pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v23i2.xxxxx

# RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU MENGGUNAKAN TURBIN TIPE SAVONIUS 6 SUDU DENGAN GENERATOR AC BERBASIS ARDUINO MEGA 2560

**Julio Abiyu Putra[1)], Fakhruddin Mangkusasmito[2)],**
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail : fakhm17@gmail.com*

**ABSTRACT**

*The design and construction of a prototype for a Wind Power Plant (PLTB) using a three-blade Archimedes wind turbine has been completed. This turbine utilizes a DC motor that has been converted into a DC generator, with overall dimensions of 120 x 80 x 80 cm, powered by wind energy. Testing was conducted to evaluate the efficiency of converting wind energy into electrical energy based on various wind speeds and types of loads, including resistors, DC motors, and LED lamps. Test results indicate that system efficiency varies depending on wind speed and load characteristics. The highest efficiency was achieved at an optimal wind speed, ranging from 60-80%, with a power coefficient between 0.1033 and 0.1699. For a 15-watt LED lamp load, the average voltage recorded was 7.404 V, whereas, for a 5-watt DC motor load, the average voltage reached 10.132 V. The testing also revealed that the highest power value for resistor loads was obtained with a 10.5 Ω resistor, delivering 2.22 W. This study highlights the importance of optimizing turbine and generator system design to enhance energy conversion efficiency under varying wind speed conditions.*

***Keywords:*** *Wind Power Plant, DC Generator, Archimedes Turbine*

## Pendahuluan

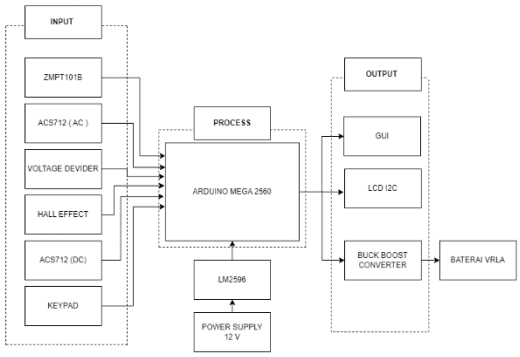
PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Angin) adalah suatu sistem yang membutuhkan angin sebagai sumber yang akan dikonversikan menjadi energi listrik. Konsep sederhana PLTB adalah angin sebagai sumber untuk memutarkan kincir yang tersambung dengan generator dimana generator tersebut mempunyai lilitan tembaga sehingga terjadinya GGL (gaya gerak listrik). Setelah GGL tersebut menghasilkan listrik, aliran listrik tersebut disimpan melalui baterai agar dapat digunakan ke beban, contoh lampu atau kipas angin.

Motor Brushless Direct Current (BLDC) merupakan jenis motor listrik yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri, otomotif, dan peralatan elektronik karena efisiensi tinggi, umur panjang, dan perawatan yang minim. Pemanfaatan BLDC sebagai generator semakin populer dalam aplikasi energi terbarukan, seperti turbin angin skala kecil dan pembangkit listrik tenaga air, karena kemampuannya untuk menghasilkan energi listrik yang efisien dari sumber energi kinetik.

Turbin angin tipe Savonius 6 Sudu adalah inovasi model turbin yang menawarkan beberapa keunggulan. Turbin Savonius pada sumbu vertikal menjadi alternatif untuk menghasilkan energi listrik dikarenakan pengembangan tentang Turbin Savonius diarahkan pada pembuatan yang ekonomis, seperti dapat beroperasi pada kecepatan angin yang rendah. Turbin ini adalah pilihan yang baik untuk aplikasi di mana kecepatan angin rendah dan kesederhanaan desain adalah prioritas. Meskipun efisiensinya lebih rendah dibandingkan turbin angin dengan sumbu horizontal, turbin ini memiliki kelebihan dalam hal biaya dan kemampuan untuk menangkap angin dari berbagai arah. Oleh karena itu, pengertian diatas dapat memotivasi penulis untuk merancang dan membuat Tugas Akhir yang berjudul "**RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU MENGGUNAKAN TURBIN TIPE SAVONIUS 6 SUDU DENGAN GENERATOR AC BERBASIS ARDUINO MEGA 2560"**

## Konsep Pembuatan Alat

Sistem dibangun melalui tahap perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Perancangan perangkat keras meliputi diagram blok dan desain rangkaian elektronika, sedangkan perancangan perangkat lunak meliputi rancangan sistem monitoring, Perancangan perangkat keras dilakukan berdasarkan blok diagram yang tersaji pada Gambar 1.




**Gambar 1.** Diagram Blok

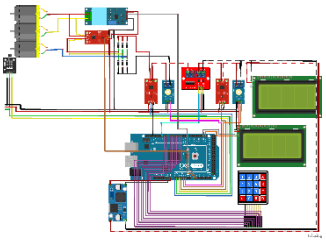
Perancangan diagram blok sistem alat ini Perancangan diagram blok sistem alat ini bertujuan untuk mempermudah dalam perancangan monitoring dan controlling alat serta untuk mempermudah proses pemahaman mengenai cara kerja dari sistem, seperti pada Gambar 1. Keterangan cara kerja blok diagram diawali dengan Generator AC sebagai supply pada panel kontrol.

