

PEMODELAN WIND TURBINE ROTOR TIPE HAWT (HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE) MENGGUNAKAN METODE VOLUME HINGGA

Millatuz Zahroh¹⁰, Dafik¹¹, Arif Fatahillah¹²

Abstract. A Wind turbine is a wind energy converters tool into electrical energy. To optimize the electrical energy converted, it needs for further research on wind turbine process. In this research, the analysis part of wind turbine is rotor, which is the contacted part to the wind. Type of wind turbine that will be analyzed in this study is HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) type because this model is the most often used type and can produce great electrical energy. This research construct a model of the air flow field form of wind turbine rotor and solve these problems by using the finite volume method. Model simulation process will be done by using MATLAB and FLUENT software. The analysis was performed with the variation initial velocity level of wind. It is 3 m/s, 5 m/s, and 7 m/s. The simulation results showed that the velocity of rotation wind turbine rotor blade higher when the initial wind velocity increases. Beside that, the result is when the initial wind velocity of 7 m/s and 5 m/s, the velocity of rotation wind turbine rotor blade tend to be more stable. With 5 m/s of wind velocity to wind turbine rotor, The difference between an average direct calculation and a SOR iterative calculation is obtained the value of relative error less than 0.1%. it is 0.079%. So the finite volume method of numerical methods is effective to solve this problem.

Key Words : Electrical Energy, Finite Volume Method, Velocity, Wind Turbine..

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan energi vital yang dibutuhkan manusia untuk menunjang kebutuhannya di berbagai aspek kehidupan. Namun, bahan bakar fosil sebagai sumber daya yang digunakan terhadap produksi energi listrik semakin menipis. Cadangan bahan bakar fosil setiap tahunnya mengalami penurunan dan akan habis dalam kurun waktu tertentu.

Untuk itu, diperlukan alternatif lain sebagai sumber energi pembangkit tenaga listrik dalam mengantisipasi kenaikan pertumbuhan kebutuhan energi listrik serta dalam meminimalisir penggunaan bahan bakar fosil.

Energi angin merupakan salah satu sumber energi alternatif terbarukan *renewable* yang potensial untuk menghasilkan energi listrik. Dalam konversi energi angin menjadi energi listrik diperlukan suatu alat yang dikenal sebagai *wind turbine*. Bagian *wind turbine* yang berinteraksi secara langsung dengan angin adalah *rotor*

¹⁰ Mahasiswa Program Studi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Jember.

¹¹ Dosen Program Studi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Jember.

¹² Dosen Program Studi Pendidikan Matematika FKIP Universitas Jember.

(baling - baling), dimana perputaran *rotor* akan terjadi akibat adanya tumbukan fluida (aliran angin). Tipe *rotor* turbin yang sering digunakan saat ini dan menghasilkan tenaga relatif tinggi disebut HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*)

Untuk pengoptimalisasian kinerja HAWT terkait dengan konversi energi angin menjadi energi listrik diperlukan suatu analisis mendalam. Pemodelan matematika sebagai cabang ilmu matematika dapat digunakan untuk merepresentasikan sistem fisik dunia real. Pemodelan persamaan matematika di dunia nyata merupakan analisis yang kompleks. Oleh karena itu dalam menganalisis medan aliran angin pada pengoptimalan kinerja *wind turbine rotor* tipe HAWT penulis menggunakan metode volume hingga.

Berdasarkan uraian di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: (1) bagaimana model matematika medan aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT (2) bagaimana pengaruh variasi kecepatan medan aliran angin terhadap tenaga putar *wind turbine rotor* tipe HAWT dan (3) bagaimana efektifitas metode volume hingga dalam menganalisis medan aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT. Penelitian ini memberikan manfaat yaitu dapat menambah pengetahuan baru bagi peneliti dan peneliti lain dalam bidang penelitian, hasil penelitian dapat memberikan gambaran simulasi aliran medan angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*) secara umum, sehingga dapat berguna bagi para teknisi dalam membangun *wind turbine*.

