

# Karakterisasi Turbin Angin Poros Horizontal Dengan Variasi Bingkai Sudu Flat Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin

**Bono, Gatot Suwoto, Margana, Sunarwo**

*Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang*

*Jl. Prof. H. Sudarto, S.H., Tembalang, Kotak Pos 6199 SMS, Semarang 50329  
Telp. 7473417, 7466420 (Hunting), Fax.7472396, E-mail : onobono61@yahoo.co.id*

## **Abstrak**

*Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan turbin Angin dengan harga jumlah bingkai sudu optimum. Metode penelitian diawali dengan membuat roda jalan (runner turbin), dengan jumlah bingkai sudu sebanyak 2, 3, 4, 5, dan 6 buah, dengan sudut sudu  $15^{\circ}$ . Sudu dibuat dari bahan plat baja dengan model 4 buah sudu di bingkai menjadi satu. Pengujian yang dilakukan meliputi uji karakteristik turbin, dimana jumlah bingkai sudu divariasikan mulai dari 2, 3, 4, 5, dan 6 buah bingkai, sedangkan kecepatan angin dibuat bervariasi. Hasil uji berupa grafik karakteristik turbin untuk masing-masing jumlah bingkai sudu. Parameter yang diukur dalam pengujian adalah kecepatan angin, putaran turbin dan torsi poros turbin, serta beban turbin. Parameter yang ditentukan dan merupakan variabel dalam penelitian ini adalah jumlah bingkai sudu, yaitu 2, 3, 4, 5, dan 6 buah, dan kecepatan angin. Beban turbin divariasikan dan setiap variasi dilakukan pencatatan terhadap parameter-parameter diatas. Pengujian dilakukan pada kondisi kecepatan angin tertentu, pada sudut sudu  $15^{\circ}$  dengan 2 buah bingkai sudu, pada kondisi tersebut beban turbin divariasikan, pada setiap variasi beban dilakukan pencatatan terhadap parameter uji di atas. Selanjutnya dilakukan hal yang sama untuk kecepatan angin yang berbeda untuk jumlah sudu tetap. Selanjutnya dilakukan pengujian dengan tahapan yang sama untuk 3, 4, 5, dan 6 bingkai sudu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya mekanik tertinggi yang mampu dibangkitkan adalah sebesar 30,19 watt, dengan putaran 207,9 rpm, pada kecepatan angin sebesar 7 m/s, terjadi pada turbin dengan 6 bingkai sudu, sedangkan Efisiensi tertinggi sebesar 40,83 %, terjadi pada turbin dengan 4 bingkai sudu dengan putaran poros 170 rpm, dan pada kecepatan angin 4 m/s.*

*Kata kunci : Turbin angin, variasi bingkai sudu, sudut sudu*

## **1. Pendahuluan**

### **1.1. Latar Belakang Masalah**

Angin merupakan salah satu energi terbarukan yang ada di dunia ini. Angin juga dapat diperoleh dengan gratis tanpa menggunakan biaya sedikitpun. Selain itu, angin juga, mudah didapat, murah, bersih dan aman digunakan. Lebih dari itu angin juga tidak menimbulkan polusi sama sekali jika dibandingkan dengan uap yang diproduksi dengan menggunakan bahan bakar fosil, serta nuklir yang menghasilkan sampah nuklir

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB) mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Angin cukup sederhana, yaitu energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator dibagian belakang turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi Listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan.

Indonesia, negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis

pantai terpanjang di dunia yaitu  $\pm 80.791,42$  Km merupakan wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin. Pada akhir tahun 2007 telah dibangun kincir angin pembangkit dengan kapasitas kurang dari 800 watt, dibangun di empat lokasi, masing-masing di Pulau Selayar tiga unit, Sulawesi Utara dua unit, dan Nusa Penida, Bali, serta Bangka Belitung, masing-masing satu unit. Kemudian, di seluruh Indonesia, lima unit kincir angin pembangkit berkapasitas masing-masing 80 kilowatt (kW) mulai dibangun. ([www.kurniadinews.com](http://www.kurniadinews.com))

Implementasi nyata PLTB di Indonesia pada tahun 2009 mencapai 1,4 MW (WWEA 2010) yang tersebar di Pulau Selayar (Sulawesi Utara), Nusa Penida (Bali), Yogyakarta, dan Bangka Belitung. Mengacu pada kebijakan energi nasional, maka PLTB ditargetkan mencapai 250 MW pada tahun 2025. ([www.getsttpln.com/2014/03/](http://www.getsttpln.com/2014/03/))

Kebutuhan akan energi listrik dan upaya-upaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar minyak (BBM), baik bagi masyarakat maupun bagi pemerintah, sudah sangat mendesak. Makin

lama keadaan ini berlangsung, maka keadaannya akan semakin parah. Tidak hanya rakyat yang menderita, tetapi pemerintahpun sudah sangat terbebani.

Dalam rangka mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil dan menuju kemandirian energi secara nasional, salah satu pendekatan yang dilakukan pemerintah adalah dengan meluncurkan program Desa Mandiri Energi. Desa Mandiri Energi merupakan konsep baru yang sedang dikembangkan di Indonesia. Pengembangan desa mandiri energi berdasar pada usaha menuju swasembada energi dalam arti mencukupi kebutuhan energi di desa itu, tanpa harus mengimpor sumber energi dari luar. Konsep kemandirian energi ini berpijak pada pemanfaatan energi terbarukan dan pemberdayaan masyarakat.

Salah satu bentuk sumber energi alternatif yang terbarukan dan tersedia di lingkungan pedesaan. adalah *angin atau bayu*. Sumber energi angin dapat dimanfaatkan dengan cara mengubah energi angin ke dalam bentuk energi listrik melalui teknologi sistem pembangkit listrik tenaga angin yang terdiri dari komponen utama yaitu turbin angin alternator, inverter, dan instalasinya.

