

# UJI PERFORMANSI TURBIN ANGIN TIPE DARRIEUS- H DENGAN PROFIL SUDU NACA 4415 DAN ANALISA PERBANDINGAN EFISIENSI MENGGUNAKAN VARIASI JUMLAH SUDU DAN SUDUT PITCH

Andinata Sitepu<sup>1</sup>, Farel H Napitupulu<sup>2</sup>, Andianto Pintoro<sup>3</sup>, A. Husein Siregar<sup>4</sup>, Dian M. Nasution<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara

Email: strain\_sitepu@yahoo.co.id

Jl. Almamater Kampus USU Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik  
Universitas Sumatera Utara

## ABSTRAK

Turbin angin Vertikal Axis tipe Darrieus H dapat mengekstrak angin dari segala arah dan dapat digunakan pada kecepatan angin yang relatif rendah yang merupakan pertimbangan untuk melakukan penelitian ini dengan kondisi angin di Indonesia. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah sudu dan pengaruh sudut pitch terhadap daya dan putaran turbin angin tipe Darrieus H. Jumlah sudu yang digunakan pada pengujian ini adalah 3, 4, 5. Jenis airfoil yang digunakan adalah airfoil NACA 4415 dengan panjang chord 30 cm dengan kecepatan angin pada pengujian adalah 3,85 m/s, dan sudut pitch sudu yang diuji mulai dari 0<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup>, 4<sup>o</sup>, 6<sup>o</sup>, 8<sup>o</sup>, 10<sup>o</sup>, 12<sup>o</sup>. Dengan kecepatan angin 3,85 m/s turbin ini dapat diaplikasikan di provinsi Nusa Tenggara Timur kabupaten Sumba Timur di daerah Kamanggih. Langkah langkah yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pembuatan prototype, dan pengujian turbin dengan mengkopel dengan generator listrik tipe aksial dengan jumlah kutub 24 buah. Dari data hasil pengujian turbin angin Darrieus H dengan bentuk sudu airfoil NACA 4415 menghasilkan efisiensi maksimal sebesar 11,37%, 12,19%, 14,69% pada beban bola lampu 10 Watt yaitu dengan jumlah sudu masing masing 3, 4, 5 buah dan efisiensi maksimal ini didapat pada saat sudut pitch sudu turbin diatur sebesar 8<sup>o</sup>. Dengan besar daya turbin maksimal yang dihasilkan turbin dengan jumlah sudu 3 buah sebesar 8, 46 Watt, untuk jumlah sudu 4 buah didapat daya maksimal sebesar 9, 07 Watt, dan pada turbin dengan jumlah sudu 5 buah didapat daya maksimal sebesar 10, 93 Watt.

*Kata kunci : Turbin angin Darrieus H, airfoil NACA 4415, sudut pitch, jumlah sudu*

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Indonesia saat ini menghadapi masalah energi, salah satunya adalah masalah penyediaan energi listrik. Indonesia cenderung masih memanfaatkan bahan bakar fosil seperti batu bara dan gas alam sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik. Namun bahan bakar fosil suatu saat pasti akan habis. Oleh karena itu pemanfaatan energi terbarukan seperti energi angin, air, surya, dan geotermal sangat perlu dikembangkan. Energi yang dihasilkan angin memang tidak sebesar energi air. Namun pemanfaatan energi angin bisa dilakukan dalam skala kecil.

Untuk mendapatkan energi dari angin, manusia membuat sistem konversi energi angin. Sistem konversi energi angin yang digunakan dapat dibagi dalam dua jenis, yaitu sistem konversi energi angin sumbu mendatar dan sistem konversi energi angin sumbu tegak. Pemilihan sistem konversi energi angin yang akan digunakan utamanya didasarkan pada ukuran kecepatan angin yang tersedia di lokasi tempat sistem konversi energi angin tersebut digunakan. Disini penulis memilih sistem konversi energi angin sumbu tegak yaitu turbin angin Darrieus tipe-H untuk dirancang dan diuji. Pemilihan turbin angin Darrieus tipe-H (*gyromill*) pada penelitian ini didasarkan pada pertimbangan bahwa efisiensi turbin angin Darrieus tipe H cukup besar. Hal ini bisa dilihat pada grafik faktor daya untuk berbagai jenis turbin angin. Turbin angin tipe Darrieus H dapat dioperasikan pada kecepatan angin relatif rendah. Hal ini sangat sesuai dengan kondisi kecepatan angin yang ada di Indonesia dimana kecepatan angin masih relatif rendah. Di daerah Indonesia bagian timur tepatnya di provinsi Nusa Tenggara Timur Kabupaten Sumba Timur daerah Kamanggih mempunyai kecepatan angin sebesar 3,85 m/s.(LAPAN,2013)

**1.2. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian tentang turbin angin Darrieus tipe-H ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh jumlah sudu terhadap daya dan putaran yang dihasilkan turbin.
2. Untuk mengetahui pengaruh sudut pitch( $\phi$ ) terhadap daya dan putaran yang dihasilkan turbin.

