

Perancangan Turbin Angin Horizontal Pada Mobil Hybrid

Alex Surapati¹, Vikriandi Tri Putra¹

Abstract

Scarcity of energy in the form of fossil fuels in the spotlight, the whole world began to look for solutions about the rescue. The best alternative is use renewable energy, which comes from nature that can be directly utilized freely and without limits such as wind energy. Utilization of wind energy can be applied to human needs, for example for energy sources for electric cars. This research aims to design a wind turbine to help charge batteries in hybrid cars (wind power and solar power). The research method starts from the design of tools, testing tools and analyzing the results of measurements. Power from wind power, into electrical energy using 3 blades with a blade diameter of 60 cm ($r = 30$ cm) and has a width of 4 cm which is placed horizontally with a height of 136 cm from the ground and placed on the front side of the car. The results obtained in this study are the wind speed of 4.5 m/s can produce a maximum rotation of the wind turbine of 782 rpm and produce a voltage of 4.05 volts, a current of 0.23 Amperes, and a power of 0.9315 Watt. The generator in a wind turbine has a maximum output power of 0.27 Watt with an average output voltage of 1.8 volts and an average current of 0.15 Amperes.

Keywords: renewable energy, wind power generation, hybrid cars

Pendahuluan

Isu kelangkaan energi, perubahan iklim dunia, dan pemanasan global menjadi sorotan masyarakat luas, bahkan seluruh dunia mulai berlomba-lomba mencari solusi tentang penyelamatan lingkungan. Penggunaan bahan bakar fosil, polusi udara, sampai kebakaran hutan disebut-sebut sebagai penyebab dari rusaknya lingkungan. Berbagai cara dilakukan untuk mencoba mengurangi efek dari pemanasan global tersebut (Harsanto, 2014).

Pada tahun 2005, cadangan minyak bumi di Indonesia pada tahun 2004 diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 18 tahun dengan rasio cadangan/produksi pada tahun tersebut. Sedangkan gas diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 61 tahun dan batubara 147 tahun. Sementara tingginya kebutuhan migas tidak diimbangi oleh kapasitas produksinya menyebabkan kelangkaan sehingga di hampir semua negara berpacu untuk membangkitkan energi dari sumber-sumber energi baru dan terbarukan (Abadi, 2011). Solusi terbaik adalah memanfaatkan energi terbarukan. Energi terbarukan adalah sumber energi alam yang dapat langsung dimanfaatkan dengan bebas. Ketersediaan energi

terbarukan ini tak terbatas dan bisa dimanfaatkan secara terus menerus misalnya angin, matahari, air, panas bumi dan lain lain.

Salah satu pemanfaatan energi terbarukan yang saat ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi angin. Energi angin merupakan energi yang dalam proses produksinya tidak mencemari lingkungan. Perkembangan energi angin di Indonesia untuk saat ini masih tergolong rendah. Pengoptimalan energi angin dapat diaplikasikan pada kebutuhan manusia sehari-hari, misalnya untuk mobil listrik.

Energi angin merupakan sumber energi yang timbul sebagai akibat adanya radiasi panas matahari yang berbeda-beda ke permukaan bumi sehingga menimbulkan perbedaan temperatur dan rapat massa udara di permukaan bumi yang mengakibatkan terjadinya perbedaan tekanan sehingga kemudian menjadi aliran udara. Energi kinetik yang dimiliki angin dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin (kincir angin), yang dengan gerakan memutarnya dapat membangkitkan tenaga listrik melalui suatu sistem magnet (Wibawa, 2014).

¹ Dosen Fak. Teknik Prodi Teknik Elektro Universitas Bengkulu
Majalah Teknik Simes Vol.14 No.1 Januari 2020

Transportasi menggunakan listrik sebagai pengganti bahan bakar minyak telah dimulai penelitiannya. Mobil *hybrid* dirancang menggunakan pembangkit listrik dari tenaga surya dan tenaga angin untuk pengisian baterai sehingga tidak membutuhkan listrik dari PLN untuk pengecasan baterai (Surapati dan Priyadi, 2017). Energi angin akan menggerakkan turbin angin dan diubah menjadi energi listrik melalui generator yang berfungsi sebagai sumber daya.

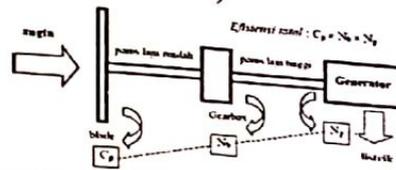
Permasalahan penelitian ini adalah bagaimana merancang turbin angin horizontal pada mobil *hybrid* dan berapa daya yang dihasilkan oleh turbin angin horizontal? Adapun tujuan penelitian ini adalah merancang turbin yang dapat digunakan untuk menggerakkan generator sehingga dapat menghasilkan listrik bagi pengisian batere pada mobil *hybrid*.

