

ANALISA PERANCANGAN TURBIN DARRIEUS PADA HYDROFOIL NACA 0015 DARI KARAKTERISTIK C_L DAN C_D PADA VARIASI SUDUT SERANG MENGGUNAKAN REGRESI LINIER PADA MATLAB

Sudargana*, R. Guruh Kis Yuniarso

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

*Email: sudargana@undip.ac.id

Abstrak

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan energi listrik serta menipisnya cadangan bahan bakar fosil, maka keadaan tersebut memaksa manusia untuk mencari energi alternatif (*renewable energy*) yang dapat diperbaharui yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Banyak energi alternatif yang dapat diperbaharui seperti pembangkit listrik tenaga air yang menjadi sumber energi yang berpotensi besar untuk dikembangkan saat ini. Terlebih dalam hal ini geografis Indonesia 63% wilayahnya terdiri dari laut menyimpan banyak potensi energi alternatif, khususnya energi arus laut. Maka dari itu perlu dikembangkan suatu alat yang dapat mengubah potensi energi arus air menjadi energi listrik sehingga cocok digunakan untuk perairan Indonesia.

Dalam tugas akhir ini dilakukan perhitungan pada turbin Darrieus 3 sudu dengan menggunakan karakteristik hydrofoil NACA 0015, diameter 0.6 m, tinggi sudu 0.8 m, dan panjang chord 0.18 m dengan variasi sudut serang 0° sampai dengan 360° dengan variasi kecepatan 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s, dan 4 m/s. Dalam perhitungan ini nilai C_L (Lift Coefficient) dan C_D (Drag Coefficient) diperoleh dari hasil simulasi.

Hasil simulasi akan menunjukkan hasil perhitungan berupa nilai torsi, daya turbin, daya hidrolis, dan efisiensi turbin. Dimana diperoleh nilai efisiensi pada kecepatan aliran 2 m/s sebesar 17.14 %, kecepatan aliran 2.5 m/s sebesar 19.776 %, kecepatan aliran air 3 m/s sebesar 21.02%, kecepatan aliran air 3.5 m/s sebesar 22.44 % dan kecepatan aliran 4 m/s sebesar 25.833 %. Dimana nilai efisiensi tertinggi didapat pada kecepatan 4 m/s sebesar 25.833 %.

Kata kunci: turbin darrieus, hydrofoil NACA 0015, regresi linear

PENDAHULUAN

Latar belakang

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan energi listrik serta menipisnya cadangan bahan bakar fosil, maka keadaan tersebut memaksa manusia untuk mencari energi alternatif (*renewable energy*) yang dapat diperbaharui yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Banyak energi alternatif yang dapat diperbaharui seperti pembangkit listrik tenaga air yang menjadi sumber energi yang berpotensi besar untuk dikembangkan saat ini. Terlebih dalam hal ini geografis Indonesia 63% wilayahnya terdiri dari laut menyimpan banyak potensi energi alternatif, khususnya energi arus laut. Maka dari itu perlu dikembangkan suatu alat yang dapat mengubah potensi energi arus air menjadi energi listrik sehingga cocok digunakan untuk perairan Indonesia.

Saat ini telah dikembangkan turbin arus air Darrieus yang efisien dapat mengambil energi dari arus air. Turbin ini menggunakan arus laut pasang surut, sungai ataupun kanal yang ada disekitarnya.

Energi kinetik yang diperoleh dari air yang mengalir dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis maupun energi listrik. Pemanfaatan energi air banyak dilakukan dengan menggunakan kincir air atau turbin air yang memanfaatkan adanya aliran air ataupun aliran arus laut.

Pemanfaatan energi arus itu dapat dilakukan dengan pemakaian sumber pembangkit listrik tenaga arus laut berupa turbin arus laut yang akan mengkonversi energi kinetik arus laut menjadi energi listrik yang prinsip kerjanya persis sama dengan turbin angin. Maka dari itu untuk membantu berkembangnya pemanfaatan turbin arus laut, disini saya ingin mencoba merancang suatu turbin arus air. Untuk tipe turbin air yang saya pilih adalah tipe Darrieus dimana merupakan jenis turbin air *vertical-axis hydro turbine* yang memiliki NACA 0015.

Tujuan

Adapun tujuan yang ingin diperoleh penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah untuk merancang Turbin Darrieus 3 sudu dengan *hydrofoil* NACA 0015 dengan mencari karakteristik *hidrodinamik* koefisien *lift* dan *drag* dengan variasi sudut serang $\alpha = 0^\circ$ sampai dengan $\alpha = 360^\circ$ guna mengetahui nilai torsi, daya, dan efisiensi dimana data yang diperoleh berupa C_L dan C_D dari hasil simulasi.

Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang diambil pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Simulasi perhitungan dilakukan pada *hydrofoil* NACA 0015
2. Simulasi perhitungan dilakukan dengan kecepatan air 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s, dan 4 m/s.

