

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Deskripsi Simulasi dan Geometri

Penelitian ini menerapkan metode simulasi numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent untuk mengevaluasi performa aerodinamika dari dua konfigurasi turbin angin, yakni desain konvensional dan *Archimedes Wind Turbine* (AWT) yang telah dimodifikasi berdasarkan penerapan pola Fibonacci. Tujuan utama dari simulasi ini adalah untuk melakukan analisis komparatif terhadap karakteristik aliran dan efisiensi energi kedua desain di bawah kondisi operasi yang identik.

Desain turbin angin konvensional dimodelkan dengan tiga bilah lurus dan simetris, sebagaimana umumnya ditemukan pada konfigurasi *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Sebaliknya, turbin Archimedes dirancang dengan bentuk spiral tiga dimensi yang mengikuti prinsip pola *Fibonacci*, di mana distribusi sudut dan lengkung bilah dirancang secara biomimetik untuk mengoptimalkan interaksi dengan aliran udara. Pemodelan geometri dilakukan menggunakan perangkat lunak desain berbantuan komputer (CAD).

Simulasi dijalankan dalam domain berbentuk silinder dengan panjang sekitar tiga kali diameter turbin, guna meminimalkan pengaruh batas domain (*boundary effect*). Aliran udara diberikan secara konstan dengan kecepatan 8,3 m/s pada sisi inlet, dengan asumsi aliran *steady-state* dan *incompressible*. Pemodelan turbulensi dilakukan menggunakan model  $k-\omega$  SST (*Shear Stress Transport*), yang dikenal efektif untuk geometri dengan kontur kompleks seperti bilah turbin.

Seluruh parameter simulasi, konfigurasi batas, serta model turbulensi yang digunakan disusun secara sistematis agar mencerminkan kondisi operasi nyata dan menghasilkan analisis performa desain yang valid dan representatif.

##### 4.1.1 Desain turbin angin konvensional

Desain turbin angin konvensional yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dengan tiga bilah simetris yang dirancang untuk berputar sejajar terhadap arah angin. Model ini dipilih sebagai pembanding karena mewakili konfigurasi turbin yang paling umum digunakan dalam berbagai aplikasi energi angin. Geometri turbin dirancang menggunakan perangkat lunak CAD dengan ukuran total yang disesuaikan agar setara dengan desain turbin Archimedes.

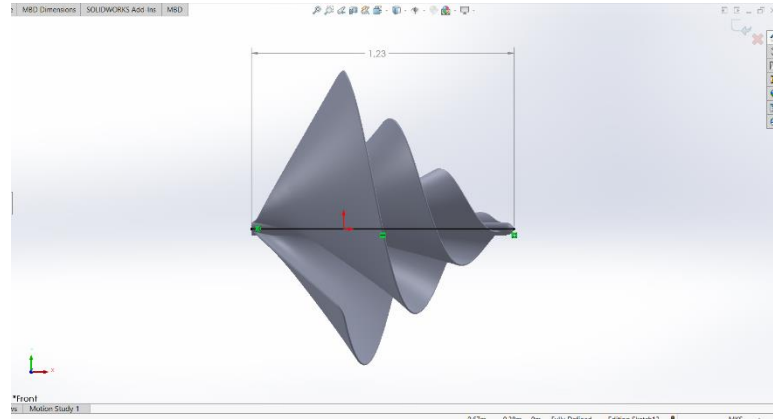


*Gambar 4. 1* Desain turbin angin konvensional (HAWT)  
(Sumber: (Simanjuntak et al., n.d.))

#### 4.1.2 Desain Wind Turbine dengan Pola Fibonacci

Desain turbin angin ini mengadopsi konsep Archimedes Wind Turbine dengan penataan bilah menggunakan pola Fibonacci, yang bertujuan meningkatkan efisiensi aliran udara melalui distribusi sudut dan jarak bilah secara biomimetik. Pola Fibonacci memungkinkan bilah-bilah turbin tersusun dalam konfigurasi spiral yang optimal untuk menangkap energi angin secara lebih merata dan mengurangi turbulensi.

Geometri turbin dengan pola Fibonacci dirancang menggunakan perangkat lunak CAD dengan dimensi keseluruhan yang sama dengan turbin konvensional, yaitu panjang 1,23 meter dan diameter 0,75 meter.

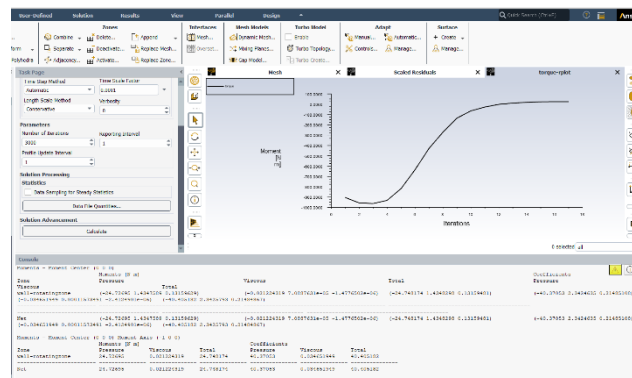


Gambar 4. 2 Geometri Desain Turbin Angin dengan Pola Fibonacci

Gambar 4.2 memperlihatkan struktur desain turbin angin dengan pola Fibonacci yang digunakan dalam simulasi ini

#### 4.1.3 Validasi Desain Turbin Angin Pola Fibonacci

Untuk memastikan kesesuaian performa desain turbin angin tipe Archimedes yang dikembangkan dalam penelitian ini, dilakukan validasi terhadap salah satu produk komersial yaitu AWM-750D produksi (*Archimedes Wind Turbine*, n.d.) AWM-750D merupakan turbin angin tipe Archimedes dengan diameter *rotor* 0,75 meter dan panjang bilah sekitar 1,1 meter, yang secara umum memiliki karakteristik desain yang serupa dengan model yang dikembangkan dalam penelitian ini. Validasi dilakukan pada kecepatan angin 3 m/s, yaitu *cut in wind speed* untuk AWM-750D, di mana turbin mulai menghasilkan torsi dan daya mekanik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik.



Gambar 4. 3 Hasil Simulasi dari kecepatan 3m/s

Berdasarkan gambar 4.3 hasil simulasi numerik yang dilakukan menggunakan ANSYS *Fluent*, diperoleh torsi sebesar 24,74 N·m pada kecepatan angin 3 m/s dan kecepatan rotasi 9,6 rad/s. Nilai ini menghasilkan daya mekanik sebesar:

$$p = \tau \times \omega = 24,74 \times 9,6 = 237,5 \text{ watt}$$

Daya sebesar 237,5 *watt* ini merupakan daya mekanik bruto, yaitu daya yang dihasilkan langsung dari interaksi antara fluida (angin) dan permukaan bilah, tanpa memperhitungkan rugi-rugi akibat gesekan, transmisi mekanis, dan efisiensi generator. Jika diasumsikan efisiensi sistem konversi berada pada kisaran 40–50%, maka estimasi daya listrik bersih (*netto*) yang dapat dihasilkan dari simulasi ini berada pada rentang:

$$P. \text{ listrik} = 237,5 \times 0,4 \text{ hingga } 0,5 = 95 \text{ s.d. } 118,75 \text{ watt}$$

Nilai ini secara umum masih lebih tinggi dibandingkan performa AWM-750D pada kecepatan angin yang sama. Berdasarkan *power curve* dalam brosur resmi AWM-750D (2023), daya listrik yang dihasilkan pada 3 m/s berada di kisaran 25–40 *watt*, karena unit tersebut dirancang untuk aplikasi mikroenergi dengan fokus pada keandalan dalam kondisi angin rendah, bukan daya puncak. Meskipun demikian, dari sisi tren performa, terdapat kesesuaian antara hasil simulasi dengan karakteristik kerja AWM-750D, yaitu bahwa pada kecepatan angin 3 m/s, turbin Archimedes sudah mulai menghasilkan torsi dan daya secara signifikan. Kesamaan ini menunjukkan bahwa desain turbin yang dikembangkan memiliki kapasitas kerja yang sebanding dengan produk komersial, bahkan menunjukkan potensi performa yang lebih tinggi jika dikembangkan lebih lanjut dengan sistem generator dan kontrol yang efisien.

