

PEMBUATAN KODE DESAIN DAN ANALISIS TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL DARRIEUS TIPE-H

Agus Muhamad Arsad*), dan Firman Hartono**)

*)Universitas Nurtanio Bandung

**) Institut Teknologi Bandung

ABSTRACT

This paper explains the development of design and analysis code of Darrieus vertical axis wind turbine. In this code, the wind turbine is modeled as two-dimensional rotating *airfoil* while the blade force is calculated by using single stream-tube flow model by assuming linear free stream velocity distribution along the turbine. Blade element theory and momentum theory are used to investigate the relationship between the turbine parameter and turbine performance. Number of blade can be varied between 2 to 10. The *airfoil* of the turbine blade can be set as required, but 5 *airfoil* type of NACA 0012, 0015, 0018, 0021 and 0025 are ready to use. Compared with reference, result of analysis indicates that the output is qualitatively good.

Key words: *Darrieus wind turbin, Single streamtube model*

ABSTRAK

Makalah ini menjelaskan tentang pembuatan kode desain dan analisis turbin angin sumbu vertikal Darrieus. Dalam kode yang dikembangkan ini, turbin angin dimodelkan sebagai *airfoil* dua dimensi yang berputar sementara gaya sudu dihitung dengan menggunakan model tabung aliran tunggal dengan mengasumsikan distribusi kecepatan *free stream* sepanjang arah aksial turbin bervariasi linier. Teori elemen sudu dan teori momentum digunakan untuk mencari hubungan antara nilai parameter turbin dengan performa turbin angin. Pada kode ini, jumlah sudu dapat divariasikan antara 2 sampai dengan 10 buah. Tipe *airfoil* sudu dapat disesuaikan, namun kode ini menyediakan 5 tipe *airfoil* yang dapat dipilih yaitu NACA 0012, 0015, 0018, 0021 dan 0025. Dibandingkan dengan referensi, hasil analisis menunjukkan bahwa secara kualitatif kode ini cukup baik.

Kata kunci: *Turbin angin Darrieus, Single streamtube model*

1 PENDAHULUAN

Turbin angin merupakan alat yang mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Turbin yang dapat menghasilkan energi dari angin secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama yaitu turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*) (De coste, Josh, 2005). Turbin angin Darrieus termasuk jenis turbin angin sumbu vertikal yang digerakkan oleh gaya angkat dari sudu (*blade*) yang dipasangkan secara vertikal. Turbin angin Darrieus berasal dari nama penciptanya yaitu

Georges Jeans Mary Darrieus dari Amerika Serikat (De coste, Josh, 2004).

Turbin angin sumbu vertikal merupakan turbin angin dengan poros yang berputar tegak lurus terhadap arah aliran angin. Umumnya, perputaran rotor disebabkan oleh adanya gaya hambat yang lebih dominan dari gaya angkat pada sudu rotor, kecuali turbin angin tipe Darrieus yang menggunakan sudu berpenampang *airfoil* sehingga perputaran rotornya disebabkan oleh gaya angkat yang lebih dominan dari gaya hambat. Prestasi turbin angin Darrieus merupakan fungsi dari beberapa parameter, di antaranya: kecepatan angin dan rpm (dinyatakan dalam *tip speed*

ratio), tipe *airfoil*, dimensi rotor, bilangan Reynolds dan sudut *pitch*.

Dibandingkan dengan turbin angin sumbu horisontal, turbin angin sumbu vertikal lebih baik dalam hal kemampuannya menangkap angin dari arah manapun. Namun, turbin jenis ini memiliki *tip speed ratio* yang rendah sehingga kecepatan putar rotornya juga rendah (De coste, Josh, 2005).

Tujuan yang ingin dicapai dari pembuatan kode desain ini adalah mempermudah proses desain dan analisis turbin angin Darrieus tipe-H. Kode yang dikembangkan ini dapat digunakan untuk menghitung besarnya torsi, daya keluaran dan memperkirakan efisiensi turbin angin Darrieus tipe-H.

