

## PENGARUH PANJANG BATANG DAN BENTUK DAUN EKOR PADA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL DENGAN MEKANISME *FURLING* TERHADAP PERFORMA TURBIN

### Basori Hidayatullah

Mahasiswa  
Universitas Negeri Semarang  
Jurusan Teknik Mesin  
basorihidayatullah@students.unnes.ac.id

### Dony Hidayat Al-Janan

Dosen  
Universitas Negeri Semarang  
Jurusan Teknik Mesin  
aljanan@mail.unnes.ac.id

### Danang Dwi Saputro

Dosen  
Universitas Negeri Semarang  
Jurusan Teknik Mesin  
Danangdwisaputro@mail.unnes.ac.id

*Small-scale wind turbines that operate at low wind speeds regularly will face yawing performance problems. The purpose of this study was to determine the effect of stem length and tail shape on turbine performance through the power generated and the yawing angle and furling angle that formed. An experimental method was used in this research. Tail stem length variations that used were 0.35 m, 0.53 m and 0.71 m. The tail shape varies Rectangular, Trapezoidal, Triangular, Up Rectangular, Down Rectangular, Up Trapezoidal, Down Trapezoidal, Up Triangular and Down Triangular. Wind speed used in this case is 4.3 m/s, 4.8 m/s and 5.2 m/s. The tests carried out at Marina Beach, Semarang. Power measurements using a digital multimeter. Yawing and furling angle measurements using video recordings and measured using Solidworks. Wind speed measurements using a digital anemometer. The results showed that the best configuration is the triangular tail shape with 0,53 m of tail stem length. The power generated of this configuration has increased from wind speed of 4.3 m/s (0.816 Watt) to 4.8 m/s (1.140 Watt) and decreased at a wind speed of 5.2 m/s (1.081 Watt). This phenomenon is related to the design where at wind speed above 5 m/s, the design of furling mechanism will work to reduce the capture of wind energy by diverting the direction of the rotor towards the wind direction. So that the damage of the blade due to higher wind pressure can be minimized.*

**Keywords:** *Furling, Horizontal Axis Wind Turbine, Yawing, Tail Stem Length, Tail Shape.*

## 1. PENDAHULUAN

Konsumsi energi di Indonesia semakin hari semakin meningkat bersamaan dengan semakin berkurangnya sumber energi tidak terbarukan yang sekarang umum dipakai. Ukuran bumi terbatas dan tidak ada isinya yang tidak terbatas, kecuali sinar matahari, energi dari matahari, energi selain dari bumi [1]. Perlu adanya alternatif pengganti energi lain untuk menanggulangi permasalahan ini. Salah satu energi yang sudah dimanfaatkan dan dikembangkan saat ini adalah energi angin. Energi angin sendiri pemanfaatannya masih cenderung sedikit, dengan potensi tenaga angin yang ada di Indonesia. Pemanfaatan energi angin dan *hybrid* di Indonesia masih sekitar 3,1 MW dengan kecepatan angin rata-rata 3-6 m/s[2].

Pada Tahun 2018 telah dibangun *first wind farm* di Indonesia, yaitu PLTB Sidrap I, pada bulan Juli 2018. *Wind farm* ini mampu menghasilkan 75 MW listrik dan dialirkan ke 70.000 rumah tangga di Sulawesi Utara. Proyek lainnya yaitu Karaha Unit I (30 MW) di Jawa Barat dan Sarulla Unit III (110 MW) di Sumatera Selatan [3].

Turbin angin sumbu horizontal merupakan salah satu jenis turbin angin yang bisa dimanfaatkan sebagai alternatif. Turbin angin Savonius yang termasuk turbin angin sumbu vertikal mampu berputar pada kecepatan angin rendah, namun performa turbin angin Savonius lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin angin

tipe propeller yang memiliki sumbu poros horizontal [4]. Turbin angin yang menghasilkan daya 10 kW kebawah disebut dengan turbin angin skala mikro, sedangkan yang menghasilkan daya 1,5 hingga 5 MW disebut dengan turbin angin skala besar[5]. Turbin angin skala mikro yang beroperasi pada kecepatan angin rendah secara teratur akan menghadapi permasalahan kinerja *yawing* atau gerakan horizontal karena sifat dari angin yang tidak rata. Gaya dorong mengenai titik tengah dari sumbu rotor, jika terdapat jarak atau pergeseran dari sumbu *yaw* maka akan menimbulkan momen *yaw* [6]. Rotor yang menoleh dari arah angin kurang efisien jika dibandingkan dengan rotor yang tidak menoleh dari arah angin, maka perlu dipertimbangkan efisiensi untuk tujuan produksi energi. Rakitan ekor digunakan untuk memastikan ekstraksi potensi angin secara maksimum meskipun pada kondisi kecepatan angin yang rendah [7]. Ekor turbin pada turbin angin skala kecil difungsikan untuk mengubah arah dan mengakomodasi variasi arah angin yang datang. Ekor diperlukan untuk menghasilkan respon yang cepat dan stabil sesuai dengan perubahan arah angin dan membuat turbin angin skala kecil menghadap ke arah angin [8]. Kecepatan angin yang sangat fluktuatif juga akan mengakibatkan keterbatasan dari kemampuan turbin angin itu sendiri. Pada kondisi kecepatan angin diatas kecepatan angin rancangan, putaran atau rpm sudu dan generator akan melebihi putaran rancangan, sehingga terjadi *overspeed* [9]. Perlindungan dilakukan untuk mencegah terjadinya *overspeed*. Karena tanpa adanya sistem perlindungan, akan terjadi kegagalan fungsi, dan mengakibatkan kerusakan pada turbin [10]. Diperlukan adanya mekanisme yang bisa mengatur kemampuan *yawing* dari turbin sehingga bisa memaksimalkan hasil konversi angin dan meminimalisir kerusakan pada alternator dan dioda yang *overheat*, dan juga bilah yang *overspeed* [11]. Mekanisme *furling* ini sendiri merupakan mekanisme yang dominan untuk mengatasi permasalahan *overspeed* dan juga kontrol daya pada turbin angin skala kecil [12], meskipun *furling* sendiri memiliki kemampuan yang buruk dalam menangkap energi saat kecepatan angin tinggi [13].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari variasi panjang batang ekor (0,35 m, 0,53 m, dan 0,71 m) dan variasi bentuk daun ekor (*rectangular, triangular, trapezoidal, upward rectangular, downward rectangular, upward triangular, downward triangular, upward trapezoidal dan downward trapezoidal*) terhadap performa turbin yang mengacu pada daya keluaran dan juga performa dari ekor turbin yaitu sudut *yawing* dan sudut *furling* yang terbentuk. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu menjadi acuan untuk pengembangan optimasi turbin angin skala kecil dengan mengoptimalkan penangkapan energi oleh turbin.