Dengan demikian, validasi ini menunjukkan bahwa model turbin angin Archimedes yang dikembangkan dalam penelitian ini telah menunjukkan performa yang layak dan valid untuk digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga angin berskala kecil hingga menengah, terutama untuk wilayah dengan kecepatan angin rendah seperti Indonesia.

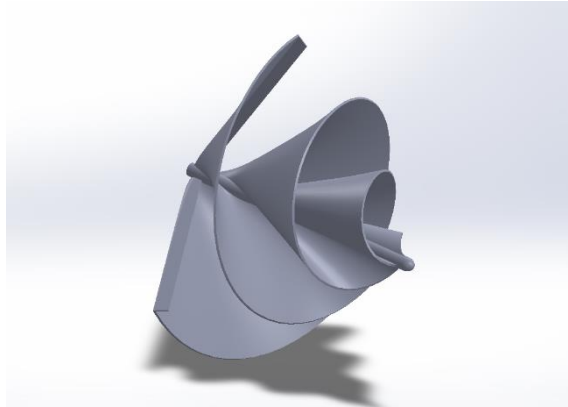
#### 4.1.4 Archimedes Spiral Rotor with Terminal Flow Deflector (ASR-TFD)

Inovasi desain rotor yang dibuat oleh peneliti merupakan turbin angin tipe *Archimedes* Spiral Rotor yang dimodifikasi dengan penambahan elemen inovatif pada bagian ujung bilah, yaitu *Terminal Flow Deflector* (TFD). Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan karakteristik aerodinamika rotor, terutama dalam hal efisiensi konversi energi angin menjadi energi mekanik serta pengurangan kerugian akibat fenomena *tip vortex*.

Secara umum, bilah utama tetap mengikuti geometri spiral Archimedes yang telah terbukti memiliki stabilitas struktur dan kemampuan menangkap angin dari berbagai arah. Namun, pada ujung trailing edge dari setiap bilah, ditambahkan sebuah sekat vertikal yang berfungsi sebagai deflektor aliran terminal. Komponen ini dirancang untuk:

- Mengganggu dan mengurangi pembentukan pusaran ujung bilah (*tip vortex*), yang umumnya menjadi sumber kehilangan energi pada rotor dengan bilah terbuka.

- Mengarahkan aliran udara secara lebih terkontrol keluar dari *trailing edge*, sehingga membantu mempertahankan lapisan batas (*boundary layer*) yang stabil dan mencegah pemisahan aliran (*flow separation*) dini.
- Memungkinkan peningkatan gaya angkat (*lift*) lokal tanpa peningkatan signifikan gaya hambat (*drag*), sehingga berpotensi meningkatkan momen puntir (*torque*) rotor secara keseluruhan.



Gambar 4. 4 Geometri desain Archimedes Spiral Rotor with Terminal Flow Deflector

Gambar 4.4 menunjukkan hasil pemodelan 3D dari desain ASR-TFD yang dibuat menggunakan perangkat lunak CAD (SolidWorks), dengan detail penambahan Terminal Flow Deflector yang ditunjukkan sebagai elemen tambahan pada ujung bilah. Dimensi, orientasi, dan ketebalan deflektor telah dioptimasi secara geometris agar tetap mempertahankan profil spiral namun memberikan efek aerodinamika yang signifikan. Selanjutnya, desain ini akan diuji dalam lingkungan simulasi menggunakan ANSYS Fluent dengan pendekatan rotating reference frame (RRF) dan model turbulensi SST k- $\omega$ .

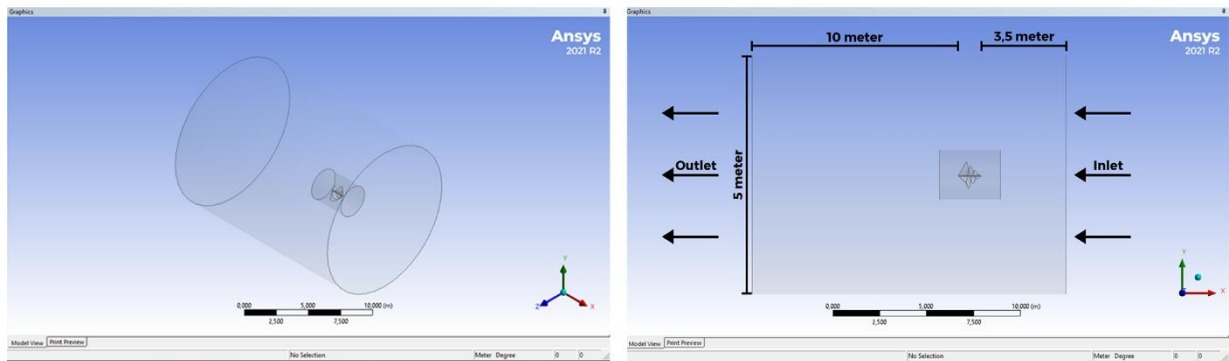
## 4.2 Simulasi di Ansys untuk Desain Turbin Angin dengan Pola Fibonacci

Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent berbasis metode Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis performa aerodinamika dari dua desain turbin angin, yaitu turbin konvensional tipe HAWT dan turbin Archimedes yang dimodifikasi dengan pola Fibonacci. Berikut tahap simulasi;

### 4.2.1 Geometry Modeling

Pada tahap awal simulasi CFD menggunakan ANSYS Fluent, dilakukan pembuatan model geometri turbin angin tipesebagai representasi fisik dari sistem yang akan dianalisis. peneliti membuat geometri ini dilakukan menggunakan ANSYS DesignModeler, dengan mempertimbangkan akurasi bentuk baling-baling dan kebutuhan domain fluida sesuai aturan dari ITTC 75-03-01-01.

Pada tahap awal simulasi numerik, dilakukan pemodelan geometri menggunakan ANSYS DesignModeler untuk mewakili kondisi fisik dari turbin angin tipe Archimedes dan domain aliran udara sekitarnya. Geometri terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu: baling-baling turbin (solid), zona rotasi (rotating zone), dan domain fluida silindris (enclosure). Model ini diatur dalam ruang kerja tiga dimensi (3D) dengan satuan meter.