2 TEORI DASAR

2.1 Daya Tersedia

Distribusi frekuensi kecepatan angin disajikan dalam bentuk histogram (Daryanto, Y., 2007). Histogram yang paling tinggi menunjukkan kecepatan angin yang paling sering terjadi tetapi bukan kecepatan angin rata-rata. Kecepatan angin rata-rata dapat dihitung dengan persamaan (Daryanto, Y., 2007):

$$\bar{U} = \frac{\sum_i t_i U_i}{\sum_i t_i} \quad (2-1)$$

\bar{U} = kecepatan angin rata-rata (m/det)

U_i = kecepatan angin pengukuran (m/det)

t_i = waktu pengukuran (det)

Daya angin tersedia adalah potensi energi angin di suatu lokasi tertentu dan dikoreksi dengan menggunakan faktor pola energi, k_E . Faktor pola energi, k_E didefinisikan sebagai (De coste, Josh, 2004).

$$k_E = \frac{\text{daya angin tersedia}}{\text{daya berdasar kecepatan rata-rata}}$$

sehingga potensi energi angin di suatu lokasi adalah:

$$\frac{P_\infty}{A} = k_E \frac{1}{2} \rho \overline{U^3} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (2-2)$$

dimana:

P_∞ = daya angin tersedia (W)

A = luas permukaan yang diekspose (m²)

k_E = faktor pola energi

ρ = kerapatan massa udara (kg/m³)

\overline{U} = kecepatan angin rata-rata (m/det)

2.2 Daya Turbin Angin

Daya yang dihasilkan dari konversi oleh rotor turbin angin sebanding dengan pangkat tiga kecepatan angin. Daya yang dapat dihasilkan rotor turbin angin adalah (Sidiq, Moch Ridwan, 2008):

$$P_t = \frac{1}{2} c_p \rho A' U^3 \quad (2-3)$$

dimana :

P_t = daya keluaran rotor turbin angin (Watt)

c_p = koefisien daya turbin angin

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

A' = luas sapuan rotor (m²)

U = kecepatan angin (m/det)

Dengan demikian untuk suatu situs tertentu, daya turbin angin rata-rata yang dapat dihasilkan adalah:

$$P_t = \frac{P_\infty}{A} c_p A' \quad (2-4)$$

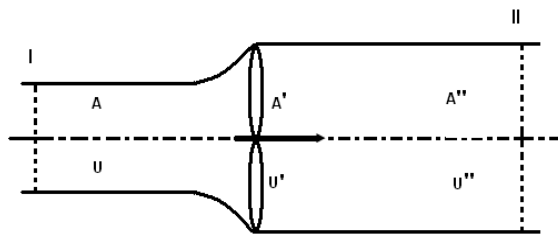
2.3 Teori Momentum

Teori momentum adalah metode analisis dengan cara memperhitungkan perubahan momentum udara selama melewati turbin angin. Teori momentum mengasumsikan bahwa aliran adalah tidak viskos dan tunak, juga rotor dianggap sebagai sebuah piringan dengan jumlah sudu tak terbatas. Pertimbangan yang digunakan dalam teori momentum yang juga diaplikasikan pada teori elemen sudu adalah:

- Daya merupakan fungsi sederhana dari *thrust*.
- Kecepatan dianggap seragam.

Perhatikan Gambar 2-1 berikut, jika U adalah kecepatan angin di depan rotor, U' adalah kecepatan angin pada saat melalui rotor dan U'' adalah kecepatan angin di belakang rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas:

$$AU = A'U' = A''U'' \quad (2-5)$$



Gambar 2-1: Asumsi teori Betz

Selanjutnya berdasarkan teorema Euler, gaya yang bekerja pada rotor adalah:

$$F = \rho A' U' (U - U'') \quad (2-6)$$

Karenanya daya kinetik angin yang diserap oleh rotor adalah:

$$P_t = F U' = \rho A' U'^2 (U - U'') \quad (2-7)$$

Selisih energi kinetik di depan dan di belakang rotor dapat dihitung dengan persamaan Bernoulli :

$$\Delta P_t = \frac{1}{2} \rho A' U' (U^2 - U''^2) \quad (2-8)$$

$$\Delta P_t = \frac{1}{2} \rho A' U' (U^2 - U''^2)$$

Persamaan (2-7) adalah sama dengan persamaan (2-8) sehingga dari kedua persamaan itu diperoleh harga:

$$U' = \frac{U + U''}{2} \quad (2-9)$$

Jika persamaan (2-9) disubstitusikan kedalam persamaan (2-6) dan (2-7) didapat:

$$F = \frac{1}{2} \rho A' (U^2 - U''^2) \quad (2-10)$$

dan

$$P_t = \frac{1}{4} \rho A' (U^2 - U''^2) (U + U'') \quad (2-11)$$

Untuk kecepatan U tertentu dapat dikaji besarnya P_t sebagai fungsi dari U'' dengan mendiferensiasi persamaan (2-11).

