

## Studi Turbin Angin Sederhana Dan Efisien Untuk Kondisi Indonesia

**Janu Pardadi, Samsul Kamal, Aris Setiawan**

Program Studi Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Telepon (0274) 521673  
Email : pardadi@yahoo.com

### Abstrak

*Seiring dengan semakin langkanya sumber energi fosil, banyak pihak mencari alternatif energi yang mampu menggantikan energi fosil dengan jenis energi yang lebih terbarukan (renewable energy) dan ramah lingkungan. Salah satu sumber energi itu adalah angin. Turbin angin dapat mengkonversi energi yang dimiliki angin menjadi energi mekanik dan selanjutnya dapat menghasilkan listrik. Jenis turbin angin yang banyak berkembang kini adalah tipe turbin angin sumbu horisontal. Permasalahannya bahwa turbin angin sumbu horisontal ini memiliki biaya instalasi dan perawatan yang tinggi.*

*Objek penelitian ini adalah turbin angin savonius sudu airfoil. Turbin angin Savonius adalah turbin angin sumbu vertikal yang memiliki kelebihan dalam segi kemudahan instalasi dan perawatan namun memiliki tingkat efisiensi yang rendah. Sudu airfoil digunakan untuk memanfaatkan gaya hambat sekaligus gaya angkat sehingga diharapkan memperbaiki proses konversi energinya. Pada penelitian ini dibandingkan kinerja turbin menggunakan nozzle dan tidak. Variasi kecepatan yang dipakai adalah 3,37 m/s, 3,58 m/s dan 4,06 m/s.*

*Hasil penelitian menunjukkan turbin angin savonius sudu airfoil tanpa nozzle memiliki kinerja paling baik.  $Cp_{max}$  yang didapatkan sebesar 10 % pada tip speed ratio berada pada nilai 0,44 dan kecepatan angin 3,58 m/s. Penggunaan nozzle justru menurunkan kinerja turbin angin di tiga variasi kecepatan.  $Cp_{max}$  yang dapat dicapai oleh turbin dengan penggunaan nozzle hanya sebesar 3,3 % pada tip speed ratio 0,30 pada kecepatan angin 3,58 m/s.*

*Kata kunci:* Turbin angin savonius, nozzle, koefisien daya, tip speed ratio.

### Pendahuluan

#### 1. Latar belakang

##### 1.1 Perkembangan Energi Angin Dunia.

Pemanfaatan energi angin melalui apa yang disebut sekarang *windmills* telah dilakukan oleh manusia sejak ratusan tahun yang lalu untuk, terutama, pengolahan hasil pertanian di Persia, China, Belanda dan Amerika Utara. Diantara tahun 1850 dan 1940 saja terdapat sekitar enam juta mesin *windmills* di USA untuk memenuhi berbagai keperluan industri pertanian , Jon Naar (1982). Saat itu, mudah dimengerti dari sisi teknologi bahwa *performance* mesin *windmills* masih jauh dari efisien, hanya sekitar 10%. Sejak 1973, ketika krisis ‘energi’ minyak, teknologi konversi energi angin WECS (*Wind Energi Conversion System*) berkembang dengan pesat. Di USA saja waktu itu telah dapat memanfaatkan lebih dari 30% seluruh potensi energi angin yang ada. Teknologi terbaru dari konversi energi angin sebagaiannya merupakan limpahan (*spin-off*) dari kemajuan di bidang keteknikan *aerospace* dan helikopter di USA. Di dunia pada awal tahun 2002 telah terpasang sekitar 25.000 MW dan 70% dari kapasitas tersebut berada di Eropa. Sekitar 45 negara saat ini telah berkontribusi secara aktif dalam pengembangan energi angin, *Wind Force* (2001-2). Berdasar kemajuan yang realistic, listrik dunia mengharap sekitar periode 2002 hingga 2007 akan terdapat sekitar 120.600 MW listrik dipenuhi oleh energi angin . Dengan dukungan kemajuan teknologi dan kondisi sumber energi konvensional, prediksi catu instalasi pertahun pada 2020 sebesar 150.000 MW *per annum* dan mensupply 12% dari kebutuhan listrik dunia dianggap sangat beralasan. Terkait dengan lingkungan, dimulai dari Protokol Kyoto , 1997 , yang mentargetkan 5,2% pengurangan greenhouse gas tahun 1990 pada periode 2008 – 2012 disemua tingkat regional dan national, maka berbagai Negara telah menuju kearah target tersebut, termasuk Indonesia dengan mencanangkan Program Langit Biru berdasar CDM (*Clean Development*

*Mechanism).* Lima belas Negara Eropa telah mentargetkan 22% listriknya dari sumber *renewable* termasuk energi angin.