Prinsip utamanya energi yang dihasilkan angin adalah mengubah energi listrik yang dimiliki angin menjadi energi kinetik poros. Besarnya energi yang dapat ditransferkan ke rotor tergantung pada massa jenis udara, luas area, dan kecepatan angin. Energi kinetik untuk suatu massa angin m yang bergerak dengan kecepatan v yang nantinya akan diubah menjadi energi poros. Angin adalah udara (yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara disekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah.

Energi angin merupakan salah satu potensi energi terbarukan yang dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap kebutuhan energi listrik, khususnya wilayah terpencil. Energi angin dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik dengan turbin angin (*wind turbine*) (Abadi, 2011).

Prinsip dasar kerja dari turbin angin adalah mengubah energi gerak angin menjadi energi putar pada kincir. lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Pembangkit ini dapat mengkonversikan energi angin

menjadi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Sistem pembangkitan listrik menggunakan angin sebagai sumber energi merupakan sistem alternatif yang sangat berkembang pesat, mengingat angin merupakan salah satu energi yang tidak terbatas di alam. prinsip kerja turbin angin dapat dilihat pada Gambar 1 (Zuita dan Aidil, 2013).



Gambar 1. Prinsip kerja turbin angin

Energi mekanik pada turbin angin diperoleh dari suatu proses konversi energi angin (Arifin, 2007). Energi angin sendiri merupakan energi yang berasal dari pergerakan massa udara yang bergerak dari suatu daerah bertekanan maksimum ke daerah bertekanan minimum. Massa udara yang bergerak ini disebut sebagai energi kinetik karena memiliki kecepatan gerak, sehingga daya yang menjadi *input* turbin angin tak lain berasal dari energi kinetik angin. Besarnya daya tersebut secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut (Zuita dan Aidil, 2013):

$$P_{tot} = m \frac{V_i^2}{2 g_c} \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{Sedangkan : } m = \rho A V_i \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{Maka : } P_{tot} = \frac{1}{2 g_c} \rho A V_i^3 \quad \dots\dots(3)$$

Dimana :

P_{tot} = Daya total (W)

m = Laju aliran massa (Kg/s)

V_i = Kecepatan datang angin (m/s)

g_c = Faktor konversi 1.0 Kg/(N.s²)

ρ = Massa jenis udara (Kg/m³)

A = Area sapuan turbin (m²)

Kincir angin merupakan sebuah alat yang digunakan dalam Sistem Konversi Energi Angin (SKEA). Kincir angin berfungsi merubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Putaran poros tersebut

induksitotal dalam kumparan diberikan (Anggo, 2017).

Generator adalah suatu alat atau mesin yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dimana energi mekanik didapatkan dari energi potensial dan kinetik yang akan menggerakkan rotor melalui poros penghubung pada generator. Menurut Karyanto (2000) untuk pembangkit listrik tenaga angin (PLTA), energi potensial diperoleh dari sumber daya air dan angin. Energi potensial akan mendorong sudu atau impeler pada turbin sehingga timbul energi kinetik. Energi ini diubah oleh generator menjadi energi listrik melalui lilitan kumparan stator dan magnet rotor. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator dapat berbentuk arus bolak balik (AC) dan arus searah (DC) (Zuita dan Aidil, 2013). Generator AC keluarannya dapat menghasilkan tegangan langsung sementara generator DC harus di olah dulu menggunakan komutator untuk menyearahkan output generator. Perbedaan generator DC dengan generator AC terletak pada kumparan jangkar dan kumparan statornya.

Generator membangkitkan tenaga listrik dengan jalan memutar sebuah kumparan di dalam medan magnet. Ada dua macam arus listrik, arus searah dan arus bolak balik dan tergantung cara menghasilkan listrik generator (Karyanto, 2000).

Alternator berfungsi untuk merubah energi mekanik yang didapat dari mesin menjadi tenaga listrik. Energi mekanik yang dihubungkan oleh pully yang memutar rotor sehingga membangkitkan arus bolak-balik pada stator yang diubah menjadi arus searah oleh dioda sebelum digunakan oleh komponen-komponen kendaraan yang membutuhkan ataupun untuk mengisi baterai kendaraan (Karyanto, 2000).

Dengan memutar generator pada kecepatan tertentu dan menghasilkan medan magnet, maka tegangan (E_{max}) akan terinduksi kumparan jangkar stator. Dengan Persamaan 4 (Fahey, 2006).

$$E_{max} = 2\pi N f \phi_{max} \frac{N_s}{N_{ph}} \dots\dots(4)$$

Dimana :

E_{max} = tegangan maksimal generator (v)

N = jumlah lilitan pada stator

f = frekuensi listrik yang dihasilkan

ϕ_{max} = fluks maksimum (Wb)

N_s = jumlah kumparan

N_{ph} = jumlah fasa

Untuk menghitung frekuensi yang digunakan pada Persamaan 4, dapat menggunakan Persamaan 5.