Pada umumnya kecepatan angin yang dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin dibatasi dengan syarat-syarat tertentu. Sedangkan syarat – syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik tersebut dapat dilihat pada tabel 1 berikut. Angin kelas 3 adalah batas minimum dan angin kelas 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Tabel 1 . Kondisi angin.

| Kondisi angin |                         |                          |                            |
|---------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Kelas angin   | Kecepatan angin (m/dtk) | Kecepatan angin (km/jam) | Kecepatan angin (knot/jam) |
| 1             | 0,3 – 1,5               | 1 – 5,4                  | 0,58 – 2,92                |
| 2             | 1,6 – 3,3               | 5,5 – 11,9               | 3,11 – 6,42                |
| <b>3</b>      | <b>3,4 – 5,4</b>        | <b>12,0 – 19,5</b>       | <b>6,61 – 10,5</b>         |
| 4             | 5,5 – 7,9               | 19,6 – 28,5              | 10,7 – 15,4                |
| 5             | 8,0 – 10,7              | 28,6 – 38,5              | 15,6 – 20,8                |
| 6             | 10,8 – 13,8             | 38,6 – 49,7              | 21 – 26,8                  |
| 7             | 13,9 – 17,1             | 49,8 – 61,5              | 27 – 33,3                  |
| <b>8</b>      | <b>17,2 – 20,7</b>      | <b>61,6 – 74,5</b>       | <b>33,5 – 40,3</b>         |
| 9             | 20,8 – 24,4             | 74,6 – 87,9              | 40,5 – 47,5                |
| 10            | 24,5 – 28,4             | 88,0 – 102,3             | 47,7 – 55,3                |
| 11            | 28,5 – 32,6             | 102,4 – 117,0            | 55,4 – 63,4                |
| 12            | > 32,6                  | > 118                    | 63,4                       |

Sumber : <http://www.getstpln.com/2014/03/karakteristik-angin-3090.html>

Dengan melihat potensi angin seperti pada tabel 1, maka pantaslah apabila angin dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit energi listrik yaitu dengan mengubah kecepatan angin menjadi energi mekanik oleh sudu-sudu turbin, kemudian dari poros

turbin akan memutar alternator yang akan menghasilkan energi listrik.

## 1.2. Perumusan Masalah

Isu-isu krisis energi dewasa ini, menuntut masyarakat untuk menggali potensi energi alternatif di Indonesia, seperti tenaga angin. Kendala yang dihadapi masyarakat untuk memanfaatkan potensi energi angin adalah teknologi pembuatan turbin angin yang kurang dipahami oleh masyarakat. Sementara pengetahuan masyarakat tentang teknologi turbin angin masih sangat rendah. Oleh karenanya untuk memenuhi kebutuhan energi listrik masyarakat tersebut, salah satunya adalah perlu adanya turbin angin yang cara pembuatan dan perawatannya mudah, serta mempunyai efisiensi yang baik.

## 1.3. Tujuan penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah menghasilkan turbin angin sudu flat berbingkai dengan jumlah sudu dan sudut sudu yang terbaik, serta mendapatkan karakteristik dari turbin angin sudu flat berbingkai tersebut.

## 1.4. Landasan Teori

Sudu turbin di buat dari plat Galvanis. Sudu turbin berfungsi mengubah energi angin menjadi energi mekanik berupa putaran sudu turbin. Sudu yang digunakan merupakan jenis *upwind*, dimana sudu berhadapan dengan arah angin. Sudu didesain tidak fleksibel dan diperlukan mekanisme yaw (ekor turbin) untuk menjaga sudu agar tetap berhadapan dengan arah angin.

Besarnya daya kinetis udara yang mengalir dengan laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) yang mengalir melalui suatu penampang dengan luasan (A) dengan kecepatan (V), dapat ditentukan dengan persamaan : diperoleh dengan rumus (Leysen, 1983), Sehingga besarnya daya kinetis dapat dihitung:

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V^2$$

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot V^2$$

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

dimana :  $\rho$  adalah massa jenis udara, ( $\text{kg/m}^3$ ), A adalah luas sapuan rotor turbin, ( $\text{m}^2$ ), V adalah kecepatan angin, (m/s),  $P_k$  adalah daya kinetik, (watt)

Besar daya mekanik turbin angin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

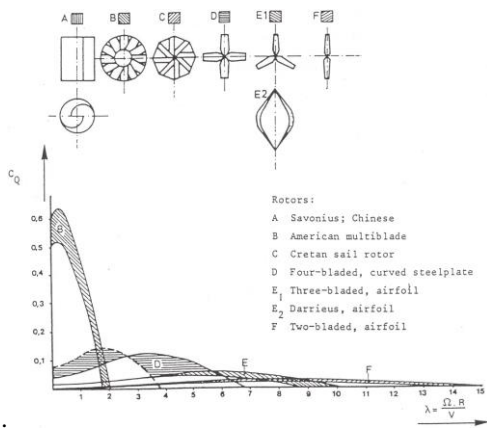
$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot T}{60}$$

dimana T adalah Torsi, (Nm), n adalah kecepatan putaran rotor, (rpm),  $P_m$  adalah daya mekanik, (watt)

Efisiensi turbin angin ditunjukkan dalam kurva *coefisien of power* ( $C_p$ ), yang dapat dihitung dengan persamaan

$$C_p = \frac{\text{Daya output}}{\text{Daya input}} \times 100\%$$

Pada umumnya turbin angin yang mempunyai jumlah sudu banyak (soliditas tinggi) akan mempunyai torsi yang besar. Turbin angin jenis ini banyak digunakan untuk keperluan mekanikal seperti pemompaan air, pengolahan hasil pertanian dan aerasi tambak. Sedangkan turbin angin dengan jumlah sudu sedikit, misalnya dua atau tiga, digunakan untuk keperluan pembangkitan listrik. Turbin angin jenis ini mempunyai torsi rendah tetapi putaran rotor yang tinggi. Gambar 1 memperlihatkan korelasi antara efisiensi ( $\lambda$ ,  $TSR=Tip\ Speed\ Ratio$ ) dengan torsi ( $C_Q$ ). Gambar ini menjelaskan bahwa rotor dengan jumlah sudu banyak akan mempunyai torsi yang besar tetapi efisiensi tidak terlalu tinggi atau sebaliknya. (Daryanto, 2007)



Gambar 1 Torsi rotor untuk berbagai jenis turbin angin

Jika dikaitkan dengan sumber daya angin, turbin angin dengan jumlah sudu banyak lebih cocok digunakan pada daerah dengan potensi energi angin yang rendah karena *rated wind speed*-nya tercapai pada putaran rotor dan kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi. Sedangkan turbin angin dengan sudu sedikit (untuk pembangkitan listrik) tidak akan beroperasi secara efisien pada daerah dengan kecepatan angin rata-rata kurang dari 4 m/s.

