

Rancang Bangun Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Dengan Turbin Savonius Untuk Keperluan Praktikum

Seniari, Ni Made
Jurusan Teknik Elektro,
Universitas Mataram

Mataram, Nusa Tenggara Barat
seniari_nimade@unram.ac.id

Muljono, Agung Budi
Jurusan Teknik Elektro
Universitas Mataram

Mataram, Nusa Tenggara Barat
agungbm@unram.ac.id

Nugroho, Agus
Alumni Jurusan Teknik Elektro
Universitas Mataram

Mataram, Nusa Tenggara Barat
anugroho@gmail.com

Nababan, Sabar,
Jurusan Teknik Elektro,
Universitas Mataram

Mataram, Nusa Tenggara Barat
sabar@unram.ac.id

Ginarsa, I Made
Jurusan Teknik Elektro
Universitas Mataram

Mataram, Nusa Tenggara Barat
kadekgin@unram.ac.id

Abstrak—Pembelajaran pembangkitan energi baru terbarukan akan efektif apabila dilakukan dengan praktek perancangan dan pengujian hasil dari sistem pembangkitan yang dilakukan. Dalam hal ini dilakukan perancangan prototipe pembangkit listrik tenaga bayu atau angin. Hasil perancangan digunakan sebagai media pembelajaran dalam konversi energi terbarukan (*renewable energy*) di laboratorium SMP. Tujuan perancangan adalah untuk mengetahui karakteristik keluaran turbin (tegangan output) terhadap kecepatan rotor atau kecepatan angin, dan jumlah lilitan rotor. Rancangan prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Bayu menggunakan turbin Savonius, dengan jumlah lilitan rotor 150, 200 dan 250, dengan kecepatan angin yang meningkat. Pada lilitan 250, dihasilkan tegangan output tertinggi pada masing-masing kecepatan angin 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 dan 2,5 m/s yaitu 0,9; 1,2; 1,4; 1,6 dan 1,8 V. Perhitungan tegangan output juga dilakukan pada masing-masing rancangan, untuk mengetahui kinerja hasil rancangan. Hasil perhitungan tegangan output pada 250 adalah 1,085; 1,101; 1,128; 1,253 dan 1,514 V. Persentase error rata-rata antara tegangan output perhitungan dengan tegangan output pengukuran untuk masing-masing jumlah lilitan rotor adalah 8,14; 11,16 dan 19,35. Jadi semakin banyak jumlah lilitan rotor, semakin besar kecepatan angin, maka tegangan output yang dihasilkan semakin besar.

Kata Kunci—*Prototipe PLTB, Jumlah lilitan Rotor, Kecepatan Angin*

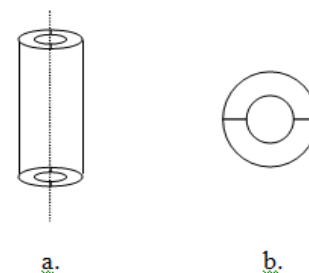
I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu atau angin (PLTB) adalah suatu pembangkit yang memanfaatkan energi angin sebagai sumber energinya. Pemanfaatan energi angin yaitu menggunakan kincir angin lalu dihubungkan dengan generator ataupun turbin. PLTB termasuk sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, yang harus diperkenalkan sejak dini kepada generasi muda. Memperkenalkan PLTB kepada siswa SMP akan lebih efektif apabila disertai dengan praktek perancangan prototipe dan pengukuran. Prototipe PLTB diukur dan dihitung tegangan output pada variasi kecepatan angin dan jumlah lilitan rotor. Selanjutnya dihitung persentase eror antara tegangan output hasil pengukuran dan hasil

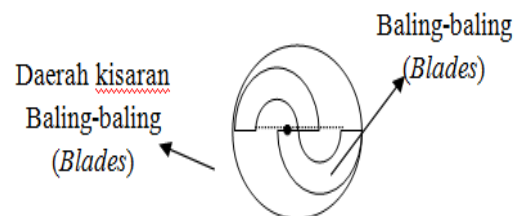
perhitungan, untuk mengetahui kinerja prototipe PLTB hasil rancangan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Turbin Savonius merupakan salah satu turbin angin yang memiliki poros tegak. Apabila dilihat dari atas maka akan terlihat seperti huruf "S". Baling-baling (*blades*) dari turbin Savonius merupakan sebuah tabung yang terbelah menjadi dua bagian secara vertikal.

