

RANCANGAN DAN ANALISA SISTEM ORIENTASI TURBIN ANGIN KAPASITAS 2,5 KW

Agus Bayu Utama

Peneliti Pusat Teknologi Dirgantara Terapan, LAPAN

ABSTRACT

The orientation (safety) system with eccentric rotor and hinge vane has been designed for small windturbine 2.5 kW and then the static analysis of mathematic formula has been done basically a theory of balance of moment at a tower axis with 2 condition: the wind speed up to a rated wind speed ($V \leq V_{\text{design}}$) and the wind above a rated wind speed ($V > V_{\text{design}}$). With a rated wind speed $V_{\text{desain}} = 10 \text{ m/s}$, at $V \leq V_{\text{design}}$ is the value of a angle $\gamma_0 = 6.16^\circ$. The weight of tail G from 250N has to be degraded to 209N, that is with changing the weight of tail bar to $m_1=12.5 \text{ kg}$ and the weight of main vane to $m_2=8.4 \text{ kg}$. At the condition $V > V_{\text{desain}}$ begin the rotor to rotate with the angle δ .

Keywords: *Small windturbine, Orientation (safety) system*

ABSTRAK

Telah dirancang satu sistem orientasi dengan rotor eksentrik dan ekor pengarah dengan *hinge* (sumbu gantung) untuk turbin angin skala kecil kapasitas 2.5 kW, kemudian dilakukan analisa statis rumusan matematis berdasarkan teori kesetimbangan momen pada sumbu menara pada 2 kondisi kecepatan angin yaitu kecepatan angin sampai kecepatan angin rancangan ($V \leq V_{\text{disain}}$) dan kecepatan angin di atas kecepatan angin rancangan ($V > V_{\text{disain}}$). Dengan kecepatan angin rancangan $V_{\text{disain}} = 10 \text{ m/s}$, maka nilai γ_0 (sudut serang angin terhadap daun ekor) pada kondisi $V \leq V_{\text{disain}}$, adalah 6.16° . Nilai berat ekor G yang tadinya 250 N harus diturunkan menjadi 209 N, yaitu dengan mengubah nilai berat batang ekor menjadi $m_1=12.5\text{kg}$ dan nilai berat daun ekor menjadi $m_2=8.4 \text{ kg}$. Pada kondisi $V > V_{\text{disain}}$ rotor mulai berputar dengan sudut serang angin terhadap rotor δ .

Kata Kunci: *Turbin angin skala kecil, Sistem orientasi*

1 PENDAHULUAN

Turbin angin dapat diklasifikasikan berdasarkan rancangan, gaya penggerak, orientasi poros rotor dan kapasitas daya (Manual Pemanfaatan Sistem Konversi Energi Angin, 1994/1995). Berdasarkan kapasitas daya, turbin angin dikelompokkan dalam tiga kategori yaitu kecil ($< 10 \text{ kW}$), menengah ($10 - 100 \text{ kW}$) dan besar ($> 100 \text{ kW}$).

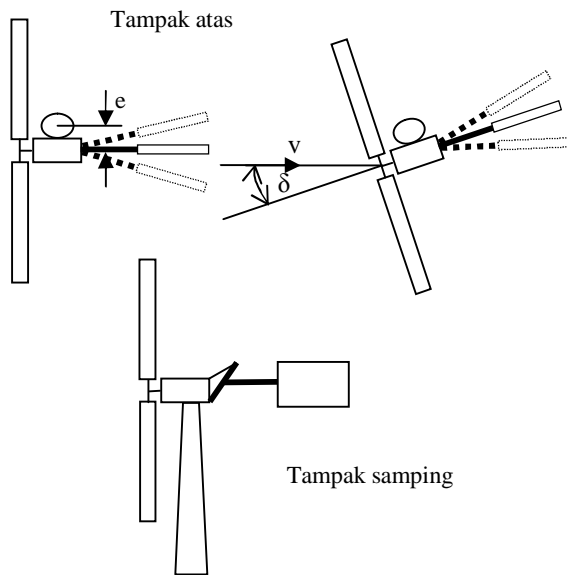
Sebuah turbin angin terdiri dari beberapa komponen penting yaitu menara, rotor (sudu), transmisi (*gearbox*), generator, sistem orientasi dan sistem pengaturan (sistem kontrol). Setiap komponen

mempunyai peranan penting agar turbin angin bisa berfungsi dengan baik seperti yang diharapkan.

