

OPTIMASI PERANCANGAN TURBIN ANGIN VERTIKAL TIPE DARRIEUS UNTUK PENERANGAN DI JALAN TOL

Ismail^{1*}, Erlanda Pane¹, Triyanti¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Pancasila
Jl Raya Lenteng Agung, Srengseng Sawah, Jagakarsa
*E-mail: erlandaauptapane@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk optimasi perancangan dan analisis turbin angin sebagai teknologi alternatif yang dimanfaatkan untuk penerangan jalan tol. Penerangan jalan tol merupakan hal yang penting bagi aktivitas transportasi terutama dalam kondisi malam hari. Teknologi turbin angin yang dirancang memiliki prinsip kerja yaitu memanfaatkan hembusan angin dari kendaraan yang melintas untuk memutar sudu turbin dan menjadi energi listrik simpan. Data parameter yang mempengaruhi dalam perancangan turbin angin adalah variasi jumlah sudu turbin, sudut puntiran sudu turbin, kecepatan angin, tinggi rotor penggerak turbin, dan massa jenis udara. Metode penelitian yang digunakan dalam perancangan melalui empat tahapan yaitu *review* literatur, observasi lapangan, perancangan dan analisis turbin angin. Hasil perancangan didapatkan bahwa turbin angin vertikal tipe *Darrieus* yang optimal untuk penerangan jalan tol dengan jumlah sudu turbin sebanyak dua buah, sudut puntiran sudu turbin sebesar 30⁰, diameter rotor sebesar 350 mm, dan ketinggian rotor sebesar 1,050 mm untuk kecepatan rata-rata angin sebesar 2.1 m/s. Daya yang dihasilkan oleh turbin angin sebesar 1.908 Wh, dimana energi listrik yang disimpan mampu bertahan selama 12 jam di dalam akumulator sebesar 24 V dan kapasitas sebesar 50 Ah. Aplikasi energi tersebut dapat diterapkan pada dua buah lampu LED dengan daya sebesar 40 Watt / 8-24 Volt DC dan total beban pemakaian sebesar 1.104 Wh.

Kata kunci: Sudu turbin; Sudut puntir sudu turbin; Turbin angin *darrieus*

ABSTRACT

This research conducted to optimization and analysis of wind turbine design as an alternative technology, which applied for the lighting of road. Lighting of road is an important thing for transportation activity especially in the night. The principle of wind turbine design is utilization of wind from the vehicle motion in the road to rotate of turbine blade and become to electric energy stored. Basic parameters to influence of wind turbine performance are the number of turbine blade, the twist angle of turbine blade, wind velocity, rotor height, and air density. The method of research use four steps which is literature review, observation, design and analysis wind turbine. The results showed that Darrieus type wind turbine was optimum to lighting of roads with two turbine blades, the twist angle of turbine blade is 30⁰, rotor diameter is 350 mm, and rotor height is 1,050 mm to average wind velocity is 2.1 m/s. The power of wind turbine is 1.908 Wh, where the electric energy can be kept for 12 hours in the accumulator, which have voltage 24 V and capacity 50 Ah. The electric energy can be applied in the two LED lamps with the power of LED is 40 W/ 8-24 Volt DC and capacity total is 1.104 Wh.

Keywords : *Darrieus wind turbine; Turbine blade; twist angle of turbine blade*

PENDAHULUAN

Transportasi merupakan suatu aktivitas manusia untuk berpindah dan kegiatan pendistribusian barang dari satu tempat ke tempat lain yang dilakukan selama 24 jam. Transportasi juga merupakan hal yang penting untuk mendukung pengembangan kegiatan sosial dan peningkatan ekonomi nasional suatu negara (Chai *et al*, 2016). Transportasi pada malam hari merupakan kegiatan yang paling banyak dilakukan karena pendistribusian barang dari dan ke suatu tempat sangat cepat

dilakukan sehingga mampu menurunkan biaya operasional barang (Rayes & Hyari, 2005).

Peningkatan aktivitas transportasi pada malam hari dapat dilakukan dengan faktor pendukung yaitu penerangan jalan. Penerangan jalan mampu mendukung tingkat kenyamanan dan keselamatan para pengguna jalan terutama untuk keamanan terlebih jalan-jalan di dalam kota yang memiliki rata-rata tingkat lalu lintas cukup tinggi (Widodo, 2009). Pada umumnya, penerangan jalan raya menggunakan teknologi *solar cell* dengan memanfaatkan penyerapan

energi radiasi matahari yang dikonversikan menjadi energi listrik. Bahan utama dari teknologi *solar cell* adalah silikon yang merupakan bahan pengembangan dari semikonduktor elektronik (Subodro, 2012). Teknologi *solar cell* dengan bahan silikon masih memiliki beberapa kekurangan yaitu rendahnya penyerapan spektrum radiasi matahari dikarenakan membutuhkan ketebalan material silikon yang cukup besar (ketebalan 200 μm), dan untuk meningkatkan daya serap *solar cell* yang berhubungan dengan efisien maka diperlukan proses pemurnian untuk meningkatkan kualitas bahan silikon dengan biaya yang mahal (Yu Peng *et al*, 2017), dengan kekurangan tersebut maka diperlukan teknologi energi alternatif yang lain untuk sistem penerangan jalan tersebut.

Energi angin merupakan sumber energi terbarukan yang dapat dijadikan sebagai sumber energi alternatif penerangan jalan dikarenakan energi angin tidak memerlukan bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik, dan ruang instalasi yang kecil (Promdee & Photong, 2016). Sumber energi angin yang terbanyak pada jalan raya terletak pada jalan tol dikarenakan selain aliran angin alami, aliran angin yang berasal dari kendaraan yang melintas pada jalan tol menjadi sumber yang sangat potensial. Tingginya kecepatan angin yang berasal dari pergerakan kendaraan pada jalan tol menghasilkan gangguan yang kuat pada udara dan mengirimkan energi untuk membangun pemanfaatan energi dalam bentuk energi angin lokal (Lapointe & Gopalan, 2016). Potensi energi angin pada jalan tol yang sangat tinggi, tergantung pada jauhnya jarak jalan tol dan tingginya suatu jalan tol (Tian *et al*, 2017).

