

Analisis Fenomena Penampang Alir *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) Tipe Heliks Terhadap Kecepatan Angin Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berskala Rumah Tangga

Martinus, S.T., M. Sc., M. Dyan Susila E.S., S.T., M.Eng., dan Martinus Budiyo, S. T.
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung 2011

Abstrak

Penelitian ini membahas fenomena (turbulensi angin dan penyebaran tekanan) pada penampang alir *vertical axis wind turbine* (VAWT) tipe *helix* terhadap kecepatan angin sebagai pembangkit listrik alternatif berskala rumah tangga. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui turbulensi aliran angin terhadap sudu angin *helix* vertikal dan daya yang dihasilkan turbin dengan variabel penelitian kecepatan aliran udara (4, 8, dan 12 m/s), bentuk *blade* (1/2 lingkaran dan lurus dengan masing-masing berjumlah 3 buah sudu), dan pola aliran (laminar dan turbulen). Penyimulasian memanfaatkan *software* GAMBIT 2.2.3 dan FLUENT 6.3.26. Simulasi dimulai dengan membuat pemodelan 2 buah bentuk *blade* melalui GAMBIT (tahap *preprocessing*), lalu membagi elemen atau objek tersebut menjadi bagian-bagian terkecil (*meshing*) melalui FLUENT, mendefinisikan kondisi batas untuk aliran udara yang akan dilalui *blade*, dan penginterasian dari objek yang telah dibuat terhadap sejumlah kondisi batas tersebut (tahap solusi). Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbulensi penampang alir pada *blade* 1/2 lingkaran (1,4 – 28 m/s) yang tidak jauh berbeda dengan *blade* lurus yaitu 1,1 – 22 m/s (kecepatan udara 4 m/s, demikian dengan kecepatan lainnya). Sedangkan, turbulensi *contour of pressure* terbaik pada *blade* 1/2 lingkaran yaitu 13,8-40,4 Pascal (kecepatan 4 m/s). Daya tertinggi yang diserap *blade* ($daya_{\text{angin}}$) terhadap $daya_{\text{turbin}}$ terdapat pada kecepatan udara 4 m/s dengan efisiensi sebesar 19,6% (9,335 dari 47,628 Watt). Sedangkan, yang terendah pada 12 m/s dengan efisiensi 10,34% (132,967 dari 1285,956 Watt).

Kata kunci : *Vertical axis wind turbine*, VAWT, *blade*, sudu, 1/2 lingkaran, lurus, GAMBIT, FLUENT, pembangkit listrik, turbulensi

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Manusia telah memanfaatkan energi angin selama 5.500 tahun lamanya dan seiring perkembangan zaman, energi angin terus digali potensinya karena masyarakat dunia belum memanfaatkan potensi angin secara maksimal. Saat ini, potensi energi angin banyak menyita perhatian khalayak peneliti dengan wujud nyata pemanfaatan energi tersebut di era pemanasan global berupa turbin angin. Menurut WWEA (*World Wind Energy Association*), diperkirakan sampai tahun 2007 energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin mencapai 93,85 giga watt dan menghasilkan lebih dari 1% dari totalitas penggunaan listrik secara global.

Indonesia sebagai negara kepulauan mempunyai potensi cukup besar akan energi angin sehingga pengembangan pembangkit tenaga listrik akan terdistribusi melalui turbin angin. Seperti yang telah dilakukan oleh Martinus di tahun 2010, beliau melakukan *manufacturing* dan studi kelayakan ekonomi prototipe turbin angin tipe helik sebagai pengganti pembangkit perusahaan listrik negara (PLN). Hal ini didasari oleh Kebijakan Umum Bidang Energi (KUBE) 1980 serta Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No.996.K/43/MPE/1999 berisikan prioritas penggunaan bahan bakar terbaharukan dalam menghasilkan listrik yang hendak dibeli PLN. Sedangkan, penelitian yang akan dilakukan berupa analisa daya, aliran udara pada turbin helik vertikal menggunakan *software* FLUENT.

B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini yaitu :

1. Mengetahui turbulensi aliran angin terhadap sudu turbin angin helik vertikal
2. Mengetahui besarnya daya turbin yang dihasilkan dari penampang sudu dengan memvariasikan bentuk sudu dan kecepatan angin dari model turbin helik vertikal yang dirancang dengan menggunakan *software* GAMBIT dan FLUENT
3. Mengetahui besarnya tekanan dan kecepatan angin yang diterima oleh penampang sudu (*blade*)

C. Batasan Masalah

Penelitian ini mempunyai batasan masalah:

1. Jenis turbin yang disimulasikan adalah turbin tipe vertikal dengan sudu heliks dengan dimensi turbin berupa diameter (D) = 90 cm, tinggi (H) = 135 cm dan disimulasikan dalam bentuk 3 dimensi
2. Variasi kecepatan aliran udara 4, 8, dan 12 m/s
3. Simulasi menggunakan *software* GAMBIT 2.2.3 dan FLUENT 6.3.26.

D. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini sebagai berikut: pendahuluan, tinjauan pustaka, metode penelitian, hasil dan pembahasan, simpulan dan saran, dan daftar pustaka.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Turbin Angin

Turbin angin yang kerap dikenal dengan nama kincir angin. Turbin angin merupakan sarana mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik guna memutar generator listrik. Sehingga, turbin angin dirancang guna menangkap energi kinetik yang berasal dari angin. Sedangkan, angin adalah aliran fluida yang mempunyai sifat-sifat aerodinamis, yakni :

1. Sifat kompresibel (mampat)
2. Viskositas (kekentalan)
3. Densitas (kerapatan)
4. Turbulensi (olakan)

Dengan adanya sejumlah angin yang dilewatkan ke cakram penghalang maka aliran tersebut akan membelok dan membentuk garis aliran (*streamline*). Dengan adanya bentuk dari rancangan cakram tertentu (luas penampang bagian atas lebih kecil dibandingkan dengan bagian bawah) akan mengakibatkan perbedaan kecepatan dan tekanan udara di antara sisi atas dan bawah cakram. Hal ini terjadi karena kesetimbangan debit pada aliran tersebut sehingga permukaan cakram mengalami gaya hambat (*drag*, sejajar permukaan) dan gaya angkat (*lift*, tegak lurus dengan permukaan). Salah satu gaya tersebut akan dominan tergantung pada jenis cakram penghalang yang digunakan (*blade*). Dan umumnya, rancangan *blade* dengan nominasi gaya angkat yang mempunyai efisiensi dan daya yang lebih tinggi.

Turbin mempunyai *blade* (sirip baling-baling) berbentuk penampang sayap pesawat (*aerofoil*). Karena efisiensinya tinggi dan menghasilkan perbedaan tekanan yang besar di antara kedua sisi *blade* guna memutar *blade* dengan momen yang cukup besar pula. *Airfoil* adalah suatu cakram berpenampang lengkung parabolik dengan bagian depan cukup lurus dan bagian ujung meruncing. Ketika angin melewati *airfoil* lebih cepat pada bagian atas dibandingkan dengan bagian bawahnya. Hal ini disebabkan tekanan pada bagian bawah lebih besar dan mengakibatkan terbentuknya gaya angkat.

Jenis-jenis turbin sangatlah banyak, tetapi secara garis besar dapat dibedakan atas dua tipe yaitu :

1. HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*)
Tipe turbin ini mempunyai sumbu putar yang sejajar terhadap tanah dan paling banyak dikembangkan di berbagai negara karena cocok dipakai untuk menghasilkan listrik.
 2. VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*)
Turbin tipe vertikal mengartikan bahwa sumbunya berputar secara vertikal terhadap tanah dan jarang digunakan secara komersial. VAWT terdiri beberapa tipe yang paling umum ditemukan yaitu Savonius Rotor, Darrieus Rotor, Giromill dan H-Rotor.
-

Adapun, karakteristik VAWT mempunyai berbagai keunggulan yaitu :

1. Mempunyai desain dasar *blade* yang lebih sederhana dibandingkan tipe VAWT lainnya
2. Mampu mendayagunakan aliran angin dari segala arah sehingga tidak dibutuhkan *yaw mechanism* seperti yang terdapat pada HAWT
3. Konstruksi lebih sederhana dan biaya manufaktur juga lebih terjangkau dibandingkan HAWT karena VAWT tidak memerlukan *yaw mechanism*. Di samping itu, generator, *gearbox*, komponen-komponen mekanik maupun elektronik dapat diletakkan di atas permukaan tanah dan tidak harus diletakkan di atas menara (*tower*)
4. Proses perawatan lebih mudah karena konstruksi yang sederhana dan sejumlah komponen yang berada di atas permukaan tanah
5. Mampu melakukan *self start* pada kecepatan angin yang relatif rendah
6. Mampu menghasilkan torsi yang lebih tinggi dari kisaran kecepatan angin yang rendah hingga kecepatan angin yang tinggi

Kelemahan yang ditemukan pada VAWT:

1. Pada skala yang sama, rata-rata VAWT hanya mampu menghasilkan 50% dari total efisiensi HAWT. Khususnya turbin angin Savonius, efisiensi yang mampu dihasilkan sekitar 15-25% dari total energi angin yang diterima
2. *Tip speed ratio* atau λ yang dihasilkan rendah sehingga efisiensi yang dihasilkan akan rendah