$$\frac{dP_t}{dU''} = \frac{1}{4} \rho A' (U^2 - 2U \cdot U'' - U''^2)$$

Pada $\frac{dP_t}{dU''} = 0$ diperoleh dua akar persamaan

yaitu: $U'' = -U$ yang berarti udara dalam keadaan tenang dan $U'' = \frac{U}{3}$ yang merupa-

kan harga yang menghasilkan daya maksimum. Dengan demikian daya maksimum yang diperoleh adalah:

$$P_{t \text{ maks.}} = \frac{8}{27} \rho A' U^3 \quad (2-12)$$

2.4 Efisiensi Betz

Efisiensi turbin angin adalah perbandingan antara daya yang diserap oleh turbin angin terhadap daya angin yang tersedia. Persamaan untuk mendapatkan efisiensi maksimum turbin angin adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\text{daya maksimum turbin}}{\frac{1}{2} \rho A' U^3} \times 100 \%$$

Dengan daya maksimum dari persamaan (2-12) dan daya angin dari persamaan (2-2) dengan mengabaikan K_E didapat:

$$\eta = \frac{\frac{8}{27} \rho A' U^3}{\frac{1}{2} \rho A' U^3} \times 100 \%$$

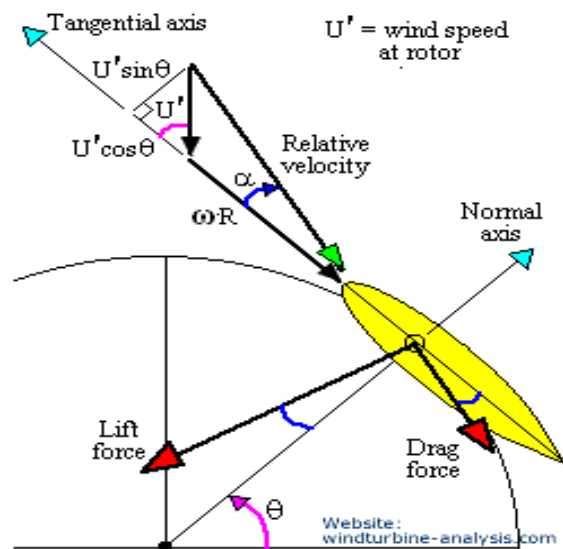
$$\eta = \frac{16}{27} \times 100 \% \quad (2-13)$$

Nilai $16/27$ ini adalah batasan Betz (*Betz limit*) yang menyatakan bahwa daya maksimum yang dapat diserap oleh turbin angin tidak melebihi 59.3% dari daya angin yang tersedia. Dengan demikian, harga C_p maksimum pada persamaan (2-3) adalah 59.3 %.

2.5 Teori Elemen Bilah

Teori Elemen Sudu (*Blade Element Theory*) adalah metode sederhana yang digunakan untuk menganalisis rotor, propeller, fan, dan kompresor. BET adalah dasar untuk analisis gaya aerodinamika pada *rotating machine*. Pada BET, gaya angkat dan gaya hambat dihitung per elemen sudu kemudian diintegrasikan sepanjang bentang sudu.

Prinsip utama dari teori elemen sudu adalah membagi sepanjang sudu menjadi beberapa bagian dan menghitung gaya-gaya yang timbul pada setiap sub bagian untuk kemudian disatukan kembali. Penerapan teori elemen sudu pada turbin angin Darrieus tipe-H ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2-2: Sistem kecepatan dan gaya pada turbin angin Darrieus tipe-H (www.windturbine-analysis.com)

