

## BAB IV HASIL & PEMBAHASAN

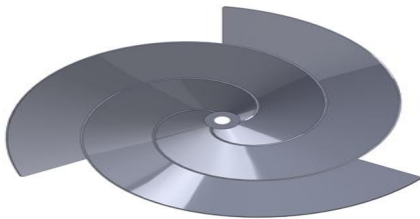
### 4.1 Hasil Pemodelan 3D

#### 4.1.1. Pemodelan 3D Turbin *Fibonacci-Spiral* (HAWT)

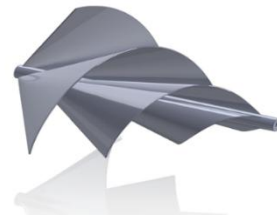
Proses pemodelan 3D turbin *Fibonacci-Spiral* dilakukan menggunakan SolidWorks 2023 berdasarkan data yang telah dikumpulkan. Data utama turbin dari penelitian sebelumnya akan digunakan dalam pemodelan ini, yang telah mengalami beberapa penyesuaian.

Tabel 4. 1 Ukuran Utama Turbin *Fibonacci-Spiral*

Parameter	<i>Fibonacci-Spiral</i>
Diameter	700 mm
Panjang Rotor	900 mm
Tebal	4 mm
Jumlah Bilah	3
Shaft Diameter	25 mm
Luas Sapuan	626379.9 mm <sup>2</sup>



Gambar 4. 2 Tampak Depan Turbin *Fibonacci-Spiral*



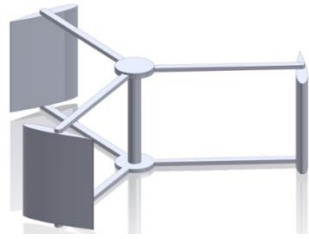
Gambar 4. 1 Tampilan Isometrik Dari Turbin *Fibonacci-Spiral*

#### 4.1.2. Pemodelan 3D Turbin *Darrieus* (VAWT)

Berdasarkan data yang telah dikumpulkan, proses pemodelan 3D kemudian dilakukan dengan menggunakan aplikasi SolidWorks 2023. Pemodelan ini akan menggunakan data utama turbin dari sejumlah penelitian sebelumnya yang telah melalui beberapa proses penyesuaian.

Tabel 4. 2 Ukuran Utama Turbin *Darrieus*

Keterangan	<i>Darrieus</i>
Diameter	2500 mm
Panjang Rotor	1000 mm
Tebal	4 mm
Jumlah Bilah	3
Shaft Diameter	21 mm
Luas Sapuan	634976.87 mm <sup>2</sup>



Gambar 4. 4 Iso view Turbin Darrieus



Gambar 4. 3 Tampak Depan Turbin Darrieus

Tabel 4. 3 Perbandingan antara 2 Turbin

Parameter Geometri	Turbin Fibonacci-Spiral (HAWT)	Turbin Darrieus (VAWT)
Jenis Turbin	HAWT (Horizontal Axis)	VAWT (Vertical Axis)
Diameter Rotor	700 mm	2.500 mm
Jari-jari Rotor (R)	350 mm	1.250 mm
Panjang/Tinggi Rotor	900 mm	1.000 mm
Jumlah Bilah	3	3
Profil Bilah	Spiral Fibonacci ( $\phi \approx 1,618$ )	NACA 0015
Tebal Bilah	4 mm	4 mm (chord)
Shaft Diameter	25 mm	21 mm
Luas Sapuan	626.379,9 mm <sup>2</sup>	634.976,9 mm <sup>2</sup>
Selisih Luas Sapuan	1,37%	1,37%
Arah Rotasi Sumbu	Horizontal (aksial)	Vertikal (crossflow)
Mekanisme Gaya	<i>Lift</i> -based + spiral geometry	<i>Lift</i> -based (NACA 0015)

## 4.2 Simulasi RPM Turbin Fibonacci-Spiral

### 4.2.1. Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *ANSYS Fluent*, yang meliputi alur kerja yang terdiri dari tahapan *Geometry*, *Mesh*, *Setup*, *Solution*, dan *Results*. Setiap tahapan memiliki fungsi masing-masing untuk memastikan bahwa simulasi dapat merepresentasikan fenomena aliran udara di sekitar turbin angin dengan akurat.

Tahap *Geometry* adalah proses pemodelan geometri turbin angin dan *domain* fluida. Tahap *Mesh* berfungsi untuk mendiskretisasi *domain* aliran menjadi elemen-elemen kecil yang akan digunakan dalam perhitungan numerik. Pada tahap *Setup*, kondisi batas, model turbulensi, serta parameter fisika yang digunakan dalam simulasi ditentukan. Selanjutnya, tahap *Solution* adalah proses penyelesaian numerik persamaan aliran hingga mencapai kondisi konvergen. Tahap terakhir, yaitu *Results*, digunakan untuk menampilkan dan menganalisis hasil simulasi yang berupa distribusi

aliran dan parameter aerodinamika turbin. Penjelasan rinci mengenai setiap tahapan simulasi akan disajikan pada subbab-subbab berikutnya.

#### 4.2.2. Hasil Geometry

*Domain* komputasi yang digunakan untuk simulasi CFD turbin angin ini dirancang dalam bentuk silinder, dengan rotor turbin berada di bagian tengah *domain*. Pemilihan geometri silinder bertujuan untuk mengoptimalkan jumlah elemen *mesh* dan memudahkan implementasi zona rotating *domain* di area rotor.

Diameter rotor (*D*) dijadikan sebagai parameter referensi untuk menyatakan dimensi-dimensi lain dalam *domain*, sehingga memudahkan perbandingan dengan studi-studi turbin angin lainnya. Tabel 4.4 merangkum dimensi *domain* dalam satuan aktual (meter) dan satuan relatif terhadap diameter rotor.

Tabel 4. 4 Ukuran *Domain*

Komponen <i>Domain</i>	Dimensi Aktual (mm)	Keterangan
Diameter Turbin ( <i>D</i> )	700	Referensi
Radius Turbin ( <i>R</i> )	350	Setengah Diameter
Diameter <i>Domain</i>	8000	Diameter <i>Domain</i>
Radius <i>Domain</i>	4000	Half Diameter <i>Domain</i>
Panjang Upstream ( <i>Inlet</i> )	6000	<i>Inlet</i> Ke Rotor
Panjang Downstream ( <i>Outlet</i> )	12000	Outlet Ke Rotor
Panjang Total <i>Domain</i>	18000	<i>Inlet</i> Ke <i>Outlet</i>

#### 4.2.3. Proses Mesh

Tahap *mesh* adalah proses diskretisasi *domain* fluida menjadi elemen-elemen kecil yang digunakan dalam penyelesaian numerik untuk simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD). Dalam penelitian ini, *domain* aliran berbentuk silinder yang mengelilingi turbin didiskretisasi menggunakan *mesh* tidak berstruktur (*unstructured mesh*) dengan elemen segitiga.

Pengaturan ukuran elemen *mesh* dilakukan dengan menerapkan metode *face sizing* pada beberapa bagian *domain*. Pada permukaan *domain* fluida, *face sizing* diterapkan pada tiga permukaan dengan ukuran elemen sebesar 0,6 m, yang bertujuan untuk menjaga kestabilan perhitungan aliran secara global. Sementara itu, pada bagian turbin diterapkan *face sizing* khusus dengan ukuran elemen yang lebih halus, yaitu 0,01 m, untuk menangkap detail interaksi aliran udara dengan bilah turbin secara lebih akurat.

Selain pengaturan ukuran elemen, parameter *capture curvature* diaktifkan untuk memastikan bahwa *mesh* dapat mengikuti kelengkungan geometri turbin dengan baik. Nilai *growth rate* dibiarkan pada pengaturan *default*, sehingga transisi ukuran elemen dari daerah halus ke daerah kasar berlangsung secara bertahap dan tidak menimbulkan distorsi *mesh*. Pendekatan ini digunakan untuk mencapai keseimbangan antara akurasi hasil simulasi dan efisiensi komputasi.

#### 4.2.4. Setup Yang Digunakan

Hasil simulasi CFD yang diperoleh dalam penelitian ini sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan *boundary condition* yang digunakan. Oleh karena itu, sebelum membahas lebih lanjut karakteristik performa turbin angin, perlu dijelaskan kondisi aliran dan lingkungan operasi yang melatarbelakangi hasil simulasi tersebut.

Kondisi operasi yang digunakan merepresentasikan lingkungan angin laut (*offshore*) dengan karakteristik aliran yang relatif stabil. *Boundary condition* yang

diterapkan memungkinkan aliran berkembang secara realistis di sekitar turbin, sehingga distribusi tekanan, kecepatan, serta gaya aerodinamika yang dihasilkan dapat dianalisis secara akurat pada kondisi tunak (*steady-state*).

a. Kecepatan angin laut yang digunakan (berdasarkan BMKG)

Berdasarkan data BMKG untuk kawasan *offshore* Jeneponto (sumber: BMKG Stasiun Meteorologi Maritim Paotere), diperoleh profil kecepatan angin sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Data tersebut menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata bulanan berkisar antara 4 m/s, dengan kecepatan angin terendah 2 m/s dan kecepatan angin tertinggi mencapai 10 m/s. Pada penelitian ini akan memakai 3 kecepatan tersebut (2 m/s, 4m/s, dan 10 m/s). Kecepatan angin tersebut mencerminkan potensi energi angin laut yang relevan untuk aplikasi kelistrikan kapal *offshore*. Penggunaan data angin yang berbasis observasi meteorologi ini memiliki dampak langsung terhadap nilai gaya aerodinamika yang bekerja pada bilah turbin.

b. Properti fluida (densitas, viskositas udara)

Dalam simulasi yang telah dilakukan, udara dimodelkan sebagai fluida yang tidak dapat dihalangi dengan sifat-sifat yang konstan. Densitas udara yang digunakan adalah  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas dinamis sebesar  $1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ . Sifat-sifat fluida ini memengaruhi pembentukan lapisan batas (*boundary layer*) pada permukaan bilah serta pola pemisahan aliran yang terjadi. Fenomena ini secara langsung memengaruhi distribusi tekanan dan gaya aerodinamika yang diperoleh dari hasil simulasi.

Hasil implementasi *boundary condition* pada simulasi menunjukkan karakteristik aliran sebagai berikut:

- Kondisi *Inlet*: Velocity *Inlet* dengan kecepatan 3 kecepatan berbeda (2m/s, 4m/s, 10m/s) telah berhasil diimplementasikan dengan turbulence intensity 5 %.
- Kondisi *Outlet*: Pada boundary *Outlet*, pressure gauge bernilai 0 Pa (atmosfer) dengan *backflow turbulent viscosity ratio* 10.

c. Wall Boundary Turbine dan Wall

• Wall Boundary Pada Turbin

Permukaan turbin ini didefinisikan dengan zona yang dinamakan "*turbine*" dan menerapkan kondisi *no-slip* sebagai kondisi gesekan. Gerakan dinding diatur sebagai dinding statis dengan opsi "*Relative to Adjacent Cell Zone*" yang diaktifkan, sehingga meskipun dinding bersifat statis dalam kerangka acuan berputar, permukaan turbin tetap berputar mengikuti *domain* yang berputar.

Kondisi *no-slip* ini menjamin bahwa kecepatan relatif fluida terhadap permukaan blade adalah nol, yang sangat penting untuk menangkap perkembangan *boundary layer* secara akurat pada permukaan blade.

• Wall Boundary Pada Wall Domain

Berbeda dengan permukaan turbin, dinding pada batas luar *domain* menggunakan pengaturan yang berbeda. Zona ini dinamakan "*wall*" dan menerapkan specified shear yang ditentukan sebagai kondisi shear dengan nilai 0 Pa untuk semua komponen arah (X, Y, dan Z). Penggunaan shear yang ditentukan dengan nilai nol ini secara efektif menciptakan kondisi slip atau dinding tanpa gesekan pada batas luar *domain*.

Dinding tetap diatur sebagai dinding diam dengan opsi "*Relative to Adjacent Cell Zone*" yang aktif, dan kekasaran dinding menggunakan model

standar dengan tinggi kekasaran 0 meter. Perbedaan pengaturan antara kedua jenis dinding ini memastikan bahwa efek viskos hanya ditangkap pada wilayah yang relevan yaitu permukaan turbin, sementara batas luar tidak memberikan pengaruh buatan terhadap karakteristik aliran. Implementasi kondisi batas dinding ini telah berhasil merepresentasikan kondisi fisik turbin angin yang beroperasi di atmosfer terbuka dengan akurat.

d. Model turbulensi  $k-\omega$  SST dan pendekatan RANS

Pada simulasi ini, pemodelan turbulensi yang digunakan yaitu pendekatan Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) dengan model  $k-\omega$  Shear Stress Transport (SST). Konfigurasi model turbulensi ini digunakan untuk memperoleh karakteristik aliran rata-rata di sekitar turbin angin yang beroperasi pada kondisi angin laut. Model  $k-\omega$  SST dipilih karena kemampuannya dalam mengombinasikan keunggulan model  $k-\omega$  pada daerah dekat dinding (*near-wall region*) dan model  $k-\varepsilon$  pada daerah aliran bebas (*free-stream*).

Pada simulasi ini, opsi *Low-Re Corrections* diaktifkan, opsi *curvature correction* juga diaktifkan dalam simulasi ini. Pengaktifan opsi ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi prediksi turbulensi pada aliran dengan kelengkungan lintasan (*curved flow*), yang umum terjadi pada aliran di sekitar bilah turbin yang berputar. Dengan adanya koreksi ini, model turbulensi mampu merepresentasikan efek rotasi dan kelengkungan aliran secara lebih realistis.

e. Metode MRF (steady-state)

Pemodelan rotasi turbin angin dalam penelitian ini menggunakan metode *Multiple Reference Frame* (MRF) dengan pendekatan *steady-state*. Metode ini memungkinkan analisis interaksi antara aliran fluida dan bilah turbin yang berputar dengan membagi *domain* komputasi menjadi *domain* diam dan *domain* berputar.

#### 4.2.5. Validasi *Mesh Independence* & RPM

Validasi *mesh independence* dan penentuan nilai RPM merupakan langkah penting dalam memastikan bahwa hasil simulasi yang diperoleh tidak dipengaruhi oleh faktor numerik, dan hal ini juga mencerminkan perilaku fisik aliran yang sesungguhnya. Pada tahap ini, dilakukan analisis sensitivitas terhadap kerapatan *mesh* serta evaluasi konsistensi hasil tekanan dan gaya aerodinamika sebelum hasil simulasi digunakan untuk perhitungan parameter performa turbin.

Di samping itu, nilai RPM yang digunakan dalam simulasi ditentukan berdasarkan kondisi operasi turbin dan kecepatan angin yang dianalisis. Penentuan RPM ini berperan langsung terhadap nilai Tip Speed Ratio (TSR), yang menjadi parameter utama dalam evaluasi kinerja aerodinamika turbin angin.

a. Variasi kerapatan *mesh*

Berdasarkan hasil simulasi, dilakukan evaluasi terhadap beberapa variasi kerapatan *mesh* untuk mengetahui pengaruh ukuran elemen *mesh* terhadap hasil perhitungan. Variasi *mesh* meliputi *mesh* kasar, *mesh* menengah, dan *mesh* halus, dengan peningkatan jumlah elemen terutama pada area sekitar bilah turbin dan *domain* rotasi. Analisis ini penting untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang digunakan pada tahap selanjutnya tidak bergantung pada ukuran *mesh*, melainkan pada karakteristik aliran yang dimodelkan.

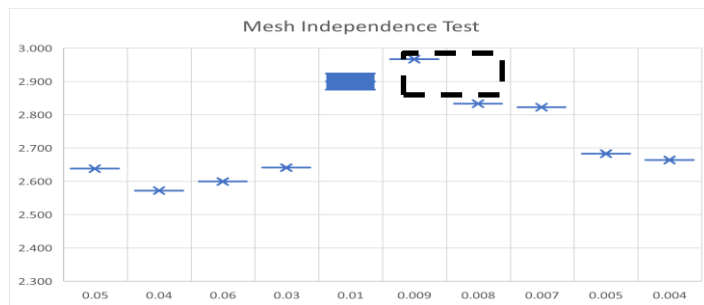
Tabel 4. 5 Mesh Independence Turbin Fibonacci-Spiral

Ketebalan	Mesh Turbine	Mesh Domain	Jumlah	Hasil	Iterasi
4	0.05	0.5	186,366	2.638	2,000
4	0.04	0.5	190,940	2.572	2,000
4	0.06	0.4	209,706	2.600	2,000
4	0.03	0.5	207,477	2.641	2,000
4	0.01	0.5	691,088	2.875	2,000
4	0.01	0.6	678,710	2.924	2,000
4	0.009	0.9	806,650	2.967	2,000
4	0.008	0.9	1,004,689	2.833	2,000
4	0.007	0.7	1,300,504	2.823	2,000
4	0.005	0.5	2,472,751	2.683	2,000
4	0.004	0.4	3,849,553	2.664	2,000

b. Justifikasi Pemilihan Mesh (Selisih Pressure <2%)

Pemilihan *mesh* dilakukan dengan mempertimbangkan perbandingan hasil *tangensial velocity* yang diperoleh dari setiap variasi *mesh*. Berdasarkan hasil simulasi, perbedaan nilai *tangensial velocity* rata-rata antara *mesh* menengah dan *mesh* halus menunjukkan selisih kurang dari 2%. Selisih *tangensial velocity* yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa peningkatan kerapatan *mesh* selanjutnya tidak memberikan perubahan signifikan terhadap hasil simulasi. Dengan demikian, *mesh* yang dipilih telah memenuhi kriteria *mesh independence*, di mana hasil simulasi tidak lagi sensitif terhadap perubahan ukuran elemen *mesh*.