Turbin angin merupakan teknologi energi alternatif yang mampu mengkonversi energi angin pada jalan tol menjadi energi listrik. Turbin angin memiliki dua buah tipe yaitu turbin angin tipe *horizontal axis* (HAWT) dan *vertical axis* (VAWT). Prinsip kerja dari turbin angin HAWT berdasarkan gaya angkat (*lift force*) energi angin dan turbin angin VAWT berdasarkan gaya tarik (*drag force*) yang terjadi akibat pergerakan angin (Santhakumar *et al*, 2017). Gaya tarik (*drag force*) berdasarkan pergerakan angin sangat cocok dengan aliran angin dari pergerakan kendaraan karena memiliki gaya torsi yang lebih besar (Goh *et al*, 2016). Oleh karena itu,

teknologi turbin VAWT dapat digunakan untuk teknologi alternatif konversi energi angin. Selain itu, turbin angin tipe VAWT memiliki kelebihan yaitu memiliki kapabilitas untuk menahan aliran turbulen, dan memungkinkan dapat berotasi dengan mudah pada aliran angin yang rendah (Mahmoud *et al*, 2012),

Turbin angin tipe VAWT memiliki dua tipe yaitu tipe *Darrieus* dan tipe *Savonius* (Ambrosio & Marco, 2010). Tipe turbin angin tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Turbin Savonius

Turbin Darrieus

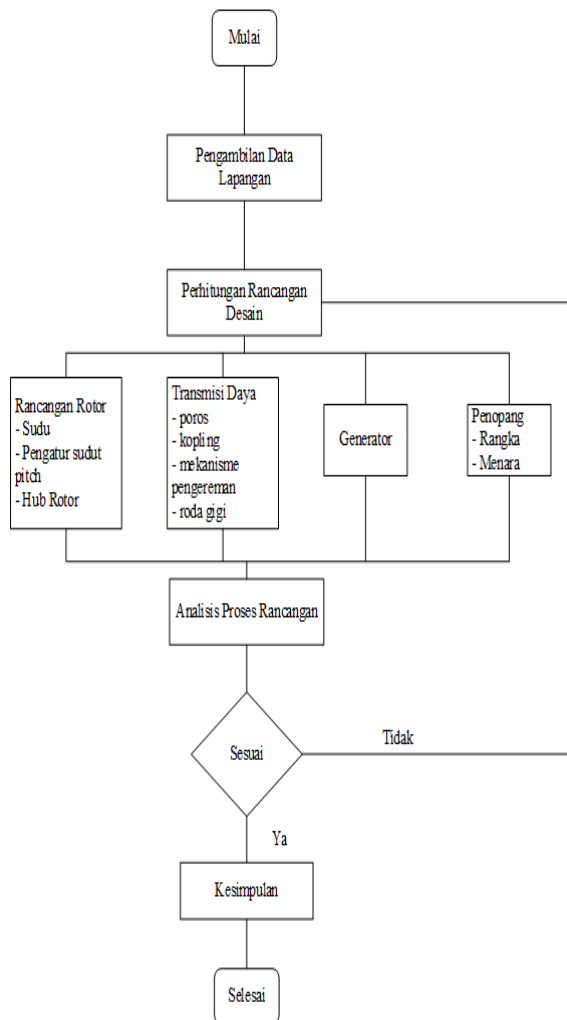
Gambar 1. Tipe turbin angin VAWT
(Ambrosio & Marco, 2010)

Tipe *Darrieus* memiliki koefisien daya (C_p) sebesar 0.2-0.4 dan kebutuhan kecepatan angin minimal untuk memutar sudu turbin sebesar 3–7.5 m/s lebih besar jika dibandingkan dengan koefisien daya (C_p) tipe *Savonius* sebesar 0.1-0.2 dan kecepatan angin minimal sebesar 1.4 m/s (Promdee & Photong, 2016). Pada penelitian ini dikembangkan penggunaan turbin angin VAWT tipe *Darrieus*, dikarenakan pada penelitian ini lebih mengutamakan desain turbin dengan koefisien daya (C_p) besar yang memiliki pengaruh terhadap gaya torsi. Parameter dasar yang mempengaruhi desain dari turbin angin tipe *Darrieus* adalah kecepatan angin, jumlah sudu turbin, sudut puntiran sudu turbin, massa jenis udara, dan tinggi rotor penggerak turbin. Berdasarkan data parameter tersebut, maka analisis kecepatan angin rata-rata yang masuk ke dalam turbin dan analisis daya energi angin untuk menghasilkan energi listrik pada penerangan jalan tol dapat diketahui. Selain itu, tujuan dari penelitian ini adalah mengoptimasi perancangan dan analisis turbin angin tipe *Darrieus* sebagai teknologi alternatif untuk penerangan jalan tol dengan perhitungan variasi jumlah sudu dan sudut puntir sudu turbin yang berdampak pada penggunaan sejumlah lampu dan daya simpan energi listrik.

METODE

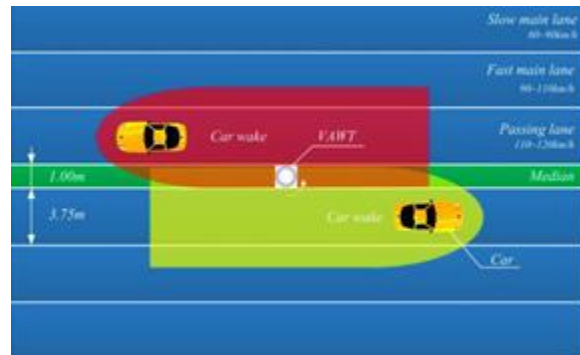
Desain turbin angin tipe *Darrieus* yang digunakan untuk penerangan jalan tol melalui empat tahapan metode yaitu *review* literatur, observasi lapangan, perancangan, dan analisis energi turbin angin. Keseluruhan tahapan tersebut dapat ditampilkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Diagram Alir Perancangan



Pada tahapan *review* literatur yang dibahas pada bagian pendahuluan sebelumnya dapat diketahui bahwa turbin angin VWAT tipe *Darrieus* cocok digunakan untuk menangkap besarnya energi angin yang dihasilkan oleh pergerakan kendaraan pada jalan tol. Perlu diketahui, pada umumnya jalan tol memiliki tiga buah jalur antara lain jalur lambat (*slow main lane*), jalur cepat (*fast main lane*), dan jalur untuk mendahului kendaraan yang lain (*passing lane*). Jarak antara jalur pada jalan tol yang berlawanan arah adalah sebesar 1 m, sedangkan lebar setiap jalur sebesar 3.75 m

(Tian *et al*, 2017). Rata-rata kecepatan kendaraan tiap-tiap jalur berbeda satu sama lain, dimana data kecepatan tersebut dapat ditampilkan pada Gambar 3. Data kecepatan kendaraan tersebut dapat digunakan sebagai data primer untuk perancangan turbin.