3. Perancangan dilakukan pada hasil simulasi pada jenis aliran *steady*.
4. Simulasi perhitungan dilakukan dengan variasi sudut serang $0-360^\circ$.
5. Perancangan dilakukan dengan diameter turbin 0.6 m, chord 0.18 m, dan tinggi turbin 0.80 m [4].

Metode Penyelesaian Masalah

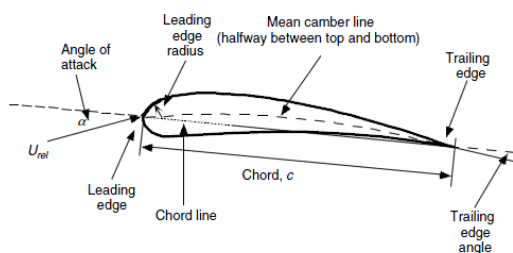
Dalam penulisan tugas akhir ini, metode penyelesaian masalah yang digunakan adalah:

1. Studi Pustaka
Studi pustaka adalah metode yang digunakan dalam penelitian ilmiah yang dilakukan dengan membaca dan mengolah data yang diperoleh setelah melakukan studi literatur.
2. Studi Simulasi dan Analitik
Metode simulasi dilakukan dengan cara mensimulasikan kasus yang dihadapi ke dalam pemodelan sesuai dengan program yang digunakan (*Matlab*).
3. Pengolahan dan Analisa Data
Mengolah data-data berupa nilai C_L dan C_D untuk mendapatkan suatu persamaan kurva dengan menggunakan *curve fitting* pada software *Matlab* dan mengolah data berupa grafik kecepatan putar turbin (n) dengan menggunakan regresi linier untuk mendapatkan persamaan garis. Kemudian hasil pengolahan tersebut digunakan untuk membantu dalam perhitungan guna mendapatkan karakteristik dari turbin Darrieus hydrofoil NACA 0015. Setelah hasil perancangan dianalisa maka dapat ditarik kesimpulan dari analisa yang telah dilakukan.
4. Laporan
Setelah dilakukan tahapan-tahapan di atas, dilakukanlah penyusunan laporan tugas sarjana. Dalam proses penyusunan laporan ini disesuaikan dengan petunjuk dari dosen pembimbing.

TINJAUAN PUSTAKA

Hydrofoil

Hydrofoil pada hakikatnya sama dengan airfoil, hanya saja *hydrofoil* biasa digunakan pada fluida air, sedangkan airfoil digunakan pada fluida udara. *Hydrofoil* merupakan suatu struktur dengan bentuk geometri spesifik yang digunakan untuk menghasilkan gaya mekanis karena gerakan relatif dari *hydrofoil* tersebut dan juga fluida sekitarnya [8].

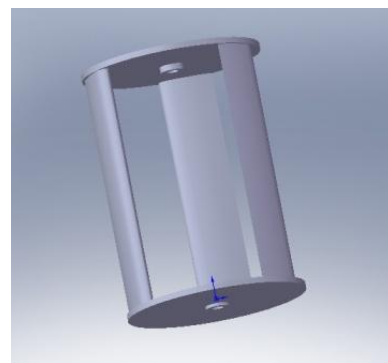


Gambar 1. Bentuk profil *hydrofoil* [8]

Turbin Darrieus

Turbin Darrieus merupakan salah satu jenis turbin yang dikembangkan oleh seorang *aeronautical engineer* asal Prancis yang bernama Georges Jean Marie Darrieus pada tahun 1931. Turbine darrieus ini memiliki keunggulan diantaranya tidak terlalu memperhitungkan arah aliran karena bentuknya yang simetri, tekanan gravitasi tidak mampu balik pada bentuk sudunya, mampu beroperasi pada head dan kecepatan yang rendah [3], sedangkan kelemahannya adalah ketidak mampuan melakukan *self-starting*, dan getaran yang tinggi.

Prinsip kerja turbin Darrieus adalah akibat kecepatan aliran air maka menyebabkan sudu berputar dengan kecepatan putar tertentu, maka resultan dari kecepatan tersebut akan menghasilkan gaya hidrodinamis [7].

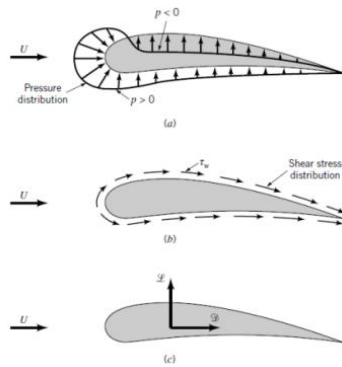


Gambar 2. Turbin Darrieus.

Gaya angkat (*lift*) dihasilkan karena bentuk airfoil dari sudu turbin. sudu-sudu ini memotong udara dengan sudut serang yang mengakibatkan perbedaan tekanan. Hasil dari perbedaan tekanan inilah yang mengakibatkan gaya angkat, yang mana mendorong sudu bergerak ke depan. Untuk mendorong turbin, torsi yang disebabkan oleh gaya angkat harus lebih besar dibanding torsi yang dihasilkan oleh gaya hambat (*drag*) sehingga menghasilkan torsi netto [2].