Gambar 4. 5 Domain fluida

Turbin yang digunakan memiliki panjang total 1,23 meter dan diameter 0,75 meter, sesuai dengan spesifikasi desain Archimedes spiral. Turbin ditempatkan di dalam sebuah enclosure berbentuk silinder yang mewakili domain fluida tempat simulasi berlangsung. Pembuatan enclosure ini mengacu pada standar ITTC 7.5-03-01-01, dimana batas domain ditentukan berdasarkan perkalian diameter turbin sebagai berikut:

- Jarak inlet :  $3D - 5D = 2,25 - 3,75$  (3,5 meter)
- Jarak outlet :  $10D - 15D = 7,5 - 11,25$  (10 meter)
- Radius domain silinder :  $5D - 7D = 3,75 - 5,25$  (5 meter)

Diameter enclosure dirancang sebesar 5 meter, agar terdapat cukup ruang untuk perkembangan aliran dan menghindari efek dinding. Agar proses setting boundary conditions di ANSYS Fluent lebih sistematis, dilakukan penamaan (*name selection*) pada masing-masing permukaan dan domain sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Nama-nama komponen

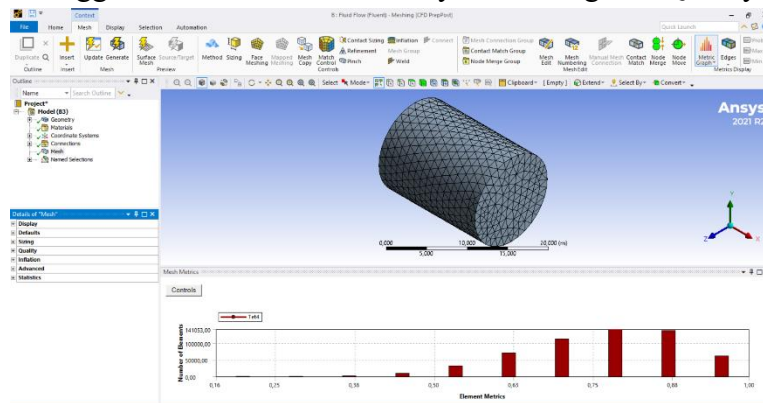
| Nama komponen | Keterangan                                        |
|---------------|---------------------------------------------------|
| Inlet         | Permukaan depan domain sebagai arah masuk angin   |
| Outlet        | Permukaan belakang domain sebagai keluaran aliran |
| Wall          | Permukaan dinding samping enclosure               |
| RotatingZone  | Volume silinder di sekitar turbin (zona rotasi)   |
| Turbin        | Permukaan padat dari bilah turbin                 |
| Boolean 1&2   | Hasil pemrosesan boolean (potongan antar domain)  |

Proses name selection ini bertujuan untuk memisahkan antara domain statik dan rotasi, serta mempermudah pengaturan boundary condition dan interface saat masuk ke tahap Fluent Setup.

#### 4.2.2 Meshing

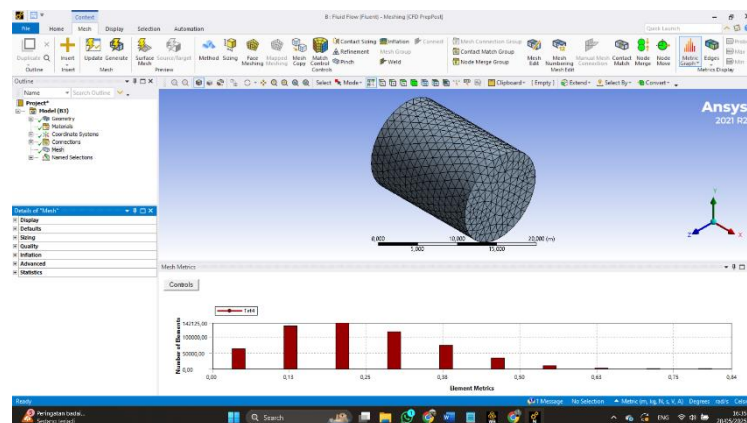
Proses *meshing* merupakan langkah penting dalam simulasi numerik CFD karena secara langsung mempengaruhi akurasi dan kestabilan solusi yang dihasilkan. Pada penelitian ini, proses meshing dilakukan menggunakan ANSYS *Meshing* dengan pendekatan tetrahedral (Tet4) yang dipilih berdasarkan kompleksitas bentuk geometri turbin angin tipe *Archimedes* dengan panjang 1,23 meter dan diameter 0,75 meter.

Geometri terdiri dari dua *domain* utama yaitu enclosure utama (*outer domain*) dan rotating zone (inner domain berbentuk silinder). Untuk menghasilkan mesh yang optimal, default mesh method disesuaikan menggunakan kontrol ukuran elemen (*element sizing*) dan ditambahkan fitur inflation layer untuk menangkap efek lapisan batas (*boundary layer*) di sekitar permukaan turbin. Pada tahap ini, dilakukan evaluasi kualitas mesh menggunakan dua metrik utama yaitu Orthogonal Quality dan Skewness.



Gambar 4. 6 Histogram distribusi nilai orthogonal quality

Metrik pada (Gambar 4.6) merupakan hasil dari nilai *orthogonal quality*. Metrik ini menunjukkan kualitas elemen berdasarkan kesimetrian terhadap permukaan normal. Nilai orthogonal quality berada pada rentang 0 hingga 1, di mana nilai mendekati 1 menunjukkan kualitas mesh yang sangat baik. Berdasarkan hasil simulasi (Gambar 4.5), nilai *orthogonal quality* berkisar antara 0,16 hingga 1,00, dengan mayoritas elemen berada pada rentang 0,75–0,88. Hal ini menunjukkan bahwa mesh yang digunakan sudah memenuhi standar kualitas yang baik untuk simulasi fluida.



Gambar 4. 7 Histogram Distribusi Nilai Skewness

Metrik pada gambar 4.7 merupakan hasil dari nilai *skewness*. Metrik ini mengukur ketidaksempurnaan bentuk elemen mesh, dengan nilai ideal berada di bawah 0,25. Berdasarkan hasil yang diperoleh (Gambar 4.7), nilai *skewness* elemen berada pada rentang 0 hingga 0,84, dengan distribusi dominan di bawah 0,38, yang masih berada dalam kategori baik hingga cukup. Elemen dengan nilai skewness di atas 0,5 masih dalam batas toleransi untuk simulasi transien namun tetap diperhatikan pada proses validasi hasil.

Secara keseluruhan, jumlah elemen mesh yang dihasilkan sebanyak  $\pm 141.053$  elemen, yang terdiri dari elemen-elemen tetrahedral berukuran lebih halus di sekitar

geometri turbin, terutama pada area rotasi dan area trailing edge. Pemetaan mesh disesuaikan untuk menjaga densitas elemen pada area yang mengalami gradien tekanan tinggi.

Kualitas mesh yang dihasilkan telah memenuhi standar umum CFD dan referensi dari ITTC (*International Towing Tank Conference*) 75-03-01-01, yang menyatakan bahwa nilai *skewness*  $\leq 0,9$  dan *orthogonal quality*  $\geq 0,1$  masih dapat diterima untuk simulasi numerik dengan kondisi kompleks seperti rotasi pada *turbomachinery*.

#### 4.2.3 Setup dan Konfigurasi Simulasi

Setelah proses meshing selesai dan kualitas elemen dinyatakan baik berdasarkan nilai *orthogonal quality* dan *skewness*, tahap selanjutnya dalam proses simulasi adalah melakukan setup dan konfigurasi fisika aliran fluida di ANSYS Fluent. Pada tahap ini, berbagai parameter fisik dan batasan-batasan simulasi didefinisikan agar sistem yang dianalisis mampu merepresentasikan kondisi nyata dari turbin angin tipe Archimedes. Simulasi dilakukan dengan pendekatan aliran tunak (*steady-state*) tiga dimensi menggunakan solver *pressure-based*, yang umum digunakan untuk aliran inkompresibel dan bersifat stabil. Model turbulensi yang digunakan adalah model SST  $k-\omega$ .

