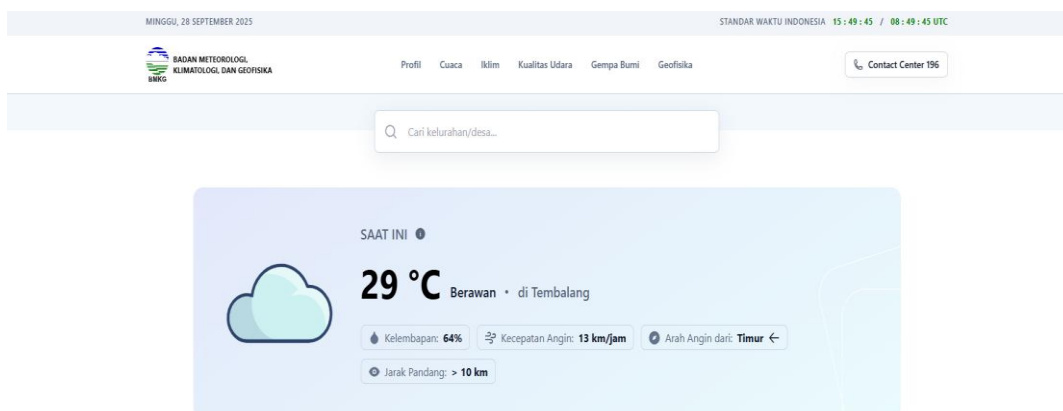
4.1.1 Lokasi Pengambilan Data Kecepatan Turbin Angin Savonius

Pengumpulan data kecepatan angin dilakukan di Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro (UNDIP) yang terletak di Tembalang, Semarang. Pengukuran ini menggunakan anemometer digital berbentuk cup, yang berfungsi untuk mengukur kecepatan angin secara langsung di tempat pengukuran. Untuk mendapatkan gambaran kondisi angin yang mempengaruhi turbin, alat pengukur ditempatkan pada ketinggian yang sejajar dengan poros turbin, yaitu sekitar 2 meter dari permukaan tanah.

Pengukuran kecepatan angin dilakukan di area terbuka yang relatif bebas hambatan, sehingga hasilnya lebih stabil dan tidak dipengaruhi oleh turbulensi yang disebabkan oleh bangunan di sekitarnya. Data kecepatan angin dicatat dalam interval waktu satu detik selama periode tertentu, kemudian diproses untuk mendapatkan nilai rata-rata kecepatan angin selama periode pengamatan tersebut.

Hasil dari pengukuran menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata mencapai 3,8 meter per detik. Nilai ini menjadi parameter utama dalam analisis performa turbin angin tipe Savonius yang sedang diuji. Selain itu, data kecepatan angin ini digunakan untuk menghitung rasio kecepatan tip (TSR), koefisien daya (C_p), serta memperkirakan energi yang dapat dihasilkan oleh turbin. Dengan demikian, proses pengumpulan data kecepatan angin di lokasi penelitian memberikan dasar empiris yang kuat dan valid untuk mendukung analisis kinerja turbin secara akurat dan komprehensif.

4.1.2 Validasi Kecepatan Turbin Angin Savonius di Lokasi dan BMKG



Gambar 4.2 Kecepatan Angin pada BMKG

Dalam rangka menjamin keabsahan data yang digunakan untuk analisis performa turbin angin tipe Savonius secara ilmiah, dilakukan proses validasi kecepatan angin. Tujuan dari validasi ini adalah untuk memastikan bahwa data pengukuran langsung di lapangan, yang diperoleh melalui penggunaan anemometer di lokasi penelitian, memiliki tingkat akurasi dan kesesuaian yang tinggi dengan data sekunder yang disediakan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).

Proses validasi kecepatan angin ini sangat penting karena data yang akurat dan terpercaya merupakan dasar utama dalam menilai performa dan efisiensi turbin angin. Dengan membandingkan hasil pengukuran lapangan dengan data sekunder dari BMKG, peneliti dapat mengidentifikasi potensi ketidaksesuaian, mengoreksi kesalahan pengukuran, serta memastikan bahwa data yang digunakan benar-benar mencerminkan kondisi aktual di lokasi penelitian.

Selain itu, validasi ini juga membantu dalam meningkatkan keandalan model prediksi dan simulasi yang digunakan dalam studi tersebut. Data yang tervalidasi dengan baik akan memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai kecepatan angin di lokasi, yang pada akhirnya akan mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat terkait pengembangan dan optimalisasi turbin angin Savonius.

Secara keseluruhan, proses ini merupakan langkah penting dalam memastikan integritas data dan keberlanjutan penelitian, serta mendukung pengembangan energi terbarukan yang berbasis pada data ilmiah yang valid dan terpercaya.

Kecepatan angin rata-rata di Sekolah Vokasi UNDIP Tembalang Adalah:

Sumber	Kecepatan Asal	Satuan Asal	Faktor Konversi	Kecepatan dalam m/s
Rooftop Gedung Sekolah Vokasi	3.8	m/s	1	3.8 m/s
BMKG	13	km/jam	$1 \text{ km/jam} = \frac{1}{3.6} \text{ m/s}$	$\frac{13}{3.6} \approx 3.61 \text{ m/s}$

Tabel 4.1 Data Perbandingan Sekolah Vokasi Undip dengan BMKG

a) Perbandingan Nilai

Perbedaan antara kedua data tersebut adalah sebesar 0.19 m/s, yang diperoleh dari pengurangan 3.8 m/s dan 3.61 m/s. Validasi hasil pengukuran dianggap berhasil karena selisihnya kurang dari batas toleransi sebesar 0.5 m/s, atau sekitar 5% dari nilai yang diukur oleh BMKG. Data pengukuran yang dilakukan di SV UNDIP menunjukkan hasil sebesar 3.8 m/s, yang sangat sejalan dengan data regional dari BMKG yang tercatat sebesar 3.61 m/s. Ketepatan dan keandalan pengukuran ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan cukup akurat dan konsisten dengan standar regional, sehingga dapat dipercaya untuk analisis lebih lanjut atau pengambilan keputusan terkait kondisi lingkungan atau cuaca di wilayah tersebut.

b) Kesesuaian untuk Turbin Savonius

Kecepatan angin di wilayah SV UNDIP sebesar 3.8 m/s sangat sesuai untuk penggunaan turbin angin tipe Savonius.

- Turbin Savonius merupakan salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang dikenal karena kemampuannya beroperasi pada kecepatan angin yang rendah, biasanya mulai berputar pada kecepatan sekitar 1.5 m/s hingga 3 m/s.
- Rentang kecepatan angin yang ideal untuk turbin ini berkisar antara 3 m/s sampai 6 m/s.

