

ANALISIS ALIRAN PADA ROTOR TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL MENGGUNAKAN PENDEKATAN KOMPUTASIONAL

*Nazaruddin Sinaga⁽¹⁾

⁽¹⁾Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jalan Prof. Soedharto, SH, Tembalang, Semarang 50275

*E-mail: nsinaga.ccfed@yahoo.com

Abstrak

Pemanfaatan energi angin di Indonesia terkendala oleh rendahnya kecepatan rata-rata angin di kebanyakan wilayah Indonesia. Oleh karena itu perlu diupayakan dan dikembangkan teknologi yang dapat digunakan untuk memanfaatkan energi angin yang berkecepatan rendah ini sehingga dapat diterapkan secara komersial. Salah satu upaya yang perlu dilakukan untuk mencapai tujuan ini adalah dengan memantapkan kemampuan dalam melakukan analisis dan perancangan turbin angin untuk berbagai parameter yang mempengaruhi karakteristik turbin angin. Dalam tulisan ini dikemukakan hasil-hasil perhitungan numerik 2 dan 3 dimensi dari suatu turbin angin yang terdapat di Laboratorium Efisiensi dan Konservasi Energi, Universitas Diponegoro. Tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan model simulasi perhitungan yang nantinya dapat digunakan untuk menganalisis dan merancang turbin angin dengan berbagai variasi parameter, misalnya sudut pitch, sudut yaw, sudut tilt, sudut precone, diameter rotor, jenis airfoil, kecepatan angin, intensitas turbulensi, dan sebagainya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS FLUENT dengan model turbulensi $k-\epsilon$ standard dan Spalart-Allmaras, pada sebuah turbin angin sumbu horizontal 3 sudu berdiameter 120 cm menggunakan airfoil NACA 4415 dengan panjang chord terlebar 153 mm. Kecepatan angin divariasikan dari 2,5 m/s - 3,4 m/s dengan kecepatan rotor 355 rpm, dengan sudut serang dari 0 - 16 derajat serta sudut pitch 23 - 26 derajat. Kesimpulan utama yang dihasilkan dari studi ini adalah bahwa analisis aliran pada turbin angin dapat dilakukan dengan metoda numerik dengan hasil yang cukup baik. Kesimpulan lainnya adalah bahwa model turbulensi $k-\epsilon$ standard memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan model turbulensi Spalart-Allmaras. Dari simulasi ini juga dihasilkan rancangan rotor turbin angin yang dapat bekerja pada kecepatan angin yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin yang dimiliki saat ini.

Kata kunci : turbin angin, wind turbine aerodynamics, blade design, computational fluid dynamic

1. Pendahuluan

Saat ini listrik merupakan kebutuhan yang tidak terpisahkan dari kegiatan manusia, karena penggunaannya yang praktis. Berbagai sumber energi primer dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, baik yang bersifat terbarukan (*renewable*) maupun tak terbarukan (*non-renewable*). Tekanan yang dialami akibat sifatnya yang tak terbarukan, serta efek negatifnya terhadap lingkungan secara global, mengakibatkan tumbuh pesatnya penggunaan sumber-sumber energi terbarukan pada dua dekade terakhir ini, termasuk energi angin.

Angin sebagai sumber energi yang jumlahnya melimpah merupakan sumber energi yang terbarukan. Energi angin akan tetap ada selama bumi masih mendapat energi dari matahari. Dengan menerapkan teknologi konversi energi yang tepat, energi angin sebagai sumber energi terbarukan dapat diharapkan menjadi sumber energi yang ramah lingkungan dan tidak akan pernah habis. Namun demikian, tidak seluruh

wilayah di muka bumi ini memiliki potensi energi angin yang tinggi. Pada umumnya di daerah sub-tropik memiliki potensi energi angin yang lebih besar dibandingkan dengan di daerah tropik.

Pemanfaatan energi angin di Indonesia masih belum cukup intensif dan cenderung tidak menjadi prioritas pemerintah. Hal ini dapat dimengerti karena menurut Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN), pengembangan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Indonesia masih menghadapi beberapa masalah penting yang harus dipecahkan, yang salah satunya adalah rendahnya kecepatan angin di Indonesia, yaitu rata-rata hanya pada kisaran 2,5 – 6 m/s [1]. Meski potensi tersebut secara rata-rata cukup rendah, akan tetapi sebenarnya cukup banyak daerah-daerah di Indonesia yang memiliki potensi energi angin yang layak untuk dimanfaatkan, terutama sebagai energi listrik.