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

n = kecepatan medan putar rotor

p = jumlah kutub pada rotor

Untuk dapat menghitung nilai tegangan efektif (E_{rms}) dari generator menggunakan persamaan 6.

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(6)$$

$$E_{rms} = 0,75 \text{ volt}$$

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh medan magnet rotor yang menembus luas penampang stator.

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi (X_m). Reaktansi pemagnet (X_m) ini bersamaan dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s).

Bila generator diberi beban yang berubah-ubah maka besarnya tegangan terminal V akan berubah-ubah pula, hal ini disebabkan adanya kerugian tegangan pada:

- a) Resistansi jangkar R_a
Resistansi jangkar/fasa R_a menyebabkan terjadinya kerugian tegang/fasa (tegangan jatuh/fasa)

dan I.Ra yang sefasa dengan arus jangkar.

b) Reaktansi bocor jangkar X
Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluks yang terjadi tidak mengimbas pada jalur yang telah ditentukan, hal seperti ini disebut Fluks Bocor

c) Reaksi Jangkar Xa
Adanya arus yang mengalir pada kumparan jangkar saat generator dibebani akan menimbulkan fluksi jangkar (Φ_A) yang berintegrasi dengan fluksi yang dihasilkan pada kumparan medan rotor (Φ_F) (Fahey, 2006).

Jarak antarmagnet dapat di cari dengan menggunakan Persamaan 7 (Fahey, 2006).

$$T_f = \sin 30^\circ \times b \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$T_f = \frac{1}{2} \times b$$

Dengan :

T_f = Jarak antar magnet (cm)

b = Panjang Magnet (cm)

Luasan area magnet ini menentukan luasan piringan rotor dengan selanjutnya adanya syarat bahwa luasan piringan stator mengikuti luasan rotor dengan tujuan untuk mensinkronkan antara kutub magnet permanen dengan kumparan pada stator.

Dalam perancangan rotor ini berbentuk selinder maka dalam mencari luas area magnet menggunakan Persamaan 8 (Purbaya, 2017).

$$A_{magnet} = \frac{\pi \cdot (r_o^2 - r_i^2) - T_f (r_o - r_i) \cdot Nm}{Nm} \quad \dots\dots(8)$$

Dimana :

r_o = Radius luar magnet (cm)

r_i = Radius dalam magnet (cm)

T_f = Jarak antar magnet (cm)

Nm = Jumlah magnet

Pada perancangan rotor bentuk selinder maka dihitung Densitas Fluks Maksimum menggunakan persamaan 9 (Andri, 2010).

$$B_{max} = B_r \cdot \frac{lm}{lm + \delta} \quad \dots\dots\dots(9)$$

Dengan :

B_{max} = Densitas fluks maksimum (T)

B_r = Densitas fluks magnet (Tesla) (Nilai B_r merupakan nilai ketetapan dari jenis magnet NdFeB N42 Ni.

lm = tebal magnet (cm)

δ = Jarak antara rotor dengan stator (cm)

Perhitungan Fluks magnetik menggunakan Persamaan 10.

$$\varphi_{max} = A_{magnet} \times B_{max} \quad \dots\dots\dots(10)$$

Dengan :

φ_{max} = Fluks magnetik (webber)

A_{magnet} = Area magnet (cm²)

B_{max} = Densitas fluks maksimum

Baterai atau akumulator adalah sebuah sel listrik dimana didalamnya berlangsung proses elektrokimia yang reversible (dapat berbalikan) dengan efisiensinya yang tinggi. Jenis sel baterai ini disebut juga *storage battery*, adalah suatu baterai yang dapat digunakan berulang kali pada keadaan sumber listrik arus bolak-balik (AC) terganggu.

Tiap sel baterai ini terdiri dari dua macam elektroda yang berlainan, yaitu elektroda positif dan elektroda negatif yang dicelupkan dalam suatu larutan kimia.

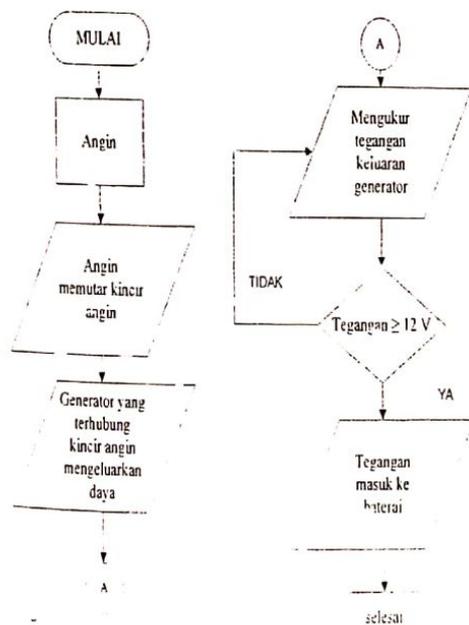
Baterai digunakan atau tidak, tetap akan mengeluarkan daya. Bila sedang tidak digunakan maka pengeluaran tersebut terjadi secara perlahan yang biasa disebut pengeluaran daya sendiri (*self discharge*). Cepat atau lambatnya pengeluaran dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah suhu elektrolit. Sebuah baterai tidak terpakai berisi penuh akan habis juga dayanya dalam jangka waktu 3 bulan jika baterai diletakkan di suhu 40°C. sedangkan makin dingin suhunya maka makin lambat dayanya berkurang (Bambang, 2011).