**2. TINJAUAN PUSTAKA**

**2.1 Potensi Angin**

Energi merupakan suatu kekuatan yang dimiliki oleh suatu zat sehingga zat tersebut mempunyai pengaruh pada keadaan sekitarnya. Menurut mediumnya dikenal banyak jenis energi. Salah satu dari berbagai jenis energi tersebut adalah energi angin. Perpindahan molekul udara memiliki energi kinetik, sehingga secara lokal jumlah molekul udara berpindah melalui luasan selama selang waktu tertentu menentukan besarnya daya.

Pada dasarnya angin terjadi karena ada perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Di daerah katulistiwa, udaranya menjadi panas mengembang dan menjadi ringan, naik ke atas dan bergerak ke daerah yang lebih dingin. Sebaliknya daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun ke bawah. Dengan demikian terjadi suatu perputaran udara berupa perpindahan udara dari kutub utara ke garis katulistiwa menyusuri permukaan bumi dan sebaliknya suatu perpindahan udara dari garis katulistiwa kembali ke kutub utara, melalui lapisan udara yang lebih tinggi. Angin dapat bergerak secara horizontal maupun vertikal dengan kecepatan yang dinamis dan fluktuatif.

Dalam sebuah presentasi yang diadakan sebuah perusahaan yang bernama WhyPgen dan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) pada tanggal 14 Mei 2013, Indonesia adalah salah satu negara yang memiliki potensi untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga angin. Potensi tenaga angin yang tersedia di Indonesia mencapai 9.286 MW akan tetapi sampai saat ini energi angin yang telah digunakan lebih kurang sebesar 2 MW (Wahyudin, 2013).

**2.2 Energi Angin**

Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara disebabkan oleh adanya perbedaan suhu udara akibat terjadinya pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh sinar matahari. Udara yang bergerak ini memiliki kecepatan tertentu, sehingga udara tersebut memiliki energi kinetik.

Daya  $P_0$  yang dikandung oleh angin dengan massa  $m$ , dalam volum silinder yang mempunyai luas  $A$ , dalam waktu  $t$ , dengan kerapatan udara  $\rho$ , dan volume silinder  $V_0$  adalah merupakan energi kinetik ( $E_k$ ) angin dibagi waktu, secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_0 = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2}mu_0^2}{t} \qquad V_0 = A.L$$

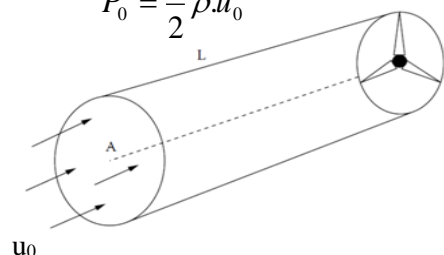
$$m = \rho V_0 = \rho.A.L$$

Substitusi nilai massa  $m$  ke persamaan 2.1. Kecepatan angin,  $u_0 = L/t$ , melalui luasan  $A$  selama waktu  $t$ , sehingga persamaan daya diperoleh

$$P_0 = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2}\rho.A.L.u_0^2}{t} = \frac{1}{2}\rho.A\left(\frac{L}{t}\right)u_0^2 = \frac{1}{2}\rho.A.u_0^3$$

Daya per satuan luas, sebagai potensi daya angin atau kerapatan daya angin (*wind power density*), yaitu :

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho.u_0^3$$



$u_0$

Gambar 2.1 Aliran angin melalui silinder dengan luas A  
(Sumber: Vaughn Nelson)

### 2.3. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin poros vertikal atau yang lebih dikenal dengan vertical axis wind turbine (VAWT) memiliki ciri utama yaitu keberadaan poros tegak lurus terhadap arah aliran angin atau tegak lurus terhadap permukaan tanah. TASV terdiri dari beberapa tipe yang paling umum dijumpai yaitu: Savonius Rotor, Darrieus Rotor, Giromill, dan H-Rotor.