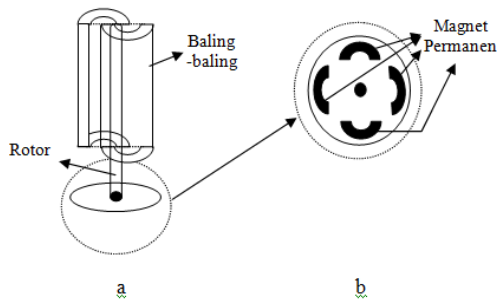


Gambar 1.a. Sebuah tabung yang bisa dijadikan baling-baling (*blades*).
b. Tampak atas sebuah tabung yang akan dijadikan baling-baling (*blades*) pada turbin Savonius.

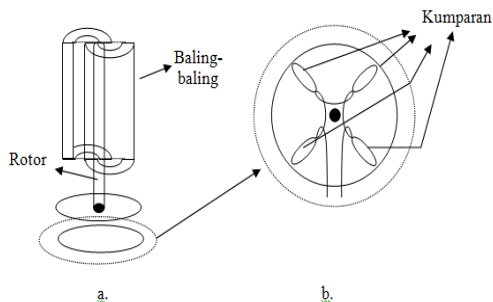


Gambar 2. Tampak atas turbin Savonius

Pergerakan rotor dari suatu turbin angin dipengaruhi oleh kecepatan tiupan angin yang memutar baling-baling (*blades*). Pada perancangan ini, magnet permanen yang terpasang dibawah piringan dijadikan sebagai rotor yang selalu ikut berputar jika baling-baling berputar. Pemasangan magnet permanen tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.



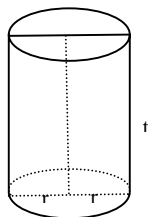
Gambar 3. a. Pemasangan kumparan dibawah magnet permanen. b. Posisi pemasangan kumparan



Gambar 4 a. Pemasangan kumparan dibawah magnet permanen. b. Posisi pemasangan kumparan

Volume Bangun Ruang Tabung

Suatu tabung dapat diperoleh dari prisma tegak yang rusuk alasnya diperbanyak sehingga bidang alasnya membentuk sebuah lingkaran



Gambar 5. Bangun ruang tabung

Volume tabung mempunyai rumus yaitu :
 Volume tabung = Luas alas x Tinggi (1)

Jika jari-jari tabung = r dan tinggi tabung = t maka :
 Volume tabung = $\pi \cdot r^2 \cdot t$ (2)

Untuk luas lingkaran mempunyai persamaan yaitu :
 Luas lingkaran = $2 \cdot \pi \cdot r \cdot t$ (3)

Kemudian untuk luas setengah lingkaran mempunyai persamaan yaitu : $\pi \cdot r \cdot t$ (4)

Selanjutnya untuk luas $\frac{1}{4}$ lingkaran mempunyai persamaan yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Luas } \frac{1}{4} \text{ lingkaran} &= \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot t \\ &= A = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r \cdot t \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Keliling lingkaran} = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (6)$$

Untuk persamaan luas $\frac{1}{4}$ lingkaran sama dengan persamaan luas penampang tabung atau luas penampang turbin savonius yang terkena hempasan angin. Karena bentuk dari

turbin savonius memiliki kesamaan dengan bentuk luas $\frac{1}{4}$ lingkaran. Jadi untuk persamaan luas penampang turbin yang terkena hempasan angin adalah menggunakan persamaan (5) yaitu $A = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r \cdot t$.

Dasar Elektromagnet

Medan magnet berperan sangat penting sebagai rangkaian proses konversi energi. Melalui medium medan magnet, bentuk energi mekanik dapat diubah menjadi energi listrik, atau sebaliknya dapat diubah dari bentuk energi listrik menjadi energi mekanik. Dari sisi elektris, medan magnet mampu untuk mengimbaskan tegangan pada konduktor, sedangkan dari sisi mekanis, medan magnet bisa menghasilkan gaya dan kopel. Keutamaan medan magnet sebagai perangkat proses konversi energi disebabkan terjadinya bahan-bahan magnetik yang memungkinkan diperolehnya kerapatan energi yang tinggi.