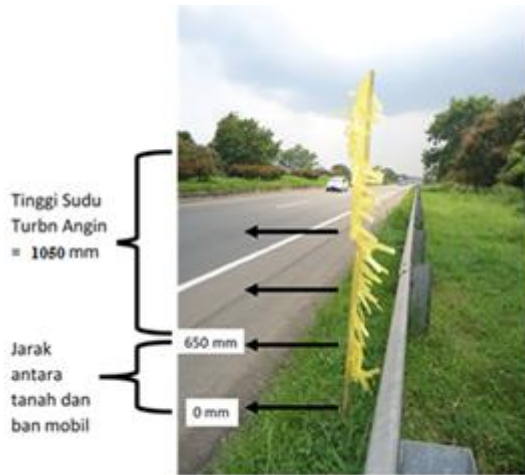


Gambar 3. Skema kecepatan kendaraan pada jalan tol (Tian *et al*, 2017)

Tahapan pengambilan data (observasi) pada lapangan selanjutnya dilakukan untuk menguatkan data yang didapatkan hasil dari *review* literatur. Data observasi lapangan disesuaikan dengan potensi energi angin dari kendaraan terhadap kebutuhan daya listrik untuk penerangan jalan tol. Pada pengambilan data kecepatan angin dari kendaraan yang melintas dilakukan sebanyak dua kali dalam satu hari, yaitu pada saat siang hari (Pukul 13.00-14.30) dan malam hari (Pukul 19.30-21.00) dengan rentangan waktu masing-masing selama satu setengah jam. Pengambilan data dilakukan dengan menempatkan empat titik bagian pengambilan data. Titik pengambilan data tersebut terletak di bagian antara lain:

- Titik 1 yaitu titik ketinggian dari dasar tanah setinggi 650 mm.
- Titik 2 yaitu titik ketinggian dari dasar tanah setinggi 1000 mm
- Titik 3 yaitu titik ketinggian dari dasar tanah setinggi 1350 mm
- Titik 4 yaitu titik ketinggian dari dasar tanah setinggi 1700 mm

Titik pengambilan data (observasi) lapangan tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Tinggi hembusan angin kendaraan

Malam hari merupakan kondisi di mana angin membawa suhu yang lebih tinggi dibandingkan pada kondisi siang hari, sehingga aliran angin pada malam hari lebih besar dibandingkan

siang hari (Kim, 2014), hal ini dapat terlihat pada data observasi lapangan Tabel 1. Pengambilan data observasi, menggunakan anemometer yang terpasang pada tiang

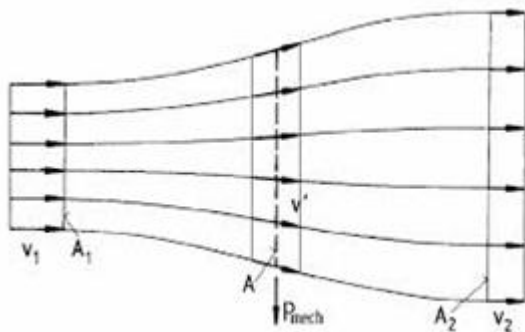
pengukur dan posisinya disesuaikan dengan empat titik pengambilan data. Tiang pengukur tersebut diletakkan sejauh 1.5 meter dari bahu jalan. Pengambilan data kecepatan angin dilakukan sebanyak sepuluh kali per tiap titik, dengan tujuan untuk mendapatkan analisis kecepatan angin rata-rata. Selain itu, dapat juga untuk menentukan tata letak turbin berdasarkan penentuan arah angin yang berpotensi menghasilkan energi yang besar untuk dimanfaatkan.

Tahapan selanjutnya yaitu perancangan turbin angin tipe *Darrieus*. Komponen-komponen utama yang terdapat pada turbin untuk dirancang antara lain sudu turbin, sistem transmisi daya, rotor turbin, generator, dan akumulator (*accumulator*) sebagai penyimpan daya listrik (Josh, 2004). Perancangan turbin angin tipe *Darrieus* memiliki parameter dasar yang mempengaruhi performa dari turbin. Parameter dasar tersebut adalah kecepatan angin, jumlah sudu turbin, sudut puntiran sudu turbin, massa jenis udara, dan tinggi rotor

Tabel 1. Data kecepatan angin hasil observasi lapangan

No.	Waktu (Jam)	Kecepatan Angin (m/s)			
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4
Siang Hari					
1.	13.00	1.56	1.67	1.97	2.18
2.	13.10	1.26	1.17	1.47	1.18
3.	13.20	1.13	1.21	1.74	2.15
4.	13.30	1.07	2.03	1.88	1.16
5.	13.40	0.96	1.65	2.23	1.89
6.	13.50	1.32	1.87	2.05	1.76
7.	14.00	1.08	1.51	1.36	1.32
8.	14.10	1.08	1.21	1.32	1.38
9.	14.20	0.95	1.08	0.94	1.17
10.	14.30	0.67	1.20	0.99	1.39
Malam Hari					
1.	19.30	1.52	1.87	2.44	1.25
2.	19.40	1.81	1.43	1.92	1.32
3.	19.50	1.53	2.63	1.35	2.91
4.	20.00	1.75	1.95	2.35	1.31
5.	20.10	1.90	2.55	1.92	2.18
6.	20.20	1.62	1.35	1.77	1.82
7.	20.30	1.55	1.62	3.05	2.92
8.	20.40	1.32	1.71	3.12	2.56
9.	20.50	1.62	1.52	3.54	3.35
10.	21.00	1.97	1.65	1.93	2.22

penggerak turbin. Data parameter kecepatan angin, massa jenis udara, dan tinggi rotor penggerak turbin telah diketahui melalui data observasi lapangan. Data yang berasal dari observasi tersebut dapat digunakan untuk menentukan sistem aerodinamis sudu turbin seperti perhitungan dimensi sudu turbin (tipe *airfoil* dan *tip speed ratio*) dan dapat menentukan daya angin dan daya mekanik rotor turbin yang digunakan. Daya angin dapat diketahui dengan melalui persamaan kontinuitas Hukum Betz. Persamaan kontinuitas menjelaskan kondisi kecepatan angin masuk ke dalam rotor (V_1), kecepatan angin pada rotor (V'), dan kecepatan angin setelah rotor (V_2) yang dijelaskan pada Gambar 5.



Gambar 5. Kecepatan angin melewati rotor (Gundtoft, 2009)

Perhitungan Hukum Betz dapat mengetahui daya angin yang masuk ke dalam turbin melalui Persamaan 1. (Wagner *et al*, 2009)

$$P_{wind} = \frac{E_{kin,wind}}{\Delta t} = \frac{\Delta V \rho v^2}{2\Delta t} = \frac{Av\Delta t v^2 \rho}{2\Delta t} = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (1)$$

Kondisi penggunaan rotor turbin tergantung pada dimensi sudu turbin yang merupakan bentuk fungsi dari *tip speed ratio* (λ), diameter rotor turbin (D), dan jumlah elemen sudu (B). Pada tahap awal desain sudu turbin perlu diketahui kecepatan putar rotor turbin (n) yang merupakan hubungan antara *tip speed ratio* (TSR) dengan kecepatan angin (v) yang dijelaskan melalui Persamaan 2. (Wagner *et al*, 2009)

$$n = \frac{\lambda 60 v}{\pi D} \quad (2)$$

Data kecepatan putar rotor turbin dapat menentukan koefisien daya (C_p) rotor turbin yang digunakan dan disesuaikan dengan grafik

perbandingan antara C_p dan TSR yang disajikan pada Gambar 6. Grafik pada Gambar 6 juga dapat menandakan ukuran kinerja turbin angin dan indikator secara keseluruhan dari turbin angin. TSR mempengaruhi jumlah sudu yang digunakan dalam mendesain turbin tipe *Darrieus*. Hal ini dapat ditunjukkan pada data Tabel 2.