Permasalahan rendahnya kecepatan angin ini tentu berdampak kepada rendahnya energi listrik yang dihasilkan, sehingga harga instalasi menjadi sangat mahal [2]. Sebagai contoh, jika suatu turbin angin dapat menghasilkan daya sebesar 10 kW pada kecepatan angin 10 m/s, maka jika kecepatan angin hanya 5 m/s maka daya yang dihasilkan turbin angin hanya sekitar 1,25 kW. Hal ini berarti, untuk menghasilkan daya 10 kW dibutuhkan 8 unit turbin angin. Hal ini tentunya akan membuat biaya produksi listrik dari turbin angin ini menjadi sangat mahal, bahkan tidak layak secara ekonomi.

Oleh karena itu, agar pemanfaatan energi angin di Indonesia dapat dilakukan secara intensif maka perlu diupayakan teknologi turbin angin yang dapat bekerja pada kecepatan angin rendah, dan juga dapat menghasilkan energi yang besar. Beberapa teknologi telah dihasilkan dan diaplikasikan, mulai dari teknologi variasi luas permukaan rotor, generator kecepatan rendah, penurunan momen inersia, aplikasi tiang yang lebih tinggi, dan sebagainya [3, 4, 5, 6]. Kemajuan teknologi turbin angin kecepatan rendah ini menuntut kemampuan untuk memprediksi karakteristik turbin untuk berbagai parameter yang mungkin divariasikan.

Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan numerik 2 dan 3 dimensi dari suatu turbin angin yang terdapat di Laboratorium Efisiensi dan Konservasi Energi, Universitas Diponegoro, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tujuan utamanya adalah untuk mendapatkan model simulasi perhitungan yang nantinya dapat digunakan untuk menganalisis dan merancang turbin angin dengan berbagai variasi parameter, misalnya sudut pitch, sudut yaw, sudut tilt, sudut precone, diameter rotor, jenis airfoil, kecepatan angin, intensitas turbulensi, dan sebagainya.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS FLUENT dengan membandingkan 2 model turbulensi, yaitu $k-\epsilon$ standard dan Spalart-Allmaras, pada sebuah turbin angin sumbu horizontal 3 sudu berdiameter 120 cm menggunakan airfoil NACA 4415 dengan panjang chord terlebar 153 mm. Kecepatan angin divariasikan dari 2,5 m/s - 3,4 m/s pada kecepatan rotor 355 rpm, dengan sudut serang dari 0 - 16 derajat serta sudut pitch 23 - 26 derajat.



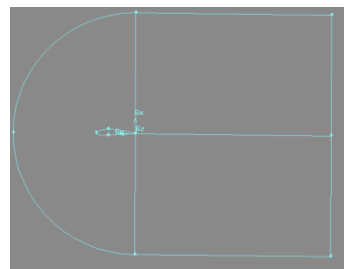
Gambar 1. Turbin angin horisontal 3 sudu

2. Metoda Perhitungan

3.2. Simulasi Airfoil 2 Dimensi

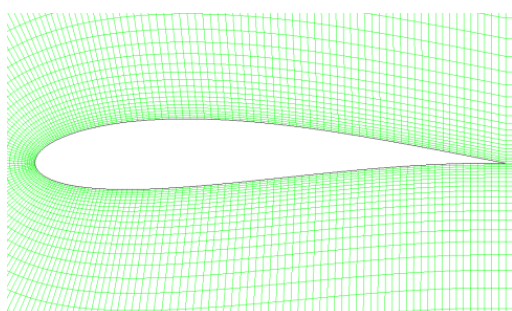
Airfoil 2D dengan panjang chord (c) = 0.153 m dan memiliki penampang memanjang tak terhingga ditempatkan dalam aliran luar dengan kecepatan aliran bebas yang uniform, dalam keadaan tanpa gangguan Adapun batas-batas domain perhitungan dapat dilihat pada Gambar 2. Dinding airfoil diasumsikan berada dalam keadaan tidak slip (*no-slip wall condition*). Kondisi kecepatan masuk (*velocity inlet*) diterapkan pada batas masuk, batas samping atas dan samping bawah. Adapun sisi keluarannya (*pressure outlet*) dikondisikan memiliki gradien tegak lurus nol.

Domain perhitungan ini sebenarnya merupakan geometri yang relatif sederhana, sehingga grid yang dipakai adalah jenis *quadrilateral*. Jenis grid ini dapat mengurangi waktu komputasi dibanding jenis *triangular* serta menambah akurasi hasil simulasi. Adapun untuk simulasi airfoil ini digunakan jenis grid quadrilateral tersruktur jenis-C grid seperti ditunjukkan pada Gambar 3 [7, 8, 9, 10].



Gambar 2. Domain perhitungan airfoil 2 dimensi

Proses penggenerasian *mesh* dilakukan mulai dari *mesh* garis dengan *successive ratio* = 1, *interval count* yang sesuai dengan tingkat ketelitian di masing-masing zona dan juga *interval size* = 0,015. Pada Gambar 3 diperlihatkan hasil generasi *mesh* model *airfoil*, dimana *meshing* pada daerah *leading edge* lebih rapat karena diperkirakan daerah *leading edge* memiliki *gradient* tekanan dan kecepatan yang tinggi. Model solusi yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.