Gaya Gerak Listrik (GGL)

Apabila sebuah konduktor digerakkan tegak lurus sejauh d_s memotong suatu medan magnet dengan kerapatan fluks B , maka perubahan fluks pada konduktor dengan panjang efektif l adalah:

$$d\phi = B l d_s \quad (7)$$

dari hukum Faraday diketahui bahwa gaya gerak listrik (ggl) dinyatakan sebagai:

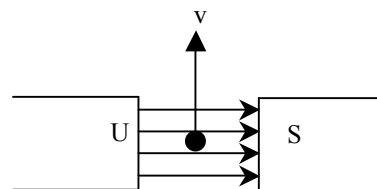
$$e = d\phi/dt \quad (8)$$

maka

$$e = B l ds/dt$$

dimana $ds/dt = v =$ kecepatan putaran rotor jadi,

$$e = B \cdot l \cdot v \quad (9)$$



Gambar 6. Arah medan magnet tegak lurus dengan arah kecepatan putaran rotor.

Arah gaya gerak listrik ini ditentukan oleh aturan tangan kanan, dengan jempol, telunjuk dan jari tengah yang saling tegak lurus menunjukkan masing-masing arah v , B dan e .

Persamaan $e = B.l.v$ dapat diartikan bahwa apabila dalam suatu medium medan magnet diberikan energi mekanik dengan kecepatan v , maka akan dibangkitkan energi listrik sebesar e .

Angin

Udara yang bergerak disebut angin. Udara bisa bergerak apabila terjadi perbedaan tekanan udara dan perbedaan volume gas pada tempat yang satu dengan tempat yang lain. Hal ini dijelaskan oleh hukum Boyle yang menjelaskan keterkaitan antara tekanan (P) dan volume gas (V) yaitu :

$$\begin{aligned} P \cdot V &= \text{konstan} \\ P_1 V_1 &= P_2 V_2 \end{aligned} \quad (10)$$

Keterangan :

P = tekanan (pa)

V = volume (m^3)

Pergerakan angin yang terus menerus akibat perbedaan tekanan udara akan menimbulkan energi kinetik. Energi kinetik (E_k) ini dirumuskan dengan:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Ax)v^2 \quad (11)$$

Keterangan :

E_k = Energi kinetik (joule)

m = Massa udara (kg)

v = Kecepatan angin (m/dt)

ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)

x = Ketebalan bidang (m)

A = Luas bidang sapuan turbin (m^2)

Selain adanya energi pada angin, juga terdapat daya yang diakibatkan oleh adanya energi kinetik tersebut. Daya ini merupakan turunan dari energi kinetik angin dengan rumus:

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2}(\rho Ax)v^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (12)$$

Dengan P_w = Daya angin (watt)

Kerapatan udara (ρ) merupakan fungsi dari tekanan udara yang dipengaruhi oleh adanya suhu. Kerapatan udara standar (ρ_0) dijadikan sebagai acuan untuk mendapatkan kerapatan udara yang semestinya, sehingga persamaan dari kerapatan udara adalah sebagai berikut:

$$\rho = 3,485 \frac{P}{T} \quad (kg/m^3) \quad (13)$$

Dengan :

p = tekanan udara (kPa)

T = Suhu (0K)

Sehingga daya angin yang ditunjukkan pada persamaan (3) akan menjadi:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3 = \frac{1,742 \rho Av^3}{T} \quad (W) \quad (14)$$

Kerapatan udara memiliki acuan standar yang ditentukan oleh keadaan tekanan dan suhu yang juga distandarkan, yaitu tekanan udara sebesar 101.3 kPa dengan suhu 273 0K , sehingga daya angin (P_w) menjadi :

$$P_w = 0.647 Av^3 \quad (W) \quad (15)$$

Dalam konversi energi mekanik menjadi energi listrik atau sebaliknya, diperlukan medium medan magnet. Dari sisi elektris, medan magnet mampu untuk menginduksikan tegangan pada konduktor. Dari sisi mekanis, medan magnet bisa menghasilkan gaya dan kopel. Keutamaan medan magnet sebagai perangkat proses konversi energi disebabkan terjadinya bahan-bahan magnetik yang memungkinkan diperolehnya kerapatan energi yang tinggi.

Turbin Angin

Turbin adalah suatu alat yang digunakan untuk merubah energi kinetik menjadi energi mekanik untuk

menggerakkan generator, untuk menghasilkan energi listrik. Semakin besar kerapatan massa serta kecepatan pergerakan sumbernya, maka akan semakin besar energi listrik yang dihasilkan [1].

$$P_a = \frac{1}{2}(\rho v^3 A) W \quad (16)$$

Dengan :

P_a = Daya angin yang dibutuhkan (W)

ρ = intensitas udara (kg/m^3)

A = luas sapuan bilah (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

Kemampuan menyerap energy itulah yang disebut sebagai efisiensi system (K). Energy angin (mekanik) berupa kecepatan putaran (ω) turbin dan torsinya (T).