Tabel 2. Hubungan TSR dengan jumlah sudu

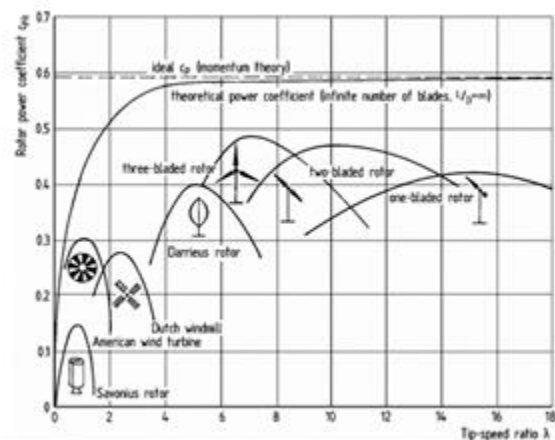
TSR (λ)	Jumlah Sudu (B)
1	8-24
2	6-12
3	4-6
4	3-4
>4	1-3

Sumber : Laysen, 1983

Tip speed ratio (λ) juga dapat menentukan sudut aliran angin (Φ), dan formulasi penentuan lebar sudu atau *chord* (C) sebagai fungsi jarak terhadap pusat rotasi (r) dengan menggunakan pendekatan Hukum Betz (Laysen, 1983) dan disesuaikan dengan jumlah sudu turbin (B) serta kondisi rasio gaya angkat (*lift force*) dan gaya dorong (*drag force*) turbin (C_l/C_d) yang perhitungannya menggunakan Persamaan 3 dan 4.

$$\Phi = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

$$C = \frac{8 \pi r}{B \frac{C_l}{C_d}} (1 - \cos \Phi) \quad (4)$$



Gambar 6. Grafik perbandingan C_p dan TSR (John, 2012)

Desain sudu turbin juga tidak terlepas dari rancangan sistem aerodinamis sudu turbin yang ditentukan dengan tipe *airfoil* yang digunakan. *Airfoil* merupakan bagian terpenting

pada bagian sudu turbin untuk menerima aliran angin yang melintasi permukaan sudu. Menurut John, tipe *airfoil* yang digunakan pada saat ini memiliki dua tipe yaitu NACA 4412 dan NACA 23012. Berdasarkan pengujian *airfoil* yang dilakukan oleh John, dapat diketahui bahwa *airfoil* tipe NACA 4412 memiliki koefisien daya dan efisiensi sudu turbin yang lebih baik daripada *airfoil* tipe NACA 23012, sehingga pada penelitian ini *airfoil* tipe NACA 4412 dalam merancang sudu turbin yang terpilih. Penentuan tipe aliran yang mengalir pada *airfoil* tipe NACA 4412 menggunakan persamaan bilangan Reynolds yang ditunjukkan pada Persamaan 5. (John, 2012)

$$Re = \frac{\rho v c}{\mu} \quad (5)$$

Nilai sudut koefisien *lift force* dan *drag force* atau yang biasa dikenal dengan sudut serang (*angle of attack*) dari *airfoil* NACA 4412 (α) adalah sebesar 8.5⁰ (John,2012). Nilai koefisien tersebut dapat digunakan untuk menentukan sudut *pitch* (β) sebagai sudut sudu turbin yang digunakan untuk menerima aliran angin yang melewati area permukaan sudu berdasarkan Persamaan 6. (John,2012)

$$\beta = \Phi - \alpha \quad (6)$$

Analisis distribusi gaya yang terjadi pada sudu turbin dilakukan berdasarkan perhitungan rancangan sudu turbin. Analisis distribusi gaya terfokus kepada analisis gaya dorong (*drag force*) [F_d] dan gaya angkat (*lift force*) [F_L]. Distribusi kedua gaya ini dipengaruhi oleh koefisien gaya dorong (C_D) sebesar 0.02333 dan gaya angkat (C_L) sebesar 1.3086 di mana kedua koefisien tersebut tergantung dari nilai sudut (α) *airfoil* tipe NACA 4412 (John, 2012), massa jenis udara (ρ), luas penampang sudu turbin yang dirancang dari *software* desain *SoildWork* (A), dan kecepatan angin (v). Kedua gaya tersebut dapat diketahui dengan Persamaan 7 dan 8 (John,2012).

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (7)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A \quad (8)$$

Setelah mengetahui besaran gaya angkat dan gaya dorong, maka dilakukan perhitungan gaya aksial (F_a) dan gaya tangensial (F_t) pada sudu turbin dengan pengaruh sudut *apparent*

wind atau sudut arah angin masuk ke dalam sudu turbin (ϕ) yang dapat dihitung dengan Persamaan 9 (John, 2012) berdasarkan jari-jari rotor (r) dan TSR (λ) yang kemudian dilanjutkan dengan Persamaan 10 dan 11. (John, 2012)

$$\phi = \arctan \frac{r}{r \lambda} \quad (9)$$

$$F_t = F_L \cos \phi + F_D \sin \phi \quad (10)$$

$$F_a = F_L \sin \phi - F_D \cos \phi \quad (11)$$

Setelah melakukan desain sudu turbin, maka selanjutnya dapat ditentukan kondisi daya teoritis pada turbin. Daya teoritis pada perancangan turbin angin tipe *Darrieus* memperhitungkan laju aliran massa, daya mekanik rotor turbin, dan daya turbin yang dibangkitkan oleh hembusan angin. Perhitungan laju aliran massa udara (\dot{m}), dipengaruhi oleh luas penampang (A) dari sudu yang dirancang. Perhitungan laju aliran massa (\dot{m}) menggunakan Persamaan 12. (Tong, 2010)

$$\dot{m} = \rho . A . v \quad (12)$$

Daya mekanik turbin terletak pada bagian rotor turbin. Daya mekanik pada rotor turbin tergantung dari putaran rotor turbin (n) dan gaya torsi (T) yang terdapat pada sistem rotor turbin, dimana gaya torsi tersebut dipengaruhi oleh faktor antara lain laju aliran massa udara (\dot{m}), kecepatan angin yang masuk ke dalam rotor (v), dan jari-jari rotor (r). Analisis gaya torsi (T) dan daya mekanik (P_m) rotor turbin dapat dihitung dengan Persamaan 13 dan 14 (Tong, 2010)

$$T = \dot{m} (v_1 - v_2) R \quad (13)$$

$$P_m = T \left(\frac{2 \pi n}{60} \right) \quad (14)$$

Daya turbin yang dibangkitkan oleh hembusan angin (P_t) merupakan daya yang dipengaruhi oleh adanya daya hembusan angin yang melewati turbin (P_{wind}). Daya turbin tersebut juga dipengaruhi dari kondisi koefisien daya turbin tersebut (C_p). Hal ini dapat diketahui melalui Persamaan 15 (Tong, 2010).

$$P_t = C_p * P_{wind}$$

$$P_t = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (15)$$

Setelah perhitungan rancangan desain turbin (rotor turbin dan sudu turbin) telah dilakukan, pada tahapan selanjutnya dilakukan

proses pemilihan material untuk turbin angin. Proses pemilihan material dilakukan dengan memperhatikan kondisi aspek kenyamanan, keselamatan dan keamanan sisi operasional turbin angin tersebut. Aspek yang digunakan untuk pemilihan material adalah memiliki bahan yang kuat dan kaku dengan massa barang yang relatif ringan, tidak berubah bentuk dalam kondisi apapun, mudah dibentuk, tahan terhadap korosi dan perawatan mudah.