#### a. Turbin angin Darieuss H-Rotor

Bentuk pengembangan lanjut dari turbin angin tipe Darrieus dengan keperluan produksi daya yang kecil. Turbin angin Darrieus memiliki torsi rotor yang relatif rendah tetapi putarannya lebih tinggi dibanding dengan turbin angin Savonius sehingga lebih diutamakan untuk menghasilkan energi



Gambar 2.2 Turbin angin Darieuss H—Rotor

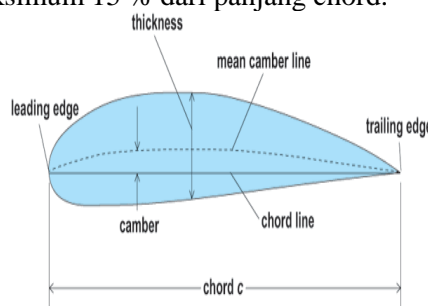
### 2.4 Airfoil NACA

NACA airfoil adalah bentuk airfoil sayap pesawat udara yang dikembangkan oleh *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA). Sampai sekitar Perang Dunia II, airfoil yang banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama periode ini banyak pengujian arifoil dilakukan diberbagai negara, namun hasil riset NACA lah yang paling terkemuka. Bentuk dari airfoil ditentukan oleh seri digit yang sesuai ketentuan NACA airfoil, parameter penomorannya dalam persamaan yang lebih tepat untuk perhitungan potongan melintang airfoil.

#### 2.5 Airfoil NACA seri 4 digit

Pada airfoil NACA seri empat digit, digit pertama menyatakan persen maksimum chamber terhadap chord. Digit kedua menyatakan persepuluh posisi maksimum chamber pada *chord* dari *leading edge*. Sedangkan dua digit terakhir menyatakan persen ketebalan airfoil terhadap *chord*. Contohnya air foil yang digunakan pada penelitian ini adalah airfoil NACA 4415. Airfoil NACA 4415 ini memiliki arti sebagai berikut:

- Maksimum chamber 4 %.
- Posisi maksimum chamber berada 40 % dari panjang chord diukur dari leading edge.
- Dan memiliki ketebalan maksimum 15 % dari panjang chord.



Gambar 2.3 Airfoil Naca 4415

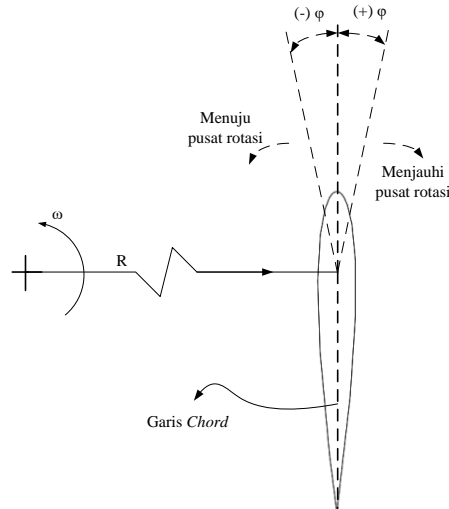
**2.6 Sudut serang (*angle of attack*) dan sudut *pitch***

Sudut serang pada turbin Darrieus-H merupakan sudut antara garis *chord* sudu dengan garis komponen kecepatan relatif. Pada turbin angin Darrieus-H ini, besarnya sudut serang dipengaruhi oleh beberapa hal seperti, *tip speed ratio*, sudut *azimuth* sudu, dan sudut *pitch* sudu. Semakin besar *tip speed ratio* maka sudut serang akan semakin kecil, hal ini dapat dilihat dari persamaan di bawah ini.

$$\alpha = \text{arc tan} [\sin\theta / (\lambda + \cos\theta)]$$

dimana:  $\lambda = \text{tip speed ratio}$

$\theta =$  sudut *azimuth* sudu



Gambar. 2.4 Arah sudut *pitch*  
(Sumber: Ekawira K Napitupulu)

Untuk sudut *pitch*  $\varphi = 0$ , maka nilai sudut serang tidak berubah, tetapi jika sudut *pitch*  $\varphi > 0$ , maka sudut serang akan berubah sesuai dengan besarnya perubahan sudut *pitch*.

$$\alpha = \{ \text{arc tan} [\sin\theta / (\lambda + \cos\theta)] \} - \varphi$$