B. *Helix Wind*

VAWT atau *helix wind* merupakan paradigma teknologi generasi *platform*. Teknologi sebelumnya juga merancang turbin untuk menghasilkan energi listrik yang berasal dari angin. Hal tersebut menjadi pusat perhatian secara eksklusif mengenai efisiensi dan keluaran daya, mengabaikan kepentingan pengguna dengan membangun secara luas pemakaian seperti *visual impact* (estetis), membuat zona batas, mengutamakan batasan ketinggian, dan menurunkan akses informasi

angin. *Helix wind* akan mengubah secara cepat industri kecil angin dengan menghilangkan hambatan dan menyediakan harga yang dapat dijangkau oleh pemakai dan sistem energi anginnya bersifat komersial. *Helix wind* mempunyai berbagai keuntungan yang berbeda seperti :

1. Mempunyai estetis yang tinggi karena rancangannya menarik
2. Memiliki harga yang kompetitif dalam tampilannya
3. Menyediakan sistem yang belum pernah diketahui oleh pemakai dan *reseller support*
4. Perizinannya sederhana
5. Menyediakan pengaturan tampilan dan adanya pengumpulan data

C. Jumlah *Blade*

Tinjauan teoritis yang benar belum ditemukan sebagai konsep terbaik jumlah *blade* yang digunakan karena selama ini lebih ditentukan oleh jenis penggunaannya, seperti untuk pembangkit listrik atau pompa air, dan kecepatan angin saat rotor mulai berputar. Adapun konsep jumlah *blade* terdiri atas 4 konsep yaitu konsep satu, dua, tiga, dan multi *blade*. Dengan konsep dua dan tiga *blade* yang membutuhkan momen gaya yang cukup besar guna memulai proses putaran dan dapat menjadi kendala apabila mesin mempunyai rasio transmisi *gear* lebih dari 1:5 saat kecepatan angin rendah. Sedangkan, untuk turbin angin berskala besar dibutuhkan mesin diesel guna memulai berputar (motor) sampai rotor mempunyai daya yang cukup untuk mengimbangi beban mekanik dan beban induksi generator.

D. Mekanisme Turbin Angin

Cara kerja turbin angin merupakan kebalikan cara kerja kipas angin karena pada kipas angin bekerja untuk menghasilkan angin bukan menghasilkan listrik. Angin akan memutar sudut turbin dan poros pun bergerak karena dihubungkan dengan generator sehingga listrik dihasilkan.

E. Daya

Daya yang dihasilkan oleh poros suatu

turbin merupakan transformasi energi kinetik yang terdapat pada aliran angin. Aliran angin bergerak dengan nilai kecepatan tertentu dengan besaran energi kinetik yang dapat diserap oleh susunan *blade* turbin angin. Daya maksimal aliran angin pada rancangan turbin sebanding dengan energi kinetik aliran udara seperti pada persamaan 1.

$$P_{\text{turbin}} = m \times E_{\text{kinetik}} = m \frac{v_i^2}{2g_c} \dots\dots\dots 1$$

di mana

- P_{turbin} = daya yang dihasilkan turbin, Watt
- m = massa udara per waktu, kg/s
- v_i = kecepatan angin masuk, m/s
- g_c = faktor konversi, 1 kg/N.s²

Massa aliran udara per waktu dapat dihitung dengan persamaan 2.

$$m = \rho_{\text{udara}} \times A \times v_i \dots\dots\dots 2$$

di mana

- ρ_{udara} = massa jenis udara, kg/m³
- A = luas penampang rancangan turbin, m²

Sehingga didapatkan persamaan 3.

$$P_{\text{total}} = \frac{1}{2} \times \rho_{\text{udara}} \times v^3 \times A \dots\dots\dots 3$$

Dari persamaan 3 dapat disimpulkan bahwa daya total dari aliran angin sebanding dengan kerapatan udara, luas penampang turbin, dan kecepatan angin.

Daya angin yang dihasilkan dapat dihitung melalui pendekatan teori Betz yaitu menggunakan gambar *Performance of Main Conventional Wind Machines*. Kurva ini menjelaskan mengenai *coefficient power* (C_p) merupakan fungsi dari *tip speed ratio* atau λ .