Di bidang keekonomian , terjadi penurunan biaya produksi listrik dari wind power. Biaya produksi untuk satu kilowatt jam telah turun sekitar 1/5 nya dibanding biaya produksi 20 tahun yang lalu. Di Inggris misalnya, telah banyak ditanda tangani kontrak proyek energi listrik dengan harga 3 US\$ cents/kWh. yang cukup kompetitif terhadap listrik energi gas. Majalah Windpower Monthly memberikan harga per installed kilowatt energi angin disekitar 700 US\$, yang kembali sangat kompetitif terhadap instalasi PLTG. Prediksi harga sekitar 2,62 US\$ cent / kWh di tahun 2010 dengan harga instalasi sekitar 555 US\$ setiap kilowatt merupakan prediksi yang sangat realistik. Sementara itu, ukuran setiap kapasitas rerata turbin angin baru saat ini juga semakin besar, dari saat ini sekitar ukuran 1 MW, dan pada tahun 2007 diperkirakan turbin angin ukuran 1,3 MW serta 1,5 MW akan berada di market dengan proven technology. Hingga saat inipun prediksi itu sudah ada yang melampaui walau masih belum fully proven pada ukuran pasar. Di Indonesia, kebutuhan daya listrik 11.000 MW akan dialami jaringan Jawa-Madura-Bali di tahun 2010 yang mungkin hanya akan dapat dipenuhi oleh PLN sekitar 40 % nya saja dengan jenis pembangkit konvensional. Dengan demikian peluang untuk masuknya energi angin sangatlah besar.

### 1.2 Potensi Angin di Indonesia.

Energi yang dimiliki angina adalah jumlah total gerakan molekul udara, yang secara mekanika fluida , akan proporsional terhadap kecepatannya. Teoritis ada sekitar 5 quadrillion tons molekul udara bergerak sebagai angin di sekitar bumi kita dan jika dapat diambil 10 % saja dari energi tersebut, akan dapat memenuhi 10 % kebutuhan energi dunia saat ini. Bergantung lokasi dan geografinya, kecepatan angin potensial di Indonesia berkisar antara 3 hingga 7 m/dtk. Indonesia timur secara umum merupakan daerah yang cukup potensial bagi pengembangan energi angin. Sedang untuk pulau Jawa , daerah pantai selatan dan banyak daerah di Jawa Timur seperti Ponorogo mempunyai potensi energi angin yang cukup baik. Pengukuran potensi angin di daerah pantai selatan Jawa Tengah, Laporan Penelitian (2005), tepatnya daerah pantai Purworejo memberikan kecepatan angina rerata tahunan sekitar 6,1 m/dtk dengan durasi efektif sekitar 77,83 % Dari data wind rose , arah dominan adalah tenggara dengan prosentase waktu rerata 19,28 %. Analisis data menunjukkan potensi dengan rapat daya 289,4 W/m<sup>2</sup> dengan prediksi produksi daya tahunan sekitar 2335,75 kWh/m<sup>2</sup>. Dengan potensi tersebut, dapat dinyatakan bahwa potensi angin daerah pantai selatan dan khususnya daerah Purworejo termasuk dalam kategori cukup baik , Manwell J.F et al (2003).

## **2. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kurva karakteristik turbin angin savonius sudu airfoil yang digunakan dalam penelitian. Kurva ini menunjukkan hubungan antara koefisien daya  $C_p$  sebagai fungsi dari tip speed ratio  $\lambda$  yang dapat menggambarkan kinerja dari turbin angin tersebut. Dengan adanya 3 variasi kecepatan dan penggunaan nozzle maka akan didapatkan pula 6 kurva karakteristik yang berbeda yang selanjutnya dapat dibandingkan satu sama lain sehingga dapat diketahui kinerja turbin yang paling efisien. Selain itu dengan penelitian ini akan didapatkan hubungan antara kecepatan angin ( $V_o$ ), daya turbin ( $P_{turbin}$ ) dan koefisien turbin ( $C_p$ ).

## **3. Perkembangan Kincir Angin di Indonesia.**

Sulit untuk menemukan catatan perkembangan penggunaan kincir angin secara sistimatis di Indonesia. Namun berbagai usaha secara seporadis memberikan petunjuk bahwa pemanfaatan energi angin di Indonesia juga mengalami peningkatan dengan berbagai ukuran kemajuan. Penggunaan kincir tradisional untuk penggaraman dan pertambakan di daerah Jawa Timur telah lama dikenal. Berbagai lembaga perguruan tinggi juga telah menunjukkan arah minat penelitian maupun memperoleh ketrampilan praktis lapangan. Saat ini LAPAN dan juga BPPPT telah membukukan berbagai pembuatan dan pemasangan kincir angin berbagai jenis di berbagai lokasi dengan ukuran sampai dengan sekitar 100 kW. Pemerintah Daerah Jawa Tengah telah memasang uji coba listrik tenaga angin berkapasitas 6 kW di daerah Purworejo, Laporan Penelitian Dewan Riset Pemerintah Propinsi Jawa Tengah (2005). Jurusan Teknik Mesin , FT UGM telah memberikan usaha konstribusi yang dapat di

catat melalui kegiatan mahasiswa maupun membantu pengembangan usaha pemerintah daerah. Berbagai kegagalan tidak jarang mewarnai usaha tersebut dengan berbagai perkiraan sebab, mulai dari konstruksi, kekuatan bahan maupun sifat angin yang ada di Indonesia. Tantangan yang ada di Indonesia dalam pemanfaatan energi angin adalah teknologi, keekonomian dan kelembagaan. Prioritas pengembangan energi alternatif, termasuk energi angin dari pemerintah mestinya harus dapat mendorong usaha pengembangan energi angin secara lebih nyata.