Konsep gaya angkat (*Lift*) dan Gaya hambat (*Drag*)

Ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida, suatu interaksi antara benda dengan fluida terjadi; efek ini dapat digambarkan dalam bentuk gaya-gaya pada pertemuan antar-muka fluida benda. Hal ini dapat digambarkan dalam tegangan-tegangan geser dinding, τ_w , akibat efek viskos dan tegangan normal akibat tekanan, p .



Gambar 3. Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: a. gaya tekanan, b. gaya viskos, c. gaya resultan (*lift* dan *drag*)^[1].

Gaya resultan dengan arah yang sama (sejajar) kecepatan hulu disebut sebagai gaya hambat (*drag*), D , dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai gaya angkat (*lift*), L , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3c, dimana dapat dilihat untuk persamaan *drag* dan *lift* :

$$D = \int dF_x = \int p \cos \theta \, dA + \int \tau_w \sin \theta \, dA \quad (1)$$

Dan

$$L = \int dF_y = -\int p \sin \theta \, dA + \int \tau_w \cos \theta \, dA \quad (2)$$

Perhitungan manual distribusi-distribusi ini dari persamaan pembangun aliran, misalnya persamaan *Navier-Stokes*, sangat sulit dilakukan. Terkadang perhitungan komputasi dapat dilakukan pada persamaan-persamaan ini. Informasi yang lebih banyak lagi tentang distribusi tersebut dapat diperoleh melalui eksperimen. Oleh karena perhatian utama para ahli di bidang keteknikan sering kali lebih kepada tahanan dan gaya angkat daripada distribusi tekanan dan tegangan geser, hasil-hasil eksperimen biasanya diperoleh dan disajikan secara langsung dalam tahanan dan gaya angkat. Data-data tersebut biasanya disajikan dalam bentuk bilangan tak berdimensi koefisien tahanan (*drag coefficient*) dan koefisien gaya angkat (*lift coefficient*), didefinisikan sebagai :

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2 A} \quad (3)$$

dan

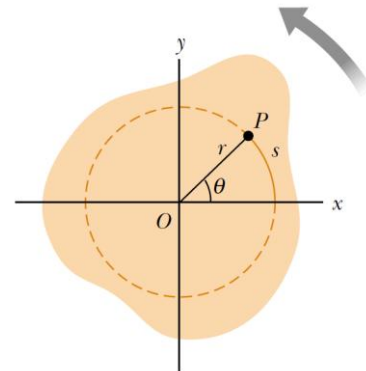
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v_\infty^2 A} \quad (4)$$

dimana :

- C_D = koefisien gaya hambat
- C_L = koefisien gaya angkat
- ρ = densitas fluida (kg/m^3)
- A = luasan acuan (m^2)
- c = panjang chord (m)
- V_∞ = kecepatan fluida relatif terhadap obyek (m/s)^[4]

Koordinat sudut θ dari suatu benda tegar yang berotasi mengelilingi sebuah sumbu tetap bisa bernilai

positif atau negatif. Bila kita menentukan sudut-sudut positif yang akan diukur berlawanan dengan arah jarum jam dari sumbu- x positif maka θ pada Gambar 4 merupakan sudut positif.



Gambar 4. Vektor gaya dan kecepatan pada hydrofoil^[6].

dimana diketahui untuk persamaan kecepatan sudut:

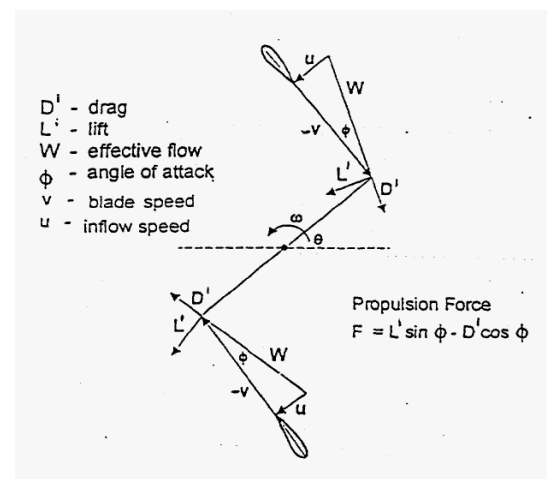
$$\omega = \frac{2\pi n}{60(2.3)} \quad (5)$$

dimana :

- ω = koefisien gaya hambat
- n = putaran

Perhitungan Daya Turbin Darrieus

Besarnya energi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus merupakan energi poros yang diperoleh turbin dari energi aliran air. Untuk mengetahui daya turbin Darrieus terlebih dahulu harus diketahui vektor gaya dan kecepatan pada hydrofoilnya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5 dibawah ini.