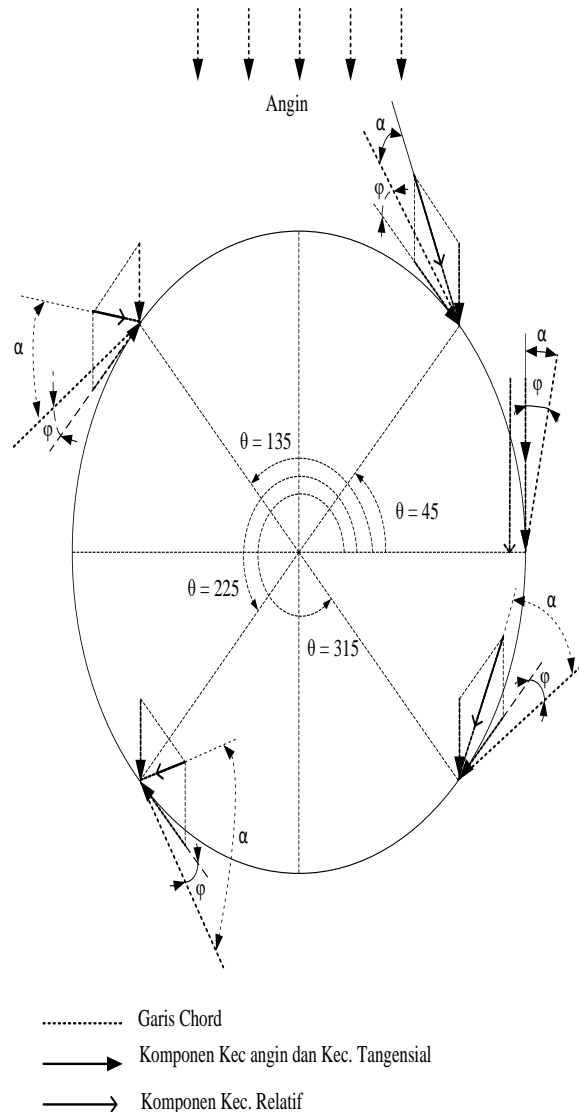
$$\rightarrow 0^\circ > \theta < 180^\circ$$

$$\alpha = \{ \text{arc tan} [\sin\theta / (\lambda + \cos\theta)] \} + \varphi$$

$$\rightarrow 180^\circ > \theta < 360^\circ$$

Pada sudut *azimuth*  $\theta = 0^\circ$  dan  $\theta = 180^\circ$ , nilai sudut serang sama dengan sudut *pitch*.

$$\alpha = \varphi \rightarrow \theta = 0^\circ, \text{ dan } \theta = 180^\circ$$



Gambar. 2.5 Perubahan sudut serang sebagai fungsi *tip speed ratio*, sudut *azimuth*, dan sudut *pitch* (Sumber: Eka wira K Napitupulu)

**2.7 Tip Speed Ratio**

*Tip speed ratio* merupakan rasio kecepatan ujung rotor turbin terhadap kecepatan angin yang melalui rotor. Rasio kecepatan ujung rotor memiliki nilai nominal yang berubah – ubah terhadap perubahan kecepatan angin. Turbin angin tipe *lift* memiliki *tip speed ratio* yang lebih besar dibanding dengan turbin angin tipe *drag*.

*Tip speed ratio*  $\lambda$  dihitung dengan persamaan :

$$\lambda = \frac{v}{u} = \frac{\omega.r}{u} = \frac{2\pi.n.r}{60.u} \quad \text{Dimana :}$$

- n = putaran rotor (rpm)
- r = radius rotor (m)
- u = kecepatan angin (m/s)

**2.8 Generator**

Turbin angin yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik tentu memerlukan generator yang berguna mengubah energi mekanik gerak rotasi rotor menjadi energi listrik. Besar putaran minimal yang diperlukan generator AC untuk dapat menghasilkan energi listrik dan besar putaran kerja bergantung pada jumlah kutub dan kumparan dalam generator.

$$n = \frac{120f}{p}$$

dimana:  $n$  : putaran (rpm)

$p$  : jumlah kutub

$f$  : frekuensi (Hz)

Pada penelitian ini generator yang digunakan adalah *permanent magnet generator* tipe aksial dengan jumlah kutub 24 dan menggunakan magnet Neodyum (NdFeB) grade 38. Ukuran magnet 40mm x 20mm x 10mm.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tempat Penelitian

Proses pembuatan turbin angin tipe darrieus-H dilakukan dengan cara manual (*handmade*). Setelah pembuatan dan assembly objek penelitian selesai, pengujian turbin angin dapat dilakukan. Proses penelitian dilakukan di Laboratorium Proses Produksi dan lantai 4 gedung Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.