METODE PENELITIAN

Berdasarkan jenisnya, penelitian ini merupakan jenis penelitian murni. Dengan penelitian murni peneliti memodelkan bentuk pola kecepatan aliran udara pada *wind turbine rotor (blade)*. Penelitian dilakukan dalam tiga tahapan utama. Tahapan pertama yaitu menentukan model matematika meliputi kegiatan wawancara dan studi pustaka atau pengumpulan bahan dari literatur buku, jurnal, dan internet mengenai proses aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT. Setelah didapatkan data dari berbagai sumber, peneliti membuat peninjauan model matematika terhadap perubahan momentum dan energi dalam permasalahan ini.

Tahapan kedua menyelesaikan model matematika menggunakan metode volume hingga meliputi penyelesaian model matematika perubahan momentum dan energi hingga pendikritisasian menggunakan teknik QUICK (*Quadratic Upwind*

Interpolation Confective Kinematics). Tahapan ketiga yaitu membuat program matematika. Program matematika dibuat agar model matematika proses aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*) yang telah diselesaikan dapat di analisis dalam *software MATLAB* dan kemudian disimulasikan menggunakan *software FLUENT*. Penyelesaian secara numerik dan simulasi *FLUENT* dilakukan di laboratorium pendidikan matematika gedung III FKIP Universitas Jember.

Pengumpulan data yang dilakukan peneliti menggunakan teknik studi dokumentasi yaitu mengumpulkan data yang diperoleh dari dokumen-dokumen yang ada atau catatan-catatan yang tersimpan, baik itu berupa jurnal dan buku. Tahap ini peneliti mengumpulkan semua data-data terbaru berupa nilai variabel-variabel dan berbagai persamaan fisika dasar yang berpengaruh terhadap aliran angin serta kinerja *wind turbin rotor* untuk mengkonstruksi model matematika.

Efektivitas model medan aliran angin ditentukan dengan membandingkan kecepatan putaran *wind turbine rotor* tipe HAWT hasil simulasi perhitungan metode iteratif dengan hasil simulasi perhitungan metode analitik. Dan dihitung dengan menggunakan *error* relatif.

$$Error\ relatif = \left| \frac{a - \hat{a}}{a} \right| \tag{1}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

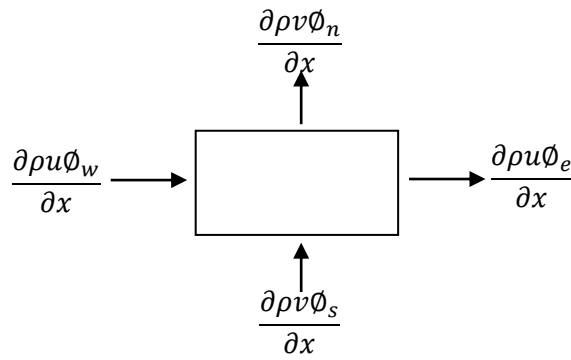
Model Medan Aliran Angin pada *Wind Turbine Rotor* Tipe HAWT

Persamaan umum untuk momentum adalah :

$$\frac{\partial \rho \phi_o}{\partial t} + [pure\ rate] = \Sigma F \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho \phi_o}{\partial t} + [Output - Input] = \Sigma F \tag{3}$$

Pada Gambar 1 persegi panjang melambangkan *blade* yang di sepanjang sisinya dialiri medan angin ditinjau dari sumbu x dan sumbu y. Dimana momentum masuk adalah $\frac{\partial \rho u \phi_w}{\partial x}$ dan $\frac{\partial \rho v \phi_s}{\partial x}$ dan momentum keluar adalah $\frac{\partial \rho u \phi_e}{\partial x}$ dan $\frac{\partial \rho v \phi_n}{\partial x}$. Gaya yang bekerja dalam aliran ini adalah gaya tekanan (∇p) gaya tegangan ($\nabla \tau_{ij}$).