Gambar 5. Vektor gaya dan kecepatan pada hydrofoil^[5].

Dari gambar 5 dapat diketahui bahwa sudut serang (α) merupakan sudut chord (c) dan kecepatan efektif aliran atau juga biasa disebut kecepatan relatif aliran (W). Kecepatan relatif aliran merupakan kecepatan yang berpengaruh langsung terhadap gaya-

gaya pada hidrofoil dimana kecepatan ini tegak lurus terhadap arah gaya angkat (*lift*) dan sejajar terhadap arah gaya hambat (*drag*). Nilai kecepatan relatif dapat diperoleh melalui rumus berikut:

$$W = U + (-\omega R) \tag{6}$$

Dari diagram gaya yang terlihat pada gambar 5, dapat diketahui besar gaya dorong yang dihasilkan dari hidrofoil tersebut.

$$F = L \sin \alpha - D \cos \alpha \tag{7}$$

Yang mana nilai gaya dorong jika dikalikan dengan radius dari turbin akan menghasilkan nilai torsi turbin Darrieus yang dinyatakan dengan:

$$T = F \times R \tag{8}$$

dimana:

- T = torsi turbin (N.m)
- R = radius turbin (m)
- F = gaya dorong (N)

Sehingga besar daya yang dimiliki oleh turbin Darrieus dapat dinyatakan dengan^[13]:

$$P_T = T \times \omega \tag{9}$$

dimana:

- P_T = daya turbin (watt)
- T = torsi turbin (N.m)
- ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

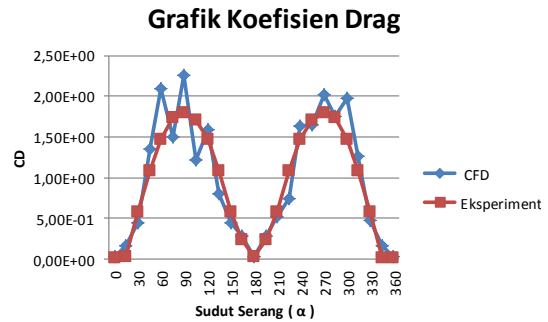
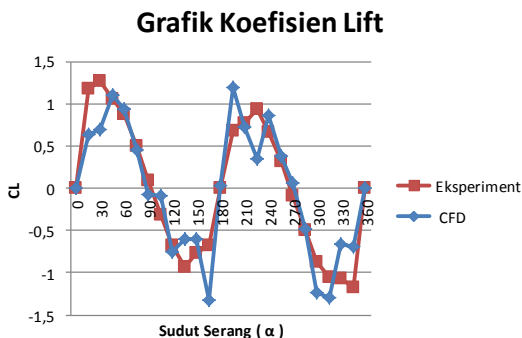
Efisiensi turbin merupakan perbandingan antara daya turbin yang dihasilkan dengan daya yang dimiliki oleh aliran air^[5]. Hubungan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_H} \tag{10}$$

Pemodelan Menggunakan Matlab

3.1. Pengolahan Data Menggunakan Matlab

Dari hasil simulasi Fluent didapatkan nilai C_L dan C_D berupa kurva dengan variasi sudut serang. Berdasarkan kurva pada gambar 6 .



Gambar 6. Kurva C_D dan C_L hasil Simulasi pada kecepatan 2.5 m/s

Nilai C_L dan C_D tersebut masih sebatas nilai yang bergantung pada besar tiap-tiap sudut serangnya maka dari itu diperlukan suatu pengolahan sehingga didapat suatu persamaan kurva yang mewakili nilai C_L dan C_D secara keseluruhan. Dalam hal ini pengolahan dilakukan menggunakan Matlab dengan fitur *cftool* (*curve fitting tool*). Fitur ini membantu dalam hal pengolahan data berupa kurva sehingga dapat ditemukan persamaan kurvanya. Maka diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 1. Persamaan kurva C_{L1} dan C_{L2} dari hasil pengolahan data.

Kecepatan Aliran	Persamaan C_{L1}	Persamaan C_{L2}
2 m/s	0.997 SIN (2.471 x)	0.875 SIN(2.321 x)
2.5 m/s	1.012 SIN (2.339x)	0.7747 SIN(2.46 x)
3 m/s	0.997 SIN (2.471 x)	0.875 SIN(2.321 x)
3.5 m/s	0.997 SIN (2.471 x)	0.875 SIN(2.321 x)
4 m/s	0.997 SIN (2.471 x)	0.875 SIN(2.321 x)

*Nilai c pada C_{L1} dan C_{L2} hasilnya mendekati nol maka dianggap nol

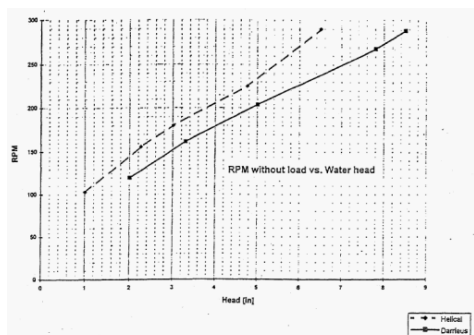
Tabel 2 Tabel persamaan kurva C_D dari hasil pengolahan data.