Dari Gambar (2-2), dapat diturunkan kecepatan relatif adalah:

$$U_R = \sqrt{(U' \sin \theta)^2 + (U' \cos \theta + \omega R)^2} \quad (2-14)$$

Sudut serang α ,

$$\tan \alpha = \frac{-U' \sin \theta}{U' \cos \theta + \omega R} \quad (2-15)$$

Koefisien normal dan tangensial,

$$C_{norm} = -C_L \cos \alpha - C_D \sin \alpha \quad (2-16)$$

$$C_{tang} = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (2-17)$$

Dimana C_L dan C_D adalah koefisien *lift* dan *drag* untuk sudut serang α . Gaya yang searah putaran untuk sebuah *airfoil* pada θ tertentu adalah:

$$F = \frac{1}{2} \rho U_R^2 (H_C) (-C_{norm} \sin \theta - C_{tang} \cos \theta) \quad (2-18)$$

2.7 Parameter Prestasi Untuk Rotor Darrieus

Parameter untuk menunjukkan performa turbin angin Darrieus diantaranya:

- Koefisien daya, yang didefinisikan sebagai (www.windturbine-analysis.com).

$$C_P = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} \quad (2-19)$$

Dimana:

P_t = Daya turbin angin (Watt).

- *Tip-speed ratio*, yang didefinisikan sebagai (www.windturbine-analysis.com).

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2-20)$$

Dimana:

R = jari-jari rotor (m)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

- Koefisien torsi, yang didefinisikan sebagai (www.windturbine-analysis.com).

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 AR} \quad (2-21)$$

Dimana:

T = Torsi rotor turbin angin (Nm)

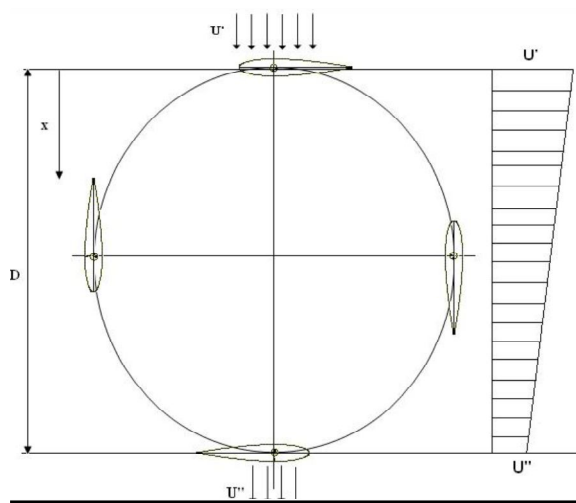
3 KODE DESAIN TURBIN ANGIN DARRIEUS TIPE-H

Persamaan-persamaan yang digunakan telah diturunkan pada bab 2. Proses pembuatan kode desain tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

- Menentukan geometri turbin, yaitu: tinggi turbin H , jari-jari R , sudut *pitch*, jumlah sudu, n dan panjang *chord* c .

- Memilih/menentukan tipe *airfoil*; tipe *airfoil* berhubungan dengan karakteristik $C_l - \alpha$ dan $C_d - \alpha$ *airfoil*.
- Menetapkan kecepatan angin U dan putaran rpm.
- Menghitung bilangan Reynolds Re .
- Melakukan interpolasi linier data $C_l - \alpha$ dan $C_d - \alpha$ berdasarkan bilangan Reynolds Re .
- Menghitung gaya angkat dan gaya hambat yang bekerja pada setiap sudu pada semua posisi sudut θ .
- Menghitung gaya arah putaran, F , berdasarkan besar gaya angkat, gaya hambat dan posisi sudut θ .
- Menghitung koefisien daya dan koefisien torsi, sebagai fungsi *tip-speed ratio*.

Berbeda dengan turbin angin sumbu horisontal, dimana kecepatan aksial angin pada sudu turbin relatif seragam, pada turbin Darrieus tipe-H, kecepatan aksial angin di depan lebih tinggi dari kecepatan angin di belakang sudu. Berdasarkan pengetahuan penulis, variasi perubahan kecepatan aksial dari depan turbin ke belakang tidak terdapat pada literatur. Dengan demikian, dalam makalah ini diasumsikan kecepatan aksial turun secara linier seperti ditunjukkan pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1: Asumsi penurunan kecepatan rotor

Kecepatan aksial di belakang, U'' , dihitung secara iteratif dengan memper-timbangkan jumlah energi yang terserap oleh turbin. Langkah-langkah iterasi dijelaskan sebagai berikut:

- Mengasumsikan harga k_1 untuk membantu mendapatkan nilai $U'' = k_1 \times U'$.
- Menghitung posisi masing-masing bilah berdasarkan harga θ dengan menggunakan persamaan:
 $x = R - (R \sin \theta)$, $R = \text{jari - jari rotor}$
- Menghitung kecepatan pada posisi masing-masing bilah berdasarkan harga x yang telah dicari pada point (2), dengan menggunakan persamaan:

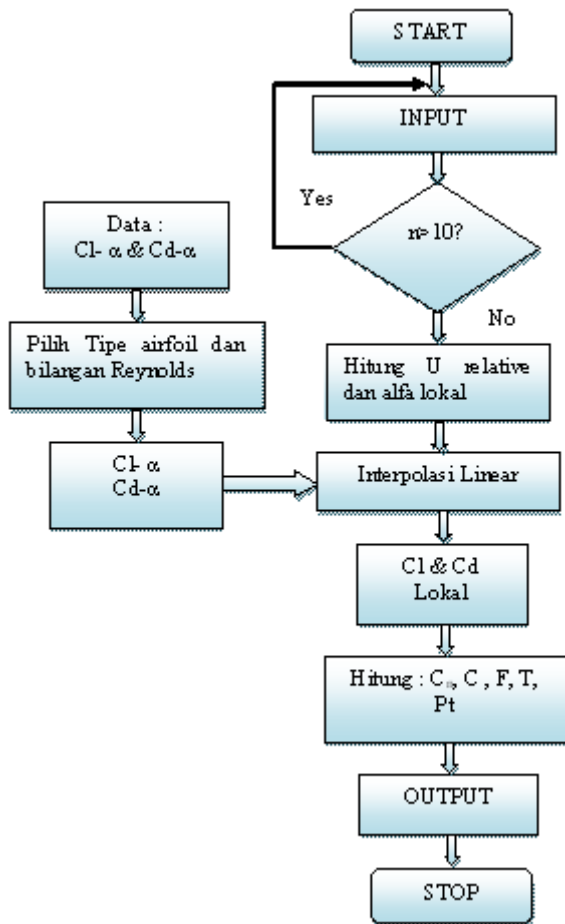
$$U(x) = U' + \frac{U'' - U'}{D} x$$

- Menghitung *alfa* lokal berdasarkan harga $U(x)$ dengan menggunakan persamaan (2-15).
- Menghitung koefisien *lift* dan koefisien *drag* berdasarkan *alfa* lokal dengan interpolasi linier.
- Menghitung kecepatan relatif dari $U(x)$ dengan menggunakan persamaan (2-14).
- Menghitung gaya pada masing-masing bilah dengan menggunakan persamaan (2-18).
- Menghitung daya $P_t = T \times \omega$, dalam satuan watt.
- Menghitung k_2 dengan persamaan:

$$1 - k_2^3 = \frac{P_t}{\rho A U^3}$$

- Memeriksa apakah k_1 konvergen dengan k_2 , jika tidak sama maka k_1 diubah sampai $k_1 \approx k_2$ dengan tingkat konvergensi pada kode desain ini sampai dengan 5 desimal.

Diagram alir dari proses pembuatan kode desain ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3-2: Diagram alir Pembuatan kode desain

4 STUDI KASUS DAN ANALISIS

Prestasi turbin angin Darrieus tipe-H dapat dihitung dengan mengubah nilai masukan baik kecepatan, rpm, jumlah sudu, tipe *airfoil*, bilangan Reynolds, *chord*, jari-jari rotor, tinggi rotor dan *pitch angle*. Keluaran dari kode desain kemudian dicatat untuk membuat grafik koefisien daya dan koefisien torsi sebagai fungsi dari *TSR*. Sebagai studi kasus, dilakukan analisis terhadap turbin angin Darrieus pada (www.windturbine-analysis.com) dengan data-data sebagai berikut; tinggi 0,3 meter, diameter 0,5 meter, *solidity* 0,6, *aspect ratio* 3. Referensi (www.windturbine-analysis.com) tidak menyebutkan tipe *airfoil* yang digunakan. Hasil analisis pada referensi (www.windturbine-analysis.com) juga tidak cukup lengkap, hanya menampilkan kurva C_p - λ . Namun demikian, data-data

pada (www.windturbine-analysis.com) sudah dapat digunakan sebagai pembandingan.