Potensi energi angin di Indonesia sebesar 9287 MW sedangkan yang telah terpasang hanya sebesar 0,5 MW. Kecepatan angin potensial berkisar antara 2-6 m/dtk tergantung dari lokasi. Potensi paling besar ada di daerah Nusa Tenggara Timur dan Barat dengan rata rata kecepatan angin sebesar 5 m/dtk (Purwanto dkk., 2006).

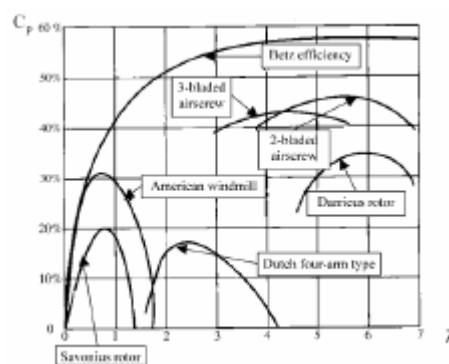
Daya yang dimiliki angin sebanding dengan massa jenis udara, luasan yang dilewati angin, dan pangkat tiga kecepatan angin. Albert Betz menyatakan bahwa secara teoretis besar maksimal energi angin yang dapat dikonversi oleh kincir angin ideal sebesar 59% atau  $16/27$  dikenal dengan Betz Limit (Boyle, 1996). Ada dua kemungkinan untuk transformasi daya angin menjadi daya kinetik, yaitu dengan pemanfaatan gaya hambat, drag force, dan dengan daya angkat, lift force (Sihana, 2004). Turbin angin savonius memanfaatkan gaya hambat saja sebagai penggeraknya. Turbin ini juga mengalami gaya hambat yang mengurangi kinerja turbin sehingga perlu diupayakan untuk menghilangkan gaya hambat ini untuk meningkatkan kinerjanya.

Kurva karakteristik daya sangat dibutuhkan oleh para perancang turbin angin, dalam pembuatan setiap turbin angin menggunakan beberapa metode tanpa adanya acuan yang menyatakan kualitas hasil. Berdasarkan kurva karakteristik turbin angin, langkah selanjutnya dapat merancang suatu turbin angin (Burton dkk., 2001).

Menurut Menet (2004) Turbin angin Savonius memiliki beberapa keuntungan yaitu :

1. Merupakan turbin angin yang sederhana dan mudah untuk dibuat.
2. Instalasi dan perawatan dapat dilakukan lebih mudah.
3. Dapat menangkap angin dari segala arah dan dengan kecepatan yang rendah.

Menurut Eldridge dan Savonius, turbin angin HAWT memiliki kecepatan angular yang tinggi sehingga tingkat efisiensi juga tinggi sedangkan turbin angin tipe savonius adalah tipe slow running wind turbine memiliki tingkat efisiensi yang jauh di bawah turbin tipe HAWT ataupun Darrieus (Menet, 2004).



Gambar 1. Kinerja berbagai turbin angin konvensional (Menet, 2004)

#### 4. Konversi Energi Angin

Secara prinsip, perubahan tekanan dari aliran udara yang melewati benda merupakan dasar dari konversi energi angin. Gaya-gaya aerrodinamika : *Lift* yang berarah tegak terhadap aliran udara relative (*relative wind*) dan *Drag* yang berarah parallel terhadap arah aliran udara relatif. Terhadap poros yang searah dengan aliran udara lift dapat menghasilkan torsi pemutar poros, dan demikian juga terhadap poros yang tegak lurus arah aliran udara , drag dapat menghasilkan torsi pemutar poros (*dragging*). Karena itu , ada dua prinsip dasar pemanfaatan angin pada kincir angin yaitu kincir poros horizontal yang biasanya menggunakan gaya *lift*, dan kincir poros tegak yang biasanya menggunakan

gaya *drag*. Untuk poros tegak, umumnya menghasilkan putaran rendah namun torsi tinggi sehingga lebih cocok untuk pemanfaatan langsung misal pompa pertanian, sedang kincir poros horizontal dengan jumlah sudu kecil biasanya menghasilkan putaran besar sehingga lebih cocok untuk generator listrik.