Kecepatan Aliran	Persamaan C_D
2 m/s	1.046sin(0.2651x+1.571) + 0.9446sin(4.005x+(-1.571))
2.5 m/s	1.054sin(0.1848x+1.638) + 1.0165sin(4.017x-1.858)
3 m/s	1.046sin(0.2651x+1.571) + 0.9446sin(4.005x+(-1.571))
3.5 m/s	1.046sin(0.2651x+1.571) + 0.9446sin(4.005x+(-1.571))
4 m/s	1.046sin(0.2651x+1.571) + 0.9446sin(4.005x+(-1.571))

Pengolahan Grafik Nilai Kecepatan Putar dengan Head Kecepatan

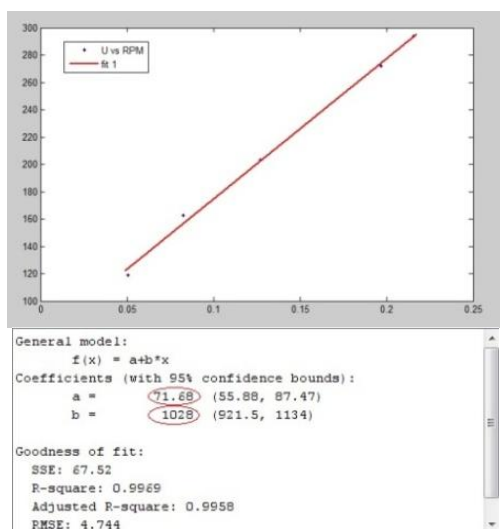
langkah-langkah dalam pengolahan grafik nilai kecepatan putar (n) dengan head kecepatan (H) pada

turbin Darrieus dimana tujuannya adalah untuk mencari nilai kecepatan sudut (ω) pada setiap kecepatan aliran. Grafik yang dijadikan acuan diperoleh dari ref [4] seperti yang ditampilkan pada grafik di bawah ini.



Gambar 7. Grafik kecepatan putaran tanpa beban dengan head kecepatan pada turbin Darrieus^[4].

Berikut ini adalah grafik kecepatan putar tanpa beban dengan kecepatan aliran pada turbin Darrieus yang telah diolah menggunakan regresi linier.



Gambar 8. Grafik yang telah diolah menggunakan regresi linier.

Dimana didapat persamaan:

$$n = 71.68 + 1028 H \quad (11)$$

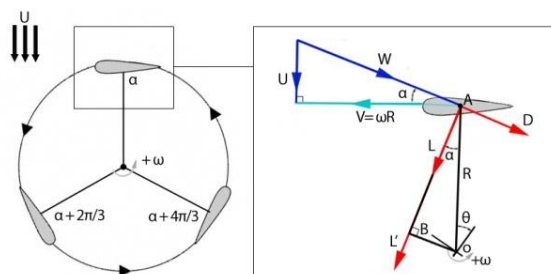
berikut adalah tabel hasil perhitungan dari variasi kecepatan aliran:

Tabel 3. Tabel persamaan kurva C_D dari hasil pengolahan data.

Kecepatan aliran (u)	Kecepatan sudut (ω)
2 m/s	29.351 Rad/s
2.5 m/s	41.833 Rad/s
3 m/s	56.897 Rad/s
3.5 m/s	74.651 Rad/s
4 m/s	95.203 Rad/s

Mencari Persamaan Rumus Torsi Turbin Darrieus

Gaya tangensial pada hydrofoil terjadi karena adanya komponen gaya angkat (*lift*) pada bidang putar yang dikurangi dengan gaya hambat (*drag*) yang berlawanan arah. Gaya tangensial pada rotor ini mempunyai jarak lengan tertentu pada sumbu putar (poros) dan hasil kali keduanya disebut dengan torsi (T).



Gambar 9. Diagram benda bebas dari vektor gaya dan kecepatan pada hydrofoil.

Dari gambar 7 dapat dilihat gaya-gaya yang bekerja pada hydrofoil, sehingga didapat persamaan torsi turbin yang dapat ditulis seperti di bawah ini,

$$T = L \times (R \sin \alpha) - (D) \times (R \cos \alpha) \quad (12)$$

Karena pada turbin terdapat 3 sudu dengan sudut-sudut tertentu maka persamaan pada setiap sudunya adalah sebagai berikut,

$$T_1 = L \times (R \sin \alpha) - (D) \times (R \cos \alpha)$$

$$T_2 = L \times (R \sin (\alpha + 120^\circ)) - (D) \times (R \cos (\alpha + 120^\circ))$$

$$T_3 = L \times (R \sin (\alpha + 240^\circ)) - (D) \times (R \cos (\alpha + 240^\circ))$$

