

## STUDI MODEL TURBULENSI PADA VERTICAL AXIS WATER TURBINE (VAWT) MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

Elyas Nur Fridayana<sup>1</sup>, Yoyok Setyo Hadiwidodo<sup>1</sup>, Dendy Satrio<sup>1</sup>, Elysa Nensy Irawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

<sup>2</sup>Prodi Mekatronika dan Kecerdasan Buatan, Kampus Purwakarta, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

Email: fridayana.elyas@gmail.com, yoyoksetyohadiwidodo@gmail.com, dendysatrio@gmail.com, elysanensyirawan@gmail.com

### Abstrak

Penentuan model turbulen memiliki peranan penting dalam proses simulasi computational fluid dynamics (CFD). Beberapa macam model turbulen berdasarkan viskositas eddy dipakai agar waktu komputasi lebih singkat. VAWT tipe Darrieus dengan profil NACA 633-18 digunakan dalam penelitian ini. Simulasi CFD 2-dimensi dengan ketelitian tinggi dilakukan secara transient menggunakan pertambahan sudut azimuth sebesar  $1^{\circ}$ . Komputasi dilakukan hingga beberapa kali revolusi sampai didapat perubahan koefisien daya ( $C_p$ ) akhir kurang dari 5%. Nilai  $y^+$  kurang dari 1 diberikan pada daerah dekat trailing edge dipermukaan foil. Variasi model turbulen yang dibandingkan diantaranya adalah Spalart-Allmaras (S-A), realizable  $k-\epsilon$ , Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  dan transition SST  $k-\omega$ . Kurva  $C_p$ -TSR seluruh variasi model turbulen memiliki perilaku yang mirip, kecuali SST  $k-\omega$ . Matrik kesesuaian hasil simulasi CFD pada vertical axis turbine (VAWT) dipresentasikan dalam bentuk error relatif terhadap data eksperimental. Hasil simulasi menunjukkan bahwa realizable  $k-\epsilon$  memberikan  $C_p$  yang paling akurat, sedangkan model turbulensi Spalart-Allmaras memiliki error paling besar. Penggunaan transition SST  $k-\omega$  yang mampu memperhitungkan efek aliran transisi dan intermitensi turbulen memberikan akurasi baik namun kurang memuaskan pada TSR tinggi.

**Kata kunci:** Computational Fluid Dynamics (CFD), Darrieus, Model Turbulen, realizable  $k-\epsilon$ , Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$ , Spalart-Allmaras (S-A), dan transition SST  $k-\omega$ .

### Abstract

*Determination of the turbulent model has an important role in the computational fluid dynamics (CFD) simulation process. Several kinds of turbulent models based on eddy viscosity are used to shorten the computation time. Darrieus type VAWT with a NACA profile of 633-18 was used in this study. The 2-dimensional CFD simulation with high accuracy was carried out transiently using an increase in the azimuth angle of  $1^{\circ}$ . Computing was carried out for several revolutions until the*

<b>How to cite:</b>	Elyas Nur Fridayana, et al (2022) Studi Model Turbulensi pada Vertical Axis Water Turbine (VAWT) Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD), <i>Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia</i> , 7 (6).
<b>E-ISSN:</b>	2548-1398
<b>Published by:</b>	Ridwan Institute

*final power coefficient ( $C_p$ ) change was less than 5%. A  $y^+$  value of less than 1 is assigned to the region near the trailing edge on the foil surface. The variations of the turbulent model that are compared include Spalart-Allmaras (S-A), realizable  $k-\epsilon$ , Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$  and SST transition  $k-\omega$ . The  $C_p$ -TSR curves of all variations of the turbulent model have similar behavior, except for the  $k-\omega$  SST. The suitability matrix of the CFD simulation results on the vertical axis turbine (VAWT) is presented in the form of an error relative to the experimental data. The simulation results show that the realizable  $k-\epsilon$  gives the most accurate  $C_p$ , while the Spalart-Allmaras turbulence model has the largest error. The use of the  $k-\omega$  SST transition which is able to take into account the effects of transition flow and turbulent intermittency provides good accuracy but is not satisfactory at high TSR.*

**Keywords:** *Computational Fluid Dynamics (CFD), Darrieus, Turbulence Model, realizable  $k-\epsilon$ , Shear Stress Transport (SST)  $k-\omega$ , Spalart-Allmaras (S-A), and transition SST  $k-\omega$ .*

## **Pendahuluan**

Vertical Axis Water Turbine (VAWT) sangat menjanjikan digunakan untuk mengkonversi energi laut karena memiliki pusat gravitasi turbin yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin sumbu horizontal (Yan, Luo, & Bai, 2019). Keuntungan lain dari penggunaan VAWT adalah kinerjanya yang tidak bergantung arah aliran arus serta instalasi dan perawatannya yang sederhana. Tidak hanya itu, turbin jenis ini tidak mengharuskan letak generator berada di bawah air (Marsh, Ranmuthugala, Penesis, & Thomas, 2015). Banyaknya keunggulan yang dimiliki oleh VAWT dibandingkan turbin dengan sumbu horizontal, membuat para peneliti tertarik untuk mempelajari kinerja hidrodinamikanya.

Performa VAWT dapat diprediksi melalui studi numerik. Dua jenis penelitian yang umum digunakan adalah metode semi empiris *Double Multiple Steam-Tube* (DMST) dan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Studi oleh Fernández et al. (2018) menunjukkan bahwa metode CFD memiliki hasil dan kemampuan analisis 3D yang lebih akurat (Fernández, Solís, Oro, Díaz & Velarde, 2018). Sedangkan DMST dapat membantu kita memahami cara kerja VAWT dan secara teoritis dapat menghasilkan efisiensi lebih dari *Betz Limit* (Paraschivoiu, 2002). Interaksi antara aliran bebas dengan sudu turbin pada area *upstream* dapat diperhitungkan secara akurat menggunakan metode DMS, namun fenomena fluida yang terbentuk setelahnya tidak mampu dimodelkan. Sehingga asumsi-asumsi tertentu diberikan untuk menyelesaikan interaksi fluida dengan sudu turbin pada area *downstream* (Beri & Yao, 2011).

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) pada dasarnya dapat dilakukan melalui beberapa metode, diantaranya *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES), *Detached Eddy Simulation* (DES), *Scale-Adaptive Simulation* (SAS) dan *Reynolds-Averaged Navier Stokes* (RANS) (Ma et al., 2018), (Schlör, Venghaus, & Hake, 2018) Pendekatan DNS, LES, dan SAS memiliki biaya komputasi yang sangat tinggi sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan industri (Franchina, Persico, & Savini,

2019). Simulasi pembangkitan ulekan (*wakes generation*) dengan metode DNS dilakukan oleh Naung et al. (2021) pada model airfoil 2D (Naung, Rahmati, & Farokhi, 2021). Penyelesaian komputasi pada penelitian tersebut memakan waktu selama 13.328 *core-hours*. Simulasi DNS lain dilakukan oleh Hosseini et al. (2016) pada model 3-Dimensi berupa potongan sayap pesawat berbentuk airfoil (Hosseini, Vinuesa, Schlatter, Hanifi, & Henningson, 2016). Ukuran memanjang (*sapanwise*) dari potongan sayap tersebut adalah sebesar 10% dari lebar chord. Total waktu satu kali simulasi pada penelitian tersebut membutuhkan waktu 35 juta *core-hours*.