Proses perancangan dan pemilihan material yang telah dilakukan, kemudian pada tahapan selanjutnya dilakukan proses analisis energi listrik yang telah dihasilkan oleh turbin angin untuk diaplikasikan pada sistem penerangan jalan. Sistem penerangan jalan memerlukan identifikasi besaran arus yang dibutuhkan untuk pembebanan menyalakan lampu, daya beban penerangan, dan spesifikasi lampu yang digunakan dengan tujuan optimasi rancangan turbin dapat tercapai. Spesifikasi lampu yang digunakan memiliki daya sebesar 40 W dengan tegangan sebesar 8-24 Volt dan frekuensi sebesar 50 Hz. Perhitungan arus pada lampu dapat menggunakan Persamaan 16. (Tong, 2010)

$$I = \frac{P}{V} \quad (16)$$

Beban pemakaian lampu (P_{beban}) dilakukan pada rentangan waktu (T) selama 12 jam sesuai dengan jumlah lampu yang digunakan (N). Perhitungan pembebanan penerangan listrik berdasarkan penyimpanan energi yang ditempatkan pada bagian akumulator untuk pemakaian selama 12 jam. Penentuan waktu selama 12 jam berdasarkan sistem penerangan yang digunakan pada malam hari. Daya total (P_{total}) yang dibutuhkan oleh lampu merupakan hasil penjumlahan dari beban pemakaian lampu, dengan kerugian sistem yang ditimbulkan pada umumnya sebesar 15% dari total beban pemakaian lampu (Tong, 2010). Daya beban pemakaian lampu dan daya total keseluruhan dapat ditentukan dengan Persamaan 17 dan 18. (Tong, 2010)

$$P_{\text{beban}} = (P_{\text{lampu}} \cdot T) \cdot N \quad (17)$$

$$P_{\text{total}} = P_{\text{bebsn}} + \text{rugi sistem} \quad (18)$$

$$P_{\text{total}} = P_{\text{bebsn}} + (15\% \cdot P_{\text{beban}})$$

Hasil daya total yang diketahui dapat menentukan besaran arus beban yang mengalir ke dalam lampu mengikuti perhitungan Persamaan 19. (Tong, 2010)

$$I = \frac{P_{\text{total}}}{V} \quad (19)$$

Analisis energi pada generator listrik dilakukan karena terhubung dengan rotor turbin. Generator listrik yang digunakan memiliki sistem magnet permanen yang memiliki spesifikasi putaran generator sebesar 500 rpm, arus generator sebesar 3.34 A, dan tegangan keluar generator sebesar 14 V-DC. Daya generator yang digunakan menggunakan Persamaan 20. (Tong, 2010)

$$P_{\text{generator}} = V \times I \times \eta_{\text{generator}} \quad (20)$$

Rotor turbin yang berputar selama 24 jam menandakan generator juga bekerja selama 24 jam, sehingga daya listrik yang dihasilkan oleh generator dapat ditentukan dengan Persamaan 21 (Tong, 2010). Selain itu, total arus yang dihasilkan oleh generator selama 24 jam juga dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 22. (Tong, 2010)

$$P_{\text{generator total}} = 24 \text{ jam} \times P_{\text{generator}} \quad (21)$$

$$I_{\text{generator total}} = 24 \text{ jam} \times I_{\text{generator}} \quad (22)$$

Analisis optimasi perancangan turbin dilakukan juga dengan menggunakan parameter variasi jumlah sudu turbin, dan variasi pemuntiran sudu. Variasi jumlah sudu turbin menggunakan variasi sebanyak 2 buah, 4 buah, 6 buah, dan 8 buah, sedangkan variasi pemuntiran sudu turbin mengambil sudut sudu turbin sebesar 30° , 90° , 150° , 210° , 270° , dan 330° . Pemilihan sudut puntir sudu turbin dengan menggunakan simulasi *software Qblade*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data kecepatan angin observasi lapangan pada Tabel 1 dilakukan pengumpulan data secara kumulatif, sehingga frekuensi kecepatan angin yang selalu muncul, dan nilai rata-rata kecepatan angin dapat diketahui. Data kumulatif kecepatan angin terlihat pada Tabel 3. Frekuensi kumulatif kecepatan angin terjadi pada rentangan antara 1.49 m/s sampai dengan 1.9 m/s dengan nilai tengah (median) sebesar 1.7 m/s. Nilai kecepatan angin yang selalu muncul (modus) terjadi secara berturut-turut adalah 1.29 m/s, 1.70 m/s, dan 2.11 m/s. Sedangkan, kecepatan angin maksimal terjadi pada kondisi malam hari sebesar 3.43 m/s. Nilai rata-rata kecepatan angin dengan frekuensi kumulatif secara keseluruhan adalah 2.1 m/s. Data rata-rata kecepatan angin jalan

tol diperoleh pada jalur bebas hambatan, dengan kondisi kecepatan rata-rata kendaraan yang melintas sebesar 80 km/jam. Berdasarkan data observasi lapangan tersebut dapat diketahui juga bahwa pada titik ke empat dengan ketinggian 1700 mm dari tanah atau

1050 mm dari ban mobil memiliki kecepatan angin terbesar. Sehingga, desain rotor turbin dilakukan pemasangan pada ketinggian tersebut dan jari-jari rotor turbin dirancang sebesar 350 mm. Massa jenis udara yang terdapat pada jalan tol sebesar 1.225 kg/m^3 .

Tabel 3. Data kumulatif kecepatan angin

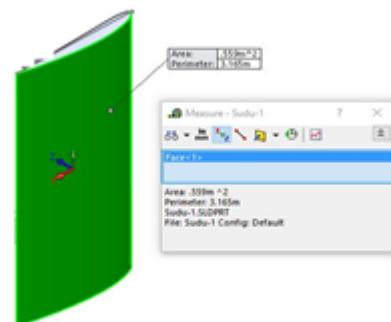
No.	Variabel	Nilai
1.	Jumlah Data (N)	80
2.	Rentangan Nilai	2.87
3.	Banyaknya kelas Pembulatan	7.34 7
4.	Panjang Kelas	0.41
5.	Rata-rata	2.1 m/s
6.	Standar Deviasi	0.909
7.	Distribusi Frekuensi Maksimum Minimum	1.7 m/s 3.43 m/s

Keseluruhan data observasi lapangan tersebut dapat dijadikan sebagai data primer dalam mendesain perhitungan aerodinamis sudu turbin dan kemampuan rotor turbin.