## 2. METODE DAN BAHAN

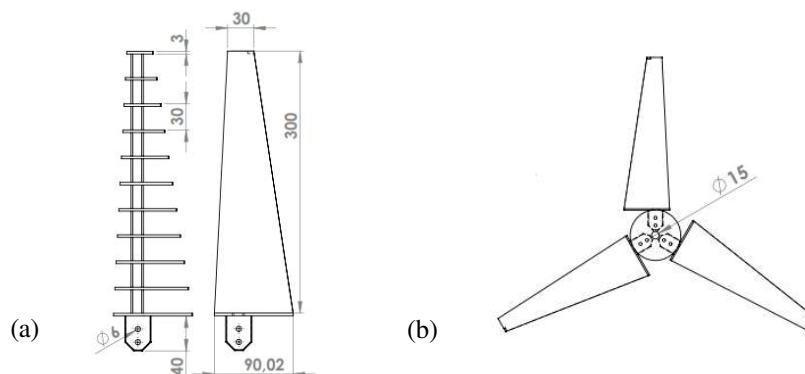
Desain penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimen. Metode penelitian eksperimen bertujuan untuk menyelidiki dan menguji kemungkinan sebab akibat dari variabel – variabel yang ditentukan dan membandingkan hasilnya dengan sesuatu atau lebih kelompok kontrol [14].

### 2.1 Variabel Penelitian

Terdapat 3 variabel dalam sebuah penelitian kuantitatif yang dilihat dari peran dan posisinya [14]. Variabel penelitian tersebut terdiri dari variabel bebas yaitu panjang batang ekor dan bentuk daun ekor, variabel terikat adalah daya keluaran, sudut *furling* dan sudut *yawing*, dan variabel kontrolnya adalah kecepatan angin.

### 2.2 Spesifikasi Rancangan Bilah dan Ekor

Bilah NACA 3612 dengan jenis *taper* berjumlah 3 dengan diameter 70 cm sesuai dengan Gambar 1.



**Gambar 1:** Bilah *taper* NACA 3612, (a) bilah *taper* metode rangka, (b) *assembly* bilah dengan *hub*.

Batang ekor menggunakan bahan pipa aluminium dengan diameter luar 8 mm dan ketebalan 0,5 mm. Variasi panjang batang ekor adalah 11 0,35 m ( $0,5 \times \text{diameter bilah}[9]$ ), 12 0,53 m ( $(11 + 13)/2$ ), dan 13 0,71 m.

Mekanisme *furling* dapat dirancang dengan menentukan parameter – parameter yaitu *vane force*, *thrust force*, *moment thrust*, *length of tail*, *mass of tail*, dan *furl force* [15]. Dalam penelitian ini ditentukan kecepatan angin rancangan adalah 5 m/s dan TSR 7. Rumus perancangan sebagai berikut:

Rotor *offset* ( $l_{offset}$ ), panjang *offset* minimum adalah sebesar 4% dari diameter sapuan bilah [9].

$$l_{offset} = \frac{4 \times D}{100} \quad (1)$$

D adalah diameter bilah.

Luas sapuan bilah ( $A_{swept}$ ), diketahui dengan menggunakan rumus luas lingkaran.

$$A_{swept} = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \quad (2)$$

Gaya dorong ( $F_{thrust}$ ), merupakan gaya dorong yang mengenai rotor.

$$F_{thrust} = \rho \times A_{swept} \times C_t \times V_f^2 \quad (3)$$

Dimana,  $\rho$  adalah massa jenis udara ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $V_f$  adalah kecepatan angin rancangan (m/s), dan  $C_t$  adalah koefisien *thrust*.  $C_t$  untuk TSR 7 adalah 0,9[13].

*Moment Thrust* ( $M_T$ ), momen timbul akibat jarak antara *rotor axis* dengan *yaw axis*.

$$M_{thrust} = F_{thrust} \times l_{offset} \quad (4)$$

Luas daun ekor ( $A_{vane}$ ), luas daun ekor adalah 10% dari luas sapuan bilah [15].

$$A_{vane} = \frac{10 \times A_{swept}}{100} \quad (5)$$

Gaya dorong pada daun ekor ( $F_{vane}$ ), untuk menghadapkan rotor selalu kearah angin diperlukan pembelokan sebesar  $\alpha$ . Dalam hal ini  $\alpha$  yang digunakan sebesar  $20^\circ$  [15].

$$F_{vane} = \rho \times A_{vane} \times V_f^2 \times \sin \alpha \quad (6)$$

Panjang ekor ( $l_{tail}$ ), dengan  $M_{restoring}$  sama dengan  $M_{thrust}$ .

$$l_{tail} = \frac{M_{restoring}}{F_{vane}} \quad (7)$$

Massa pada ujung ekor ( $m$ ), untuk keseimbangan momen pada sumbu pivot, maka  $F_g = F_{vane}$ . Digunakan mekanisme *inclined pivot axis* untuk mempertahankan posisi ekor dengan memiringkan sumbu engsel sebesar  $15^\circ$  terhadap *yaw axis* [6].

$$F_g = m \times g \times \sin \theta \quad (8)$$

Dimana,  $g$  adalah gaya gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ), dan  $\theta$  adalah sudut kemiringan *pivot*.

Panjang batang ekor ( $l_{boom}$ ), dengan panjang batang pivot adalah 0,08 m.

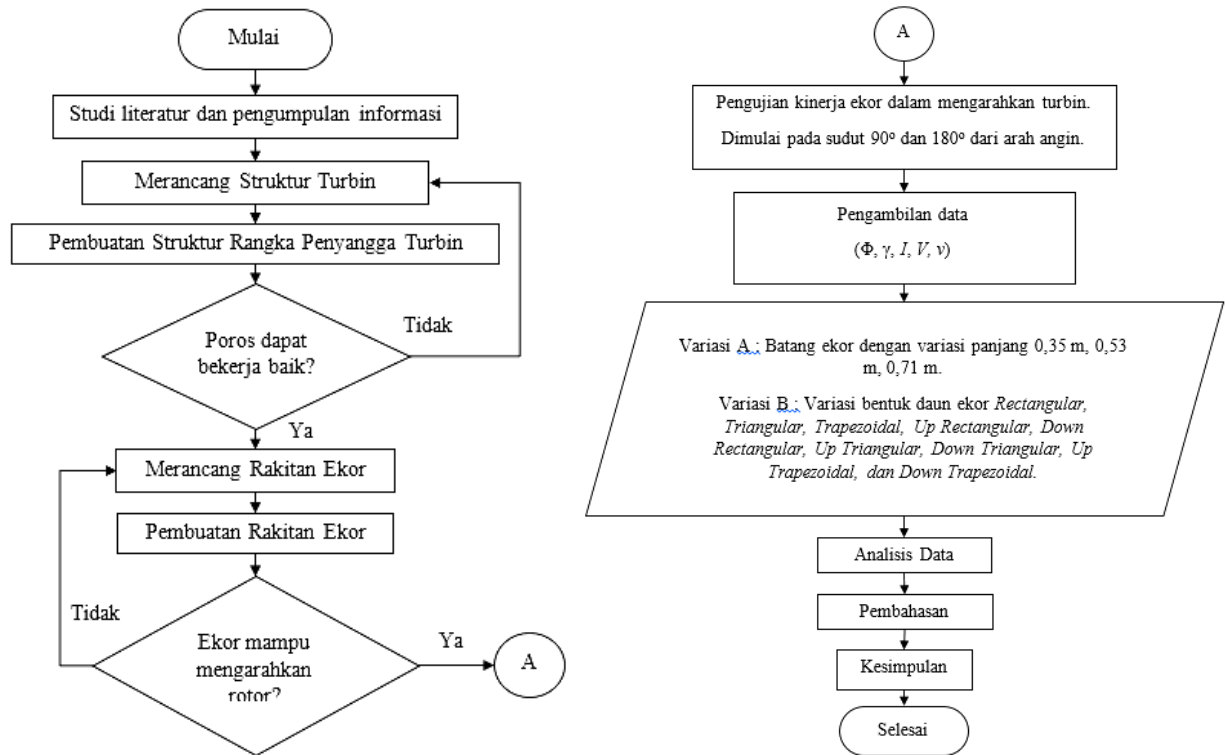
$$X = l_{pivot} \times \sin \theta \quad (8)$$

$$l_{boom} = l_{tail} - X \quad (9)$$

Dimana,  $l_{pivot}$  adalah panjang batang pivot.