Pengaturan material fluida yang digunakan adalah udara (*air*) dengan densitas standar sebesar  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas dinamis sebesar  $1,7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Pemilihan properti ini dilakukan sesuai dengan kondisi lingkungan standar dan asumsi fluida inkompresibel. Untuk menyederhanakan analisis termal, model energi dinonaktifkan karena simulasi tidak mempertimbangkan perpindahan panas. Domain simulasi dibagi menjadi beberapa bagian utama, yaitu *inlet*, *outlet*, *wall*, dan *rotating zone*. Pada sisi *inlet*, ditetapkan kecepatan angin sebesar  $8,3 \text{ m/s}$  berdasarkan kondisi eksperimental atau literatur terkait. Sisi *outlet* diberikan kondisi tekanan nol gauge (tekanan atmosfer), sedangkan dinding *enclosure* luar dianggap sebagai *stationary wall* tanpa pergerakan.

Untuk merepresentasikan rotasi turbin, digunakan pendekatan *Moving Reference Frame* (MRF) pada *domain rotating zone*. Dengan metode ini, turbin dianggap berada dalam sistem koordinat yang berputar terhadap *domain* diam, sehingga aliran yang masuk dianalisis dalam kerangka acuan yang bergerak. Kecepatan sudut rotasi turbin ditetapkan sebesar  $254 \text{ RPM}$  yang dikonversi menjadi  $26,56 \text{ rad/s}$ . Untuk menghitung *rotational velocity* ( $\omega$ ) pada simulasi *archimedes wind turbine* menggunakan pendekatan berbasis TSR (*Tip Speed Ratio*).

Rumus dasar menghitung *rotational velocity*

$$\omega = \frac{TSR \times U_{\infty}}{R} \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana;

$$U_{\infty} = 8,3 \text{ m/s}$$

$$R = \frac{D}{2} = \frac{0,75}{2} = 0,375 \text{ meter}$$

Untuk *Archimedes spiral wind turbine*, TSR optimal  $\approx 1,0 - 1,5$

$$\omega = \frac{1,2 \times 8,3}{0,375} = \frac{9,96}{0,375} = 26,56 \text{ rad/s}$$

## Konversi ke RPM

Rumus RPM (mengubah kecepatan sudut dari satuan radian per detik menjadi rotasi permenit (RPM))

$$RPM = \frac{\omega \times 60}{2\pi} = \frac{26,56 \times 60}{6,283} = 254 RPM \dots \dots \dots (4.2)$$

Pemilihan metode MRF bertujuan untuk menghemat waktu komputasi sekaligus tetap memberikan hasil yang representatif terhadap fenomena fisika rotasi. Inisialisasi awal dilakukan dengan metode hybrid initialization, yang mampu memberikan nilai awal yang stabil dan mempercepat konvergensi solusi.

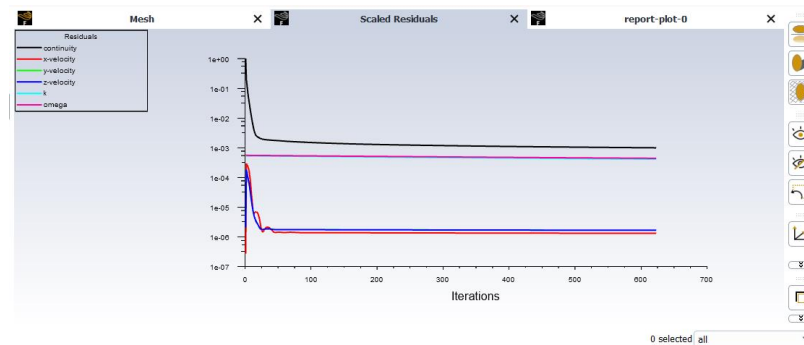
### 4.3 Analisa Hasil Simulasi

Hasil simulasi numerik dengan menggunakan ANSYS *Fluent* pada desain turbin angin tipe *Archimedes* menghasilkan nilai torsi sebesar 25,14 N·m pada kecepatan angin sebesar 8,3 m/s dan kecepatan rotasi turbin 254 RPM, yang setara dengan 26,56 rad/s. Torsi ini merupakan besarnya momen gaya yang dihasilkan akibat interaksi antara aliran fluida dan permukaan bilah turbin. Dalam konteks simulasi CFD, torsi adalah salah satu parameter paling signifikan yang merepresentasikan sejauh mana geometri turbin mampu mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik rotasi secara efektif.

Besarnya torsi yang dihasilkan berkorelasi erat dengan luas permukaan bilah, bentuk spiral turbin, dan distribusi tekanan serta kecepatan fluida sepanjang bidang rotasi. Geometri tipe *Archimedes* memberikan keuntungan aerodinamis tertentu melalui pola aliran fluida yang cenderung melingkar dan mengikuti jalur spiral bilah, sehingga menciptakan gaya dorong yang stabil terhadap sumbu turbin. Torsi sebesar 25,14 N·m menunjukkan bahwa desain ini mampu menghasilkan gaya putar yang signifikan pada kecepatan rotasi yang telah ditentukan.

#### 4.3.1 Grafik Residuals

Grafik *residuals* merupakan indikator numerik yang sangat penting dalam analisis konvergensi simulasi CFD. Grafik ini menunjukkan nilai galat (*error*) atau perbedaan antara hasil perhitungan dari iterasi sebelumnya dengan iterasi saat ini untuk setiap persamaan konservasi, seperti kontinuitas (*massa*), momentum (x, y, z *velocity*), energi, dan turbulensi (k dan *omega*). Konvergensi dianggap tercapai jika nilai residuals turun secara signifikan mendekati batas toleransi tertentu dan stabil dalam beberapa iterasi.



Gambar 4. 8 Grafik Residuals

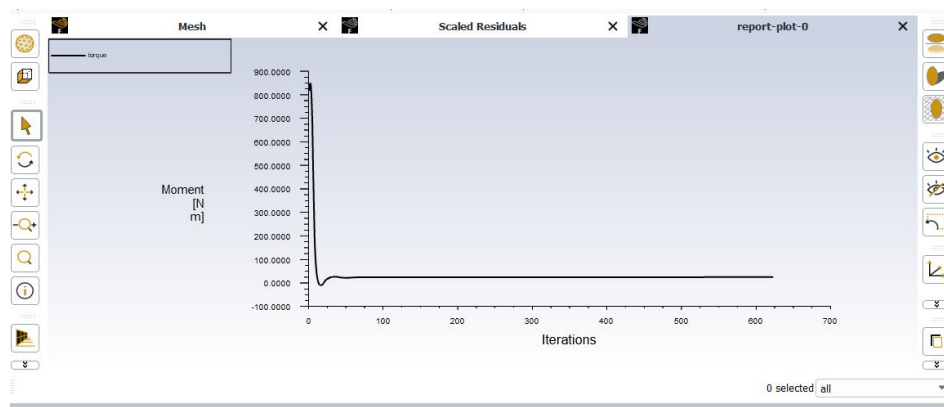
Berdasarkan Gambar 4.8, hasil simulasi menunjukkan bahwa semua residuals mengalami penurunan yang drastis pada awal iterasi, kemudian mengalami stabilisasi mendekati nilai konvergen setelah kurang lebih 150 iterasi. Nilai residuals pada akhir simulasi umumnya berada pada kisaran di bawah  $10^{-3}$ , bahkan untuk beberapa parameter seperti kecepatan (*x-velocity*, *y-velocity*, dan *z-velocity*) serta energi turbulen (*k* dan *omega*), nilai *residuals* turun hingga mendekati  $10^{-6}$ . Hal ini menunjukkan bahwa solusi numerik telah mencapai kestabilan dan kesesuaian antar iterasi, menandakan bahwa simulasi berada dalam kondisi konvergen.