Sistem orientasi diperlukan dengan tujuan: mengatur posisi rotor pada variasi kecepatan angin dan arah angin sehingga diharapkan dapat diperoleh putaran rotor mendekati konstan sesuai rancangan. Untuk turbin angin dengan diameter rotor lebih besar dari 10 meter maka sistem orientasi yang dipakai adalah sistem orientasi aktif artinya pengaturan posisi rotor dengan menggunakan motor listrik [Gasch, Robert, 2005].

2 RANCANGAN SISTEM ORIENTASI

Model yang digunakan adalah sistem orientasi dengan rotor eksentrik dan ekor pengarah dengan *hinge* (sumbu gantung) seperti terlihat pada Gambar 2-1. Model ini selain mengatur dan mengarahkan turbin angin (rotor) menuju arah datangnya angin juga membatasi besarnya kecepatan angin yang bekerja pada rotor. Pada kecepatan angin tertentu sesuai rancangan, rotor akan mulai berbelok karena ada momen akibat daya dorong pada sudu. Momen ini besarnya tergantung dari besarnya e (jarak titik tengah tower ke rotor). Kemudian pada sudut serang tertentu δ akan diimbangi oleh momen pada ekor pengarah. Ekor pengarah pada disain dengan *hinge* bisa bergerak ke kiri dan ke kanan sesuai dengan sudut rancangan.



Gambar 2-1: Sistem orientasi dengan rotor eksentrik, ekor pengarah dengan *hinge*

Pada rancangan sistem orientasi turbin angin LPN 2,5 kW ini ada parameter yang sudah diketahui sebagai masukan dan ada parameter yang harus dihitung sehingga mekanisme kerja sistem orientasi yang dirancang sesuai yang diharapkan.

Parameter yang diketahui antara lain:
 Luas sapuan rotor $A_r = \pi R^2 = 21.57 \text{ m}^2$
 dengan Rotorradius $R = 2.621 \text{ m}$

- Luas sisi rotor (*chord*) $A_{rs} = 0.02 \text{ m}^2$
- Luas daun ekor $A_v = 0.7 \text{ m}^2$
- Jarak eksentrik $e = 0.06 \text{ m}$
- Jarak sumbu tower ke rotor $f = 0.509 \text{ m}$
- Jarak sumbu tower ke sumbu gantung $i = 0.154 \text{ m}$
- Berat batang ekor $m_1 = 15 \text{ kg}$
- Berat daun ekor $m_2 = 10 \text{ kg}$
- Panjang batang ekor $l = 3 \text{ m}$
- Panjang dan lebar daun ekor $a = 1 \text{ m}$
- Lebar daun ekor $b = 0.7 \text{ m}$
- Koefisien gaya rotor $C_t = 8/9$
- Koefisien gaya sisi rotor $C_f = 8/9$
- Koefisien gaya daun ekor $C_N = 2.6 * a$

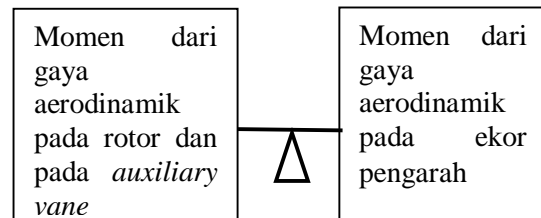
Parameter yang tidak diketahui:

- δ : Sudut serang angin terhadap rotor
- γ_0 : Sudut serang angin terhadap daun ekor pada kondisi $V \leq V_{disain}$
- α, γ : Sudut serang angin terhadap daun ekor pada kondisi $V > V_{disain}$
- V : Kecepatan angin m/s

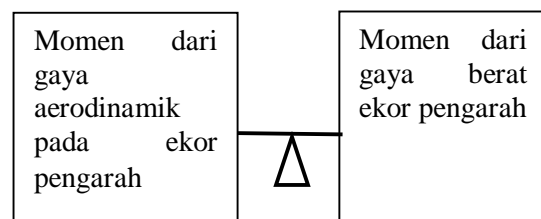
3 DASAR TEORI

Pada analisa statik posisi rotor, ekor pengarah dan *auxiliary vane* (daun ekor tambahan) adalah stabil pada setiap kecepatan angin artinya momen gaya pada sumbu menara dan sumbu gantung (*hinge*) selalu seimbang [Lysen, E.H, 1982].