Gambar 1: Bagan Volume Kendali Persamaan Momentum

Arah gaya untuk tiap sumbu (ρf_i) Dengan mensubstitusikan rumus fisika dasar, maka didapat rumus sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho \phi_o}{\partial t} + \left[\frac{\partial \rho u \phi_e}{\partial x} - \frac{\partial \rho u \phi_w}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial \rho v \phi_n}{\partial y} - \frac{\partial \rho v \phi_s}{\partial y} \right] = -\nabla p + \nabla \tau_{ij} + \rho f_i \quad (4)$$

Dimana

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Sehingga didapat persamaan momentum adalah :

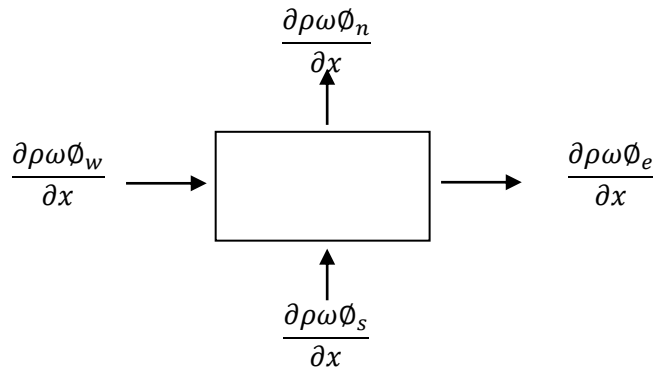
$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \phi_o}{\partial t} + \left[\frac{\partial \rho u \phi_e}{\partial x} - \frac{\partial \rho u \phi_w}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial \rho v \phi_n}{\partial y} - \frac{\partial \rho v \phi_s}{\partial y} \right] &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial y} + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ + \mu \frac{\partial u}{\partial x \partial y} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 2\mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial v}{\partial x \partial y} + \rho f_x + \rho f_y \end{aligned} \quad (6)$$

Persamaan umum untuk persamaan energi adalah :

$$\frac{\partial \rho \phi_o}{\partial t} + [pure\ rate] = S \quad (7)$$

Karena objek yang diteliti adalah aliran udara, maka :

$$\frac{\partial}{\partial t} (energi) + (fluks\ energi\ masuk - fluks\ energi\ keluar) = Source \quad (8)$$



Gambar 2: Bagan Volume Kendali Persamaan Energi

Pada Gambar 2 persegi panjang melambangkan *blade* yang di sepanjang sisinya dialiri medan angin ditinjau dari sumbu x dan sumbu y . Dimana energi masuk adalah $\frac{\partial \rho \omega \phi_w}{\partial x}$ dan $\frac{\partial \rho \omega \phi_s}{\partial x}$ dan energi keluar adalah $\frac{\partial \rho \omega \phi_e}{\partial x}$ dan $\frac{\partial \rho \omega \phi_n}{\partial x}$

$$source = \nabla(\tau_\omega \omega_i) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (9)$$

Dimana,

$$\nabla(\tau_\omega \omega_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\tau_\omega \left[\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_\omega \left[\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] \right) \quad (10)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan 9 dan persamaan 10 dan nilai *output input* pada bagan kendali pada persamaan 7 maka didapat persamaan energi adalah

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \phi_o}{\partial t} + \left[\frac{\partial \rho \omega \phi_e}{\partial x} - \frac{\partial \rho \omega \phi_w}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial \rho \omega \phi_n}{\partial y} - \frac{\partial \rho \omega \phi_s}{\partial y} \right] = \tau_\omega \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + 2\tau_\omega \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} + \\ \tau_\omega \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (11)$$

Persamaan momentum dan persamaan energi pada model matematika merupakan persamaan diferensial parsial. Untuk menyelesaikan persamaan momentum dan persamaan energi yaitu dengan mengintegrasikan persamaan diferensial sebanyak variabel bebas yang ada. Persamaan momentum 6 dan Persamaan energi 11 mengandung variabel bebas x , y , dan t . Sehingga untuk menyelesaikannya harus diintegrasikan sebanyak tiga kali,