Dengan demikian daerah-daerah dengan potensi energi angin rendah, yaitu kecepatan angin rata-rata kurang dari 4 m/s, lebih cocok untuk dikembangkan turbin angin keperluan mekanikal. Jenis turbin angin yang cocok untuk keperluan ini antara lain *american tipe multi blade*, *cretan sail* dan *savonius*. (Daryanto, 2007)

**Tip Speed Ratio ( $TSR=\lambda$ )** adalah perbandingan antara kecepatan putar ujung sudu dengan kecepatan aliran udara bebas. Ini adalah sudut serang optimum yang menghasilkan perbandingan gaya angkat dengan gaya dorong yang tinggi. Karena sudut serang tergantung pada kecepatan angin, yang besarnya dapat ditentukan dengan persamaan :

$$TSR = \lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

Sedangkan

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

sedangkan hubungan antara Tip Speed ratio ( $\lambda$ ) dengan jumlah sudu dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 23 Hubungan  $\lambda$  dengan jumlah blade

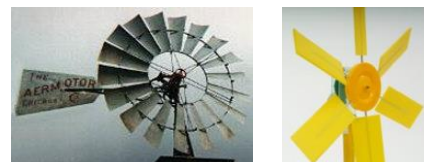
| $\lambda_d$ | B      |
|-------------|--------|
| 1           | 6 – 20 |
| 2           | 4 – 12 |
| 3           | 3 – 6  |
| 4           | 2 – 4  |
| 5 – 8       | 2 – 3  |
| 8 – 15      | 1 – 2  |

(E.H Leysen, 1983:66)

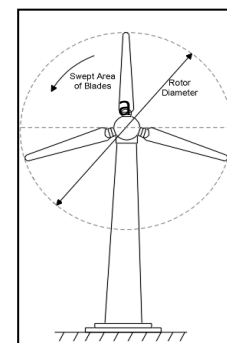
**Soliditas** adalah perbandingan antara jumlah sudu dengan luas sapuan total, beberapa contoh turbin dengan soliditas rendah maupun soliditas tinggi dapat dilihat pada gambar 2