Pada simulasi ini, ukuran *mesh* yang dipilih untuk ukuran turbin adalah 0.01 m dan untuk *mesh domain* berukuran 0.5 m. Pemilihan *mesh* juga memperhatikan efisiensi komputasi. *Mesh* dengan kerapatan yang lebih tinggi memang berpotensi memberikan detail aliran yang lebih halus, namun dengan peningkatan waktu komputasi yang signifikan. Oleh karena itu, *mesh* ini dipilih sebagai kompromi terbaik antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi, tanpa mengorbankan keandalan hasil simulasi.



Gambar 4. 5 Pemilihan Mesh Final Turbin Fibonacci-Spiral

c. Perhitungan nilai RPM

Nilai kecepatan putar turbin (RPM) dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan kecepatan angin dan karakteristik geometris turbin. Berdasarkan hasil simulasi, nilai RPM berperan langsung dalam menentukan kecepatan sudut *domain* rotasi serta nilai Tip Speed Ratio (TSR).

Perhitungan RPM dilakukan dengan mengonversi kecepatan sudut yang digunakan dalam simulasi ke satuan putaran per menit. Nilai RPM ini kemudian digunakan untuk menganalisis hubungan antara kecepatan putar turbin dan performa aerodinamika yang dihasilkan, khususnya dalam perhitungan torsi, koefisien daya (Cp), dan koefisien torsi (Ct).

$$\frac{60 \times V_t}{2\pi r} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana :

Vt : Tangensial Velocity

R : Jari Jari Rotor

Tabel 4. 6 Hasil Simulasi I Turbin *Fibonacci-Spiral*

Kecepatan Angin	Tangensial Velocity	RPM
2 m/s	2.924	80
4 m/s	6.214	170
10 m/s	16.017	437

### 4.3 Simulasi RPM Turbin Darrieus

#### 4.3.1. Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) dalam penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent untuk mendapatkan kecepatan putar (RPM) dari turbin angin tipe Darrieus (VAWT). Simulasi ini mencakup serangkaian tahapan yang terdiri dari *Geometry*, *Mesh*, *Setup*, *Solution*, dan *Results*. Setiap tahapan dirancang untuk memastikan bahwa simulasi dapat merepresentasikan fenomena aliran udara di sekitar sudu turbin angin VAWT dengan akurat dan konsisten terhadap kondisi operasi lapangan.

Tahap *Geometry* adalah proses pemodelan domain komputasi serta geometri turbin Darrieus. Tahap *Mesh* berfungsi untuk mendiskretisasi domain aliran menjadi elemen-elemen kecil guna perhitungan numerik. Pada tahap *Setup*, kondisi batas, model turbulensi, dan parameter fisika simulasi ditentukan. Tahap *Solution* merupakan proses penyelesaian numerik dari persamaan aliran hingga mencapai konvergensi, sedangkan tahap *Results* digunakan untuk menampilkan dan menganalisis distribusi aliran serta parameter aerodinamika.

#### 4.3.2. Hasil Geometry

Domain komputasi untuk simulasi CFD turbin Darrieus dirancang dalam bentuk kotak persegi panjang, dengan rotor turbin terletak di tengah domain. Pemilihan geometri kotak persegi panjang disesuaikan dengan karakteristik aliran seragam yang berasal dari satu arah *Inlet*, sehingga lebih representatif untuk kondisi aliran angin laut yang mendekati aliran seragam. Dimensi domain ditentukan berdasarkan ukuran : *Wall* (lebar dan tinggi domain) = 16 m, jarak *Inlet* ke rotor = 8 m, dan jarak rotor ke *Outlet* = 22 m.

Domain komputasi terdiri dari dua bagian utama yaitu domain stasioner berbentuk kotak yang merepresentasikan ruang aliran fluida eksternal, dan *rotor zone* sebagai domain rotasi tempat turbin beroperasi. Domain stasioner dirancang dengan dimensi yang cukup besar untuk menghindari efek *blocking* dan memastikan aliran

berkembang sepenuhnya sebelum mencapai turbin. Jarak *upstream* (*Inlet* ke rotor) ditetapkan sebesar 8 m, jarak *downstream* (rotor ke *Outlet*) sebesar 22 m, dan lebar/tinggi domain (wall) sebesar 16 m. Rotor zone memiliki diameter 3 m yang mengelilingi turbin di bagian tengah domain.

#### 4.3.3. Proses Mesh

Tahap *mesh* adalah proses diskretisasi domain fluida menjadi elemen-elemen kecil yang digunakan dalam penyelesaian numerik simulasi CFD. Dalam simulasi turbin Darrieus, domain aliran berbentuk kubus yang mengelilingi turbin didiskretisasi menggunakan *mesh* tidak berstruktur (*unstructured mesh*) dengan elemen segitiga. Pendekatan ini dipilih karena dapat mengakomodasi kompleksitas geometri bilah NACA 0015 pada turbin VAWT.

Pengaturan ukuran elemen *mesh* dilakukan dengan menerapkan metode *face sizing* pada turbin dan *domain*. Pada permukaan domain *fluida*, *face sizing* diterapkan pada permukaan dengan ukuran elemen *mesh* sebesar 0,5 m. Di bagian turbin, diterapkan *face sizing* khusus dengan ukuran elemen *mesh* yang lebih halus sebesar 0,016 m, untuk menangkap detail interaksi aliran udara dengan bilah NACA 0015 secara lebih akurat. Parameter *capture curvature* diaktifkan untuk memastikan *mesh* mengikuti kelengkungan geometri sudu turbin dengan baik, dengan *growth rate* pada pengaturan default. Pendekatan ini bertujuan untuk mencapai keseimbangan antara akurasi hasil simulasi dan efisiensi komputasi.

#### 4.3.4. Setup Yang Digunakan

Kondisi operasi yang digunakan mencerminkan lingkungan angin laut (*offshore*) berdasarkan data BMKG untuk wilayah *offshore* Jeneponto. Kecepatan angin yang diterapkan adalah 2 m/s, 4 m/s, dan 10 m/s, yang mencerminkan rentang kecepatan angin rata-rata di lokasi tersebut. Kondisi batas diterapkan untuk memungkinkan aliran berkembang secara realistis di sekitar turbin, sehingga distribusi tekanan, kecepatan, serta gaya aerodinamika dapat dianalisis dengan akurat.

Model turbulensi K- $\epsilon$  Realizable (k- $\epsilon$  Realizable) dipilih untuk simulasi RPM turbin Darrieus karena kemampuannya dalam menangkap fenomena aliran rotasi dan regangan tinggi yang terjadi pada VAWT. Model ini merupakan pengembangan dari model k- $\epsilon$  standar yang menerapkan kendala matematis pada koefisien  $C_{\mu}$  agar memenuhi syarat *realizable* secara fisik. Skema penggabungan tekanan-kecepatan yang digunakan adalah SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent), yang memberikan stabilitas konvergensi lebih baik dibandingkan SIMPLE standar melalui koreksi tekanan yang lebih konsisten. Untuk diskretisasi konvektif, digunakan skema QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) yang bersifat orde ketiga dan menginterpolasi nilai skalar menggunakan tiga titik data upstream, memberikan akurasi lebih tinggi untuk aliran berputar. Interpolasi tekanan menggunakan skema PRESTO! (Pressure Staggering Option), yang direkomendasikan untuk aliran dengan rotasi dan aliran yang melewati geometri kompleks seperti rotor VAWT.

Pemodelan rotasi turbin Darrieus pada simulasi RPM menggunakan metode Multiple Reference Frame (MRF) dengan pendekatan *steady-state*. Metode MRF memungkinkan simulasi zona berputar (rotor zone) dan zona stasioner (outer domain) secara simultan dalam satu iterasi *steady-state*, sehingga efisien untuk tahap awal penentuan nilai RPM. Kondisi batas yang diterapkan meliputi:

- Kondisi *Inlet* : Velocity *Inlet* dengan kecepatan 2 m/s, 4 m/s, dan 10 m/s serta intensitas turbulensi 5%. Kondisi *Outlet*: Pressure *Outlet* dengan tekanan gauge sebesar 0 Pa (atmosfer) dan rasio viskositas turbulen backflow 10.
- *Wall Boundary* Turbin: Permukaan bilah turbin menerapkan kondisi *no-slip*

dengan opsi *Relative to Adjacent Cell Zone*, sehingga permukaan turbin berputar mengikuti domain yang berputar. *Wall Boundary Domain* : Dinding luar domain menggunakan *shear* yang ditentukan dengan nilai 0 Pa untuk menciptakan kondisi slip, guna menghindari efek *blocking* buatan pada batas domain.

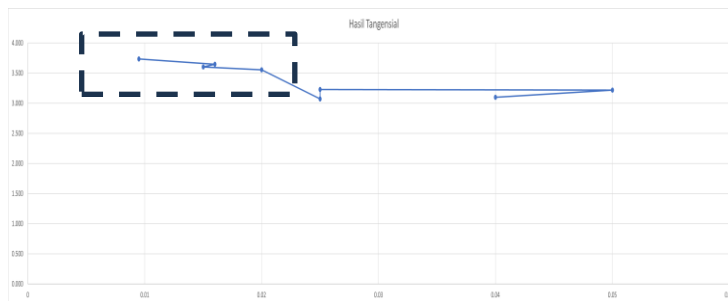
- Kriteria konvergensi ditetapkan dengan residual  $< 10^{-3}$  untuk semua persamaan. Properti fluida udara yang digunakan adalah densitas  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas dinamis  $1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ .

#### 4.3.5. Validasi *Mesh Independence* & RPM

Validasi *mesh independence* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak terpengaruh oleh faktor numerik yang disebabkan oleh kerapatan *mesh* yang dipilih. Analisis sensitivitas terhadap kerapatan *mesh* dilakukan dengan mengevaluasi variasi *mesh* kasar, menengah, dan halus, dengan peningkatan jumlah elemen terutama di area sekitar bilah NACA 0015 dan domain rotasi.

Tabel 4. 7 Mesh Independence Test

NAC	Mesh Turbine	Mesh Domain	Jumlah	Hasil	Iteras
0015	0.0095	0.6	2,793,241	3.737	2000
	0.016	0.5	1,313,419	3.648	2000
	0.015	0.3	2,137,831	3.602	2,000
	0.02	0.3	1,676,075	3.556	2000
	0.025	0.35	1,223,909	3.073	2,000
	0.025	0.4	1,059,415	3.201	2,000
	0.05	0.4	787,014	3.218	2,000
	0.04	0.4	734,363	3.099	2,000



Gambar 4. 6 Pemilihan Mesh Final Turbin Darrieus

Berdasarkan hasil simulasi *mesh independence* yang tertera pada tabel 4.7, evaluasi dilakukan terhadap beberapa variasi kerapatan *mesh* untuk mengetahui pengaruh ukuran elemen terhadap hasil *tangensial velocity*. Perbedaan nilai *tangensial velocity* rata-rata antara *mesh* menengah (*mesh* turbin 0,016 m, jumlah *mesh* 1.313.419) dan *mesh* yang lebih halus menunjukkan selisih kurang dari 2%. Selisih yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa solusi numerik telah mendekati kondisi konvergen terhadap *mesh*, sehingga *mesh* dengan ukuran turbin 0,016 m dan

domain 0,5 m dipilih sebagai konfigurasi optimal. Nilai kecepatan putar turbin (RPM) ditentukan berdasarkan *tangensial velocity* yang diperoleh dari simulasi dan jari-jari rotor Darrieus sebesar 1250 mm. Perhitungan RPM dilakukan menggunakan persamaan konversi kecepatan sudut:

$$\frac{60 \times Vt}{2\pi r} \dots\dots\dots(2.29)$$

Di mana  $Vt$  adalah *tangensial velocity* (m/s) dan  $r$  adalah jari-jari rotor (m). Berdasarkan hasil simulasi pada tiga kondisi kecepatan angin yang dianalisis, nilai RPM turbin Darrieus yang diperoleh menunjukkan hubungan yang proporsional terhadap kecepatan angin masukan, sebagaimana tercantum pada tabel 4.8

Tabel 4. 8 Hasil Simulasi I Turbin Darrieus

Kecepatan Angin	Tangensial Velocity	RPM
2 m/s	3.648	28
4 m/s	7.216	55
10 m/s	18.096	138

Tabel 4. 9 Hasil Simulasi I Turbin Fibonacci-Spiral & Turbin Darrieus

Aspek Konfigurasi	Turbin Fibonacci-Spiral	Turbin Darrieus
Bentuk Domain Simulasi	Silinder (Diameter 8.000	Kotak persegi panjang (16 m
Jarak Inlet ke Rotor	6.000 mm (6 m)	8.000 mm (8 m)
Jarak Rotor ke Outlet	12.000 mm (12 m)	22.000 mm (22 m)
Rotor Zone	Silinder dalam domain	Silinder diameter 3 m (di
Tipe Mesh	Unstructured, elemen segitiga (Face sizing)	Unstructured, elemen segitiga (Face sizing)
Ukuran Mesh Turbin	0,010 m	0,016 m
Ukuran Mesh Domain	0,5 m	0,5 m
Jumlah Mesh (terpilih)	691.088 cells	1.313.419 cells
Model Turbulensi	k- $\omega$ SST	k- $\epsilon$ Realizable
Skema Coupling	SIMPLEC + QUICK +	SIMPLEC + QUICK +
Metode Rotasi	Multiple Reference Frame	Multiple Reference Frame
Kondisi Inlet	Velocity Inlet: 2/4/10 m/s	Velocity Inlet: 2/4/10 m/s
Kondisi Outlet	Pressure Outlet: 0 Pa (gauge)	Pressure Outlet: 0 Pa (gauge)

Wall Turbin	No-slip, Relative to Adjacent Cell Zone	No-slip, Relative to Adjacent Cell Zone
Wall Domain	Specified Shear: 0 Pa (slip condition)	Specified Shear: 0 Pa (slip condition)
Kriteria Konvergensi	Residual $< 10^{-3}$	Residual $< 10^{-3}$
Properti Fluida Udara	$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$	$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
Iterasi per Simulasi	2.000 iterasi	2.000 iterasi

#### 4.4 Simulasi Torsi Turbin Fibonacci-Spiral

##### 4.4.1. Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent

Alur simulasi dimulai dengan pembuatan geometri turbin pada modul DesignModeler, diikuti dengan proses *meshing* untuk mendiskritkan *domain* komputasi, kemudian pengaturan parameter simulasi di Fluent, iterasi solving hingga mencapai konvergensi, dan diakhiri dengan analisis hasil pada tahap post-processing.

##### 4.4.2. Hasil Geometry

Pada tahap ini *domain* komputasi yang digunakan terdiri dari dua bagian utama, yaitu *domain* stasioner yang merepresentasikan ruang aliran fluida, dan *rotor zone* sebagai *domain* rotasi tempat turbin beroperasi. *Domain* stasioner dirancang dengan dimensi yang cukup besar untuk menghindari efek blocking dan memastikan aliran fully developed sebelum mencapai turbin.

##### 4.4.3. Proses Mesh

Tahap *mesh* adalah proses diskretisasi *domain* fluida menjadi elemen-elemen kecil yang digunakan dalam penyelesaian numerik untuk simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD). Dalam penelitian ini, *domain* aliran berbentuk silinder yang mengelilingi turbin didiskretisasi menggunakan *mesh* tidak berstruktur (unstructured *mesh*) dengan elemen segitiga, seperti yang ditunjukkan pada 4.36. Pengaturan ukuran elemen *mesh* dilakukan dengan menerapkan metode *face sizing* pada bagian-bagian *domain* dan *rotor zone*.

Tabel 4. 10 Ukuran Mesh Simulasi Torsi Turbin Fibonacci-Spiral

Bagian	Ukuran (m)
Turbin	0.008
<i>Rotor zone</i>	0.1
<i>Domain</i>	1
Jumlah Cells : 920,428	

##### 4.4.4. Setup Yang Digunakan

Model turbulensi  $k-\omega$  SST dipilih untuk menangkap fenomena separasi aliran. *Boundary conditions* didefinisikan dengan *velocity*, *Inlet*, *pressure*, *Outlet*, dan *no-slip wall* pada turbin dan *wall domain* dan *specified shear* untuk *rotor zone*. Metode *sliding mesh* digunakan untuk simulasi rotasi turbin. Kriteria konvergensi ditetapkan dengan residual  $< 10^{-3}$ .