Hasil integrasi persamaan momentum adalah:

$$\begin{aligned} \frac{\rho \phi_o \Delta x \Delta y}{\Delta t} = -p \Delta y - p \Delta x - \rho u \phi_e \Delta y + \rho u \phi_w \Delta y - \rho v \phi_n \Delta x + \rho v \phi_s \Delta x \\ + 2\mu u \frac{\Delta y}{\Delta x} + \mu u + \mu v \frac{\Delta y}{\Delta x} + 2\mu v \frac{\Delta x}{\Delta y} + \mu u \frac{\Delta x}{\Delta y} + \mu v + \rho f \Delta y + \rho f \Delta x \end{aligned} \quad (12)$$

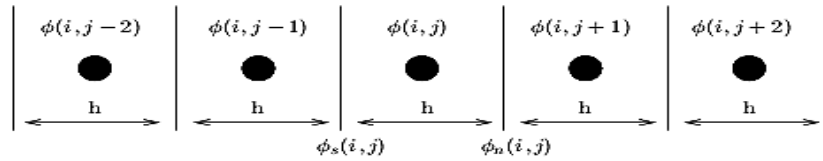
Hasil integrasi persamaan energi adalah:

$$\begin{aligned} \frac{\rho \phi_o \Delta x \Delta y}{\Delta t} = -\rho \omega \phi_e \Delta y + \rho \omega \phi_w \Delta y - \rho \omega \phi_n \Delta x + \rho \omega \phi_s \Delta x + \tau_\omega \omega \frac{\Delta y}{\Delta x} + 2\tau_\omega \omega \\ + \tau_\omega \omega \frac{\Delta x}{\Delta y} + (G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (13)$$

Untuk menyelesaikan persamaan momentum dan energi, maka langkah selanjutnya persamaan 12 disubtitusikan ke persamaan 13. Selanjutnya setelah di-associatif dan didistribusikan. Maka didapatkan model matematika pada *wind turbine rotor* tipe HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*) adalah :

$$\begin{aligned}
& (u - \omega)\rho\Delta y\phi_e + (\omega - u)\rho\Delta y\phi_w + (v - \omega)\rho\Delta x\phi_n + (\omega - v)\rho\Delta x\phi_s \\
& = (-p + \rho f)\Delta y + (-p + \rho f)\Delta x + (2\mu u + \mu v - \tau_\omega\omega)\frac{\Delta y}{\Delta x} + \\
& (2\mu v + \mu u - \tau_\omega\omega)\frac{\Delta x}{\Delta y} + (Y_\omega - G_\omega - D_\omega - S_\omega)\Delta x\Delta y + \mu u + \mu v - 2\tau_\omega\omega \quad (14)
\end{aligned}$$

Diskritisasi *QUICK* Model Medan Aliran Angin pada *Wind Turbine Rotor* tipe HAWT



Gambar 3: Diskritisasi Teknik *QUICK*

Dengan menggunakan diskritisasi teknik *QUICK* diperoleh nilai ϕ pada bidang menjadi ϕ pada titik sebagai berikut:

$$\phi_n(i, j) = \phi(i, j) + g_1(\phi(i, j+1) - \phi(i, j)) + g_2(\phi(i, j) - \phi(i, j-1)) \quad (15)$$

dengan bobot g_1 :

$$g_1 = \frac{[\phi_n(i, j) - \phi(i, j)][\phi_n(i, j) - \phi(i, j-1)]}{[\phi_n(i, j+1) - \phi(i, j)][\phi_n(i, j+1) - \phi(i, j-1)]} = \frac{\left(\frac{1}{2}h\right)\left(\frac{3}{2}h\right)}{(h)(2h)} = \frac{3}{8} \quad (16)$$

Dan bobot untuk g_2 :

$$g_2 = \frac{[\phi_n(i, j) - \phi(i, j)][\phi_n(i, j+1) - \phi(i, j)]}{[\phi_n(i, j+1) - \phi(i, j)][\phi_n(i, j+1) - \phi(i, j-1)]} = \frac{\left(\frac{1}{2}h\right)\left(\frac{1}{2}h\right)}{(h)(2h)} = \frac{1}{8} \quad (17)$$

Substitusi Persamaan 16 dan Persamaan 17 ke Persamaan 15 diperoleh:

$$\phi_n(i, j) = -\frac{1}{8}\phi(i, j-1) + \frac{3}{4}\phi(i, j) + \frac{3}{8}\phi(i, j+1) \quad (18)$$

