

Perancangan Mekanisme *Furling Control* untuk Kincir Angin Skala Mikro

Agus Suandi, Linggar Pramudiono, Nurul Iman Supardi
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu
Jalan W.R. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu 38371
email: suandi.agus@gmail.com

ABSTRACT

Wind speed changes drastically with a very fast interval makes windmill requires a control system that aims to prevent damage due to excess wind energy. Furling mechanism works by utilizing aerodynamic forces and gravity. This simple system is realistic to apply to micro-scale wind turbines.

In this study was designed to make windmills protection at a wind speed of 8 m/s. Experiment carried out using a car as means to manipulate the wind speed. Wind speed is measured using anemometer and furling movement data recorded using the camera. Video footage are combined using Camtasia Studio application to synchronize the data the furling angle, blades revolution and wind speed data. Angle analysis performed by image analysis results of screenshots every change of wind speed by a margin of 0.5 m / s are then measuring the angle using Autodesk Inventor application.

The experiment results show that the furling design has approached the desired criteria. Windmill began to yaw at a wind speed of 7.5 m/s which is slightly lower than the initial plan 8 m/s. At a wind speed of 7.5 m/s have been formed 1,5° yawing angle and the angle of furling 1,5° with blade speed of 720 rpm. Furling mechanism design managed to hold the rate hike of blade rotation at 1007 rpm by yawing angle of 37° and furling 16° at a wind speed of 9.5 m/s. As the increase in wind speed, yawing and furling angle formed increasingly large and blade speed decreases.

Key words: *furling, mechanic control, windmill, aerodynamic*

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Sebagai sumber energi terbarukan, angin memiliki potensi untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat, sebagian besar pemanfaatan energi angin adalah sebagai pembangkitan listrik. Pengkajian dan pengembangan teknologi pemanfaatan energi angin sangat diperlukan agar penerapannya dapat disesuaikan serta mendukung kemandirian teknologi dalam negeri.

Alat yang dapat digunakan untuk mengkonversi energi angin adalah kincir angin, di mana energi angin yang merupakan energi kinetik diubah menjadi energi mekanik (putaran) yang kemudian

dapat dimanfaatkan sesuai dengan kebutuhan. Di dalam perancangannya tidak hanya mengutamakan bagaimana cara kincir mengkonversi energi, mengingat bahwa energi angin sangat fluktuatif, maka kincir angin harus mampu menyesuaikan keadaan. Di mana harus menghadap arah datang angin untuk mendapatkan energi yang optimal namun harus terlindungi dari kecepatan angin yang berlebih[2].

Perlindungan tersebut dilakukan untuk mencegah terjadinya *overspeed*. Tanpa sistem perlindungan, rotor dapat berputar hingga melebihi batas kemampuan bilah, generator dan komponen rotor lainnya, sehingga dapat

terjadi kegagalan fungsi, dengan kata lain “berbahaya”.

Furling merupakan sistem kontrol perlindungan kincir angin yang sederhana, dengan memanfaatkan gaya gravitasi bumi dan gaya angkat aerodinamik (kontrol pasif). Dengan teknologi *furling*, sistem perlindungan akan lebih memungkinkan untuk diaplikasikan pada kincir angin skala mikro[2].

Oleh sebab itu, penelitian tentang *furling control* perlu dilakukan dengan membuat rancangan, kemudian melakukan pengujian untuk mengetahui kerja sistem yang dirancang.

Rumusan Masalah

Semakin tinggi kecepatan angin maka semakin tinggi pula putaran yang dihasilkan kincir angin. Kecepatan angin yang sangat tinggi hingga melebihi batas kemampuan rotor dapat menyebabkan kerusakan. Oleh karena itu perlu diberikan sistem kontrol untuk keamanan rotor.

Mekanisme *furling control* memanfaatkan kecepatan angin dan gaya gravitasi bumi, sehingga dapat diaplikasikan pada kincir angin skala mikro.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Merancang *furling system* yang sesuai dengan kincir angin yang digunakan
2. Mengetahui hubungan kecepatan angin terhadap terjadinya sudut *furling*

Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk mengetahui sistem kerja *furling* lebih jauh dan mengkaji hubungan kecepatan angin terhadap sudut *furling* dalam memberikan perlindungan kincir angin.

Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Merancang mekanisme *furling control*
2. Diameter bilah (D): 1 m;
3. $Furling$
 $windspeed, v_f$: 8 m/s
4. Menggunakan kincir angin tipe tiga bilah HAWT berbahan PVC.

2. DASAR TEORI

Energi Angin

Pada dasarnya energi angin bersumber dari matahari, udara yang terpanaskan oleh matahari memuai lalu naik karena semakin ringan, udara dingin di sekitarnya bergerak untuk menggantikannya. Inilah yang menyebabkan terjadinya angin yang bergerak dari wilayah bertekanan udara lebih tinggi ke wilayah yang bertekanan udara lebih rendah. Bentuk energi dari udara yang bergerak adalah energi kinetik.