#### 3.2 Objek Penelitian dan Alat Penelitian

##### 3.2.1 Objek Penelitian

Adapun objek penelitian yaitu prototype turbin angin tipe Darrieus-H seperti gambar 3.1 .



Gambar 3.1 Prototype Turbin angin tipe Darrieus H dengan profil sudu NACA 4415

##### 3.2.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Digital Multimeter

Digunakan untuk mengukur tegangan dan arus pada rangkaian beban

2. Digital Tachometer

Digunakan untuk mengukur putaran poros pada turbin Darrieus H.

3. Thermo-Anemometer

Alat ini berguna untuk mengukur kecepatan angin dan temperatur lingkungan.

### 4. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

#### 4.1 Hasil Pengujian

##### 4.1.1 Pengukuran kecepatan angin

Pengambilan data kecepatan angin diukur pada zona dimana aliran angin belum terganggu akibat putaran turbin (*free stream zone*). Pada daerah ini angin mengalir dengan kecepatan aliran bebas (*free stream velocity*). Pada pengujian turbin angin ini, pengukuran kecepatan angin dilakukan pada:

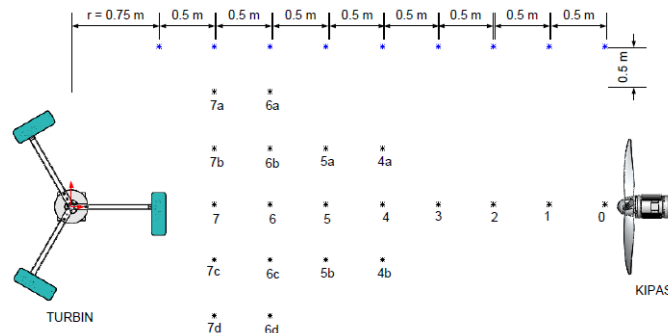
$$x \approx 1.35 r + 0.75$$

dimana:

$x$  = jarak pengukuran dari pusat turbin (m)

$r$  = radius turbin (m)

$$x \approx 1.35(0.75) + 0.75 = 1.76 \text{ m} \approx 1.75 \text{ m}$$



Gambar.4.1 Pengukuran kecepatan angin

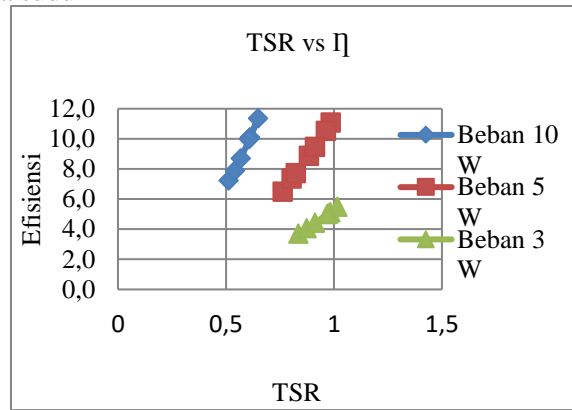
| Titik | V (m/s) |       |       |       |      |
|-------|---------|-------|-------|-------|------|
|       | V1      | V2    | V3    | Vave  |      |
| 0     | 13.02   | 13.15 | 12.83 | 13.00 |      |
| 1     | 9.55    | 9.70  | 9.38  | 9.54  |      |
| 2     | 7.73    | 7.87  | 7.82  | 7.81  |      |
| 3     | 6.67    | 6.48  | 6.46  | 6.54  |      |
| 4     | 5.23    | 4.97  | 5.13  | 5.11  |      |
| 4.a   | 4.42    | 4.57  | 4.64  | 4.54  | 4.70 |
| 4.b   | 4.37    | 4.51  | 4.48  | 4.45  |      |
| 5     | 4.85    | 4.57  | 4.45  | 4.62  |      |
| 5.a   | 4.35    | 4.40  | 4.38  | 4.38  | 4.41 |
| 5.b   | 4.41    | 4.12  | 4.15  | 4.23  |      |
| 6     | 4.38    | 4.32  | 4.45  | 4.38  |      |
| 6.a   | 3.55    | 3.46  | 3.56  | 3.52  |      |
| 6.b   | 3.83    | 3.88  | 3.92  | 3.88  | 3.85 |
| 6.c   | 3.90    | 3.87  | 3.85  | 3.87  |      |
| 6.d   | 3.52    | 3.58  | 3.61  | 3.57  |      |
| 7     | 2.35    | 2.41  | 2.36  | 2.37  |      |
| 7.a   | 1.95    | 2.02  | 1.97  | 1.98  |      |
| 7.b   | 2.21    | 2.16  | 2.13  | 2.17  | 2.12 |

|     |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|
| 7.c | 2.15 | 2.10 | 2.13 | 2.13 |
| 7.d | 1.98 | 1.90 | 2.05 | 1.98 |