Dengan kecepatan angin sebesar 3.8 m/s, yang berada dalam rentang operasional optimal, proyek Anda memiliki peluang yang baik untuk menghasilkan energi listrik secara efisien.

c) Perhitungan dengan Data

$$V_{lapangan} = 3.8 \text{ m/s}$$

$$V_{BMKG} = 3.6 \text{ m/s}$$

1. Error Absolut:

$$E_{abs} = |3.8 - 3.6| = 0.2 \text{ m/s} \dots\dots\dots 4.1$$

2. Error Relatif:

$$E_{rel} = \frac{0.2}{3.6} \times 100\% = 5.56\% \dots\dots\dots 4.2$$

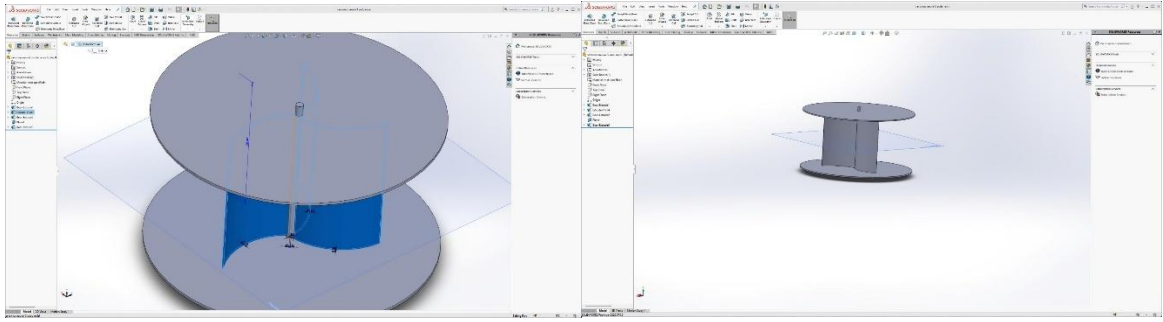
Sumber Data		Kecepatan Angin (m/s)	Selisih (m/s)	Error (%)
Rooftop Sekolah Undip	Gedung Vokasi	3.8		
BMKG Semarang		3.6	0.2	5.56

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Perbandingan Kecepatan Angin

Hasil verifikasi menunjukkan adanya perbedaan relatif sebesar 5,56% antara data yang diperoleh dari lapangan dan data dari BMKG. Perbedaan ini tergolong kecil, sehingga data pengukuran yang diambil di Sekolah Vokasi UNDIP dapat dianggap valid dan layak digunakan untuk analisis kinerja turbin angin Savonius.

4.2 Pemodelan Desain Turbin Angin Savonius

Dalam penelitian ini, aspek teknis dari desain turbin angin tipe Savonius telah dirancang secara rinci. Turbin ini dirancang dengan tiga sudu, sebuah konfigurasi yang umum dipilih untuk meningkatkan gaya dorong dan memudahkan proses pembuatan. Spesifikasi dari turbin yang digunakan, seperti yang tercantum dalam Tabel 3.1, mencakup berbagai parameter penting termasuk diameter, tinggi, jumlah sudu, dan bahan yang dipilih. Secara khusus, turbin ini memiliki diameter sebesar 0,3 meter dan tinggi 0,5 meter.



Gambar 4.3 Desain Turbin Angin Savonius Menggunakan SOLIDWORKS

Setiap baling-baling dari turbin dirancang dengan diameter 6 cm, menggunakan pipa PVC berukuran 4 inci yang mudah diperoleh dan cukup ringan, sehingga cocok untuk keperluan laboratorium. Pemilihan pipa PVC didasarkan pada keunggulannya, seperti ketahanan terhadap cuaca dan kemudahan dalam proses pemotongan serta pembentukan bentuk geometri Savonius. Poros utama turbin, yang berfungsi sebagai poros penggerak (*shaft*), dibuat dari bahan dengan diameter 6 mm, cukup kuat untuk menahan torsi yang dihasilkan saat angin berkecepatan rendah hingga sedang. Luas penampang dari turbin dihitung sebesar 706,5 mm, yang menjadi dasar dalam perhitungan energi angin yang dapat ditangkap oleh turbin tersebut.

Dengan spesifikasi ini, turbin angin tipe Savonius dirancang untuk beroperasi secara optimal pada kecepatan angin yang rendah, sekitar 3 hingga 5 m/s, sesuai dengan kondisi angin rata-rata di daerah Tembalang, Semarang. Model ini akan digunakan sebagai acuan dalam simulasi numerik maupun pengujian eksperimental guna menilai performa aerodinamik dari turbin tersebut.

4.3 Simulasi dan Geometri pada CFD

Pada proses simulasi sendiri perangkat lunak ANSYS Fluent digunakan untuk memodelkan turbin angin tipe Savonius. Geometri dari turbin ini didasarkan pada spesifikasi desain yang meliputi tiga sudu, dengan diameter 0,3 meter dan tinggi 0,5 meter. Tujuan utama dari pengaturan domain simulasi adalah untuk meminimalkan pengaruh batas domain, atau efek batas, terhadap hasil simulasi. Domain simulasi berbentuk silinder yang panjangnya sekitar tiga kali diameter turbin, mengikuti arah aliran udara.

4.3.1 Kondisi Batas (Boundary Conditions)

- *Inlet*: diatur sebagai *velocity inlet* dengan kecepatan tetap sebesar 3,8 m/s.
- *Outlet*: diatur sebagai *pressure outlet* dengan tekanan relatif 0 Pa (setara atmosfer).
- Dinding domain (*cylindrical wall*): diatur sebagai *symmetry* sehingga tidak menimbulkan hambatan terhadap aliran.
- Permukaan turbin: diatur sebagai *no-slip wall* untuk memastikan interaksi lengkap antara fluida dan permukaan bilah.

Karena kecepatan aliran udara yang relatif rendah, pengaruh dari faktor kompresibilitas dapat diabaikan, asalkan aliran tersebut tetap stabil dan tidak mengalami proses kompresi. Untuk memodelkan turbulensi, digunakan model $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*), yang dipilih karena kemampuannya dalam memberikan prediksi yang lebih akurat terhadap fenomena *flow separation* dan pola vorteks di sekitar bilah turbin.

Model ini juga dikenal lebih stabil dalam mengatasi gradien kecepatan yang tajam pada kontur yang kompleks.