Energi Kinetik, $E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

Daya adalah jumlah energi per satuan waktu, sehingga daya angin dapat ditentukan dengan setengah kali laju aliran massa dikalikan kuadrat kecepatan angin, dengan catatan bahwa ρ dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan udara[4].

$$\text{Daya, } P = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{t} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Energi angin merupakan energi yang fluktuatif, kecepatan angin tidak pernah konstan, kadang rendah dan bahkan tiba-tiba sangat tinggi.

Pengukuran kecepatan angin merupakan dasar perhitungan potensi energi angin. Variabel utama dalam pengukuran angin yaitu kecepatan dan arah angin. Kecepatan angin dapat diukur dengan menggunakan anemometer, sedangkan arah angin menggunakan *wind sock* atau *wind vane*.

Berdasarkan data angin, barulah dapat dilakukan pengkajian dasar maupun lanjutan sebelum membangun *power plant* (sistem pembangkit listrik tenaga angin) seperti:

- Perhitungan dan pemetaan potensi energi angin
- Karakteristik angin pada suatu daerah
- Durasi kecepatan angin produktif, dll.

Kincir Angin

Umumnya kincir angin dimanfaatkan untuk pembangkit listrik

baik skala besar maupun skala mikro sesuai dengan potensi angin di daerah pemasangan dan teknologi yang tersedia[10].

Pencegahan *Overspeed*

Cara yang paling realistis dan aman adalah dengan menggunakan '*governing system*'. Terdapat dua tipe *governing system* yaitu:

- *Yaw dan tilts*

Di mana *nacelle* dipalingkan dari posisi mengarah angin sehingga kecepatan putar bilah menurun. Kondisi berpaling hanya pada saat kecepatan angin melebihi batas yang ditentukan, kemudian kembali menghadap angin ketika kecepatan angin di bawah batas yang ditentukan[2].

- *Blade pitching*

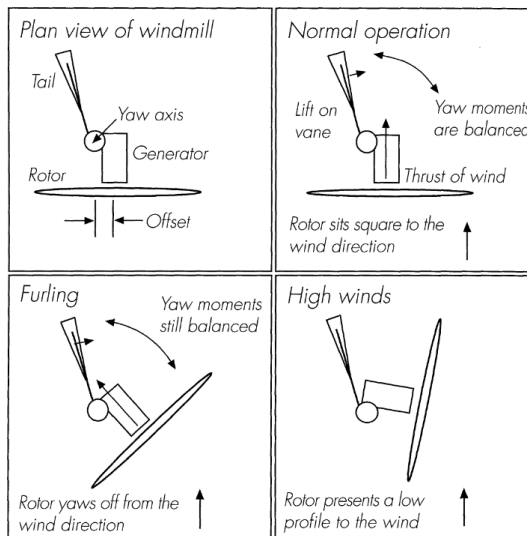
Dengan mengubah puntiran pada tiap-tiap bilah, maka sudut serang juga akan berubah, gaya angkat pada bilah menurun, sehingga kecepatan putar bilah juga akan menurun[2].

Furling Control

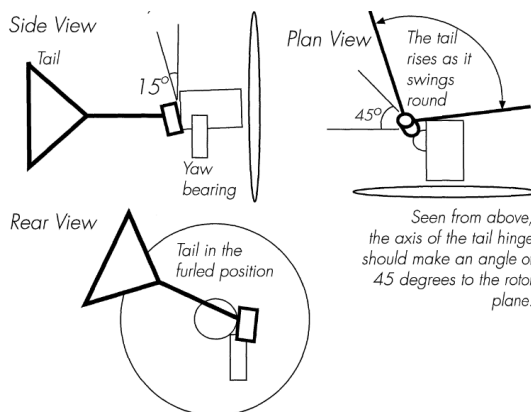
Terdapat beberapa nama dalam kelompok sistem *furling* yaitu '*autofurl*', '*furlmatic*' atau '*hinged vane safety system*'. Pada dasarnya prinsip kerja yang digunakan sama saja, dengan memanfaatkan gaya dorong dari angin. Ketika kecepatan angin normal, rotor akan selalu menghadap arah datang angin

dan berpaling jika kecepatan angin sangat tinggi sebagai upaya proteksi[2].

Agar dapat berpaling dari arah datang angin, sumbu rotor digeser dari *yaw axis*. Panjang penggeseran yang dimaksud disebut dengan ‘*offset*’, Momen untuk *yawing* akan timbul sebesar *thrust* dikalikan dengan *offset*[2].



Gambar 2.1 *Yaw governing system* pada kincir angin skala mikro[2].



Gambar 2.2 Konsep gravitasi yang digunakan untuk *furling*[2].