### 2.3 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini mengamati tentang performa turbin angin dari pengaruh perbedaan bentuk daun ekor dan juga panjang batang ekor pada turbin angin. Pengamatan yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengamatan terhadap arus dan tegangan yang diukur dari motor atau *generator* pada kecepatan angin yang sudah ditentukan, yaitu pada kecepatan angin 4,3 m/s, 4,8 m/s dan 5,2 m/s. Diagram alir penelitian sesuai dengan Gambar 2.



**Gambar 2:** Diagram Alir Penelitian

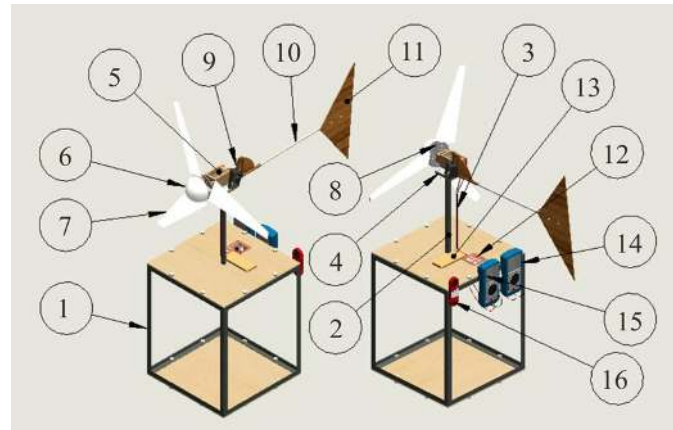
**Tabel 1:** Data Hasil Perhitungan Rancangan

| SIMBOL          | NILAI | SATUAN            |
|-----------------|-------|-------------------|
| $V_f$           | 5.00  | m/s               |
| $D$             | 0.70  | M                 |
| $P$             | 1.23  | kg/m <sup>3</sup> |
| $G$             | 9.81  | m/s <sup>2</sup>  |
| $C_t$           | 0.90  | -                 |
| $A_{swept}$     | 0.38  | m <sup>2</sup>    |
| $l_{offset}$    | 0.28  | M                 |
| $F_{Thrust}$    | 10.60 | N                 |
| $M_T$           | 0.29  | N.m               |
| $A_{vane}$      | 0.04  | m <sup>2</sup>    |
| $A$             | 20.0  | deg.              |
| $M_{restoring}$ | 0.29  | N.m               |
| $F_{vane}$      | 0.40  | N                 |
| $l_{tail}$      | 0.73  | m                 |
| $l_{pivot}$     | 0.08  | m                 |
| $\theta$        | 15.0  | deg.              |
| $x_{boom}$      | 0.02  | m                 |

|                     |                  |     |
|---------------------|------------------|-----|
| $l_{boom\ 1,2,3}$   | 0.71, 0.53, 0.35 | m   |
| $M_{vane\ 1,2,3}$   | 0.28, 0.21, 0.14 | N.m |
| $M_{weight\ 1,2,3}$ | 0.28, 0.21, 0.14 | N.m |
| $F_g$               | 0.40             | N   |
| $M_1$               | 0.15             | Kg  |

### 2.4 Skema Alat Pengujian

Skema alat pengujian dan turbin yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



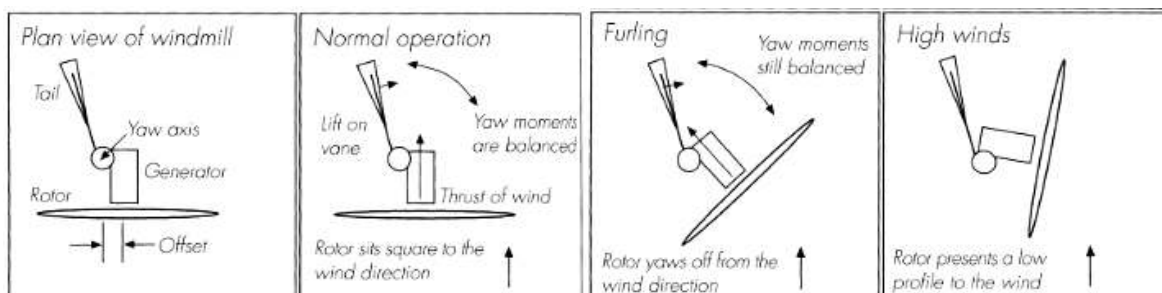
**Gambar 3:** Skema alat pengujian

Keterangan Gambar 3:

- |                            |                           |                   |                  |
|----------------------------|---------------------------|-------------------|------------------|
| 1. Rangka penyangga turbin | 5. DC Generator           | 9. Sambungan ekor | 13. Handphone    |
| 2. Tiang turbin            | 6. Cone                   | 10. Batang ekor   | 14. Multimeter 1 |
| 3. Kabel keluaran daya     | 7. Bilah ( <i>blade</i> ) | 11. Daun ekor     | 15. Multimeter 2 |
| 4. Poros putar             | 8. Hub bilah              | 12. Rangkaian PCB | 16. Anemometer   |

### 2.5 Mekanisme *Furling*

*Furling* merupakan sebuah mekanisme yang digunakan untuk memberikan keamanan terhadap turbin apabila kecepatan angin mencapai kecepatan yang sangat tinggi dan akan membahayakan turbin angin [6]. *Furling* dalam penelitian ini ditujukan untuk mengoptimalkan kinerja dari turbin angin dalam penangkapan energi dan sebagai metode pengamanan terhadap kerusakan bilah yang mungkin terjadi. *Yawing* terjadi pada poros utama sedangkan *furling* terjadi pada poros pivot. Mekanisme *furling* yang akan bekerja pada penelitian ini seperti skema pada Gambar 4.



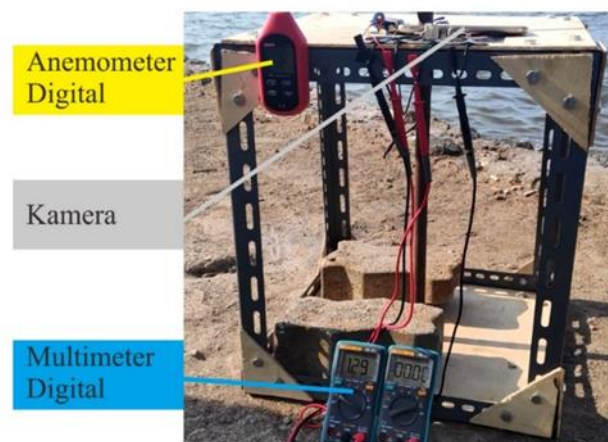
**Gambar 4:** Konsep mekanisme *furling* dan *yawing* [6].

## 2.6 Alat dan Bahan

Adapun alat yang digunakan yaitu *anemometer digital* Benetech tipe GM816 untuk mengukur kecepatan angin, *multimeter AC/DC voltage tester* Richmeter RM101 untuk mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan dalam penelitian, Laptop Acer Aspire 4739 untuk mendesain ekor, mengukur sudut *furling* dan juga sudut *yawing*, *Handphone* untuk merekam data penelitian, *DC motor* Canon FH-71860 digunakan sebagai alat konversi dari putaran menjadi energi listrik. Adapun bahan penelitian yang digunakan yaitu Triplek dengan ketebalan 3 mm untuk daun ekor, Pipa aluminium dengan diameter luar 8 mm untuk batang ekor, Mur dan Baut untuk menggabungkan batang ekor dengan daun ekor.