Dimana nilai L dan D didapat dari persamaan diatas sehingga diuraikan menjadi berikut

$$T_1 = \left(\frac{1}{2} \times \rho \times (W)^2 \times A \times C_L\right) \times (R \sin \alpha) - \left(\frac{1}{2} \times \rho \times (W)^2 \times A \times C_D\right) \times (R \cos \alpha)$$

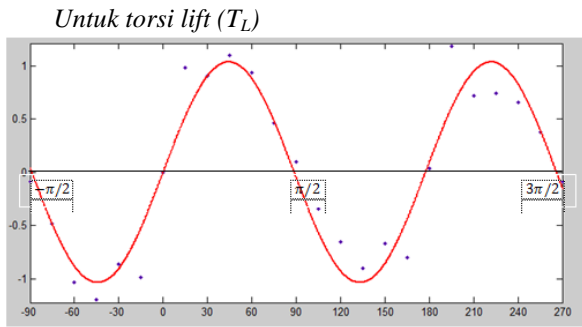
$$T_2 = \left(\frac{1}{2} \times \rho \times (W)^2 \times A \times C_L\right) \times (R \sin (\alpha + 120^\circ)) - \left(\frac{1}{2} \times \rho \times (W)^2 \times A \times C_D\right) \times (R \cos (\alpha + 120^\circ))$$

$$T_3 = \left(\frac{1}{2} \times \rho \times (W)^2 \times A \times C_L\right) \times (R \sin (\alpha + 240^\circ)) - \left(\frac{1}{2} \times \rho \times (W)^2 \times A \times C_D\right) \times (R \cos (\alpha + 240^\circ))$$

dimana

- T = Torsi (Nm)
- R = Radius (m)
- L = Gaya lift (gaya angkat) (N)
- C_L = Koefisien lift
- D = Gaya drag (gaya hambat) (N)
- C_D = Koefisien drag
- ρ = Density air yang mengalir (kg/m^3)
- W = Kecepatan air relatif (m/s)
- A = Luasan sudu (m^2)

Rumus torsi diatas hanya mewakili satu posisi sudut tertentu saja, maka torsi keseluruhan dapat dirumuskan sebagai berikut:



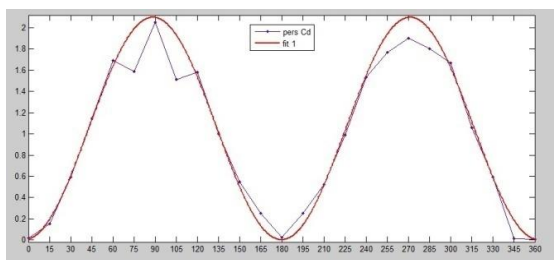
Gambar 10. Grafik *coefisien lift* (C_L) terhadap sudut serang (α).

$$T_L = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \rho \frac{1}{2} (W)^2 A C_{L1} (R \sin \alpha) d\alpha + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \rho \frac{1}{2} (W)^2 A C_{L2} (R \sin \alpha) d\alpha \right) \quad (13)$$

Nilai C_{L1} dan C_{L2} merupakan persamaan kurva sinusoidal hasil pengolahan data pada subbab sebelumnya yang mana nilainya dapat dilihat pada tabel 1. Dan untuk nilai Torsi *lift* di semua sudunya dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$T_L \text{ total} = (T_{L1 \text{ sudu } 1} + T_{L2 \text{ sudu } 1}) + (T_{L1 \text{ sudu } 2} + T_{L2 \text{ sudu } 2}) + (T_{L1 \text{ sudu } 3} + T_{L2 \text{ sudu } 3})$$

Untuk torsi drag (T_D)



Gambar 11. Grafik *coefficient drag* (C_D) terhadap sudut serang (α).

$$T_D = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \rho \frac{1}{2} W^2 A C_D R \cos \alpha d\alpha \right) \quad (14)$$

Nilai C_D merupakan persamaan kurva sinusoidal hasil pengolahan data pada subbab sebelumnya yang mana nilainya dapat dilihat pada tabel 2. Jadi besar torsi *drag* keseluruhan pada semua sudunya sebagai berikut:

$$T_D \text{ total} = T_{D \text{ sudu } 1} + T_{D \text{ sudu } 2} + T_{D \text{ sudu } 3} \quad (3.15)$$

Maka dari persamaan 13 dan persamaan 14 didapat nilai Torsi total dari turbin.

$$T_{\text{total}} = T_L \text{ total} - T_D \text{ total} \quad (15)$$

PERHITUNGAN

Pada bagian ini akan diuraikan metode perhitungan untuk mendapatkan besar nilai torsi, daya turbin, daya hidrolis, dan efisiensi dari turbin Darrieus hydrofoil NACA 0015 pada setiap variasi kecepatan guna nantinya mengetahui karakteristik dari turbin ini pada variasi bilangan reynoldnya.