Persamaan RANS muncul dengan menerapkan dekomposisi Reynolds pada persamaan original Navier-Stokes. Dekomposisi ini membagi kecepatan menjadi komponen kecepatan rata-rata aliran turbulen dan komponen fluktuasinya yang diperkenalkan oleh Osborne Reynold (Reynolds, 1895). Persamaan ini menjelaskan keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada fluida, yaitu gaya-gaya benda dan gaya-gaya permukaan yang diselesaikan melalui kuantitas rata-rata aliran (Yusuf, Asako, Sidik, Mohamed, & Japar, 2020). Sebagian besar peneliti fokus pada kemampuan model RANS untuk memprediksi kinerja VAWT, meskipun model RANS yang asli yaitu *Reynolds Stress Model* (RSM) akurat pada banyak kasus tetapi memiliki kompleksitas dalam memecahkan enam persamaan transport (Takahashi, Uchida, Yoshino, Yamamoto, & Kitamura, 1995). Penyelesaian *Reynold Stress Tensor* yang lebih sederhana diusulkan melalui Hipotesis Boussinesq dengan model viskositas eddy (Versteeg & Malalasekera, 2007). Viskositas turbulen disederhanakan melalui asumsi isotropik membuat nya lebih mudah dan cepat diselesaikan.

Pada dasarnya, model RANS berkaitan erat dengan model turbulensi. Untuk memperoleh solusi persamaan numerik, model turbulensi merupakan prosedur komputasi untuk mendekati sistem persamaan aliran sehingga masalah aliran yang bervariasi dapat dihitung. Secara garis besar, model turbulensi digunakan untuk memodifikasi persamaan Navier Stokes melalui nilai rata-rata serta besarnya fluktuasi untuk menghasilkan persamaan RANS (Blazek, 2015). Melalui pendekatan model turbulensi ini, perhitungan dengan metode CFD dapat diselesaikan dengan waktu dan usaha yang lebih sedikit.

Umumnya, model turbulensi berdasarkan viskositas *eddy* memiliki beberapa model pendekatan yang populer digunakan seperti  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , dan Spalart-Allmaras (Blazek, 2015). Proses perancangan VAWT menggunakan metode CFD akan lebih ekonomis jika menggunakan pendekatan tersebut, namun tidak semua model dapat memberikan hasil yang akurat pada seluruh kasus. Pada fenomena fisik tertentu model turbulen yang satu lebih akurat daripada model yang lain. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini dengan tujuan untuk menyelidiki model turbulen berdasarkan viskositas eddy yang paling akurat dengan cara membandingkan hasil penelitian ini terhadap hasil eksperimental pada VAWT tipe Darrieus.

## KAJIAN PUSTAKA

### Parameter Kinerja Turbin

Untuk mengetahui kinerja turbin, digunakan parameter non-dimensi, yakni koefisien daya ( $C_p$ ). Koefisien daya adalah hal yang paling umum digunakan dalam mewakili kinerja turbin juga dikenal sebagai efisiensi (Zafirakis, Paliatsos, & Kaldellis, 2012). Karena turbin arus berputar, kinerja hidrodinamika merupakan fungsi dari kecepatan putar dan kecepatan aliran jauh. Adapun persamaan matematis dari  $C_p$  yakni,

$$C_p = \lambda C_m \quad (2.1)$$

Dimana  $\lambda$  adalah *Tip Speed Ratio* (TSR) yang merupakan perbandingan kecepatan linier perputaran turbin terhadap kecepatan aliran jauh ( $U_\infty$ ) fluida yang mengenai turbin dengan persamaan sebagai berikut,

$$\lambda = \frac{\omega r}{U_\infty} \quad (2.2)$$

Persamaan untuk koefisien momen ( $C_m$ ) adalah

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} \quad (2.3)$$

Dimana :

$\omega$  = kecepatan sudut putar turbin

$r$  = radius turbin

$T$  = torsi mekanik

$\rho$  = densitas fluida

$A$  = luas penampang turbin

### Persamaan Atur pada Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS)

Persamaan RANS melakukan perhitungan parameter-parameter aliran berdasarkan nilai rata-rata dari fluktuasi turbulensi. Pada aliran turbulen, semua variabel berfluktuasi secara acak dari waktu ke waktu, termasuk tekanan ( $P = \bar{P} + P'$ ) dan kecepatan ( $u = \bar{u} + u'$ ). Persamaan atur yang digunakan pada RANS tercipta akibat dekomposisi Reynold pada Navier-Stokes asli, sehingga terbentuk persamaan baru seperti berikut (Versteeg & Malalasekera, 2007),

$$\text{Continuity} \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (2.4)$$

$$x\text{-momentum} \quad -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \rho g = \rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} \right) + \nabla \cdot \overline{RS} \quad (2.1)$$

$$y\text{-momentum} \quad -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \rho g = \rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} \right) + \nabla \cdot \overline{RS} \quad (2.2)$$

$$z\text{-momentum} \quad -\nabla \bar{P} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \rho g = \rho \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{w} \cdot \nabla \bar{w} \right) + \nabla \cdot \overline{RS} \quad (2.3)$$

Persamaan 2.5 hingga 2.7 diatas memiliki suatu kuantitas baru yakni  $\nabla \cdot \overline{RS}$  yang merupakan Tegangan Tensor Reynolds.

**Model Reynolds Stress Turbulence (RST)**

Model *Reynolds Stress Turbulence* (RST) merupakan model RANS asli yang dikembangkan untuk memprediksi aliran turbulen melalui gejala viskoelastik. RST mengungkapkan mengenai viskositas turbulen dan menentukan tegangan turbulen secara langsung dengan cara menyelesaikan persamaan transport untuk setiap komponen tegangan (Blazek, 2015). Persamaan yang harus diselesaikan oleh Model RST yaitu 1 persamaan untuk kontinuitas, 3 persamaan momentum, dan 7 persamaan tegangan Reynold ( $\nabla RS$ ).

$$\nabla RS = \begin{vmatrix} \overline{\rho u' u'} & \overline{\rho u' v'} & \overline{\rho u' w'} \\ \overline{\rho v' u'} & \overline{\rho v' v'} & \overline{\rho v' w'} \\ \overline{\rho w' u'} & \overline{\rho w' v'} & \overline{\rho w' w'} \end{vmatrix} \tag{2.8}$$

Pada aliran 3-dimensi  $\nabla RS$  memiliki 9 buah persamaan, tetapi akibat efek simetri tinggal menyisakan 6 persamaan unik dan 1 persamaan simetri ( $\overline{\rho u' u'} = \overline{\rho v' v'} = \overline{\rho w' w'}$ ).