Perancangan desain turbin pada tahapan awal terletak pada desain sudu turbin yang berkaitan dengan grafik hubungan *tip speed ratio* (TSR) dan koefisien daya (C_p) turbin. Berdasarkan grafik yang terdapat pada Gambar 6, desain turbin tipe *Darrieus* yang digunakan, memiliki nilai TSR sebesar 5, dan koefisien daya (C_p) maksimum sebesar 0.4. Berdasarkan nilai TSR tersebut, juga dapat diketahui jumlah sudu yang digunakan berdasarkan data Tabel 2, di mana jumlah sudu turbin yang digunakan sebanyak 2 buah. Rotor turbin sebagai tenaga penggerak turbin dipengaruhi oleh kecepatan angin yang masuk untuk menimbulkan energi listrik pada generator dari putaran poros rotor turbin menuju poros generator. Kecepatan angin dengan rata-rata sebesar 2.1 m/s mampu membuat kecepatan putar rotor turbin sebesar 286.62 rpm.

Penentuan ukuran dimensi sudu turbin dilakukan setelah mengetahui jumlah sudu turbin, TSR, dan koefisien daya (C_p). Perhitungan ukuran dimensi sudu turbin, terletak pada kondisi lebar sudu turbin dan luas penampang area turbin. Pada dimensi lebar sudu turbin, dengan nilai TSR sebesar 5 maka didapatkan sudut aliran angin yang mengarah ke area turbin adalah sebesar 7.5° berdasarkan Persamaan 3. Kondisi sudut aliran angin yang

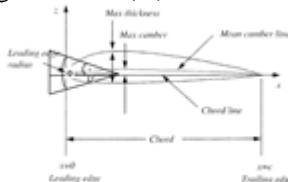
telah diketahui tersebut, dapat menentukan kondisi lebar sudu turbin atau *chord* yang disesuaikan dengan menggunakan pendekatan Hukum Betz, di mana didapatkan lebar sudu turbin yang dirancang sebesar 514 mm sesuai dengan perhitungan Persamaan 4. Lebar sudu turbin yang diketahui dapat dijadikan sebagai fungsi jarak dari pusat rotasi rotor turbin. Luas area penampang sudu turbin merupakan luas area yang dijadikan sebagai tempat sapuan angin dan ditunjukkan pada Gambar 7. Perhitungan luas area penampang sudu turbin diketahui dengan menggunakan *software* desain *SolidWork*, dan didapatkan luasan area tersebut sebesar 0.559 m^2 .



Gambar 7. Luas penampang area permukaan sudu turbin

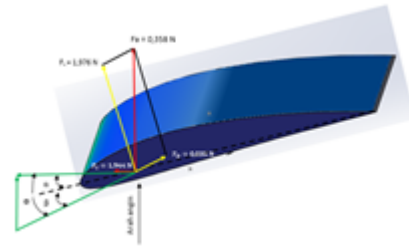
Sistem aerodinamis pada rancangan turbin tidak hanya terpusat pada ukuran dimensi sudu, melainkan juga pada desain *airfoil* yang digunakan pada sudu turbin. Desain *airfoil* dapat menentukan kondisi aliran angin yang melewati permukaan sudu turbin.

Desain *airfoil* yang digunakan pada penelitian ini adalah *airfoil* dengan tipe NACA 4412 karena memiliki kelebihan yang telah disebutkan sebelumnya pada bagian metode dibandingkan dengan tipe *airfoil* yang lainnya. Analisis kondisi aliran angin desain *airfoil* tipe NACA 4412 dilakukan dengan perhitungan Bilangan Reynolds berdasarkan Persamaan 5 dan didapatkan nilai bilangan Reynolds dari aliran angin sebesar 71143.22 atau dapat diartikan bahwa aliran angin yang melewati permukaan sudu turbin berupa aliran turbulen. *Airfoil* NACA 4412 memiliki sudut serang (*angle of attack*) sebesar 8.5° , di mana dengan sudut aliran angin yang mengarah ke turbin sebesar 7.5° dapat ditentukan sudut *pitch* suatu sudu turbin. Sudut *pitch* merupakan sudut yang mempengaruhi penerimaan aliran angin. Sudut *pitch* dari sudu turbin rancangan didapatkan sebesar -0.960° . Sudut *pitch* yang semakin besar akan menyebabkan peningkatan energi angin yang diterima dan mempengaruhi kondisi daya dan torsi turbin (Akhlis *et al*, 2016). Pada Gambar 8, disebutkan bahwa sudut *pitch* ditandai dengan simbol (β), sudut serang dengan simbol (α), dan sudut aliran angin dengan simbol (Φ).



Gambar 8. Kondisi sudut pada sudu turbin

Penentuan sudut yang mempengaruhi penerimaan energi angin juga mempengaruhi penyebaran gaya yang terdapat pada sudu turbin baik gaya angkat maupun gaya dorong. Penyebaran gaya tersebut diketahui dengan melakukan perhitungan pada Persamaan 7 dan 8. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan gaya angkat yang terdapat pada sudu turbin sebesar 1.976 N dan gaya dorong sebesar 0.035 N. Pergerakan sudu turbin ditentukan dengan gaya aksial dan gaya tangensial pada sudu turbin yang dipengaruhi oleh gaya angkat dan gaya dorong turbin sesuai dengan perhitungan dengan Persamaan 9 dan 10. Hasil perhitungan mendapatkan gaya aksial pada sudu turbin sebesar 0.358 N, dan gaya tangensial sebesar 1.944 N. Kondisi penyebaran gaya pada sudu turbin tersebut dapat terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Gaya-gaya pada sudu

Analisis penyebaran gaya yang ditampilkan pada Gambar 9 mengakibatkan sudu turbin dapat berputar dengan baik. Hal ini terjadi karena gaya yang bekerja secara tegak lurus memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan gaya yang bekerja sejajar dengan sudu turbin.

Perhitungan daya teoritis juga tidak bisa ditinggalkan dalam proses perancangan turbin tipe *Darrieus* ini dikarenakan daya teoritis menandakan tingkat performa dari rancangan turbin ini sendiri. Daya teoritis merupakan daya mekanik yang dihasilkan oleh rotor turbin, akibat dari laju aliran massa angin yang masuk ke dalam turbin, dan daya turbin akibat dari hembusan angin. Daya mekanik rotor turbin merupakan hasil dari kondisi torsi pada rotor turbin dan memiliki keterkaitan dengan daya turbin yang dihasilkan akibat dari daya angin yang masuk ke dalam turbin. Berdasarkan perhitungan pada Persamaan 12, didapatkan laju aliran massa angin yang masuk ke dalam turbin sebesar 1.438 kg/s, sedangkan gaya torsi yang dihasilkan oleh rotor turbin sebesar 1.057 Nm sehingga menyebabkan daya mekanik pada rotor turbin sebesar 31.71 W. Daya turbin dipengaruhi oleh daya angin yang masuk ke dalam turbin dan tergantung juga terhadap koefisien daya (C_p) turbin. Berdasarkan perhitungan Persamaan 15, dapat diketahui bahwa daya angin yang masuk ke dalam turbin didapatkan sebesar 3.171 W, dapat menimbulkan daya turbin sebesar 1.268 W. Pemilihan material desain dilakukan juga untuk mendukung tingkat performa rancangan turbin angin dengan memenuhi aspek-aspek yang telah disebutkan sebelumnya. Material yang mampu memenuhi aspek-aspek tersebut adalah material dengan bahan paduan aluminium dan komposit serat (*fiber reinforced plastic*). Bahan paduan ini memiliki karakteristik berupa kekuatan tensil berkisar 200-600 MPa, memiliki sifat ringan dan dapat dibentuk dengan mudah.