Untuk membuat sistem bekerja secara otomatis dapat menggunakan pegas yang dibebankan pada ekor, namun penggunaan pegas tidak dapat bertahan lama akibat pengaruh cuaca dan kelelahan (*fatigue*). Cara yang lebih baik

adalah dengan menggunakan gravitasi, yang mana ekor akan terangkat pada batas kecepatan angin tertentu dan normal kembali ketika kecepatan angin telah normal[3].

Merancang *furling* tidak bisa hanya dengan mengaplikasikan teori secara mentah, masih diperlukan *trial and error*. Berikut adalah tips dalam merancang *furling* untuk kincir angin skala mikro:

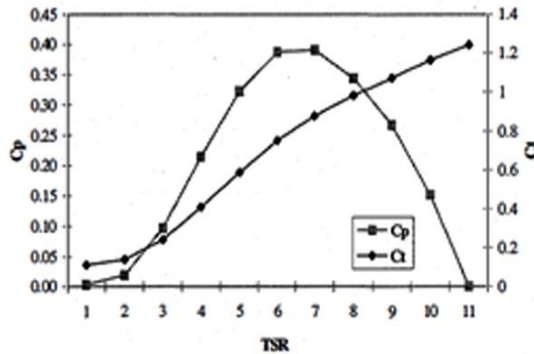
- *Offset* (jarak antara sumbu rotor dan *yaw axis*) minimal 4% dari diameter sapuan bilah[3]
- Besar luas penampang ekor seharusnya berada antara 5% dan 10% dari luas sapuan[4]
- Dengan luas penampang ekor sekitar 10% dari luas sapuan, ekor ditekuk 20% berlawanan dengan arah *offset* untuk memberikan momen yang seimbang akibat adanya *offset*[3]
- Panjang batang ekor (*tail boom*) setidaknya sebesar panjang satu bilah atau setengah dari diameter sapuan[3]
- Bentuk sirip ekor tidak terlalu berpengaruh namun tinggi (*span*) mempengaruhi gaya yang diterima[2].

Hukum Newton kedua menjadi dasar persamaan untuk menentukan gaya dorong yang diberikan angin terhadap rotor (*thrust force*) adalah[9]:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{m}{dt} \cdot dv = \dot{m} v = \rho \cdot A \cdot v^2$$

$$F_{thrust} = \rho \cdot A_{swept} \cdot v^2 \cdot C_t$$

Dimana C_t adalah koefisien gaya dorong (gaya aksial) yang bisa diketahui dengan melihat diagram $C_p - C_t - TSR$ seperti pada gambar 2.3[7].



Gambar 2.3 Diagram C_p dan C_t sebagai fungsi TSR[7]

Sedangkan gaya yang diberikan angin terhadap penampang ekor adalah:

$$F_{vane} = \rho \cdot v^2 \cdot A_{vane} \cdot \sin \alpha$$

Akibat adanya *offset* timbul momen yang disebut *thrust moment* (M_{thrust}) dengan *yaw axis* sebagai pusatnya, untuk menyeimbangkannya diperlukan momen pada ekor $M_{restoring}$ yang sama besar. Persamaan keseimbangan momen berlaku dalam sistem keseimbangan ini.

$$\sum M_{yaw} = 0$$

$$\sum M_{yaw} = M_{thrust} - M_{vane} = 0$$

$$M_{thrust} - M_{vane} = 0$$

$$M_{thrust} = M_{vane}$$

M_{thrust} adalah hasil kali F_{thrust} dengan ℓ_{offset} , M_{vane} adalah hasil kali F_{vane} pada dengan panjang ekor ℓ_{tail} . Sehingga untuk mengetahui panjang ekor yang digunakan:

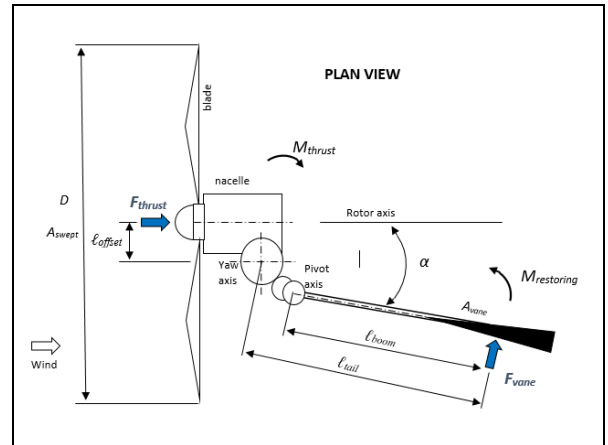
$$M_{thrust} = M_{vane}$$

$$F_{thrust} \cdot \ell_{offset} = F_{vane} \cdot \ell_{tail}$$

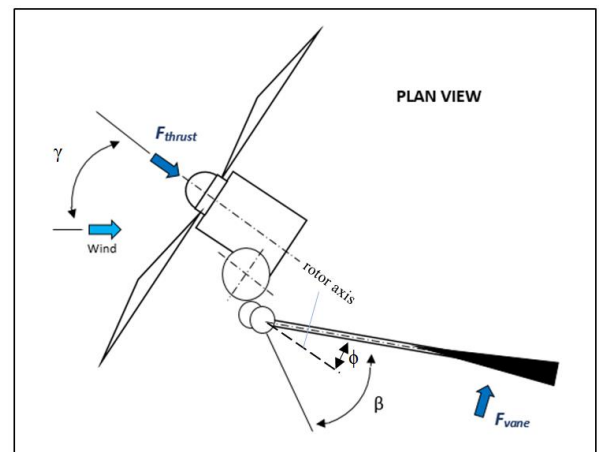
$$\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A_{swept} \cdot C_t \cdot \ell_{offset} = \rho \cdot v^2 \cdot A_{vane} \cdot \sin \alpha \cdot \ell_{tail}$$

$$\ell_{tail} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot A_{swept} \cdot C_t \cdot \ell_{offset}}{\rho \cdot v^2 \cdot A_{vane} \cdot \sin \alpha}$$

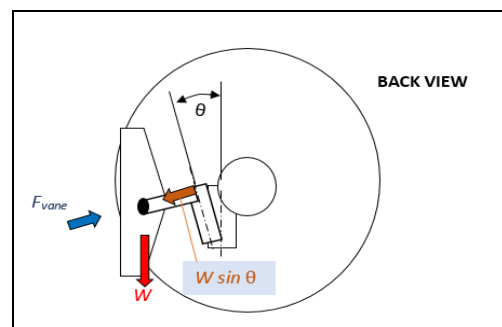
$$\ell_{tail} = \frac{M_{thrust}}{\rho \cdot v^2 \cdot A_{vane} \cdot \sin \alpha}$$



Gambar 2.4 Skema sistem *furling* kincir angin



Gambar 2.5 Sistem ketika kecepatan angin tinggi (*furled position*)



Gambar 2.6 Tampak belakang sistem ketika posisi normal

Agar ekor dapat melipat pada kecepatan angin yang diinginkan, jumlah momen yang bekerja pada sumbu pivot harus sama dengan nol pada kecepatan angin tersebut. Momen yang bekerja pada sumbu pivot yaitu momen yang disebabkan oleh gaya aerodinamika pada ekor (M_{vane}) dan momen yang disebabkan gaya berat pada ujung batang ekor (M_{weight}), dimana pusat penampang ekor pada sumbu horisontalnya terletak pada ujung ekor. Dengan demikian persamaan keseimbangannya adalah:

$$\begin{aligned}\sum M_{pivot} &= 0 \\ \sum M_{pivot} &= M_{vane} - M_{gravity} = 0 \\ M_{vane} - M_{gravity} &= 0 \\ M_{vane} &= M_{gravity}\end{aligned}$$

sehingga massa ujung ekor adalah:

$$\begin{aligned}M_{vane} &= M_{gravity} \\ F_{vane} \cdot \ell_{boom} &= F_g \cdot \ell_{boom} \\ \rho \cdot v^2 \cdot A_{vane} \cdot \sin \alpha \cdot \ell_{boom} &= m \cdot g \cdot \sin \theta \cdot \ell_{boom} \\ m &= \frac{\rho \cdot v^2 \cdot A_{vane} \cdot \sin \alpha \cdot \ell_{boom}}{g \cdot \sin \theta \cdot \ell_{boom}}\end{aligned}$$

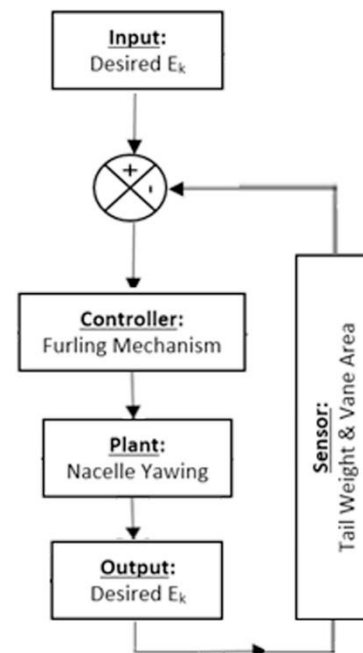
Ketika kecepatan angin meningkat hingga gaya pada penampang ekor F_{vane} lebih besar daripada gaya yang melawan arah putaran ekor F_g maka ekor akan berputar, besarnya gaya yang tersisa itu disebut dengan gaya *furling* F_{furl} [9].

$$F_{furl} = F_{vane} - F_g$$

3. METODOLOGI PENELITIAN

Perancangan

Fungsi dari *furling control* adalah mempertahankan posisi ketika kecepatan angin normal untuk mendapat energi yang optimal dan berpaling ketika kecepatan angin terlalu tinggi sebagai sistem proteksi. Diagram blok pada gambar 3.1 menjelaskan cara kerja sistem kontrol *furling* yang dirancang.