$$P_m = \omega \cdot T \quad (Watt) \quad (17)$$

$$P_m = P_a \cdot k \quad (Watt) \quad (18)$$

Dengan :

P_m = Daya Mekanik (W)

Ω = Kecepatan putaran

T = Torsi (Nm)

P_a = Daya angin yang dibutuhkan (W)

K = efisiensi sistem

Koefisien daya adalah hal penting dalam merancang turbin angin karena menunjukkan berapa besar energi angin yang dapat diekstraksi dari energi kinetik angin yang melalui penampang rotor. Koefisien daya sangat mempengaruhi kinerja turbin angin, dan dipengaruhi oleh konstruksi turbin angin dan prinsip konversinya.

Koefisien daya adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin dengan daya yang tersedia oleh angin sehingga bisa dirumuskan sebagai berikut :

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (19)$$

Dengan :

C_p = koefisien daya

P_{out} = daya yang dihasilkan oleh turbin angin

P_{in} = daya yang tersedia oleh turbin angin

Perancangan *prototype* ini mengacu pada perancangan dan penelitian sebelumnya antara lain. Penelitian tentang pemanfaatan turbin angin axial 4 bilah dan 3 bilah dengan menggunakan generator magnet permanent dari bahan fiber glass, menggunakan 10 buah magnet permanent dengan lilitan 100, 125, dan 150 berdiameter 28 cm. Untuk turbin angin axial 4 bilah dapat menghasilkan tegangan 100 volt dan arus sebesar 0,50 mA pada kecepatan 758 rpm, dan untuk turbin angin axial 3 bilah dapat menghasilkan tegangan 90 volt dan arus sebesar 0,45 mA pada kecepatan 807 rpm. Pada sistem pembangkit ini mampu dibebani lampu emergency dengan nameplate 6 volt 4,5 Ah dan dapat mengisi lampu emergency pada tegangan 40 V[2].

Pembuatan *prototype* kincir angin HAWT bersudu 3 buah, material sudu (*blade*) terbuat dari *fibreglass* dengan panjang 75 cm. Pengujian dilakukan di daerah waduk Gajah Mungkur Wonogiri, menggunakan *gearbox* dengan

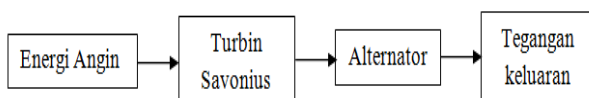
perbandingan 1:1,2. Dari hasil pengujian yang dilakukan didapat bahwa kincir tersebut mampu menghasilkan tegangan 95 Volt dan arus 4,5 mA pada kecepatan 5,6 m/s [3].

Penelitian kinerja turbin angin sumbu horizontal NACA 4412 dengan modifikasi sudu tipe flat pada variasi sudut kemiringan 0° , 10° dan 15° . Pada pengujian turbin angin kali ini dilakukan di alam pada ketinggian 8 meter dan variasi sudut kemiringan 0° , 10° , 15° . Pengambilan data meliputi kecepatan angin, daya, energi dan juga rpm dilakukan selama 2 jam pada masing – masing sudut kemiringan. Untuk akumulasi energi terbesar didapatkan pada kemiringan sudut 15° yaitu sebesar 51,85 watt.jam. Sedangkan untuk akumulasi energi paling sedikit yaitu pada kemiringan sudut 0° yaitu sebesar 14,96 watt.jam. Sedangkan efisiensi terbesar didapatkan pada pengujian dengan kemiringan sudut 15° , yaitu sebesar 4,44%. Sedangkan nilai efisiensi tekecil didapatkan pada pengujian dengan kemiringan sudut 0° , yaitu sebesar 4,16% [4].

Rancang bangun kincir angin HAWT kapasitas 1000 watt dengan sudu berjumlah 3 buah. Diameter rotor kincir tersebut adalah 2,28 m dan *airfoil* yang dipakai adalah tipe NACA 4415, blade terbuat dari *fibreglass*. Dari data pengujian yang dilakukan kincir tersebut dapat menghasilkan daya terendah pada kecepatan angin 2,67 m/s dengan daya sebesar 4,4 watt. Daya tertinggi dari kincir tersebut adalah sebesar 65,6 watt pada kecepatan angin 9,2 m/s [5].