Persamaan kontinuitas memiliki residuals akhir mendekati  $10^{-2}$ , yang masih dapat diterima dalam simulasi *steady-state*, terutama jika parameter target utama (seperti torsi atau daya) sudah menunjukkan kestabilan. Nilai residuals yang relatif tinggi pada kontinuitas dapat disebabkan oleh kompleksitas aliran dalam domain rotasi atau interaksi dinding dengan fluida, namun hal tersebut tidak serta-merta menunjukkan kegagalan simulasi selama parameter fisis utama tidak mengalami fluktuasi ekstrem.

Dengan memperhatikan tren kurva residuals yang menurun dan stabil, serta hasil perhitungan torsi yang konsisten, dapat disimpulkan bahwa simulasi telah memenuhi syarat konvergensi. Hal ini memperkuat keabsahan data hasil yang diperoleh dari simulasi dan menunjukkan bahwa model turbin telah diselesaikan dengan pendekatan numerik yang akurat dan stabil.

#### 4.3.2 Grafik torsi

Pada proses simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent, pemantauan nilai torsi (torque) yang dihasilkan oleh permukaan baling-baling terhadap fluida menjadi salah satu indikator utama untuk mengevaluasi performa aerodinamik dari turbin angin. Torsi merupakan momen puntir yang dihasilkan akibat adanya gaya angkat dan hambat yang bekerja pada sudu turbin selama berinteraksi dengan aliran udara. Nilai torsi ini sangat berperan dalam menentukan output daya mekanik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui generator.



Gambar 4. 9 Grafik Torsi

Gambar 4.9 menunjukkan hasil grafik torque monitor atau momen puntir (torsi) terhadap jumlah literasi selama proses simulasi *steady-state* menggunakan ANSYS Fluent. Grafik ini sangat penting dalam mengevaluasi kestabilan dan validitas hasil simulasi karena mencerminkan konsistensi gaya yang dihasilkan oleh fluida terhadap permukaan baling-baling yang berputar.

Berdasarkan grafik tersebut, nilai torsi mengalami lonjakan tajam pada awal iterasi yang disebabkan oleh adaptasi awal solver terhadap kondisi batas dan kondisi awal sistem (initial transients). Setelah melalui sekitar 100 iterasi, nilai torsi mulai stabil dan cenderung konstan pada nilai sekitar 25,14 Nm. Stabilisasi ini menunjukkan bahwa solver telah menyelesaikan distribusi tekanan dan kecepatan secara numerik pada domain simulasi, dan tidak terdapat perubahan signifikan pada iterasi selanjutnya.

Nilai torsi sebesar 25,14 Nm merupakan hasil kumulatif dari gaya tekanan dan gaya viskositas yang bekerja pada permukaan baling-baling di dalam zona rotasi (wall-rotatingzone). Torsi ini dihitung berdasarkan sumbu rotasi (axis 1 0 0) yang merepresentasikan sumbu *horizontal* (X-axis) dari sistem turbin angin *horizontal* (HAWT).

Dengan nilai torsi yang relatif konstan, hal ini menandakan bahwa turbin telah mencapai kondisi operasi stabil secara numerik. Ketidakstabilan nilai torsi atau fluktuasi besar sepanjang iterasi dapat menunjukkan adanya masalah pada mesh, model fisika, atau boundary conditions yang kurang sesuai. Namun, dalam kasus ini, kestabilan torsi memperkuat validitas hasil simulasi dan dapat digunakan sebagai dasar untuk perhitungan parameter performa lainnya seperti daya mekanik dan efisiensi.

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa proses simulasi telah menghasilkan hasil yang andal dan dapat digunakan dalam pembahasan kinerja aerodinamika turbin angin berdasarkan nilai torsi yang dihasilkan terhadap kecepatan rotasi dan kecepatan angin masukan.

Besarnya torsi yang dihasilkan berkorelasi erat dengan luas permukaan bilah, bentuk spiral turbin, dan distribusi tekanan serta kecepatan fluida sepanjang bidang rotasi. Geometri tipe Archimedes memberikan keuntungan aerodinamis tertentu melalui pola aliran fluida yang cenderung melingkar dan mengikuti jalur spiral bilah, sehingga menciptakan gaya dorong yang stabil terhadap sumbu turbin. Torsi sebesar 25,14 N·m menunjukkan bahwa desain ini mampu menghasilkan gaya putar yang signifikan pada kecepatan rotasi yang telah ditentukan. Daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$p = \tau \times \omega \dots \dots \dots (4.3)$$

Dengan;

$p$  = Daya Mekanik (Watt)

$\tau$  = Torsi (25,14 Nm)

$\omega$  = Kecepatan sudut rotasi / *Omega* (26,56 rad/s)

Dengan memasukkan nilai-nilai tersebut;

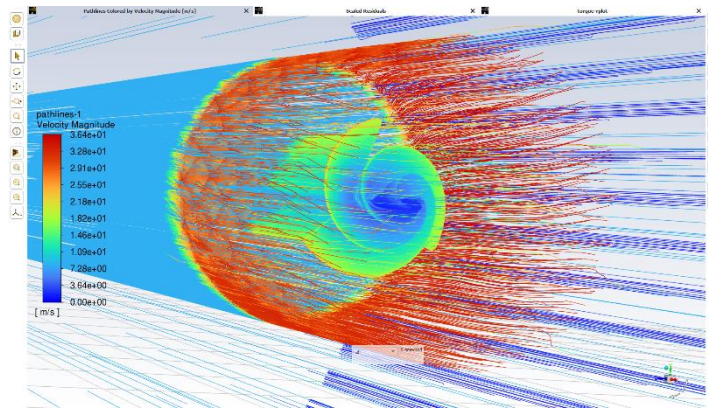
$$p = 25,14 \times 26,56 = 667,71 \text{ watt}$$

Nilai daya mekanik sebesar 667,71 Watt ini merupakan estimasi energi kinetik angin yang berhasil dikonversi menjadi energi rotasional oleh sistem turbin dalam kondisi operasi tertentu. Angka ini penting sebagai indikator performa turbin dalam

kondisi ideal (tanpa mempertimbangkan rugi-rugi sistem mekanis dan efisiensi konversi generator).

#### 4.3.3 Visualisasi Aliran Fluida Menggunakan Pathlines

Untuk memahami lebih lanjut pola aliran udara yang terbentuk akibat interaksi antara fluida dengan permukaan baling-baling turbin angin tipe Archimedes, dilakukan visualisasi aliran menggunakan fitur pathlines pada ANSYS Fluent. Pathlines ini memberikan gambaran lintasan partikel fluida sepanjang domain, sekaligus menunjukkan distribusi kecepatan secara spasial. Warna pada lintasan menunjukkan besar kecilnya kecepatan fluida di setiap titik, sehingga memudahkan dalam mengamati fenomena percepatan, perlambatan, serta pembentukan daerah turbulen (*wake region*) di sekitar turbin.