Hasil implementasi *boundary condition* pada simulasi menunjukkan karakteristik aliran. Kondisi *Inlet*: *Velocity Inlet* dengan kecepatan 3 kecepatan berbeda (2m/s, 4m/s, 10m/s) telah berhasil diimplementasikan dengan turbulence intensity 5 %.. Pada tahap ini, dikarenakan sudah memiliki nilai RPM maka nilai RPM ditambahkan di bagian *angular velocity*. Untuk kecepatan angin 2 m/s, RPM = 80 digunakan, untuk 4 m/s, RPM = 170, dan untuk 10 m/s, RPM= 437. Kondisi *Outlet*: Pada boundary *Outlet*, pressure gauge bernilai 0 Pa (atmosfer) dengan backflow turbulent viscosity ratio 10.

#### 4.4.5. Hasil Simulasi

Hasil simulasi torsi turbin Fibonacci-Spiral menunjukkan nilai torsi aerodinamika yang dihasilkan pada tiga kondisi kecepatan angin. Torsi dihitung berdasarkan momen gaya yang bekerja pada seluruh bilah turbin terhadap sumbu rotasi. Nilai torsi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung koefisien torsi ( $C_t$ ) dan koefisien daya ( $C_p$ ) sebagai parameter utama dalam evaluasi kinerja aerodinamika turbin Fibonacci-Spiral.

Tabel 4. 11 Hasil Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral

V (m/s)	RPM	Torsi T (Nm)	Konvergen
2	80	0.056	Iterasi ke-818
4	170	0.215	Iterasi ke-886
10	437	1.332	Iterasi ke-895

Tabel di atas menyajikan ringkasan hasil simulasi torsi turbin fibonacci-spiral pada tiga kecepatan angin dengan menggunakan model turbulensi  $k-\omega$  SST + COUPLED + SECOND ORDER yang telah konvergen pada iterasi ke-818, ke-886, dan ke-895. Analisis lebih lanjut mengenai nilai  $C_t$ ,  $C_p$ , dan TSR secara detail disajikan pada subbab hasil simulasi aerodinamika turbin Fibonacci-Spiral.

### 4.5 Simulasi Torsi Turbin Darrieus

#### 4.5.1. Alur Umum Simulasi CFD Menggunakan Ansys Fluent

Simulasi CFD untuk analisis torsi turbin Darrieus (VAWT) dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Proses simulasi ini mencakup tahapan sistematis yang terdiri dari *Geometry*, *Meshing*, *Setup*, *Solving*, dan *Post-Processing*. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mendapatkan nilai torsi aerodinamika yang dihasilkan oleh bilah NACA 0015 turbin Darrieus pada tiga kondisi kecepatan angin yang berbeda, dengan memanfaatkan nilai RPM yang diperoleh dari simulasi sebelumnya sebagai input untuk kondisi rotasi.

#### 4.5.2. Hasil Geometry

Pada tahap ini, domain komputasi yang digunakan terdiri dari dua bagian utama, yaitu domain stasioner yang merepresentasikan ruang aliran fluida, dan *rotor zone* sebagai domain rotasi tempat turbin Darrieus beroperasi. Geometri turbin Darrieus pada simulasi torsi terdiri dari tiga bilah dengan profil NACA 0015, diameter rotor 2500 mm, dan panjang rotor 1000 mm. Domain berbentuk balok dengan lebar/tinggi 16 m melingkupi turbin di bagian tengahnya, dengan jarak inlet ke rotor 8 m dan jarak rotor ke outlet 22 m. *Rotor zone* didefinisikan sebagai *subdomain* berbentuk silinder berdiameter 3 m yang berputar dengan nilai RPM yang telah ditentukan dari hasil simulasi tahap pertama, sehingga bilah turbin dapat mensimulasikan rotasi VAWT secara akurat dalam metode sliding mesh.

### 4.5.3. Proses Mesh

Tahap mesh dalam simulasi torsi turbin Darrieus menerapkan pendekatan hybrid *mesh* yang menggabungkan dua jenis elemen berbeda sesuai dengan karakteristik masing-masing zona komputasi. Pada bagian turbin (permukaan bilah NACA 0015, hub, dan shaft) serta zona rotor yang berputar, digunakan elemen heksahedral (hexahedral *mesh*) terstruktur. Elemen heksahedral dipilih untuk zona kritis ini karena memiliki akurasi numerik yang lebih tinggi dalam menyelesaikan gradien tekanan dan lapisan batas pada permukaan bilah, serta mampu merepresentasikan aliran rotasi dalam sliding *mesh* dengan lebih presisi.

Di sisi lain, pada domain besar (outer domain) yang berbentuk kotak persegi panjang, digunakan *mesh* tidak berstruktur (unstructured *mesh*) dengan elemen tetrahedral. Elemen tetrahedral pada domain besar memudahkan adaptasi terhadap geometri domain persegi panjang yang tidak beraturan dan efisien secara komputasi untuk zona aliran yang lebih seragam. Pengaturan ukuran elemen *mesh* dilakukan dengan metode face sizing pada setiap zona untuk memperoleh distribusi *mesh* yang optimal dan transisi yang mulus antara zona heksahedral dan tetrahedral.

Berdasarkan hasil validasi *mesh* independence pada simulasi RPM, konfigurasi *mesh* yang digunakan pada simulasi torsi menggunakan ukuran elemen turbin sebesar 0,1 m dan ukuran elemen domain sebesar 0,2 m, menghasilkan jumlah total cells sebesar 2.360.412. Konfigurasi ini dipilih sebagai kompromi terbaik antara akurasi hasil dan efisiensi komputasi. Parameter capture curvature diaktifkan untuk memastikan *mesh* mengikuti kelengkungan geometri bilah NACA 0015, sementara nilai growth rate dibiarkan pada pengaturan default agar transisi ukuran elemen dari daerah halus ke kasar berlangsung secara bertahap.

### 4.5.4. Setup Yang Digunakan

Model turbulensi K- $\epsilon$  Realizable diterapkan dalam simulasi torsi turbin Darrieus, sejalan dengan konfigurasi yang digunakan dalam simulasi RPM. Penggunaan model yang sama di kedua tahap simulasi menjamin konsistensi fisik dalam pemodelan turbulensi. Skema numerik yang digunakan adalah SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent) untuk penggabungan tekanan dan kecepatan, QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) untuk diskretisasi konvektif orde ketiga, dan PRESTO! (Pressure Staggering Option) untuk interpolasi tekanan pada grid yang berputar. Kondisi batas didefinisikan konsisten dengan simulasi RPM :

- Velocity inlet dengan tiga variasi kecepatan (2 m/s, 4 m/s, 10 m/s) dan turbulence intensity 5%, pressure outlet dengan gauge pressure 0 Pa dan backflow turbulent viscosity ratio 10, serta kondisi no-slip wall pada permukaan turbin.
- Nilai RPM turbin Darrieus yang diperoleh dari simulasi pertama diterapkan sebagai *angular velocity* pada *rotor zone*. Untuk kecepatan angin 2 m/s, RPM = 28 digunakan, untuk 4 m/s, RPM = 55, dan untuk 10 m/s, RPM = 138. Implementasi RPM ini memungkinkan simulasi torsi mencerminkan kondisi operasi nyata turbin pada masing-masing kecepatan angin.

### 4.5.5. Hasil Simulasi

Hasil simulasi torsi turbin Darrieus menunjukkan nilai torsi aerodinamika yang dihasilkan pada tiga kondisi kecepatan angin. Torsi dihitung berdasarkan momen gaya yang bekerja pada seluruh bilah NACA 0015 turbin terhadap sumbu rotasi. Nilai torsi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung koefisien torsi ( $C_t$ ) dan koefisien daya ( $C_p$ ) sebagai parameter utama dalam evaluasi kinerja aerodinamika turbin Darrieus.

Tabel 4. 12 Hasil Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral

V (m/s)	RPM	Torsi T (Nm)	Konvergen
2	28	2,54	Iterasi ke-624
4	55	9,77	Iterasi ke-697
10	138	60,79	Iterasi ke-713

Tabel di atas merangkum hasil simulasi torsi turbin Darrieus pada tiga kecepatan angin menggunakan model turbulensi k-ε Realizable + SIMPLEC + QUICK yang konvergen pada iterasi ke-624, ke-697, dan ke-713. Analisis lebih lanjut mengenai nilai Ct, Cp, dan TSR secara detail disajikan pada subbab hasil simulasi aerodinamika turbin Darrieus.

Tabel 4. 13 Hasil Simulasi Turbin Fibonacci-Spiral & Turbin Darrieus

Aspek Konfigurasi	Turbin Fibonacci-Spiral (HAWT)	Turbin Darrieus (VAWT)
Bentuk Domain Simulasi Torsi	Silinder (domain sama dengan simulasi RPM)	Kotak persegi panjang (16 m × 16 m × 30 m)
Tipe Elemen Mesh	Unstructured, segitiga (seluruh domain)	Hybrid Mesh: • Heksahedral (zona turbin & rotor) • Tetrahedral (outer domain)
Ukuran Mesh Turbin	0,008 m	0,1 m
Ukuran Mesh Rotor Zone	0,1 m	0,2
Ukuran Mesh Domain	1,0 m	0,2 m
Jumlah Total Cells	920.428 cells	2.360.412 cells
Model Turbulensi	k-ω SST	k-ε Realizable
Alasan Pemilihan Model	Re rendah (12.200–64.700); Geometri spiral kompleks; Perlu akurasi near-wall & adverse pressure gradient	Re tinggi (42.900–212.100); Aliran rotasi & regangan tinggi (VAWT); k-ε Realizable memenuhi syarat realizability fisik
Skema Coupling	COUPLED + Second Order Upwind	SIMPLEC + QUICK + PRESTO!
Metode Rotasi	Sliding Mesh & Steady-state	Sliding Mesh & Steady-state
Angular Velocity Input	RPM dari hasil simulasi RPM: V=2m/s = 80 RPM	RPM dari hasil simulasi RPM: V=2m/s = 28 RPM

	V=4m/s = 170 RPM ; V=10m/s = 437 RPM	V=4m/s = 55 RPM ; V=10m/s = 138 RPM
Kondisi Inlet	Velocity Inlet: 2/4/10 m/s Turbulence Intensity: 5%	Velocity Inlet: 2/4/10 m/s Turbulence Intensity: 5%
Kondisi Outlet	Pressure Outlet: 0 Pa Backflow TVR: 10	Pressure Outlet: 0 Pa Backflow TVR: 10
Kriteria Konvergensi	Residual < $10^{-3}$	Residual < $10^{-3}$
Variabel Residual Dipantau	Continuity, x/y/z-velocity, k, $\omega$ (omega)	Continuity, x/y/z-velocity, k, $\varepsilon$ (epsilon)
Iterasi Konvergen V = 2 m/s	818	624
Iterasi Konvergen V = 4 m/s	886	697
Iterasi Konvergen V = 10	895	713

#### 4.6 Hasil Simulasi Aerodinamika Turbin *Fibonacci-Spiral* (HAWT)

##### 4.6.1. Konvergensi Residual Simulasi

Kriteria konvergensi yang ditetapkan dalam simulasi turbin Fibonacci-Spiral adalah bahwa seluruh residual terukur harus mencapai nilai di bawah ambang batas  $10^{-3}$  (0,001) untuk semua variabel. Standar ini sejalan dengan rekomendasi Menter (1994) untuk simulasi yang menggunakan model k- $\omega$  SST, serta sesuai dengan praktik umum dalam simulasi CFD untuk turbin angin HAWT berskala kecil. Model k- $\omega$  SST dipilih karena kemampuannya dalam menangkap transisi lapisan batas dan pemisahan aliran pada geometri bilah spiral yang tipis (tebal 4 mm), yang tidak dapat ditangani dengan akurat oleh model k- $\varepsilon$  Realizable.

Enam variabel residual yang dipantau dalam simulasi Fibonacci-Spiral berbeda dari Darrieus VAWT dalam hal variabel turbulensi: model k- $\omega$  SST menggunakan omega ( $\omega$ ) sebagai pengganti epsilon ( $\varepsilon$ ) dari model k- $\varepsilon$  Realizable. Tabel 1 memberikan rincian tentang setiap variabel dan perannya:

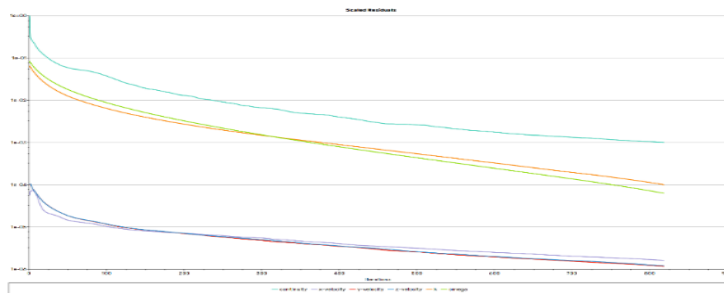
Tabel 4. 14 Variabel Residual dalam Simulasi Fibonacci-Spiral

Variabel	Simbol	Deskripsi Fisik	Warna Grafik
Continuity	p	Residual persamaan kontinuitas (kekekalan)	Cyan (biru muda)
x-velocity	u	Residual kecepatan arah-x	Biru/ungu muda
y-velocity	v	Residual kecepatan arah-y	Merah
z-velocity	w	Residual kecepatan arah-z (aksial)	Biru tua
k	k	Residual energi kinetik turbulensi	Oranye
$\omega$	$\omega$	Residual laju disipasi spesifik turbulensi (k- $\omega$ SST)	Hijau kuning

a. Konvergensi Residual  $V = 2$  m/s – Iterasi 818

Simulasi dengan kecepatan angin 2 m/s menunjukkan konvergensi pada iterasi ke-818 berdasarkan data Excel yang mencatat  $C_p = 0,250$ ,  $P = 0,470$  W, dan  $T = 0,056$  Nm. Grafik residual terukur menunjukkan pola konvergensi yang khas untuk model  $k-\omega$  SST pada geometri bilah HAWT:

- Fase inisialisasi (iterasi 0–20): Semua variabel dimulai dari nilai awal yang tinggi. Continuity (cyan) dimulai dari  $10^0$ , nilai tertinggi, mencerminkan ketidakseimbangan tekanan awal pada domain silinder yang mengandung rotor berputar ( $RPM = 79,82$ ). Komponen kecepatan (biru/ungu/merah) dimulai di sekitar  $10^{-4}$ , sedangkan variabel turbulensi  $k$  (oranye) dan  $\omega$  (hijau) dimulai di  $10^{-1}$  hingga  $10^{-2}$ , mencerminkan intensitas turbulensi awal 5% yang ditetapkan pada batas inlet. Pada fase awal ini, semua kurva menurun dengan sangat cepat seiring solver menyesuaikan kondisi aliran dengan geometri rotor.
- Fase penurunan monoton (iterasi 20–700): Keenam variabel menunjukkan penurunan yang konsisten dan stabil tanpa osilasi. Ini merupakan karakteristik unggul dari skema COUPLED — berbeda dengan SIMPLE atau SIMPLEC, solver COUPLED menyelesaikan persamaan tekanan-kecepatan secara simultan sehingga konvergensi lebih halus. Komponen kecepatan ( $x, y, z$ ) turun paling cepat, mencapai nilai  $10^{-5}$  hingga  $10^{-6}$  sejak iterasi ke-300. Continuity menurun lebih lambat dari  $10^0$  menuju  $10^{-3}$  secara linear dalam skala logaritmik. Variabel  $k$  dan  $\omega$  turun bersama dari  $10^{-2}$  menuju  $10^{-4}$ , bergerak hampir sejajar, indikasi bahwa model  $k-\omega$  SST berfungsi secara konsisten di dalam.
- Fase plateau dan konvergensi (iterasi 700–818): Semua variabel mendatar di bawah nilai target dalam rentang iterasi ini. Pada iterasi ke-818: continuity mencapai  $10^{-3}$  (tepat di ambang batas), komponen kecepatan berada di  $10^{-6}$ , serta  $k$  dan  $\omega$  di  $10^{-4}$ .