III. METODE

Prototype pembangkit listrik tenaga bayu dengan menggunakan turbin Savonius sebagai turbin pemutar rotor. Perputaran rotor ini dengan sendirinya akan ikut menyebabkan perputaran pada magnet permanen yang terletak pada piringan yang disatukan dengan rotor yang berputar sesuai dengan kecepatan angin. Perputaran magnet permanen ini diharapkan akan menimbulkan adanya fluks magnet pada kumparan yang digesek. Gesekan antara magnet permanent dengan kumparan kawat akan menyebabkan timbulnya fluks pada kumparan yang bisa menghasilkan arus listrik, seperti blok diagram seperti dibawah ini:



Gambar 7. Blok diagram perancangan

Perancangan alat ini terdiri dari beberapa bagian yaitu :

1. Pembuatan kerangka dasar.
 - Memotong papan triplek dengan ukuran 14cm x 25cm.
 - Membuat lubang pada papan triplek untuk meletakkan alternator.
2. Pembuatan coil atau alternator.
 - Potong kertas kardus 4cm x 25cm sebagai tempat menggulung kawat tembaga.
 - Gulung kawat tembaga pada potongan kertas kardus sebanyak 200 lilitan searah jarum jam, gulungan kawat tembaga dibuat sebanyak 4buah.

- Lepaskan seluruh gulungan kawat dari potongan kardus dan gosok kedua ujung kawat dengan kertas amplas.
 - Kemudian hubungkan ke 4 ujung kawat sehingga keseluruhan kawat tersambung.
3. Pembuatan stator.
 - Letakkan alternator pada papan triplek.
 - Pasang LED pada ujung-ujung alternator.
 4. Pembuatan rotor.
 - Pasang magnet permanent pada bagian bawah compact disc dengan cara dilem.
 5. Pembuatan turbin.
 - Potong kertas kardus menyerupai huruf S.
 - Potong dan belah botol air mineral 1,5liter dengan tinggi 20cm dan diameter 9cm menjadi 2 bagian.
 - Lem belahan botol air mineral yang telah dibelah pada potongan kertas kardus.

Pengujian hasil perancangan

1. Hubungkan rangkaian dari alat perancangan yang telah di sambungkan ke LED dengan volt meter.
2. Set volt meter pada posisi AC (alternating current).
3. Tiupkan angin dengan menggunakan kipas angin ke permukaan turbin.
4. Kemudian lihat LED dapat menyala dan dapat dilihat besarnya tegangan keluaran pada volt meter.

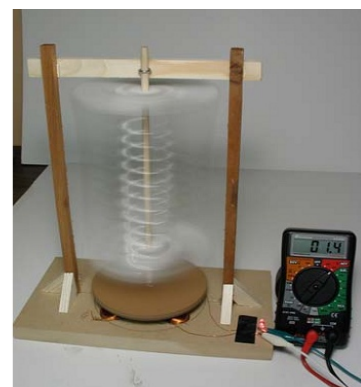
IV. HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengujian, perhitungan, perbandingan dan pengukuran berdasarkan dari perancangan pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan turbin Savonius. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja dari perancangan dan mengetahui apakah perancangan sudah bekerja dengan baik sesuai dengan perencanaan atau tidak.

Pengujian dari alat ini meliputi beberapa bagian, yaitu :

1. Pengujian pengaruh kecepatan angin dan jumlah lilitan terhadap tegangan output
2. Hasil perhitungan dan pengukuran tegangan output
3. Analisa hubungan antara tegangan output dengan kecepatan putar poros turbin.
4. Persentase error antara tegangan output perhitungan dengan tegangan output pengukuran.

A. Pengaruh kecepatan angin terhadap tegangan Output.



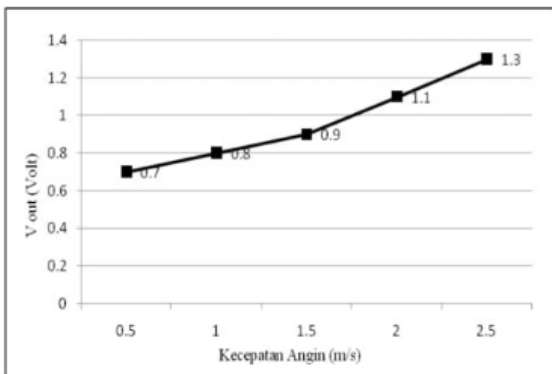
Gambar 8. Rangkaian Pengujian Pengaruh Kecepatan Angin Terhadap Tegangan Output.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya tegangan output terhadap besarnya kecepatan angin yang ditiupkan ke turbin angin (turbin Savonius). Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini yaitu voltmeter, kipas angin dan lampu LED. Rangkaian percobaan yang digunakan pada pengujian ini seperti pada Gambar 8.