Dengan cara yang sama akan diperoleh $\phi_s(i, j)$, $\phi_e(i, j)$ dan $\phi_w(i, j)$:

$$\begin{aligned}
\phi_s(i, j) &= -\frac{1}{8}\phi(i, j-2) + \frac{3}{4}\phi(i, j-1) + \frac{3}{8}\phi(i, j) \\
\phi_e(i, j) &= -\frac{1}{8}\phi(i-1, j) + \frac{3}{4}\phi(i, j) + \frac{3}{8}\phi(i+1, j) \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\phi_w(i, j) = -\frac{1}{8}\phi(i-2, j) + \frac{3}{4}\phi(i-1, j) + \frac{3}{8}\phi(i, j)$$

Substitusi persamaan 18 dan persamaan 19 pada persamaan 14 sehingga diperoleh

$$\left(\frac{3}{8}\rho((u - \omega)\Delta y + (v - \omega)\Delta x)\right)\phi(i, j) + \left(\frac{3}{8}(u - \omega)\rho\Delta y\right)\phi(i+1, j)$$

$$\begin{aligned}
 &+ \left(-\frac{7}{8}(u - \omega)\rho\Delta y\right)\phi(i - 1, j) + \left(\frac{1}{8}(u - \omega)\rho\Delta y\right)\phi(i - 2, j) \\
 &+ \left(\frac{3}{8}(v - \omega)\rho\Delta x\right)\phi(i, j + 1) + \left(-\frac{7}{8}(v - \omega)\rho\Delta x\right)\phi(i, j - 1) \\
 &+ \left(\frac{1}{8}(v - \omega)\rho\Delta x\right)\phi(i, j - 2) = (-p + \rho f)\Delta y + (-p + \rho f)\Delta x \\
 &+ (2\mu u + \mu v - \tau_\omega \omega) \frac{\Delta y}{\Delta x} + (2\mu v + \mu u - \tau_\omega \omega) \frac{\Delta x}{\Delta y} + \\
 &(Y_\omega - G_\omega - D_\omega - S_\omega)\Delta x\Delta y + \mu u + \mu v - 2\tau_\omega \omega
 \end{aligned} \tag{20}$$

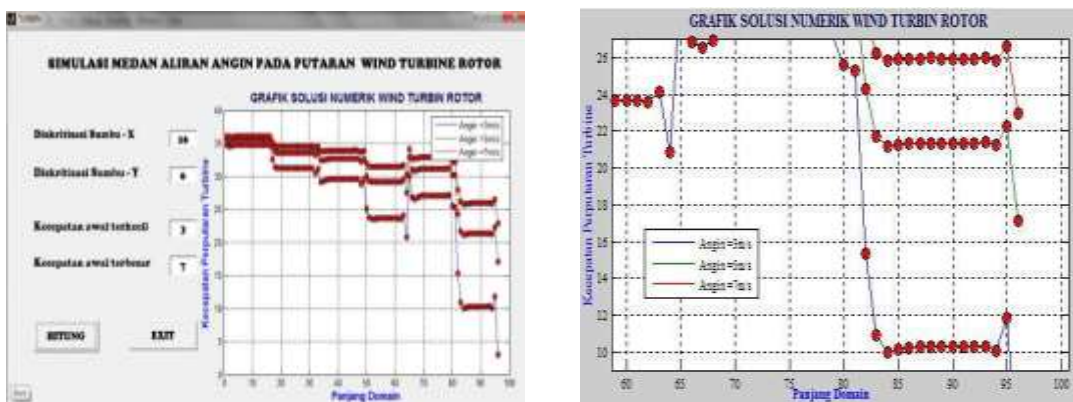
Jika persamaan (20) dimisalkan dalam bentuk :

$$A(\phi(i, j)) + B(\phi(i + 1, j)) + C(\phi(i - 1, j)) + D(\phi(i - 2, j)) + E(\phi(i, j + 1)) + F(\phi(i, j - 1)) + G(\phi(i, j - 2)) = H \tag{21}$$

Maka untuk menganalisis proses aliran angin pada *blade* digunakan perkalian matriks atau nilai ϕ dengan persamaan : $K \times \phi = H$ sehingga $\phi = K^{-1} \times H$ Pada diskritisasi *QUICK wind turbine rotor* tipe HAWT selanjutnya *blade* turbin dipartisi menjadi n bagian, yang masing-masing bagian akan menjadi satu anggota matriks mewakili satu bagian volume pada aliran angin.