4.3.2 Meshing dan Independensi Mesh

Pada tahap meshing, model turbin dan domain aliran dibagi menjadi elemen-elemen kecil supaya aliran udara bisa dihitung secara detail oleh CFD. Mesh dibuat lebih rapat di sekitar sudu turbin karena di area ini terjadi perubahan aliran yang cukup kompleks, seperti percepatan aliran, separasi, dan pembentukan pusaran. Sementara itu, mesh di bagian yang lebih jauh dari turbin dibuat lebih kasar agar waktu komputasi tetap efisien tanpa mengurangi akurasi hasil secara signifikan. Tujuan utama meshing ini adalah untuk mendapatkan hasil simulasi yang stabil dan akurat, di mana kualitas mesh yang baik akan membantu solver membaca pola aliran dengan benar dan mempercepat tercapainya konvergensi pada proses simulasi.

Proses meshing dilakukan menggunakan skema *hybrid mesh*, dengan:

- Mesh heksagonal terstruktur di bagian domain utama untuk efisiensi komputasi.
- Mesh lebih rapat (*refined mesh*) pada area sekitar bilah turbin untuk menangkap gradien kecepatan dan interaksi fluida dengan geometri.

Pengujian terhadap independensi mesh dilakukan dengan menerapkan berbagai tingkat kehalusan mesh, mulai dari yang sangat halus hingga yang lebih kasar. Parameter yang dievaluasi meliputi torsi (T) dan koefisien daya (C_p), yang kemudian dibandingkan di antara berbagai variasi tingkat mesh tersebut. Apabila perubahan nilai output yang dihasilkan dari variasi tingkat mesh tersebut kurang dari 2%, maka simulasi dianggap tidak bergantung pada tingkat kehalusan mesh yang digunakan.

4.3.3 Kriteria Konvergensi

Konvergensi dalam simulasi CFD menunjukkan bahwa perhitungan yang dilakukan sudah stabil dan hasilnya sudah tidak banyak berubah meskipun iterasi terus berjalan. Secara sederhana, konvergensi bisa dilihat dari grafik **residual** yang terus menurun dan kemudian cenderung mendatar pada nilai yang kecil. Hal ini menandakan bahwa persamaan aliran, seperti kontinuitas, kecepatan, dan turbulensi, sudah terselesaikan dengan baik. Selain itu, nilai parameter fisik yang dipantau, seperti torsi atau gaya pada turbin, juga sudah stabil dan tidak berfluktuasi besar. Jika kondisi ini tercapai, maka hasil simulasi dapat dianggap valid dan siap digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Simulasi dijalankan hingga memenuhi kriteria konvergensi, dengan:

- Residual setiap persamaan (continuity, momentum, k , ω) turun hingga 10^{-3} .
- Perubahan parameter monitoring (torsi pada poros turbin) stabil dan tidak mengalami fluktuasi signifikan.

Diharapkan bahwa simulasi ini dapat memberikan data numerik yang tepat mengenai aliran di sekitar turbin angin Savonius, termasuk distribusi kecepatan, tekanan, dan torsi yang dihasilkan. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk

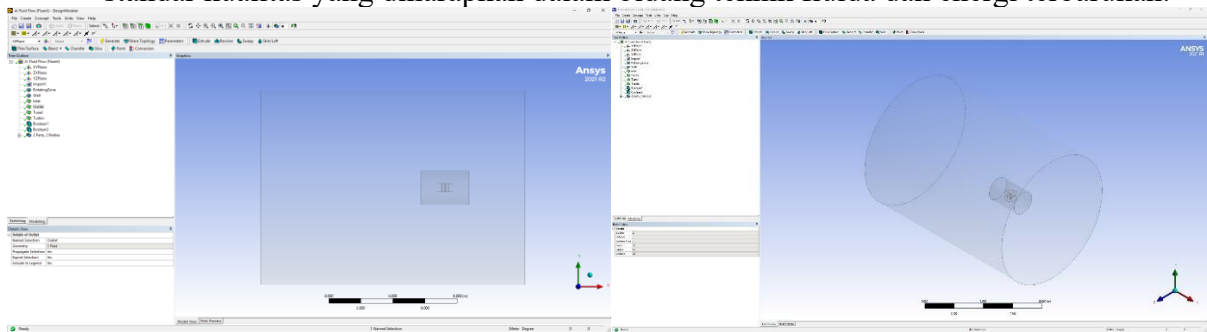
memastikan bahwa hasil yang diperoleh mewakili kondisi nyata selama tahap awal pengaturan.

4.4 Simulasi di Ansys Fluent untuk Menjalankan Simulasi Turbin Angin Savonius

Studi mengenai performa aerodinamika pada kondisi kecepatan angin rendah dilakukan melalui simulasi numerik terhadap turbin angin tipe Savonius, menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Untuk meminimalkan pengaruh batas domain, geometri turbin disesuaikan dengan spesifikasi desain yang telah ditetapkan, kemudian ditempatkan dalam domain berbentuk silinder yang panjangnya sekitar tiga kali diameter turbin tersebut.

4.4.1 Model Geometri

Dalam penelitian ini, pembuatan model geometris untuk turbin angin tipe Savonius dilakukan berdasarkan spesifikasi desain yang telah ditentukan sebelumnya. Selain itu, prosedur verifikasi dan validasi numerik diterapkan menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) sesuai dengan standar ITTC 7.5-03-01-01, guna memastikan bahwa proses pembuatan mesh, pemodelan, dan simulasi numerik memenuhi kriteria verifikasi dan validasi yang berlaku. Langkah ini penting agar hasil simulasi dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan akurat, serta memenuhi standar kualitas yang diharapkan dalam bidang teknik fluida dan energi terbarukan.



Gambar 4.4 Proses Pemodelan Geometri

- Jarak Inlet : $3D - 5D = 2,25 - 3,75$ (3,5 m)
- Jarak Outlet : $10D - 15D = 7,5 - 11,25$ (10 m)
- Radius Domain Silinder : $5D - 7D = 3,75 - 5,25$ (5 m)

Turbin yang dirancang ini memiliki rotor dengan diameter 0,30 meter dan tinggi 0,50 meter, terdiri dari tiga bilah yang dibuat dari potongan pipa PVC berdiameter sekitar 0,06 meter. Bilah-bilah tersebut disusun dengan sudut 120° terhadap poros, membentuk pola S khas dari turbin Savonius. Pada poros, digunakan material dengan diameter 6 mm untuk menahan torsi dan memungkinkan rotasi. Geometri turbin ini dirancang menggunakan perangkat lunak CAD dan kemudian diekspor dalam format STEP untuk keperluan simulasi di ANSYS Fluent.