Gambar 3.1 Diagram blok sistem kontrol *furling*

Energi kinetik yang diterima kincir dapat dipengaruhi oleh kecepatan angin dan luas sapuan rotor, dengan memalingkan rotor dari arah angin maka luas bidang yang tegak lurus terhadap garis arah angin akan berkurang, sehingga semakin kecil energi kinetik yang diterima.

Furling control yang dirancang merupakan sistem kontrol mekanik, lingkaran tertutup (*closed loop*) dan otomatis. Berpalingnya kincir angin dari arah angin diakibatkan momen thrust

yang diimbangi momen furling. Ekor dapat melipat dan kembali ke posisi semula secara otomatis dengan memanfaatkan gaya angin dan berat ekor.

Kriteria rancangan terdapat pada batas kecepatan angin di mana sistem mulai bekerja untuk melakukan penyelamatan. Dalam rancangan ini, kecepatan angin $v = 8$ m/s. Selain v yang merupakan batas untuk memulai penyelamatan, v juga merupakan batas untuk kembali ke posisi normal, artinya ketika kincir berada pada posisi berpaling ($v > 8$ m/s) lalu kecepatan angin mengalami penurunan hingga $v < 8$ m/s, maka sistem bekerja secara otomatis untuk mengembalikan kincir ke posisi normal.

Tahapan Perancangan

- Data awal yang diperlukan antara lain:
 - D = diameter rotor
 - TSR = perbandingan kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin, (*Tip Speed Ratio*)
 - v_f = kecepatan angin ketika dimulainya penyelamatan (*furling windspeed*).
- Menentukan *rotor offset* (l_{offset})
- Menghitung *thrust force* dan *thrust moment*

- Menentukan Bentuk dan luas penampang ekor M
- Menentukan panjang ekor dan beratnya. M

Untuk mendukung agar sistem berjalan sesuai rancangan, material yang digunakan dipilih dengan pertimbangan kekuatan, mampu buat, mampu mesin dan ketersediaannya. Pada sistem ini material yang digunakan yaitu:

- Bilah : PVC
- Flange : Aluminium
- Nacelle : Besi
- Yaw Shaft : Baja Karbon
- Pivot Shaft : Baja Karbon
- Tail Boom : Pipa Galvanis
- Tail Vane : Aluminium Composite
- D Panel

Perhitungan dan Kondisi Batas

Untuk menentukan massa ujung ekor m , panjang l_{boom} , dan luas penampang ekor A dilakukan perhitungan menggunakan aplikasi Microsoft Excel. Data awal perhitungan diberikan berdasarkan asumsi kondisi lingkungan (ρ) udara dari tabel fluida dan batasan masalah.

Informasi awal yang perlu diketahui adalah spesifikasi kincir yang diinginkan, informasi tersebut adalah sebagai berikut:

$$\rho_{udara} : 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$$D : 1 \text{ m}$$

$$\text{TSR} : 6 \text{ (asumsi)}$$

$$\text{Furling windspeed, } v_f : 8 \text{ m/s}$$

Melalui informasi tersebut dapat ditentukan dimensi rancangan sebagai berikut:

- *otor offset* (ℓ_{offset})

Panjang offset minimum sebesar 4% dari diameter sapuan bilah, dalam rancangan ini diambil ukuran minimum tersebut, sehingga:

$$\ell_{offset} = \frac{4}{100} \times 1 \text{ m} = 0,04 \text{ m}$$

- *hrust Force* (F_{thrust})

Gaya dorong yang bekerja pada bilah akibat pengaruh kecepatan angin (thrust force) dipengaruhi oleh densitas udara, luas sapuan, kecepatan angin dan *coefficient of thrust* (C_t), nilai C_t dapat ditentukan dengan melihat diagram pada gambar 2.3 sehingga:

$$\text{TSR} = 6$$

$$C_t = 0,75$$

$$A_{swept} = \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} 3,14 \cdot (1 \text{ m})^2 = 0,785 \text{ m}^2$$

$$F_{thrust} = \rho_{udara} \cdot A_{swept} \cdot C_t \cdot v_f^2$$

$$= 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,785 \text{ m}^2 \cdot 0,75 \cdot (8 \text{ m/s})^2$$

$$= 46,158 \text{ N}$$

- *hrust Momment* (M_{thrust})

Akibat adanya *offset* (jarak antara *rotor axis* dan *yaw axis*) maka timbul momen sebesar *thrust force* dikalikan *offset*, sehingga:

$$M_{thrust} = F_{thrust} \cdot \ell_{offset}$$

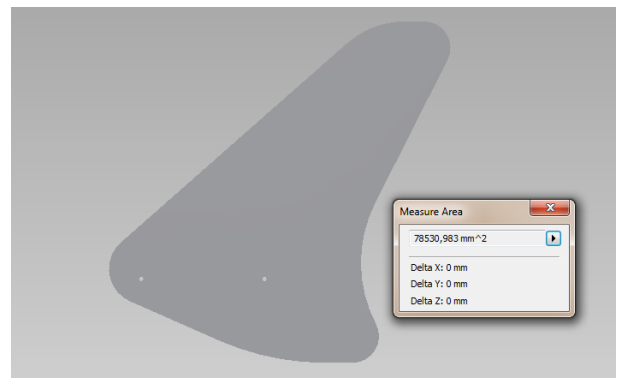
$$= 46,158 \text{ N} \cdot 0,04 \text{ m}$$

$$= 1,84632 \text{ N.m}$$

- irip Ekor (*Tail Vane*)