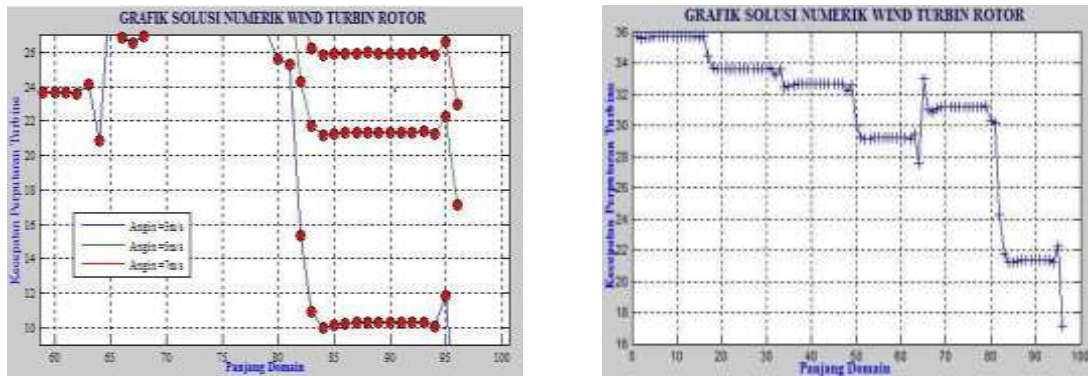
Pembahasan

Dalam penelitian ini dilakukan dua kali tahap simulasi program MATLAB. Simulasi pertama dilakukan untuk mengetahui pengaruh tingkat kecepatan aliran angin terhadap kecepatan putaran *wind turbine rotor*. Simulasi kedua dilakukan untuk mengetahui perbandingan hasil antara perhitungan biasa dan perhitungan menggunakan metode iteratif, metode SOR (*Successive Overrelaxation*)



Gambar 4: Grafik Simulasi MATLAB dengan Variasi Kecepatan

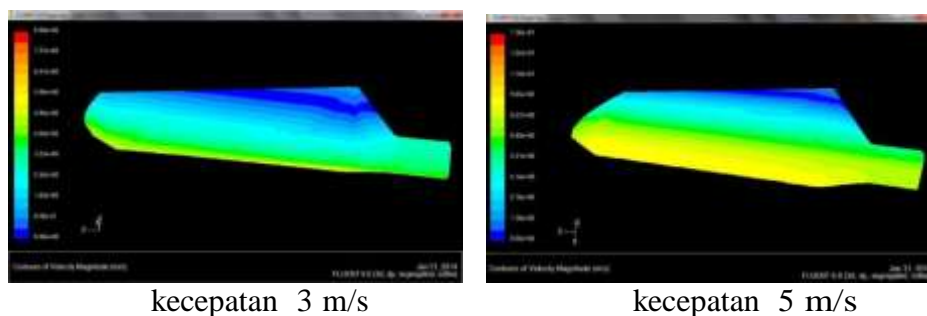
Dari kedua grafik Gambar 4 tampak bahwa pada kecepatan awal angin 7 m/s dan 5 m/s kecepatan putaran *blade wind turbin rotor* cenderung lebih stabil. Sedangkan pada kecepatan awal angin 3 m/s kecepatan putaran *blade wind turbin rotor* menurun cukup tajam. Selanjutnya berikut ini merupakan hasil simulasi *MATLAB* perhitungan biasa dan perhitungan menggunakan metode iteratif, metode SOR, dengan kecepatan awal angin 5 m/s