Perhitungan Torsi (T)

Untuk mendapatkan nilai torsi total dari turbin Darrieus dengan hydrofoil NACA 0015 ini maka perlu dilakukan perhitungan di ketiga sudunya dimana disana dipengaruhi oleh nilai *lift* dan *drag* seperti yang telah diuraikan pada persamaan (15) dan variabel-variabel yang diketahui didapat dari hasil pengolahan data pada bab sebelumnya. Berikut ini adalah contoh perhitungan untuk mencari nilai torsi total pada kecepatan aliran 2.5 m/s (Perhitungan untuk variasi kecepatan lainnya bisa dilihat pada lampiran).

Diketahui:

- Kecepatan aliran (U) = 2.5 m/s
- Kecepatan sudut (ω) = 41.833 rad/s
- Koefisien *lift* 1 (C_{L1}) = 1.012 sin(2.339x)
- Koefisien *lift* 2 (C_{L2}) = 0.7747 SIN(2.46x)
- Koefisien drag (C_D) = 1.054 sin(0.1848x + 1.638) + 1.016 sin(4.017x - 1.858)
- Diameter (D) = 0.6 m [5]
- Panjang chord (c) = 0.18 m [5]
- Tinggi turbin (H) = 0.8 m [5]
- Kerapatan fluida (ρ) = 998.2 kg/m³

Rumus torsi *lift*:

$$T_L = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \rho \frac{1}{2} (W)^2 A C_{L1} (R \sin(x)) dx + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \rho \frac{1}{2} (W)^2 A C_{L2} (R \sin(x)) dx \right)$$

Rumus torsi *drag*:

$$T_D = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \rho \frac{1}{2} W^2 A C_D (R \cos(x)) dx$$

Dari perhitungan menggunakan rumus diatas didapat nilai torsi seperti ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4. Hasil perhitungan torsi dengan variasi kecepatan aliran.

Kecepatan aliran (U)	Torsi Lift (T_L)	Torsi Drag (T_D)	Torsi
2 m/s (Exp)	69.931 Nm	58.7379 Nm	11.193 Nm
2.5 m/s	418.69 Nm	400.994 Nm	17.696 Nm
3 m/s (Exp)	275.187 Nm	251.2936 Nm	23.893 Nm
3.5 m/s (Exp)	484.149 Nm	453.2692 Nm	30.88 Nm
4 m/s (Exp)	807.442 Nm	765.8386 Nm	41.603 Nm

Perhitungan Daya Turbin (P_t)

Seperti yang telah disinggung pada Bab II maka besar daya turbin yang dihasilkan dapat diperoleh melalui persamaan:

$$P_t = T \times \omega \quad (17)$$

Dimana nilai T atau torsi didapat dari hasil perhitungan pada subbab sebelumnya dan nilai ω atau kecepatan sudut didapat pada pengolahan data pada Bab III. Untuk perhitungan daya turbin dari turbin Darrieus dengan hydrofoil NACA 0015 pada kecepatan 2 m/s diketahui nilai T dan ω sebagai berikut,

Kecepatan sudut (ω) = 41.833 Rad/s
Torsi (T) = 17.696 N.m

Maka perhitungan daya turbin

$$P_t = T \cdot \omega$$

$$P_t = (17.696) (41.833)$$

$$P_t = 740.277 \text{ Watt}$$

Dibawah ini merupakan tabel hasil perhitungan daya turbin dari turbin Darrieus dengan hydrofoil NACA 0015 dari variasi kecepatan aliran 2 m/s sampai dengan 4 m/s.

Tabel 5 Hasil perhitungan daya turbin dengan variasi kecepatan aliran.

Kecepatan aliran (U)	Power Turbin (P _t)
2 m/s (Exp)	328.526 Watt
2.5 m/s	740.277 Watt
3 m/s (Exp)	1359.44 Watt
3.5 m/s (Exp)	2305.223 Watt
4 m/s (Exp)	3960.73 Watt

Perhitungan Daya hidrolis (P_h)

Daya hidrolis adalah daya yang masuk kedalam turbin berupa daya potensial air. Untuk mencari besar nilai daya hidrolis dapat menggunakan persamaan:

$$P_h = \rho g Q H$$

$$= \rho g (A U) \left(\frac{U^2}{2g}\right)$$

$$= \rho (A) \left(\frac{U^3}{2}\right)$$

$$= \rho (H)(D) \left(\frac{U^3}{2}\right)$$

Dimana diketahui:

Kerapatan fluida (ρ) = 998.2 kg/m³
Tinggi turbin (H) = 0.8 m
Diameter turbin (D) = 0.6 m
Kecepatan aliran (U) = 2 m/s

Maka perhitungan daya hidrolis pada kecepatan aliran 2 m/s.

$$P_h = \rho (H)(D) \left(\frac{U^3}{2}\right)$$

$$P_h = (998.2) (0.8) (0.6) \left(\frac{2^3}{2}\right)$$

$$P_h = 1916.544 \text{ Watt}$$

Dibawah ini merupakan tabel hasil perhitungan daya turbin dari turbin Darrieus dengan hydrofoil NACA 0015 dari variasi kecepatan aliran 2 m/s sampai dengan 4 m/s,

Tabel 6. Hasil perhitungan daya hidrolis dengan variasi kecepatan aliran.