Metode Penelitian

Pembangkit listrik tenaga angin dirancang dengan membuat turbin angin yang dirancang dari 3 bilah yang terbuat dari bahan pipa paralon berdiameter 8 cm dan tebal 0,5 mm yang terhubung langsung dengan generator yang berkapasitas 6 Watt. Turbin angin dirancang 3 bilah dengan diameter bilah 60 cm ($r = 30$ cm) yang akan diletakkan di bagian sisi depan mobil *hybrid* dengan posisi turbin angin dan generator diletakkan secara *horizontal*.

Metode pengumpulan data dilakukan dengan alat ukur yang diletakkan pada mobil *hybrid*. Alat ukur yang digunakan yaitu alat ukur kecepatan angin (anemometer), alat ukur kecepatan putar (tachometer), alat ukur tegangan, dan alat ukur arus. Data dari alat ukur diambil selama mobil *hybrid* beroperasi. Data yang didapatkan dari alat ukur dianalisa.

Rancangan sistem dalam penelitian ini disusun dalam bentuk diagram alir (*flowchart*). Diagram alir digunakan untuk melihat proses dari pembangkit tenaga listrik angin. Diagram alir (*flowchart*) dapat dilihat pada Gambar 3.

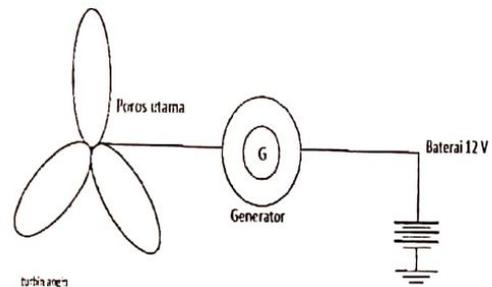


Gambar 3. Diagram alir.

Diagram alir pada Gambar 3 memperlihatkan perancangan proses pembangkit listrik tenaga angin. Angin memutar kincir angin yang dihubungkan langsung dengan generator, selanjutnya generator dapat mengeluarkan daya dan alat ukur mengukur tegangan yang dikeluarkan oleh generator. Tegangan yang dikeluarkan oleh generator akan diproses lagi sehingga mendapatkan tegangan yang cukup untuk mengecaskan aki. Jika tegangan keluaran dari generator lebih besar dari 12 V, maka tegangan akan masuk ke aki dan apabila tegangan lebih kecil dari 12 V maka akan diproses lagi.

Pada penelitian ini rancangan sistem pembangkit listrik tenaga angin adalah perancangan perangkat keras (*hardware*). Perancangan perangkat keras yang dimaksud yaitu pembuatan dan perakitan turbin angin.

Rangkaian sistem pembangkit listrik tenaga angin dapat dilihat pada Gambar 4.

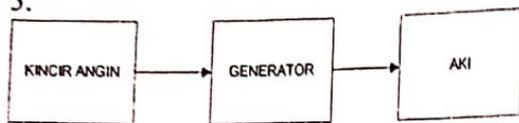


Gambar 4. Rangkaian sistem pembangkit listrik tenaga angin.

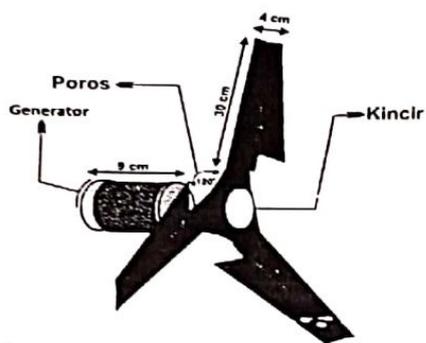
Berdasarkan Gambar 4, pembangkit listrik tenaga angin menggunakan generator dengan kapasitas 6 watt. Data-data yang dibutuhkan seperti kecepatan angin, kecepatan putar generator, tegangan dan arus keluaran generator serta kapasitas baterai yang tersedia disimpan saat kincir angin berputar, selama penelitian menggunakan alat ukur untuk mengukur data yang dibutuhkan.