Sumbu Menara:



Sumbu Gantung (*hinge*):



Adapun gaya-gaya yang bekerja dapat diuraikan sebagai berikut:

Gaya dorong (*thrust*) pada rotor:

$$F_{rt} = C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V \cdot \cos \delta)^2 \cdot A_r \quad (3-1)$$

Gaya dorong pada sisi rotor:

$$F_{rs} = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V \cdot \sin \delta)^2 \cdot A_{rs} \quad (3-2)$$

Gaya pada daun ekor:

$$F_v = C_N \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (1-a)^2 \cdot V^2 \cdot A_v \quad (3-3)$$

Gaya berat pada ekor:

$$F_{vg} = G \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \gamma \quad (3-4)$$

Gaya dorong pada daun ekor tambahan:

$$F_a = C_{Na} \cdot (90^\circ - \delta - \xi) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_a \cdot \cos \xi \quad (3-5)$$

Kesetimbangan momen pada sumbu menara:

$$F_{rt} \cdot e + F_{rs} \cdot f + F_a \cdot R_a = F_v \cdot LR_v$$

Kesetimbangan momen pada sumbu gantung:

$$F_v \cdot R_v = F_{vg} \cdot R_G$$

3.1 Kesetimbangan Momen pada Sumbu Menara Kondisi 1:

Sampai dengan kecepatan angin desain $V = V_{disain}$, rotor masih tegak lurus terhadap angin ($\delta = 0^\circ$) dengan kecepatan putar : $\Omega_{max} = \lambda V_{disain} / R$.

$$F_{rt} \cdot e + F_{rs} \cdot f + F_a \cdot R_a = F_v \cdot LR_v$$

$$F_{rt} \cdot e = F_v \cdot LR_v \quad (3-6)$$

$$\left[C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V \cdot \cos \delta)^2 \cdot A_r \right] \cdot e = F_v \cdot [h \cdot \cos \gamma_0 + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

sehingga :

$$\left[C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{disain}^2 \cdot A_r \right] \cdot e = \left[C_N \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (1-a)^2 \cdot V_{disain}^2 \cdot A_v \right] \cdot [h \cdot \cos \gamma_0 + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

$$C_t \cdot \frac{A_r}{A_v} \cdot \frac{1}{(1-a)^2} \cdot e = C_N \cdot [h \cdot \cos \gamma_0 + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

dengan $C_N = 2.6 \cdot \gamma_0$, in Radian untuk $0^\circ < \gamma_0 < 40^\circ$

$$C_t \cdot \frac{A_r}{A_v} \cdot \frac{1}{(1-a)^2} \cdot e = 2.6 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \gamma_0 \cdot [h \cdot \cos \gamma_0 + R_v \cdot \cos \varepsilon] \quad (3-7)$$

dengan program matematik yang sederhana semisal excel, γ_0 bisa didapat

atau dengan memakai persamaan lain:

$$\left[C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{disain}^2 \cdot A_r \right] \cdot e = F_{vg} \cdot \frac{R_G}{R_v} \cdot [h \cdot \cos \gamma_0 + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

$$\left[C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{disain}^2 \cdot A_r \right] \cdot e = G \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \gamma_0 \cdot \frac{R_G}{R_v} \cdot [h \cdot \cos \gamma_0 + R_v \cdot \cos \varepsilon] \quad (3-8)$$

nilai γ_0 bisa didapat

jika γ_0 hasil pencarian dengan persamaan (3-7) dan (3-8) tidak sama, berarti kesetimbangan momen pada sumbu gantung (*hinge*) belum sama.

jika γ_0 hasil pencarian dengan persamaan (3-7) kita ambil, maka dicari nilai G :

$$G = \left[2.6 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (1-a)^2 \cdot V_{disain}^2 \cdot A_r \right] \cdot \frac{R_v}{R_G \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \gamma_0} \quad (3-9)$$