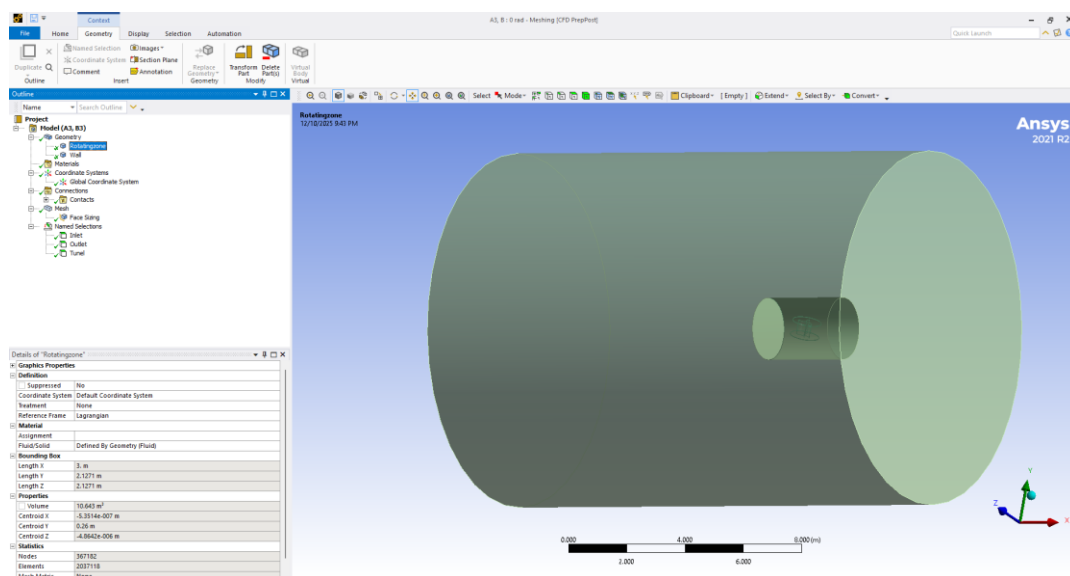
Nama Komponen	Keterangan
Inlet	Inlet merupakan batas masuk aliran fluida (udara) ke dalam domain simulasi.
Outlet	Outlet adalah batas keluar aliran udara dari domain simulasi.
Wall	Wall merepresentasikan batas dinding dari domain fluida yang berfungsi sebagai pembatas aliran.

RotatingZone	Rotating zone merupakan area khusus yang mengelilingi turbin dan digunakan untuk memodelkan efek rotasi.
Turbin	Geometri utama berupa sudu-sudu Savonius. Pada simulasi, turbin didefinisikan sebagai <i>solid body</i> yang terletak di dalam rotating zone.
Boolean 1	Digunakan untuk mengurangi atau memisahkan domain fluida dengan geometri turbin.
Boolean 2	Untuk membentuk <i>rotating zone</i> yang mengelilingi turbin, sehingga domain dapat dipisahkan antara zona stasioner (fluida bebas) dan zona berputar (di sekitar turbin).

Tabel 4.3 Nama-nama Komponen

Dalam upaya meminimalkan pengaruh batas domain (boundary effect) terhadap hasil simulasi, area perhitungan dirancang berbentuk silinder. Jarak antar sisi minimal dua kali diameter rotor dan panjangnya sekitar tiga kali diameter turbin mengikuti arah aliran udara. Untuk memastikan aliran udara dapat bergerak dengan lancar sebelum mencapai rotor, posisi turbin ditempatkan pada titik 1D dari inlet.

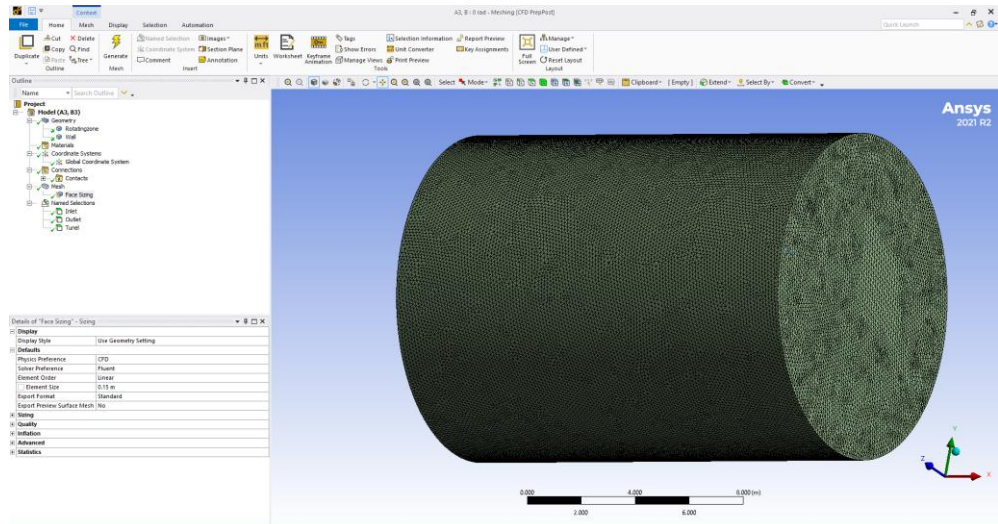
4.4.2 Meshing



Gambar 4.5 Proses Meshing 1

Struktur mesh heksagonal pada domain utama dan proses penyempurnaan mesh di sekitar bilah turbin digunakan untuk melakukan pemodelan numerik. Untuk menangkap perubahan kecepatan di dekat permukaan dinding, lapisan batas diterapkan pada permukaan sudu, dengan target nilai y^+ sekitar 1 agar sesuai dengan model turbulensi $k-\omega$ SST. Pengujian independensi mesh dilakukan dengan menggunakan tiga tingkat kepadatan mesh (halus, sedang, dan kasar). Perbandingan hasil torsi dan koefisien daya (C_p) dari ketiga mesh menunjukkan bahwa variasi kurang dari 2%, menandakan bahwa hasil simulasi tidak bergantung pada ukuran mesh. Prosedur ini mengikuti standar ITTC 7.5-03-01-01. Untuk memastikan keakuratan numerik, digunakan metode yang diadopsi dari standar ITTC, termasuk penerapan Grid Convergence Index (GCI) untuk memperkirakan ketidakpastian numerik dan

perhitungan order of accuracy (p) untuk memperoleh solusi yang mendekati kondisi ideal pada grid tak hingga. Langkah-langkah ini memastikan bahwa hasil simulasi dapat diukur dan dipercaya secara ilmiah.