## 3. HASIL DAN DISKUSI

Dalam rancangan ekor ini diinginkan sudut *furling* dan *yawing* akan mulai terbentuk pada kecepatan angin 5 m/s dan mampu mengurangi penangkapan angin dengan membelokkan rotor menjauh dari arah angin. Hal ini berhubungan dengan daya yang dihasilkan karena dengan semakin tinggi sudut *furling* dan sudut *yawing* yang terbentuk maka daya yang dihasilkan akan menurun, namun disisi lain untuk pengaman dari kerusakan sudu, maka harus adanya rancangan ekor untuk sistem ini. Kecepatan angin yang diambil sebagai acuan pada penelitian ini yaitu pada kecepatan angin 4,3 m/s, 4,8 m/s dan 5,2 m/s. Dari data yang didapatkan menunjukkan bahwa pada kecepatan 4,3 m/s sudut *furling* dan sudut *yawing* sudah terbentuk. Pengambilan data dilakukan sesuai dengan skema seperti Gambar 5.



**Gambar 5:** Pengambilan data

Seiring panjang batang yang semakin panjang, maka sudut *furling* dan *yawing* yang terbentuk semakin kecil. Ini berdampak pada daya tangkap angin oleh sudu turbin. Bentuk daun ekor juga sangat berpengaruh untuk mengarahkan angin, karena faktor dari bentuk daun ekor yang memiliki geometri yang berbeda meskipun luas area dari masing – masing bentuk sama.

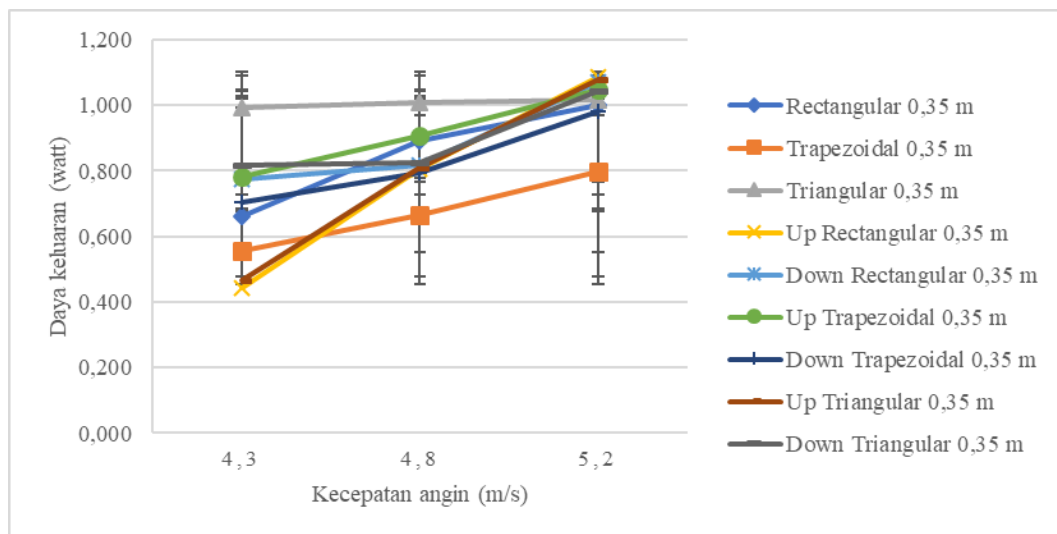
### 3.1 Pembahasan

Hasil daya keluaran dari penelitian ini berdasar panjang batang ekor ditunjukkan pada Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 2 menunjukkan pada panjang batang 0,35 m, pada kecepatan angin 4,3 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Triangular* dengan nilai 0,991 watt, dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Up Rectangular* dengan nilai 0,443 watt. Pada kecepatan angin 4,8 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* dengan nilai 1,008 watt, dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor *Trapezoidal* dengan nilai 0,666 watt. Pada kecepatan angin 5,2 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Up Rectangular* dengan nilai 1,087 watt, dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor *Trapezoidal* dengan nilai 0,799 watt.

Tabel 2. Daya keluaran pada panjang ekor 0,35 m

| Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>4,3 m/s | Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>4,8 m/s | Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>5,2 m/s |
|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| Triangular       | 0,991                      | Triangular       | 1,008                      | Up Rectangular   | 1,087                      |
| Down Triangular  | 0,817                      | Up Trapezoidal   | 0,906                      | Up Triangular    | 1,078                      |
| Up Trapezoidal   | 0,783                      | Rectangular      | 0,891                      | Down Rectangular | 1,070                      |
| Down Rectangular | 0,776                      | Down Triangular  | 0,823                      | Up Trapezoidal   | 1,047                      |
| Down Trapezoidal | 0,704                      | Down Rectangular | 0,818                      | Down Triangular  | 1,043                      |
| Rectangular      | 0,660                      | Up Triangular    | 0,809                      | Triangular       | 1,018                      |
| Trapezoidal      | 0,554                      | Up Rectangular   | 0,804                      | Rectangular      | 1,003                      |
| Up Triangular    | 0,466                      | Down Trapezoidal | 0,793                      | Down Trapezoidal | 0,981                      |
| Up Rectangular   | 0,443                      | Trapezoidal      | 0,666                      | Trapezoidal      | 0,799                      |



Gambar 6: Hubungan daya keluaran terhadap kecepatan angin (0,35 m).

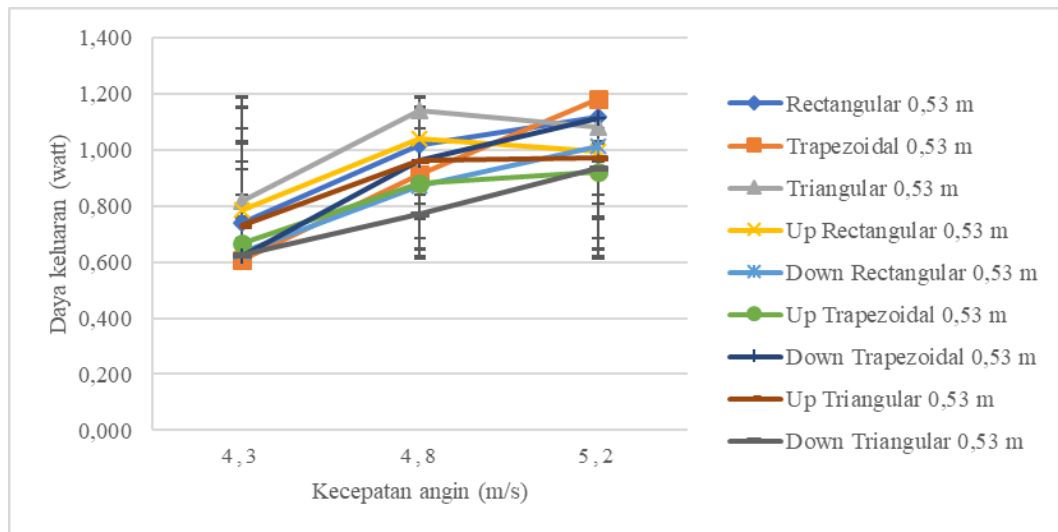
Gambar 6 menunjukkan pada panjang batang 0,35 m ini, semua variasi bentuk daun ekor dari kecepatan angin 4,3 m/s ke 5,2 m/s terus mengalami kenaikan daya keluaran. Hal ini terjadi dikarenakan adanya pengaruh dari panjang batang ekor yang terlalu pendek sehingga kondisi ekor yang kurang stabil dalam mengarahkan turbin yang disebabkan momen dorong dengan momen balik pada ekor tidak seimbang, sehingga penangkapan angin oleh turbin menjadi naik dan turun dengan tempo yang sangat cepat dan menyebabkan mekanisme *furling* yang telah dirancang tidak bisa bekerja maksimal.