Ukuran yang realistis untuk luas penampang sirip ekor (vane) yaitu antara 5% hingga 10% dari luas sapuan, dalam perancangan ini digunakan luas penampang ekor sebesar 10 %, sehingga:

$$A_{vane} = \frac{10}{100} \cdot 0,785 \text{ m}^2 = 0,0785 \text{ m}^2$$



Gambar 3.2 Dimensi *tail vane* yang dirancang

- *estoring Moment*

Diperlukan momen sebesar M_{thrust} pada ekor untuk tetap menghadapkan rotor ke arah angin, sehingga ekor harus dibelokkan sebesar α . Untuk A_{vane} antara 5% - 10% A_{swept} , besar sudut α yaitu 10° hingga 20° . Dalam penelitian ini digunakan $\alpha = 20^\circ$, sehingga:

$$F_{vane} = \rho_{udara} \cdot A_{vane} \cdot v_f^2 \cdot \sin \alpha$$

$$= 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,048335 \text{ m}^2 \cdot (8 \text{ m/s})^2 \cdot \sin 20^\circ$$

$$= 2,104929 \text{ N}$$

$$M_{thrust} = M_{restoring}$$

$$\ell_{tail} = \frac{M_{restoring}}{F_{vane}} = \frac{1,84632 \text{ N.m}}{2,104929 \text{ N}} = 0,877141 \text{ m}$$

•

aya Gravitasi pada Ekor

Sebagai fungsi mempertahankan posisi ketika kecepatan angin normal dan bergeser ketika *overspeed*, digunakan mekanisme *inclined pivot axis*, di mana sumbu engsel ekor (pivot) dimiringkan membentuk sudut sebesar $\theta = 15^\circ$ terhadap vertikal berlawanan arah *rotor offset*. Untuk mendapatkan keseimbangan momen pada sumbu pivot, maka $F_g = F_{vane}$ dengan syarat ujung batang ekor berada satu garis sumbu vertikal terhadap titik pusat penampang ekor, sehingga:

$$\begin{aligned} F_g &= m \cdot g \cdot \sin \theta \\ m &= \frac{F_g}{g \cdot \sin \theta} \\ &= \frac{2,104929 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \sin 15^\circ} \\ &= 0,829034 \text{ kg} \end{aligned}$$

•

anjang Batang Ekor

Batang ekor berpusat pada sumbu pivot, jarak antara *yaw axis* dan *pivot axis* dapat ditentukan dengan panjang sumbu pivot dikali sinus sudut pivot, sehingga panjang batang ekor adalah:

$$\begin{aligned} \ell_{boom} &= \ell_{tail} - x \\ &= \ell_{tail} - (\ell_{pivot} \cdot \sin \theta) \\ &= 0,877141 \text{ m} - (0,2 \text{ m} \cdot \sin 15^\circ) \\ &= 0,825378 \text{ m} \end{aligned}$$

Alat yang Digunakan

1. *Anemometer* - digunakan untuk mengukur kecepatan angin pada saat pengujian.
2. *Tachometer* - berfungsi untuk mengetahui putaran rotor kincir angin.
3. Neraca timbang - untuk mengukur massa ujung ekor kincir.
4. Penunjuk Arah Angin - *wind vane* berperan sebagai penunjuk arah angin (*Wind Direction Sensor*)
5. Kamera - digunakan dua buah kamera. Kamera 1 untuk merekam gerakan kincir angin dan kamera 2 untuk merekam tampilan pada alat ukur selama pengujian yang kemudian hasil rekaman dapat dianalisa lebih lanjut.
6. Obrolan bak terbuka - (*pick-up*) digunakan untuk merekam kecepatan angin yang diberikan pada kincir angin.

N

P

M

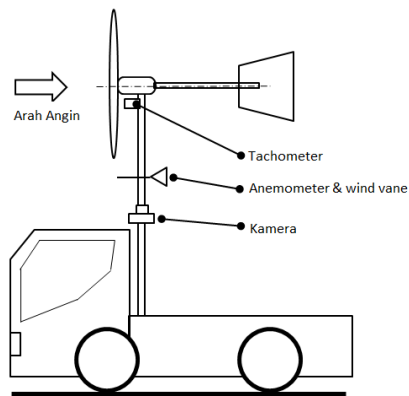
Pengambilan Data

Furling bekerja dengan melipat ekor sehingga *nacelle* berputar berpaling dari arah angin, gerakan tersebut membentuk sudut yaitu sudut antara posisi ekor terlipat dengan posisi normal Φ dan sudut antara sumbu rotor dengan garis arah angin γ . Dengan berpalingnya *nacelle* dari arah angin maka putaran bilah tidak terus menerus meningkat seiring kenaikan kecepatan angin.