Dalam pembangkit listrik tenaga angin, sumber utamanya adalah angin. Angin yang mengerakkan kincir angin akan memutar generator sehingga

generator dapat menghasilkan daya. Tegangan yang dikeluarkan generator apabila dibawah 12V akan diproses lagi sehingga mendapatkan hasil yang diinginkan dan bisa mengecras aki yang berkapasitas 12V. Untuk lebih jelas mengenai keseluruhan kerja sistem secara umum dapat dilihat pada Gambar 5.

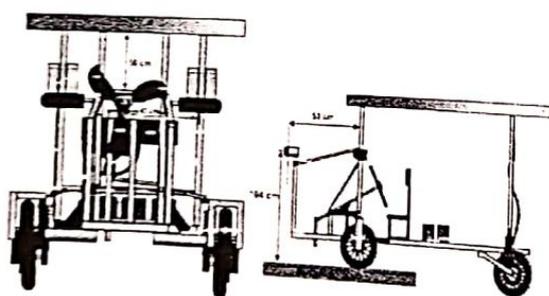


Gambar 5. Diagram blok sistem pembangkit listrik tenaga angin.



Gambar 6. Rancangan Kincir Angin

Gambar 6 menjelaskan bahwa kincir angin yang akan dibuat berbentuk taper linier. Taper linier adalah bentuk yang paling optimal untuk mendapatkan angin agar bisa memutar turbin dengan maksimum.



Gambar 7. Penempatan Kincir Angin Pada Mobil Hybrid

Hasil dan Pembahasan

Kincir angin diletakkan pada sisi depan mobil *hybrid* karena merupakan sisi yang melawan arah aliran angin dan dapat menerima angin

secara maksimal dan diletakkan pada ketinggian 104 cm dari permukaan tanah. Pada posisi ini adalah posisi yang sesuai untuk peletakkan pembangkit listrik tenaga angin pada mobil *hybrid*. Rencana penempatan kincir angin dapat dilihat pada Gambar 7. Dari perancangan yang dibuat maka dapat dibuat perhitungan daya yang akan dihasilkan dari turbin angin dengan kecepatan mobil sebesar 30 km/Jam dan kecepatan angin 5,6 m/s dengan menggunakan persamaan 2.

$$P_{tot} = \frac{1}{2 \times 1} \times 1,2 \times 0,0173 \times 5,6^3$$

$$P_{tot} = 1,822 \text{ Watt}$$

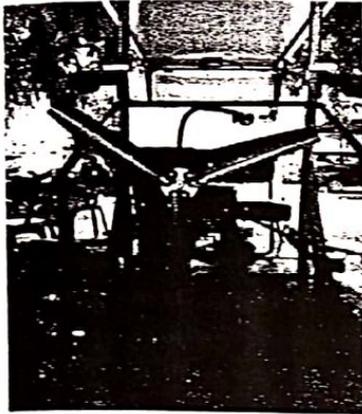
Dari perhitungan daya dengan kecepatan angin sebesar 5,6 m/s dan area sapuan turbin 173 cm², maka didapatkan daya sebesar 1,822 Watt.

Pengujian pembangkit listrik tenaga angin untuk mengetahui daya yang dihasilkan dari generator pada turbin angin. Pengukuran menggunakan beberapa alat ukur sebagai media penunjang dalam pengambilan data antara lain: pengukuran menggunakan anemometer untuk mengukur kecepatan angin, tachometer untuk mengukur kecepatan putar turbin angin, dan multimeter untuk mengukur tegangan dan arus keluaran generator saat turbin angin berputar dan saat mobil *hybrid* beroperasi.

Perhitungan tegangan keluaran generator dari pembangkit listrik tenaga angin dilakukan untuk mengetahui perbedaan antara tegangan yang diukur dan tegangan yang dihitung dari pembangkit listrik tenaga angin sesuai dengan tegangan dan arus yang dihasilkan oleh generator pada turbin angina. Setelah didapat data tegangan dan arus pengukuran maka akan dihitung daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin dan membandingkan daya yang terdapat pada baterai, sehingga didapat daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin.

Pada penelitian ini, turbin angin yang digunakan memiliki 3 kincir

dengan ukuran sepanjang 30 cm pada masing masing kincir. Kincir angin dibuat dengan menggunakan bahan pipa PVC yang dibentuk presisi satu sama lainnya. Bentuk kincir ini menyesuaikan dengan ukuran mobil hybrid seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Turbin Angin dengan 3 bilah

Pada Gambar 8 dapat dilihat kincir angin dipasang dengan jarak yang sama yaitu sebesar 120 derajat dari kincir satu ke kincir lainnya. Kincir angin diletakkan 136 cm dari permukaan tanah karena apabila letak kincir angin terlalu tinggi maka akan menghalangi pandangan pengendaranya begitu juga sebaliknya jika kincir angin diletakkan terlalu rendah akan mengakibatkan terkena aspal sehingga bisa membuat kincir angin menjadi patah. Pemilihan generator harus menyesuaikan terhadap ukuran kincir angin yang telah dibuat. Kincir angin yang dirancang berjari-jari 30 cm dalam satu putaran sehingga membutuhkan generator yang memiliki torsi awal yang rendah. Generator yang digunakan adalah dinamo sepeda karena memiliki torsi awal yang rendah..