Tabel 3: Daya keluaran pada panjang ekor 0,53 m

| Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>4,3 m/s | Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>4,8 m/s | Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>5,2 m/s |
|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| Triangular       | 0,816                      | Triangular       | 1,140                      | Trapezoidal      | 1,183                      |
| Up Rectangular   | 0,787                      | Up Rectangular   | 1,039                      | Rectangular      | 1,118                      |
| Rectangular      | 0,737                      | Rectangular      | 1,019                      | Down Trapezoidal | 1,113                      |
| Up Triangular    | 0,732                      | Up Triangular    | 0,962                      | Triangular       | 1,081                      |
| Up Trapezoidal   | 0,668                      | Down Trapezoidal | 0,961                      | Down Rectangular | 1,014                      |
| Down Rectangular | 0,634                      | Trapezoidal      | 0,913                      | Up Rectangular   | 0,994                      |
| Down Triangular  | 0,626                      | Up Trapezoidal   | 0,881                      | Up Triangular    | 0,971                      |
| Down Trapezoidal | 0,619                      | Down Rectangular | 0,873                      | Down Triangular  | 0,935                      |
| Trapezoidal      | 0,605                      | Down Triangular  | 0,770                      | Up Trapezoidal   | 0,921                      |

Tabel 3 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,53 m, pada kecepatan angin 4,3 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Triangular* dengan nilai 0,816 watt. Dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Trapezoidal* dengan nilai 0,605 watt. Pada kecepatan angin 4,8 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Triangular* dengan nilai 1,140 watt, dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor *Down Triangular* dengan nilai 0,770 watt. Pada kecepatan angin 5,2 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Trapezoidal* dengan nilai 1,183 watt, dan

daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Up Trapezoidal* dengan nilai 0,921 watt.



**Gambar 7:** Hubungan daya keluaran terhadap kecepatan angin (0,53 m).

Gambar 7 menunjukkan pada panjang batang 0,53 m ini, variasi bentuk daun ekor jenis *Rectangular*, *Trapezoidal*, *Down Rectangular*, *Up Trapezoidal*, *Down Trapezoidal*, *Up Triangular* dan *Down Triangular* dari kecepatan angin 4,3 m/s ke 5,2 m/s terus mengalami kenaikan daya keluaran, sedangkan pada jenis *Triangular* dan jenis *Up Rectangular* mengalami penurunan daya keluaran pada kecepatan angin 5,2 m/s. Hal ini terjadi karena adanya faktor dari bentuk daun ekor yang mendapatkan gaya dorong angin, karena untuk bentuk *triangular* sendiri memiliki keunggulan dalam bentuk, yaitu lebih aerodinamis dan untuk jenis *up triangular* memiliki keunggulan dalam gaya angkatnya yang lebih cepat. Daya terus mengalami kenaikan karena ekor kurang mampu dalam membelokan rotor menjauhi turbin.

**Tabel 4:** Daya keluaran pada panjang ekor 0,71 m

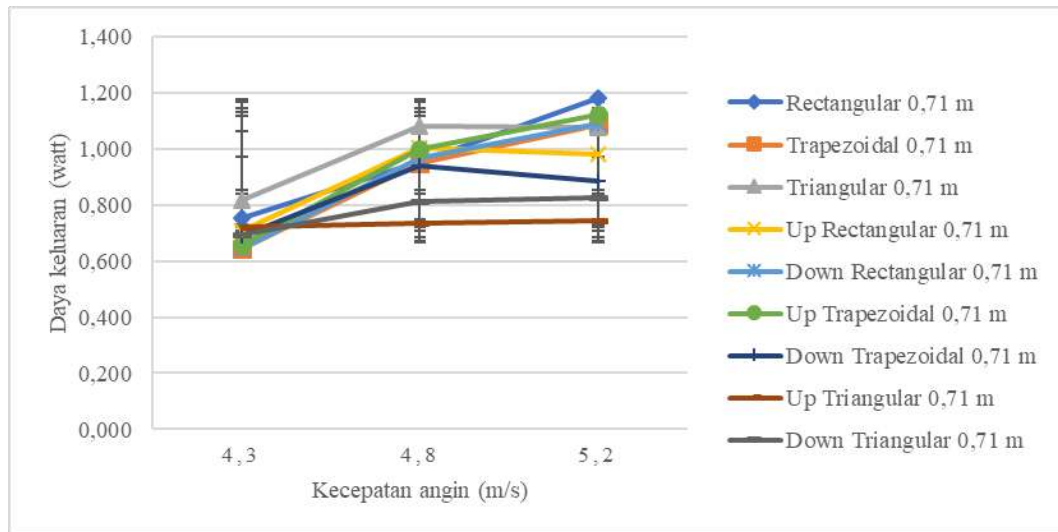
| Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>4,3 m/s | Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>4,8 m/s | Bentuk daun ekor | Kecepatan angin<br>5,2 m/s |
|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| Triangular       | 0,816                      | Triangular       | 1,082                      | Rectangular      | 1,181                      |
| Rectangular      | 0,753                      | Up Rectangular   | 1,003                      | Up Trapezoidal   | 1,121                      |
| Up Triangular    | 0,720                      | Up Trapezoidal   | 0,999                      | Down Rectangular | 1,092                      |
| Up Rectangular   | 0,706                      | Down Rectangular | 0,966                      | Trapezoidal      | 1,087                      |
| Down Triangular  | 0,695                      | Rectangular      | 0,955                      | Triangular       | 1,078                      |
| Down Trapezoidal | 0,691                      | Trapezoidal      | 0,948                      | Up Rectangular   | 0,980                      |
| Up Trapezoidal   | 0,658                      | Down Trapezoidal | 0,940                      | Down Trapezoidal | 0,886                      |
| Down Rectangular | 0,644                      | Down Triangular  | 0,814                      | Down Triangular  | 0,827                      |
| Trapezoidal      | 0,642                      | Up Triangular    | 0,735                      | Up Triangular    | 0,742                      |

Tabel 4 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,71 m, pada kecepatan angin 4,3 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Triangular* dengan nilai 0,816 watt. Dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Trapezoidal* dengan nilai 0,642 watt. Pada kecepatan angin 4,8 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Triangular* dengan nilai 1,082 watt, dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Up Triangular* dengan nilai 0,735 watt. Pada kecepatan angin 5,2 m/s daya keluaran terbesar terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Rectangular* dengan nilai 1,181 watt, dan daya keluaran terkecil terdapat pada bentuk daun ekor jenis *Up Triangular* dengan nilai 0,742 watt.