Gambar 4.6 Proses Meshing 2

Perancangan bentuk geometri turbin angin tipe Savonius mengikuti standar ITTC, yang tidak hanya menggambarkan secara fisik rotor tetapi juga memenuhi syarat verifikasi dan validasi secara numerik. Pendekatan ini memberikan dasar yang kuat untuk memastikan keakuratan hasil simulasi, yang kemudian akan diverifikasi melalui data eksperimen di lapangan.

4.4.3 Setup dan Konfigurasi Simulasi

Penelitian ini fokus pada analisis karakteristik aliran fluida di sekitar turbin angin tipe Savonius dengan menggunakan solver numerik ANSYS Fluent. Setelah proses pembuatan model geometri dan mesh selesai, tahap pengaturan dilakukan untuk menentukan kondisi numerik dan fisik yang sesuai dengan fenomena aliran udara nyata. Mengingat turbin Savonius beroperasi dalam kondisi aliran tak tunak akibat rotasi sudu yang terus berubah, solver yang dipilih adalah tipe pressure-based dengan pendekatan transient. Model turbulensi $k-\omega$ SST dipilih karena kemampuannya dalam menangkap fenomena separasi aliran di permukaan sudu secara akurat.

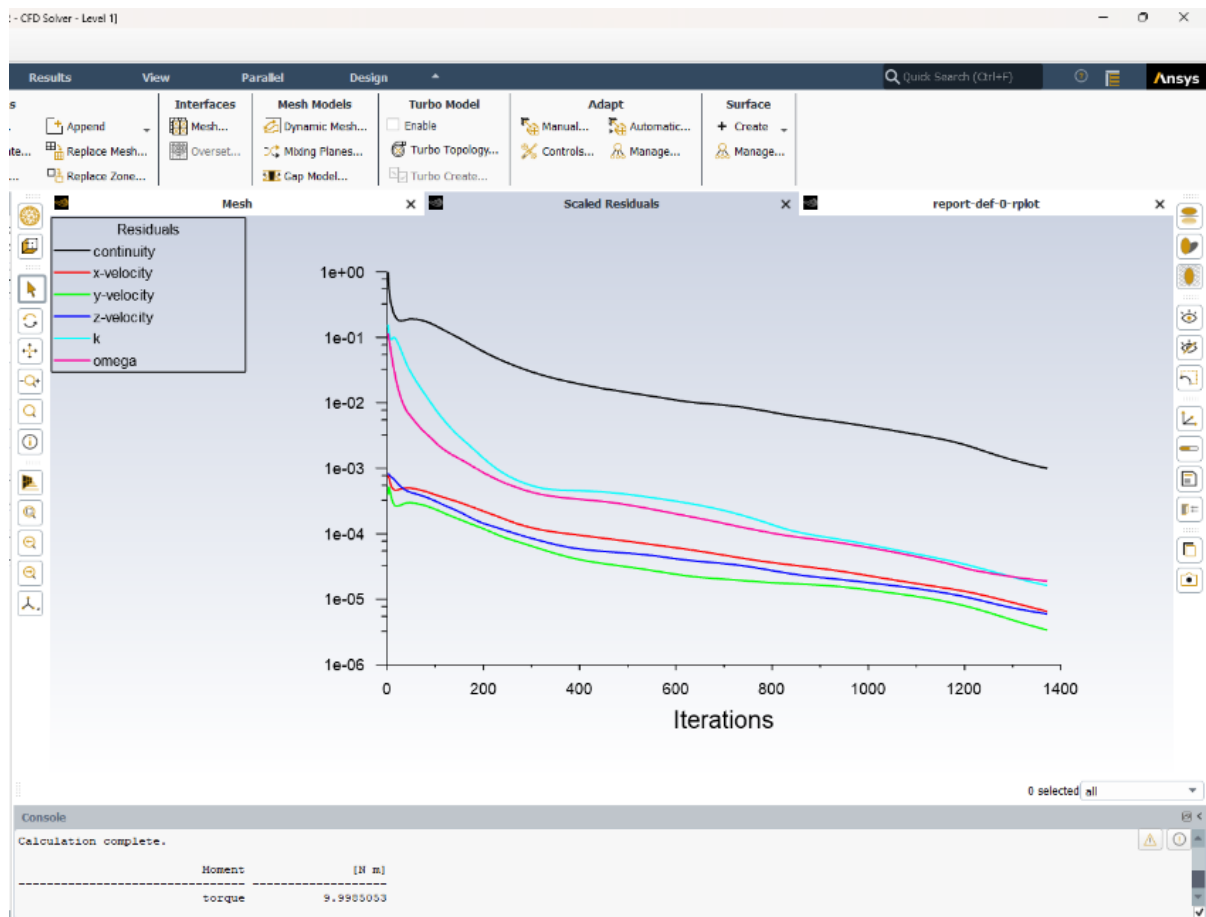
Pada tahap awal simulasi, geometri turbin angin Savonius dibuat dalam domain berbentuk silinder yang merepresentasikan aliran udara di sekitar turbin. Geometri ini meliputi inlet, outlet, dinding, serta zona berputar yang mewakili area rotasi sudu. Setelah model selesai, langkah berikutnya adalah pembuatan mesh menggunakan elemen Tet4 yang mampu menangani bentuk geometri yang kompleks secara lebih baik. Mesh kemudian diperiksa kualitasnya untuk memastikan tidak ada error yang dapat mengganggu kestabilan proses perhitungan.

Selanjutnya, proses pengaturan dilakukan dengan menetapkan kondisi batas. Pada sisi inlet, kecepatan aliran udara diatur sebesar 3,8 m/s, yang telah divalidasi berdasarkan data pengukuran lapangan. Nilai ini sesuai dengan densitas udara dan luas penampang inlet. Outlet diatur sebagai pressure outlet, sementara dinding domain didefinisikan sebagai stationary wall, dan zona turbin sebagai rotating zone dengan kecepatan rotasi yang dihitung sebelumnya. Model turbulensi RNG k- ϵ digunakan untuk menangkap karakteristik aliran berputar di sekitar sudu.