**Model Turbulen Viskositas Eddy**

Suatu aliran turbulen akan menunjukkan adanya pusaran yang kemudian dikenal sebagai aliran eddy jika diberi injeksi (misalnya aliran udara yang diinjeksi asap, atau aliran air yang diinjeksi tinta). Model viskositas eddy menyederhanakan tegangan Reynolds dengan mengasumsikan bahwa gerak turbulensi sama dengan gerak Brown, sehingga persamaan (2.5) menjadi persamaan (2.9).

$$-\nabla \bar{P} + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \bar{u} + \rho g = \rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} \right) \tag{2.9}$$

Sedangkan tegangan Reynolds diselesaikan melalui rata-rata kecepatan aliran sebagai berikut

$$RS = \mu_t \nabla \bar{u} \tag{2.10}$$

Dimana  $\mu_t$  merupakan viskositas turbulen yang mengontrol kekuatan gaya gesekan fluida dalam aliran turbulen (Blazek, 2015). Model turbulen berdasarkan viskositas eddy terbagi lagi menjadi berbagai macam. Model turbulen dengan satu persamaan dan dua persamaan menjadi populer karena usaha komputasinya yang ringan.

**k-ε Model**

Model turbulen k-ε diajukan oleh Harlow dan Nakayama pada 1968 dan hingga saat ini menjadi model turbulen dua persamaan viskositas eddy yang paling banyak digunakan. Untuk menyelesaikan persamaan tegangan Reynolds, model turbulen k-

epsilon menggunakan 2 persamaan transport, yaitu energi kinetik turbulen ( $k$ ) dan laju disipasi energi kinetik turbulen ( $\epsilon$ ).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.11)$$

Persamaan transport energi kinetik turbulen pada model turbulen k- $\epsilon$  sebagai berikut,

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}}_{\text{Time}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right]}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k}_{\text{Sources + Sinks}} \quad (2.42)$$

Sedangkan persamaan transport untuk laju disipasi energi kinetik turbulen adalah,

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t}}_{\text{Time}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right]}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{C_1 \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_3 P_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon}_{\text{Sources + Sinks}} \quad (2.53)$$

Dalam persamaan di atas, energi kinetik turbulen ( $k$ ) adalah energi kinetik eddy dalam aliran turbulen per satuan massa. Meskipun laju disipasi turbulen ( $\epsilon$ ) dalam laju disipasi ( $k$ ) yang diubah menjadi panas.

### k- $\omega$ Model

Model k- $\omega$  merupakan model turbulensi berdasarkan model Wilcox k-omega. Untuk menghitung efek aliran pada bilangan Reynolds rendah, model ini memasukkan beberapa modifikasi. Model ini didasarkan model empiris persamaan transport untuk energi kinetik turbulen ( $k$ ) dan laju disipasi energi spesifik ( $\omega$ ). Hubungan matematis antara  $k$  dan  $\omega$  adalah,

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (2.64)$$

Persamaan transport ( $k$ ) dan ( $\omega$ ) pada model turbulen k- $\omega$  berurutan sebagai berikut,

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}}_{\text{Time}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right]}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{P_k + P_b - \rho \epsilon + S_k}_{\text{Sources + Sinks}} \quad (2.75)$$

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t}}_{\text{Time}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \omega)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right]}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2}_{\text{Sources + Sinks}} \quad (2.86)$$

Dimana,  $\omega$  adalah laju disipasi turbulen spesifik, yakni  $\epsilon/k$ . Omega dan epsilon memiliki arti fisik yang hampir mirip namun dengan sudut pandang yang berbeda.

### Shear-Stress-Transport (SST) k- $\omega$

Model *Shear-Stress-Transport* (SST) didesain untuk memberikan akurasi yang tinggi terhadap letak awal dan kondisi aliran separasi akibat gradien tekanan balik (*adverse pressure gradient*) dengan memasukkan efek transport ke dalam formulasi viskositas eddy. Model SST mengkompromikan kelemahan antara k- $\epsilon$  dan k- $\omega$ . Persamaan baru SST memiliki fungsi penggabung di dekat dinding menggunakan k- $\omega$  sedangkan k- $\epsilon$  untuk zona jauh dari dinding. Fungsi penggabung  $F_1$  bergantung pada nilai  $y^+$ . Nilai  $F_1$  adalah 1 untuk  $y^+ = 0$  dan hampir 0 untuk daerah terjauh dari dinding (Versteeg & Malalasekera, 2007). Korelasi antara  $\omega$  dan  $\epsilon$  sebagai berikut,

$$\omega = \frac{\epsilon}{C_\mu k} \quad (2.97)$$

Persamaan transport energi turbulen kinetik yang digunakan pada model ini adalah,

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}}_{\text{Time}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\omega)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2}_{\text{Sources + Sinks}} + \underbrace{2 \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla k : \nabla \omega}_{\text{Cross-diffusion}} \quad (2.10)$$

Sedangkan persamaan transport untuk laju disipasi spesifik turbulen kinetik energi sebagai berikut,

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}}_{\text{Time}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\omega)}_{\text{Convection}} = \underbrace{\nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2}_{\text{Sources + Sinks}} + \underbrace{2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla k : \nabla \omega}_{\text{Additional Term}} \quad (2.119)$$

### Spalart-Allmaras

Model Spalart-Allmaras (SA) terbilang model turbulen yang sederhana karena tidak perlu menghitung skala panjang (*length scale*). SA efektif untuk melakukan pemodelan turbulen pada bilangan Re yang rendah. Persamaan matematis pada model ini adalah,

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f \quad (2.20)$$

Dimana, nutilda ( $\tilde{\nu}$ ) merupakan parameter yang sangat mirip dengan viskositas turbulen tetapi linier terhadap  $y^+$  (Blazek, 2015). Sedangkan persamaan transport  $\tilde{\nu}$  dijabarkan seperti berikut,

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\tilde{\nu})}{\partial t}}_{\text{Time}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\tilde{\nu})}_{\text{Convection}} = \underbrace{\frac{1}{\sigma_\nu} \nabla \cdot \left[ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \nabla(\tilde{\nu}) + C_{b2}\rho \frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial z} \frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial z} \right]}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{C_{b1}\rho S\tilde{\nu} - C_{w1}\rho f_w \left( \frac{\tilde{\nu}}{\kappa y} \right)^2}_{\text{Sources + Sinks}} \quad (2.21)$$

## Metode Penelitian

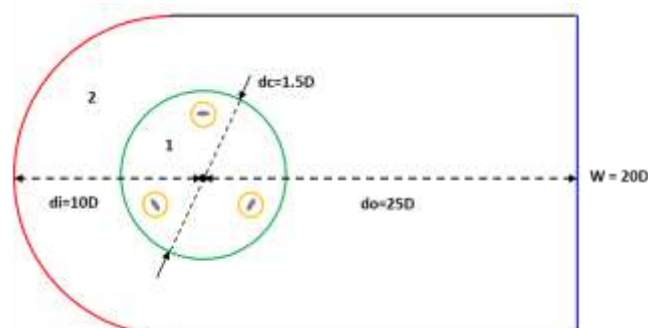
### Geometri dan Domain Komputasi

Penelitian ini melakukan perbandingan hasil komputasi menggunakan metode CFD dengan data eksperimen turbin sumbu vertikal yang dipublikasikan oleh (Bouhal et al., 2018). Sehingga model geometri turbin yang digunakan juga mengacu pada referensi tersebut. Model uji fisik kemudian disederhanakan pada simulasi CFD menjadi 2-Dimensi dengan memodelkan sudu turbin tanpa adanya shaft dan struktur pendukung. Konfigurasi ukuran turbin yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1**  
**Konfigurasi turbin**