Sehingga untuk mengetahui kerja sistem *furling* maka data yang perlu diambil ketika melakukan pengujian adalah:

1. Kecepatan angin, v (m/s)
2. Sudut *Furling*, Φ ($^{\circ}$)
3. Sudut *Yawing*, γ ($^{\circ}$)
4. Putaran bilah, n (rpm)

Kecepatan angin direkayasa menggunakan laju mobil, dengan syarat bahwa pengujian dilakukan pada saat tidak ada pengaruh angin luar. Kondisi tersebut didapatkan pada pagi hari antara pukul 05.30 WIB hingga 08.30 WIB.



Gambar 3.3 Instalasi alat ukur untuk perekaman data

Proses perekaman data dibantu dengan dua kamera, satu unit untuk merekam tampilan alat ukur (tachometer dan anemometer) dan satu unit untuk merekam gerakan *yawing* dan *furling*. Hal ini dilakukan merekam perubahan sudut *yawing* dan *furling*.

Untuk mensinkronkan hasil rekaman kamera 1 (kincir) dan kamera 2 (display) diperlukan proses penggabungan video menggunakan program komputer. Masing-masing kamera memiliki kemampuan untuk

merekam video dan audio, aba-aba suara hitung mundur menjadi indikator dimulainya detik pertama pengambilan data.

Pengolahan Data

Rekaman video digabungkan menggunakan aplikasi Camtasia Studio untuk mensinkronkan data gerak *furling* dengan data putaran bilah dan kecepatan angin. Analisa sudut dilakukan berdasarkan analisa gambar hasil *screenshot* setiap perubahan kecepatan angin dengan selisih 0,5 m/s yang kemudian dilakukan pengukuran sudut menggunakan aplikasi Autodesk Inventor

Perhitungan dilakukan menggunakan aplikasi Microsoft Excel. Data hasil perhitungan diplot dalam grafik berdasarkan variabel dan respon yang didapatkan, sehingga dapat dilihat pengaruh variasi panjang ekor terhadap kerja *furling*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Perhitungan Rancangan

Dengan mengacu pada dimensi hasil perhitungan rancangan tersebut dibuat model kincir angin yang sesungguhnya. Pembuatan sistem *furling* untuk kincir angin dapat dilihat pada gambar 4.1

Tabel 4.1 Data perhitungan rancangan

Simbol	Nilai	Satuan	Simbol	Nilai	Satuan
V_f	8.00	m/s	$M_{restoring}$	1.85	N.m
D	1.00	M	F_{vane}	2.10	N
P	1.23	kg/m ³	I_{tail}	0.88	m

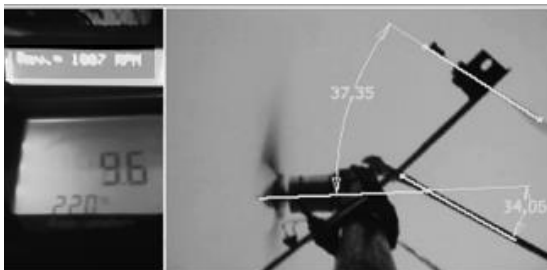
G	9.81	m/s ²	I_{pivot}	0.20	m
Ct	0.75	-	Θ	15.00	deg.
A_{Swept}	0.79	m ²	X_{boom}	0.05	m
l_{offset}	0.04	M	l_{boom}	0.83	m
F_{thrust}	46.16	N	M_{vane}	1.74	N.m
M_T	1.85	N.m	M_{weight}	1.74	N.m
A_{vane}	0.08	m ²	F_g	2.10	N
α	20.00	deg.	M	0.83	kg



Gambar 4.1 Kincir angin hasil perancangan

Pengujian *Furling*

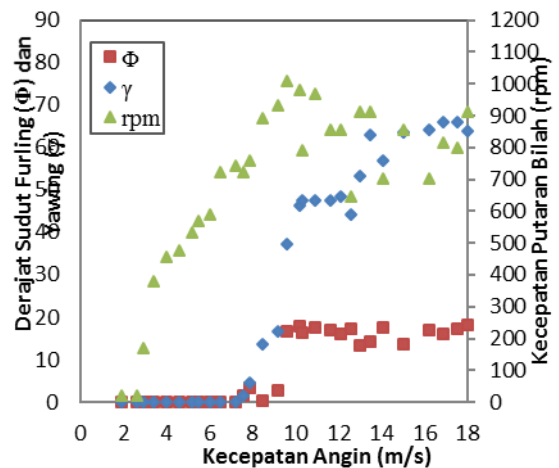
Pengujian dilakukan untuk mengetahui kerja rancangan sistem *furling* dengan menaikkan kecepatan angin secara perlahan mulai dari 2 - 18 m/s. Hasil perekaman data pengujian dapat dilihat pada gambar 4.2, dimana kamera 1 menampilkan pergerakan *yawing* dan *furling* sementara kamera 2 menampilkan nilai kecepatan angin (m/s) dan kecepatan putar bilah (rpm).