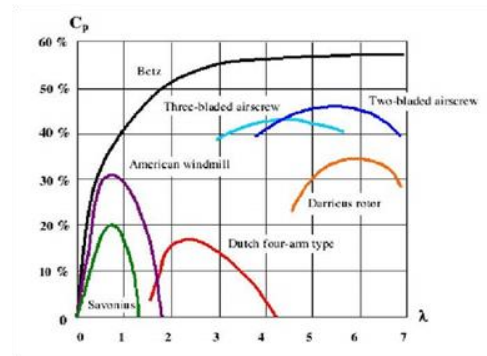
$$\lambda = \frac{\omega \times R}{v} \dots\dots\dots 4$$

Di mana ω = kecepatan sudut = $\frac{2\pi \text{ rpm}}{60}$

- R = radius rotor, m
- v = kecepatan aliran angin, m/s

Dengan memplotkan nilai λ ke dalam *Performance of Main Conventional Wind*

Machines (Savonius) maka didapatkan nilai C_p . Adapun, gambar *Performance of Main Conventional Wind Machines* dapat dilihat pada Gambar 2.1. berikut.



Gambar 2.1. *Performance of main conventional wind machines* (digilib.petra.ac.id, 2011)

Sehingga, daya angin yang dihasilkan ketika menyerap energi kinetik aliran angin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 5.

$$P_{\text{angin}} = C_p \times \rho_{\text{udara}} \times R \times H \times v^3 \dots\dots\dots 5$$

Di mana

- P_{angin} = daya yang dihasilkan oleh angin, Watt
- C_p = *coefficient power*

Dengan daya angin dan turbin yang telah diketahui maka nilai efisiensi turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 6 berikut

$$\text{Efisiensi}_{\text{turbin}} = \frac{P_{\text{angin}}}{P_{\text{turbin}}} \times 100\% \dots\dots\dots 6$$

F. Fluent

Program FLUENT ini merupakan alat bantu untuk menganalisa atau memprediksi dengan cepat dan akurat mengenai aliran fluida, baik cair maupun gas. FLUENT menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD atau komputasi aliran fluida dinamik) yaitu analisis yang didasari metode volume terbatas.

- *Computational* adalah segala sesuatu yang berhubungan dengan matematika dan metode numerik atau komputasi
- *Fluid dynamics* adalah dinamika dari segala sesuatu yang mengalir

Sehingga, CFD merupakan suatu ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika). Sebenarnya, CFD mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. CFD merupakan pendekatan dari persoalan yang asalnya kontinu (mempunyai jumlah sel tak terhingga) menjadi model yang diskrit (mempunyai jumlah sel terhingga). Untuk FLUENT versi 6.1.22 menggunakan metode volume hingga (*finite volume method*) sebagai metode diskritisasinya. Pada umumnya, tahapan simulasi CFD terdiri atas:

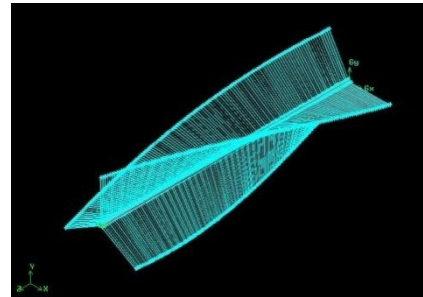
1. *Preprocessing*
Preprocessing merupakan langkah pertama dalam membangun dan menganalisa sebuah model CFD. Langkah ini sebagai komponen input dari permasalahan aliran ke dalam program CFD dengan menggunakan *interface* sehingga memudahkan operator, dan berfungsi sebagai *transformer* input berikutnya ke dalam bentuk yang sesuai dengan pemecahan masalah (*solver*).
2. *Solving*
Solving merupakan program inti pencari solusi dari CFD untuk menghitung kondisi-kondisi yang diterapkan pada saat *preprocessing*
3. *Postprocessing*
Postprocessing merupakan langkah dalam mengorganisasi dan menginterpretasikan data hasil simulasi CFD dapat berupa gambar, kurva, dan animasi (Tuakia, 2008).

III. METODOLOGI PENELITIAN

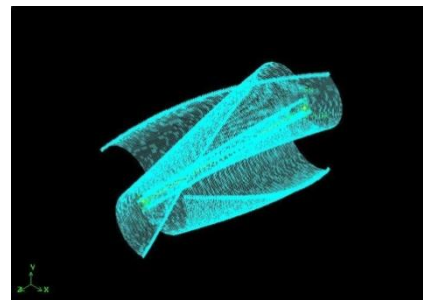
A. Pemodelan

Model turbin angin dalam penelitian ini adalah pemodelan dengan 2 jenis tipe rotor

turbin tipe *helix*. Perbedaan dari kedua jenis rotor tersebut adalah bentuk *blade* penampang dari rotor. Bentuk *blade* penampang tersebut adalah persegi panjang dan setengah lingkaran dengan tiga buah *blade*.