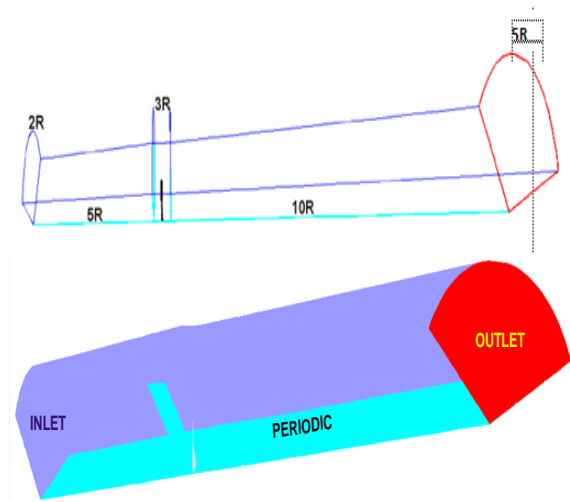
Gambar 3. Grid quadrilateral terstruktur

Tabel 1. Model solusi simulasi airfoil 2D

Viscous model	k-ε RNG
Near wall treatment	Enhanced wall function
Discretization:	
Pressure	Standard
Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Momentum	2nd Upwind scheme
Turbulence kinetic energy	1st Upwind scheme
Turbulence dissipation rate	1st Upwind scheme
Calculational method	Steady

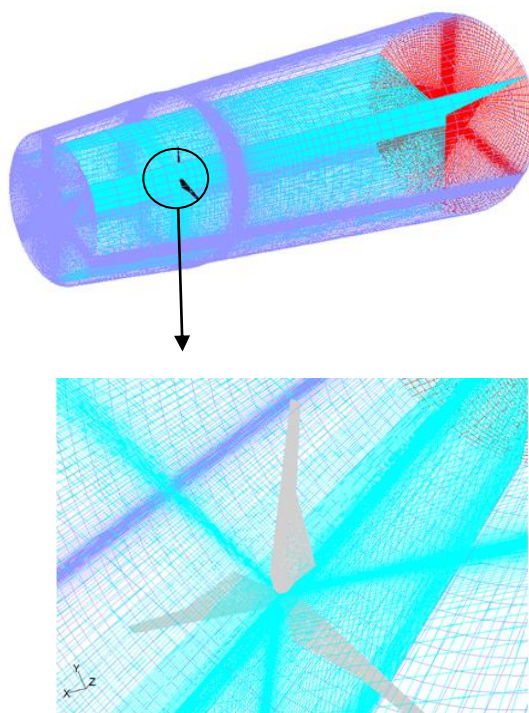
3.2. Simulasi Rotor Aliran 3 Dimensi

Rotor turbin angin ditempatkan dalam aliran luar berbentuk *stream-tube*, dengan kecepatan aliran bebas yang uniform, tanpa gangguan (*undisturbed*). Adapun domain dan kondisi batas yang ditetapkan pada simulasi 3 dimensi ini ditunjukkan pada Gambar 4. Sudu sebagai dinding yang diasumsikan berada dalam keadaan tidak slip (*no-slip wall condition*). Kondisi batas *velocity inlet* diterapkan pada sisi masuk dan selubung, *periodic* pada sisi kanan dan kiri dan sisi keluar berupa *pressure outlet*.



Gambar 4. Domain dan kondisi batas perhitungan 3D

Dalam pemodelan rotor ini, generasi *mesh* dilakukan mulai dari *mesh* garis dengan *successive ratio* = 1, *interval count* = 40 yang sesuai dengan tingkat ketelitian di masing-masing zona dan juga *first length* = 0,1. Pada tahap berikutnya dilakukan generasi *volume mesh* pada seluruh domain. Pembuatan *mesh* di sini menggunakan elemen *hexagonal* dan tipe generasi *hex cooper*. Pada Gambar 5 ditunjukkan hasil generasi *mesh* 3D tersebut. Penggenerasian *volume mesh* secara *periodic* dilakukan untuk menghemat jumlah grid dan waktu komputasi.



Gambar 5. Hasil generasi mesh pada domain 3D. Adapun model solusi yang digunakan dalam simulasi 3 dimensi ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Model solusi dalam simulasi turbin angin 3D

Viscous model	k-ε standard
Near wall treatment	satndard wall function
Dicretization:	
Pressure	Standard
Pressure-Velocity coupling	SIMPLE
Momentum	1st Upwind scheme
Turbulence kinetic energy	1st Upwind scheme
Turbulence Dissipation Rate	1st Upwind scheme
Calculational method	Steady

3. Hasil Perhitungan dan Diskusi

3.2. Simulasi Airfoil 2 Dimensi

Pada Tabel 3 ditunjukkan hasil simulasi aliran 2D yang dilakukan pada airfoil dengan kecepatan dan sudut serang (AOA) yang beragam. Nilai gaya yang dihasilkan adalah dengan asumsi bahwa *planform area* adalah 0,153 m².