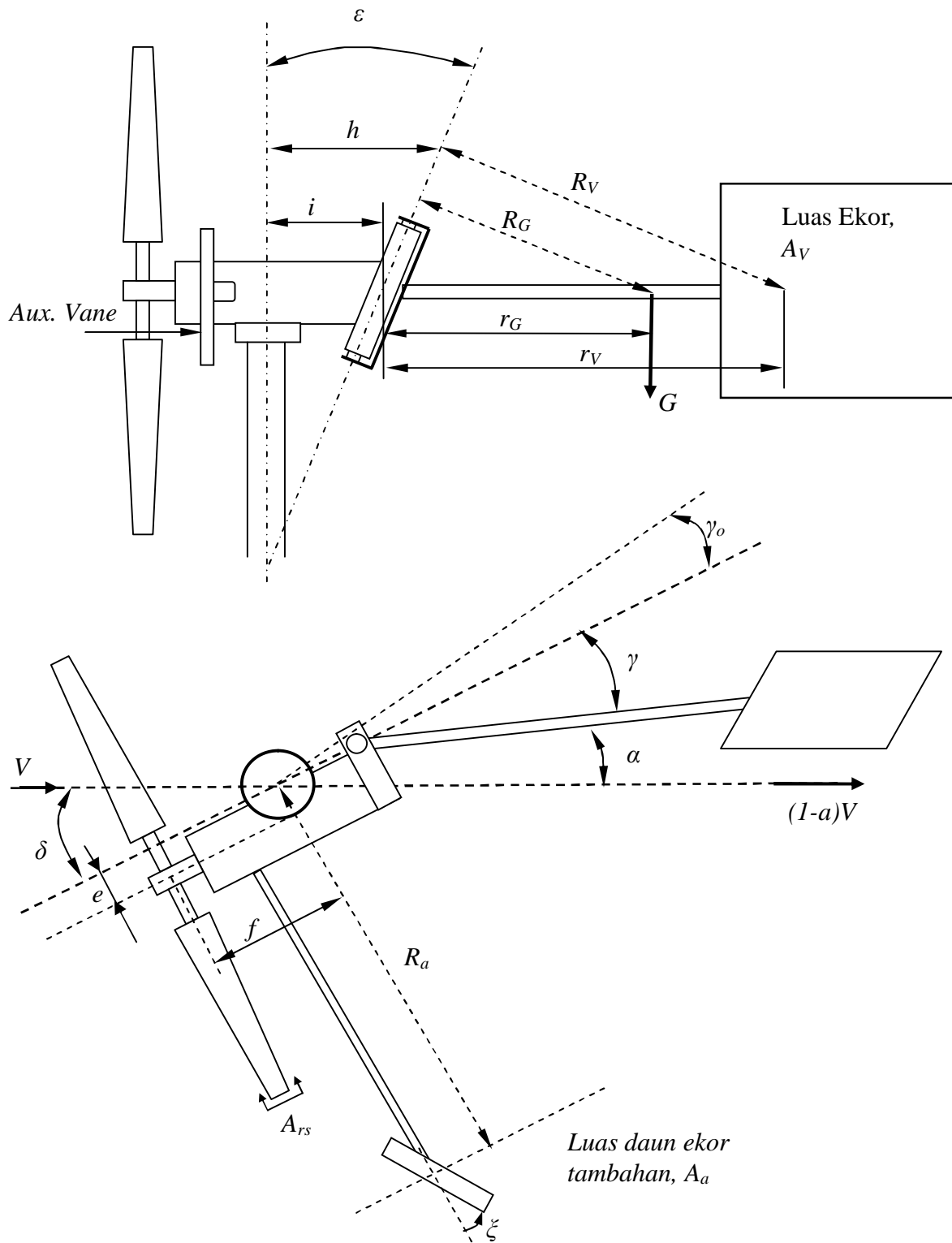
jika γ_0 hasil pencarian dengan persamaan (3-8) kita ambil, maka dicari nilai A_v :

$$A_v = \frac{G \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \gamma_0}{\left[2.6 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \gamma_0 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (1-a)^2 \cdot V_{disain}^2 \right]} \cdot \frac{R_G}{R_v} \quad (3-10)$$