Setelah semua kondisi batas ditetapkan, proses inisialisasi dilakukan menggunakan metode hybrid initialization agar distribusi awal kecepatan dan tekanan merata di seluruh domain. Simulasi kemudian dijalankan secara iteratif hingga residual mencapai kestabilan di bawah 10^{-3} . Dari hasil simulasi, torsi yang dihasilkan oleh turbin tercatat sebesar 0.0999 N·m, yang kemudian digunakan untuk menghitung daya mekanis turbin melalui rumus $P = T \cdot \omega$. Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi setup yang diterapkan mampu merepresentasikan fenomena aerodinamika turbin Savonius secara akurat dan memberikan dasar yang kuat untuk analisis performa energi yang dihasilkan.

4.4.4 Grafik Residual

Hasil residual dari simulasi turbin angin tipe Savonius yang dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent menunjukkan proses penilaian terhadap tingkat konvergensi solusi numerik yang diperoleh. Pada tahap awal, nilai residual masih cukup tinggi karena solusi yang dihasilkan bersifat kasar dan belum mencapai kestabilan. Seiring waktu dan bertambahnya jumlah iterasi, nilai residual mengalami penurunan yang cukup signifikan, mendekati angka yang lebih rendah dan menunjukkan tanda-tanda kestabilan. Dalam studi ini, residual untuk persamaan kontinuitas serta komponen momentum pada sumbu X dan Y berhasil turun di bawah angka 10^{-3} , sementara residual untuk model turbulensi mendekati angka 10^{-4} , menandakan bahwa solusi telah mencapai tingkat konvergensi yang memadai.



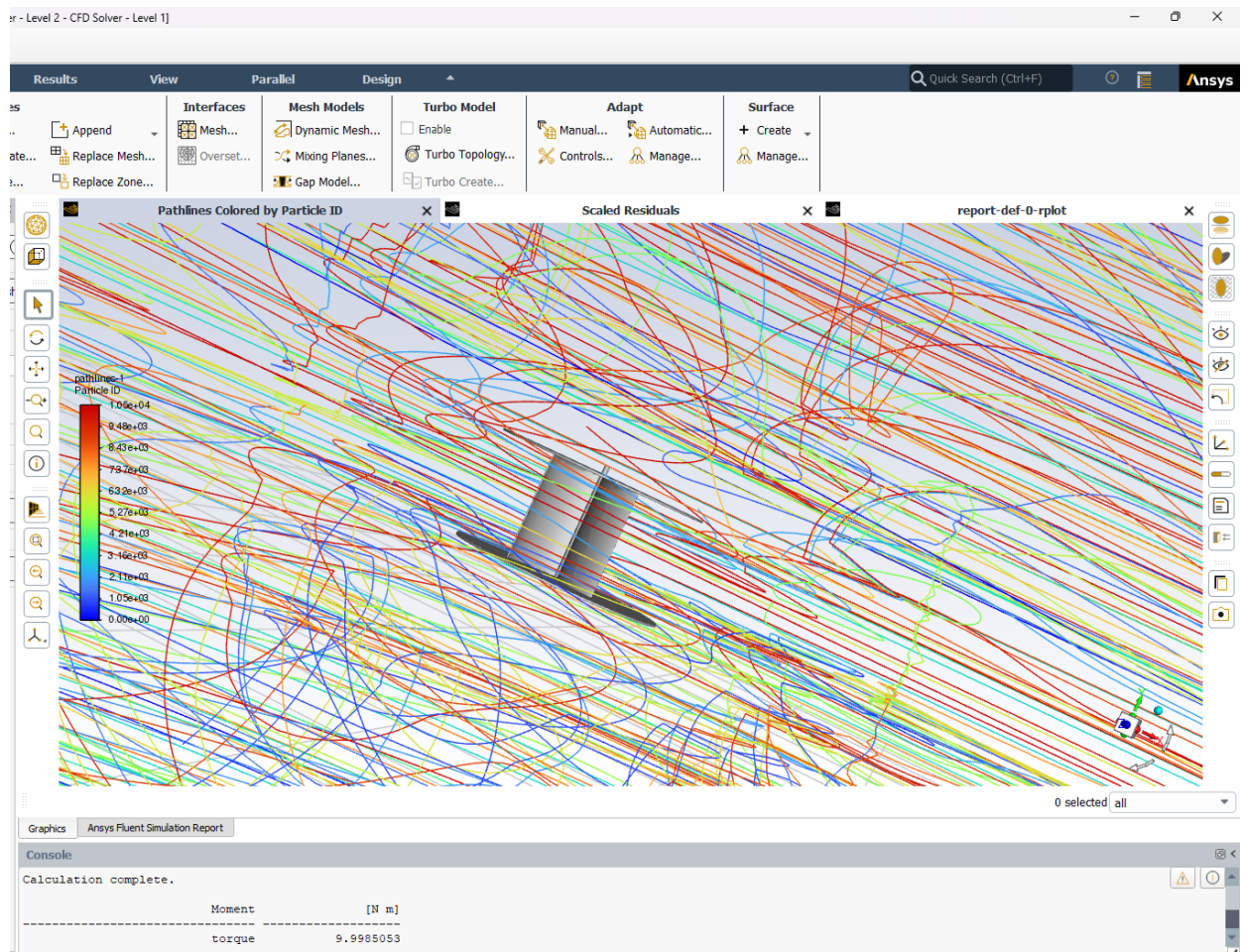
Gambar 4.7 Grafik Scaled Residual

Pada Gambar 4.6, ditampilkan grafik Residual yang menggambarkan statistik atau hasil perhitungan pada turbin angin yang telah ditentukan. Residual, yaitu kesalahan dari persamaan diskretisasi yang telah dinormalisasi agar dapat dibandingkan antar variabel, digunakan dalam simulasi CFD untuk memantau tingkat konvergensi. Dari pengaturan tersebut, diperoleh nilai torsi sebesar 0.0999 N·m.