Tabel.4.1 Data kecepatan angin pada berbagai titik

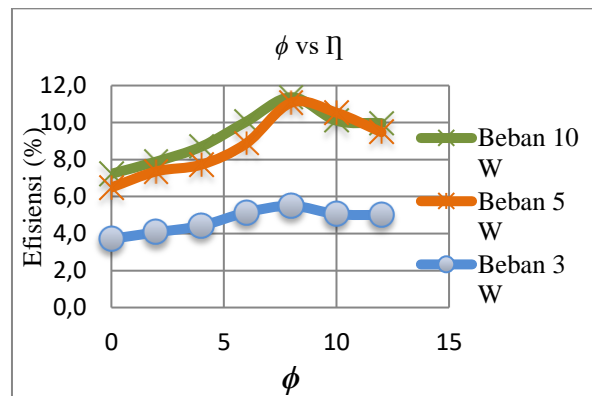
Data kecepatan yang diambil adalah data kecepatan angin rata-rata pada titik 6, 6a, 6b, 6c, 6d, yaitu sebesar 3,85 m/s.

4.1.2 Grafik pengujian tiga sudu



Gambar 4.2 Grafik TSR Vs η

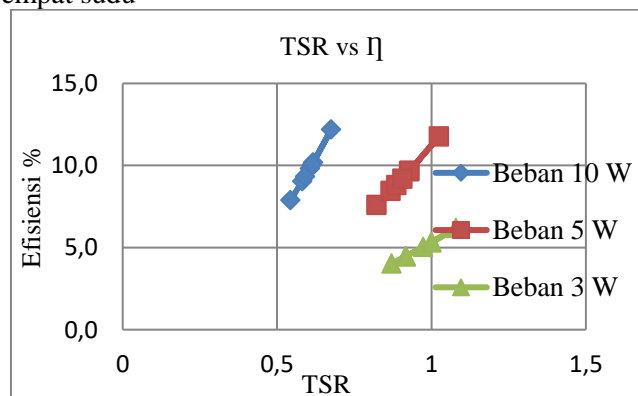
Pada pengujian tiga sudu efisiensi maksimum terjadi pada pembebanan 10 W yaitu sebesar 11,37 % dan tsr 0,65.



Gambar 4.3 Grafik φ Vs η

Efisiensi maksimum terjadi pada sudut pitch 8°.Efisiensi yang didapat sebesar 11,37 %

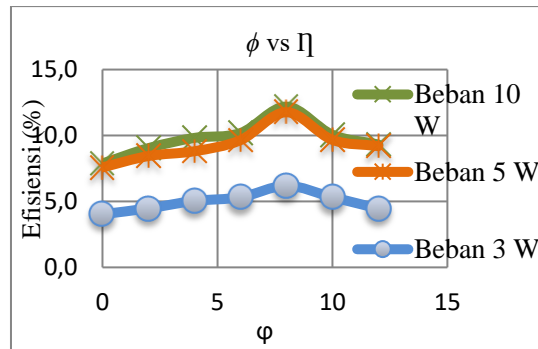
4.1.2 Grafik pengujian empat sudu



Gambar 4.4 Grafik TSR Vs η

Pada pengujian tiga sudu efisiensi maksimum terjadi pada pembebanan 10 W yaitu sebesar 12,19 % dan tsr 0,68.