Gambar 8 menunjukkan pada panjang batang 0,71 m ini, variasi bentuk daun ekor jenis *Rectangular*, *Trapezoidal*, *Down Rectangular*, *Up Trapezoidal*, *Up Triangular* dan *Down Triangular* kecepatan angin 4,3 m/s ke 5,2 m/s terus mengalami kenaikan daya keluaran, kecuali pada jenis *Triangular*, *Up Rectangular* dan *Down Trapezoidal* mengalami penurunan daya keluaran pada kecepatan angin 5,3 m/s. Pada panjang batang ekor 0,71 m ini lebih stabil dibandingkan dengan variasi panjang batang ekor lainnya, namun panjang batang

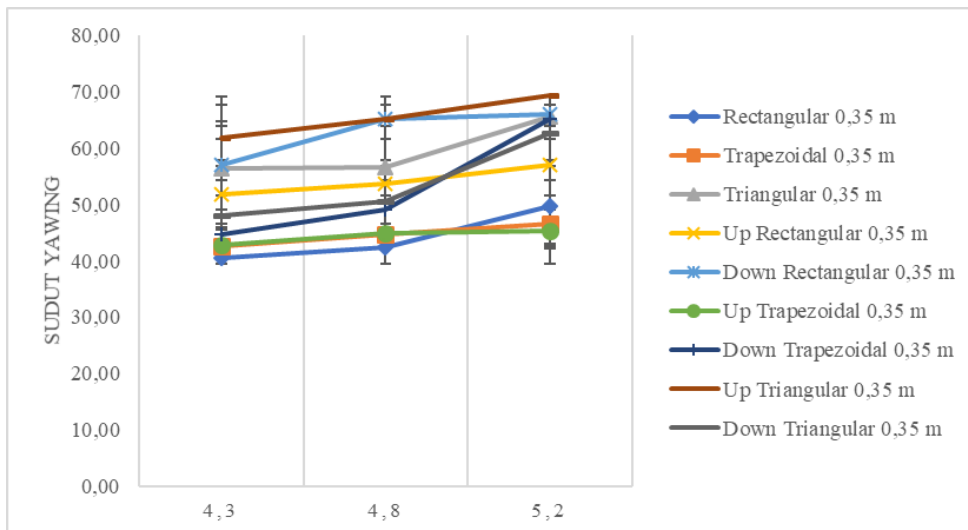


ekor 0,71 m ini memiliki titik balik yang terlalu tinggi dari rancangan yaitu pada kecepatan angin 6 m/s. Variasi daun ekor yang mengalami penurunan daya keluaran pada kecepatan angin 5,2 m/s yaitu *Triangular*, *Up Rectangular* dan *Down Trapezoidal* yang lebih mampu untuk memaksimalkan momen dorong dan momen baliknya.



**Gambar 8:** Hubungan daya keluaran terhadap kecepatan angin (0,71 m).

Grafik sudut *yawing* terhadap kecepatan angin untuk variasi bentuk daun ekor berdasarkan panjang batang ekor ditunjukkan sesuai dengan Gambar 12, Gambar 13 dan Gambar 14.



**Gambar 9:** Sudut *yawing* terhadap kecepatan angin (0,35 m)

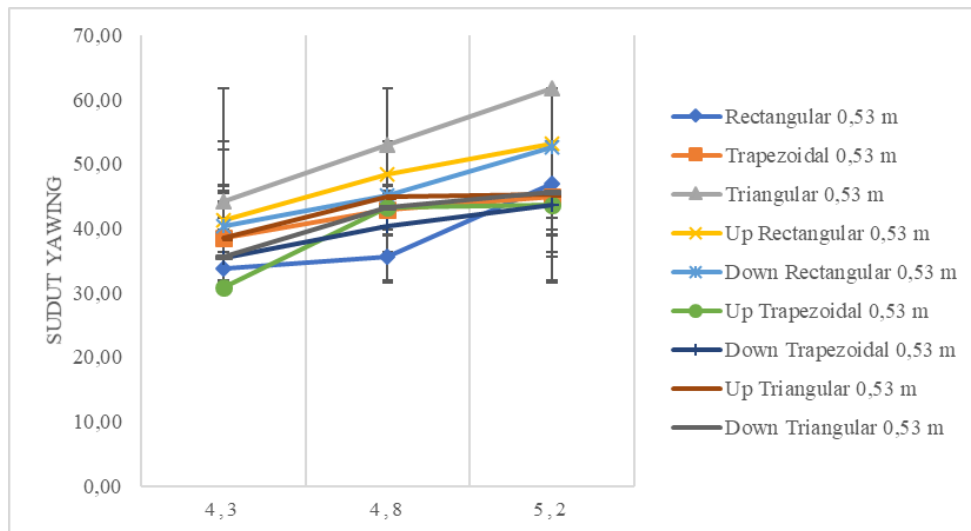
Gambar 9 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,35 m, semua bentuk daun ekor mulai dari *Rectangular* sampai dengan *Down Triangular*, sudut *yawing* yang terbentuk semakin besar seiring dengan kecepatan angin yang bertambah.

Sudut *yawing* terbesar yang terbentuk pada kecepatan angin 4,3 m/s terdapat pada bentuk daun ekor *Up Triangular* yaitu 61,73 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Rectangular* yaitu 40,56 derajat. Pada kecepatan angin 4,8 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Down Rectangular* yaitu 65,23 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Rectangular* yaitu 42,40 derajat. Pada kecepatan angin 5,2 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Up Triangular* yaitu 69,36 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Up Trapezoidal* yaitu 45,24 derajat.

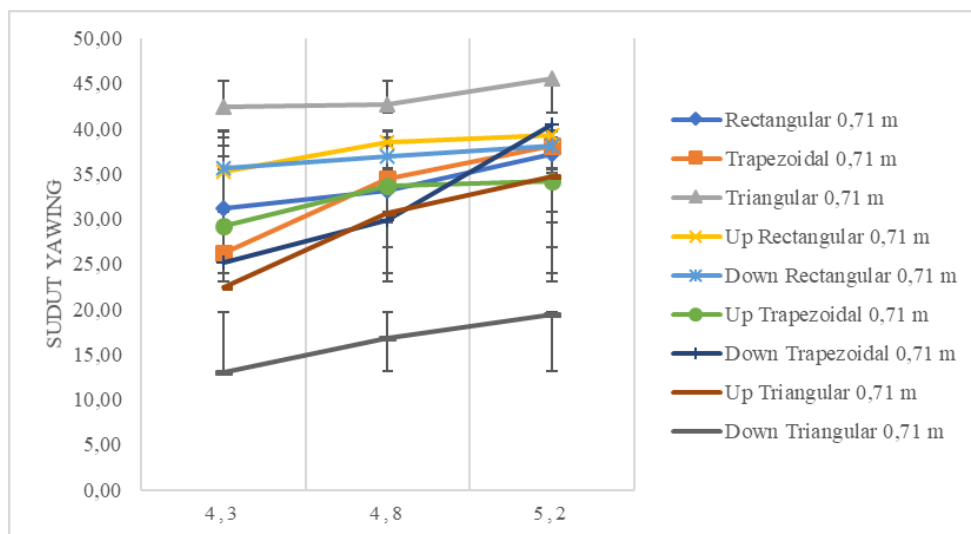
Gambar 10 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,53 m, semua bentuk daun ekor mulai dari *Rectangular* sampai dengan *Down Triangular*, sudut *yawing* yang terbentuk semakin besar seiring dengan

kecepatan angin yang bertambah.