Parameter	Nilai
<i>Airfoil</i>	NACA63 <sub>3</sub> -18
<i>Cord length (c)</i>	0.0563 m
Tinggi (H)	0.45 m
<i>Aspect ratio (H/D)</i>	1.5
Jumlah blade (n)	3
<i>Solidity</i>	1.126

Domain berbentuk C dipilih untuk mengurangi pembuatan mesh yang tidak perlu pada daerah dekat inlet. Ukuran dimensi domain ditentukan untuk menghindari pengaruh jarak dinding terhadap hasil komputasi dari kinerja turbin. Penelitian lain mengenai efek jarak ukuran domain telah dilakukan oleh Rezaeiha et al., (2017). Jarak pusat turbin dengan *inlet* ( $d_i$ ) sebesar 10 x diameter dibandingkan jarak lebih lebar 15 x diameter hanya memberikan selisih sebesar 1% terhadap efisiensi turbin (Rezaeiha, Kalkman, & Blocken, 2017). Sedangkan jarak pusat turbin dengan *outlet* ( $d_o$ ) terbaik berada pada nilai 25D. Pada penelitian tersebut menyebutkan radius zona rotasi ( $d_c$ ) tidak banyak memberi efek, tetapi lebar domain ( $w$ ) terbaik sebesar 20D. Rekomendasi yang diberikan tersebut kemudian diadopsi dalam pembuatan domain komputasi penelitian saat ini, seperti terlihat pada Gambar 1.



**Gambar 1. Pengaturan kondisi batas**

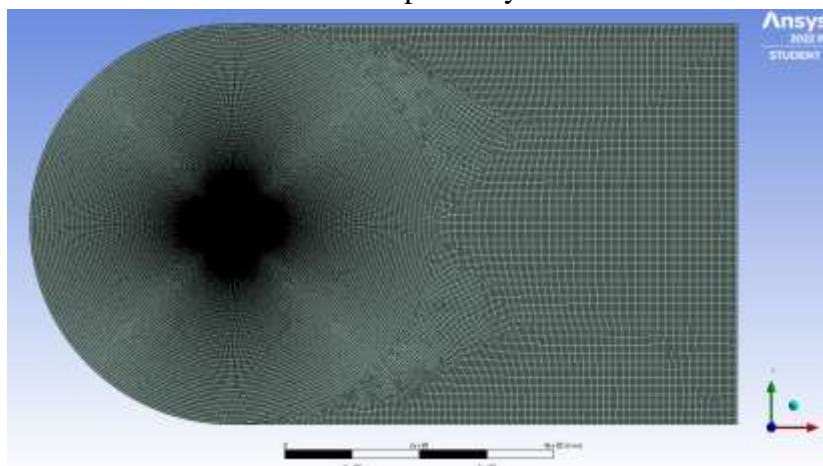
Garis merah menunjukkan pengaturan kondisi batas berupa *inlet* yakni area masuknya fluida ke dalam domain. Sedangkan garis biru pada sisi kanan merupakan



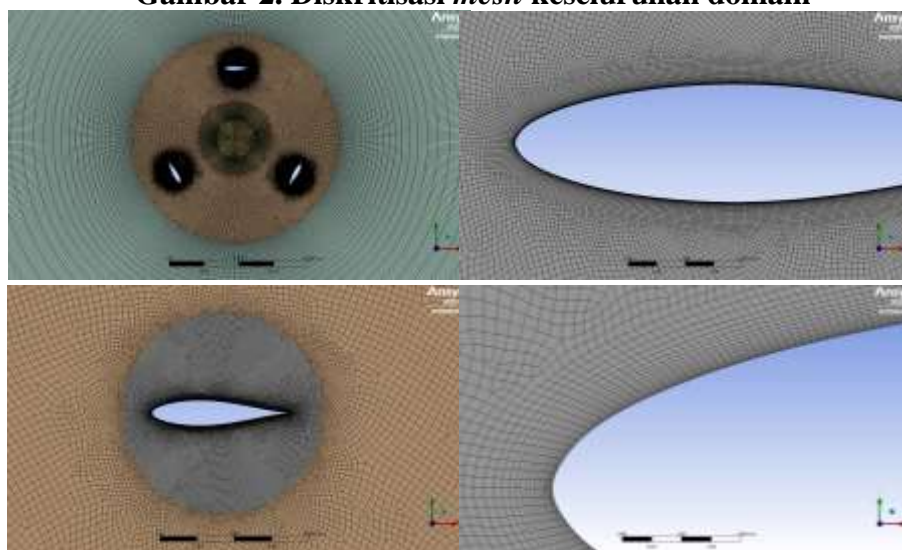
*outlet* yang merupakan area keluarnya fluida dari daerah domain. Pada kondisi batas *inlet* diberikan nilai konstan sebesar 1 m/s sedangkan pada *outlet* diatur sebagai *pressure outlet* dengan distribusi tekanan 0 Pa. Area dengan nomor 1 merupakan *rotating zone*, yang menjadi zona berputarnya turbin. Sedangkan area dengan nomor 2 didefinisikan sebagai *fixed zone*. Untuk menghubungkan antara *rotating zone* dengan *fixed zone* maka digunakan kondisi batas interface yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan garis lingkaran berwarna hijau. Warna abu-abu menunjukkan sudu turbin dengan profil airfoil NACA63<sub>3</sub>-18 yang didefinisikan sebagai dinding tanpa kondisi selip.

### Pembuatan *Mesh*

Hasil pembuatan kondisi batas kemudian digunakan pada langkah selanjutnya yaitu *meshing*. Proses ini merupakan tahapan yang sangat penting dalam simulasi CFD. Strategi pembuatan *mesh* mempengaruhi akurasi hasil akhir komputasi. Semakin padat *mesh* yang dibuat, akurasi akan semakin tinggi namun komputasi semakin berat. Karenanya kepadatan mesh akan dipertahankan pada daerah-daerah penting seperti permukaan sudu turbin, area dekat dengan sudu, zona rotasi dan *interface* zona rotasi. Sedangkan daerah lain dibiarkan rendah kepadatannya.



Gambar 2. Diskritisasi *mesh* keseluruhan domain



Gambar 3. Diskritisasi *mesh* zona rotasi dan area dekat foil

Model *mesh* semi terstruktur dengan kombinasi tipe *quadrilateral* telah digunakan. Struktural mesh akan mengurangi waktu komputasi sedangkan mesh tak terstruktur digunakan pada daerah dekat sudu dan zona rotasi akibat bentuk yang kompleks. Area dekat sudu diberikan perlakuan khusus berupa lapisan inflasi. Prosedur ini bertujuan untuk menjaga supaya nilai  $y^+$  sebesar 1 atau lebih kecil terutama pada permukaan foil dekat dengan *trailing edge*. Dimana fenomena sparasi aliran terjadi pada daerah ini. Nilai  $y^+$  kurang dari 1 sesuai yang direkomendasikan untuk kasus aliran eksternal pada foil (Marsh, Ranmuthugala, Penesis, & Thomas, 2017). Hasil dari pembuatan *mesh* seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 3. Jumlah elemen total *mesh* yang dibuat sekitar 140.000 digunakan sebagai acuan awal sesuai penelitian oleh Taher et al., (2014) (Abu-El-Yazied, Ali, & Montasser, 2014). Selanjutnya akan dibuat variasi jumlah elemen *mesh* yang untuk digunakan uji sensitivitas atau dikenal dengan istilah *grid independency test*.