3.2 Kesetimbangan Momen pada Sumbu Menara Kondisi 2:

Ketika kecepatan angin melebihi kecepatan angin rancangan ($V \geq V_{disain}$), maka: $\Omega_\delta = \Omega_{max} = \lambda(V \cos \delta) / R$

Sehingga: $V_{disain} = V \cdot \cos \delta \Rightarrow \delta = \arccos \frac{V_{disain}}{V}$



Gambar 3-1: Skema berbagai parameter yang diperlukan pada analisis kesetimbangan momen

$$F_{rt} \cdot e + F_{rs} \cdot f + F_a \cdot R_a = F_v \cdot LR_v$$

$$F_{rt} \cdot e + F_{rs} \cdot f = F_v \cdot LR_v \quad (3-11)$$

$$\left[C_n \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V \cdot \cos \delta)^2 \cdot A \right] \cdot e + \left[C_n \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V \cdot \sin \delta)^2 \cdot A_n \right] \cdot f = F_v \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

sehingga

$$\left[C_n \cdot \cos^2 \delta \cdot A \cdot e + C_n \cdot \sin^2 \delta \cdot A_n \cdot f \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_n \cdot (1-a)^2 \cdot A_v \right] \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

$$\left[C_n \cdot \cos^2 \delta \cdot A \cdot e + C_n \cdot \sin^2 \delta \cdot A_n \cdot f \right] = \left[C_n \cdot (1-a)^2 \cdot A_v \right] \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

dengan $C_n = 2.6 \cdot \alpha$, in Radian untuk

$$0^\circ < \alpha < 40^\circ, \delta = \gamma + \alpha, \alpha = \delta - \gamma$$

$$\left[C_n \cdot \cos^2 \delta \cdot A \cdot e + C_n \cdot \sin^2 \delta \cdot A_n \cdot f \right] = \left[2.6 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \alpha \cdot (1-a)^2 \cdot A_v \right] \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

$$\left[C_n \cdot \cos^2 \delta \cdot A \cdot e + C_n \cdot \sin^2 \delta \cdot A_n \cdot f \right] = \left[2.6 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (\delta - \gamma) \cdot (1-a)^2 \cdot A_v \right] \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \varepsilon]$$

$$[h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \varepsilon] \quad (3-12)$$

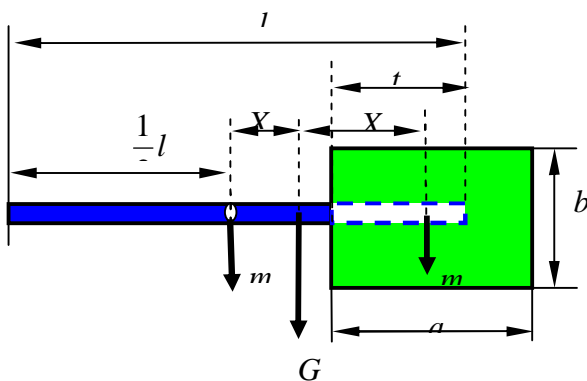
dengan program matematik yang sederhana semisal excel, γ_0 bisa didapat, kemudian didapat nilai α .

jika nilai α tidak memenuhi $0^\circ < \alpha < 40^\circ$, maka dipakai persamaan (3-12b)

dengan $C_n = 1.1$, untuk $40^\circ < \alpha < 90^\circ$

$[C_n \cdot \cos^3 \delta \cdot A_n \cdot e + C_n \cdot \sin^3 \delta \cdot A_n \cdot f] = [1.1 \cdot (1-a)^3 \cdot A_v] \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \varepsilon]$
 Nilai γ_0 bisa didapat, kemudian didapat nilai α .