Sudut *yawing* terbesar yang terbentuk pada kecepatan angin 4,3 m/s terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 44,17 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Up Trapezoidal* yaitu 30,88 derajat. Pada kecepatan angin 4,8 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 52,98 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Rectangular* yaitu 35,64 derajat. Pada kecepatan angin 5,2 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 61,84 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Up Trapezoidal* yaitu 43,65 derajat.



**Gambar 10:** Sudut *yawing* terhadap kecepatan angin (0,53 m)

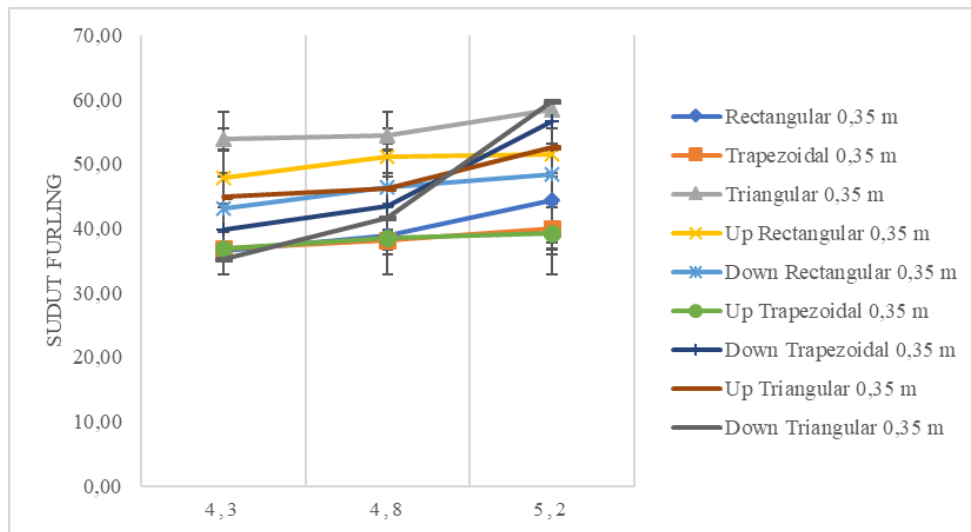


**Gambar 11:** Sudut *yawing* terhadap kecepatan angin (0,71 m)

Gambar 11 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,71 m, semua bentuk daun ekor mulai dari *Rectangular* sampai dengan *Down Triangular*, sudut *yawing* yang terbentuk semakin besar seiring dengan kecepatan angin yang bertambah.

Sudut *yawing* terbesar yang terbentuk pada kecepatan angin 4,3 m/s terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 42,39 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Down Triangular* yaitu 12,94 derajat. Pada kecepatan angin 4,8 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 42,62 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Down Triangular* yaitu 16,82 derajat. Pada kecepatan angin 5,2 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 45,50 derajat, dan sudut *yawing* terkecil pada bentuk daun ekor *Down Triangular* yaitu 19,45 derajat.

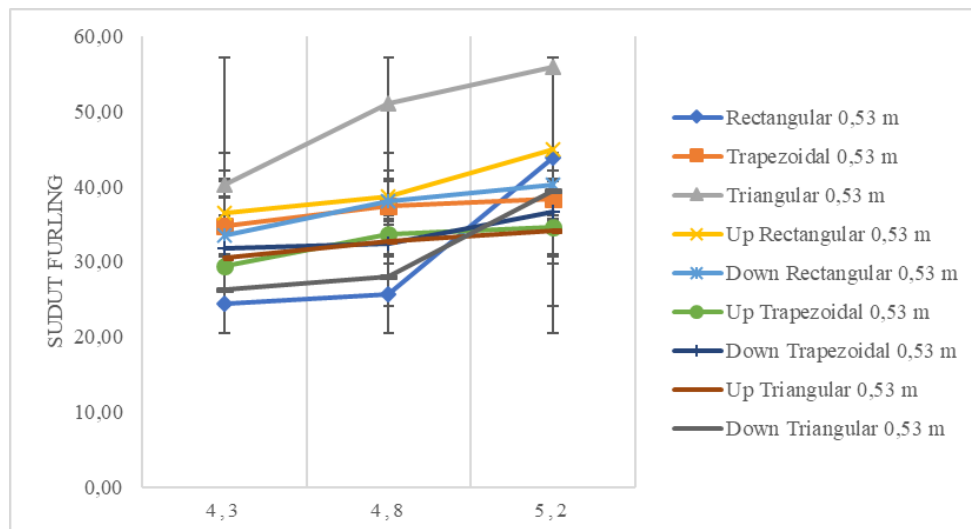
Grafik sudut *furling* terhadap kecepatan angin untuk variasi bentuk daun ekor berdasarkan panjang batang ekor ditunjukkan sesuai dengan Gambar 12, Gambar 13 dan Gambar 14.



**Gambar 12:** Sudut *furling* terhadap kecepatan angin (0,35 m)

Gambar 12 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,35 m, semua bentuk daun ekor mulai dari *Rectangular* sampai dengan *Down Triangular*, sudut *furling* yang terbentuk semakin besar seiring dengan kecepatan angin yang bertambah.

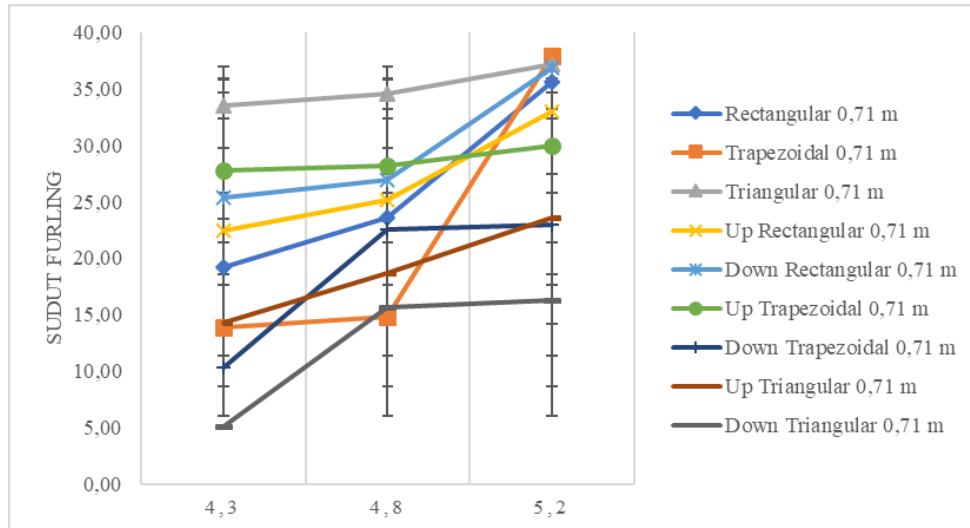
Sudut *furling* terbesar yang terbentuk pada kecepatan angin 4,3 m/s terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 53,94 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Down Triangular* yaitu 35,17 derajat. Pada kecepatan angin 4,8 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 54,44 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Trapezoidal* yaitu 38,10 derajat. Pada kecepatan angin 5,2 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Down Triangular* yaitu 59,65 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Up Trapezoidal* yaitu 39,20 derajat.



**Gambar 13:** Sudut *furling* terhadap kecepatan angin (0,53 m)

Gambar 13 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,53 m, semua bentuk daun ekor mulai dari *Rectangular* sampai dengan *Down Triangular*, sudut *furling* yang terbentuk semakin besar seiring dengan kecepatan angin yang bertambah.