Pendistribusian daya merupakan hal yang penting untuk mendistribusikan daya energi angin dari rotor turbin ke dalam generator, sehingga diperlukan transmisi daya untuk menyalurkannya. Transmisi daya yang digunakan menggunakan tipe *speed increasing* antara poros rotor turbin terhadap poros generator dengan menggunakan *belt* dan *pulley*. Poros rotor yang digunakan memiliki ukuran standar sebesar 20 mm untuk memenuhi kecepatan putar poros turbin sebesar 286,62 rpm. Putaran rata-rata pada poros generator harus lebih tinggi dari putaran poros rotor turbin angin yaitu sebesar 500 rpm, sehingga dapat ditentukan perbandingan rasio *pulley* yang dipilih yaitu 1 : 1,75, dengan diameter *pulley* yang digunakan adalah 80 mm : 140 mm.

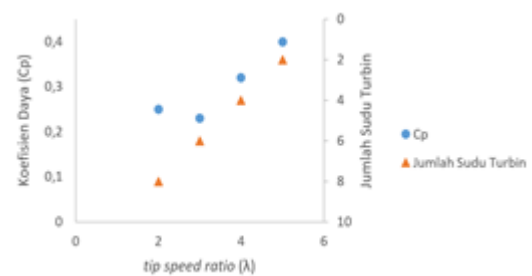
Pendistribusian arus listrik juga perlu dilakukan sebagai langkah untuk proses penyimpanan daya listrik dari generator ke akumulator. *Battery Charger Regulator* (BCR) merupakan alat yang mengatur arus yang masuk dan keluar dari akumulator dengan kondisi otomatis. Prinsip kerja BCR adalah pengisian daya listrik pada akumulator dihentikan apabila dalam keadaan penuh dan digunakan untuk pembebanan listrik.

Sistem penerangan memerlukan tingkat pembebanan penyalan lampu dengan tujuan optimasi rancangan turbin dapat tercapai. Perhitungan pembebanan memiliki keterkaitan dengan penyimpanan energi yang ditempatkan pada bagian akumulator untuk pemakaian selama 12 jam dalam kondisi malam hari. Berdasarkan daya beban pemakaian lampu selama 12 jam, dan faktor kerugian sebesar 15% dari sistem listrik serta daya lampu sebesar 40 W maka didapatkan daya total beban sebesar 1.104 Wh, sehingga arus beban yang diterima oleh lampu LED sebesar 46 Ah. Tipe akumulator yang memenuhi kondisi tersebut adalah akumulator tipe FCG12-50T dengan tegangan 12 V dan arus sebesar 50 Ah.

Perhitungan analisis energi yang dihasilkan oleh generator berdasarkan kondisi daya generator dan arus generator yang berputar selama 24 jam, yang diakibatkan oleh gerakan rotor. Daya listrik generator yang dihasilkan adalah sebesar 39.75 W per jam, sehingga apabila generator berputar selama 24 jam maka daya generator yang dihasilkan sebesar 954 Wh. Arus listrik yang dihasilkan

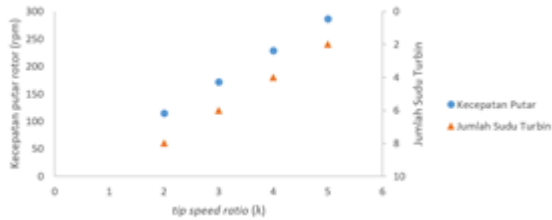
oleh generator selama 24 jam adalah sebesar 80.16 Ah. Apabila dibandingkan antara daya generator dengan daya beban secara berurutan yaitu 954 Wh dengan 1104 Wh, maka untuk memenuhi daya beban dibutuhkan dua buah unit turbin angin tipe *Darrieus* dengan daya total sebesar 1.908 Wh.

Optimisasi desain turbin tipe *Darrieus* dilakukan dengan melakukan variasi jumlah sudu turbin, dan variasi sudut puntir sudu turbin. Jumlah sudu turbin memiliki keterkaitan dengan *tip speed ratio* (TSR) dan koefisien daya (C_p), dimana semakin sedikit jumlah sudu maka TSR dan C_p akan meningkat yang secara tak langsung juga meningkatkan daya listrik turbin. Kondisi tersebut dapat dilihat pada grafik Gambar 10.

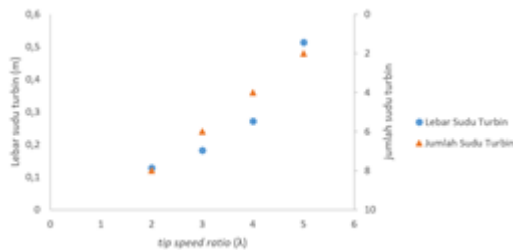


Gambar 10. Hubungan TSR, C_p , dan jumlah sudu turbin

Berdasarkan data grafik didapatkan bahwa dengan jumlah sudu 2 buah, menjadi kondisi yang optimal dalam desain turbin tipe *Darrieus*. Selain itu, jumlah sudu turbin juga mempengaruhi putaran rotor turbin, di mana apabila semakin banyak jumlah sudu turbin maka menyebabkan pergerakan rotor turbin akan melambat dan semakin berat, sedangkan apabila dengan jumlah sudu yang sedikit, maka menyebabkan putaran rotor turbin semakin cepat sehingga daya listrik yang dihasilkan dari turbin semakin besar. Lebar sudu turbin juga dipengaruhi oleh jumlah sudu turbin, di mana apabila semakin banyak sudu turbin maka akan mengakibatkan penerimaan energi angin pada turbin semakin sedikit, akan tetapi apabila jumlah sudu turbin yang ditentukan sedikit, maka penerimaan energi angin akan semakin besar pada setiap luasan area sudu turbinnya. Lebar sudu turbin juga memiliki kaitan dengan putaran rotor pada turbin. Hubungan jumlah sudu turbin dengan putaran rotor turbin dan lebar sudu turbin dapat dilihat pada Gambar 11 dan 12.