Kecepatan aliran (U)	Power Hidrolis (P _h)
2 m/s (Exp)	1916.544 Watt
2.5 m/s	3743.25 Watt
3 m/s (Exp)	6468.336 Watt
3.5 m/s (Exp)	10271.478 Watt
4 m/s (Exp)	15332.352 Watt

Perhitungan Efisiensi Turbin (η_t)

Efisiensi turbin didapat dari besarnya daya yang keluar (P_t) berbanding dengan daya yang masuk (P_h) dimana telah dirumuskan pada persamaan (3.19)

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_h} \times 100\%$$

Besar nilai daya turbin (P_t) dan daya hidrolis (P_h) telah didapatkan dari perhitungan sebelumnya. Berikut dibawah ini adalah perhitungan nilai efisiensi turbin Darrieus dengan hydrofoil NACA 0015 pada kecepatan aliran 2 m/s dimana diketahui,

Daya turbin (P_t) = 740.277 Watt
Daya hidrolis (P_h) = 3743.25 Watt

maka perhitungannya sebagai berikut,

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_h} \times 100\%$$

$$\eta_t = \frac{740.277 \text{ Watt}}{3743.25 \text{ Watt}} \times 100\%$$

$$\eta_t = 19.776 \%$$

Dibawah ini merupakan tabel hasil perhitungan efisiensi turbin dengan variasi kecepatan aliran,

Tabel 7. Hasil perhitungan efisiensi turbin dengan variasi kecepatan aliran.

Kecepatan aliran (U)	Efisiensi Turbin (η_t)
2 m/s (Exp)	17.14%
2.5 m/s	19.776 %
3 m/s (Exp)	21.02 %
3.5 m/s (Exp)	22.44 %
4 m/s (Exp)	25.833 %

Data hasil seluruh perhitungan yang telah dilakukan yang terdiri dari besar nilai torsi, daya turbin, daya hidrolis dan efisiensi turbin dirangkum pada tabel dibawah ini.

Tabel 8. Hasil perhitungan karakteristik turbin Darrieus dengan hydrofoil NACA 0015 dengan variasi kecepatan aliran.

Kecepatan aliran (U)	Torsi Nm	P_t Watt	P_h Watt	η_t
2 m/s (Exp)	11.193	328.526	1916.544	17.14 %
2.5 m/s	17.696	740.277	3743.25	19.776 %
3 m/s (Exp)	23.893	1359.44	6468.336	21.02 %
3.5 m/s (Exp)	30.88	2305.223	10271.478	22.44 %
4 m/s (Exp)	41.603	3960.73	15332.352	25.833 %

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil perancangan yang telah dilakukan pada turbin Darrieus 3 sudu dengan spesifikasi profil sudu NACA 0015, diameter 0.6 m, tinggi sudu 0.8 m, dan panjang chord 0.18 m dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai torsi turbin tertinggi didapat pada kecepatan aliran air 4 m/s sebesar 41.603 Nm.
2. Nilai daya turbin tertinggi didapat pada kecepatan aliran air 4 m/s sebesar 3960.73 Watt.
3. Nilai daya hidrolis tertinggi sebesar 15332.352 Watt yang didapat pada kecepatan aliran air 4 m/s.
4. Mencapai nilai efisiensi terbaik pada kecepatan aliran air 4 m/s yaitu sebesar 25.83 % .

Saran

1. Dalam perancangan turbin Darrieus sebaiknya lebih banyak melakukan variasi jumlah sudu dan variasi pada bilangan Reynoldnya.
2. Konstruksi turbin perlu diperhatikan penggunaan material sesuai situasi dan kondisi lingkungan dimana turbin tersebut dipasang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Munson, Bruce R, Donald F Young, and Theodore H. Okiishi. 2002. “ *Fundamental of Fluids Mechanic 2nd*

2. Decoste , Josh, “*Self-Starting Darrieus Wind Turbine*”. Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University.
3. El-Sayed, A.F dan Abdel Azim. 1995. “*Dynamics of Vertical Axis Wind Turbines (Darrieus Type)*”. Zagazig University.
4. Gerhart, Philip M dan Richard J. Gross. 1985 . “*Fundamentals of Fluid Mechanics*”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA.
5. Gorlov, A. M. 1998. “*Development of the Helical Reaction Hydrolic Turbine*”, MIME Department, Northeastern University, Boston
6. Young H.D dan Freedman R.A. 2001. “*Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid 1*”. Jakarta: Penerbit Erlangga.
7. www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/0506/marine_renewables/home/contents.htm.
8. http://en.wikipedia.org/wiki/NACA_Airfoil