Tabel 3. Solusi Simulasi Airfoil 2D

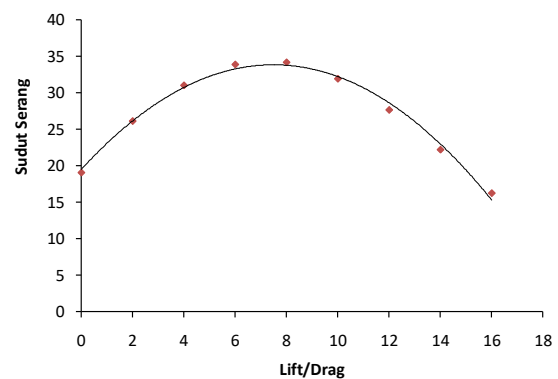
AOA	Gaya angkat		Gaya Tahanan		Total	
	Pressure	Viscous	Pressure	Viscous	Gaya Angkat	Gaya Tahanan
0	17.32	0.03	0.30	0.60	17.35	0.91
2	24.85	0.03	0.34	0.61	24.88	0.95
4	32.00	0.03	0.43	0.60	32.03	1.03
6	39.05	0.04	0.56	0.59	39.09	1.15
8	45.10	0.05	0.75	0.57	45.15	1.32
10	49.79	0.05	1.01	0.55	49.84	1.56
12	52.63	0.06	1.38	0.52	52.68	1.90
14	52.88	0.06	1.89	0.49	52.94	2.38
16	50.18	0.05	2.63	0.45	50.23	3.09

Dari hasil simulasi terlihat bahwa gaya *lift* cenderung makin besar dengan bertambah besarnya sudut serang, demikian pula dengan gaya *drag*. Keberadaan *drag* ini memberikan pengaruh yang berlawanan dengan *lift*. *Drag* akan menurunkan torsi pada turbin angin sedangkan *lift* akan menaikkan torsi pada turbin angin. Agar dapat menghasilkan torsi yang maksimum untuk memutar rotor maka sudu dibuat dalam bentuk yang menghasilkan rasio

lift/drag yang maksimum. Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa nilai rasio *lift/drag* terbaik terjadi pada sudut serang 8°.

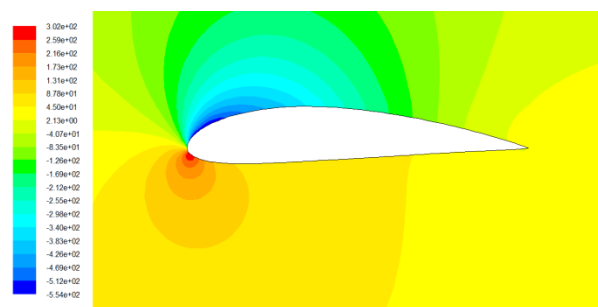
Pada sudut serang 0° aliran yang terjadi adalah aliran laminar sehingga *drag* yang timbul adalah karena desakan udara pada *leading edge*. Bentuk profil airfoil yang melengkung pada sisi atas dan cenderung datar pada sisi bawah menyebabkan kecepatan pada sisi atas lebih tinggi dari permukaan sisi bawah. Sesuai dengan persamaan Bernoulli [2], maka tekanan statik pada permukaan atas akan lebih rendah daripada tekanan statik pada permukaan bawah. Perbedaan tekanan statik pada kedua permukaan sudu inilah yang menyebabkan terjadinya gaya angkat pada sudu ataupun sayap pesawat.

Dengan semakin besar sudut serang maka perubahan momentum udara ketika menumbuk sudu menjadi lebih besar pula. Perubahan momentum ke arah bawah menyebabkan timbulnya gaya ke atas pada airfoil. Namun perubahan momentum yang besar ini juga meningkatkan nilai *drag* pada airfoil, sehingga sudut serang yang terlampau tinggi akan mengakibatkan *drag* yang besar yang mengurangi kinerja rotor. Pada sudut serang yang terlampau tinggi terjadi fenomena *stall* yaitu kondisi ketika aliran udara tidak mampu menyentuh bagian belakang sudu atau mengalir mengikuti bentuk sudu. Hal ini menyebabkan terjadinya turbulensi yang besar pada bagian belakang sehingga meningkatkan *drag* secara signifikan.