### Pengaturan Fisik

Simulasi CFD 2-dimensi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent. Pengaturan parameter masukan dilakukan dengan tuntutan agar dapat merepresentasikan kondisi fisik. Model fisik aliran fluida *incompressible* digunakan pada simulasi ini. Aliran fluida diselesaikan menggunakan persamaan Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (U-RANS). Sedangkan perputaran turbin dimodelkan dengan teknik *sliding mesh*. Parameter simulasi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2**  
**Pengaturan Parameter simulasi**

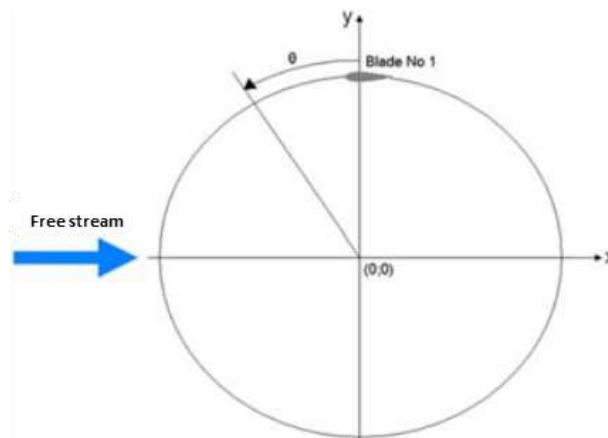
Parameter	Nilai
<i>Viscous model</i>	Spalart-Allmaras, <i>Realizable</i> $k-\epsilon$ , <i>Shear Stress Transport</i> (SST) $k-\omega$ dan <i>transition</i> SST $k-\omega$
TSR	1,43; 1,59; 1,78; 2,06 dan 2,41
<i>Turbine blades</i>	<i>No slip wall</i>
<i>Boundary wall</i>	<i>Symmetry</i>
<i>Inlet</i>	<i>Velocity inlet</i>
<i>Outlet</i>	<i>Pressure outlet</i>
<i>Turbulent intensity</i>	1%
<i>Turbulent length scale</i>	0.07D

Penentuan *time step* menjadi salah satu hal yang penting agar diperoleh hasil dengan akurasi yang baik. *Time step* ditentukan berdasarkan sudut kenaikan azimuth dari simulasi. Persyaratan minimum sudut kenaikan azimuth harus diberikan pada model U-RANS. Pada kasus simulasi VAWT 2-dimensi penambahan sudut azimuth ( $\varphi$ ) sebesar  $1^\circ$  telah direkomendasikan oleh Rezaeiha et al., (2018) (Rezaeiha, Montazeri, & Blocken, 2018). Sesuai yang disebutkan Satrio et al., (2018), bahwa sudut azimuth  $1^\circ$  memberikan akurasi tinggi namun dengan waktu komputasi lama (Satrio & Utama,

2018). Dalam pengaturan CFD, kenaikan sudut azimuth dapat dikonversi menjadi *time step* menggunakan persamaan berikut,

$$\Delta t = \frac{\varphi(\text{sudut azimuth})}{180 \cdot \omega / \pi} \quad (2.20)$$

Posisi sudut azimuth awal dimulai dari posisi awal sudu nomor 1 seperti terlihat pada Gambar 4. Turbin berputar berlawanan arah jarum jam, paruh pertama putaran sudu nomer 1 merupakan daerah *upstream* dan paruh kedua merupakan daerah *downstream*. Pembagian kedua zona tersebut perlu dilakukan karena momen negatif sering terjadi didaerah ini (Wardhana & Fridayana, 2018). Dengan kenaikan sudut azimuth  $1^\circ$  maka *number of time steps* dalam satu kali revolusi sebanyak 360. Proses komputasi secara iteratif digunakan pada tiap sudut azimuth. Nilai residual  $10^{-5}$  disyaratkan untuk penyelesaian seluruh persamaan momentum dan persamaan turbulen Spalart-Allmaras, *Realizable*  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  SST dan *transition* SST  $k-\omega$ . Sedangkan residual untuk kontinuitas diatur pada nilai  $10^{-4}$  guna mempersingkat waktu komputasi. Apabila syarat nilai residual minimum tersebut terpenuhi atau telah mencapai jumlah iterasi maksimal sebanyak 100 kali maka komputasi dilanjutkan pada *time step* berikutnya. Metode diskritisasi second-order dengan algoritma SIMPLE digunakan untuk menyelesaikan seluruh persamaan transport. Simulasi dilakukan menggunakan komputer dengan prosesor Amd Ryzen 9 seri 3900x yang memiliki 12 inti dan 32 Gb RAM. Namun Ansys Fluent versi *student* hanya bisa dijalankan 4 proses parallel.



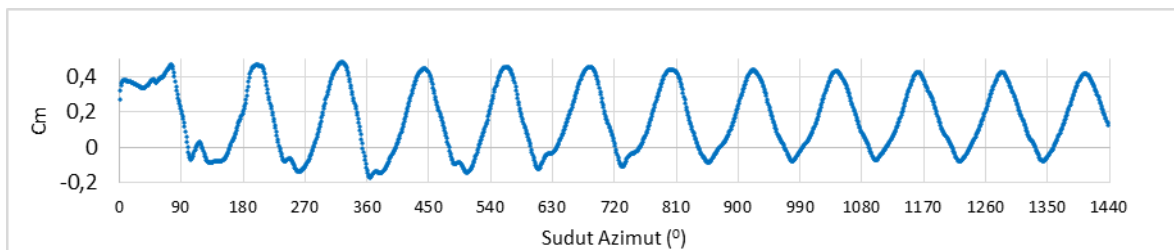
**Gambar 4. Koordinat azimuth dari sudu nomor 1**

Hasil simulasi berupa data koefisien momen ( $C_m$ ) pada tiap-tiap posisi azimuth selanjutnya diolah agar diperoleh koefisien daya ( $C_p$ ) dalam satu revolusi. Koefisien momen rata-rata ( $\overline{C_m}$ ) bersama TSR digunakan untuk menghitung ( $C_p$ ) sesuai persamaan berikut,

$$C_p = \frac{\overline{C_m} \frac{1}{2} \rho u^2 A R \omega}{\frac{1}{2} \rho A u^3} = \overline{C_m} \frac{\omega R}{u} \quad (3.12)$$

$$C_p = \overline{C_m} \times TSR \quad (3.2)$$

Hasil simulasi yang konvergen tidak cukup diperoleh hanya dengan melakukan komputasi selama 1 kali revolusi saja. Hal ini disebabkan akibat proses inisialisasi diawal simulasi yang belum cukup mencerminkan aliran fluida pada turbin yang berputar. Sehingga butuh waktu dalam pembentukan aliran selama beberapa revolusi turbin.