## 5. Pengalaman Kegagalan

Kegagalan merupakan pengalaman sangat berharga bila ditindak lanjuti untuk meniadakannya pada proses perbaikan. Berdasar pengalaman dan catatan yang ada, maka berbagai kegagalan di lapangan atas berbagai kincir terpasang di Indonesia, baik impor maupun buatan dalam negeri / local kiranya selalu dapat dihubungkan dengan

- a. Konstruksi yang tidak mampu bertahan pada angin berfluktuasi turbulen (terutama kincir buatan lokal)
- b. Perawatan yang tidak mudah ditangani (baik kincir impor maupun lokal)

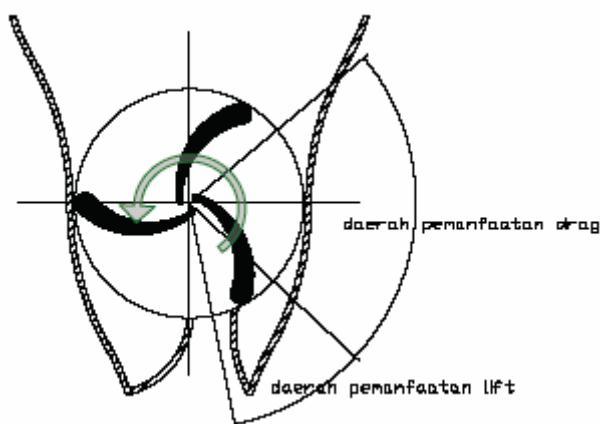
Karena itu, menurut catatan dan informasi yang kami ketahui, belum ada satupun kincir di Indonesia yang bertahan untuk beroperasi lebih dari lima tahun. Sementara umur (life time) keekonomian kincir umumnya harus dapat bertahan hingga minimal sekitar 10 hingga 12 tahun. Karena itu, penelitian ini berusaha untuk mengembangkan kincir angin dengan modifikasi dan gabungan jenis serta konstruksi kincir yang telah ada (drag atau poros vertikal dan lift atau poros horizontal), dengan harapan dapat meningkatkan life time yang lebih baik. Perlu juga kiranya untuk disampaikan, bahwa pengalaman kegagalan juga banyak dialami oleh berbagai usaha pemanfaatan energi angin di luar negeri.

## 6. Arah Pengembangan

Dari uraian kedua jenis kincir (poros vertikal dan horizontal) tersebut maka akan dilakukan pengembangan kincir dengan modifikasi dan penggabungan kelebihan-kelebihan yang ada pada kedua jenis kincir tersebut, yang kiranya dapat beroperasi lebih lama serta mudah dioperasikan dan dirawat sesuai kondisi umumnya daerah di Indonesia. Sebagai pegangan awal dari modifikasi tersebut adalah

- Menggunakan jenis poros vertikal untuk tetap mempertahankan lower cost of installation and easier accessibility for maintenance and repairs
- Mengusahakan pemanfaatan optimum dari gabungan gaya lift dan drag untuk memperbaiki proses konversi

Langkah awal dari pengembangan tersebut adalah dirancang suatu konstruksi jenis kincir poros vertikal, namun dengan gaya penggeraknya merupakan gabungan pemanfaatan lift dan drag sebagaimana terlihat pada Gambar 2



Gambar 2. Idea rancangan awal kincir yang akan dikembangkan, jenis poros vertikal dengan pemanfaatan *lift* dan *drag*.

## 7. Tinjauan Pustaka

Energi adalah kapasitas atau kemampuan untuk melakukan kerja. Energi memiliki berbagai bentuk dan hanya dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk energi yang lain. Prinsip ini dikenal dengan Hukum termodinamika pertama. (Boyle, 1996).

Penelitian tentang turbin angin *savonius* pernah dilakukan sebelumnya oleh Fauzan (2008) mengenai pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin yang menyimpulkan bahwa turbin angin *savonius* dengan jumlah sudu lebih sedikit kinerjanya lebih baik. Pada penelitian ini turbin dengan dua sudu bentuk plat memiliki kinerja paling baik.

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah pada penelitian ini digunakan sudu bentuk airfoil sehingga gaya lift yang biasanya diabaikan pada turbin Savonius menjadi bermanfaat dan membantu sebagai gaya pemutar turbin selain gaya drag. Selain itu pada turbin dipasang sebuah nozzle untuk mengurangi gaya drag yang merugikan dan meningkatkan kecepatan angin yang menumbuk turbin sehingga kinerja turbin dapat meningkat. Penelitian turbin angin savonius yang menggunakan sudu airfoil pernah dilakukan oleh Priyanto (2008) dengan memvariasikan bentuk sudu plat dan sudu airfoil yang menyimpulkan bahwa sudu plat memiliki kinerja lebih baik daripada sudu airfoil.