Gambar 4. 10 hasil visualisasi pathlines

Gambar 4.10 memperlihatkan hasil visualisasi pathlines (jalur lintasan partikel fluida) yang melewati turbin angin tipe Archimedes dengan baling-baling spiral berbasis pola Fibonacci. Visualisasi ini dihasilkan dari simulasi numerik menggunakan ANSYS Fluent, dan memberikan informasi penting mengenai pola aliran udara di sekitar turbin, serta bagaimana distribusi kecepatan berubah akibat interaksi dengan geometri turbin. Warna pada pathlines mewakili magnitudo kecepatan aliran udara (dalam satuan m/s). Skala warna di sisi kiri menunjukkan bahwa:

- Warna biru tua ( $0\text{--}3,64$  m/s) menunjukkan area dengan kecepatan fluida rendah, terutama ditemukan di bagian belakang (*downstream*) turbin dan di area tengah pusaran (*wake zone*)
- Warna hijau hingga kuning (sekitar  $10\text{--}20$  m/s) menunjukkan fluida dengan kecepatan menengah, banyak terjadi di sekitar sisi luar bilah spiral.
- Warna merah menunjukkan aliran dengan kecepatan tertinggi (hingga  $36,4$  m/s), yang terlihat dominan di bagian sisi dan atas turbin, serta di sekitar bilah luar, akibat percepatan aliran saat melewati bilah melengkung.

Visualisasi ini mengindikasikan bahwa baling-baling spiral menciptakan pusaran (*vortex*) yang kompleks dan menyebabkan variasi kecepatan yang cukup besar di sekitarnya. Fenomena ini sangat umum terjadi pada desain turbin tipe *Archimedes*, di mana aliran dipaksa berputar searah geometri *spiral*, menghasilkan gaya angkat dan torsi yang konstan sepanjang bilah. Terlihat juga adanya fenomena penyempitan dan percepatan aliran di sisi kanan (*downstream*), yang menunjukkan bahwa sebagian energi kinetik dari angin telah berhasil diubah menjadi energi mekanik (torsi) oleh bilah turbin.

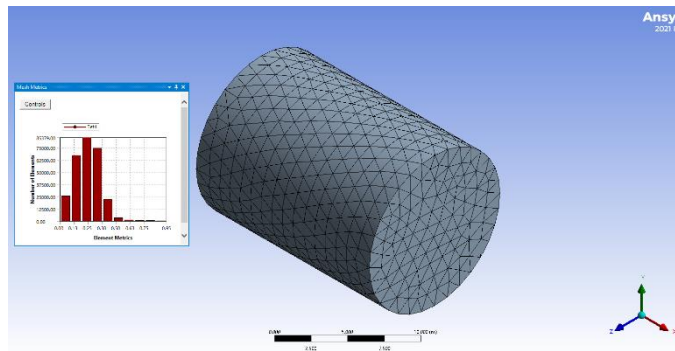
Sementara itu, daerah di belakang bilah (*wake region*) menunjukkan perlambatan dan turbulensi, yang merupakan karakteristik umum pada setiap sistem konversi energi angin.

#### 4.4 Hasil Simulasi pada Desain ASR-TFD

Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent berbasis metode Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis performa aerodinamika dari desain ASR-TFD.

##### 4.4.1 Meshing

Geometri yang digunakan telah dimasukkan ke dalam domain berbentuk silinder untuk mensimulasikan aliran fluida di sekitar turbin angin tipe Archimedes. Proses meshing dilakukan menggunakan elemen tetrahedral (Tet4) dengan physics preference untuk CFD (Fluent). Ukuran elemen mengikuti pengaturan default size sekitar  $6.114 \times 10^{-3}$  m, dengan minimum edge length sekitar  $1.27 \times 10^{-5}$  m, yang masih dalam batas yang dapat diterima untuk simulasi transien aliran turbulen.



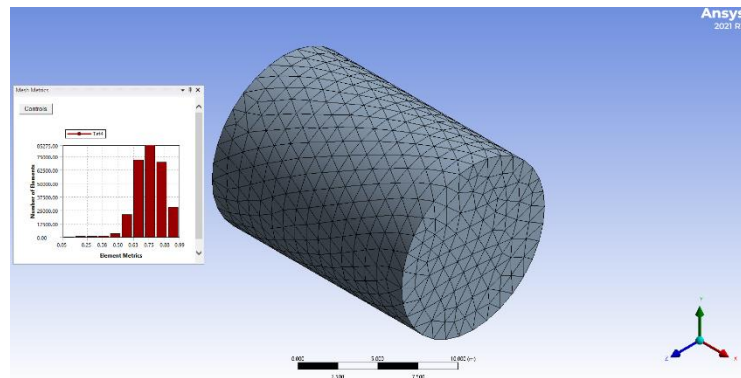
Gambar 4. 11 Histogram Nilai skewness pada ASR-TFD

Gambar 4.11 menunjukkan distribusi skewness dari elemen-elemen mesh yang digunakan dalam domain simulasi. Skewness merupakan parameter penting dalam evaluasi kualitas mesh yang menunjukkan sejauh mana bentuk elemen menyimpang dari bentuk idealnya. Nilai skewness berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai 0 menunjukkan kualitas elemen yang ideal, sedangkan nilai di atas 0.5 menunjukkan penurunan kualitas, dan di atas 0.9 termasuk dalam kategori kualitas buruk yang dapat menyebabkan ketidakstabilan numerik dalam simulasi.

Berdasarkan grafik yang ditampilkan, mayoritas elemen memiliki nilai skewness di bawah 0.4, dengan konsentrasi tertinggi berada pada rentang 0.25 hingga 0.3. Hanya sebagian kecil elemen yang memiliki skewness mendekati 0.6, dan tidak ditemukan elemen dengan nilai di atas ambang batas kritis 0.9. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas mesh secara keseluruhan termasuk dalam kategori baik, dan sangat layak digunakan untuk simulasi CFD.

Secara interpretatif, rendahnya nilai skewness ini menandakan bahwa elemen-elemen mesh tidak mengalami distorsi geometri yang signifikan. Hal ini penting karena elemen yang mendekati bentuk ideal akan memberikan hasil numerik yang lebih akurat dan konvergen, terutama dalam simulasi aliran turbulen dan perhitungan distribusi

tegangan di sekitar bilah turbin. Dengan demikian, mesh yang dihasilkan sudah memenuhi standar kualitas untuk analisis CFD menggunakan ANSYS Fluent.



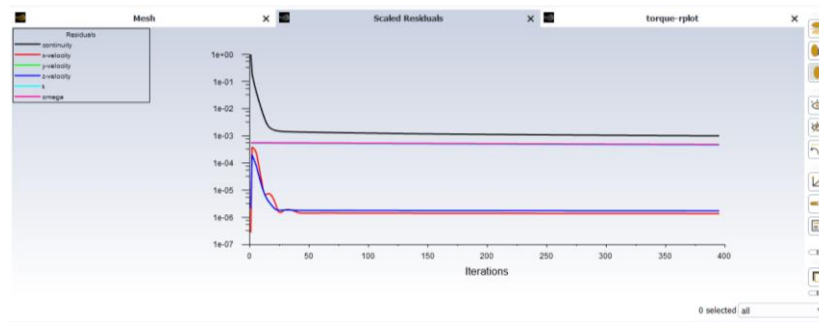
Gambar 4. 12 Histogram Nilai Orthogonal Quality pada ASR-TFD

Berdasarkan hasil analisis pada Gambar 4.12, sebagian besar elemen mesh berada pada rentang nilai 0.75 hingga 0.85, dengan puncak distribusi yang terkonsentrasi di sekitar nilai tersebut. Tidak ditemukan elemen yang memiliki nilai orthogonal quality di bawah 0.5, yang berarti tidak ada elemen yang masuk kategori buruk atau bahkan mendekati ambang batas peringatan. Kondisi ini menunjukkan bahwa mesh yang dihasilkan memiliki orientasi elemen yang sangat baik, serta mampu menangkap perubahan gradien aliran dengan akurat.