Pada pengukuran ini menggunakan parameter-parameter yang ditentukan dengan perhitungan menggunakan persamaan (1) sampai dengan persamaan (5). Parameter-parameter yang digunakan yaitu sebagai berikut :

- Ketebalan kawat = 0,6 mm
- Jumlah lilitan = 200 lilitan
- Kecepatan angin = 0,5 m/s – 2,5 m/s dengan range 0,5 m/s
- Jari-jari (r) = 5 cm
- Tinggi turbin (t) = 24 cm
- Tinggi poros turbin = 28,5 cm
- Tinggi tiang penyangga = 33 cm
- Lebar mistar penyangga = 23,5 cm
- Diameter pondasi alat 22,5 cm
- Diameter letak kumparan = 7 cm
- Kedalaman letak kumparan = 1 cm
- Jumlah kumparan = 4 buah
- Luas penampang turbin = 188,5 cm²
- Tipe magnet yang digunakan adalah magnet permanen.

Hasil pengukuran tegangan output terhadap kecepatan angin diperlihatkan Gambar 9.

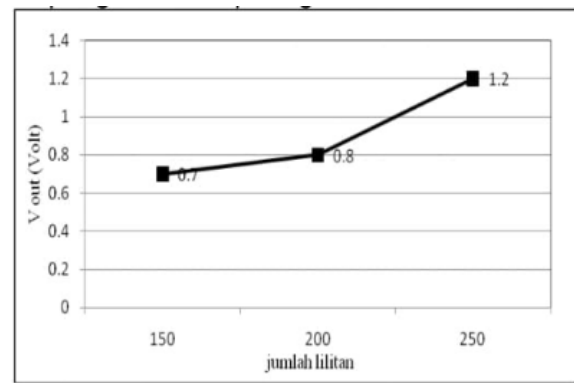


Gambar 9. Karakteristik pengaruh kecepatan angin terhadap tegangan output

Dari Gambar 9 terlihat bahwa hubungan antara kecepatan angin terhadap tegangan output membentuk suatu grafik yang linier, yaitu semakin besar kecepatan angin, maka semakin besar pula tegangan outputnya. Peningkatan hasil pengukuran tegangan output pada alat disebabkan karena semakin besar kecepatan angin yang ditangkap oleh turbin angin maka tegangan output yang dihasilkan semakin besar pula.

B. Pengaruh jumlah lilitan terhadap kecepatan angin konstan ($v = 1 \text{ m/s}$)

Dalam melakukan pengukuran untuk mengetahui pengaruh jumlah lilitan terhadap kecepatan angin konstan yaitu $v = 1 \text{ m/s}$ dengan menggunakan diameter kawat 0,6 mm, diperoleh hasil pengukuran seperti Gambar 10.



Gambar 10. pengaruh jumlah lilitan terhadap tegangan output pengukuran dengan kecepatan angin konstan 1 m/s

Gambar 10 memperlihatkan bahwa hubungan antara jumlah lilitan terhadap tegangan output membentuk suatu grafik yang linier, yaitu semakin banyak jumlah lilitan, maka semakin besar pula tegangan outputnya.

C. Hasil perhitungan dan pengukuran tegangan output sesuai dengan dimensi perancangan alat.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan 10, dengan parameter jumlah lilitan yang berbeda-beda yaitu : 150, 200, dan 250 lilitan dimana diketahui :

Diameter rotor = 13 cm

Jari-jari rotor (r) = 6,5 cm = 0,065 m

Diameter kumparan = 5 cm

Jari-jari kumparan (r) = 2,5 cm = 0,025 m

Keliling alas rotor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6) yaitu :

$$K = 2 \cdot \pi \cdot r \\ = 2 \cdot \pi \cdot 0,025 \\ = 0,408 \text{ m}$$

Kecepatan (v) putar poros turbin = 394 Rpm untuk 150 lilitan.

$$V = 394 \text{ Rpm} = \frac{394}{60} \times K \\ = 6,567 \times 0,408 = 2,68 \text{ m/s}$$

Panjang kawat (l) = 9 meter untuk jumlah lilitan 150 lilitan

Untuk nilai kerapatan medan (B) ditentukan dari hasil pengukuran yang diambil rata-rata nilai B dari 15 sampel pada beberapa lilitan yang dihitung menggunakan persamaan (10) yaitu :

$$e = B \cdot l \cdot v \Rightarrow B = \frac{e}{l \cdot v} = \frac{0,5}{9 \cdot 2,68} = 0,0207 \text{ Tesla}$$

Untuk nilai B dari hasil rata-rata diperoleh sebesar 0,027 Tesla.