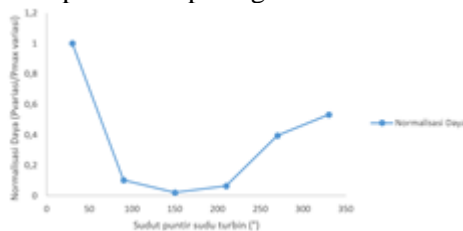


Gambar 11. Hubungan TSR, Kecepatan putar rotor, dan jumlah sudu turbin



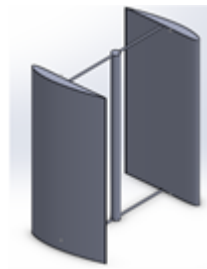
Gambar 12. Hubungan TSR, lebar sudu turbin, dan jumlah sudu turbin

Optimasi perancangan sudut puntir sudu turbin mempengaruhi kondisi daya yang dihasilkan oleh turbin, dan jumlah sapuan angin yang diterima oleh sudu turbin. Penentuan kondisi sudut puntir yang maksimal menggunakan simulasi *software Qblade* yang kemudian dilanjutkan dalam sebuah grafik normalisasi daya listrik dari turbin. Hasil sudut puntir sudu turbin dapat dilihat pada grafik Gambar 13.



Gambar 13. Hubungan sudut puntir sudu turbin dan normalisasi daya

Berdasarkan Gambar 13 dapat diketahui bahwa sudut puntir sudu turbin yang maksimal terletak pada sudut 30° dan sudut 330°. Hasil ini menyebabkan jumlah sapuan angin yang diterima oleh turbin angin semakin banyak pada daerah luasan area permukaan sudu turbin. Semakin tinggi jumlah sapuan turbin yang diterima oleh sudu turbin, maka daya listrik yang dihasilkan oleh turbin dapat berjalan dengan maksimal. Berdasarkan perhitungan perancangan, pemilihan material turbin angin, analisa energi turbin angin, dan optimasi desain turbin angin, maka gambaran desain turbin dapat terlihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Desain turbin tipe *Darrieus*

SIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan perhitungan optimasi dan analisis perancangan turbin angin tipe *Darrieus* maka dapat disimpulkan bahwa rata-rata kecepatan angin pada jalan tol sebesar 2.1 m/s dengan kecepatan angin terbesar yaitu 3.43 m/s dalam kondisi malam hari. Teknologi turbin angin yang mampu memanfaatkan aliran angin tersebut memiliki spesifikasi ketinggian rotor sebesar 1050 mm, diameter rotor sebesar 350 mm, dan sudu turbin sebanyak dua buah dengan *airfoil* tipe NACA 4412 yang memiliki ukuran dimensi lebar sebesar 514 mm dan luas permukaan sebesar 0.559 m² serta dengan sudut puntir sudu turbin sebesar 30°. Disain turbin angin memiliki nilai *tip speed ratio* (TSR) sebesar 5 dan koefisien daya (C_p) sebesar 0.4 yang mampu menghasilkan daya sebesar 954 Wh, dan untuk memenuhi beban lampu LED 40 W dengan beban daya sebesar 1104 Wh maka diperlukan dua buah turbin dengan daya total sebesar 1908 Wh dan waktu simpan energi selama 12 jam untuk kondisi malam hari. Hasil perancangan dan optimasi turbin angin tipe *Darrieus* ini diharapkan dapat dilakukan proses manufaktur dan diuji sehingga dapat dibandingkan dengan hasil perancangan yang telah dilakukan ke depannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada tim Teknik Mesin Universitas Pancasila yang telah membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Akhlis, N., Syafi'i, H., Prastiko, Y.C. & Sukmana, B.M. 2016. Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Pitch Terhadap Performa Turbin Angin Darrieus-H Sumbu Vertikal NACA 0012. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*.17(2): 6-12.
Ambrosio, D.M. & Marco, M. 2010. *Vertical Axis Wind Turbines : History*,

- Technology and Applications*. Tesis tidak diterbitkan. Swedia : Hogskolan Halmstad
- Chai, Jian., Lu, Y.Q., Wang, S.Y. & Lai, K.K. 2016. Analysis of Road Transportation Energy Consumption Demand in China. *Journal of Transportation Research Part D*.(48) :112-124.
- Goh, S.C., Raman, B.S., Chidambaresan, K. & Uwe, S.J. 2016. Tow Testing of Savonius Wind Turbine Above a Bluff Body Complemented by CFD Simulation. *Journal of Renewable Energy*. (87): 332-345.
- Gundtoft, S. 2009. *Wind Turbines*. Denmark: University of Aarhus.
- John, M.C. 2012. *Design and Optimization of a Small Wind Turbine*. Tesis tidak diterbitkan. Amerika Serikat : Rensselaer Polytechnic Institute Hartford.
- Josh, Decoste. 2004. *Self-Starting Darrieus Wind Turbine*. Tesis tidak diterbitkan . Amerika Serikat : Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University.
- Kim, Y.M., You, K.P. & You, J.Y. 2014. Characteristics of Wind Velocity and Temperature Change Near an Escarpment-Shaped Road Embankment. *The Scientific World Journal*: 1-13.
- Lapointe, C. & Gopalan, H. 2016. Numerical Investigation of Mini Wind Turbines Near Highways. *Journal of Solar Energy Engineering*. 138(2) : 1-4.
- Laysen, E.H. 1983. *Introduction to Wind Energy Consultancy Service Wind Energy*. Tesis tidak diterbitkan : Netherlands.
- Mahmoud, NH., El-Haroun, AA., Wahba, E. & Nasef., MH. 2012. An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance. *Alexandria Engineering Journal*. 51(1): 19-25.
- Promdee, C. & Photong, C. 2016. *Effects of Wind Angles and Wind Speed on Voltage Generation of Savonius Wind Turbine with Double Wind Tunnels*. Makalah disajikan dalam 2016 International Electrical Engineering Congress, iEECON 2016, Chiang Mai Thailand, 2-4 Maret 2016.
- Rayes, K.E., ASCE. & Hyari, K. 2005. Optimal Lighting Arrangements for Nightmare Highway Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 131(12) : 1292-1300.
- Santhakumar, S., Palanivel, I. & Venkatasubramanian, K. 2017. A Study on The Rotational Behaviour of a Savonius Wind Turbine in Low Rise Highways During Different Monsoons. *Journal of Energy for Sustainable Development*. (40) : 1-10.
- Subodro, R. & Ramelan, A.H. 2012. Sintesa Titanium Dioxide (TiO₂) untuk *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). *Jurnal Politeknosains*. 32-42.
- Tian, W., Mao, Z., An, X., Zhang, B. & Wen, H. 2017. Numerical Study of Energy Recovery From The Wakes of Moving Vehicles on Highways by Using a Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Energy (Accepted Manuscript)*. 1-25
- Tong, Wei.2010. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Boston : WITPress.
- Wagner, R., Antoniou, I., Pedersen, S.M., Courtney, M.S. & Jorgensen, H.E. 2009. The Influence of the Wind Speed Profile on Wind Turbine Performance Measurements. *Journal of Wind Energy*. (12): 348-362.
- Widodo, Aris. 2009. Kajian Manajemen Optimalisasi Penerangan Jalan Umum Kota Semarang. *Jurnal Teknik Sipil & Perancangan*. 11(1) : 41-50.
- Yu, Peng., Wu, Jiang., Liu, Shenting., Xiong, Jie., Jagadish, C. & Wang, Z.M. 2016. Design and Fabrication of Silicon Nanowires Towards Efficient Solar Cells. *Journal of Nano Today (Article in Press)*. 1-34.