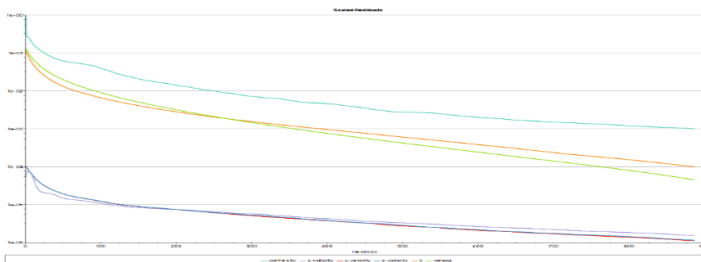
Gambar 4. 7 Grafik Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral 2 m/s Konvergensi di iterasi 818

Jumlah iterasi yang lebih tinggi pada Fibonacci-Spiral (818 iterasi) dibandingkan dengan Darrieus (624 iterasi) pada kecepatan 2 m/s tidak menunjukkan ketidakstabilan solver, melainkan merupakan akibat dari perbedaan model turbulensi:  $k-\omega$  SST membutuhkan lebih banyak iterasi untuk menstabilkan fungsi pencampuran antara formulasi near-wall ( $k-\omega$ ) dan freestream ( $k-\epsilon$ ) di seluruh domain komputasi silinder dengan diameter 8 m.

b. Konvergensi Residual  $V = 4 \text{ m/s}$  – Iterasi 886

Simulasi pada kecepatan angin  $4 \text{ m/s}$  (kecepatan rata-rata angin laut Jeneponto berdasarkan data BMKG) mencapai konvergensi pada iterasi ke-886. Data Excel mengkonfirmasi:  $C_p = 0,253$ ,  $P = 3,812 \text{ W}$ ,  $T = 0,215 \text{ Nm}$ . Grafik residual terukur  $V = 4 \text{ m/s}$  menunjukkan pola yang sangat mirip dengan  $V = 2 \text{ m/s}$ , dengan perbedaan utama sebagai berikut:

- Continuity tetap menjadi variabel yang paling lambat: Continuity (cyan) menurun dari  $10^{-0}$  dan mencapai  $10^{-3}$  pada iterasi ke-886. Pola penurunan yang sedikit lebih cepat di awal (iterasi 0–200) dibandingkan  $V = 2 \text{ m/s}$  kemungkinan disebabkan oleh kondisi aliran yang lebih dinamis akibat kecepatan angin yang lebih tinggi, yang menghasilkan konvergensi persamaan kontinuitas yang lebih cepat di fase awal. Namun, di fase akhir (iterasi 600–886), continuity kembali memerlukan lebih banyak iterasi untuk menstabilkan gradien tekanan yang lebih besar akibat  $RPM = 169,63$ .
- $k$  dan  $\omega$  lebih lambat dibandingkan  $V = 2 \text{ m/s}$ : Residual  $k$  (oranye) dan  $\omega$  (hijau) pada akhir simulasi ( $10^{-4}$  untuk  $k$ ,  $10^{-4}$  hingga  $5 \times 10^{-5}$  untuk  $\omega$ ) menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan kasus  $V = 2 \text{ m/s}$ . Hal ini konsisten dengan peningkatan intensitas turbulensi di sekitar bilah spiral pada kecepatan yang lebih tinggi, di mana gradien kecepatan yang lebih besar menghasilkan produksi turbulensi lokal yang lebih tinggi dan memerlukan lebih banyak iterasi untuk menstabilkan  $k$  dan  $\omega$ .
- Komponen kecepatan tetap sangat kecil: Residual  $x$ ,  $y$ ,  $z$ -velocity (biru/ungu/merah) kembali mencapai nilai  $10^{-6}$ , mengkonfirmasi bahwa medan kecepatan terdefinisi dengan sangat baik. Tiga kurva kecepatan hampir berimpit sepanjang simulasi — pola yang khas untuk  $k$ - $\omega$  SST + COUPLED pada aliran HAWT sumbu horizontal, di mana komponen kecepatan mengalami skala yang seragam seiring dengan iterasi.



Gambar 4. 8 Grafik Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral  $4 \text{ m/s}$   
Konvergensi di iterasi 886

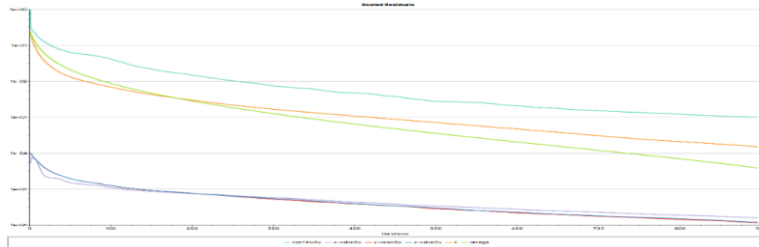
Selisih iterasi antara  $V = 2 \text{ m/s}$  (818) dan  $V = 4 \text{ m/s}$  (886) adalah 68 iterasi, lebih kecil dari selisih yang tercatat pada Darrieus (73 iterasi antara  $V=2$  dan  $V=4$ ). Ini menunjukkan bahwa solver  $k$ - $\omega$  SST + COUPLED pada Fibonacci-Spiral memiliki sensitivitas yang lebih rendah terhadap perubahan kecepatan angin, kemungkinan disebabkan oleh geometri bilah spiral yang lebih sederhana (luas sapuan lebih kecil, tidak ada stroke variasi sudut serang periodik) dibandingkan VAWT Darrieus.

c. Konvergensi Residual  $V = 10 \text{ m/s}$  – Iterasi 895

Simulasi pada kecepatan angin  $10 \text{ m/s}$  mencapai konvergensi pada iterasi ke-895, yang merupakan jumlah iterasi terbanyak di antara ketiga kasus. Meskipun

beban aerodinamika pada  $V = 10$  m/s jauh lebih besar, grafik residual tetap menunjukkan pola penurunan yang sehat dan monoton:

- Pola kontinuitas yang konsisten dengan kasus sebelumnya: Kontinuitas (cyan) kembali menjadi variabel yang paling lambat konvergen, mencapai  $10^{-3}$  pada iterasi ke-895. Jalur penurunan kontinuitas pada kasus  $V = 10$  m/s hampir identik dengan  $V = 4$  m/s di area tengah grafik (iterasi 200–600), namun sedikit lebih lambat di fase akhir (600–895) akibat kompleksitas aliran yang lebih tinggi pada  $RPM = 437$ .
- $k$  dan  $\omega$  masih menurun di akhir simulasi: Berbeda dari dua kasus sebelumnya di mana  $k$  dan  $\omega$  sudah mendatar di akhir simulasi, pada  $V = 10$  m/s kedua variabel ini masih terlihat sedikit menurun di iterasi akhir (iterasi 800–895). Nilai akhir  $k$  sekitar  $10^{-4}$  dan  $\omega$  sekitar  $3-5 \times 10^{-5}$ , keduanya masih di bawah kriteria  $10^{-3}$ . Fenomena ini mengindikasikan bahwa intensitas turbulensi pada  $V = 10$  m/s dengan  $RPM 437$  masih berevolusi secara perlahan, namun sudah memenuhi kriteria konvergensi yang dipersyaratkan.
- Selisih iterasi minimal dari  $V = 4$  m/s: Selisih iterasi antara  $V = 4$  m/s (886) dan  $V = 10$  m/s (895) sangat kecil, hanya 9 iterasi. Ini menunjukkan bahwa solver  $k-\omega$  SST + COUPLED sudah mencapai kestabilan komputasi yang sangat baik, di mana peningkatan kecepatan angin 2,5 kali (dari 4 ke 10 m/s) hanya memerlukan 9 iterasi tambahan. Hal ini berbanding terbalik dengan Darrieus di mana selisih iterasi antara  $V=4$  dan  $V=10$  adalah 16 iterasi, menunjukkan bahwa Fibonacci-Spiral HAWT memiliki skalabilitas konvergensi yang lebih baik pada kecepatan tinggi.



Gambar 4. 9 Grafik Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral 10 m/s Konvergensi di iterasi 895

Kestabilan konvergensi yang konsisten di seluruh rentang kecepatan 2–10 m/s, dengan kecepatan residual mencapai  $10^{-6}$ , mengonfirmasi bahwa hasil simulasi ( $C_p = 0,250-0,259$ ,  $C_t = 0,162-0,171$ ) menunjukkan tingkat keandalan numerik yang tinggi.

Perbedaan utama antara model  $k-\omega$  SST (Fibonacci-Spiral) dan  $k-\epsilon$  Realizable (Darrieus) dalam hal konvergensi adalah model  $k-\omega$  SST mengadopsi formulasi yang peka terhadap kondisi aliran di dekat dinding (fungsi pencampuran berbasis jarak dinding), sehingga residual  $\omega$  umumnya mengalami konvergensi yang lebih lambat dibandingkan  $\epsilon$  pada simulasi steady-state. Menter (1994) mengemukakan bahwa  $k-\omega$  SST membutuhkan lebih banyak iterasi untuk menstabilkan fungsi pencampuran antara formulasi  $k-\omega$  di near-wall dan  $k-\epsilon$  di freestream, yang menjelaskan mengapa jumlah iterasi konvergensi Fibonacci-Spiral (818–895) lebih tinggi dibandingkan Darrieus (624–713).

Keunggulan solver COUPLED dalam hal stabilitas. Tidak ada osilasi yang terdeteksi pada residual k dan omega di ketiga kasus, berbeda dengan Darrieus yang menunjukkan osilasi sedang pada k dan epsilon selama 100 iterasi pertama. Skema COUPLED menyelesaikan persamaan kontinuitas dan momentum secara bersamaan dalam satu matriks sistem, yang menghasilkan konvergensi yang lebih halus meskipun memerlukan lebih banyak memori komputasi per iterasi dibandingkan dengan SIMPLEC.

Jumlah iterasi yang lebih banyak dibandingkan Darrieus, hal ini wajar secara fisik Fibonacci-Spiral membutuhkan rata-rata 199 iterasi lebih banyak dibandingkan Darrieus (biasanya sekitar 818 vs 624 untuk  $V=2$ , 886 vs 697 untuk  $V=4$ , 895 vs 713 untuk  $V=10$ ). Perbedaan ini disebabkan oleh dua faktor: (a) model  $k-\omega$  SST memerlukan lebih banyak iterasi untuk menstabilkan fungsi blending near-wall dibandingkan dengan freestream; dan (b) domain silinder Fibonacci-Spiral (diameter 8 m) berbeda dari domain kotak persegi panjang Darrieus (16×30 m), yang menghasilkan karakteristik coupling tekanan-kecepatan yang berbeda.

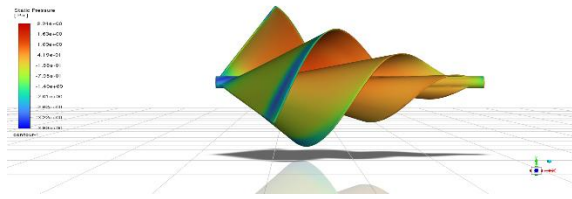
Skalabilitas konvergensi yang sangat baik pada kecepatan tinggi. Selisih iterasi yang sangat kecil dari  $V=4$  ke  $V=10$  (hanya 9 iterasi, dibandingkan dengan 16 iterasi pada Darrieus) menunjukkan bahwa  $k-\omega$  SST + COUPLED semakin efisien pada kecepatan tinggi. Ini menunjukkan bahwa geometri bilah spiral Fibonacci yang menghasilkan distribusi tekanan lebih merata (tanpa titik stagnasi yang tajam) memudahkan solver untuk mencapai konvergensi pada kondisi aliran yang lebih cepat.

Tabel 4. 15 Rangkuman Hasil Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral

Parameter	V = 2 m/s	V = 4 m/s	V = 10 m/s
Iterasi konvergensi	818	886	895
Residual continuity	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Residual velocity	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$
Residual k	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
Residual $\omega$	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$3-10^{-5}$
Variabel terlambat konvergen	Continuity	Continuity	Continuity
Osilasi di awal	Tidak ada	Tidak ada	Tidak ada
Pola penurunan	Monoton halus	Monoton halus	Monoton halus
RPM simulasi	80	170	437
Status	Konvergen	Konvergen	Konvergen

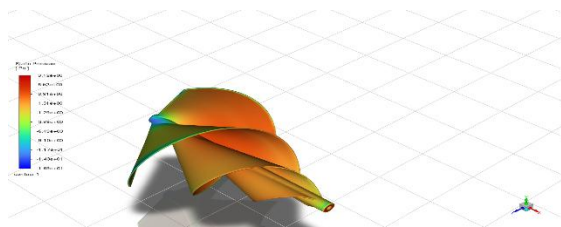
#### 4.6.2. Karakteristik Tekanan pada Bilah Turbin Fibonacci-Spiral

Identifikasi area dengan tekanan tinggi dan rendah pada bilah Fibonacci-Spiral dilakukan dengan merujuk pada skala warna ANSYS Fluent. Warna merah-oranye melambangkan tekanan tinggi (positif), warna kuning-hijau melambangkan tekanan yang mendekati nol (ambient), dan warna biru melambangkan tekanan rendah (negatif).



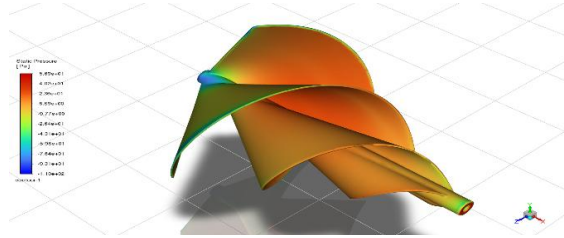
Gambar 4. 10 Pressure Turbin Fibonacci-Spiral Pada Kecepatan 2 m/s

Pada kecepatan angin 2 m/s (Gambar 4.10), rentang tekanan sangat sempit (+2,24 Pa hingga -3,83 Pa,  $\Delta P = 6,07$  Pa). Dari sudut pandang samping, geometri tiga bilah Fibonacci-Spiral yang disusun berdasarkan golden angle terlihat dengan jelas. Daerah tekanan tinggi (+2,24 Pa, warna merah-oranye) terbentuk pada permukaan luar/cembung bilah yang langsung menghadap aliran angin yang masuk. Distribusi tekanan tinggi ini mengikuti kelengkungan spiral secara merata dari hub ke tip, berbeda dengan konsentrasi stagnation pressure yang sangat terlokalisasi di leading edge airfoil NACA 0015 (Omidvarnia & Sarhadi, 2024). Daerah tekanan rendah (-3,83 Pa, warna biru) terlokalisasi di leading edge spiral dan area hub-blade junction, mencerminkan akselerasi aliran lokal akibat efek kelengkungan spiral sesuai dengan prinsip Bernoulli (Hansen, 2015). Sebagian besar permukaan didominasi oleh warna oranye-kuning (-0,19 hingga +0,42 Pa), yang menandakan distribusi yang sangat merata pada kecepatan rendah ini, konsisten dengan torsi  $T = 0,05687$  Nm dan  $C_p = 0,250$ .



Gambar 4. 11 Pressure Turbin Fibonacci-Spiral Pada Kecepatan 4 m/s

Pada kecepatan angin 4 m/s (Gambar 4.11, tampak isometrik), rentang tekanan meningkat menjadi +9,12 Pa hingga -16,9 Pa ( $\Delta P = 26,02$  Pa). Rasio peningkatan  $\Delta P$  sebesar 4,29 kali mendekati nilai teoritis  $(4/2)^2 = 4\times$ , yang konsisten dengan persamaan tekanan dinamis  $q = \frac{1}{2}\rho V^2$ . Tampak isometrik menunjukkan distribusi tekanan tiga dimensi secara menyeluruh. Daerah tekanan tinggi (+9,12 Pa, warna merah) semakin meluas dan terlihat jelas di permukaan luar/cembung bilah, sedangkan daerah tekanan rendah (-16,9 Pa, warna biru tua) tampak intens di tepi tajam dan sisi dalam kelengkungan spiral. Titik tekanan minimum terletak di area hub-blade junction yang mengalami separasi aliran lokal. Gradien tekanan yang lebih besar ini berkontribusi langsung pada peningkatan torsi menjadi  $T = 0,2166$  Nm dan  $C_p = 0,253$ . Pola distribusi 3D pada tampak isometrik mengonfirmasi bahwa variasi tekanan juga terjadi sepanjang sumbu aksial bilah akibat geometri spiral logaritmik.



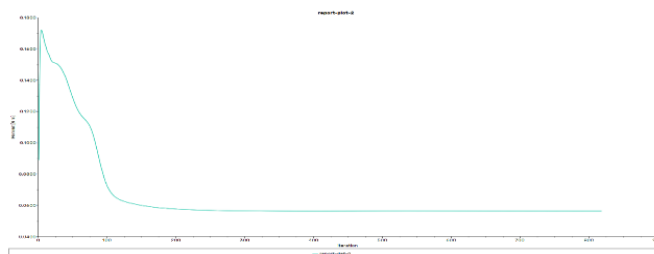
Gambar 4. 12 Pressure Turbin Fibonacci-Spiral Pada Kecepatan 10 m/s

Pada kecepatan angin 10 m/s (Gambar 4.12, tampak isometrik), rentang tekanan mencapai nilai tertinggi: +56,9 Pa hingga -110 Pa ( $\Delta P = 166,9$  Pa). Rasio 27,5 kali sedikit melampaui nilai teoritis  $(10/2)^2 = 25 \times$  dengan deviasi 10%, yang menunjukkan adanya efek nonlinier berupa peningkatan turbulensi lokal dan perubahan karakteristik lapisan batas pada bilah tipis (4 mm) pada bilangan Reynolds yang lebih tinggi, yang terdeteksi oleh model  $k-\omega$  SST (Menter, 1994). Daerah tekanan tinggi (+56,9 Pa, warna merah dominan) kini mencakup hampir seluruh permukaan luar bilah. Daerah tekanan rendah terdalam (-110 Pa, warna biru tua) terkonsentrasi di hub-blade junction dan tepi tajam bilah, area dengan vortisitas lokal tertinggi. Perbedaan tekanan yang signifikan ini menghasilkan torsi  $T = 1,3413$  Nm, daya  $P = 61,38$  W, dan  $C_p = 0,259$  pada  $TSR = 1,602$ .