Interpretasi dari hasil ini mengindikasikan bahwa mesh yang digunakan sudah memenuhi kriteria kualitas tinggi untuk simulasi CFD. Nilai orthogonal quality yang tinggi sangat penting dalam menjaga kestabilan numerik selama iterasi, serta memastikan prediksi aliran, khususnya di sekitar dinding bilah turbin dan daerah boundary layer, dapat diselesaikan dengan baik. Dengan demikian, mesh ini sangat layak digunakan dalam analisis dinamika fluida pada turbin angin tipe Archimedes, baik untuk studi steady maupun transien.

#### 4.4.2 Setup

Simulasi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent dengan pendekatan Multiple Reference Frame (MRF) untuk menganalisis perilaku aerodinamika turbin angin tipe Archimedes yang beroperasi pada kecepatan angin 8,3 m/s dan kecepatan rotasi 26,56 rad/s, menghasilkan nilai Tip Speed Ratio (TSR) sebesar 1,2. Domain simulasi dibagi menjadi dua zona, yaitu zona berputar (rotating zone) yang mengelilingi turbin dan zona diam (stationary zone) yang merepresentasikan aliran bebas, dengan interaksi keduanya ditangani melalui internal interface. Model aliran yang digunakan adalah aliran steady-state dengan fluida inkompresibel berupa udara pada suhu ruang ( $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ), serta model turbulensi  $k-\omega$  SST untuk mengakomodasi gradien tekanan tinggi dan separasi aliran. Kondisi batas mencakup velocity inlet (8,3 m/s), pressure outlet (0 Pa), rotating wall untuk permukaan turbin yang berputar searah sumbu X, dan stationary wall untuk enclosure.



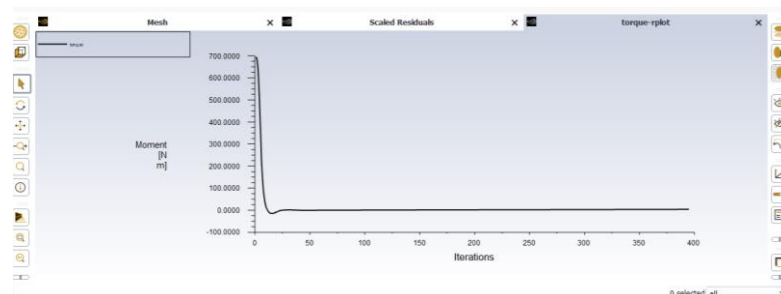
Gambar 4. 13 Grafik Residualas pada ASR-TFD

Grafik residuals yang ditampilkan merupakan indikator konvergensi dari solusi numerik selama proses iterasi simulasi CFD. Grafik ini memvisualisasikan evolusi kesalahan (residual) dari masing-masing persamaan konservasi, yaitu continuity, x-velocity, y-velocity, z-velocity, k, dan omega, terhadap jumlah iterasi. Residual dihitung sebagai selisih antara nilai solusi saat ini dengan solusi sebelumnya, dan menjadi ukuran seberapa dekat solusi mendekati kestabilan (steady-state).

Pada grafik tersebut, terlihat bahwa semua residual mengalami penurunan tajam dalam 50–70 iterasi pertama, yang menunjukkan bahwa solver berhasil menyelesaikan aliran awal dengan cepat. Setelahnya, residual mulai mendatar, menandakan bahwa solusi sudah mulai mencapai kestabilan numerik. Nilai residual untuk komponen kecepatan (x, y, z), serta variabel turbulensi (k dan  $\omega$ ), telah menurun hingga mencapai kisaran  $10^{-5}$ , yang lebih baik dari ambang batas konvergensi standar  $10^{-4}$ , menandakan bahwa hasil simulasi telah terkonvergensi dengan baik.

Namun, residual continuity tidak turun drastis dan menetap pada kisaran  $10^{-2}$  hingga  $10^{-3}$ . Meskipun ini masih dalam batas yang dapat diterima, kondisi ini perlu diperhatikan khususnya bila aliran sangat sensitif terhadap perubahan tekanan. Dalam banyak kasus MRF dan geometri kompleks seperti turbin Archimedes, residual continuity yang konstan di atas  $10^{-3}$  namun tetap stabil bisa diterima selama parameter target (seperti torsi dan gaya) menunjukkan konvergensi yang baik dan tidak fluktuatif.

Secara keseluruhan, kurva residual yang stabil tanpa lonjakan besar, serta kecenderungan menurun, menunjukkan bahwa solusi numerik telah mencapai kondisi steady dan layak dianalisis lebih lanjut untuk evaluasi performa turbin.



Gambar 4. 14 Grafik Torsi dari ASR-TFD

Grafik torsi yang ditampilkan merupakan hasil pemantauan nilai momen puntir (torque) yang dihasilkan oleh permukaan turbin terhadap sumbu rotasi sepanjang proses iterasi. Torsi ini dihitung sebagai hasil integrasi dari gaya-gaya fluida (tekanan dan viskositas) terhadap bidang permukaan bilah turbin dalam domain berputar (rotating zone). Grafik menunjukkan bahwa nilai torsi mengalami fluktuasi signifikan pada awal iterasi, terutama pada 0–30 iterasi pertama, di mana nilai moment mencapai lebih dari 600 N·m. Hal ini umum terjadi karena solver masih berusaha menstabilkan medan aliran dan menyeimbangkan kontribusi tekanan dan gaya gesek viskos.

Setelah sekitar iterasi ke-50, nilai torsi mulai stabil mendekati nilai konvergen di sekitar 7,02 N·m, sebagaimana ditunjukkan oleh garis mendatar yang nyaris tanpa fluktuasi pada iterasi selanjutnya hingga iterasi ke-400. Stabilitas grafik ini menunjukkan bahwa solusi telah mencapai kondisi steady-state, dan torsi yang diperoleh telah cukup representatif untuk digunakan dalam perhitungan daya mekanik turbin.

Secara kuantitatif, hasil pada bagian console menunjukkan bahwa total torsi bersih (net moment) pada sumbu utama rotasi (sumbu X) adalah 7,0256 N·m, yang merupakan hasil dari akumulasi momen tekanan dan momen viskos pada permukaan turbin. Nilai ini menjadi parameter kunci dalam evaluasi performa aerodinamis, perhitungan daya output turbin, dan efisiensi pada kondisi operasi yang ditentukan ( $U_\infty = 8,3$  m/s,  $\omega = 26,56$  rad/s, TSR = 1,2).

Dengan demikian daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin dapat dihitung menggunakan rumus:

$$p = \tau \times \omega \dots \dots \dots$$

Dengan;

$p$  = Daya Mekanik (Watt)

$\tau$  = Torsi (7,0256 Nm)

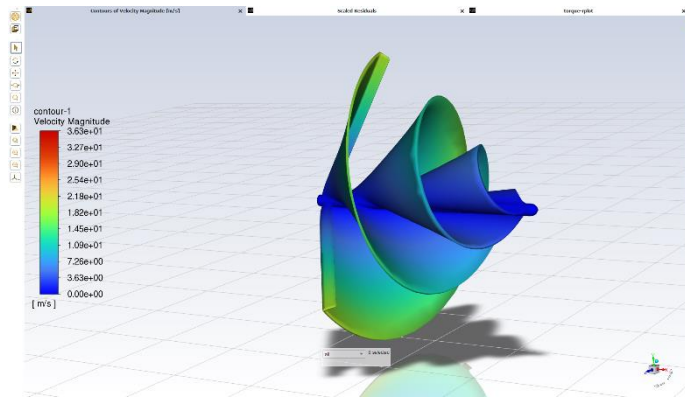
$\omega$  = Kecepatan sudut rotasi / *Omega* (26,56 rad/s)