(a). Low solidity (0.10) = high speed, low torque



(b). High solidity (>0.80) = low speed, high torque



$$\text{Solidity} = 3a/A$$

(c) Harga soliditas

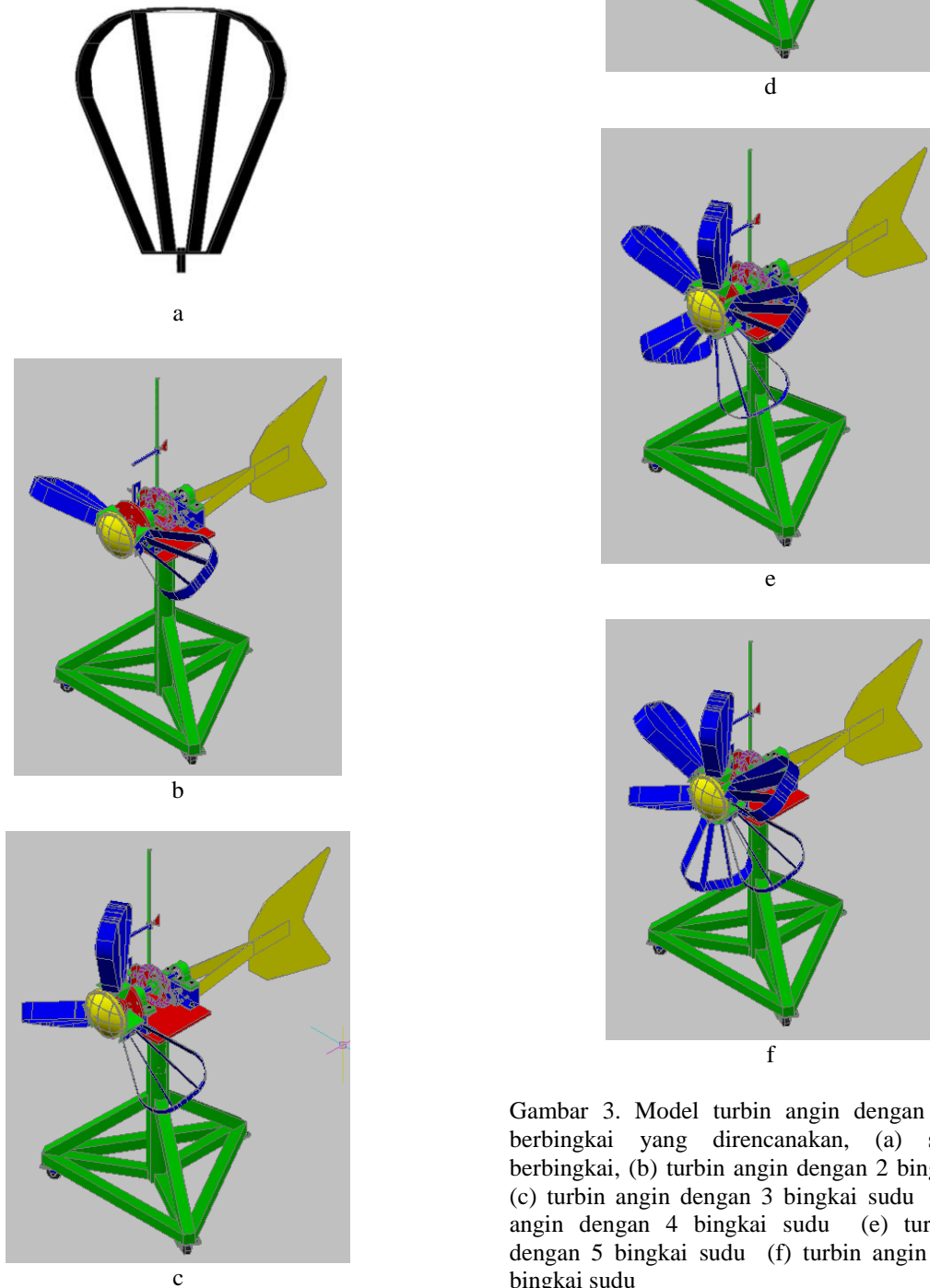
Gambar 2. Soliditas turbin angin

## 2. Metode Penelitian

Desain runner turbin dibuat dengan variasi bingkai sudu, yaitu 2, 3, 4, 5, dan 6 buah bingkai sudu, dengan masing-masing bingkai terdiri atas 4

sudu flat, dengan Sudut sudu dibuat  $15^{\circ}$ , serta sudu dibuat dari bahan plat baja yang di bingkai. Bingkai sudu dipasangkan pada piringan putar dengan cara dibaut, serta piringan putar dan sudu dapat dibongkar-pasang pada instalasi pengujian, seperti terlihat pada Gambar 3.

Instalasi pengujian terdiri dari komponen utama blower, turbin angin, Generator listrik atau dinamometer/beban turbin, yang dilengkapi alat ukur pengujian meliputi anemometer, tachometer, termometer, dan neraca pegas



Gambar 3. Model turbin angin dengan sudu flat berbingkai yang direncanakan, (a) sudu flat berbingkai, (b) turbin angin dengan 2 bingkai sudu. (c) turbin angin dengan 3 bingkai sudu (d) turbin angin dengan 4 bingkai sudu (e) turbin angin dengan 5 bingkai sudu (f) turbin angin dengan 6 bingkai sudu

Pengujian yang dilakukan meliputi uji karakteristik turbin, dengan kecepatan angin bervariasi, pada sudut sudu dari  $15^{\circ}$ , serta jumlah bingkai sudu bervariasi mulai dari 2, 3, 4, 5, dan 6 buah. Hasil uji berupa grafik karakteristik turbin untuk masing-masing jumlah bingkai sudu.

Parameter yang diukur dalam pengujian adalah kecepatan angin, putaran dan torsi poros turbin. Parameter yang ditentukan dan merupakan variabel dalam penelitian ini adalah kecepatan angin dan jumlah bingkai sudu. Beban pada pronny break divariasikan dan setiap variasi dilakukan pencatatan terhadap parameter-parameter diatas.

Data hasil pengujian diolah untuk mendapatkan debit aliran udara, daya kinetik udara, daya poros, dan efisiensi turbin. Hasil pengolahan kemudian direpresentasikan dalam bentuk grafik karakteristik turbin. Analisis akan menghasilkan kesimpulan pada turbin dengan jumlah bingkai sudu tertentu yang mempunyai unjuk kerja terbaik.

### 3. Hasil Dan Pembahasan

Piringan putar (*runner*) turbin angin yang dibahas dalam artikel ini adalah turbin angin dengan 2, 3, 4, 5, dan 6 bingkai sudu, dimana masing-masing bingkai sudu terdapat 4 bilah sudu, dengan tinggi sudu 30 cm. Diameter piringan putar terkecil 20 cm, diameter piringan putar terbesar 80 cm.

Grafik hubungan antara daya mekanik, efisiensi terhadap putaran turbin pada berbagai jumlah bingkai sudu dan pada berbagai kecepatan angin, dapat dilihat seperti pada gambar 4 sampai dengan gambar 18, berikut.

#### 3.1 Grafik Hubungan Putaran Turbin dan Daya Mekanik pada berbagai kecepatan angin dan berbagai jumlah bingkai sudu

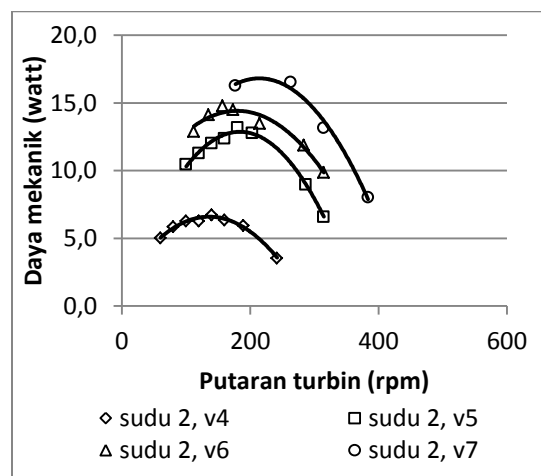
Dari hasil pengujian dapat digambarkan grafik hubungan putaran poros dan daya mekanik pada berbagai jumlah bingkai sudu untuk masing-masing kecepatan angin seperti terlihat pada gambar .4 sampai dengan gambar 12.

Dari gambar tersebut di atas terlihat bahwa daya mekanik semakin bertambah besar seiring dengan bertambahnya kecepatan turbin, sampai pada putaran tertentu daya mekanik akan mencapai maksimum, selanjutnya daya mekanik akan semakin berkurang meskipun putaran turbin terus bertambah besar.

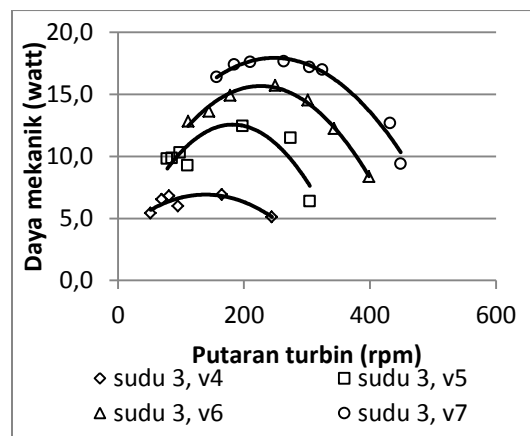
Dari gambar 4 sampai dengan 12, terlihat bahwa daya mekanik terbesar yang dapat dihasilkan turbin terjadi pada kecepatan angin 7 m/s. Hal ini sesuai dengan persamaan perhitungan daya mekanik, yaitu bahwa besarnya daya mekanik berbanding lurus dengan kecepatan putar turbin dan torsiya.