Grafik *scaled residuals* menunjukkan perkembangan konvergensi setiap persamaan yang diselesaikan dalam simulasi CFD. Garis hitam merepresentasikan residual kontinuitas yang menggambarkan keseimbangan massa fluida di dalam domain, di mana penurunannya secara bertahap menunjukkan bahwa prinsip kekekalan massa telah terpenuhi dengan baik. Garis merah, hijau, dan biru masing-masing menunjukkan residual komponen kecepatan arah sumbu X, Y, dan Z, yang seluruhnya mengalami penurunan hingga berada pada orde 10^{-4} – 10^{-5} , menandakan bahwa medan kecepatan aliran telah mencapai kondisi numerik yang stabil. Garis biru muda menunjukkan residual energi kinetik turbulen (k), yang mencerminkan kestabilan prediksi fluktuasi turbulensi dalam aliran, sedangkan garis ungu merepresentasikan residual laju disipasi spesifik (ω) yang berkaitan dengan mekanisme disipasi energi turbulen. Penurunan residual k dan ω secara konsisten menunjukkan bahwa model turbulensi mampu menangkap karakteristik aliran, termasuk fenomena separasi dan vorteks di sekitar sudu turbin. Secara keseluruhan, tren penurunan seluruh residual yang stabil dan berada di bawah batas toleransi menunjukkan bahwa simulasi telah mencapai kondisi konvergen, sehingga hasil simulasi layak digunakan untuk analisis distribusi

tekanan, torsi, dan koefisien daya turbin angin Savonius. Dalam penetapan kondisi batas, sisi yang masuk ke dalam domain digambarkan sebagai aliran dengan kecepatan angin sesuai hasil pengukuran di lapangan. Sedangkan sisi keluar dari domain digambarkan sebagai aliran tekanan dengan tekanan relatif nol. Untuk menghindari efek pantulan dari aliran tersebut, dinding luar dari sudu turbin diatur secara simetris agar tidak mempengaruhi aliran di dalam domain.

4.4.5 Pemodelan Menggunakan Pathlines

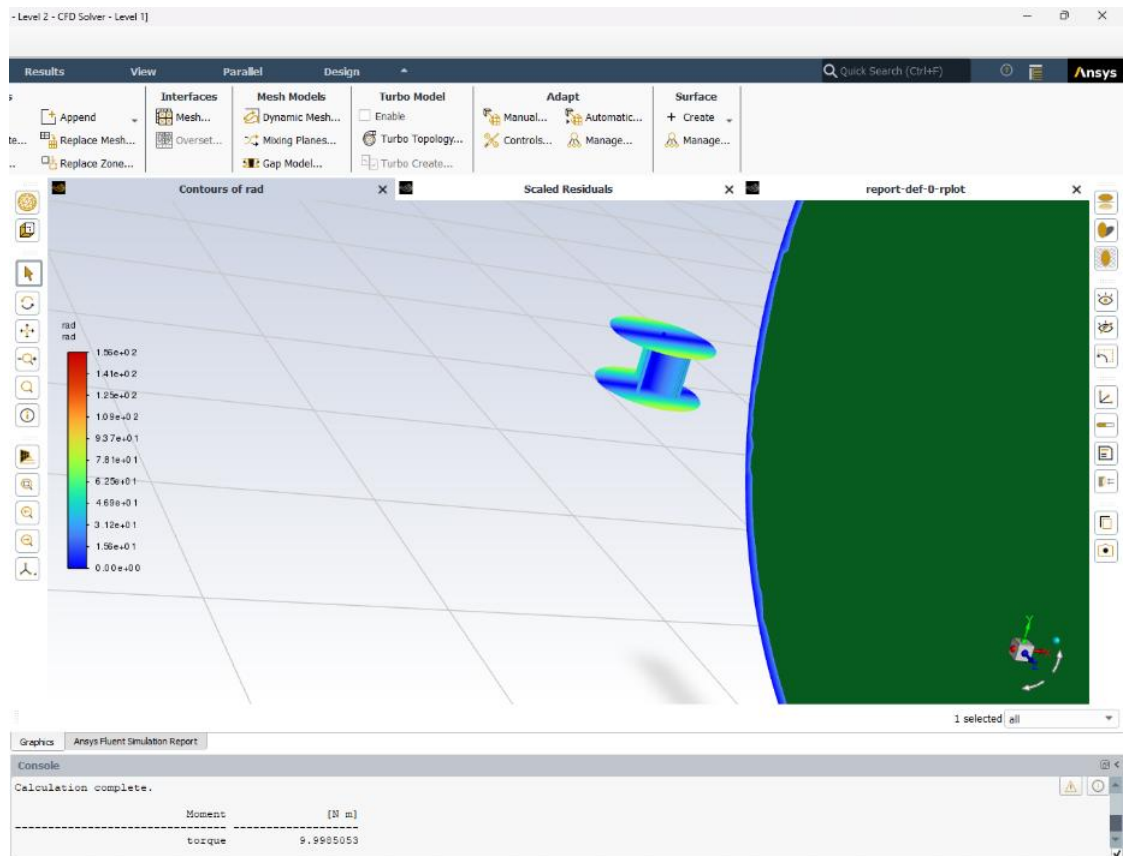


Gambar 4.8 Pemodelan Pathlines

Pada Gambar tersebut ditampilkan visualisasi lintasan aliran udara pathlines di sekitar turbin angin vertikal tipe Savonius. Perbedaan warna pada garis aliran digunakan untuk membedakan partikel udara yang berbeda, sehingga arah dan pola pergerakan aliran dapat diamati dengan lebih jelas. Dari hasil visualisasi terlihat bahwa aliran udara mengalami pembelokan saat mengenai sudu turbin, kemudian sebagian aliran membentuk pusaran (vorteks) di sekitar dan di belakang turbin. Kondisi ini menunjukkan adanya interaksi yang kuat antara aliran udara dan geometri sudu, terutama pada sisi cekung yang berperan dalam menangkap energi angin. Daerah aliran yang berputar dan tidak teratur di sekitar turbin mengindikasikan terjadinya kehilangan energi, namun pada saat yang sama berkontribusi terhadap pembentukan torsi yang menggerakkan rotor. Secara umum, pola aliran yang terbentuk memperlihatkan karakteristik khas turbin

Savonius, di mana gaya hambat dari aliran udara dimanfaatkan untuk menghasilkan torsi pada kondisi kecepatan angin rendah.

Gambaran aliran yang ditampilkan memberikan wawasan kualitatif mengenai perilaku fluida di sekitar bilah turbin Savonius. Terlihat adanya zona turbulensi di bagian hilir yang menunjukkan adanya kehilangan energi akibat proses separasi aliran, namun di sisi lain juga menunjukkan adanya gaya dorong yang cukup besar pada bilah utama. Fenomena ini sejalan dengan hasil perhitungan sebelumnya, di mana torsi yang dihasilkan mencapai $0.0999 \text{ N}\cdot\text{m}$ pada kecepatan angin sebesar 3.8 m/s .