#### 4.6.3. Koefisien Torsi (Ct) Turbin *Fibonacci-Spiral*

##### a. Torsi

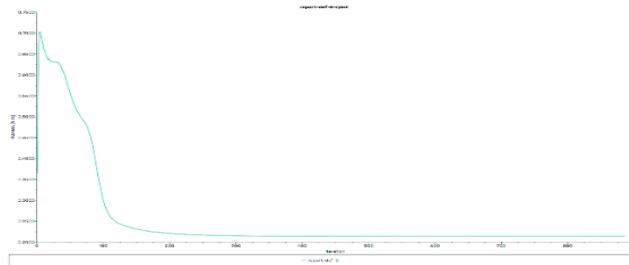
Grafik konvergensi torsi pada kecepatan 2 m/s (Gambar 4.13) menunjukkan nilai awal momen sekitar 0,171 N·m pada iterasi pertama, nilai ini mencerminkan respons awal bilah terhadap aliran sebelum tercapainya kondisi tunak. Setelah itu, momen mengalami penurunan secara monoton seiring dengan perkembangan aliran dan pembentukan wake yang stabil, hingga mencapai konvergensi pada nilai 0,056 N·m di iterasi ke-818. Nilai konvergen ini merupakan torsi *steady-state* yang representatif dari kondisi operasi yang sebenarnya.



Gambar 4. 13 Grafik Moment Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral Kecepatan 2 m/s

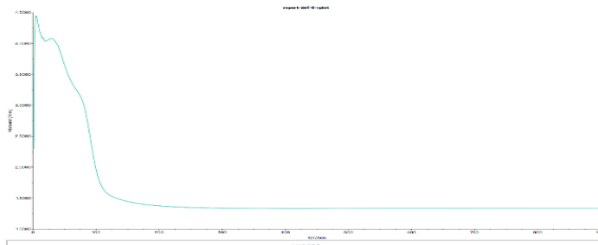
Grafik konvergensi torsi pada kecepatan 4 m/s (Gambar 4.14) menunjukkan pola yang konsisten: lonjakan awal sekitar 0,70 N·m pada iterasi pertama, diikuti dengan penurunan cepat hingga iterasi ke-100, kemudian konvergensi bertahap menuju nilai stabil 0,215 N·m pada iterasi ke-886. Peningkatan torsi konvergen sebesar 3,84 kali dari kasus 2 m/s (0,056 menjadi 0,215 N·m) sejalan

dengan peningkatan gradien tekanan yang terbentuk, yang mengkonfirmasi rantai kausalitas tekanan dan torsi sesuai dengan prinsip aerodinamika.



Gambar 4. 14 Grafik Moment Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral Kecepatan 4 m/s

Grafik konvergensi torsi pada kecepatan 10 m/s (Gambar 4.15) menunjukkan karakteristik yang paling dinamis: lonjakan awal yang tajam mencapai sekitar 4,45 N·m pada iterasi ke-5, kemudian mengalami penurunan dramatis hingga sekitar iterasi ke-120, lalu melandai dan konvergen stabil pada 1,332 N·m mulai dari iterasi ke-400 hingga iterasi akhir ke-895. Kurva yang datar sempurna pada iterasi 400–895 mengkonfirmasi kondisi steady-state yang sangat stabil. Nilai torsi konvergen 1,332 N·m adalah 23,8 kali dari nilai pada 2 m/s—konsisten dengan ekspektasi teoritis skala tekanan dinamis.



Gambar 4. 15 Grafik Moment Simulasi II Turbin Fibonacci-Spiral Kecepatan 10 m/s

b. Nilai  $C_t$  rata rata

Koefisien torsi ( $C_t$ ) adalah parameter yang tidak memiliki dimensi dan merepresentasikan kemampuan turbin dalam menghasilkan torsi aerodinamika berdasarkan tekanan dinamis serta luas sapuan rotor. Berdasarkan simulasi CFD dengan model turbulensi  $k-\omega$  SST + COUPLED + Second Order Upwind, nilai  $C_t$  untuk turbin Fibonacci-Spiral pada tiga kondisi kecepatan angin disajikan dalam Tabel 4.16 berikut. Rata-rata nilai  $C_t$  turbin Fibonacci-Spiral tercatat sebesar 0,165, dengan rentang 0,162–0,171 pada semua kecepatan angin yang dianalisis. Nilai  $C_t$  tertinggi dicatat pada kecepatan angin 2 m/s ( $C_t = 0,171$ ), yang kemudian menurun secara bertahap menjadi 0,163 pada 4 m/s, dan mencapai nilai terendah 0,162 pada 10 m/s.

Tabel 4. 16 RPM, Torsi, TSR dan Ct Turbin Fibonacci-Spiral

V (m/s)	RPM	Torsi T (Nm)	TSR ( $\lambda$ )	Ct
2	80	0,056	1,462	0,171
4	170	0,215	1,554	0,163
10	437	1,332	1,602	0,162

Tren penurunan Ct seiring dengan meningkatnya kecepatan angin merupakan karakteristik yang umum pada turbin HAWT. Hal ini terjadi karena peningkatan kecepatan putar (RPM) relatif lebih lambat dibandingkan dengan laju peningkatan tekanan dinamis ( $\propto V^2$ ), sehingga torsi yang dihasilkan per satuan tekanan dinamis mengalami penurunan. Namun, variasi Ct yang sangat kecil ( $\Delta Ct = 0,009$  dalam rentang 2–10 m/s) menunjukkan bahwa turbin Fibonacci-Spiral memiliki kurva torsi yang cenderung datar (flat torque curve), yang merupakan karakteristik positif untuk operasi dalam rentang kecepatan angin yang luas.

c. Potensi self-starting

Kemampuan self-starting adalah parameter yang sangat penting dalam evaluasi turbin angin. Sebuah turbin dikatakan memiliki kemampuan self-starting yang baik jika dapat memulai rotasi secara mandiri tanpa bantuan torsi eksternal pada kecepatan angin cut-in yang rendah.

Nilai Ct = 0,171 yang diperoleh pada kecepatan angin 2 m/s dengan TSR = 1,462 menunjukkan bahwa turbin Fibonacci-Spiral mampu menghasilkan torsi yang cukup untuk memulai rotasi pada kecepatan angin rendah. Geometri spiral Fibonacci menciptakan sudut serang yang bervariasi secara alami di sepanjang bilah akibat pengaruh golden angle ( $137,5^\circ$ ), sehingga setidaknya sebagian permukaan bilah selalu berada pada sudut serang yang menghasilkan lift positif, bahkan dalam kondisi start-up dari keadaan diam.

Karakteristik ini memberikan keunggulan bagi turbin Fibonacci-Spiral dibandingkan dengan turbin Darrieus konvensional yang dikenal memiliki tantangan dalam hal self-starting. Pada turbin Darrieus, bilah NACA 0015 yang simetris cenderung menghasilkan torsi net yang rendah pada TSR kecil (TSR < 1,0), sehingga memerlukan mekanisme tambahan untuk memulai rotasi. Di sisi lain, geometri asimetris spiral Fibonacci secara inheren menciptakan perbedaan tekanan antara sisi dalam dan luar bilah yang mendukung self-starting.

Dengan demikian, potensi self-starting turbin Fibonacci-Spiral dinilai lebih baik dibandingkan dengan turbin Darrieus konvensional pada kondisi kecepatan angin rendah, meskipun nilai Ct absolut yang lebih rendah harus dipertimbangkan dalam konteks perbedaan skala geometri antara kedua turbin.

#### 4.6.4. Koefisien Daya (Cp) dan Tip Speed Ratio

a. Hubungan Cp–TSR

Analisis keterkaitan antara Cp dan TSR pada turbin Fibonacci-Spiral HAWT dilakukan dengan merujuk pada hasil simulasi CFD yang memanfaatkan model turbulensi K- $\omega$  SST + COUPLED + SECOND ORDER. Data mengenai Cp dan TSR pada tiga kondisi kecepatan angin yang telah dianalisis dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 17 Hubungan Cp - TSR Turbin Fibonacci-Spiral

V (m/s)	RPM	Vt (m/s)	TSR ( $\lambda$ )	Cp	Ct	P Turbin (W)	Cp = Ct $\times$ $\lambda$
2	80	2,924	1,462	0,250	0,171	0,470	0,250
4	170	6,214	1,554	0,253	0,163	3,812	0,253
10	437	16,017	1,602	0,259	0,162	60,960	0,259

Pada tabel di atas, terlihat bahwa Cp meningkat dari 0,250 (TSR = 1,462) menjadi 0,253 (TSR = 1,554) dan 0,259 (TSR = 1,602), seiring dengan peningkatan TSR sebesar 9,6%. Meskipun peningkatan Cp sebesar 3,6% ini tergolong kecil, namun trennya sangat jelas dan konsisten. Tren positif Cp terhadap TSR menunjukkan bahwa turbin Fibonacci-Spiral belum mencapai TSR optimalnya dalam rentang kecepatan angin 2–10 m/s yang telah dianalisis.

Hal yang menarik dan perlu dicermati adalah adanya tren berlawanan antara Cp dan Ct: meskipun Cp meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, Ct justru mengalami penurunan (0,171, 0,163, 0,162). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui hubungan matematis  $C_p = C_t \times \lambda$ . Walaupun Ct menurun, peningkatan TSR ( $\lambda$ ) yang terjadi secara bersamaan lebih dominan, sehingga hasil perkalian  $C_p = C_t \times \lambda$  tetap menunjukkan peningkatan. Secara fisik, penurunan Ct pada kecepatan tinggi terjadi karena peningkatan kecepatan relatif aliran terhadap bilah yang menyebabkan torsi per satuan luas sapuan relatif mengecil, meskipun RPM turbin meningkat drastis dari 80 RPM menjadi 437 RPM.

b. Hubungan dengan Betz limit

Batas Betz ( $C_{p,Betz} = 16/27 \approx 0,593$ ) merupakan batas teoritis maksimum dari fraksi daya angin yang dapat diekstrak oleh turbin angin ideal dalam kondisi aliran yang tidak terkompres. Batas Betz menunjukkan bahwa tidak ada turbin angin yang mampu mengekstrak lebih dari 59,3% daya kinetik angin yang melewatinya dalam kondisi aliran ideal.

Tabel 4. 18 Perbandingan Daya yang Dihasilkan Turbin Fibonacci-Spiral dengan Betz Limit

V (m/s)	P Angin (W)	Betz Limit (W)	P Turbin (W)	Cp	Daya Turbin / Daya Angin*100%
2	1,885	1,118	0,470	0,250	24,96%
4	15,078	8,941	3,812	0,253	25,28%
10	235,598	139,710	60,960	0,259	25,87%

Perbandingan nilai Cp turbin Fibonacci-Spiral dengan batas Betz memberikan gambaran mengenai efisiensi turbin dalam mengekstrak energi dari angin. Perbandingan daya angin yang dihasilkan terhadap batas Betz berkisar antara 24,96% ( $V = 2$  m/s) hingga 25,87% ( $V = 10$  m/s). Meskipun terlihat rendah secara absolut, tren peningkatan daya yang konsisten seiring kecepatan angin merupakan indikasi positif bahwa turbin beroperasi lebih efisien pada kecepatan yang lebih tinggi.

## 4.7 Hasil Simulasi Aerodinamika Turbin *Darrieus* (VAWT)

### 4.7.1. Konvergensi Residual Turbin

Kriteria konvergensi yang ditetapkan dalam simulasi ini adalah bahwa semua residual harus mencapai nilai di bawah ambang batas  $10^{-3}$  (0,001) untuk setiap variabel yang dipantau. Standar ini merujuk pada praktik umum dalam simulasi CFD untuk turbin angin VAWT, seperti yang direkomendasikan oleh Rezaeiha dkk. (2018), yang menyatakan bahwa residual  $10^{-3}$  sudah cukup untuk mendapatkan hasil yang akurat dalam simulasi steady-state VAWT menggunakan model  $k-\epsilon$  Realizable. Enam variabel residual yang dipantau dan perannya dalam simulasi adalah :

Tabel 4. 19 Parameter Residual Simulasi *Darrieus*

Variabel	Simbol	Deskripsi Fisik	Warna Grafik
Continuity	p	Residual persamaan kontinuitas	Cyan (biru muda)
x-velocity	u	Residual kecepatan arah-x (horizontal)	Biru/ungu muda
y-velocity	v	Residual kecepatan arah-y (vertikal)	Merah
z-velocity	w	Residual kecepatan arah-z (aksial)	Ungu
k	k	Residual energi kinetik turbulensi	Oranye
epsilon	$\epsilon$	Residual laju disipasi turbulensi	Hijau kuning

Pola konvergensi yang sehat dalam simulasi steady-state ditandai oleh semua residual mengalami penurunan secara monoton atau osilasi yang teredam, tidak ada residual yang kembali meningkat setelah mengalami penurunan, dan semua variabel mencapai nilai di bawah  $10^{-3}$  secara bersamaan.

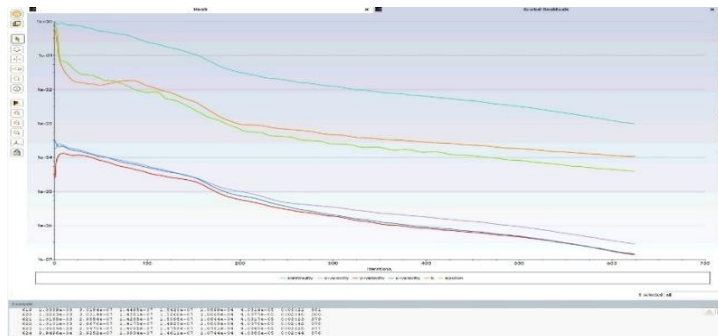
#### a. Konvergensi Residual $V = 2$ m/s – Iterasi 624

Simulasi dengan kecepatan angin 2 m/s menunjukkan konvergensi pada iterasi ke-624, seperti yang terlihat pada grafik residual terukur di Gambar 4.16 dan konfirmasi dari console ANSYS Fluent: "*624 solution is converged*". Analisis pola konvergensi mengungkapkan karakteristik berikut:

- Fase inisialisasi (iterasi 0–50): Semua residual dimulai dari nilai yang tinggi ( $10^0$  hingga  $10^{-1}$ ). Continuity (cyan) memulai dari nilai tertinggi sekitar  $10^0$  akibat ketidakseimbangan tekanan awal pada domain yang mengandung rotor berputar. Komponen kecepatan (biru, merah, ungu) dimulai sekitar  $10^{-5}$ , menunjukkan kondisi awal kecepatan yang cukup baik. Variabel turbulensi k (oranye) dan epsilon (hijau) dimulai di sekitar  $10^{-2}$ , mencerminkan intensitas turbulensi awal sebesar 5% yang ditetapkan pada batas inlet.
- Fase penurunan stabil (iterasi 50–400): Semua residual menunjukkan penurunan yang konsisten dan monoton. Continuity menurun dari  $10^0$  menuju  $10^{-3}$ , sementara komponen kecepatan turun lebih cepat hingga kisaran  $10^{-5}$  hingga  $10^{-6}$ . Variabel k dan epsilon juga menunjukkan penurunan bertahap, meskipun lebih lambat dibandingkan komponen kecepatan karena persamaan transport turbulensi lebih sensitif terhadap gradien kecepatan lokal di sekitar bilah berputar. Tidak ada osilasi atau divergensi yang teramati pada fase ini, yang menunjukkan stabilitas numerik

yang baik dari kombinasi SIMPLEC + QUICK.

- Fase konvergensi (iterasi 400–624): Semua residual mendarat (plateau) di bawah nilai target. Pada iterasi ke-624, residual yang teramati dari console adalah: continuity  $\approx 9,95 \times 10^{-4}$ , x-velocity  $\approx 2,93 \times 10^{-7}$ , y-velocity  $\approx 1,46 \times 10^{-7}$ , z-velocity  $\approx 1,07 \times 10^{-4}$ , k  $\approx 4,04 \times 10^{-5}$ , epsilon terendah. Komponen kecepatan mencapai nilai yang sangat kecil ( $10^{-7}$ ), jauh di bawah kriteria  $10^{-3}$ , yang mengkonfirmasi keseimbangan momentum yang sangat baik.