(a)



(b)

Gambar 3.1. Rotor *Helix Wind Turbine* Tipe *Blade* (a) Persegi panjang (lurus), dan (b) $\frac{1}{2}$ lingkaran

Keterangan

- Jumlah sudu : 3
- Diameter Turbin : 900 mm
- Tinggi Turbin : 1350 mm
- Jumlah Tingkat : 1

B. Pembagian Elemen (*Meshing*)

Meshing adalah pembagian objek menjadi bagian-bagian kecil. Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu objek akan mempengaruhi ketelitian analisis CFD. Semakin kecil ukuran *mesh* maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti. Di lain sisi, analisa tersebut akan membutuhkan daya

komputasi dan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan objek yang memiliki ukuran *mesh* lebih besar. Sehingga, ukuran *mesh* harus diatur sedemikian rupa agar diperoleh hasil yang teliti dan daya komputasi yang dibutuhkan tidak terlalu besar.

C. Penentuan Kondisi Batas

Untuk lebih menyepesifikasikan permasalahan, maka dibuat beberapa kondisi batas. pada analisis ini yaitu :

- Pemodelan *blade* turbin angin tipe helik untuk mempermudah perhitungan secara komputasi.
- Aliran fluida adalah aliran *incompressible* karena bilangan *Mach* yang digunakan sangat kecil kurang 0,3. Dengan kecilnya bilangan *Mach* maka persamaan energi diabaikan.
- Nilai kecepatan fluida dimasukkan di sisi masuk masing-masing komponen sumbu koordinat.

Pada *pressure outlet*, nilai tekanan statik aliran balik dan aliran turbulen aliran balik juga dimasukkan

D. Solusi

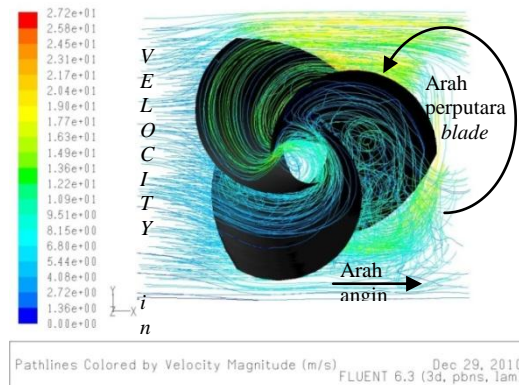
FLUENT menyediakan dua parameter yang harus ditentukan, yaitu faktor *under-relaxation* dan diskritisasi. Faktor *under-relaxation* merupakan faktor untuk menyetabilkan proses iterasi pada *solver segregate*. Pada awal iterasi, dapat menggunakan faktor *under-relaxation* yang sudah ada (*default*). Umumnya, penurunan faktor *under-relaxation* dapat meningkatkan konvergensi faktor ini tidak mempunyai persamaan dan nilai yang paling baik hanya bisa didapat dari pengalaman.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Turbulensi *Velocity Magnitude* Pada Penampang *Blade*

Berikut ini adalah gambar-gambar berpola aliran udara *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dengan *blade* berbentuk ½

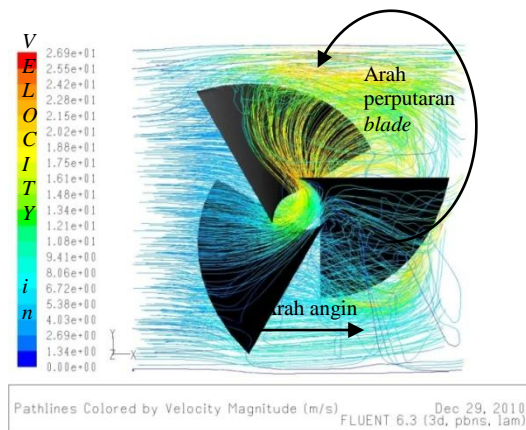
lingkaran maupun lurus, dan berkecepatan 4 m/s. Gambar ini hanya menampilkan 80% *velocity magnitude* pada penampang *blade*.



Gambar 4.1. *Velocity magnitude* VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk ½ lingkaran dan berpola aliran laminar dengan meninjau sisi atas turbin

Gambar 4.1. adalah gambar mengenai *velocity magnitude* dari VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk ½ lingkaran dan berpola aliran laminar dengan meninjau dari sisi atas. Gambar tersebut menunjukkan pola aliran udara yang menuju ke dalam *blade*. Gambar tersebut menunjukkan nilai *velocity magnitude* tertinggi yaitu 27,2 m/s dan hampir sebagian besar *stream line* berwarna biru dan kuning pada *blade* serta hanya beberapa *stream line* berwarna jingga dan merah, serta nilai turbulensinya berkisar 1,36-27,2 m/s. (*stream line* yang tidak mengikuti bentuk *blade* dan menabrak *stream line* lainnya yang dikenal dengan turbulensi). Ketika udara diinputkan, udara akan menyebar pada penampang *blade* lalu udara menuju ke arah poros turbin. Udara keluar melalui sisi penampang *blade* lainnya. *Stream line* berwarna baik biru, kuning, jingga maupun merah tersebut menandakan pergerakan aliran udara. Lalu, terlihat adanya perbedaan warna *stream line* yaitu jarak antara *blade* dengan batas lingkungan terhadap warna *stream line* pada penampang *blade* (*stream line* berwarna biru dan kuning). Hal ini disebabkan batas lingkungan yang dibuat terlalu dekat dengan posisi *blade*.