Pada Gambar 4, turbin dengan 2 bingkai sudu, daya mekanik maksimum yang dihasilkan sebesar 17,29 watt, terjadi pada putaran 221,17 rpm,

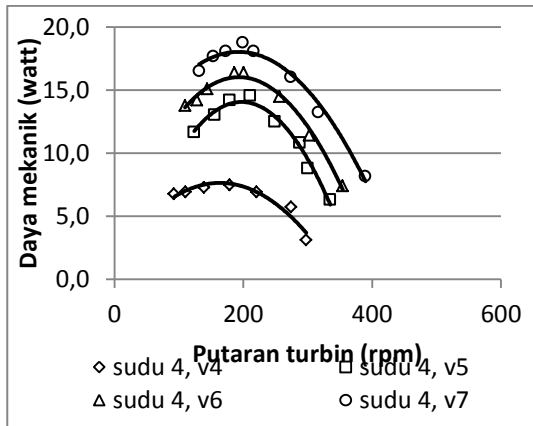
pada kecepatan angin 7 m/s, pada Gambar 5, untuk turbin dengan 3 bingkai sudu, daya mekanik maksimum sebesar 17,24 watt terjadi pada putaran 232,75 rpm, pada kecepatan angin 7 m/s, Gambar 6, untuk turbin dengan 4 bingkai sudu, daya mekanik maksimum yang dihasilkan sebesar 16,88 watt, terjadi pada putaran 169,83 rpm, pada kecepatan angin 7 m/s, Gambar 7, untuk turbin dengan 5 bingkai sudu, daya mekanik maksimum sebesar 24,39 watt, terjadi pada putaran 239,75 rpm, pada kecepatan angin 7 m/s, Gambar 8 untuk turbin dengan 6 bingkai sudu, daya mekanik maksimum sebesar 30,19 watt, terjadi pada putaran 207,94 rpm, pada kecepatan angin 7 m/s



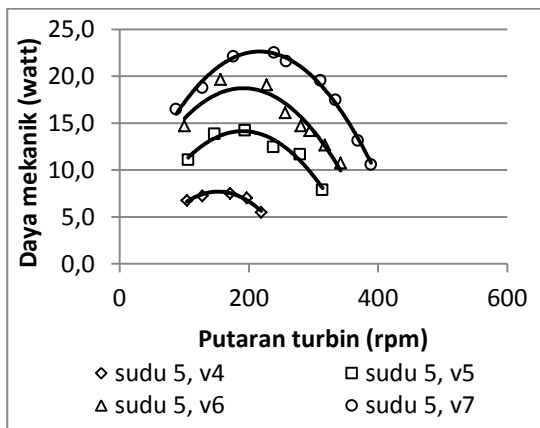
Gambar 4. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk 2 bingkai sudu, pada berbagai kecepatan angin



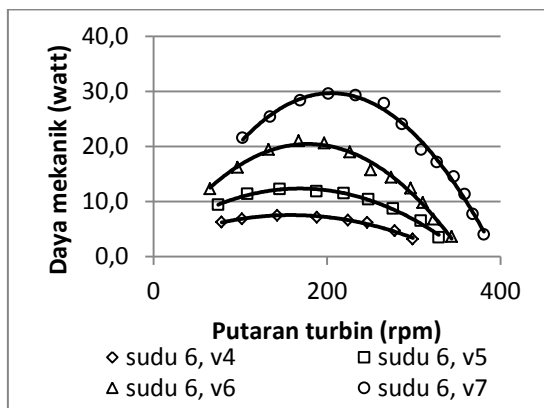
Gambar 5. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk 3 bingkai sudu, pada berbagai kecepatan angin



Gambar 6. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk 4 bingkai sudu, pada berbagai kecepatan angin



Gambar 7. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk 5 bingkai sudu, pada berbagai kecepatan angin



Gambar 8. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk 6 bingkai sudu pada berbagai kecepatan angin,

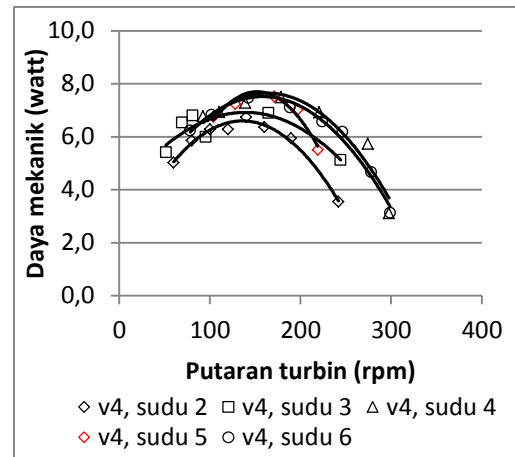
Sedangkan dari gambar 9 untuk turbin dengan kecepatan angin 4 m/s, pada berbagai berbagai jumlah bingkai sudu, daya mekanik maksimum sebesar 8,26 watt, pada putaran 180,5 rpm, terjadi pada turbin dengan 4 bingkai sudu.

Pada gambar 10 untuk turbin dengan kecepatan angin 5 m/s, pada berbagai berbagai jumlah bingkai sudu, daya mekanik maksimum sebesar 15,33 watt, pada putaran 212,13 rpm, terjadi pada turbin dengan 4 bingkai sudu.