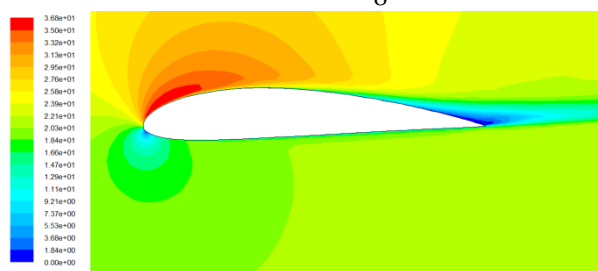


Gambar 6. Hasil perhitungan rasio lift/drag

Pada Gambar 7 diperlihatkan distribusi tekanan pada sudut serang $\alpha = 8^\circ$. Terlihat jelas bahwa distribusi tekanan pada permukaan bawah menunjukkan nilai yang jauh lebih besar dari pada permukaan atas. Sebagai konsekuensinya dihasilkan *lift* yang tinggi pula. Akan tetapi, berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 3, peningkatan gaya *lift* ini juga akan meningkatkan gaya *drag*. Pada Gambar 8 terlihat bahwa pada permukaan atas airfoil, dimulai dari daerah *trailing edge* menuju ke atas, sudah terjadi separasi aliran laminar (*laminar separation bubble*).



Gambar 7. Kontur tekanan pada sudut serang $\alpha = 8^\circ$

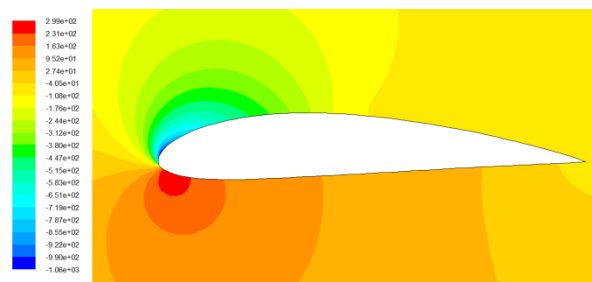


Gambar 8. Kontur kecepatan pada sudut serang $\alpha = 8^\circ$

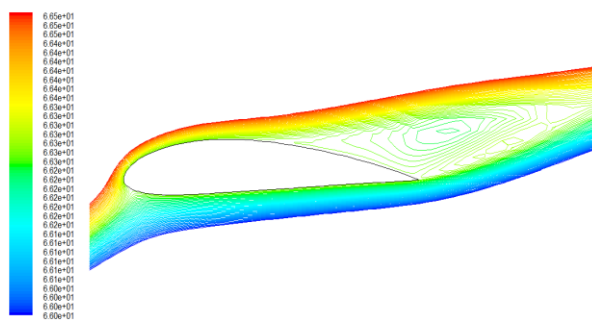
Pada Gambar 9 terlihat bahwa pada sudut serang $\alpha = 16^\circ$, titik stagnasi berada pada bagian bawah *leading edge*. Tampak pula di sepanjang permukaan airfoil distribusi tekanan menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan. Pada bagian permukaan bawah menunjukkan besarnya tekanan yang nilainya lebih dari nol ($P > 0$), tetapi pada bagian permukaan atas menunjukkan nilai tekanan kurang dari nol ($P < 0$).

Tentunya ada dampak dimana pada bagian permukaan atas distribusi tekanan dari *leading edge* sampai *trailing edge* terdapat perbedaan tekanan yang berarti ($P_{\text{leading edge}} < P_{\text{trailing edge}}$) sehingga memunculkan fenomena aliran balik dari bagian *trailing edge*. Pada Gambar 10 terlihat adanya vortex karena efek gradien tekanan yang negatif pada permukaan atas airfoil

sehingga mengakibatkan terjadinya aliran balik (*back flow*). Dalam keadaan ini sebagian aliran keluar dari lapisan batas permukaan airfoil, sehingga memicu terjadinya *stall* pada tingkat sudut serang ini. Dalam keadaan ini gaya drag lebih didominasi oleh efek tekanan (*pressure drag*) daripada efek viskos.



Gambar 9. Kontur tekanan pada sudut serang $\alpha = 16^\circ$



Gambar 10. Fungsi arus pada sudut serang $\alpha = 16^\circ$

3.2. Simulasi Aliran Rotor 3 Dimensi

Simulasi ini dilakukan dengan kondisi yang sama dengan simulasi 2 dimensi, yaitu pada kecepatan angin 3,4 m/s dan kecepatan rotor 355 rpm. Kecepatan ini merupakan nilai *cut in speed* turbin angin pada kondisi berbeban. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *starting torque* terhadap sudut *pitch*.

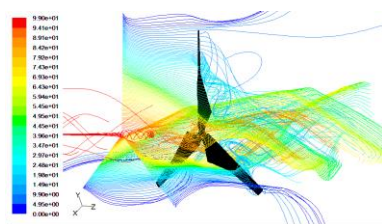
3.2.1. Pengaruh Model Turbulensi

Dalam simulasi ini divariasikan 2 model turbulensi yang sering digunakan, yaitu k- ϵ standar dan model Spalart-Allmaras. Hasil perhitungan torsi untuk kedua model turbulensi tersebut diperlihatkan pada Tabel 4. Dari tabel tersebut terlihat bahwa simulasi dengan menggunakan model k- ϵ standar memiliki ketelitian hasil yang lebih baik dibandingkan dengan model Spalart-Allmaras.