Gambar 4.9 Pemodelan Contour Turbin

Gambar tersebut menunjukkan distribusi warna pada permukaan turbin angin Savonius yang merepresentasikan kecepatan sudut putaran turbin selama simulasi berlangsung. Perbedaan warna yang terlihat, mulai dari biru hingga hijau, menunjukkan variasi nilai kecepatan sudut pada bagian-bagian turbin. Warna biru menandakan daerah dengan kecepatan putar yang lebih rendah, sedangkan warna hijau menunjukkan kecepatan putar yang lebih tinggi. Dari hasil visualisasi terlihat bahwa warna pada permukaan sudu dan poros relatif seragam, yang menandakan bahwa turbin berputar secara stabil tanpa adanya perbedaan putaran yang signifikan pada bagian tertentu. Kondisi ini menunjukkan bahwa gaya aerodinamis akibat aliran udara mampu menghasilkan torsi yang cukup untuk mempertahankan putaran turbin secara konsisten, sehingga kinerja turbin Savonius pada kondisi kecepatan angin rendah dapat dikatakan berjalan dengan baik.

Dengan demikian, proses pengaturan dan visualisasi di ANSYS Fluent tidak hanya memastikan keakuratan konfigurasi simulasi, tetapi juga menjadi dasar untuk

analisis kuantitatif terhadap kinerja turbin. Hasil ini membuktikan bahwa turbin Savonius dengan tiga sudu mampu menghasilkan distribusi aliran yang efisien dan stabil pada kecepatan angin rendah hingga sedang.

4.5 Hasil Simulasi dan Analisis

Hasil simulasi menggunakan ANSYS Fluent pada model turbin angin tipe Savonius menunjukkan torsi rata-rata yang dihasilkan pada poros turbin adalah sebesar 0.0999 N·m

Nilai massa aliran ini diukur berdasarkan kondisi batas di bagian inlet, yang berfungsi untuk memastikan konservasi massa dan sebagai dasar dalam menilai kondisi masuk yang sesuai dengan skenario pengujian. Torsi tersebut dihitung melalui proses integrasi gaya gesek dan tekanan yang bekerja pada permukaan bilah, kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan momen total terhadap poros. Angka ini secara langsung mencerminkan kemampuan turbin dalam menghasilkan momen saat terkena angin dengan kecepatan tertentu dan dalam kondisi geometris yang telah diuji.

Mencari TSR (*Tip Speed Ratio*)

$$TSR = \lambda = \frac{\omega R}{V} \dots\dots\dots 4.3$$

$$\frac{25.33 \times 0.15}{3.8} = 0.99 \text{ dibulatkan menjadi } 1$$

Mencari RPM (*Revolutions Per Minute*)

$$RPM = \frac{60 \lambda V}{2 \pi R} \dots\dots\dots 4.4$$

$$\frac{60 \times 1 \times 3.8}{2 \times 3.1416 \times 0.15} = 241.8 \text{ rpm dibulatkan menjadi } 242$$

$$RPM = 242$$

Untuk menginterpretasikan keluaran torsi ke dalam besaran daya mekanis (P), digunakan relasi dasar antara torsi dan kecepatan sudut:

$$P = T \cdot \omega \text{ Dengan } \omega = \frac{2\pi N}{60} \dots\dots\dots 4.5$$

di mana T adalah torsi (N·m), ω kecepatan sudut (rad/s), dan n putaran poros (rpm). Mengingat torsi 0.0999 N·m, besaran daya mekanis yang dihasilkan turbin untuk beberapa nilai putaran poros tipikal dihitung sebagai berikut:

Putaran (rpm)	ω (rad/s)	Daya mekanis $P=T\omega$ (W)
241.8 Rpm	25.33 rad/s	2.5304 W

Tabel 4.4 Hasil Simulasi

Rumus Konversi

$$\omega = RPM \times \frac{2\pi}{60} \dots\dots\dots 4.6$$

$$242/60 = 4.03$$

$$2\pi \approx 6.2832$$

$$4.03 \times 6.2832 = 25.33 \text{ rad/s}$$

Dan

$$P = T \cdot \omega$$

$$0.0999 \times 25.33 = 2.5304 \text{ W}$$

(Perhitungan: P dihitung langsung dari $0.0999 \times \omega$.)

Analisis mendalam dari hasil tersebut menunjukkan bahwa, berdasarkan interpretasi teknis, daya mekanis yang tersedia meningkat secara linier seiring dengan kenaikan kecepatan rotasi poros, meskipun torsi rata-rata yang tercatat tetap konstan. Dalam konteks turbin Savonius, kecepatan putaran yang efektif biasanya cukup rendah, sehingga operasi yang dilakukan cenderung berada pada kisaran daya yang lebih kecil, biasanya berkisar antara puluhan hingga ratusan watt. Hal ini sangat bergantung pada kondisi angin serta sistem penggerak dan penggunaan akhir yang diterapkan.

4.6 Mencari Nilai dari Simulasi yang Telah Diterapkan pada Ansys Fluent

Berdasarkan rangkaian simulasi numerik yang telah dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent, semua parameter utama yang diperlukan untuk menilai performa turbin angin tipe Savonius berhasil dikumpulkan. Proses analisis dimulai dengan memantau torsi yang dihasilkan oleh turbin, kemudian mengonversinya menjadi kecepatan rotasi dan selanjutnya dihitung daya mekanik yang dihasilkan oleh poros turbin. Selain itu, nilai kecepatan angin bebas dihitung berdasarkan kecepatan aliran di sisi inlet, luas area yang disapu oleh turbin, serta densitas udara standar yang berlaku.

Data yang didapatkan:

$$T = 0.0999 \text{ N/m}$$

$$rpm = 241.8 \rightarrow \omega \approx 25.33 \text{ rad/s}$$

$$\text{Savonius: diameter } D = 0.5 \text{ m, tinggi } H = 0.6 \text{ m} \rightarrow A = H \times D = 0.6 \times 0.5 = 0.3 \text{ m}^2$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 3.8 \text{ m/s}$$

Perhitungan:

Sekolah Vokasi Undip Tembalang Kota Semarang:

$$\omega = 25.33 \text{ rad/s}$$

$$P_{\text{turbine}} = T \times \omega = 0.0999 \times 25.33 \approx 2.5304 \text{ W}$$

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.3 \times (3.8)^3 \approx 10.083 \text{ W}$$

$$C_p = \frac{2.5304}{10.083} \approx 25 \% = 0.250$$

Dengan membandingkan antara energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin dan energi angin yang tersedia secara alami, diperoleh nilai koefisien daya (C_p) yang menunjukkan tingkat efisiensi dalam mengubah energi angin menjadi energi mekanik oleh turbin Savonius. Analisis ini memberikan gambaran lengkap mengenai kinerja aerodinamika turbin dan menjadi dasar untuk menilai seberapa dekat hasil simulasi dengan nilai teoritis maupun data dari penelitian sebelumnya.

HALAMAN SENGGAJA
DIKOSONGKAN