Hubungan  $C_p$  dengan torsi, kecepatan angin, luas penampang :

$$C_p = \frac{\tau \Omega}{0,5 \rho A v_0^3} \quad (5)$$

dalam hal ini,

$C_p$  = koefisien daya , maks 0,593

$\Omega$  = kecepatan angular rotor turbin, rad/s

$\tau$  = torsi, newton meter

$v_0$  = kecepatan angin, m/s

### 7.1 Tip Speed Ratio

*Tip Speed Ratio* adalah Rasio kecepatan tangensial sudu (*tip speed ratio*) didefinisikan sebagai perbandingan antara kecepatan tangensial sudu (*tip speed*)  $v_t$  (m/s) dengan kecepatan angin di depan turbin  $v_0$ . Rasio ini sangat berguna untuk membandingkan karakter berbagai jenis turbin yang berlainan dan dinyatakan oleh persamaan Pengukuran yang lain dari kecepatan turbin angin adalah *tip speed*,  $v_t$ , yang merupakan kecepatan tangensial rotor pada ujung sudu, diukur dalam meter per sekon (m/s). *Tip speed* dapat dituliskan ke dalam persamaan:

$$v_t = \frac{2\pi r N}{60} \quad (6)$$

dengan :  $\lambda$  = *Tip Speed Ratio*

$v_t$  = kecepatan tangensial ujung sudu, m/s

$r$  = jari jari rotor, meter

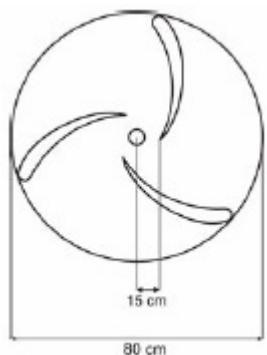
$N$  = kecepatan putar turbin angin, (rpm)



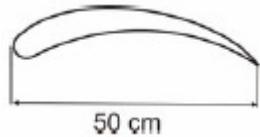
Gambar 3. turbin angin *Savonius* sudu *airfoil* yang akan dianalisis.



Gambar 4 *Savonius* Bentuk *Airfoil* Tampak Depan



Gambar 5 Obyek Penelitian Tampak Atas dengan diameter 80 cm dan jarak hub dengan sudu 15 cm



Gambar 6 Panjang Tampak Muka Sudu Bentuk Airfoil

Dimensi nozzle : *Input* : 95 cm (lebar) x 165 cm (tinggi) , *Output* : 35 cm (lebar) x 165 cm (tinggi)

## Metodologi

### 1. Pendekatan

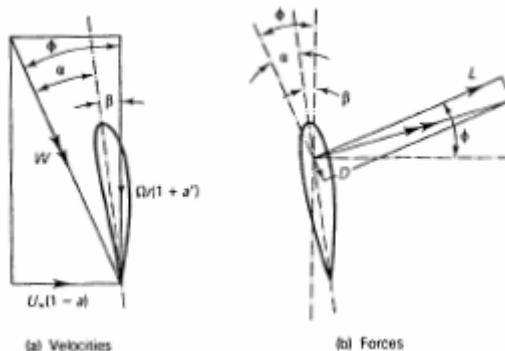
Gaya *drag* yang menimbulkan torsi umumnya digunakan sebagai penggerak pada kincir angin jenis poros vertikal

$$Drag = 0,5 \rho U^2 A C_D \quad (7)$$

dengan  $\rho$  = massa jenis udara , kg/m<sup>3</sup>  
 $U$  = kecepatan angin , m/dtk  
 $A$  = luasan frontal , m<sup>2</sup>  
 $C_D$  = koefisien drag

$C_D$  setidaknya merupakan fungsi angka Reynolds,  $Re$  , dan bentuk geometri. Untuk permukaan frontal terhadap arah angin berbentuk silinder / cembung, pada  $Re$  yang moderat, harga  $C_D$  adalah sekitar 1, sedang untuk permukaan frontal berbentuk cekung, harga koefisien *drag* nya adalah sekitar 2,5. Perbedaan ini digunakan pada kincir jenis Savonius (S-rotor) untuk menimbulkan torsi putar. Torsi yang timbul , dengan demikian , akan lebih optimum jika *drag* lawan yang diakibatkan oleh permukaan cembung dapat diatiadakan atau diperkecil. Kincir ini menghasilkan torsi yang cukup besar dengan putaran yang relatif lambat. Dengan pemikiran bahwa bentuk air foil memerlukan luasan yang cukup untuk memperoleh *drag* yang cukup besar, maka Darrieus mengembangkan kincir vertikal dengan dua bilah panjang lengkung yang menghasilkan putaran relatif lebih tinggi. Kincir ini memiliki *tip-speed ratio* yang tinggi sehingga memberikan konversi energi angin yang optimum, namun memiliki *starting torque* yang relatif rendah sehingga sulit memberikan *self-start* dibanding kincir Savonius. Kincir ini banyak dikembangkan di Kanada untuk mengasilkan listrik sampai dengan ukuran MW elektrik. Kelebihan kincir jenis poros vertikal , menurut Jon Naar (1982) adalah “*lower cost of installation and easier accessibility for maintenance and repairs*”.