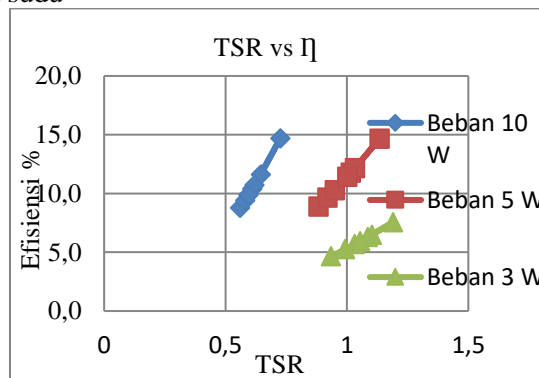




Gambar 4.5 Grafik  $\phi$  Vs  $\eta$

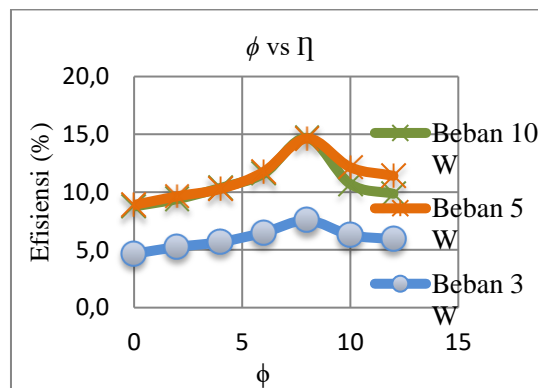
Efisiensi maksimum terjadi pada sudut pitch  $8^\circ$ . Efisiensi yang didapat sebesar 12,19%.

4.1.3 Grafik pengujian lima sudu



Gambar 4.6 Grafik TSR Vs  $\eta$

Pada pengujian tiga sudu efisiensi maksimum terjadi pada pembebanan 10 W yaitu sebesar 14,69 % dan tsr 0,73.



Gambar 4.7 Grafik  $\phi$  Vs  $\eta$

Efisiensi maksimum terjadi pada sudut pitch  $8^\circ$ . Efisiensi yang didapat sebesar 14,69 %.

4.2 Analisa Data

4.2.1 Perhitungan daya angin ( $P_{\text{angin}}$ )

Kondisi angin pada saat dilakukan pengujian yaitu pada temperatur  $32^\circ\text{C}$ . Sehingga massa jenis udara dapat dihitung, yaitu:

$$T = 32^\circ\text{C} = 305 \text{ K} \quad \rightarrow \quad \rho_{\text{udara}} = 1.1594 \text{ kg/m}^3$$

| T (K) | P (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------|------------------------|
| 300   | 1.1774                 |
| 305   | 1.1594                 |
| 350   | 0.998                  |

Kecepatan angin pada saat pengujian adalah 3.85 m/s, sehingga daya angin yang melewati luas rotor turbin menjadi:

$$\begin{aligned} D_{\text{turbin}} &= 1.5 \text{ m} \\ H_{\text{turbin}} &= 1.5 \text{ m} \\ A &= D_{\text{turbin}} \times H_{\text{turbin}} \\ &= 1.5 \times 1.5 \\ &= 2.25 \text{ m}^2 \\ P_{\text{angin}} &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \\ &= 0.5 \cdot 1.1594 \cdot (2.25)(3.85)^3 \\ &= 74.43 \text{ Watt} \end{aligned}$$

#### 4.2.2 Perhitungan tip speed ratio ( $\lambda$ )

Tip speed ratio (TSR,  $\lambda$ ) merupakan rasio kecepatan ujung rotor turbin dengan kecepatan angin yang melalui sudu rotor tersebut. TSR merupakan bilangan tanpa dimensi menunjukkan besarnya putaran turbin terhadap kecepatan angin.

$$\lambda = \omega \cdot r / v_{\infty} \quad \rightarrow \quad \omega = 2\pi n / 60$$

Sebagai contoh perhitungan, diambil data 5 sudu pembebanan 3 Watt pada sudut *pitch* 8°.

$$\begin{aligned} n &= 60.63 \text{ rpm} \\ \omega &= 2\pi (60.63) / 60 \\ &= 6.345 \text{ rad/s} \\ \lambda &= (6.345 \times 0.75) / 3.85 \\ &= 1.236 \end{aligned}$$

#### 4.2.3 Perhitungan efisiensi turbin ( $\eta_t$ )

Efisiensi merupakan perbandingan daya angin yang mampu diekstrak sudu turbin yang diukur dari besarnya energi listrik yang dihasilkan generator dengan daya angin teoritis. Efisiensi turbin merupakan keefektifan rotor turbin dalam memanfaatkan energi kinetik angin.

$$\text{Daya turbin } (P_{\text{turbin}}) = (V \cdot I) / \eta_g$$

$$\eta_g = 0.7$$

$$\text{Efisiensi turbin } (\eta_t) = P_{\text{turbin}} / P_{\text{angin}}$$

Sebagai contoh perhitungan diambil data 5 sudu pembebanan 3 Watt pada sudut *pitch* 8°.