Data masukan dan data keluaran hasil analisis menggunakan kode yang dikembangkan ditampilkan pada Tabel 4-1 dan 4-2. Kurva C_p - λ hasil analisis, bersama-sama dengan kurva C_p - λ dari referensi (www.windturbine-analysis.com) ditunjukkan pada gambar 4-1.

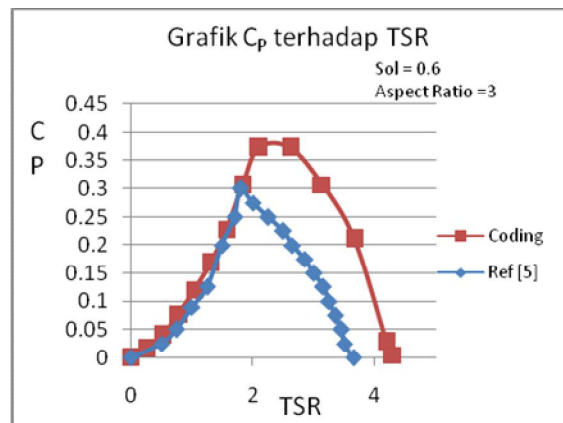
Tabel 4-1: MASUKAN KODE DESAIN

INPUT		
Kecepatan (U)	10	m/det
Putaran	350	rpm
Jumlah Sudu	3	buah
Type <i>Airfoil</i>	NACA 0012	
H	0,3	m
<i>Chord</i>	0,1	m
R	0,25	m
<i>Reynolds Number</i>	160.000	
<i>Pitch Angle</i>	0	

Tabel 4-2: KELUARAN KODE DESAIN

OUTPUT		
K1	0,98321	
K2	0,98321646	
Wind Power	75	Watt
Power output	7,4265	Watt
Efisiensi	0,09902058	
Omega	36,67	rad/det
Lamda	0,92	
Torsi	0,2025	Nm
Gaya	0,8102	N
Solidity	0,60	

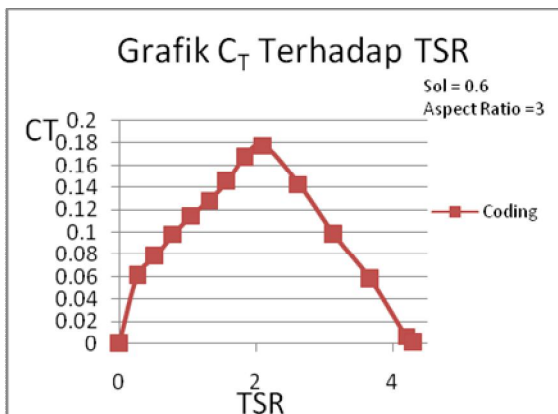
Grafik C_p terhadap *TSR* ditunjukkan pada Gambar 4-1.



Gambar 4-1: Grafik C_p terhadap *TSR*

Dari grafik pada Gambar 4-1 di atas, untuk $TSR < 2$, hasil perhitungan menggunakan kode desain dan hasil analisis pada referensi (www.windturbine-analysis.com) memiliki nilai yang hampir sama dalam satu kurva, tetapi untuk $TSR > 2$, terdapat perbedaan yang sangat signifikan dengan nilai C_p maksimum hasil perhitungan kode desain lebih tinggi dari referensi (www.windturbine-analysis.com). Hal ini dapat disebabkan karena pada kode desain ini ulakan (*wake*) di belakang *airfoil* tidak di analisis.

Selain kurva $C_p - \lambda$, hasil analisis juga dapat menampilkan kurva $C_T - \lambda$. Kurva $C_T - \lambda$ hasil analisis diperlihatkan pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2:Grafik C_T terhadap TSR

Koefisien torsi maksimum hasil perhitungan menggunakan kode desain adalah 0,18. Hal ini dapat dibuktikan pula dengan menggunakan hubungan antara C_p dan C_T dari persamaan (2-18) dan (2-20) berikut.