Untuk kincir horisontal, yang mengandalkan gaya *lift* untuk menghasilkan torsi pemutar,



Gambar 7. Vektor kecepatan dan gaya pada bilah *air foil* pada kincir poros horisontal

maka gaya lift setiap satuan panjang bilah , normal terhadap kecepatan angin relatif W dapat dinyatakan dengan

$$L = 0,5 \rho W^2 N c C_L \alpha \quad (8)$$

dengan  $N$  = jumlah bilah  
 $c$  = panjang chord bilah  
 $\alpha$  = sudut *incidence*  
 $C_L$  = koefisien *lift*

yang menghasilkan torsi setiap satuan panjang bilah sebesar

$$t = 0,5 \rho W^2 N c (C_L \sin \phi - C_D) \quad (9)$$

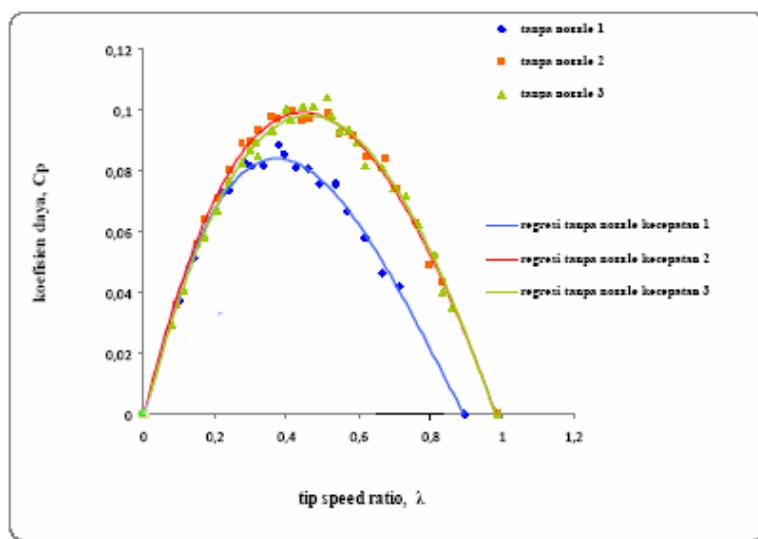
sehingga torsi total dapat dihitung dengan

$$T = \int_{R_1}^{R_2} t \, dr \quad (10)$$

Kincir jenis ini mempunyai keuntungan *tip-speed* rasio yang tinggi sehingga memberikan konversi yang optimum, dan putaran dapat ditinggikan dengan penggunaan bilah yang sedikit serta mampu *self-start* pada kecepatan angin rendah (*cut-in*). Kincir dapat diposisikan pada ketinggian yang besar untuk memperoleh kecepatan angin yang optimum, namun dengan demikian *accessibility for maintenance and repairs* menjadi kurang.

### Hasil Dan Pembahasan

Dari hasil pengamatan, maka dapat dibuat kurva seperti pada gambar 8 yang menunjukkan perbedaan kurva karakteristik hubungan koefisien daya dengan *tip speed ratio* untuk tiap variasi kecepatan yang berbeda. Mengacu pada grafik  $C_{pmax}$  vs kecepatan angin pada gambar 9, pada turbin tanpa *nozzle* terlihat bahwa koefisien daya maksimal meningkat dari kecepatan 3,37 m/s hingga kecepatan 3,58 m/s. Pada saat kecepatan angin ditingkatkan menjadi 4,06 m/s, koefisien daya juga meningkat namun tidak terlalu signifikan.

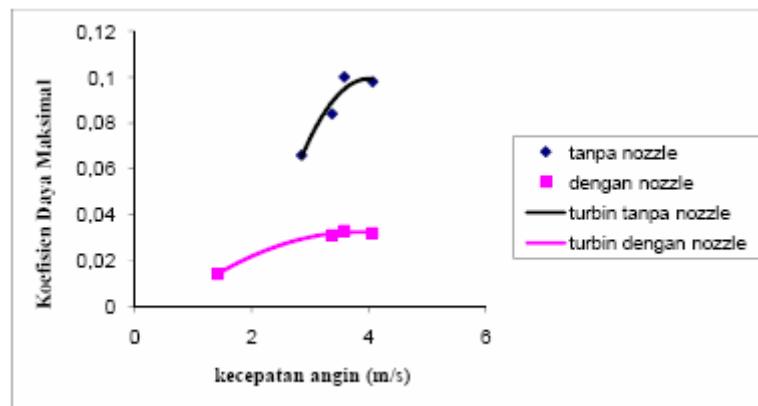


Gambar 8 Kurva Cp vs  $\lambda$  gabungan menurut variasi kecepatan

Koefisien daya maksimal yang dicapai pada kedua kecepatan ini hampir setara yaitu 10 % pada kecepatan 3,58 m/s dan 9,8 % pada kecepatan 4,06 m/s. Ini menandakan bahwa turbin angin tanpa *nozzle* ini lebih efektif digunakan pada kondisi kecepatan angin antara 3,58 m/s hingga 4,06 m/s. Pada turbin yang menggunakan *nozzle*, koefisien daya yang didapatkan relatif setara di tiga variasi kecepatan. Memang terjadi peningkatan koefisien daya maksimal saat kecepatan angin 3,37 m/s hingga kecepatan angin 3,58 m/s, namun peningkatan ini sangat kecil sekali sehingga dapat dikatakan kinerja turbin angin dengan menggunakan *nozzle* ini relatif setara pada tiga variasi kecepatan yang digunakan pada penelitian. Walaupun begitu koefisien daya maksimal yang dicapai turbin dengan *nozzle* tetap lebih rendah daripada turbin tanpa *nozzle*.