Dengan memasukkan nilai-nilai tersebut;

$$p = 7,0256 \times 26,56 = 186,655 \text{ watt}$$

#### 4.4.3 Visualisasi Hasil Countur pada ASR-TFD

Untuk memahami lebih lanjut pola aliran udara yang terbentuk akibat interaksi antara fluida dengan permukaan bilah turbin angin tipe Archimedes, dilakukan visualisasi aliran menggunakan fitur contours of velocity magnitude pada ANSYS Fluent. Visualisasi ini memberikan informasi spasial mengenai distribusi kecepatan fluida pada permukaan bilah turbin secara menyeluruh. Melalui kontur ini, dapat diamati secara jelas daerah-daerah dengan percepatan dan perlambatan aliran, serta potensi terbentuknya zona recirculation dan gradien kecepatan tinggi yang berkontribusi langsung terhadap pembangkitan gaya dan momen puntir. Warna kontur yang merepresentasikan nilai kecepatan memudahkan dalam interpretasi fenomena aerodinamika yang terjadi sepanjang bilah turbin, sekaligus menunjukkan efektivitas desain spiral dan terminal flow deflector dalam mengarahkan aliran.



Gambar 4. 15 Hasil visualisasi kontur distribusi kecepatan

Hasil kontur kecepatan menunjukkan variasi distribusi kecepatan fluida yang cukup signifikan sepanjang permukaan bilah. Terlihat bahwa daerah dengan nilai kecepatan tinggi (ditandai dengan warna merah–kuning, hingga sekitar 36 m/s) terjadi terutama pada sisi bilah bagian luar yang mengalami percepatan akibat kombinasi efek angin bebas dan rotasi turbin. Sementara itu, area di bagian dalam dan belakang bilah menunjukkan kecepatan lebih rendah (biru–hijau), yang mengindikasikan zona recirculation atau aliran dengan gradien tekanan tinggi.

Distribusi ini memperlihatkan bahwa bilah turbin berhasil mengarahkan aliran dan mempercepat fluida secara lokal di bagian tertentu, terutama pada ujung leading edge dan trailing edge dari permukaan bilah. Fenomena ini penting karena berkaitan langsung dengan pembangkitan gaya angkat dan torsi yang kemudian dikonversi menjadi daya mekanik. Selain itu, pola aliran ini juga menunjukkan efek aerodinamik dari desain spiral dan tambahan deflektor terminal yang berkontribusi terhadap peningkatan performa aliran melalui pengendalian arah dan percepatan fluida di sepanjang bilah.

Dengan demikian, kontur kecepatan ini memberikan bukti visual dan kuantitatif atas efektivitas desain ASR-TFD dalam mengelola aliran untuk menghasilkan torsi maksimum, sekaligus mendukung hasil perhitungan numerik torsi sebesar 7,02 N·m yang telah didapat sebelumnya. Visualisasi ini menjadi dasar penting untuk interpretasi performa aerodinamis dan potensi optimalisasi geometri turbin pada tahap pengembangan berikutnya.

#### 4.5 Perbandingan Turbin Angin

Untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai performa dari turbin angin tipe Archimedes yang telah didesain dan disimulasikan, dilakukan perbandingan dengan desain turbin angin konvensional tipe poros *horizontal* (*Horizontal Axis Wind Turbine* / HAWT). Turbin konvensional yang digunakan sebagai acuan adalah turbin dengan 3 buah sudu, panjang bilah 1 meter, dan menggunakan profil *airfoil* NACA 4412. Parameter kecepatan angin yang digunakan dalam simulasi adalah sebesar 8,3 m/s, sesuai dengan kecepatan angin maksimum yang digunakan pada kedua penelitian.

Berdasarkan hasil simulasi CFD yang dilakukan pada turbin angin tipe pola *fibonacci*, diperoleh nilai torsi sebesar 25,14 N·m pada kecepatan rotasi 254 RPM (26,56 rad/s), yang menghasilkan daya mekanik sebesar 667,71 Watt. Pada hasil simulasi CFD yang dilakukan pada turbin angin ASR-TFD, diperoleh nilai torsi sebesar 7,0256 N·m pada kecepatan rotasi 26,56 rad/s. Di sisi lain, berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh

Simanjuntak et al. (2020), untuk turbin konvensional dengan 3 sudu dan panjang 1 meter, diperoleh nilai torsi sebesar 2,3 N·m dan kecepatan sudut 118,871 rad/s, sehingga menghasilkan daya sebesar 273,40 Watt.

Perbandingan ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang sama, turbin Archimedes mampu menghasilkan daya sekitar 2,44 kali lebih besar dibandingkan turbin HAWT konvensional. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh karakteristik geometri bilah pada turbin Archimedes yang berbentuk spiral dan bersifat lebih “tertutup”, sehingga mampu menangkap lebih banyak energi kinetik dari aliran angin dan mengubahnya menjadi momen putar yang lebih besar. Selain itu, permukaan interaksi fluida terhadap bilah pada turbin Archimedes relatif lebih luas dan mampu menyalurkan gaya dorong secara lebih efisien dalam bentuk rotasi.

Tabel 4. 2 Perbandingan Kinerja Turbin Angin Pola *Fibonacci* dan HAWT Konvensional

| Parameter        | Turbin Pola Fibonacci | Turbin Konvensional | Turbin ASR-TFD |
|------------------|-----------------------|---------------------|----------------|
| Panjang sudu     | 1,23 meter            | 1,00 meter          | 1,23 meter     |
| Jumlah sudu      | Spiral                | 3 sudu              | Spiral         |
| Kecepatan angin  | 8,3 m/s               | 8,3 m/s             | 8,3 m/s        |
| Kecepatan rotasi | 26,56 rad/s           | 118,871 rad/s       | 26,56 rad/s    |
| Torsi            | 25,14 N·m             | 2,3 N·m             | 7,0256 N·m     |
| Daya             | 667,71 Watt           | 273,40 Watt         | 186,655 Watt   |

Berdasarkan tabel perbandingan performa turbin angin, dapat disimpulkan bahwa turbin dengan pola Fibonacci menunjukkan performa paling unggul dibandingkan dengan turbin konvensional dan turbin ASR-TFD. Turbin Fibonacci memiliki panjang sudu sebesar 1,23 meter dengan konfigurasi spiral, serupa dengan desain ASR-TFD, sedangkan turbin konvensional hanya menggunakan tiga sudu lurus dengan panjang 1,00 meter. Meskipun turbin konvensional memiliki kecepatan rotasi paling tinggi yaitu 118,871 rad/s, nilai torsi sangat rendah, hanya sebesar 2,3 N·m, dan daya yang dihasilkan pun hanya 273,40 Watt. Sebaliknya, turbin Fibonacci dengan kecepatan rotasi yang jauh lebih rendah yaitu 26,56 rad/s justru mampu menghasilkan torsi tertinggi sebesar 25,14 N·m dan daya maksimum mencapai 667,71 Watt. Adapun turbin ASR-TFD yang juga menggunakan pola spiral dan kecepatan rotasi yang sama dengan turbin Fibonacci, menghasilkan torsi sebesar 7,0256 N·m dan daya sebesar 186,655 Watt, yang berada di antara turbin Fibonacci dan konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan pola Fibonacci pada desain baling-baling turbin angin mampu meningkatkan efisiensi aerodinamis secara signifikan, dengan distribusi massa dan pola aliran udara yang lebih optimal sehingga menghasilkan performa energi yang lebih tinggi dibandingkan desain lainnya.