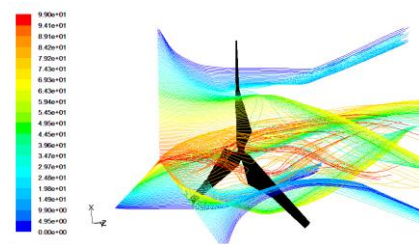
Tabel 4 Nilai torsi hasil simulasi 2 model turbulensi

Kec (m/s)	Torque (Fluent)		Torque (Torsi) (Nm)	Error (%)	
	k-ε standard	spalart allmaras		k-ε standard	spalart allmaras
3.4	4.111	4.147	4.120	-0.211	0.656
3.5	5.037	4.471	4.800	4.936	-6.863
3.7	5.179	4.580	5.020	3.162	-8.765
3.9	6.103	5.670	5.980	2.052	-5.184
4	6.735	6.580	6.690	0.679	-1.644

Pada Gambar 11 dan 12 ditunjukkan perbandingan garis-garis lintasan untuk kedua model turbulensi. Perbandingan kedua garis ini menunjukkan bahwa model k-ε standard lebih mampu mengidentifikasi bagian yang berdekatan dengan permukaan sudu dan aliran free-stream. Aliran dapat diperlihatkan dengan baik, yang ditunjukkan dari kerapatan path line yang terbentuk. Hal ini dapat diamatai dari garis lintasan yang tidak terlihat pada model Spalart-Allmaras, sedangkan pada model k-ε standard garis-garis ini muncul dengan jelas. Berdasarkan perbandingan nilai torsi dan garis lintasan tersebut maka untuk analisis selanjutnya digunakan model turbulensi k-ε standard.



Gambar 11. Garis lintasan hasil simulasi menggunakan model turbulensi k-ε standard.



Gambar 12. Garis lintasan hasil simulasi menggunakan model turbulensi Spalart-Allmaras

3.2.2. Pengaruh Pitch Terhadap Starting Torque

Starting torque merupakan nilai torsi awal yang dihasilkan untuk memutar sudu dari kondisi diam

sampai sudu bergerak. Nilai starting torque yang besar menyebabkan nilai cut in speed dari turbin kecil. Pada Tabel 5 diperlihatkan hasil perhitungan nilai starting torque yang terjadi pada berbagai sudut pitch dan kecepatan rotor turbin angin.

Tabel 5 Nilai starting torque hasil simulasi

Pitch	Starting torque (N-m)			
	Kec 3,4 m/s	Kec 3.2 m/s	Kec 3 m/s	Kec 2,5 m/s
23	0.0350	0.0308	0.0211	0.0174
24	0.0404	0.0364	0.0323	0.0276
25	0.0413	0.0396	0.0393	0.0283
26	0.0371	0.0328	0.0319	0.0262

Dari Tabel 5 tersebut dapat dilihat bahwa nilai starting torque pada sudut pitch 23° pada kecepatan 3,4 m/s, yaitu pada kecepatan cut-in speed, adalah 0.0350 N-m. Nilai cut in speed turun menjadi 3,2 m/s dengan menambah sudut pitch menjadi 24°. Hal ini dapat dilihat dari nilai starting torque pada kondisi ini yaitu 0.0364 N-m, yang lebih besar dari 0.0350 N-m. Nilai cut in speed terkecil adalah pada sudut pitch 25° yaitu 3 m/s, dimana nilai starting torque lebih besar daripada nilai starting torque pada sudut pitch 23°.

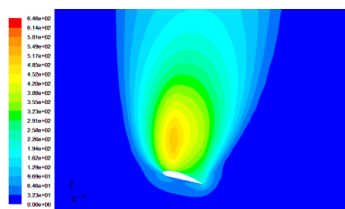
3.2.3. Pengaruh Kecepatan dan Sudut Pitch Terhadap Intensitas Turbulensi

Gambar 13 hingga 15 menunjukkan nilai intensitas turbulensi untuk sudut pitch yang berbeda. Dari gambar tersebut terlihat bahwa nilainya pada pitch 26° paling besar, sehingga nilai starting torque, seperti pada Tabel 4, pada pitch 26° paling kecil, yaitu 0.414 N-m. Adapun nilai starting torque pada pitch 25° adalah paling besar yaitu 0.625 N-m. Nilai intensitas turbulensi yang lebih besar akan menyebabkan nilai gaya tahanan yang terjadi bertambah besar, sehingga akan mempengaruhi nilai starting torque menjadi semakin rendah.