Dari seluruh perbandingan kinerja turbin yang didapatkan dari penelitian ini dapat disimpulkan turbin angin *savonius* sudu *airfoil* bekerja paling optimal tanpa menggunakan *nozzle* dan beroperasi pada kecepatan angin 3,58 m/s.

Satu hal lagi yang patut diperhatikan adalah bahwa nilai *cut in speed* turbin dengan *nozzle* lebih rendah daripada turbin tanpa *nozzle*. Ini berarti turbin dengan *nozzle* pada penelitian ini dapat berputar pada kecepatan yang lebih rendah yaitu pada kecepatan 1,421 m/s, lebih baik dari nilai *cut in speed* turbin tanpa *nozzle* yang berada pada nilai 2,845 m/s.

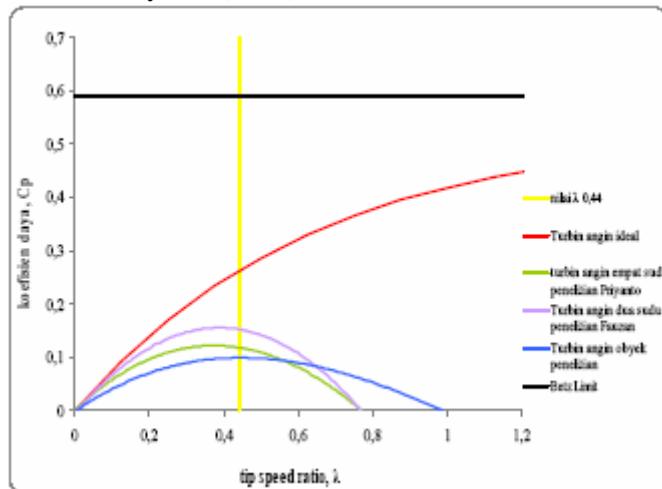


Gambar 9 Grafik Cpmax Vs Kecepatan angin

### Perbandingan Hasil Penelitian dengan Turbin Angin Ideal dan Penelitian Lain yang Sejenis

Pada penelitian ini, turbin angin yang memiliki kinerja yang paling baik adalah turbin angin *savonius* tiga sudu *airfoil* tanpa *nozzle* pada kecepatan 3,58 m/s. Turbin ini akan dibandingkan dengan turbin

angin ideal, turbin angin *savonius* dua sudu hasil penelitian Fauzan (2008) dan turbin angin *savonius* empat sudu plat hasil penelitian Priyanto (2008).



Gambar 9 Kurva Perbandingan Turbin Ideal, Nilai Betz dan Tiga Turbin *Savonius* Hasil Penelitian

Berdasarkan Gambar 9, Nilai  $Cp_{max}$  untuk Turbin *savonius* sudu *Airfoil* sebesar 10 % pada saat *tip speed ratio*,  $\lambda$ , berada pada nilai 0,44 pada kecepatan angin 3,58 m/s. Pada tip speed ratio yang sama, turbin ideal memiliki nilai  $Cp$  sebesar 26 %.

Perbandingkan nilai  $Cp_{max}$  turbin *savonius* sudu *airfoil* dengan turbin angin ideal sebesar 38,5%.

$$\frac{C_p \text{ Turbin Angin Sudu Airfoil}}{C_p \text{ Turbin Angin Ideal}} = \frac{10\%}{26\%} = 38,5\%$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa  $Cp_{max}$  turbin *savonius* sudu *airfoil* tanpa *nozzle* hanya mampu mencapai 38,5 % dari  $Cp$  yang bisa dicapai turbin angin ideal. Nilai  $Cp_{max}$  tersebut dapat dikatakan relatif rendah jika dibandingkan nilai  $Cp$  yang dimiliki turbin angin ideal. Hal ini mengindikasikan bahwa kinerja dari turbin angin yang menjadi obyek penelitian belum cukup baik.