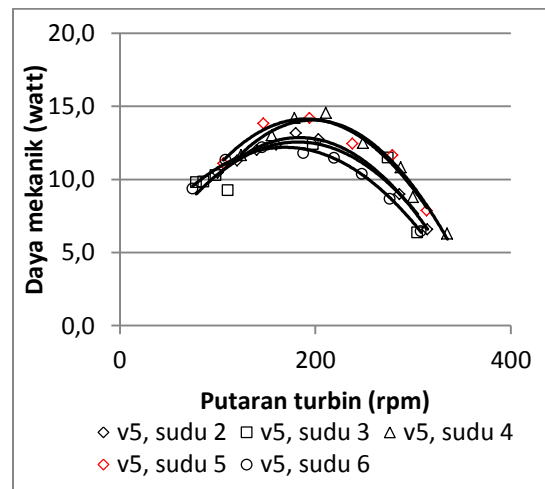
Pada gambar 11 untuk turbin dengan kecepatan angin 6 m/s, pada berbagai berbagai jumlah bingkai sudu, daya mekanik maksimum sebesar 21,24 watt, pada putaran 185 rpm, terjadi pada turbin dengan 6 bingkai sudu.

Pada gambar 12 untuk turbin dengan kecepatan angin 7 m/s, pada berbagai berbagai jumlah bingkai sudu, daya mekanik maksimum sebesar 30,19 watt, pada putaran 207,94 rpm, terjadi pada turbin dengan 6 bingkai sudu.

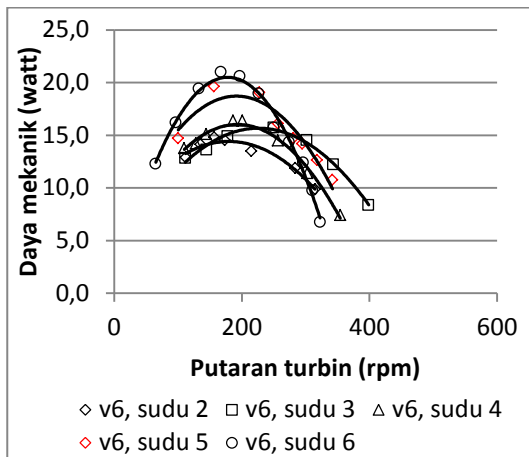
Dari gambar 4 sampai dengan gambar 12, terlihat bahwa daya mekanik terbesar yang mampu dihasilkan turbin angin adalah sebesar 30,19 watt dengan kecepatan angin 7 m/s, pada turbin dengan 6 bingkai sudu.



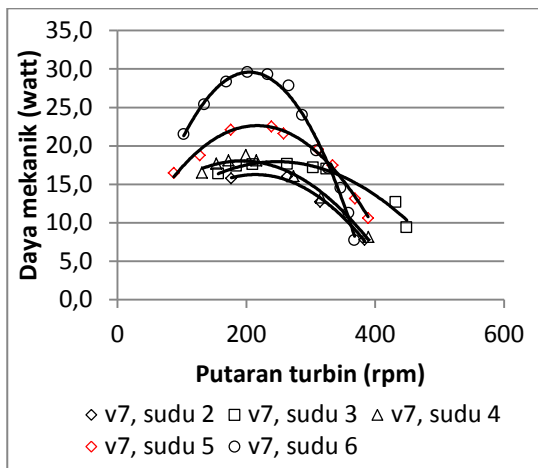
Gambar 9. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 4 m/s



Gambar 10. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 5 m/s



Gambar 11. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 6 m/s



Gambar 12. Grafik hubungan putaran turbin dengan daya mekanik untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 7 m/s

### 3.2. Grafik Hubungan Putaran Turbin dan Efisiensi pada berbagai kecepatan angin dan berbagai jumlah bingkai sudu

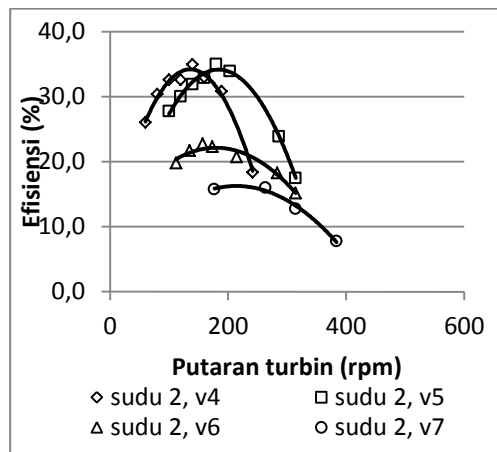
Dari hasil pengujian dapat digambarkan hubungan antara putaran turbin dengan efisiensi atau koefisien daya (*Coefficient of power=Cp*) pada berbagai kecepatan angin dan posisi sudut sudu seperti pada gambar 13 sampai dengan gambar 17

Seperti pada daya mekanik, hal yang sama juga terjadi pada efisiensi, yaitu efisiensi semakin bertambah besar seiring dengan bertambahnya kecepatan turbin, sampai pada putaran tertentu efisiensi akan mencapai maksimum, selanjutnya efisiensi total akan semakin berkurang meskipun putaran turbin terus bertambah besar. Hal ini sesuai dengan persamaan efisiensi, dimana efisiensi berbanding lurus dengan daya mekanik, sehingga jika daya mekanik memiliki kurva berupa garis

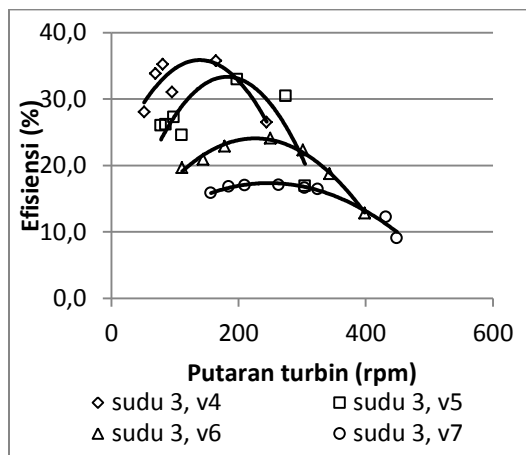
lengkung, maka kurva efisiensi juga akan berupa garis.

Dari gambar 13 sampai dengan 17, terlihat bahwa efisiensi terbesar yang dapat dihasilkan turbin terjadi pada kecepatan angin sebesar 4 m/s.