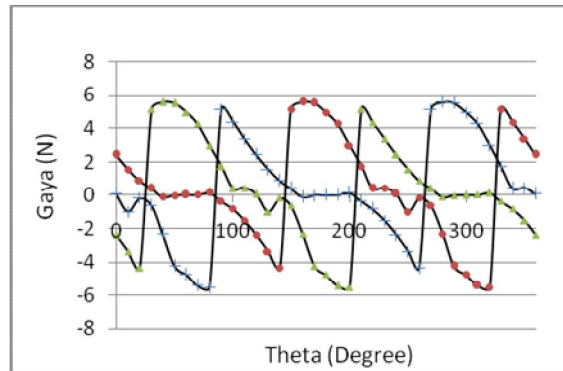
$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 AR} \frac{\omega}{\left(\frac{U}{U}\right)} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2} \rho U^3 A \left(\frac{\omega R}{U}\right)}$$

$$= \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho U^3 A \lambda}$$

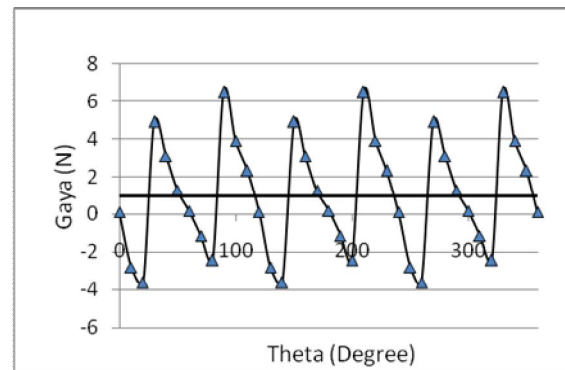
$$\therefore C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (4-1)$$

Gaya dalam arah putaran untuk kecepatan udara dan putaran tertentu tergantung posisi sudut θ . Gaya pada tiap-tiap sudu ditunjukkan pada

Gambar 4-3, sedangkan total gaya terhadap sudut θ sudu 1 ditunjukkan pada Gambar 4-4.



Gambar 4-3: Grafik gaya arah putaran terhadap sudut θ , + sudu 1, o sudu 2, Δ sudu 3



Gambar 4-4: Grafik gaya total arah putaran terhadap sudut θ sudu 1, Δ gaya total, - rata-rata gaya total per putaran

Tampak pada Gambar 4-3, gaya searah putaran yang dihasilkan oleh satu sudu membentuk siklus dengan nilai positif pada beberapa sudut putar dan negatif pada sudut yang lain. Ini artinya gaya aerodinamika sudu tidak selalu menghasilkan torsi yang bermanfaat tetapi juga menghasilkan torsi yang justru menghambat putaran sudu. Hal inilah yang menyebabkan putaran turbin angin sumbu vertikal tidak setinggi putaran turbin angin sumbu horizontal.

Jika gaya-gaya aerodinamika ketiga sudu pada satu posisi tertentu digabungkan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-4, maka akan dihasilkan gaya total rata-rata positif yang menyebabkan sudu berputar. Namun demikian pada beberapa posisi sudut masih terdapat

gaya total yang bernilai negatif yang cenderung menghambat putaran sudu. Dengan demikian, jika kecepatan atau momentum sudu ketika memasuki daerah gaya total negatif tidak terlalu besar, sudu akan mengalami perlambatan yang cukup signifikan dan mungkin dapat menghentikan putarannya.

5 KESIMPULAN

Makalah ini menjelaskan pengembangan kode desain dan analisis turbin angin Darrieus tipe-H. Teori dasar yang digunakan adalah Teori Momentum dan Teori Elemen Sudu dengan menggunakan model tabung aliran tunggal dan asumsi penampang sudu sebagai *airfoil* (2 dimensi). Selain itu, dalam kode ini juga diasumsikan kecepatan udara dari depan ke belakang bervariasi secara linier. Hasil perhitungan menggunakan kode ini hampir sama dengan hasil analisis pada

literatur sehingga disimpulkan bahwa kode yang dikembangkan cukup baik.

DAFTAR RUJUKAN

- De coste, Josh, 2005. *Vertical Axis Wind Turbine*. Department of Mechanical Engineering Dalhousie University. December 5.
- De coste, Josh, 2004. *Self-Starting Darrieus Wind Turbine*. Department of Mechanical Engineering Dalhousie University. April 8.
- Daryanto, Y., 2007. *Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*, BALAI PPTAGG – UPT-LAGG, Yogyakarta, 5 April.
- Sidiq, Moch Ridwan, 2008. *Pembuatan Dan Pengujian Turbin Angin Darrieus Dengan Diameter 30cm Dan Tinggi 30cm*, Tugas Akhir Sarjana, Teknik Penerbangan UNNUR, Bandung.
- www.windturbine-analysis.com.