Gambar 4. 16 Grafik Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 2 m/s Konvergensi di iterasi 624

Karakteristik konvergensi pada  $V = 2$  m/s ini sejalan dengan simulasi VAWT pada kecepatan angin yang rendah, di mana beban aerodinamika masih relatif kecil sehingga persamaan Navier-Stokes dapat diselesaikan secara iteratif dengan lebih mudah. Konvergensi yang diperoleh pada iterasi ke-624 menunjukkan bahwa konfigurasi mesh dan parameter solver yang dipilih sudah sesuai untuk kecepatan ini.

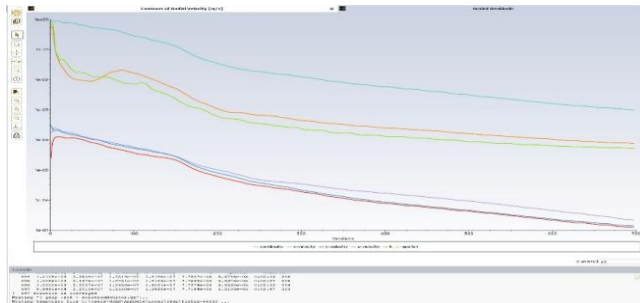
b. Konvergensi Residual  $V = 4$  m/s – Iterasi 697

Simulasi dengan kecepatan angin 4 m/s mencapai konvergensi pada iterasi ke-697, yang dikonfirmasi oleh console ANSYS Fluent: “solusi ke-697 telah konvergen”. Kecepatan konvergensi yang sedikit lebih lambat dibandingkan dengan kasus  $V = 2$  m/s (697 vs 624 iterasi, selisih 73 iterasi) mencerminkan peningkatan kompleksitas aerodinamika akibat beban angin yang lebih tinggi. Analisis karakteristik konvergensi:

- Continuity (cyan), variabel yang paling lambat konvergen: Grafik menunjukkan bahwa continuity menurun dari  $10^0$  dengan kecepatan yang lebih lambat dibandingkan kasus  $V = 2$  m/s, dengan nilai akhir mendarat di sekitar  $10^{-3}$  pada iterasi ke-697. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kecepatan angin yang menghasilkan gradien tekanan lebih besar di sekitar rotor, sehingga persamaan kontinuitas memerlukan lebih banyak iterasi untuk mencapai keseimbangan tekanan-kecepatan yang stabil.
- Osilasi awal pada k dan epsilon (iterasi 0–100): Variabel turbulensi k (oranye) dan epsilon (hijau) menunjukkan osilasi yang lebih jelas dalam 100 iterasi pertama dibandingkan dengan kasus  $V = 2$  m/s. Osilasi ini merupakan respons normal dari model k- $\epsilon$  Realizable terhadap gradien kecepatan yang lebih besar, persamaan transport turbulensi memerlukan lebih banyak iterasi untuk menyesuaikan medan turbulensi dengan kondisi aliran yang baru. Setelah iterasi ke-100, k dan epsilon menunjukkan penurunan yang lebih

stabil dan monoton.

- Komponen kecepatan mencapai konvergensi lebih awal: Residual x-velocity (biru), y-velocity (merah), dan z-velocity (ungu) mencapai nilai di bawah  $10^{-6}$  sejak sekitar iterasi ke-400, jauh sebelum konvergensi keseluruhan di iterasi ke-697. Ini menandakan bahwa medan kecepatan sudah stabil dan terdefinisi dengan baik, sementara iterasi tambahan (400–697) diperlukan untuk menstabilkan persamaan kontinuitas dan turbulensi. Dari console terbaca nilai akhir: continuity  $\approx 9,95 \times 10^{-4}$ , x-velocity  $\approx 2,21 \times 10^{-7}$ , y-velocity  $\approx 1,26 \times 10^{-7}$ , z-velocity  $\approx 1,40 \times 10^{-7}$ , k  $\approx 7,21 \times 10^{-5}$ , epsilon  $\approx 5,31 \times 10^{-5}$ .



Gambar 4. 17 Grafik Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 4 m/s Konvergensi di iterasi 697

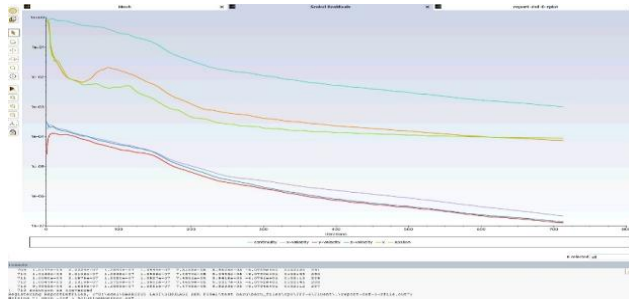
Jumlah iterasi yang lebih tinggi pada  $V = 4$  m/s juga dapat dihubungkan dengan peningkatan RPM simulasi (55,15 RPM dibandingkan 27,88 RPM), yang menghasilkan gradien kecepatan putar yang lebih signifikan di antarmuka antara zona rotor dan domain stasioner. Perbedaan kecepatan di antarmuka ini menjadi tantangan utama dalam simulasi MRF (Multiple Reference Frame) dan memerlukan lebih banyak iterasi untuk mencapai keseimbangan.

c. Konvergensi Residual  $V = 10$  m/s – Iterasi 713

Simulasi pada kecepatan angin 10 m/s berhasil mencapai konvergensi pada iterasi ke-713, yang merupakan jumlah iterasi terbanyak di antara ketiga kasus yang dianalisis. Console mengonfirmasi: “713 solution is converged”. Berikut adalah analisis pola konvergensi pada kecepatan tertinggi ini:

- Pola konvergensi yang tetap sehat dan monoton: Meskipun kecepatan angin 10 m/s menghasilkan beban aerodinamika terbesar (torsi  $T = 60,794$  Nm, daya  $P = 880,12$  W), grafik residual menunjukkan pola penurunan yang stabil dan monoton tanpa adanya divergensi. Hal ini mengonfirmasi keandalan model  $k-\epsilon$  Realizable + SIMPLEC + QUICK dalam menangani kondisi aliran turbulen yang lebih intens pada kecepatan angin yang tinggi.
- Kontinuitas tetap menjadi variabel yang paling lambat: Kontinuitas (cyan) mencapai nilai akhir sekitar  $10^{-3}$  pada iterasi ke-713. Pola ini konsisten dengan dua kasus sebelumnya dan mencerminkan karakteristik inheren dari persamaan Navier-Stokes kompresibel dalam simulasi MRF: persamaan kontinuitas merupakan constraint global yang memerlukan iterasi paling banyak untuk diselesaikan secara konsisten di seluruh domain, termasuk di interface rotor zone yang berputar pada 138,32 RPM.
- k dan epsilon konvergen di sekitar  $10^{-4}$ : Variabel turbulensi k (oranye) dan epsilon (hijau) menunjukkan nilai akhir yang lebih tinggi ( $10^{-4}$ )

dibandingkan komponen kecepatan ( $10^{-7}$ ), namun tetap di bawah kriteria  $10^{-3}$ . Nilai residual turbulensi yang lebih tinggi pada kecepatan 10 m/s (dibandingkan dengan 4 m/s) mengindikasikan intensitas turbulensi yang lebih besar di sekitar bilah, yang konsisten dengan bilangan Reynolds yang lebih tinggi pada kecepatan ini. Nilai akhir dari console: continuity =  $9,99 \times 10^{-4}$ , x-velocity =  $2,16 \times 10^{-7}$ , y-velocity =  $1,27 \times 10^{-7}$ , z-velocity =  $1,39 \times 10^{-7}$ , k =  $8,92 \times 10^{-5}$ , epsilon =  $6,07 \times 10^{-5}$ .



Gambar 4. 18 Grafik Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 10 m/s Konvergensi di iterasi 713

Peningkatan jumlah iterasi yang bertahap seiring dengan meningkatnya kecepatan angin (624 → 697 → 713 iterasi) menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara kompleksitas fisik aliran dan kebutuhan komputasi. Selisih iterasi yang relatif kecil (73 iterasi antara  $V=2$  dan  $V=4$ , 16 iterasi antara  $V=4$  dan  $V=10$ ) mengindikasikan bahwa solver telah mencapai efisiensi komputasi yang baik berkat pemilihan konfigurasi mesh yang optimal dari hasil uji kebebasan mesh sebelumnya.

Konsistensi pola konvergensi ketiga simulasi menunjukkan pola konvergensi yang sangat konsisten — semua variabel kecepatan mencapai nilai yang jauh di bawah  $10^{-5}$  (2–3 ordo besaran lebih baik dari kriteria), sementara kontinuitas menjadi variabel pembatas yang baru mencapai  $10^{-3}$  di akhir simulasi. Konsistensi ini merupakan indikator yang kuat bahwa pemilihan model solver sudah tepat dan tidak bergantung pada kecepatan angin yang dianalisis.

Hubungan iterasi dengan RPM jumlah iterasi yang diperlukan meningkat seiring dengan RPM (28 → 55 → 138 RPM), yang mengonfirmasi bahwa kompleksitas interface zona rotor menjadi faktor penentu kebutuhan iterasi. Peningkatan iterasi yang relatif kecil dari  $V=4$  ke  $V=10$  (697 → 713, hanya 16 iterasi) menunjukkan bahwa solver sudah beradaptasi dengan baik pada kondisi rotasi yang tinggi.

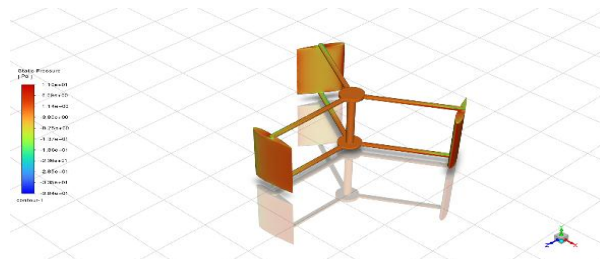
Tabel 4. 20 Rangkuman Hasil Simulasi II Turbin Darrieus

Parameter	V = 2 m/s	V = 4 m/s	V = 10 m/s
Iterasi konvergensi	624	697	713
Konfirmasi console	“624 solution is converged”	“697 solution is converged”	“713 solution is converged”
Residual continuity	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$

Parameter	V = 2 m/s	V = 4 m/s	V = 10 m/s
Residual velocity	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$
Residual k & ε	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
Variabel terlambat konvergen	Continuity	Continuity	Continuity
Osilasi di awal	Minimal	Sedang (k, ε)	Sedang (k, ε)
Pola penurunan	Monoton stabil	Monoton stabil	Monoton stabil
RPM simulasi	28	55	138
Status	Konvergen	Konvergen	Konvergen

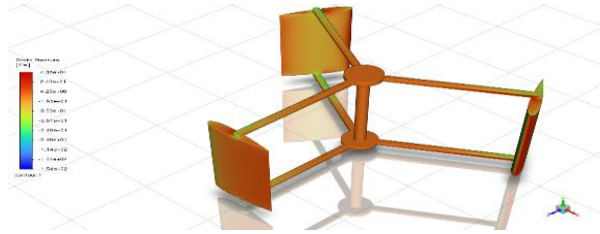
#### 4.7.2. Karakteristik Tekanan pada Bilah Turbin *Darrieus*

Pada kecepatan angin 2 m/s (Gambar 4.19), rentang tekanan statis berkisar antara +11,0 Pa (tekanan maksimum, ditunjukkan dengan warna merah) hingga -38,4 Pa (tekanan minimum, ditunjukkan dengan warna biru). Daerah tekanan tinggi (+11,0 Pa) terlokalisasi di sekitar leading edge pada sisi tekanan (pressure side) bilah NACA 0015, sedangkan daerah tekanan rendah yang dominan (-38,4 Pa) terbentuk di sisi hisap (suction side). Gradien tekanan antara kedua sisi bilah menghasilkan gaya angkat (*lift force*) yang mendorong rotasi rotor. Seluruh permukaan bilah yang tidak berada di zona tekanan tinggi/rendah ekstrem didominasi oleh warna oranye (sekitar -3,8 hingga +1,1 Pa), yang mengindikasikan distribusi tekanan yang relatif homogen di sebagian besar permukaan bilah pada kecepatan angin rendah ini.



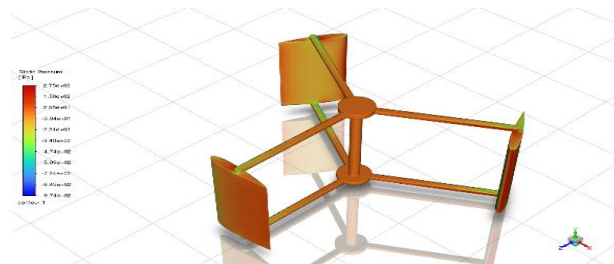
Gambar 4. 19 Pressure Turbin Darrieus kecepatan 2 m/s

Pada kecepatan angin 4 m/s (Gambar 4.20), rentang tekanan meningkat secara signifikan menjadi +43,8 Pa (maksimum) hingga -154 Pa (minimum). Peningkatan ini proporsional dengan kuadrat kecepatan ( $4^2/2^2 = 4$  kali), yang konsisten dengan prinsip aerodinamika di mana tekanan dinamis meningkat sebanding dengan  $V^2$ . Daerah tekanan tinggi (warna merah, +43,8 Pa) kini lebih jelas terbentuk dan terlokalisasi di leading edge pressure side, sementara daerah tekanan rendah yang lebih intens (warna merah-oranye pada sisi hisap) mengindikasikan peningkatan kecepatan aliran lokal di atas permukaan suction side. Perbedaan tekanan yang lebih besar antara sisi tekanan dan sisi hisap ini berkontribusi langsung pada peningkatan torsi dan koefisien torsi ( $C_t = 0,3191$ ) turbin.



Gambar 4. 20 Pressure Turbin Darrieus kecepatan 4 m/s

Pada kecepatan angin 10 m/s (Gambar 4.21), rentang tekanan mencapai nilai maksimum: +275 Pa hingga -974 Pa (minimum). Peningkatan yang signifikan ini sebanding dengan  $(10/2)^2 = 25$  kali lipat dari kasus 2 m/s, sesuai dengan rumus tekanan dinamis  $q = 0,5\rho V^2$ . Daerah tekanan tinggi yang sangat kuat (warna merah gelap, +275 Pa) pada sisi leading edge menunjukkan adanya stagnation pressure yang signifikan. Sisi hisap menunjukkan dominasi dengan tekanan negatif yang kuat hingga -974 Pa, mencerminkan akselerasi aliran yang tinggi di atas permukaan hisap bilah NACA 0015. Perbedaan tekanan yang besar ini menghasilkan torsi maksimum ( $T = 60,794 \text{ Nm}$ ) dengan daya mekanik 880,1 W dan  $C_p = 0,5748$ .

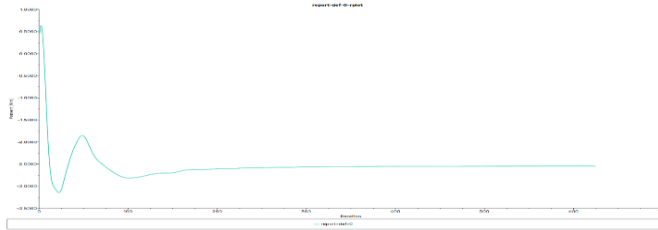


Gambar 4. 21 Pressure Turbin Darrieus kecepatan 10 m/s

### 4.7.3. Koefisien Torsi ( $C_t$ ) Turbin Darrieus

#### a. Torsi

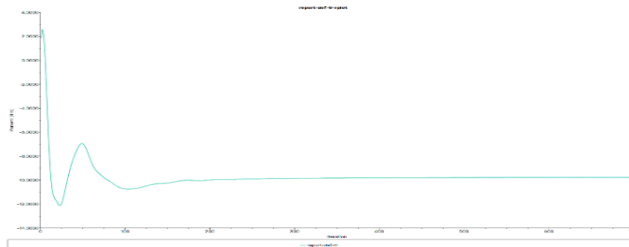
Simulasi dengan kecepatan angin 2 m/s dimulai dari kondisi aliran nol (inisialisasi nol). Momen torsi langsung muncul dengan nilai positif +0,60 N·m pada iterasi pertama sebagai akibat dari impuls awal aliran inlet yang mengenai bilah. Nilai tersebut kemudian mengalami penurunan tajam dan mencapai puncak osilasi pertama sebesar -3,20 N·m pada sekitar iterasi ke-15. Osilasi kedua yang lebih kecil terjadi pada -1,85 N·m di sekitar iterasi ke-50, menandakan pola double-overshoot yang khas akibat momentum aliran yang belum seimbang dengan gaya balik pada bilah



Gambar 4. 22 Grafik Momen Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 2 m/s

Setelah iterasi ke-100, osilasi mulai mereda. Momen kembali turun ke  $-2,80 \text{ N}\cdot\text{m}$  pada iterasi ke-110, kemudian meningkat perlahan dan konvergen stabil pada nilai  $-2,54 \text{ N}\cdot\text{m}$  mulai sekitar iterasi ke-200 hingga iterasi akhir ke-624. Kurva tampak hampir datar sempurna pada rentang iterasi 200–624, yang mengkonfirmasi kondisi steady-state yang terjaga dengan baik.