3.3 Radius Titik Berat Ekor Pengarah r_G dan Radius Daun Ekor r_v :



Gambar 3-2: Skema berbagai parameter dalam menentukan r_G dan r_v

Kesetimbangan momen di titik G adalah:

$$X_1 \cdot m_1 \cdot g = X_2 \cdot m_2 \cdot g \quad (3-13)$$

Dengan $X_2 = \frac{1}{2}l - X_1 - t + \frac{1}{2}a$ dan

$t = 0 \dots \dots a$, maka:

$$X_1 \cdot m_1 = m_2 \cdot [\frac{1}{2}l - X_1 - t + \frac{1}{2}a]$$

$$(m_1 + m_2) \cdot X_1 = m_2 \cdot [\frac{1}{2}l - t + \frac{1}{2}a]$$

$$X_1 = \frac{m_2}{(m_1 + m_2)} \cdot [\frac{1}{2}l - t + \frac{1}{2}a] \quad (3-14)$$

Setelah X_1 didapat maka:

Radius titik berat ekor pengarah

$$r_G = \frac{1}{2}l + X_1 \quad (3-15)$$

$$\text{Radius daun ekor } r_v = l - t + \frac{1}{4}a \quad (3-16)$$

3.4 Panjang lengan h:

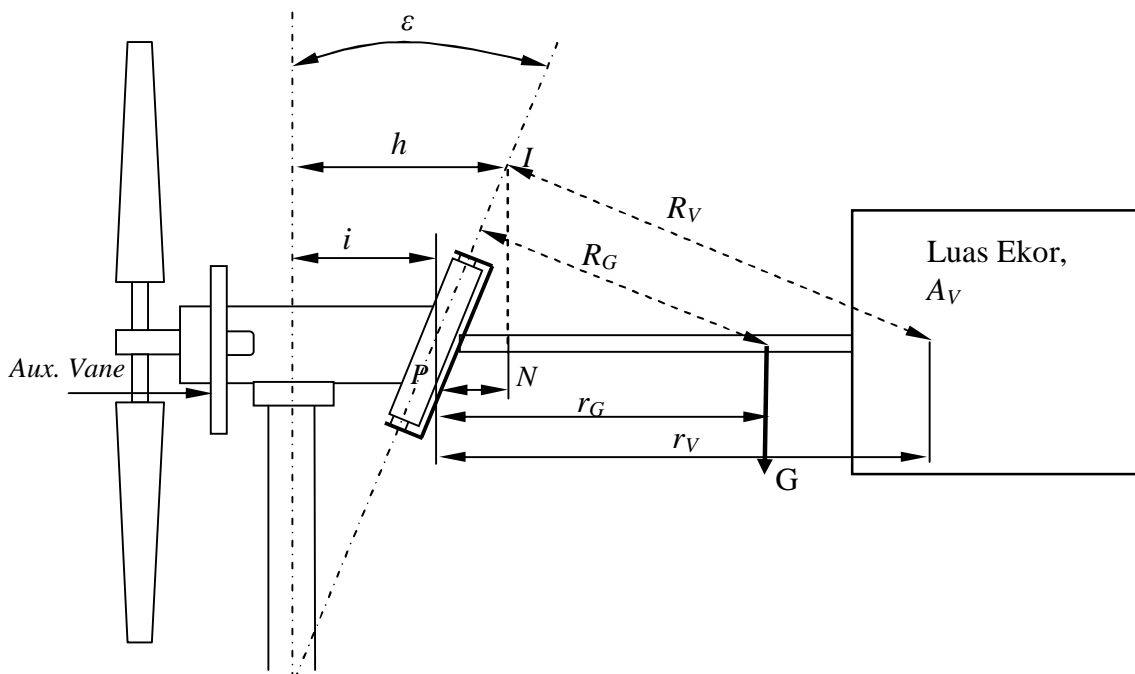
Dengan $h = i + PN$; $R_v = r_v \cdot \cos \varepsilon$ (3-17)

$$R_G = r_G \cdot \cos \varepsilon \quad (3-18)$$

$$\sin \varepsilon = \frac{PN}{PI}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{PI}{R_v} \Rightarrow PN = R_v \cdot \sin \varepsilon \cdot \tan \varepsilon = R_v \cdot \sin \varepsilon \cdot \frac{\sin \varepsilon}{\cos \varepsilon}$$

$$\text{Maka: } h = i + r_v \cdot \sin^2 \varepsilon \quad (3-19)$$



Gambar 3-3: Skema berbagai parameter dalam menentukan panjang lengan h

4 HASIL RANCANGAN DAN ANALISIS

Telah dibuatkan program komputer yang sederhana dengan mempergunakan program excel. Parameter yang sudah diketahui dimasukkan ke dalam program. Pertama kali dicari nilai dari γ_0 sudut serang angin terhadap daun ekor pada kondisi $V \leq V_{disain}$, berdasarkan

hasil analisis, nilai $\gamma_0 = 6.16^\circ$. Agar terjadi kesetimbangan momen pada sumbu *hinge* maka nilai berat ekor G yang tadinya 250 N harus diturunkan menjadi 209 N, yaitu dengan mengubah nilai berat batang ekor menjadi $m_1=12.5$ kg dan nilai berat daun ekor menjadi $m_2=8.4$ kg.