Dengan menggunakan persamaan (10) maka tegangan output pada 150 lilitan adalah :

$$e = B \cdot l \cdot v = 0,027 \times 9 \times 2,68 = 0,643 \text{ Volt}$$

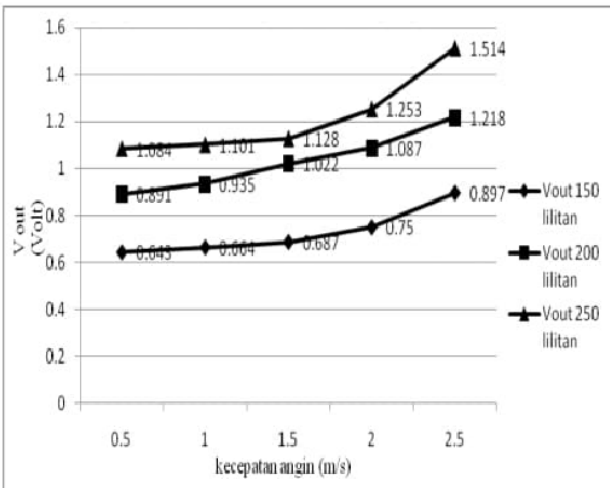
Untuk data selanjutnya dengan menggunakan Persamaan (9), hasil perhitungan dan pengukuran tegangan output dapat dilihat pada Tabel 1.

D. Tegangan output pada variasi jumlah lilitan.

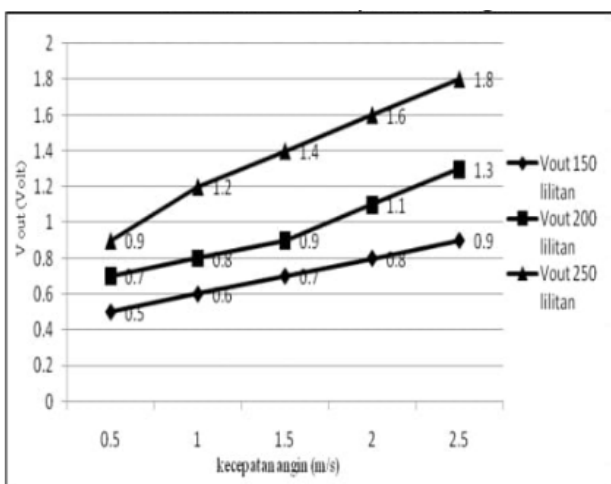
TABEL I. HASIL PERHITUNGAN DAN PENGUKURAN TEGANGAN OUTPUT PADA VARIASI JUMLAH LILITAN

v m/s	Jumlah lilitan					
	150		200		250	
	V _{output} hitung (Volt)	V _{output} ukur (Volt)	V _{output} hitung (Volt)	V _{output} ukur (Volt)	V _{output} hitung (Volt)	V _{output} ukur (Volt)
0,5	0,643	0,5	0,891	0,7	1,084	0,9
1,0	0,664	0,6	0,935	0,8	1,101	1,2
1,5	0,687	0,7	1,022	0,9	1,128	1,4
2,0	0,753	0,8	1,088	1,1	1,253	1,6
2,5	0,897	0,9	1,218	1,3	1,514	1,8

Dari Tabel 1 terlihat semakin besar kecepatan angin maka tegangan output yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini disebabkan karena putaran turbin semakin cepat, sehingga pengaruh antara kecepatan angin terhadap tegangan output yaitu berbanding lurus dengan parameter jumlah lilitan yang konstan.



Gambar 11. Tegangan output terhitung pada kenaikan kecepatan angin



Gambar 12. Tegangan output terukur pada kenaikan kecepatan angin

E. Hubungan antara tegangan output dengan kecepatan putar poros turbin.

Pengujian kecepatan putar poros turbin dengan menggunakan Tachometer Digital (dengan infra merah) dari alat dengan parameter jumlah lilitan sebagai berikut.