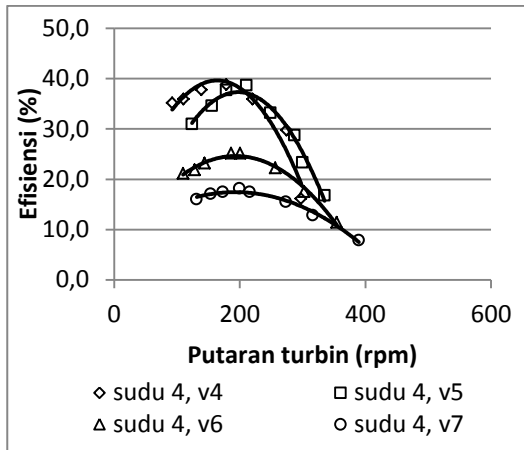
Pada turbin dengan 2 bingkai sudu, efisiensi maksimum yang dihasilkan sebesar 33,6 %, terjadi pada putaran 134,46 rpm, pada kecepatan angin 4 m/s, sedangkan untuk turbin dengan 3 bingkai sudu, efisiensi maksimum sebesar 36,67 %, terjadi pada putaran 145,88 rpm, pada kecepatan angin 4 m/s, untuk turbin dengan 4 bingkai sudu, efisiensi maksimum yang dihasilkan sebesar 40,83 %, terjadi pada putaran 170 rpm, pada kecepatan angin 4 m/s, sedangkan untuk turbin dengan 5 bingkai sudu, efisiensi maksimum sebesar 39,58 %, terjadi pada putaran 151,25 rpm, pada kecepatan angin 4 m/s, sedangkan untuk turbin dengan 6 bingkai sudu, efisiensi maksimum sebesar 38,7 %, terjadi pada putaran 156,77 rpm, pada kecepatan angin 4 m/s



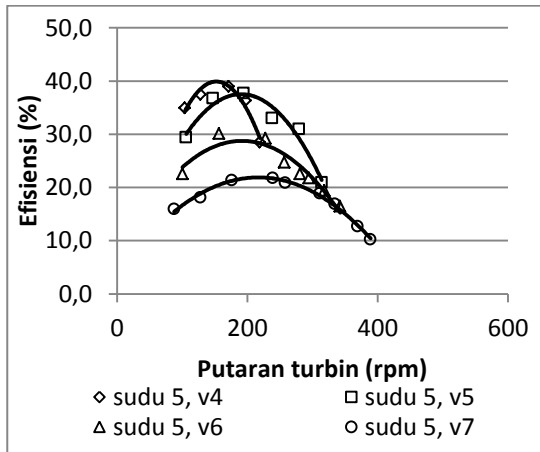
Gambar 13. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk 2 bingkai sudu pada berbagai kecepatan angin



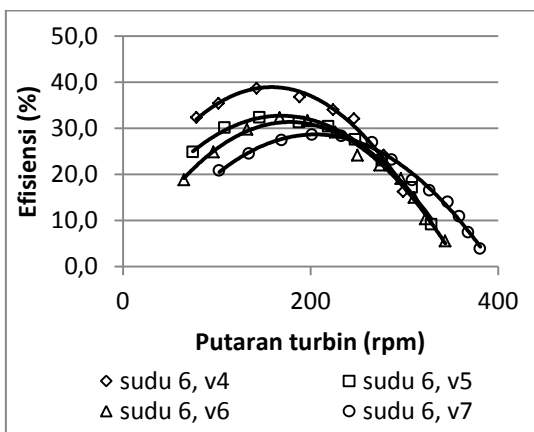
Gambar 14. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk 3 bingkai sudu pada berbagai kecepatan angin



Gambar15. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk 4 bingkai sudu pada berbagai kecepatan angin



Gambar 16. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk 5 bingkai sudu pada berbagai kecepatan angin



Gambar 17. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk 6 bingkai sudu pada berbagai kecepatan angin

Dari hasil pengujian, hubungan putaran turbin dengan efisiensi total yang dihasilkan jika digambarkan sesuai dengan posisi sudut sudu dan

pada berbagai harga kecepatan angin dapat dilihat pada gambar 18 sampai dengan gambar 21.

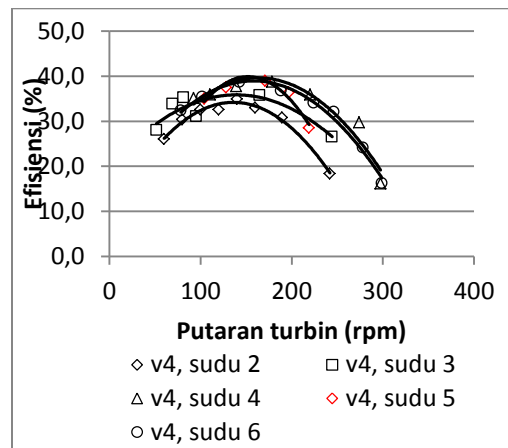
Dari gambar 18, pada kecepatan angin 4 m/s, dapat diketahui bahwa harga tertinggi efisiensi sebesar 40,83 %, terjadi pada turbin dengan 4 bingkai sudu dengan putaran poros 170 rpm.

Dari gambar 19, pada kecepatan angin 5 m/s, dapat diketahui bahwa harga tertinggi efisiensi sebesar 38,99 %, terjadi pada turbin dengan 4 bingkai sudu dengan putaran poros 204,68 rpm.

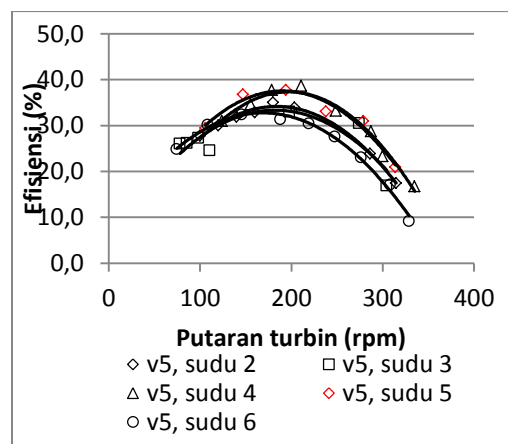
Dari gambar 20, pada kecepatan angin 6 m/s, dapat diketahui bahwa harga tertinggi efisiensi sebesar 31,36 %, terjadi pada turbin dengan 6 bingkai sudu dengan putaran poros 177,61 rpm.