Tabel 4-1: PERHITUNGAN SISTEM ORIENTASI PADA TURBIN ANGIN 2.5 Kw

Jari-jari rotor	R (m)	=	2.621
Jarak tower ke <i>Hing-axis</i>	i (m)	=	0.154
Jarak tower ke rotor	f (m)	=	0.509
Jarak tower ke pusat sudu	e (m)	=	0.06
Luas penampang sudu	A_r (m ²)	=	5.393
Luas penampang sisi sudu	A_{rs} (m ²)	=	0.02
Luas penampang daun ekor	A_v (m ²)	=	0.7
	a (m)	=	1
	b (m)	=	0.7
Panjang batang ekor	l (m)	=	3
Panjang batang ekor yang masuk ke daun ekor	t (m)	=	0.4
Berat batang ekor	m_1 (kg)	=	15
Berat daun ekor	m_2 (kg)	=	10
Jarak dari <i>Hing-axis</i> ke titik berat daun ekor	r_v (m)	=	2.85
Jarak dari <i>Hing-axis</i> ke titik berat ekor	r_G (m)	=	2.14
Percepatan gravitasi	g (m/s ²)	=	10
Berat ekor (batang + daun)	G (N)	=	250
Sudut antara <i>tower</i> dan <i>Hing axis</i>	ϵ	=	20
	$\sin \epsilon$	=	0.3419
	$\sin^2 \epsilon$	=	0.1169
	$\cos \epsilon$	=	0.9398
	$\cos^2 \epsilon$	=	0.8831
Massa jenis udara	ρ (kg/m ³)	=	1.2
Faktor kecepatan angin dibelakang rotor	$(1-a)$	=	0.7
C_t		=	0.89
C_f		=	0.89
Kecepatan angin disain	V_{disain} (m/s ²)	=	10.00
$h = i + r_v * \sin^2 \epsilon$			

Kesetimbangan momen pada sumbu menara : $V=V_{disain}$, rotor masih tegak lurus terhadap angin ($\delta = 0^\circ$)

Untuk memenuhi persamaan di bawah maka : $Y_0(^{\circ}) = 6.16$ $\cos Y_0 = 0.9942$ $\sin Y_0 = 0.1073$

$$C_t * (A_t/A_v) * [1/(1-a)^2] * \theta = 26 * (\pi / 180^\circ) Y_0 * [h * \cos(Y_0) + r_v * \cos^2(\epsilon)] \quad (4-1)$$

$$0.8385 = 0.8385$$

Untuk memenuhi persamaan di bawah maka : $Y_0(^{\circ}) = 5.1418$ $\cos Y_0 = 0.9960$ $\sin Y_0 = 0.0896$

$$C_t * 0.5 * \rho * V_{desain}^2 * A_t * \theta = G * \sin(\epsilon) * \sin(Y_0) * (r_G/r_v) * [h * \cos(Y_0) + r_v * \cos^2(\epsilon)] \quad (4-2)$$

$$17.2565 = 17.2565$$

Ternyata V_0 hasil dari persamaan (4-1) tidak sama dengan (4-2) berarti belum terjadi kesetimbangan momen pada sumbu gantung (*hinge*) γO hasil persamaan (4-1) diambil, maka dicari nilai G .