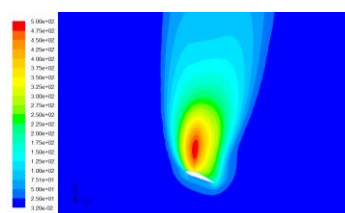
Pada Gambar 16 dan Gambar 17 ditunjukkan kontur intensitas turbulensi pada pitch 24° kecepatan 3,2 m/s dan pitch 23° kecepatan 3,4 m/s. Terlihat bahwa nilai intensitas turbulensi pada kecepatan 3,2 m/s dan pitch 24° lebih kecil daripada intensitas turbulensi pada kecepatan 3,4 m/s dan pitch 23°. Dengan demikian, berdasarkan Tabel 4, nilai starting torque pitch 24° pada kecepatan 3,2 m/s menjadi lebih besar.

Pada Gambar 18 dan Gambar 19 ditunjukkan vektor kecepatan pada *pitch* 24⁰ pada kecepatan 3,2 m/s dan *pitch* 23⁰ pada kecepatan 3,4 m/s. Vektor kecepatan pada *pitch* 24⁰ dengan kecepatan 3,2 m/s menunjukkan terjadinya *wake* yang lebih kecil. Hal ini berakibat nilai intensitas turbulensi pada kecepatan 3,2 m/s *pitch* 24⁰ lebih kecil daripada intensitas turbulensi pada kecepatan 3,4 m/s dan *pitch* 23⁰.

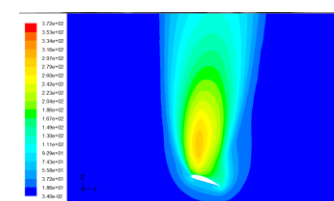
Pada Gambar 20 dan Gambar 21 ditunjukkan kontur intensitas turbulensi pada *pitch* 25⁰ kecepatan 3 m/s dan *pitch* 23⁰ kecepatan 3,4 m/s. Dari gambar tersebut terlihat bahwa intensitas turbulensi pada kecepatan 3,2 m/s dan *pitch* 24⁰ lebih kecil daripada intensitasnya pada kecepatan 3,4 m/s dan *pitch* 23⁰. Maka, berdasarkan Tabel 4 nilai *starting torque pitch* 25⁰ pada kecepatan 3 m/s menjadi lebih besar. Pada Gambar 21 dan Gambar 22 ditunjukkan vektor kecepatan pada *pitch* 25⁰ pada kecepatan 3 m/s dan *pitch* 23⁰ pada kecepatan 3,4 m/s. Pada *pitch* 25⁰ dengan kecepatan 3 m/s menunjukkan terjadinya *wake* yang kecil. Oleh karena karena *wake* yang lebih kecil ini maka intensitas turbulensi pada kecepatan 3 m/s dan *pitch* 25⁰ lebih kecil daripada intensitas pada kecepatan 3,4 m/s dan *pitch* 23⁰.



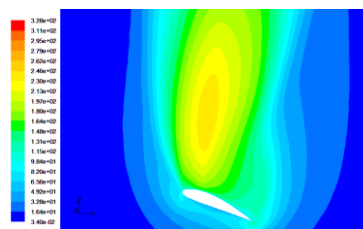
Gambar 13 Kontur intensitas turbulen pada sudut *pitch* 23⁰ dan jarak x=50 cm



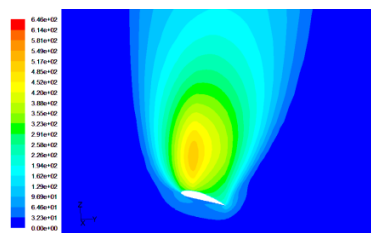
Gambar 14 Kontur intensitas turbulen pada sudut *pitch* 24⁰ dan jarak x=50 cm.



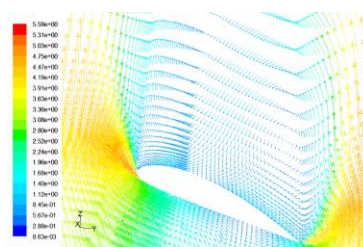
Gambar 15 Kontur intensitas turbulen pada sudut *pitch* 26⁰ dan jarak x=50 cm



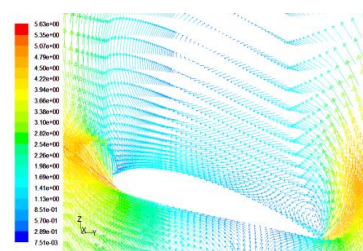
Gambar 16 Intensitas turbulensi pada sudut *pitch* 24⁰ dan kecepatan 3,2 m/s



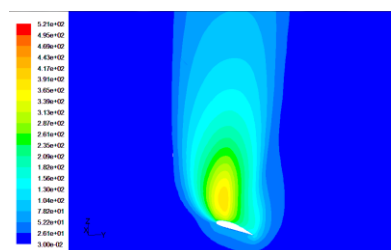
Gambar 17 Intensitas turbulensi pada sudut *pitch* 23⁰ dan kecepatan 3,4 m/s