Gambar 4.2 adalah gambar mengenai *velocity magnitude* VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk lurus dan berpola aliran laminar dengan meninjau sisi atas. Gambar tersebut menunjukkan nilai *velocity magnitude* tertinggi yaitu 26,9 m/s. Adapun, pergerakan udara pada penampang *blade* terlihat banyaknya turbulensi aliran di bagian belakang *blade* dengan nilai turbulensi berkisar 1,34-26,9 m/s.



Gambar 4.2. *Velocity magnitude* VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk lurus dan berpola aliran laminar dengan meninjau sisi atas turbin

Gambar 4.2 adalah gambar mengenai *velocity magnitude* VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk lurus dan berpola aliran laminar dengan meninjau sisi atas. Gambar tersebut menunjukkan nilai *velocity magnitude* tertinggi yaitu 26,9 m/s. Adapun, pergerakan udara pada penampang *blade* terlihat banyaknya turbulensi aliran di bagian belakang *blade* dengan nilai turbulensi berkisar 1,34-26,9 m/s.

Pada Tabel 4.1. terlihat bahwa pergerakan udara pada penampang *blade* yang berbentuk 1/2 lingkaran dengan kecepatan udara sebesar 4, 8, dan 12 m/s baik aliran udara berpola laminar dan turbulen mempunyai sejumlah nilai turbulensi aliran di bagian belakang dan mengarah ke poros *blade* yang bervariasi. *Velocity magnitude* terbaik adalah *blade* berbentuk lurus dengan nilai turbulensi berkisar 1,1-22 m/s.

Blade berbentuk 1/2 lingkaran maupun lurus keduanya mempunyai turbulensi yang

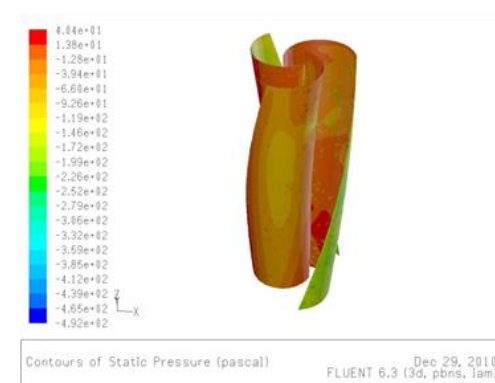
berbeda-beda di bagian poros dan belakang *blade*. Nilai turbulensinya tidak berbeda jauh dibandingkan *blade* berbentuk lurus.

Tabel 4.1. Nilai penyebaran *velocity magnitude* pada VAWT

Bentuk <i>blade</i>	Kecepatan udara, m/s	Pola aliran	Nilai <i>velocity magnitude</i> , m/s	Nilai turbulensi <i>velocity magnitude</i> , m/s
1/2 lingkaran	4	Laminar	27,2	1,36 – 27,2
		Turbulen	28	1,4 – 28
	8	Laminar	53,8	2,69 – 53,8
		Turbulen	57,4	2,87 – 57,4
	12	Laminar	79,4	3,97 – 79,4
		Turbulen	86,2	4,31 – 86,2
Lurus	4	Laminar	26,9	1,34 – 26,9
		Turbulen	22	1,1 – 22
	8	Laminar	51	2,25 – 51
		Turbulen	44,3	2,22 – 44,3
	12	Laminar	78,9	3,94 – 78,9
		Turbulen	67,3	3,36 – 67,3

Sedangkan, turbulensi udara (angin) di belakang *blade* untuk *blade* berbentuk lurus lebih kecil jumlahnya dibandingkan *blade* 1/2 lingkaran. Sehingga, dengan sedikitnya turbulensi pada penampang belakang *blade* lurus menjadikan *blade* berputar lebih stabil (udara yang diinputkan tidak menabrak dengan penampang *blade* lainnya).