TABEL II. PENGUKURAN KECEPATAN PUTAR POROS TURBIN DAN TEGANGAN OUTPUT PADA DIAMETER KAWAT 0,6 MM

V _{angin} (m/s)	Jumlah lilitan v putar poros turbin (rpm)					
	150		200		250	
	(v) rpm	V _{out} (Volt)	(v) rpm	V _{out} (Volt)	(v) rpm	V _{out} (Volt)
0,5	394	0,5	410	0,7	399	0,9
1,0	407	0,6	430	0,8	405	1,2
1,5	421	0,7	470	0,9	415	1,4
2,0	460	0,8	500	1,1	461	1,6
2,5	550	0,9	560	1,3	557	1,8

Tabel 2 memperlihatkan bahwa pengaruh antara kecepatan putar poros turbin terhadap tegangan output V_{out} membentuk suatu grafik yang linier, yaitu semakin besar kecepatan putar poros turbin maka tegangan output yang dihasilkan semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena kecepatan putaran turbin semakin bertambah seiring bertambahnya kecepatan angin.

F. Persentase error antara perhitungan tegangan output dan pengukur tegangan output

Dari hasil tegangan pengukuran (V_{ukur}) dan tegangan perhitungan (V_{hitung}) diperoleh persentase error sebagai berikut :

Pada kecepatan angin = 0,5 m/s, jumlah lilitan = 150 lilitan :

$$\%error = \left| \frac{V_{hitung} - V_{ukur}}{V_{hitung}} \right| \times 100\%$$

$$\%error = \left| \frac{0,643 - 0,5}{0,643} \right| \times 100\% = 22,21$$

Hasil perhitungan pada lilitan 200 dan 250 berikutnya ditunjukkan Tabel 3.

TABEL III. PERSEN ERROR PENGUKURAN TEGANGAN

V _{out} Hitung	Jumlah Lilitan							
	150			200			250	
	V _{out} Ukur	Error (%)	V _{out} Hitung	V _{out} Ukur	Error (%)	V _{out} Hitung	V _{out} Ukur	Error (%)
0,643	0,5	22,18	0,892	0,7	21,48	1,085	0,9	17,01
0,664	0,6	9,59	0,935	0,8	14,43	1,101	1,2	9,02
0,687	0,7	1,96	1,022	0,9	11,93	1,128	1,4	24,1
0,75	0,8	6,65	1,088	1,1	1,18	1,253	1,6	27,7
0,897	0,9	0,34	1,218	1,3	6,77	1,514	1,8	18,9
Persentase error rata2 (%)		8,14			11,16			19,35

Dari Tabel 3 terlihat bahwa persentase error terbesar terjadi pada lilitan 250. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya konversi energi mekanik ke energi listrik mengalami distorsi dari tahap demi tahap.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil rancangan prototipe PLTB dengan turbin Savonius, pengukuran tegangan output dengan kecepatan angin 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 dan 2,5m/s pada lilitan rotor 150 adalah : 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9V, pada lilitan 200 adalah 0,7; 0,8; 0,9; 1,1; 1,3 V. dan pada lilitan 250 adalah 0,9; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 V. Pada variasi kecepatan angin yang sama, tegangan output hasil perhitungan pada lilitan rotor 150 adalah : 0,643; 0,664; 0,687; 0,750; 0,897.V, pada lilitan 200 adalah 0,892; 0,935; 1,022; 1,088; 1,218 V dan pada lilitan 250 adalah 1,085; 1,101; 1,128; 1,253; 1,514 V. Sedangkan persentase error rata-rata antara tegangan output perhitungan dengan tegangan output pengukuran untuk masing-masing jumlah lilitan rotor adalah 8,14; 11,16 dan 19,35.

REFERENSI

- [1] Tim Lentera Angin Nusantara. 2014. *Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*. Tasikmalaya, Jawa Barat, 2014
- [2] Pratama, Airlangga G. "Perancangan Kincir Angin Tipe Axial Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik", *Tugas Akhir Program studi Sarjana S-1 Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah*. Surakarta, 2012.
- [3] Asy'i, H. "Desain Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Turbin Angin Horizontal dan Generator Magnet Permanen Tipe Axial Kecepatan Rendah", *Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) Periode III*. Yogyakarta., 2012
- [4] Prasetya, Maret E. "Studi kinerja Turbin Angin Sumbu Horizontal NACA 4412 Dengan Modifikasi Sudu Tipe Flat Pada Variasi Sudut Kemiringan 0°, 10° dan 15°". *Tugas Akhir Program studi Sarjana S-1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah*. Surakarta, 2015.
- [5] Alfari, M.S.. "Rancang Bangun Turbin Angin Sumbu Horizontal Kapasitas 1000 Watt". *Tugas Akhir Program Studi Diploma III Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro*. Semarang. 2016