Penelitian Priyanto (2008) dan Fauzan (2008) dilakukan dengan metode yang sama dengan obyek penelitian turbin angin empat sudu dalam penelitian (Priyanto) dan sudu plat (Fauzan).  $Cp_{max}$  yang dicapai oleh turbin angin 4 sudu plat dalam penelitian Priyanti mencapai 12,7 % pada tip speed ratio 0,36. Koefisien daya ini lebih tinggi dari koefisien daya yang dapat dicapai turbin angin pada penelitian ini yaitu 10 % pada tip speed ratio 0,44. sedangkan pada tip speed ratio yang sama, turbin 4 sudu plat Priyanto sekali lagi lebih baik daripada turbin angin yang dipakai pada penelitian ini yaitu dengan  $Cp$  11,9 %. Walaupun begitu dilihat dari perbandingan kurva yang didapatkan, turbin angin yang dipakai untuk penelitian ini memiliki bentuk yang lebih lebar. Artinya walaupun  $Cp_{max}$  yang didapat lebih rendah namun turbin ini memiliki persebaran puncak yang menyebar sehingga dapat kemungkinan menangkap energi yang lebih banyak (Burton dkk, 2002).

## Kesimpulan Dan Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan maka dapat dibuat beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. turbin angin yang paling baik dalam penelitian ini adalah turbin angin *savonius* tiga sudu *airfoil* tiga tingkat tanpa *nozzle* dengan nilai  $Cp_{max}$  10 % pada saat *tip speed ratio*,  $\lambda$ , berada pada nilai 0,44 dan kecepatan angin 3,58 m/s
2. Turbin angin *savonius* tiga sudu *airfoil* tiga tingkat tanpa *nozzle* memiliki kinerja yang lebih baik dibanding dengan turbin angin *savonius* tiga sudu *airfoil* tiga tingkat dengan *nozzle*.
3. Penyebab menurunnya kinerja turbin saat dipasang *nozzle* yang terdeteksi pada penelitian ini adalah akibat adanya interferensi angin di dalam *nozzle* yang menyebabkan berkurangnya kecepatan angin saat menumbuk turbin.
4. turbin angin *savonius* tiga sudu *airfoil* tiga tingkat tanpa *nozzle* memiliki kinerja relatif setara ada rentang kecepatan angin 3,58 – 4,06 m/s dan lebih baik daripada beroperasi pada kecepatan angin 3,37 m/s.
5. Daya maksimal yang dihasilkan oleh turbin angin *savonius* tiga sudu *airfoil* tiga tingkat dalam penelitian sebesar 5,26 W pada kecepatan angin 4,06 m/s dan kondisi tanpa *nozzle*.
6. Nilai *cut in speed* turbin angin *savonius* tiga sudu *airfoil* tiga tingkat dengan *nozzle* adalah 1,421 m/s, lebih rendah dari nilai *cut in speed* turbin tanpa *nozzle* yang berada pada nilai 2,845 m/s.
7. Penggunaan *nozzle* dengan desain seperti dalam penelitian ini tidak disarankan untuk aplikasi karena menurunkan kinerja turbin dan menghilangkan kemampuan menangkap angin dari segala arah.

## Daftar Pustaka

- Anonim, 2008, *Press Release :Wind turbines generate more than 1 % of the global electricity*, WWEA (World Wind Energy Association), Bonn
- Arismunandar, W., 2004, *Penggerak Mula turbin*, Penerbit ITB, Bandung
- Boyle G., 2000, *Renewable Energy Power for a Sustainable Future*, Oxford University Press in association with the Open University, Oxford
- Budiarto, R., 2007, *Handout Kuliah Rekayasa energi Angin*, Jurusan Tenik Fisika UGM, Yogyakarta
- Burton T. dkk, 2001, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, LTD, Chichester
- Damanik G., 2007, *Pengaruh Jumlah Sudu terhadap Kinerja Turbin Angin Berporos Horisontal*, Jurusan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Fauzan, M., 2008, *Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Berporos Vertikal*, Skripsi Jurusan Teknik Fisika UGM, Yogyakarta
- Halil, R. R., 2007, *Uji Unjuk Kerja Turbin Angin Sumbu Horizontal 3 Baling-Baling Plat Datar Dengan 2 Rotor Dihubung Seri*, Skripsi, Jurusan Teknik Fisika UGM, Yogyakarta
- Kamal S., 2006, *Proposal Hibah Penelitian*, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Yogyakarta
- Maharani, J., 2007, *Uji Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal 3 Baling-Baling Plat Datar Dengan Variasi Sudut Kemiringan 30° Dan 45°*, Skripsi, Jurusan Teknik Fisika UGM, Yogyakarta
- Manwell, J.F. dkk, 2003, *Wind Energy Explained Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons LTD, Chichester
- Menet J.L., 2004, *A Double-step Savonius Rotor for Local Production of Electricity: a Design Study*, GREEn Universit de Valenciennes, Valenciennes
- Olson R.M., Wright S.J., 1990, *Essentials of Engineering Fluid Mechanics*, Harper & Row Publisher
- Priyanto P. 2008, *Analisis Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Savonius dengan Variasi Bentuk Sudu Plat dan Airfoil*, Jurusan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Purwanto, W.W, 2006, *Indonesia Energy Outlook And Statistic 2006*, Pengkajian Energi Universitas Indonesia, Jakarta

Sihana, 2004, *Buku Ajar: Optimasi Pembangkit Daya Sumber Regeneratif*, Jurusan Teknik Fisika UGM, Yogyakarta.