**Gambar 5. Kurva  $C_m$  sebagai fungsi sudut azimut untuk TSR 1,78 (k- $\omega$  SST)**

Proses tercapainya konvergensi terlihat pada Gambar 5 yang merupakan hasil komputasi untuk TSR 1,78 dengan model turbulen k- $\omega$  SST. Hasil akhir  $C_p$  dianggap konvergen dengan syarat yaitu selisih hasil dengan  $C_p$  revolusi sebelumnya tidak lebih dari 5% seperti terlihat pada Tabel 3.

**Tabel 3**  
**Hasil  $C_p$  tiap revolusi untuk TSR 1,78 (k- $\omega$  SST)**

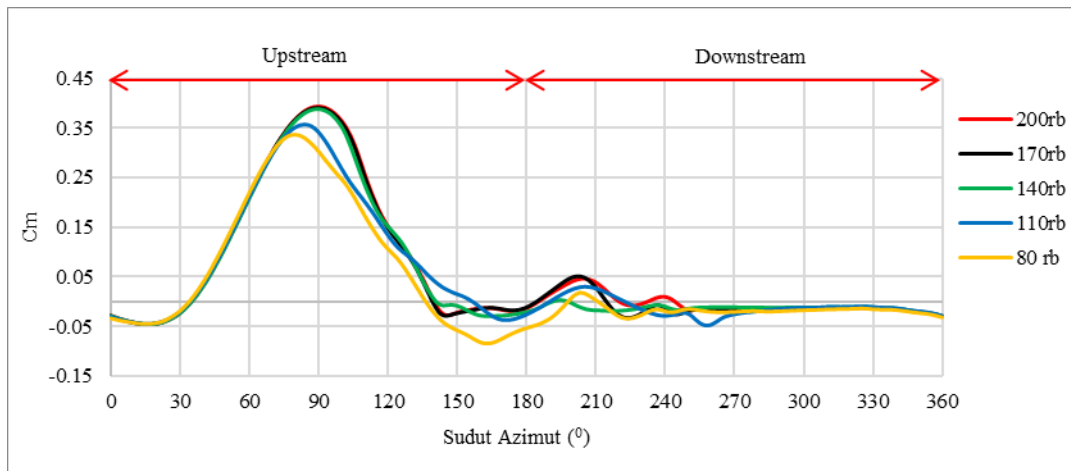
Revolusi	$C_p$	Deviasi	Keterangan
1	0,313	-	
2	0,238	31,58%	
3	0,282	15,78%	
4	0,284	0,60%	! Konvergen

### Hasil dan Pembahasan Grid Independency Test

Tingkat akurasi hasil simulasi terhadap perubahan jumlah elemen *mesh* diuji melalui prosedur *grid independency test*. Pada proses CFD, jumlah elemen *mesh* akan mempengaruhi lamanya proses komputasi. Semakin banyak jumlah elemen yang digunakan, maka akurasi semakin tinggi tetapi waktu komputasi semakin lama. Mengurangi jumlah elemen akan membuat waktu komputasi berjalan lebih singkat namun mengorbankan akurasi. Oleh karena itu, *grid independency test* berperan penting untuk menemukan berapa jumlah sel yang ideal dalam proses CFD yang dikerjakan.

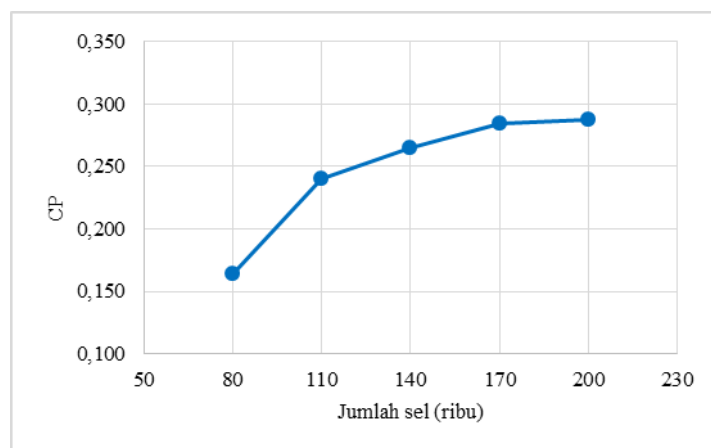
Pada penelitian ini, jumlah elemen *mesh* yang digunakan sebanyak 5 variasi. Pertambahan total elemen tiap variasinya sebesar 30.000 elemen, sehingga variasi total

elemen yang ada yaitu 80.000, 110.000, 140.000, 170.000 dan 200.000. Proses *grid independency test* ini dilakukan pada TSR 2,06 dengan kecepatan fluida 1 m/s.



**Gambar 6. Kurva  $C_m$  sudu nomor 1 terhadap sudut azimut ( $\varphi$ ) untuk masing-masing variasi *mesh***

Hasil simulasi masing-masing variasi total mesh disajikan sebagai kurva  $C_m$  untuk sudu nomor 1 terhadap sudut azimut dalam satu putaran penuh seperti pada Gambar 6. Pada zona *upstream* momen positif terbentuk secara dominan diseluruh variasi jumlah *mesh*. Dimana semakin padat *mesh* maka semakin besar momen positif yang terbentuk. Hingga akhirnya pertambahan nilai momen menjadi sangat kecil mulai dari total elemen 140.000 hingga 200.000. Sedangkan pada zona *downstream* masing-masing variasi jumlah *mesh* memberikan hasil yang beragam. Tetapi terlihat jelas bahwa total elemen 170.000 dan 200.000 memiliki besaran dan perilaku kurva yang sangat mirip.



**Gambar 7. Koefisien daya ( $C_p$ ) untuk masing-masing jumlah elemen**

Seiring meningkatnya jumlah total elemen *mesh*, nilai koefisien daya yang dihasilkan cenderung semakin besar yang dapat dilihat pada Gambar 7. Kenaikan nilai

$C_p$  tiap penambahan jumlah elemen *mesh* disajikan pada tabel 4 beserta deviasi setiap perubahan yang terjadi.