$$\begin{aligned} V_{\text{ave}} &= 23.06 \text{ Volt} \\ I_{\text{ave}} &= 0.171 \text{ Ampere} \\ P_{\text{turbin}} &= (23.06 \times 0.171) / 0.7 \\ &= 5.633 \text{ Watt} \\ \eta_t &= (5.633 / 74.43) \times 100 \% \\ &= 7.568 \% \end{aligned}$$

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian turbin angin Darrieus H yang telah dilaksanakan, penulis membuat kesimpulan yaitu:

1. Turbin angin dengan jumlah sudu 5 buah lebih efisien mengekstrak energi angin dari pada turbin angin dengan jumlah sudu 4 buah dan 3 buah. Efisiensi maksimum untuk tiap jumlah sudu yaitu:

- 3 sudu,  $\eta_{\text{max}} = 11,37 \%$
- 4 sudu,  $\eta_{\text{max}} = 12,19 \%$
- 5 sudu,  $\eta_{\text{max}} = 14,69 \%$

Dengan penurunan putaran turbin dari tanpa beban dan setelah dibebani dengan beban 10 W @  $\eta_{\text{max}}$ :

- 3 sudu, dari  $n_{\text{ave}} = 81.08 \text{ rpm} \rightarrow n_{\text{ave}} = 33.09 \text{ rpm}$  (turun 59.18%)
  - 4 sudu, dari  $n_{\text{ave}} = 84.95 \text{ rpm} \rightarrow n_{\text{ave}} = 34.41 \text{ rpm}$  (turun 50.54%)
  - 5 sudu, dari  $n_{\text{ave}} = 89.51 \text{ rpm} \rightarrow n_{\text{ave}} = 36.96 \text{ rpm}$  (turun 58.70%)
2. Turbin angin dengan profil sudu NACA 4415 lebih efektif mengekstrak energi angin pada sudut serang lokal (*local angle of attack*) yang relatif rendah, hal ini disebabkan oleh

berubahnya nilai sudut *serang* sebagai fungsi dari sudut azimuth ( $\theta$ ). Efisiensi maksimum untuk jumlah sudu 3, 4 dan 5 buah adalah pada sudut *pitch* ( $\Phi$ ) =  $8^\circ$

## 5.2 Saran

Saat proses penelitian berlangsung, penulis mengalami banyak kendala pada saat proses produksi dan kekurangan alat pada saat pengujian. Untuk memaksimalkan hal itu, penulis memberikan saran untuk penelitian dikemudian hari semakin lebih baik dan ilmiah. Adapun saran penulis:

1. Efisiensi turbin yang didapat pada penelitian ini masih rendah yaitu sebesar 14,69%. Pada literatur efisiensi turbin ini antara 25%-40%. Pada penelitian selanjutnya untuk meningkatkan efisiensi tersebut, pemilihan material sudu supaya menggunakan material yang lebih ringan.
2. Pembuatan sudu turbin sebaiknya dilakukan lebih rapi dan akurat supaya aliran udara melalui turbin lebih baik.
3. Nilai *tip speed ratio* (tsr) pada penelitian ini 0,73. Pada penelitian selanjutnya supaya mendesain turbin dengan nilai tsr antara 5-6 sesuai dengan yang terdapat pada literatur Turbin angin Darrieus, supaya efisiensi turbin semakin meningkat.

## DARTAR PUSTAKA

- [1]. Daryanto, Y. 2007. *Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: Balai PPTAAG
- [2]. DESDM. 2005. *Blueprint Pengelolaan Energi Nasional (PEN) 2005 - 2025*. Jakarta
- [3]. Hau, Eric. 2006. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics*. Edisi 2. Springer: Berlin, Germany
- [4]. KESDM. 2010. *Indonesia Energy Outlook 2010*. Jakarta
- [5]. Matthew, Sathyajith. 2006. *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer: Berlin, Germany
- [6]. Paraschivoiu, Ion. 2002. *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Presses Internationales Polytechnique. Montreal, Canada
- [7]. Tong, Wei. 2010. *Wind Power Generation And Wind Turbine Design*. Southampton: WIT Press
- [8]. <http://www.bmkg.go.id>
- [9]. <http://www.lapan.go.id>
- [10]. <http://www.bps.sumut.go.id>
- [11]. [http://www.google.com/jenis\\_jenis\\_turbin\\_angin/](http://www.google.com/jenis_jenis_turbin_angin/)
- [12]. <http://www.wintufel.net>
- [13]. <http://www.wikipedia.org>
- [14]. <http://nugrohoadi.wordpress.com/2008/05/03/pembangkit-listrik-tenaga-angin-di-indonesia/>
- [15]. <http://indonesia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>