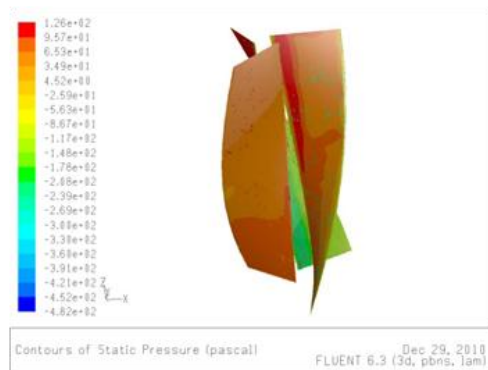
B. Analisis Penyebaran Tekanan Pada Penampang *Blade*



Gambar 4.3. *Contours of static pressure* (pascal) VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk 1/2 lingkaran, dan berpola aliran laminar

Gambar 4.3 adalah gambar mengenai *contours of static pressure* (Pascal) VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade*

berbentuk $\frac{1}{2}$ lingkaran dan berpola aliran laminar dengan meninjau dari sisi samping *blade*. Nilai tertinggi yang dicapai oleh gambar tersebut yaitu 40,4 Pascal. Adapun, penyebaran tekanan pada penampang *blade* yang tertinggi berada di bagian poros *blade* yang terlihat dengan warna jingga hingga merah berkisar antara 13,8-40,4 Pascal. Penyebaran rata-rata berada di penampang *blade* yang mengalami turbulensi aliran udara, sedangkan di belakang *blade* terlihat lebih kecilnya penyebaran tekanannya.



Gambar 4.4. *Contours of static pressure* (pascal) VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk lurus, dan berpola aliran laminar

Gambar 4.4. adalah gambar mengenai *contours of static pressure* (Pascal) VAWT dengan kecepatan udara sebesar 4 m/s, *blade* berbentuk lurus dan berpola aliran laminar dari sisi samping *blade*. Nilai tertinggi yang dicapai oleh gambar tersebut yaitu 126 Pascal. Adapun, penyebaran tekanan pada penampang *blade* yang tertinggi berada di sisi samping *blade* yang terlihat berwarna jingga dan merah yaitu berkisar 4,52-126 Pascal. Penyebaran rata-rata berada di penampang *blade* yang mengalami turbulensi aliran udara, sedangkan di belakang *blade* terlihat lebih kecilnya penyebaran tekanannya (warna hijau dan kuning).

Tabel 4.2. Nilai penyebaran tekanan pada VAWT

Bentuk <i>blade</i>	Kecepatan udara, m/s	Pola aliran	Nilai tekanan, Pascal	Nilai turbulensi tekanan, Pascal
$\frac{1}{2}$ lingkaran	4	Laminar	40,4	13,8 – 40,4
Lurus			126	4,52 – 126
$\frac{1}{2}$ lingkaran	8	Laminar	351	15,3 – 351
Lurus			483	38,8 – 483
$\frac{1}{2}$ lingkaran	12	Laminar	576	124 – 576
Lurus			1260	147 – 1260
$\frac{1}{2}$ lingkaran	4	Turbulen	58,6	1,65 – 58,6
Lurus			146	16,5 – 146
$\frac{1}{2}$ lingkaran	8	Turbulen	233	113 – 233
Lurus			576	100 – 576
$\frac{1}{2}$ lingkaran	12	Turbulen	487	220 – 487
Lurus			1240	206 – 1240

Dari uraian dan Tabel 4.2 diketahui bahwa penyebaran *contours of static pressure* yang terbaik berada pada *blade* berbentuk $\frac{1}{2}$ lingkaran baik pada kecepatan 4, 8, dan 12 m/ dengan pola aliran laminar maupun turbulen. Hal ini dikarenakan nilai tekanan yang tersebar di penampang *blade* tersebut lebih kecil dengan masing-masing *contours of static pressure* yaitu 40,4; 351; 576; 58,6; 233; dan 487 Pascal dibandingkan *blade* yang berbentuk lurus yaitu 126; 483; 1260; 146; 576; dan 1240 Pascal. Semakin kecil nilai *contours of static pressure* maka *blade* akan berputar lebih stabil. Adapun letak dari nilai tertinggi *contours of static pressure* untuk *blade* berbentuk $\frac{1}{2}$ lingkaran berada di bagian poros *blade*, sedangkan, untuk *blade* berbentuk lurus berada di bagian sisi samping. Semakin besar nilai penyebaran *contours of static pressure* pada *blade* berbentuk lurus akan menyebabkan *blade* akan lebih mudah rusak akibat dari besarnya tekanan dari udara yang mengalir.

Penyebaran nilai *contours of static pressure* yang lebih kecil pada *blade* berbentuk $\frac{1}{2}$ lingkaran menjadi nilai lebih VAWT dibandingkan HAWT. Karena, HAWT mempunyai nilai *contours of static pressure* tertinggi di bagian sisi samping dan hal ini yang menyebabkan HAWT lebih cepat rusak dibandingkan VAWT. Sehingga,

dengan *blade* berbentuk ½ lingkaran adalah *blade* terbaik baik dari sisi penyebaran *velocity magnitude* maupun *countour of pressure* sebagai pembangkit listrik berskala rumah tangga.