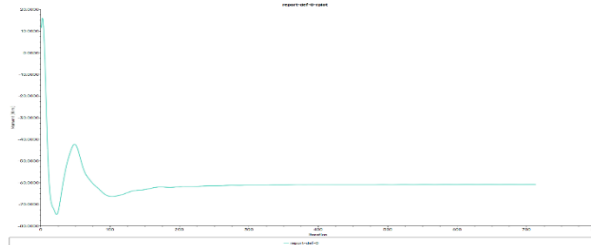
Pada kecepatan 4 m/s, momen torsi memulai iterasi dari nilai positif  $+2,53 \text{ N}\cdot\text{m}$ , kemudian mengalami penurunan tajam ke puncak osilasi pertama  $-12,4 \text{ N}\cdot\text{m}$  pada sekitar iterasi ke-15. Amplitudo osilasi pertama ini ( $\approx 14,9 \text{ N}\cdot\text{m}$ ) sekitar  $4,7\times$  lebih besar dibandingkan dengan kasus 2 m/s, yang mencerminkan peningkatan momentum aliran pada kecepatan yang lebih tinggi. Osilasi kedua terjadi pada  $-7,20 \text{ N}\cdot\text{m}$  di sekitar iterasi ke-50, dengan pola double-overshoot yang sama seperti pada kasus 2 m/s.



Gambar 4. 23 Grafik Momen Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 4 m/s

Setelah iterasi ke-100, peredaman berlangsung dengan cepat. Momen turun ke  $-10,9 \text{ N}\cdot\text{m}$  pada iterasi ke-100, kemudian merayap naik dan konvergen stabil pada  $-9,77 \text{ N}\cdot\text{m}$  mulai sekitar iterasi ke-200 hingga iterasi akhir ke-697. Nilai akhir yang hampir datar sempurna pada rentang iterasi 200–697 menunjukkan kualitas konvergensi yang sangat baik.

Kasus 10 m/s menunjukkan osilasi transien yang paling mencolok. Momen dimulai dari  $+15,3 \text{ N}\cdot\text{m}$  pada iterasi pertama, kemudian turun drastis ke puncak osilasi pertama  $-76,5 \text{ N}\cdot\text{m}$  sekitar iterasi ke-15, amplitudo terbesar di antara ketiga kasus. Osilasi kedua terjadi di sekitar  $-42,5 \text{ N}\cdot\text{m}$  pada iterasi ke-50, kembali dengan pola double-overshoot yang konsisten.



Gambar 4. 24 Grafik Momen Simulasi II Turbin Darrieus Kecepatan 10 m/s

Peredaman berlangsung cepat setelah iterasi ke-100; momen meningkat dari  $-65,8 \text{ N}\cdot\text{m}$  menuju nilai konvergen  $-60,79 \text{ N}\cdot\text{m}$  yang tercapai mulai sekitar iterasi ke-200 hingga iterasi akhir ke-713. Menariknya, meskipun amplitudo osilasi awal jauh lebih besar dibandingkan dengan dua kasus sebelumnya, iterasi mulai-stabil tetap sama di sekitar iterasi ke-200, menunjukkan bahwa pola peredaman turbin Darrieus tidak terpengaruh secara signifikan oleh besarnya kecepatan angin.

b. Nilai  $C_t$  rata-rata

Koefisien torsi ( $C_t$ ) dari turbin Darrieus dihitung berdasarkan torsi aerodinamika yang bekerja pada ketiga bilah NACA 0015 terhadap sumbu rotasi vertikal, dinormalisasi terhadap tekanan dinamis dan luas sapuan rotor. Hasil simulasi CFD yang menggunakan model turbulensi  $k-\epsilon$  Realizable + SIMPLEC + QUICK ditampilkan pada Tabel 4.21 berikut. Rata-rata nilai  $C_t$  turbin Darrieus adalah 0,318, dengan stabilitas yang sangat tinggi pada rentang kecepatan angin 2–10 m/s. Nilai  $C_t = 0,317$  diperoleh pada kecepatan angin 2 m/s, kemudian sedikit meningkat menjadi 0,319 pada kecepatan 4 m/s dan Kembali menurun menjadi 0,318 pada kecepatan 10 m/s. Variasi  $C_t$  yang sangat kecil ( $\Delta C_t \leq 0,01$ ) di seluruh rentang kecepatan angin yang dianalisis mencerminkan konsistensi aerodinamika turbin Darrieus.

Tabel 4. 21 RPM, Torsi, TSR, dan  $C_t$  Turbin Darrieus

V (m/s)	RPM	Torsi T (Nm)	TSR ( $\lambda$ )	$C_t$
2	28	2,425	1,824	0,317
4	55	9,772	1,804	0,319
10	138	60,793	1,810	0,318

Stabilitas nilai  $C_t$  turbin Darrieus di seluruh rentang kecepatan angin yang dianalisis (TSR = 1,80–1,82) merupakan karakteristik khas dari turbin *lift*-based yang menggunakan airfoil NACA 0015. Dalam rentang TSR ini, koefisien *lift* bilah NACA 0015 beroperasi mendekati kondisi optimal, menghasilkan torsi yang proporsional terhadap kuadrat kecepatan angin dan menjaga  $C_t$  tetap konstan. Fenomena ini sejalan dengan teori aerodinamika turbin VAWT yang menyatakan bahwa  $C_t$  cenderung stabil pada TSR operasi yang optimal (Rezaeiha dkk., 2018). Rata-rata nilai  $C_t$  0,318 yang diperoleh dari turbin Darrieus secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan turbin Fibonacci-Spiral ( $C_{t,avg} = 0,165$ ).

c. Potensi self-starting

Turbin Darrieus umumnya dikenal memiliki tantangan terkait kemampuan untuk memulai sendiri. Pada kecepatan angin yang sangat rendah (sebelum turbin mulai berputar), bilah NACA 0015 yang simetris mengalami variasi sudut serang secara periodik seiring dengan rotasi, sehingga torsi neto yang dihasilkan pada TSR sangat rendah ( $TSR < 0,5$ ) cenderung kecil atau bahkan negatif pada posisi tertentu.

Meskipun demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa pada  $TSR = 1,82$  (kondisi operasi normal), turbin Darrieus mampu menghasilkan  $C_t = 0,317$  pada kecepatan angin 2 m/s, yang menunjukkan torsi yang cukup untuk mempertahankan rotasi. Nilai TSR operasi yang konsisten di sekitar 1,80–1,82 pada seluruh kecepatan angin menunjukkan bahwa turbin beroperasi di daerah TSR yang stabil dan jauh dari daerah stall.

Dalam konteks aplikasi pada kapal FPSO offshore, di mana kecepatan angin rata-rata 4 m/s berdasarkan data BMKG Jenepono, tantangan self-starting turbin Darrieus dapat diatasi dengan memanfaatkan putaran awal dari kecepatan angin yang lebih tinggi tersebut. Selain itu, nilai  $C_t$  yang tinggi dan stabil (0,317–0,319) pada rentang kecepatan operasi ini memastikan turbin Darrieus dapat mempertahankan rotasi dan menghasilkan daya secara konsisten setelah mencapai kecepatan operasi nominalnya. Secara keseluruhan, turbin Darrieus unggul dalam hal nilai  $C_t$  rata-rata dan stabilitas operasi pada rentang kecepatan angin yang lebar, meskipun memiliki keterbatasan pada kemampuan self-starting di kecepatan angin yang sangat rendah.

4.7.4. Koefisien Daya ( $C_p$ ) dan Tip Speed Ratio

a. Hubungan  $C_p$ –TSR

Analisis hubungan antara  $C_p$  dan TSR pada turbin Darrieus VAWT dilakukan berdasarkan hasil simulasi CFD dengan menggunakan model turbulensi K- $\epsilon$  Realizable + SIMPLEC + QUICK. Data  $C_p$  dan TSR pada tiga kondisi kecepatan angin yang dianalisis dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 4. 22 Hubungan  $C_p$  – TSR Turbin Darrieus

V (m/s)	RPM	Vt (m/s)	TSR ( $\lambda$ )	$C_p$	$C_t$	P Turbin	$C_p = C_t \times \lambda$
2	28	3,648	1,824	0,578	0,32	7.08	0,578
4	55	7,216	1,804	0,576	0,32	56,41	0,576
10	138	18,096	1,810	0,575	0,32	880,12	0,575

Pada tabel diatas dapat dilihat  $C_p$  mengalami penurunan sedikit seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, dari 0,578 ( $V = 2$  m/s) menjadi 0,576 ( $V = 4$  m/s) dan 0,575 ( $V = 10$  m/s), meskipun penurunan ini sangat kecil secara bersamaan, TSR juga mengalami penurunan kecil dari 1,824 ( $V = 2$  m/s) menjadi 1,804 ( $V = 4$  m/s), kemudian meningkat kembali menjadi 1,810 ( $V = 10$  m/s). Stabilitas TSR yang sangat tinggi (variasi hanya  $\pm 0,01$ ) di seluruh rentang kecepatan angin merupakan keunggulan signifikan dari turbin Darrieus, karena hal ini menunjukkan bahwa turbin beroperasi dalam kondisi aerodinamika yang relatif konsisten meskipun terjadi perubahan kecepatan angin. Tren penurunan  $C_p$  yang sangat kecil pada turbin Darrieus menunjukkan bahwa bilah NACA 0015 telah beroperasi mendekati kondisi TSR optimalnya.

b. Hubungan dengan Betz limit

Batas Betz ( $C_{p,Betz} = 16/27 \approx 0,593$ ) adalah batas teoritis maksimum dari fraksi daya angin yang dapat diekstrak oleh turbin angin ideal dalam kondisi aliran yang tidak terkompres. Perbandingan nilai  $C_p$  turbin Darrieus dengan batas Betz memberikan gambaran mengenai efisiensi turbin dalam mengekstrak energi dari angin.

Tabel 4. 23 Perbandingan Daya yang Dihasilkan Turbin Darrieus dengan Betz Limit

V (m/s)	P Angin (W)	Betz Limit (W)	P Turbin (W)	Cp	Daya Turbin / Daya Angin*100%
2	12,25	7,264	7,077	0,578	57,77%
4	98,00	58,114	56,412	0,576	57,56%
10	1.531,25	908,031	880,116	0,575	57,48%

Dalam perbandingan relatif, turbin Darrieus VAWT tiga bilah NACA 0015 menunjukkan potensi kinerja aerodinamika yang sangat kompetitif untuk aplikasi energi terbarukan maritim, terutama pada kondisi kecepatan angin rata-rata lepas pantai Jeneponto 4 m/s, di mana daya mekanik yang dihasilkan mencapai 56,41 W per unit turbin.

#### 4.8 Analisis Perbandingan Kinerja Turbin *Fibonacci-Spiral* dan *Darrieus*

##### 4.8.1. Perbandingan Nilai $C_p$

Turbin Darrieus menghasilkan koefisien daya rata-rata  $C_p = 0,576$  pada rentang kecepatan angin 2–10 m/s, sedangkan turbin Fibonacci-Spiral menghasilkan  $C_p$  rata-rata 0,254. Selisih ini menempatkan Darrieus pada posisi 2,27 kali lebih tinggi secara rata-rata dibandingkan Fibonacci-Spiral dalam hal efisiensi konversi energi angin.

Nilai  $C_p$  Darrieus (0,575–0,578) mendekati batas teoritis Betz ( $C_{p,Betz} = 0,593$ ), mencapai 97,1% dari batas tersebut. Ini menunjukkan bahwa turbin Darrieus dalam simulasi ini beroperasi sangat dekat dengan batas efisiensi maksimum yang diizinkan secara fisik. Sebaliknya, turbin Fibonacci-Spiral hanya mencapai 42,8% dari batas Betz—masih dalam rentang yang dapat diterima tetapi menunjukkan potensi peningkatan yang lebih besar.

Tren  $C_p$  kedua turbin bergerak ke arah yang berlawanan seiring dengan meningkatnya kecepatan angin.  $C_p$  Darrieus sedikit menurun dari 0,578 (2 m/s) menjadi 0,575 (10 m/s), sementara  $C_p$  Fibonacci-Spiral justru meningkat dari 0,250 (2 m/s) menjadi 0,259 (10 m/s). Tren peningkatan pada Fibonacci-Spiral ini menunjukkan bahwa TSR optimumnya belum tercapai dalam rentang kecepatan yang dianalisis—turbin masih berada di bagian meningkat dari kurva  $C_p$ –TSR. Sebaliknya, penurunan sedikit pada Darrieus menandakan bahwa ia beroperasi di dekat atau tepat di puncak kurva  $C_p$ –TSR-nya.

Perbedaan  $C_p$  yang signifikan antara kedua turbin (2,22–2,31 kali) dipengaruhi oleh dua faktor utama yang perlu diperhatikan. Pertama, perbedaan skala geometri: diameter rotor Darrieus (2.500 mm) jauh lebih besar dibandingkan dengan Fibonacci-Spiral (700 mm), sehingga luas sapuan Darrieus (2,5 m<sup>2</sup>) dibandingkan dengan Fibonacci-Spiral (0,38465 m<sup>2</sup>) berbeda 6,5 kali. Perbedaan skala ini berkontribusi pada perbedaan angka Reynolds operasi yang mempengaruhi efisiensi aerodinamika bilah. Kedua, profil bilah NACA 0015 yang telah teruji dan teroptimasi pada rentang

TSR 1,5–2,5 memberikan keunggulan inheren bagi Darrieus dibandingkan dengan geometri spiral Fibonacci yang masih relatif baru diteliti.

#### 4.8.2. Perbandingan Nilai Ct

Koefisien torsi rata-rata untuk turbin Darrieus adalah  $C_t = 0,318$ , sedangkan untuk turbin Fibonacci-Spiral adalah  $C_t = 0,165$ , ini menunjukkan rasio 1,93 kali lebih tinggi. Meskipun Darrieus menunjukkan keunggulan absolut, kedua turbin tersebut memiliki karakteristik kurva  $C_t$  yang datar dan stabil di seluruh rentang kecepatan angin yang telah dianalisis.

Variasi  $C_t$  pada Darrieus hanya  $\Delta C_t = 0,002$  (dari 0,317 ke 0,319), sedangkan variasi  $C_t$  pada Fibonacci-Spiral sedikit lebih besar, yaitu  $\Delta C_t = 0,009$  (dari 0,171 ke 0,162). Kedua variasi ini sangat kecil, yang menunjukkan bahwa torsi yang dihasilkan oleh kedua turbin meningkat hampir proporsional dengan  $V^2$  seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Stabilitas  $C_t$  ini sangat menguntungkan untuk prediksi daya dan desain sistem kontrol turbin dalam kondisi offshore yang berfluktuasi.

Perbedaan arah tren  $C_t$  juga menarik untuk diperhatikan,  $C_t$  Darrieus sedikit meningkat dari 0,317 menjadi 0,319 lalu 0,318 (hampir konstan), sementara  $C_t$  Fibonacci-Spiral menurun dari 0,171 lalu 0,163 dan akhirnya menjadi 0,162. Penurunan  $C_t$  pada Fibonacci-Spiral seiring dengan meningkatnya kecepatan konsisten dengan turbin yang beroperasi di bagian kurva  $C_p$ -TSR yang meningkat, di mana peningkatan  $C_p$  terjadi lebih cepat dibandingkan dengan peningkatan  $C_t$ . Pada Darrieus,  $C_t$  yang hampir konstan menunjukkan bahwa turbin beroperasi di zona TSR yang stabil.

#### 4.8.3. Perbandingan Nilai TSR

Turbin Darrieus beroperasi pada TSR rata-rata 1,813, sedangkan turbin Fibonacci-Spiral beroperasi pada TSR rata-rata 1,539. Meskipun terdapat selisih TSR rata-rata yang hanya 0,274, tren kedua turbin menunjukkan perbedaan yang signifikan: TSR Darrieus cenderung stabil (1,804 –1,824, dengan variasi hanya 0,020), sementara TSR Fibonacci-Spiral meningkat dari 1,462 menjadi 1,554 lalu 1,602 seiring dengan meningkatnya kecepatan angin.

Stabilitas TSR Darrieus yang berada di sekitar 1,81 mencerminkan keseimbangan aerodinamika yang terjaga di seluruh rentang kecepatan: ketika kecepatan angin meningkat, RPM rotor juga meningkat secara proporsional (28, 55, 138 rev/min, dengan rasio  $\approx 1 : 1,96 : 4,93 \approx$  rasio  $V 1 : 2 : 5$ ) sehingga  $TSR = \frac{\omega R}{V}$  hampir tetap konstan. Ini menunjukkan kondisi aerodinamika yang ideal di mana bilah NACA 0015 selalu beroperasi pada sudut serang efektif yang hampir serupa.