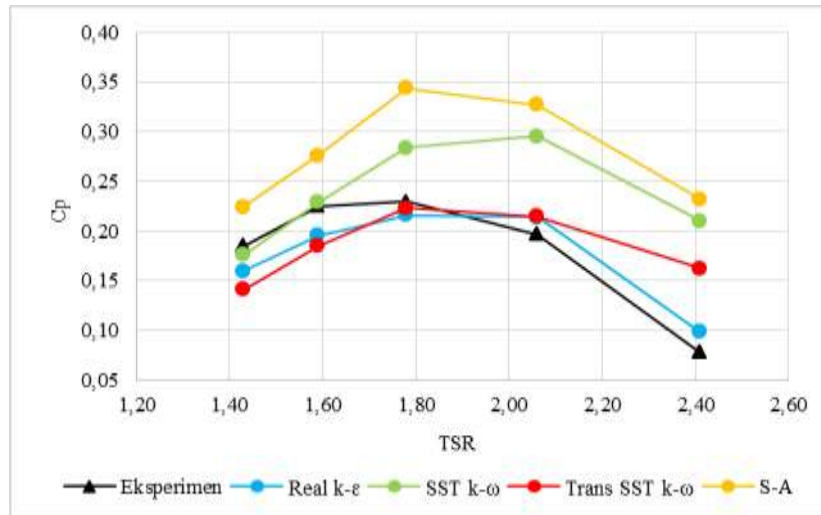
**Tabel 4**  
**Deviasi grid independency test koefisien daya ( $C_p$ )**

<i>Mesh</i> (ribu)	$C_p$	Deviasi
80	0,164	-
110	0,241	31,68%
140	0,265	9,34%
170	0,284	6,59%
200	0,287	1,11%

Penambahan jumlah elemen sebesar 30.000 dari 80.000 hingga menjadi 110.000 mengakibatkan perubahan nilai koefisien daya yang signifikan. Sedangkan penambahan jumlah elemen dari 170.000 menjadi 200.000 hanya menyebabkan perubahan koefisien daya sebesar 1,11%. Terlebih, bila dilihat kurva koefisien daya pada Gambar 7, penambahan jumlah sel 170.000 menjadi 200.000 memberikan kurva yang landai. Artinya, penambahan tersebut tidak memberi perubahan yang berarti, namun hal tersebut menyebabkan proses komputasi berlangsung semakin lama. Dengan demikian, berdasarkan *grid independency test* yang dilakukan, jumlah *mesh* yang dipilih untuk proses komputasi selanjutnya adalah sebanyak 170.000 elemen.

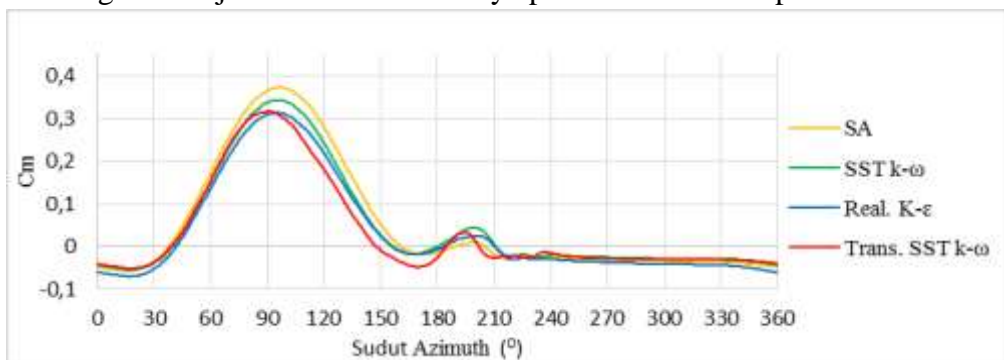
#### **Validasi Model Turbulen**

Hasil simulasi dengan variasi model turbulen Realizable  $k-\epsilon$ , SST  $k-\omega$ , spart-allmaras dan *transition* SST  $k-\omega$  selanjutnya dilakukan validasi. Proses simulasi dilakukan pada TSR 1,43; 1,59; 1,78; 2,06; dan 2,41 dan pada kecepatan fluida 1 m/s. Proses validasi mengacu pada data eksperimen sekunder yang dilakukan oleh Fertahi et al., (2018) (Bouhal et al., 2018). Validasi dilakukan melalui kurva  $C_p$  pada masing-masing model turbulensi yang digunakan dan membandingkannya dengan data eksperimen sekunder. Perbandingan kurva  $C_p$  tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.



**Gambar 8. Perbandingan kurva Cp-TSR tiap-tiap model turbulen dan data eksperimen sekunder**

Hampir semua model turbulen memiliki bentuk kurva Cp-TSR yang mirip dengan data eksperimen. Semua mencapai puncak kurva pada TSR 2,06 kecuali model turbulen SST k- $\omega$  yang mencapai puncak kurva saat nilai TSR 2,06. Kurva Cm- $\varphi$  pada sudu nomor 1 untuk TSR 2,06 terlihat pada gambar 9. Pada zona *upstream* pembangkitan momen positif memiliki bentuk kurva yang mirip antar model turbulen kecuali *transition* SST k- $\omega$ . Walaupun memiliki nilai besaran yang berbeda. Namun pada zona *downstream* SST k- $\omega$  memproduksi momen positif lebih banyak dari lainnya. Hal ini mungkin menjadi sebab terlambatnya penurunan kurva Cp-TSR dari SST k- $\omega$ .



**Gambar 9. Perbandingan Cm- $\varphi$  tiap model turbulen sudu nomor 1 TSR 2,06**

**Tabel 5**  
**Perhitungan koefisien daya ( $C_p$ ) dan error masing-masing model turbulen**

TSR	$C_p$					Error (%)			
	Eks.	Real. k- $\epsilon$	SST k- $\omega$	Trans. SST k- $\omega$	S-A	Real. k- $\epsilon$	SST k- $\omega$	Trans. SST k- $\omega$	S-A
1,43	0,185	0,160	0,176	0,142	0,225	13,68	4,65	23,49	21,50
1,59	0,225	0,195	0,229	0,185	0,276	13,20	1,73	17,78	22,64
1,78	0,230	0,216	0,284	0,223	0,344	5,93	23,51	2,95	49,45
2,06	0,197	0,215	0,296	0,215	0,327	8,90	50,16	8,97	66,17
2,41	0,078	0,099	0,211	0,162	0,233	26,45	170,08	108,09	198,15
Error rata-rata						13,63	50,02	32,26	71,58

Untuk TSR rendah kurva  $C_p$  dari SST k- $\omega$  berhimpit dengan kurva  $C_p$  eksperimen, namun setelahnya selalu memiliki hasil yang berlebihan. Sedangkan untuk spalart-allmaras hasil  $C_p$  selalu jauh lebih besar dibanding eksperimen. Realizable k- $\epsilon$  dan *transition* SST k- $\omega$  memiliki perilaku kurva  $C_p$ -TSR yang mirip. Keduanya menghasilkan  $C_p$  lebih rendah pada TSR kurang dari 2,06 namun pada TSR selanjutnya  $C_p$  dihasilkan selalu lebih besar dari data eksperimen. Kedua model turbulen ini memiliki nilai error yang sangat kecil untuk TSR 2,06. Dimana selisih  $C_p$  Realizable k- $\epsilon$  sebesar 5,93% sedangkan untuk *transition* SST k- $\omega$  hanya 2,95%. Nilai  $C_p$  dan error tiap model turbulen disajikan pada tabel 5. Secara keseluruhan, Realizable k- $\epsilon$  memberikan akurasi lebih baik untuk seluruh rentang TSR dengan error rata-rata sebesar 13,63%. Sedangkan akurasi paling buruk dengan rata-rata error sebesar 71,58% diberikan oleh spalart-allmaras.