Proses selanjutnya dilakukan perhitungan kecepatan angin rata-rata agar didapatkan kecepatan angin secara tepat. Pengambilan data kecepatan angin menggunakan alat khusus untuk menghitung kecepatan angin (anemometer). Anemometer diletakkan disekitar turbin angin dengan ketinggian 153 cm dari permukaan tanah. Dan untuk pengambilan data kecepatan putar

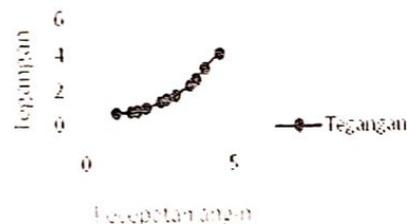
turbin angin menggunakan alat khusus menghitung kecepatan turbin angin (tachometer) yang diletakkan didekat turbin angin. Kemudian dicatat data kecepatan angin dan kecepatan putar turbin angin selama mobil hybrid bergerak. Anemometer dan tachometer yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 9.

Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan kecepatan angin dan kecepatan turbin angin dengan tegangan keluaran dari generator selama mobil hybrid bergerak dengan cuaca cerah. Pengambilan data dilakukan dari pukul 14:26:30 WIB sampai dengan 14:42:30 WIB.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin

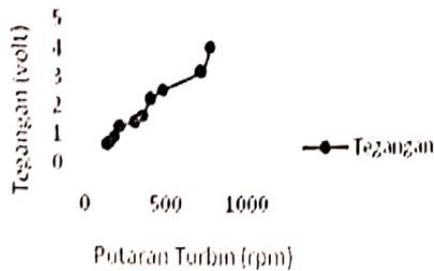
Gambar 9 terlihat bahwa semakin tinggi nilai kecepatan angin maka semakin cepat putaran turbin yang dihasilkan. Ketika angin berada dikeadaan yang tercepat yaitu 4,5 m/s kecepatan turbin juga meningkat menjadi 782 rpm hal ini membuktikan perbandingan kecepatan angin terhadap putaran turbin berbanding lurus.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Kecepatan Angin Terhadap Tegangan

Gambar 10 menjelaskan perbandingan antara kecepatan angin terhadap tegangan berbanding lurus.

Ketika kecepatan angin berada dikeadaan yang tercepat yaitu 4,5 m/s tegangan yang dihasilkan juga meningkat menjadi 4,05 V dan sebaliknya ketika kecepatan angin rendah maka tegangan yang dihasilkan juga semakin rendah.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Putaran Turbin Terhadap Tegangan

Gambar 11 adalah gambar grafik perbandingan antara putaran turbin terhadap tegangan. Gambar 11 menjelaskan bahwa semakin cepat putaran turbin maka semakin besar tegangan yang dihasilkan hal ini menunjukkan perbandingan putaran turbin terhadap tegangan yang dihasilkan berbanding lurus.

Dari data Tabel 1 akan didapat perhitungan tegangan maksimal dan tegangan efektif generator yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar ralat dari keluaran generator. Sebelum mencari tegangan maksimal dan tegangan efektif dari generator, terlebih dahulu mencari jarak antar magnet dan keliling

$$T_f = \sin 30^\circ \times 0,35 \text{ cm}$$

$$\text{rotor. } T_f = \frac{1}{2} \times 0,35 \text{ cm}$$

$$T_f = 0,175 \text{ cm}$$

Perhitungan jarak antar magnet dan keliling (A_{magnet}) pada generator.

$$A_{\text{magnet}} = \frac{3,14 (1,25^2 - 0,9^2) - 0,175 (1,25 - 0,9) \times 6}{6}$$

$$A_{\text{magnet}} = 0,3325 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{magnet}} = 0,00003325 \text{ m}^2$$

Proses selanjutnya dapat dihitung nilai fluks magnetik (ϕ_{maks}) dengan mengalikan nilai luas area magnet (A_{magnet}) terhadap kuat medan magnet (B).

$$\phi_{\text{maks}} = A_{\text{magnet}} \times B$$

$$\phi_{\text{maks}} = 0,00003325 \text{ m}^2 \times 0,4 \text{ Tesla}$$

$$\phi_{\text{maks}} = 0,0000133 \text{ webber}$$

Dari variable-variabel yang telah didapatkan, selanjutnya yang dilakukan perhitungan tegangan maksimal dan tegangan efektif generator yang digunakan.

$$E_{\text{maks}} = 2\pi N f \phi_{\text{maks}} \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$E_{\text{maks}} = 2\pi N \left(\frac{n \cdot P}{120} \right) \phi_{\text{maks}} \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$E_{\text{maks}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 300 \left(\frac{141 \cdot 6}{120} \right) 0,0000133 \frac{6}{1}$$

$$E_{\text{maks}} = 1,05 \text{ volt}$$

Proses selanjutnya dapat menghitung nilai tegangan efektif (E_{rms}).