Gambar 4.2 Hasil rekaman data dan pengukuran sudut

Hasil Pengujian *Furling*

Pada Gambar 4.3 menampilkan grafik hasil pengujian sistem *furling*. Dimana sumbu x adalah kecepatan angin dalam meter per detik, sumbu y kanan adalah putaran bilah (n) dalam *revolution per minute* (rpm) dan sumbu y kiri adalah sudut *furling* (Φ) dan *yawing* (γ) yang terbentuk.



Gambar 4.3 Grafik hasil pengujian

Dalam perancangan diinginkan bahwa sudut *yawing* γ dan *furling* Φ mulai terbentuk pada kecepatan angin 8 m/s, kenyataannya mekanisme *furling* mulai berkerja pada kecepatan 7,5 m/s dengan membentuk sudut *yawing* 1,5° dan sudut *furling* 1,5° dengan kecepatan bilah 720 rpm. Hasil ini telah mendekati v_f rancangan dengan selisih 0,5 m/s. Pada kecepatan angin 8 m/s terbentuk sudut *yawing* 4,5° dan sudut *furling* 3°.

Bilah mulai berputar pada kecepatan angin 2 m/s dan terus berputar semakin cepat seiring kenaikan kecepatan angin. Meskipun mekanisme *furling* dan *yawing* telah mulai berkerja pada kecepatan angin 7,5 m/s sebesar 1,5°, namun putaran bilah terus

meningkat hingga puncaknya pada kecepatan angin 9,6 m/s dengan putaran bilah maksimum sebesar 1007 rpm, sudut *yawing* 37° dan *furling* 16°.

Dengan terbentuknya sudut *yawing*, energi kinetik yang ditangkap bilah akan berkurang. Fenomena inilah yang membatasi laju kenaikan putaran rotor, meskipun kecepatan angin dinaikan, maka semakin besar sudut *furling* dan *yawing* yang terbentuk dan putaran bilah menunjukkan tren mendatar lalu menurun hingga berkisar 900 rpm pada kecepatan angin 18 m/s, sudut *yawing* berkisar 63° – 66° dan sudut *furling* 18,3°.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan mekanisme *furling* kincir angin skala mikro dan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan:

1. secara keseluruhan sistem yang dirancang bekerja dengan baik.
2. terbentuknya sudut *furling* dan *yawing* mulai terjadi pada kecepatan 7,5 m/s sedikit lebih rendah dari rencana awal yaitu 8 m/s. Pada kecepatan angin 7,5 m/s telah terbentuk sudut *yawing* 1,5° dan sudut *furling* 1,5° dengan kecepatan bilah 720 rpm.
3. perancangan mekanisme *furling* berhasil menahan laju kenaikan putaran bilah

pada 1007 rpm dengan sudut *yawing* 37° dan *furling* 16° pada kecepatan angin 9,5 m/s.

4. seiring meningkatnya kecepatan angin, semakin besar sudut *furling* dan *yawing* yang terbentuk. Pada kecepatan angin 18 m/s, sudut *yawing* berkisar 63° – 66° dan sudut *furling* 18°, sehingga berdampak menurunnya putaran bilah hingga 900 rpm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Iggott Hugh, 2003, How to Build a Wind Turbine
- [2]. Piggott Hugh, 2009, Windpower Workshop, British, British Wind Energy Association
- [3]. Bartmann Dan, Dan Fink, 2009, Homebrew Wind Power: A Hands-on Guide to Harnessing the Wind, Canada
- [4]. White Frank M., 2008, Fluid Mechanics Sixth Edition, New York, McGraw-Hill
- [5]. Chancey Jennifer, Gregor Archibald, Jordan Braun, Kevin Pallard, 2008, Inexpensive Wind Turbine , Dalhousie University
- [6]. C Probst Oliver, Jaime Martinez, Jorge Elizondo, Oswaldo Monroy, 2011, Small Wind Turbine Technology, 'Wind Turbine', Dr.

Ibrahim Al-Bahadly (Ed.), ISBN:
978-307-221-0, Shanghai, InTech

- [7]. Muljadi E., T. Forsyth, C.P. Butterfield, 1998, Soft-stall Control Versus *Furling* Control for Small Wind Turbine Power Regulation, Colorado, NREL.
- [8]. Anonim, 2007, Building the Basic PVC Wind Turbine, United States, Kid Wind Project
- [9]. Strong Simon J., 2008, Design of Small Wind Turbine, University of Southern Queensland.