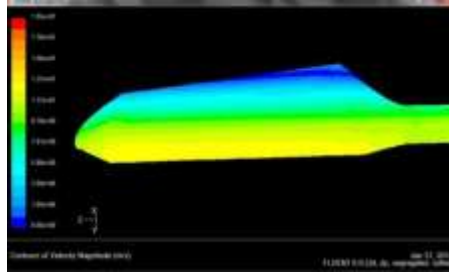


Gambar 5: Grafik Simulasi *MATLAB* Perbandingan Metode Biasa dan SOR

Berdasarkan grafik pada Gambar 5 terlihat tidak ada perbedaan antara grafik dengan perhitungan biasa maupun dengan menggunakan metode SOR. Setelah dilakukan peninjauan nilai kecepatan putaran turbin pada masing-masing titik, nilai error masing-masing titik sangat kecil, yaitu kurang dari 0,0001.

Bentuk geometri *blade* yang disimulasikan oleh *FLUENT* dengan kecepatan awal angin 3 m/s, kecepatan awal angin 5 m/s dan kecepatan awal angin 7 m/s tersaji pada Gambar 6 berikut :





kecepatan 7 m/s

Gambar 6: Hasil Simulasi FLUENT

Dari Gambar 6 terlihat bahwa dengan kecepatan angin 3 m/s dari *contour* warna kecepatan putar *blade* rendah dan kurang stabil sedangkan pada *contour* warna *blade* kecepatan putar 5 m/s dan 7 m/s tampak lebih oranye atau kecepatan putarnya lebih tinggi. Sehingga diketahui bahwa kecepatan putar *blade* akan lebih stabil dan maksimal ketika *blade* diletakkan pada daerah yang memiliki medan aliran angin dengan rentang kecepatan antara 5 m/s hingga 7 m/s.

Untuk mengetahui efektivitas metode volume hingga dalam menyelesaikan model medan aliran angin pada efek kinerja *wind turbine rotor* tipe HAWT, dapat dilihat dari besar *error* (kesalahan). Nilai *error* didasarkan pada titik diskritisasi arah datang angin. Didapatkan nilai rata-rata *error* relatifnya kurang dari 0,1 % yaitu 0,79 %. Sehingga metode numerik volume hingga efektif dalam menyelesaikan persamaan medan aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Model matematika medan aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT. (*Horizontal Axis Wind Turbin*) seperti pada Persamaan 14, yang diselesaikan secara numerik dengan metode volume hingga

$$\begin{aligned}
 & (u - \omega)\rho\Delta y\phi_e + (\omega - u)\rho\Delta y\phi_w + (v - \omega)\rho\Delta x\phi_n + (\omega - v)\rho\Delta x\phi_s \\
 & = (-p + \rho f)\Delta y + (-p + \rho f)\Delta x + (2\mu u + \mu v - \tau_\omega \omega)\frac{\Delta y}{\Delta x} + \\
 & \quad (2\mu v + \mu u - \tau_\omega \omega)\frac{\Delta x}{\Delta y} + (Y_\omega - G_\omega - D_\omega - S_\omega)\Delta x\Delta y + \mu u + \mu v - 2\tau_\omega \omega
 \end{aligned}$$

2. Pada proses aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*), hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan putaran *blade* *wind turbin rotor* semakin tinggi ketika kecepatan awal angin semakin

bertambah..

3. Hasil penyelesaian persamaan medan aliran angin pada *wind turbin rotor* tipe HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*) didapatkan bahwa nilai rata-rata *error* relatifnya kurang dari 0,1% yaitu 0,079%. Sehingga metode numerik volume hingga efektif dalam menyelesaikan persamaan medan aliran angin pada *wind turbine rotor* tipe HAWT

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Daryanto, Y. 2007. *Kajian Potensi angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta : BALAI PPTAGG - UPT-LAGG.
- [2] Malatesta, Federico. 2012. *CFD Study of a Wind Turbine Rotor*. Tidak Diterbitkan. Tesis. London: Queen Mary University of London
- [3] Pikatan, Sugata. 1999. *Konversi Energi Angin*. Surabaya : Departemen MIPA Universitas Surabaya.
- [4] Sutimin dan Widowati. 2007. *Buku Ajar Pemodelan Matematika*. Semarang : Fakultas MIPA Universitas Diponegoro.