C. Analisis Daya Pada VAWT

Setelah dilakukan perhitungan, daya yang dihasilkan oleh *blade* berbentuk ½ lingkaran dan lurus dengan kecepatan 4, 8, dan 12 m/s dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.3. Daya yang dihasilkan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dengan *blade* berbentuk ½ lingkaran dan lurus

Kecepatan udara, m/s	P_{turbin} , Watt	<i>Tip speed ratio</i> , λ	<i>Coefficient power</i> , C_p	P_{angin} , Watt	Efisiensi turbin, %
4	47,628	0,883	0,196	9,34	19,6
8	381,02	0,441	0,158	60,4	15,86
12	1285,9	0,294	0,103	133	10,34

Dari Tabel 4.3 terlihat bahwa $daya_{\text{angin}}$ yang dihasilkan dari $daya_{\text{turbin}}$ baik pada *blade* berbentuk ½ lingkaran maupun lurus dengan kecepatan 4, 8, dan 12 m/s yaitu 9,335 dari 47,628; 60,43 dari 381,024; dan 132,967 dari 1285,956 Watt Sedangkan, nilai efisiensi dari turbin tersebut masing-masing yaitu 19,6; 15,86 dan 10,34% dari $daya_{\text{turbin}}$ yang mampu dihasilkan kedua bentuk *blade*. Sehingga, pada kecepatan 4 m/s baik *blade* ½ lingkaran maupun lurus merupakan turbin paling tinggi $daya_{\text{angin}}$ -nya yaitu 9,335 Watt dengan efisiensi sebesar 19,6%.

Dengan luas penampang kedua bentuk *blade* yang sama besar mempunyai $daya_{\text{angin}}$ yang sama besar pula. Tetapi, bila ditinjau dari sisi *velocity magnitude* dan penyebaran tekanan pada penampang *blade* maka *blade* ½ lingkaran adalah bentuk *blade* terbaik. Karena pada *blade* ½ lingkaran mempunyai nilai *velocity magnitude* dan penyebaran tekanan yang lebih kecil sehingga pergerakan turbin terhadap kecepatan udara yang diinputkan akan lebih stabil dan umur pemakaian turbin jauh lebih lama dibandingkan *blade* lurus.

V. KESIMPULAN

Dari analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Nilai *velocity magnitude* dan turbulensi angin terbaik berada pada *blade* lurus
2. Nilai *contours of static pressure* (Pascal) dan penyebaran tekanan terendah pada *blade* ½ lingkaran
3. $Daya_{\text{angin}}$ tertinggi yang dihasilkan turbin dari $daya_{\text{turbin}}$ berada pada *blade* ½ lingkaran dengan kecepatan angin 4 m/s yaitu 9,335 dari 47,6228 Watt (efisiensi turbin sebesar 19,6%).
4. Dengan meninjau sisi *velocity magnitude*, *countour of pressure* beserta turbulensinya maka *blade* ½ lingkaran layak sebagai pembangkit listrik alternatif berskala rumah tangga di berbagai kecepatan angin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Daryanto, Y., F. A. Yohanes dan F. Hasim. 2005. *Potensi, Peluang dan Tantangan Energi Angin di Indonesia*. BPPT. Tangerang.
- [2] Geoffrey G.Meredith. 2000. *Kewirausahaan teori dan praktek*. PT. Pustaka Binaman Pressindo.
- [3] Gourieres, Desire Le. 1982. *Wind Power Plants –Theory and Design*. Pergamon Press.Oxford OX3 OBW. England.
- [4] Martinus, 2010. *Pembuatan dan Studi Kelayakan Ekonomi Prototype Turbin Angin Tipe Helix Sebagai Alternatif Pembangkit Listrik dengan Studi Kasus Daerah Bandarlampung, Lampung Indonesia*, Prosiding SNTTM 2010. Palembang.
- [5] Purba, J. K. 2006. *Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Rotor Savonius sebagai Pembangkit Energi Listrik Untuk Penerangan Jalan Tol*. Tugas Sarjana Teknik Mesin ITB. Bandung.
- [6] R.S. Khurmi. 1991. *A text of machine*

- design*. Eurasia publishing House. Ram nagar. New Delhi.
- [7] Suryana. 2000. *Kewirausahaan*. Salemba Empat. Jakarta.
- [8] Sularso. 2004. *Dasar perencanaan dan pemilihan elemen mesin*. PT. Pradnya Paramita. Jakarta.
- [9] Wiley, Jhon. 1985. *Intoduction to Fluid Mechanics third edition*. New York.
-