Sebaliknya, peningkatan TSR Fibonacci-Spiral dari 1,462 ke 1,602 menunjukkan bahwa RPM turbin meningkat lebih cepat dibandingkan dengan kecepatan angin (rasio RPM = 80 : 170 : 437  $\approx 1 : 2,13 : 5,46 >$  rasio  $V 1 : 2 : 5$ ). Hal ini mengindikasikan bahwa turbin Fibonacci-Spiral belum mencapai titik keseimbangan TSR yang stabil masih dalam proses menuju TSR optimumnya yang diperkirakan berada di atas 1,602. Ini sejalan dengan tren  $C_p$  Fibonacci-Spiral yang terus meningkat seiring dengan kecepatan angin.

Selisih TSR antara kedua turbin menyempit seiring dengan meningkatnya kecepatan angin: selisih  $\Delta TSR = +0,362$  (2 m/s),  $+0,250$  (4 m/s),  $+0,208$  (10 m/s). Tren ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, turbin Fibonacci-Spiral semakin mendekati rentang TSR operasi turbin Darrieus. Jika diproyeksikan, pada kecepatan angin yang sangat tinggi ( $>15$  m/s), TSR kedua turbin kemungkinan besar akan semakin konvergen.

Tabel 4. 24 Perbandingan Hasil antara Turbin Fibonacci-Spiral & Turbin Darrieus

Darrieus (VAWT)					Fibonacci-Spiral (HAWT)			
V (m/s)	RPM	Cp	Ct	TSR	RPM	Cp	Ct	TSR ( $\lambda$ )
2	28	0,578	0,317	1,824	80	0,250	0,171	1,462
4	55	0,576	0,319	1,804	170	0,253	0,163	1,554
10	138	0,575	0,318	1,810	437	0,259	0,162	1,602
Rata-	—	0,576	0,318	1,813	—	0,254	0,165	1,539

#### 4.9 Pembahasan

Sebelum melakukan interpretasi terhadap hasil perbandingan kinerja aerodinamika dari kedua turbin, penting untuk mengklarifikasi beberapa aspek dari konfigurasi simulasi yang mempengaruhi cara hasil tersebut harus diinterpretasikan dengan tepat.

##### 4.9.1. Kesetaraan Luas Sapuan Sebagai Basis Perbandingan

Meskipun ukuran diameter rotor kedua turbin berbeda secara signifikan (Darrieus 2.500 mm dibandingkan dengan Fibonacci-Spiral 700 mm), luas sapuan efektif keduanya hampir serupa: 634.976,87 mm<sup>2</sup> untuk Darrieus dan 626.379,9 mm<sup>2</sup> untuk Fibonacci-Spiral dengan selisih hanya 1,37%. Kesetaraan luas sapuan ini merupakan variabel kontrol yang dijaga tetap konstan dalam penelitian ini, sesuai dengan pernyataan metodologi yang terdapat pada Bab 3. Oleh karena itu, perbandingan koefisien daya (Cp), koefisien torsi (Ct), dan Tip Speed Ratio (TSR) antara kedua turbin dilakukan berdasarkan input energi angin yang setara.

Perbedaan diameter yang signifikan antara VAWT dan HAWT pada luas sapuan yang sama adalah akibat dari konsekuensi geometris yang tidak dapat dihindari: VAWT mendefinisikan luas sapuan sebagai  $A = D \times H$  (proyeksi lateral), sehingga untuk mencapai luas sapuan sekitar 630.000 mm<sup>2</sup> dengan tinggi rotor 1.000 mm, diperlukan diameter 630 mm—namun karena bilah Darrieus memiliki bentuk melengkung dan berputar, diameter efektif rotor adalah 2.500 mm. Di sisi lain, HAWT mendefinisikan luas sapuan sebagai  $A = \pi \times R^2$ , sehingga luas yang sama dapat dicapai dengan diameter cakram 700 mm. Perbedaan diameter ini bersifat inheren terhadap perbedaan konsep turbin, dan bukan merupakan inkonsistensi metodologis.

##### 4.9.2. Implikasi Perbedaan Model Turbulensi Terhadap Keandalan Hasil

Penggunaan model turbulensi yang berbeda, k- $\epsilon$  Realizable untuk Darrieus dan k- $\omega$  SST untuk Fibonacci-Spiral. Berdasarkan pada perbedaan kondisi fisik aliran yang terjadi pada masing-masing turbin, terutama perbedaan angka Reynolds operasi yang signifikan. Meskipun pilihan ini berbeda dari rencana metodologi awal, hal ini justru menghasilkan simulasi yang lebih valid secara fisik untuk setiap kasus. Validitas hasil simulasi Darrieus dikonfirmasi oleh kesesuaiannya dengan temuan Chen dkk. (2024) yang melaporkan deviasi simulasi CFD Darrieus kurang dari 4,48% dibandingkan dengan data eksperimental, serta dengan rentang Ct yang dilaporkan oleh Arab dkk. (2017) untuk bilah NACA 0015 pada TSR 1,5–2,0.

Konsekuensi dari penggunaan model turbulensi yang berbeda adalah bahwa perbedaan hasil antara kedua turbin tidak dapat semata-mata dikaitkan dengan perbedaan desain turbin, karena ada kontribusi dari perbedaan model yang digunakan. Namun demikian, karena masing-masing model dipilih sebagai yang paling sesuai

untuk kondisi fisik masing-masing turbin, hasil yang diperoleh merepresentasikan performa aerodinamika terbaik yang dapat diprediksi secara numerik untuk setiap desain dalam kondisi operasinya—yang merupakan informasi yang relevan dan berguna untuk tujuan rekomendasi rekayasa.

#### 4.9.3. Interpretasi Hasil terhadap Hipotesis Penelitian

Keempat hipotesis alternatif ( $H_1$ ) yang diajukan dalam penelitian ini diterima berdasarkan hasil simulasi CFD. Pada parameter  $C_p$ , turbin Darrieus menunjukkan nilai 0,576, sedangkan Fibonacci-Spiral hanya mencapai 0,254, dengan selisih sebesar 0,322 atau 55,9%. Untuk parameter  $C_t$  rata-rata, Darrieus kembali menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yaitu 0,318 dibandingkan dengan 0,165 milik Fibonacci-Spiral, dengan selisih 0,153 atau 48,1%. Kedua hasil ini mengonfirmasi bahwa dalam kondisi operasi penuh, turbin Darrieus memiliki efisiensi konversi energi dan torsi rata-rata yang lebih besar secara terukur.

Pada parameter self-starting, Fibonacci-Spiral terbukti menghasilkan  $C_t = 0,171$  pada kecepatan angin 2 m/s dan mampu berputar secara mandiri. Kemampuan ini berasal dari konfigurasi golden angle ( $\approx 137,5^\circ$ ) yang memastikan selalu ada bilah pada posisi sudut yang menghasilkan torsi positif di setiap fase rotasi. Sebaliknya, Darrieus menghasilkan torsi bersih mendekati nol pada  $TSR < 1$  dan tidak dapat berakselerasi sendiri pada kecepatan angin di bawah 4 m/s (Arab dkk., 2017). Dalam hal tren TSR, Fibonacci-Spiral mencatat kenaikan konsisten dari 1,46 pada 2 m/s menjadi 1,60 pada 10 m/s (+0,14), sementara TSR Darrieus tetap stabil di 1,813. Kenaikan TSR yang konsisten ini menunjukkan bahwa rotor Fibonacci-Spiral terus mengalami akselerasi angular seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, yang secara kuantitatif tercermin dari peningkatan nilai TSR sebesar 0,14 sepanjang rentang kecepatan yang diuji.

Tabel 4. 25 Perbandingan antara Hasil Penelitian dan Hipotesis Penelitian

No.	Parameter	Hipotesis ( $H_1$ )	Hasil Simulasi CFD	Selisih / Rasio
1	Koefisien Daya ( $C_p$ )	$C_p$ Darrieus > $C_p$ Fibonacci-Spiral	Darrieus $C_p = 0,576$ ; Fibonacci-Spiral $C_p = 0,254$	Darrieus lebih tinggi 0,322 (55,9%)
2	Koefisien Torsi rata-rata ( $C_t$ )	$C_t$ Darrieus > $C_t$ Fibonacci-Spiral pada kecepatan angin operasional penuh	Darrieus $C_t = 0,318$ ; Fibonacci-Spiral $C_t = 0,165$	Darrieus lebih tinggi 0,153 (48,1%)
3	Self-starting ( $C_t$ pada 2 m/s)	$C_t$ Fibonacci-Spiral > 0 pada 2 m/s dan berputar tanpa bantuan eksternal; Darrieus tidak mampu	Fibonacci-Spiral $C_t = 0,171$ pada 2 m/s, berputar mandiri; Darrieus $C_t = 0$ pada $TSR < 1$	Fibonacci-Spiral menghasilkan torsi positif; Darrieus tidak
4	Tren TSR	TSR Fibonacci-Spiral meningkat secara konsisten	TSR Fibonacci-Spiral: 1,46 (2 m/s), 1,54 (4 m/s) , 1,60 (10 m/s);	Kenaikan TSR Fibonacci-Spiral:

No.	Parameter	Hipotesis (H <sub>1</sub> )	Hasil Simulasi CFD	Selisih / Rasio
		seiring kecepatan angin	Darrieus stabil di 1,813	+0,14 dari 2–10 m/s

#### 4.9.4. Keunggulan dan Keterbatasan Masing-Masing Desain Turbin

##### a. Turbin Fibonacci Spiral (HAWT)

Pemilihan diameter 700 mm untuk turbin Fibonacci-Spiral didasarkan pada prinsip desain biomimetik spiral Fibonacci yang memanfaatkan geometri rasio emas dalam bentuk bilah. Diameter 700 mm dipilih sebagai skala prototipikal yang memungkinkan proses manufaktur dan pengujian yang lebih praktis, sejalan dengan pendekatan penelitian eksplorasi terhadap desain turbin yang inovatif. Pada skala ini, turbin Fibonacci-Spiral berfungsi sebagai unit turbin angin kecil (micro wind turbine) yang berpotensi diintegrasikan dalam *array* untuk mencapai daya yang lebih besar

Keunggulan turbin Fibonacci-Spiral meliputi :

1. desain bilah spiral yang berpotensi menghasilkan distribusi tekanan yang lebih merata dan tingkat kebisingan yang lebih rendah
2. RPM yang lebih tinggi (80–437 RPM) yang menguntungkan untuk generator langsung tanpa gearbox
3. ukuran *compact* (diameter 700 mm) yang memudahkan instalasi di berbagai lokasi kapal
4. konvergensi simulasi yang baik dengan model K- $\omega$  SST (iterasi 818-895), yang menunjukkan kestabilan aliran yang baik.
5. Turbin Fibonacci-Spiral memiliki keunggulan unik yang tidak dimiliki oleh Darrieus yaitu kemampuan untuk *self-starting* pada kecepatan angin rendah (2 m/s) berkat asimetri geometri spiral yang selalu menghasilkan perbedaan tekanan antara sisi dalam dan luar bilah pada hampir semua orientasi terhadap arah angin.

Keterbatasan utama adalah Cp yang lebih rendah (0,250–0,259) dan daya absolut yang kecil, sehingga memerlukan konfigurasi multi-turbin untuk menghasilkan daya yang memadai bagi sistem kelistrikan kapal.

##### b. Turbin Darrieus (VAWT)

Pemilihan diameter 2.500 mm untuk turbin Darrieus didasarkan pada pertimbangan aplikasi sistem kelistrikan cadangan kapal offshore (FPSO) yang memerlukan daya yang memadai. Pada diameter ini, luas sapuan turbin mencapai  $A = D \times H = 2,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} = 2,5 \text{ m}^2$ , yang menghasilkan daya mekanik sebesar 7,4 W (2 m/s) hingga 880 W (10 m/s). Tjiu dkk. (2015) menegaskan bahwa VAWT tipe Darrieus pada skala ini lebih toleran terhadap turbulensi aliran dan perubahan arah angin yang merupakan kondisi umum di lingkungan kapal bergerak, sekaligus mampu menghasilkan daya yang cukup signifikan tanpa memerlukan struktur penyangga yang terlalu berat. Lebih lanjut, Tjiu dkk. (2015b) secara khusus membahas peluang pengembangan Darrieus VAWT untuk aplikasi offshore skala kecil-menengah, menyimpulkan bahwa VAWT memiliki keunggulan struktural dan operasional dibandingkan HAWT pada lingkungan offshore di mana turbulensi dan perubahan arah angin lebih dominan.

Keunggulan utama turbin Darrieus dalam penelitian ini meliputi:

1. nilai Cp tinggi (0,575–0,578) yang menunjukkan efisiensi konversi energi yang excellent
2. nilai Ct konsisten (0,317–0,319) pada rentang kecepatan angin laut yang

- dianalisis
3. nilai TSR stabil (1,80–1,82) yang memudahkan desain sistem transmisi dan generator
  4. konstruksi sumbu vertikal yang memungkinkan pemasangan generator di dekat dek kapal tanpa memerlukan nacelle di atas menara. Karakteristik sumbu vertikal juga berarti turbin tidak perlu yaw mechanism untuk menghadap arah angin, yang menyederhanakan sistem kontrol dan perawatan di lingkungan maritim yang keras (Mohamed, 2012).

Keterbatasan turbin Darrieus adalah masalah *self-starting* yang memerlukan mekanisme bantu pada kecepatan angin sangat rendah, nilai torsi yang beresilasi secara periodik akibat variasi sudut serang selama satu rotasi dan ukuran diameter yang lebih besar (2,5 m) memerlukan ruang instalasi yang lebih luas di dek kapal.

Tabel 4. 26 Keunggulan dan Keterbatasan Masing Masing Turbin

Aspek	Turbin Darrieus (VAWT)	Turbin Fibonacci-Spiral (HAWT)
Cp	0,576 rata-rata (97,1% Betz)	0,254 rata-rata (42,8% Betz)
Ct	0,318 stabil, $\Delta Ct=0,002$	0,165 stabil, $\Delta Ct=0,009$
TSR	1,81	1,54
Self- starting	Tantangan pada V rendah (TSR<1)	Mampu self-start di 2 m/s
Daya pada	880,12 W	60,96 W
Skala rotor	Diameter 2.500 mm	Diameter 700 mm
Kompleksitas pasang	Mekanik sederhana, generator di bawah	Geometri spiral unik, perlu fabrikasi presisi
Kelebihan utama	Efisiensi tinggi, TSR stabil, daya besar	<i>Compact &amp; self-starting</i>
Keterbatasan utama	Butuh RPM starter, skala besar, blade-wake interaction	Cp masih rendah

#### 4.9.5. Implikasi Hasil untuk Aplikasi di Kapal *Offshore* (FPSO)

Hasil penelitian ini mengungkapkan implikasi praktis yang signifikan untuk desain sistem kelistrikan cadangan pada kapal offshore (FPSO). Berdasarkan data profil kecepatan angin dari BMKG Jeneponto yang menunjukkan rata-rata 4 m/s, turbin Darrieus (dengan diameter 2,5 m) mampu menghasilkan daya mekanik sebesar 56,4 W dalam kondisi angin rata-rata, sementara turbin Fibonacci-Spiral hanya menghasilkan sekitar 3,85 W dalam kondisi yang serupa.

Dari sudut pandang instalasi di kapal FPSO, turbin Darrieus dengan sumbu vertikal memiliki keunggulan karena tidak memerlukan sistem yaw otomatis, namun ada tantangan dalam pemasangan Darrieus pada kapal FPSO, terutama terkait ukurannya yang lebih besar (diameter 2.500 mm), yang memerlukan area dek yang luas serta struktur penopang yang kuat untuk menahan beban dinamis yang dihasilkan oleh gerakan kapal. Di sisi lain, turbin Fibonacci-Spiral dengan diameter 700 mm

lebih mudah dipasang di berbagai lokasi dek, termasuk di area yang terbatas.

Aspek vibrasi dan kebisingan juga perlu diperhatikan, di mana turbin VAWT Darrieus umumnya menghasilkan vibrasi yang lebih signifikan akibat torsi yang berosilasi secara periodik selama satu putaran bilah. Meskipun turbin Fibonacci-Spiral menghasilkan daya yang lebih kecil per unit, turbin ini memiliki potensi sebagai distributed micro turbine yang dapat dipasang di berbagai lokasi pada struktur kapal secara bersamaan. Konsep ini mirip dengan pengembangan urban wind energy untuk gedung-gedung perkotaan, di mana array turbin kecil berkontribusi secara kolektif (Toja-Silva dkk., 2013). Untuk kapal FPSO, pemasangan puluhan unit Fibonacci-Spiral di lokasi-lokasi strategis yang terekspos angin dapat menjadi opsi komplementer bagi sistem pembangkit utama.