$$G = [(2.6 \cdot (\pi/180)^\alpha) \cdot Y_0 \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot (1-\theta)^2 \cdot V_{disain}^3 \cdot A_v] \cdot [\Gamma_v / (\Gamma_G \cdot \sin(\epsilon) \cdot \sin(\gamma_0))] \quad (4-3)$$

$$G = 208.885 \quad \text{N}$$

Kesetimbangan moment pada sumbu menara: Ketika kecepatan angin melebihi kecepatan angin rancangan ($V \geq V_{disain}$), maka:

$$\delta = \arccos \frac{V_{disain}}{V}$$

dengan $C_N = 2.6 \cdot \alpha$, α in Radian untuk $0^\circ < \alpha < 40^\circ$, $\delta = \gamma + \alpha$, $\alpha = \delta - \gamma$

$$\begin{aligned} [C_i \cdot \cos^2 \delta \cdot A_r \cdot e + C_f \cdot \sin^2 \delta \cdot A_{rs} \cdot f] &= \left[2.6 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \alpha \cdot (1-a)^2 \cdot A_v \right] \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \epsilon] \\ [C_i \cdot \cos^2 \delta \cdot A_r \cdot e + C_f \cdot \sin^2 \delta \cdot A_{rs} \cdot f] &= \left[2.6 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (\delta - \gamma) \cdot (1-a)^2 \cdot A_v \right] \cdot [h \cdot \cos \gamma + R_v \cdot \cos \epsilon] \end{aligned} \quad (4-4)$$

Persamaan sebelah kiri
Persamaan sebelah kanan

Tabel 4-2: SUDUT SERANG ANGIN TERHADAP ROTOR δ SERTA SUDUT SERANG ANGIN TERHADAP DAUN EKOR α, γ PADA KONDISI $V > V_{disain}$

Kecepatan angin V	δ (°)	$\cos^2 \delta$	$\sin^2 \delta$	γ (°)	α (°)	kiri	kanan
11	24.63	0.826	0.174	19.47	5.17	0.2393	0.2393
12	33.57	0.694	0.306	29.15	4.42	0.2025	0.2025
13	39.74	0.592	0.408	35.90	3.84	0.1739	0.1739
14	44.44	0.510	0.490	41.07	3.37	0.1512	0.1512
15	48.21	0.444	0.556	45.23	2.99	0.1329	0.1329
16	51.34	0.391	0.609	48.68	2.67	0.1179	0.1179
17	54.00	0.346	0.654	51.59	2.40	0.1054	0.1054
18	56.28	0.309	0.691	54.10	2.18	0.0950	0.0950
19	58.27	0.277	0.723	56.29	1.99	0.0862	0.0862
20	60.03	0.250	0.750	58.21	1.82	0.0787	0.0787

5 KESIMPULAN DAN SARAN

- Model sistem orientasi yang digunakan pada turbin angin LPN 2.5 kW adalah sistem orientasi dengan rotor eksentrik dan ekor pengarah dengan *hinge*,
- Dengan parameter-parameter yang ada serta dengan kecepatan angin rancangan $V_{disain} = 10$ m/s, maka nilai γ_0 (sudut serang angin terhadap daun ekor) pada kondisi $V \leq V_{desain}$, adalah $\gamma_0 = 6.16^\circ$,
- Nilai berat ekor G yang tadinya 250 N harus diturunkan menjadi 209 N, yaitu dengan mengubah nilai berat batang ekor menjadi $m_1 = 12.5$ kg dan nilai berat daun ekor menjadi $m_2 = 8.4$ kg,
- Sudut serang angin terhadap rotor δ serta sudut serang angin terhadap daun ekor α, γ pada kondisi $V > V_{design}$ dapat dilihat pada Tabel 4-2,
- Rancangan dan cara analisis ini bisa dipakai pada rancangan turbin angin skala kecil lainnya.

DAFTAR RUJUKAN

- LAPAN, 1994/1995. *Manual Pemanfaatan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA)*, Proyek Diseminasi Teknologi Pemanfaatan Energi Angin.
- Gasch, Robert 2005. *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*, 4. Auflage, Teubner Verlag.
- Lysen, E.H., 1982. *Introduction to Wind Energy*, SWD Agustus.
- Heier, Siegfried, 2005. *Windkraftanlagen: Systemauslegung, Netzintegration und Regelung*, 4. Auflage, Teubner Verlag,
- Ginting, Dines, 1985. *Pengaturan Mekanik Turbin Angin Propeller 5 kW*, Bidang Sinergan LAPAN NT 8417 Nota Teknik Januari.
- El-Agamawy H., 2001. *Safety Systems for the ESES 2002 Wind Pump*. *Jurnal Renewable Energy* 23 () hal. 585-593.