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_{\text{maks}}}{\sqrt{2}}$$

$$E_{\text{rms}} = 0,75 \text{ volt}$$

Berdasarkan perhitungan (E_{maks}) dan perhitungan (E_{rms}) dapat diketahui bahwa tegangan maksimal (E_{maks}) yang dapat dihasilkan oleh generator pada kecepatan putaran turbin 141 rpm adalah sebesar 1,05 volt dan untuk tegangan efektif (E_{rms}) yang terukur adalah 0,75 volt.

Setelah didapat perhitungan tegangan keluaran dari generator, maka dapat dibuat Tabel 2 perbandingan tegangan ukur dan tegangan hitung agar mengetahui seberapa besar perbedaan yang didapat.

Tabel 1. Perbandingan Tegangan Ukur dan Tegangan Hitung

Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Turbin (rpm)	Tegangan Ukur (volt)	Tegangan Hitung (volt)
1	141	0,70	0,75
1,5	148	0,74	0,78
1,7	159	0,78	0,84
2	190	0,97	1
2,5	219	1,32	1,16
2,7	315	1,47	1,67
3	359	1,68	1,9
3,5	413	2,28	2,19
3,7	491	2,58	2,6
4	724	3,23	3,84
4,5	782	4,05	4,15

Dari data Tabel 1 perbandingan tegangan ukur dan tegangan hitung dapat dilihat hasil ketika putaran turbin maksimum menghasilkan tegangan hitung sebesar 4,15 volt dan tegangan ukur sebesar 4,03 volt. selisih antara tegangan ukur dan tegangan hitung tidak terlalu jauh dikarenakan cara mengambil data yang benar. Dari data Tabel 4.2 dapat dibuat grafik perbandingan tegangan hitung dan tegangan ukur terhadap putaran turbin seperti yang terlihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik Perbandingan Tegangan Hitung Dan Tegangan Ukur Terhadap Putaran Turbin

Dari Gambar 12 Grafik perbandingan tegangan hitung dan tegangan ukur terhadap putaran turbin terlihat selisih perbandingan antara tegangan hitung dan tegangan ukur tidak terlalu jauh. Untuk lebih jelas lagi dapat dilakukan perhitungan ralat mutlak (RM) dan ralat relatif (RR) agar dapat diketahui kesalahan yang terjadi dengan mengambil contoh data 1.

• Data 1

$$RM = |V_{hitung} - V_{ukur}|$$

$$RM = |0,75 - 0,70|$$

$$RM = 0,05$$

$$RR = \frac{RM}{V_{hitung}} \times 100 \%$$

$$RR = \frac{0,05}{0,75} \times 100 \%$$

$$RR = 6,6\%$$

Dari perhitungan ralat mutlak (RM) dan ralat relative (RR) maka dapat dibuat data Tabel 3 data hasil ralat perbandingan tegangan hitung dan tegangan ukur.

Tabel 2. Data Hasil Perhitungan Ralat

Tegangan Hitung (Volt)	Tegangan Ukur (Volt)	Ralat Mutlak	Ralat Relatif (%)
0,75	0,70	0,05	6,6
0,78	0,74	0,04	5,1
0,84	0,78	0,06	7,1
1	0,97	0,03	3
1,16	1,32	0,16	13,7
1,67	1,47	0,2	11,9
1,9	1,68	0,22	11,5
2,19	2,28	0,09	4,1
2,6	2,58	0,02	0,7
3,84	3,23	0,61	15,8

4,15	4,05	0,1	2,4
------	------	-----	-----

Dari Tabel 2 data hasil perhitungan ralat pertbandingan tegangan hitung dengan tegangan ukur dari keluaran generator dapat dilihat hasil persentase terbesar pada tegangan ukur 3,23 volt dari tegangan hitung 3,84 volt yaitu sebesar 15,8% sedangkan hasil persentase terkecil terlihat pada tegangan ukur 2,58 volt dari tegangan hitung 2,6 volt yaitu sebesar 0,7%. Hal ini disebabkan oleh pengambilan data secara manual yang membuat kurang telitnya dalam pengambilan data.

Perhitungan daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin dilakukan dengan cara mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan oleh turbin angin. Setelah data tegangan dan arus didapatkan, maka dihitung daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin.