Dari gambar 21, pada kecepatan angin 7 m/s, dapat diketahui bahwa harga tertinggi efisiensi sebesar 28,1 %, terjadi pada turbin dengan 6 bingkai sudu dengan putaran poros 201,13 rpm.

Dari gambar 13 sampai gambar 21, terlihat bahwa efisiensi terbesar yang mampu dihasilkan turbin angin adalah sebesar 40,83 %, dengan putaran poros 170 rpm dan kecepatan angin 4 m/s.

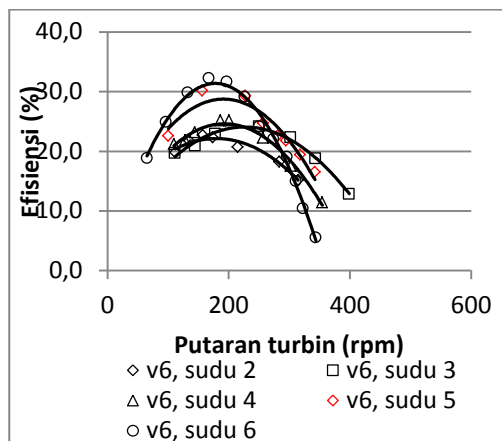


Gambar 18. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 4 m/s

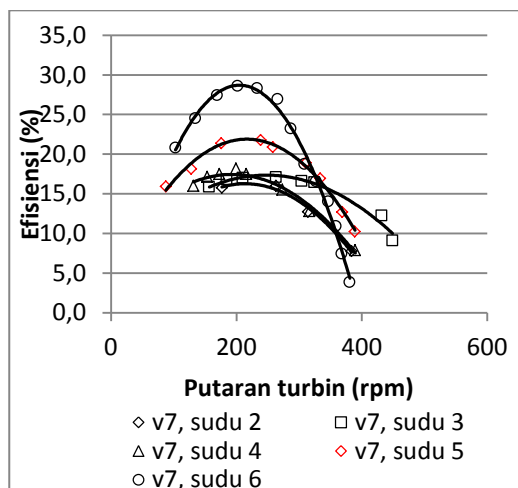


Gambar 19. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 5 m/s





Gambar 20. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 6 m/s



Gambar 21. Grafik hubungan putaran turbin dengan efisiensi untuk berbagai jumlah bingkai sudu pada kecepatan angin 7 m/s

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis data, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Daya mekanik tertinggi untuk setiap jumlah bingkai sudu terjadi pada kecepatan angin 7 m/s, adalah sebagai berikut :
  - a. turbin 2 bingkai sudu, daya mekanik terbesar 17,29 watt dengan putaran 221,1 rpm
  - b. turbin 3 bingkai sudu, daya mekanik terbesar 17,24 watt dengan putaran 232,7 rpm
  - c. turbin 4 bingkai sudu, daya mekanik terbesar 16,88 watt dengan putaran 169,8 rpm
  - d. turbin 5 bingkai sudu, daya mekanik terbesar 24,39 watt dengan putaran 239,7 rpm
  - e. turbin 6 bingkai sudu, daya mekanik terbesar 30,19 watt dengan putaran 207,9 rpm

Jadi daya mekanik tertinggi yang mampu dibangkitkan adalah sebesar 30,19 watt, pada kecepatan angin sebesar 7 m/s terjadi pada turbin

angin dengan 6 bingkai sudu dengan putaran 207,9 rpm.

2. Efisiensi tertinggi untuk setiap jumlah bingkai sudu terjadi pada kecepatan angin 4 m/s, adalah sebagai berikut :

- a. turbin 2 bingkai sudu, efisiensi maksimum 33,6 % dengan putaran 134,4 rpm
- b. turbin 3 bingkai sudu, efisiensi maksimum 36,67 % dengan putaran 145,8 rpm
- c. turbin 4 bingkai sudu, efisiensi maksimum 40,83 % dengan putaran 170,0 rpm
- d. turbin 5 bingkai sudu, efisiensi maksimum 39,58 % dengan putaran 151,25 rpm
- e. turbin 6 bingkai sudu, efisiensi maksimum 38,7 % dengan putaran 1564,77 rpm

Jadi efisiensi tertinggi yang mampu dihasilkan turbin adalah sebesar 40,83 % pada kecepatan angin 4 m/s, terjadi pada turbin dengan 6 bingkai sudu dengan putaran 170 rpm.

#### Daftar Pustaka

- Bono dkk, 2013, *Rekayasa Turbin Angin Sudu Flat Berbingkai Tipe Poros Horizontal Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin*, DIPA Polines.
- Gatot Suwoto dkk, 2010, *Unjuk kerja karakteristik turbin angin tipe poros horizontal (HAWT) terhadap variasi jumlah sudu dengan sudu dibuat dari belahan pipa PVC untuk pembangkit listrik tenaga bayu* DIPA Polines
- Daryanto y, 2007, “Kajian Potensi angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu”, Balai PPTAGG – UPT-LAGG, Yogyakarta,
- Lysen, EH. 1983. *Introduction to Wind Energy. 2nd Edition, Amersfoort, Netherlands, Consultancy Services Wind Energy Developing Countries*
- Marton Ors: 2009, *Maximum Power Point Tracking for Small Scale Wind Turbine With Self-Excited Induction Generator*, Control Engineering And Applied Informatics (CEAI), Vol.11, No.2, Pp. 30-34,
- Talam K.E., Kainkwa R.M., 2013, *Performance Characteristics of Some Small Scale Wind Turbines Fabricated in Tanzania*, International Journal of Mathematical, Computational, Natural and Physical Engineering Vol:7, No:11.
- Website for Iowa University, <[www.energy.iastate.edu](http://www.energy.iastate.edu)>.