**Tabel 6**  
**Durasi komputasi selama 1 revolusi tiap-tiap model turbulen**

Model Turbulen	Lama Komputasi
S-A	32,4 menit
SST k- $\omega$	51,6 menit
Real. k- $\epsilon$	49,2 menit
Trans. SST k- $\omega$	62,4 menit

Model turbulen spalart-allmaras dengan 1 buah persamaan transport memberikan waktu komputasi paling cepat yakni 32,4 menit dalam satu kali revolusi. Sayangnya keuntungan tersebut mengorbankan akurasi yang cukup signifikan. Realizable k- $\epsilon$  dan SST k- $\omega$  relatif membutuhkan waktu yang hampir sama. Keduanya memiliki 2 persamaan transport yang harus diselesaikan. Sedikit selisih waktu komputasi mungkin akibat konvergensi tiap time step mudah dicapai oleh Realizable k- $\epsilon$ . Sedangkan usaha komputasi paling berat diberikan oleh *transition* SST k- $\omega$ . Banyaknya persamaan transport yang harus diselesaikan untuk mencakup efek transisi dan intermitensi memberi perbaikan akurasi namun kurang memuaskan.



### **Kesimpulan**

Model turbulen berdasarkan viskositas eddy telah digunakan dalam simulasi CFD saat ini. Berbagai macam model yang dipilih memberikan hasil akhir  $C_p$ -TSR yang beragam. Tetapi hasilnya dapat diterima dalam kasus VAWT 2-dimensi. Semakin banyak persamaan transport pada suatu model turbulen memberikan tambahan waktu komputasi. Spalart allmaras dengan satu persamaan transport memiliki waktu komputasi paling singkat namun mengorbankan akurasi yang besar. Memilih Transition SST  $k-\omega$  yang memiliki 4 persamaan transport menjadi pilihan bagus pada TSR rendah, namun lewat dari titik puncak kurva  $C_p$ -TSR memberikan hasil yang berlebih dibanding data eksperimen. Realizable  $k-\epsilon$  menjadi pilihan terbaik yang handal pada TSR tinggi maupun rendah. Penggunaan SST  $k-\omega$  malah memberikan perilaku kurva  $C_p$ -TSR berbeda dari eksperimen, padahal model ini terkenal akurat untuk kasus aliran fluida eksternal yang menerjang foil.

## BIBLIOGRAFI

- A. Meana-Fernández, I. Solís-Gallego, J. Oro, K. Díaz, and S. Velarde-Suárez, "Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs," *Energy*, vol. 147, Jan. 2018.
- Abu-El-Yazied, Taher G., Ali, Ahmad M., & Montasser, Osama A. (2014). Optimization of Wind duct geometry for maximizing power generation of ducted vertical turbines. *Optimization*, 4(10).
- Beri, Habtamu, & Yao, Yingxue. (2011). Double multiple streamtube model and numerical analysis of vertical axis wind turbine. *Energy and Power Engineering*, 3(03), 262.
- Blazek, Jiri. (2015). *Computational fluid dynamics: principles and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Bouhal, T., Rajad, Omar, Kousksou, T., Arid, A., El Rhafiki, T., Jamil, A., & Benbassou, A. (2018). CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus. *Energy Conversion and Management*, 169, 266–278.
- Franchina, Nicoletta, Persico, G., & Savini, M. (2019). 2D-3D computations of a vertical axis wind turbine flow field: Modeling issues and physical interpretations. *Renewable Energy*, 136, 1170–1189.
- Hosseini, Seyed Mohammad, Vinuesa, Ricardo, Schlatter, Philipp, Hanifi, Ardeshir, & Henningson, Dan S. (2016). Direct numerical simulation of the flow around a wing section at moderate Reynolds number. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 61, 117–128.
- Ma, Ning, Lei, Hang, Han, Zhaolong, Zhou, Dai, Bao, Yan, Zhang, Kai, Zhou, Lei, & Chen, Caiyong. (2018). Airfoil optimization to improve power performance of a high-solidity vertical axis wind turbine at a moderate tip speed ratio. *Energy*, 150, 236–252.
- Marsh, Philip, Ranmuthugala, Dev, Penesis, Irene, & Thomas, Giles. (2015). Three-dimensional numerical simulations of straight-bladed vertical axis tidal turbines investigating power output, torque ripple and mounting forces. *Renewable Energy*, 83, 67–77.
- Marsh, Philip, Ranmuthugala, Dev, Penesis, Irene, & Thomas, Giles. (2017). The influence of turbulence model and two and three-dimensional domain selection on the simulated performance characteristics of vertical axis tidal turbines. *Renewable Energy*, 105, 106–116.
- Naung, Shine Win, Rahmati, Mohammad, & Farokhi, Hamed. (2021). Direct numerical simulation of interaction between transient flow and blade structure in a modern low-pressure turbine. *International Journal of Mechanical Sciences*, 192, 106104.
- Paraschivoiu, Ion. (2002). *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept*.

Presses inter Polytechnique.

- Reynolds, Osborne. (1895). IV. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.(A.)*, (186), 123–164.
- Rezaeiha, Abdolrahim, Kalkman, Ivo, & Blocken, Bert. (2017). CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Renewable Energy*, *107*, 373–385.
- Rezaeiha, Abdolrahim, Montazeri, Hamid, & Blocken, Bert. (2018). Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy Conversion and Management*, *156*, 301–316.
- Satrio, Dendy, & Utama, I. Ketut Aria Pria. (2018). The influence of time step setting on the CFD simulation result of vertical axis tidal current turbine. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, *12*(1), 3399.
- Schlör, Holger, Venghaus, Sandra, & Hake, Jürgen Friedrich. (2018). The FEW-Nexus city index–Measuring urban resilience. *Applied Energy*, *210*, 382–392.
- Takahashi, Toshiro, Uchida, Makio, Yoshino, R., Yamamoto, M., & Kitamura, N. (1995). A CMOS gate array with 600 Mb/s simultaneous bidirectional I/O circuits. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, *30*(12), 1544–1546.
- Versteeg, Henk Kaarle, & Malalasekera, Weeratunge. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Yan, Bin, Luo, Min, & Bai, Wei. (2019). An experimental and numerical study of plunging wave impact on a box-shape structure. *Marine Structures*, *66*, 272–287.
- Yusuf, Siti Nurul Akmal, Asako, Yutaka, Sidik, Nor Azwadi Che, Mohamed, Saiful Bahri, & Japar, Wan Mohd Arif Aziz. (2020). A short review on rans turbulence models. *CFD Letters*, *12*(11), 83–96.
- Wardhana W. and Fridayana E. N. (2018). *Aerodynamic Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Darrieus Type H-Rotor using Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach*. In Proceedings of the 3rd International Conference on Marine Technology - Volume 1: SENTA, ISBN 978-989-758-436-7, pages 5-11.
- Zafirakis, Dimitrios P., Paliatsos, A. G., & Kaldellis, J. K. (2012). Energy yield of contemporary wind turbines. *Comprehensive Renewable Energy*, *2*, 2–6.

**Copyright holder:**

Elyas Nur Fridayana, Yoyok Setyo Hadiwidodo, Dendy Satrio, Elysa Nensy Irawan  
(2022)

**First publication right:**

Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia

**This article is licensed under:**