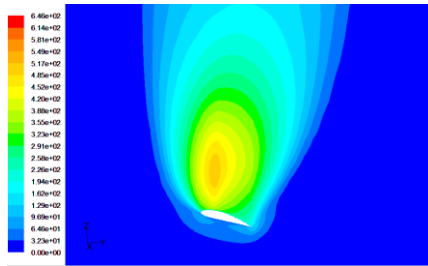
Gambar 18 Vektor kecepatan pada sudut *pitch* 24⁰, kecepatan 3.2 m/s



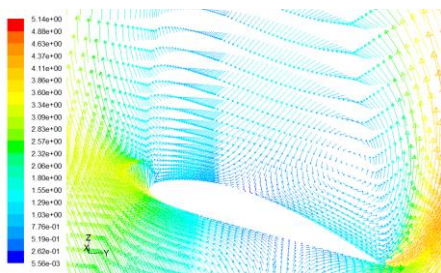
Gambar 19 Vektor kecepatan pada sudut *pitch* 23⁰, kecepatan 3.4 m/s



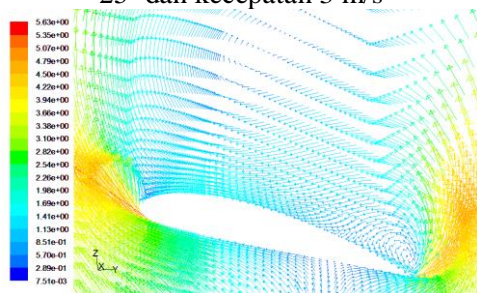
Gambar 20 Intensitas turbulensi pada sudut *pitch* 25⁰ dan kecepatan 3 m/s



Gambar 21 Intensitas turbulensi pada sudut pitch 23^o dan kecepatan 3,4 m/s



Gambar 22 Vektor kecepatan pada sudut pitch 25^o dan kecepatan 3 m/s



Gambar 23 Vektor kecepatan pada sudut pitch 23^o dan kecepatan 3,4 m/s

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil-hasil simulasi yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan utama bahwa analisis aliran pada turbin angin dapat dilakukan dengan metoda numerik dengan hasil yang cukup baik. Model perhitungan yang diterapkan dapat digunakan untuk menganalisis aliran di sekitar rotor turbin, baik secara 2 dimensi maupun 3 dimensi. Kesimpulan lain yang dihasilkan adalah bahwa model turbulensi k-ε standard memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan model turbulensi Spalart-Allmaras. Dari simulasi ini juga dihasilkan rancangan rotor turbin angin yang dapat bekerja pada kecepatan angin yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin yang dimiliki saat ini. Untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih mantap

dan lebih luas maka perlu dilakukan simulasi 3 dimensi terhadap rotor turbin angin, dengan memvariasikan beberapa parameter lainnya seperti nilai intensitas turbulensi aliran angin, jenis airfoil, kecepatan rotasi rotor, baik dalam keadaan steady maupun transien.

5. Daftar Pustaka

- Daryanto, Y., 2007, *Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*, Balai PPTAGG- UPT-LAGG. Yogyakarta.
- Hau, Erich, 2005, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd Edition, Springer, Germany.
- Singh, R. K., and Ahmed, M. R., 2013, *Blade Design and Performance Testing of a Small Wind Turbine Rotor for Low Wind Speed Applications*, Renewable Energy, Vol. 50, pp 812-819.
- Barnes, R. H., Morozov, E. V. and Shankar, K., 2015, *Improved Methodology for Design of Low Wind Speed Specific Wind Turbine Blades*, Composite Structure, Vol. 119, pp 677-684.
- Jacobs, E. N. and Sherman, A., 2009, *Airfoil Section Characteristics As Affected By Variations Of The Reynolds Number*, Report No. 586, National Advisory Comintte for Aeronautics.
- Mathew, S., Lim, C. M., Petra, M. I., Philip, G. S., Noorfathin, M., Mathew, M. S., and Raj, V., 2016, *Matching the Characteristics of Low Wind Speed Turbines with Candidate Wind Regimes*, Energy Procedia, Vol. 95, pp 286-293.
- ANSYS FLUENT V15 Tutorial, 2014, ANSYS, Inc.
- Chung, T. J., 2002, *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Petrila, T. and Trif, D., 2005, *Basics of Fluid Mechanics and Introduction to Computational Fluid Dynamics: Numerical Methods and Algorithms*, Vol. 3, Springer Science + Business Media, Boston, USA.
- Poozesh, A. and Mirzaei, M., 2016, *Flow Simulation Around Cambered Airfoil by Using Conformal Mapping and Intermediate Domain in Lattice Boltzmann Method*, Journal of Statistical Physics, Vol. 166, pp 354-367.