Dari data yang telah diukur maka dapat dihitung daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin dengan mengambil contoh data 1.

• Data 1

$$P = V \times I$$

$$P = 0,70 V \times 0,09 A$$

$$P = 0,063 \text{ watt}$$

Proses selanjutnya melakukan perhitungan daya rata-rata pada pembangkit listrik tenaga angin.

$$P_{\text{rata-rata}} = V_{\text{rata-rata}} \times I_{\text{rata-rata}}$$

$$P_{\text{rata-rata}} = 1,8 V \times 0,15 A$$

$$P_{\text{rata-rata}} = 0,27 \text{ watt}$$

Dari perhitungan daya generator pada turbin angin (P) dan perhitungan daya rata-rata ($P_{\text{rata-rata}}$) maka dapat dibuatkan tabel perhitungan daya. Tabel 4 memperlihatkan hasil perhitungan daya generator turbin angin.

Tabel 3. Hasil perhitungan daya generator turbin angin

Data ke-	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
1	0,70	0,09	0,063
2	0,74	0,12	0,0888
3	0,78	0,11	0,0858
4	0,97	0,14	0,1358
5	1,32	0,15	0,198
6	1,47	0,17	0,2499
7	1,68	0,15	0,252
8	2,28	0,18	0,4104
9	2,58	0,19	0,4902
10	3,23	0,21	0,6783
11	4,05	0,23	0,9315
Rata-rata	1,8	0,15	0,27

Dari perhitungan yang telah dilakukan terlihat generator pada turbin angin menghasilkan daya rata-rata sebesar 0,27 watt. Dengan demikian, dari data Tabel 4 dapat dilihat bahwa tegangan maksimum yang diperoleh oleh kincir angin adalah 4,05 volt jadi, tidak bisa digunakan untuk pengecasan aki yang berkapasitas 12 volt.

Kesimpulan dan saran

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengukuran untuk kecepatan angin 4,5 m/s bisa menghasilkan putaran maksimum dari turbin angin sebesar 782 rpm dan menghasilkan tegangan sebesar 4,05 volt, arus 0,23 Ampere, dan daya 0,9315 Watt.
2. Daya rata-rata yang dapat dihasilkan oleh turbin angin adalah 0,27 watt dengan tegangan rata-rata sebesar 1,8 volt dan arus sebesar 0,15 Ampere.

Dari kesimpulan di atas, diberikan saran bahwa untuk mendesain pembangkit listrik tenaga angin pada mobil hybrid, perlu diperhitungkan kecepatan laju mobil dan kecepatan angin agar mendapatkan bentuk bilah

yang sesuai untuk menggerakkan generator secara maksimum.

Daftar Pustaka

- Abadi, Sukma. 2011. "Pengembangan Model dan Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) dengan Metode Petri Net". Universitas Indonesia. Depok.
- Andri, Helly. 2010. "Rancang Bangun System Battery Charging Automatic". Universitas Indonesia. Depok.
- Anggo, Julistio. 2017. "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Skala Mikro Menggunakan Turbin Angin dan Panel Surya". Universitas Bengkulu. Bengkulu.
- Arifin, Muhammad. 2007. "Analisa Sistem Pengisian dan Trouble shooting Toyota Kijang 5K". Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Bambang, Aryo, 2011, Perancangan, Pembuatan, dan Pengujian Turbin Angin Sumbu Horizontal Tiga Sudu Berdiameter 2,07 meter, Institut Teknologi Bandung.
- Fahey, Steven. 2006. *Basic principles of the homemade axial flux alternator*.
- Harsanto, Tedy. 2014. "Rancang Bangun Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Triple-Stage Savonius Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin". Skripsi, Program Studi Fisika, Universitas Negeri Jakarta: Jakarta.
- Karyanto, E (2000). *Panduan Reparasi Mesin Diesel*. Penerbit Pedoman Ilmu Jaya. Jakarta.
- Purbaya, Andre. 2017. "rancang bangun pengisian daya ponsel pada sepeda menggunakan generator AC". Universitas Bengkulu. Bengkulu.
- Sugiyanto. 2013. "Potensi Pembangkit Listrik Hybrid menggunakan Vertical Axis Wind Turbine Tipe Savonius dan Panel Sel Surya". Jurnal Teknologi Vol 6, No. 2. Universitas Gajah Mada. Yogyakarta.
- Surapati, A dan Priyadi, I. 2017. *Rancang Bangun Mobil Hybrid (Tenaga Angin dan Tenaga Surya) Zero Pullution*. Prosiding Semnastek Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta. Jakarta. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/1871/1531>
- Zuita, Sumiati dan Aidil, Zamri. 2013. "Rancang Bangun Miniatur Turbin Angin Pembangkit Listrik Untuk Media Pembelajaran". Jurnal Teknik Mesin Vol 3, No. 2. Politeknik Negeri Padang. Padang.