Sudut *furling* terbesar yang terbentuk pada kecepatan angin 4,3 m/s terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 40,16 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Rectangular* yaitu 24,42 derajat. Pada kecepatan angin 4,8 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 50,99 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Rectangular* yaitu 25,67 derajat. Pada kecepatan angin 5,2 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 55,93 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Up Triangular* yaitu 34,04 derajat.



**Gambar 14:** Sudut *furling* terhadap kecepatan angin (0,71 m)

Gambar 14 menunjukkan bahwa pada panjang batang 0,71 m, semua bentuk daun ekor mulai dari *Rectangular* sampai dengan *Down Triangular*, sudut *furling* yang terbentuk semakin besar seiring dengan kecepatan angin yang bertambah.

Sudut *furling* terbesar yang terbentuk pada kecepatan angin 4,3 m/s terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 33,56 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Down Triangular* yaitu 5,05 derajat. Pada kecepatan angin 4,8 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Triangular* yaitu 34,57 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Trapezoidal* yaitu 14,81 derajat. Pada kecepatan angin 5,2 m/s yang terbesar terdapat pada bentuk daun ekor *Trapezoidal* yaitu 37,88 derajat, dan sudut *furling* terkecil pada bentuk daun ekor *Down Triangular* yaitu 16,28 derajat.

### 3.2 Stabilitas Ekor

Pada saat pengujian dan pengambilan data, rakitan ekor yang dirancang mampu menyesuaikan kemampuan sudu. Rancangan batas kecepatan angin yaitu 5 m/s. Pada kondisi diatas kecepatan angin rancangan, turbin akan membentuk sudut *furling* dan *yawing* yang akan berakibat pada berkurangnya penangkapan angin untuk menjaga keamanan dari sudu dan turbin itu sendiri. Pada saat kecepatan angin kembali normal yaitu dibawah kecepatan rancangan, rakitan ekor ini mampu kembali mengarahkan turbin kembali menghadap angin dan turbin kembali mampu menghasilkan daya keluaran.

Pada panjang ekor terpendek (0,35 m) menunjukkan fenomena yang kurang stabil karena faktor *moment thrust* pada sirip ekor yang tidak diimbangi dengan momen *furling* dari ekor, sehingga pada kecepatan angin rendah lebih cenderung menunjukkan gerakan ekor yang tidak stabil yang mempengaruhi stabilitas dari turbin angin. Pada panjang ekor terpanjang (0,71 m) menunjukkan fenomena yang sebaliknya, yaitu lebih stabil karena *moment thrust* mampu mengimbangi momen *furling* pada sirip ekor. Namun memiliki titik balik yang tinggi yaitu pada kecepatan angin 6 m/s (didas rancangan).

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Semakin panjang ukuran dari panjang batang ekor maka akan semakin kecil sudut *yawing* maupun *furling* yang dibentuk.
2. Daya maksimum yang mampu dihasilkan oleh turbin angin pada kecepatan angin 4,3 m/s yaitu pada bentuk daun ekor *Triangular* dengan panjang batang ekor 0,35 m dengan nilai 0,991 watt. Pada kecepatan

angin 4,8 m/s yaitu pada bentuk daun ekor *Triangular* dengan panjang batang ekor 0,53 m dengan nilai 1,140 watt. Pada kecepatan angin 5,2 m/s yaitu pada bentuk daun ekor *Trapezoidal* dengan panjang batang ekor 0,53 m dengan nilai 1,183 watt.

3. Mekanisme *furling* yang sudah dirancang pada kecepatan angin 5 m/s bekerja dengan baik, namun pada kecepatan 4,3 m/s sudut *yawing* dan *furling* sudah bekerja dengan membentuk sudut *yawing* tertinggi pada bentuk daun ekor *Up Triangular* dengan panjang batang ekor 0,35 m yaitu 61,73 derajat, dan sudut *furling* tertinggi pada bentuk daun ekor *Triangular* dengan panjang batang ekor 0,35 m yaitu 53,94 derajat.
4. Konfigurasi yang paling stabil atau yang paling ideal berdasarkan hasil penelitian untuk turbin ini adalah jenis *Triangular* dengan panjang batang ekor 0,53 m, daya yang mampu dihasilkan yaitu 0,816 watt (4,3 m/s), 1,140 watt (4,8 m/s) dan 1,081 watt (5,2 m/s).

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] HEMAMI, A., *Wind Turbine Technology*, Clifton Park, N.Y., CENGAGE Learning. 2012.
- [2] DEN, *Outlook Energy Indonesia 2016*, Jakarta Selatan, <https://www.den.go.id>, 2016.
- [3] ARINALDO, D., ADIATMA, J. C., SIMAMORA, P., *Indonesia Clean Energy Outlook Reviewing 2018, Outlooking 2019*, In: IESR 1-38, Institute for Essential Services Reform, Jakarta Selatan, 2018.
- [4] ULLY, D. N., SOEPARMAN, S., HAMIDI, N., “Pengaruh Pemasangan Sudu Pengarah dan Variasi Jumlah Sudu Rotor terhadap Performance Turbin Angin Savonius”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol. 5, No. 2, pp. 127-134, 2014.
- [5] MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L., *Wind Energy Explained Theory, Design and Application*, Second Edition, West Sussex, U.K., John Willey & Sons Ltd. Publication, 2009.
- [6] PIGGOTT, H., *Windpower Workshop Building Your Own Turbine*, Centre for Alternative Technology Publications, 1997.
- [7] NIKHIL, C. R., SANDIP, A. K., “Effect of Tail Shape on Yawing Performance of Micro Wind Turbine”, *International Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 4, No. 5-1, 38-42, August 2015.
- [8] SINGAMSITTY, V., ZHOU, H., “Tail Shape Design of Boat Wind Turbines”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 6 Issue 03, 582-587, March 2017.
- [9] ATMADI, S., FITROH, A. J., “Rancangan Sistem Orientasi Ekor Turbin Angin 50 kW”, *Jurnal LAPAN*, vol. 5, no. 2, pp. 113-117, Desember 2007.
- [10] SUANDI, A., PRAMUDIONO, L., SUPARDI, N. I., PUSPAWAN, A., “Kaji Karakteristik Mekanik Furling Control dengan Sudut Ekor 20° pada Kincir Angin Skala Mikro”, *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Rekayasa Mekanik*, Vol. 1 No. 2, pp. 21-26. Oktober 2017.
- [11] PIGGOTT, H., *How to Build a Wind Turbine Axial Flux Alternator Windmill Plans 8 Foot and 4 Foot Diameter Machines*, U.K., <https://www.scoraigwind.com>, 2003.
- [12] AUDIERNE, E., ELIZONDO, J., BERGAMI, L., IBARRA, H., PROBST, O., “Analysis of the Furling Behavior of Small Wind Turbines”, *Applied Energy*, 2278-2292. Jan. 2010.
- [13] MULJADI, E., FORSYTH, T., BUTTERFIELD, C. P., *Soft-Stall Control versus Furling Control for Small Wind Turbine Power Regulation*, In: Report NREL/CP-500-25100, National Renewable Energy Laboratory, Bakersfield, C.A., 1998.
- [14] SURYANA, *Metodologi Penelitian*. Bandung, Universitas Pendidikan Indonesia, 2010.
- [15] SUANDI, A., PRAMUDIONO, L., SUPARDI, N. I., “Perancangan Mekanisme Furling Control untuk Kincir Angin Skala Mikro”, *Jurnal Teknosia*, Vol. III, No. 1, 47-59. Maret 2017.