Rangkaian input yang digunakan dalam prototipe ini terdiri dari sensor ZEMPT 101B tegangan AC sensor arus ACS712 AC dan DC dan tegangan Voltage Devider berfungsi untuk mendeteksi arus dan tegangan yang berada pada rangkaian prototype. Sedangkan, Hall Effect Sensor RPM mendeteksi kedekatan (proximity), kehadiran atau ketidakhadiran suatu objek magnetis yang menggunakan suatu jarak kritis yang dalam hal ini digunakan untuk mendeteksi putaran generator AC per menit. Sensor ZEMPT101B, sensor ACS712 dan Voltage Devider akan aktif ketika ada tegangan yang masuk dari generator AC. Selanjutnya sensor ZEMPT10B, ACS712 dan Voltage Devider akan mengirim besaran arus dan tegangan yang telah terbaca ke arduino. Arduino juga mendapatkan data kecepatan putaran yang telah terukur pada rotor generator dc yang berasal dari Hall Effect Sensor RPM.

Perangkat mikrokontroler yang digunakan pada prototype ini yaitu Arduino Uno, Arduino Uno akan mengolah data dari sensor masukan yang kemudian akan menghasilkan output berupa pembacaan visual sensor dengan LCD dan memproses data imana sensor menjadi sebuah perintah untuk menampilkan data ke GUI (Graphical User Interface) sebagai media pemantauan imana .

Rangkaian output pada prototipe ini yaitu LCD, dan GUI. LCD I2C 20x4 pada rangkaian ini bekerja untuk menampilkan setiap data yang di-input kedalam program maupun output dari program. LCD 20x4 akan menampilkan iman saat pertama kali menyala dengan keterangan alat, nama alat, dan nama penulis. Selain itu LCD berperan dalam menampilkan besaran monitorin tegangan, arus, daya dan RPM ketika sistem berjalan Sedangkan, GUI digunakan untuk penampil visualisasi status data yang terbaca baik dengan manual maupun melalui visualisasi komputer yang bersifat real time dengan bantuan software microsoft visual code.

Perancangan juga dilakukan pada bagian rangkaian elektronika yang digunakan dalam pembuatan perangkat keras. Skematik rangkaian berdasarkan diagram blok yang telah dibuat seperti ditunjukan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Wiring Diagram

Berdasarkan wiring dan skematik rangkaian pada gambar 2, prototipe ini memiliki cara kerja yaitu dimana uno akan mendapatkan input tegangan dari generator AC 3 Phase yang sebelumya telah di-stepdown oleh LM2596 yang selanjutnya dimana uno akan memberi input tegangan. Perancangan pada bagian ini menggunakan sensor arus Allegro ACS 712 untuk mengukur arus dari generator AC. Sensor Allegro ACS 712 menghasilkan tegangan sebagai pembacaan

Sensor ini menggunakan komponen efek Hall. Sensor menerima dimana dari keluaran generator dengan tegangan DC dari Rectifier dengan dimana beban. Dengan menghubungkan kedua input tersebut, sensor dapat membaca arus dengan tegangan offset 2,5 volt. Hal ini sesuai dengan tegangan yang bersumber dari VCC dan GND tanpa ada arus yang mengalir ke dalamnya.

Komponen pendukung alat ini menggunakan rangkaian pembagi tegangan sebagai sensor tegangan. Pada dasarnya, pemantauan tegangan sederhana melibatkan penggunaan dua resistor dengan nilai berbeda dan membandingkan tegangan pada kedua resistor. Namun untuk mempermudah proses perakitan alat, alat ini diganti dengan sensor voltage devider. Konversi tegangan dilakukan dengan rangkaian pembagi tegangan. Tegangan input ke mikrokontroler adalah 0 sampai 5 volt tergantung standar komponen. Hal ini karena

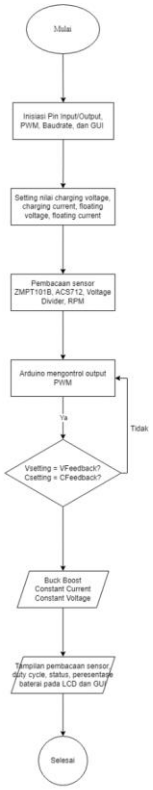
tegangan keluaran generator DC antara 0 dan 30 volt.

Sensor hall effect rpm ini ditempatkan di dekat komponen yang bergerak dan perangkat ini adalah poros atau poros generator. Sebuah magnet kemudian dipasang pada komponen yang bergerak sehingga medan magnet terdeteksi oleh sensor pada saat komponen bergerak. Ketika suatu komponen bergerak (misalnya poros generator DC), magnet yang menempel pada komponen tersebut juga ikut bergerak. Setiap kali magnet melewati sensor efek Hall, medan magnet yang terdeteksi oleh sensor berubah. Sensor efek Hall merespons perubahan medan magnet dengan menghasilkan tegangan Hall. Tegangan Hall ini merupakan sinyal listrik yang berbanding lurus dengan kekuatan medan magnet yang diterima. Sinyal listrik yang dihasilkan oleh sensor efek Hall diproses oleh unit kendali atau mikrokontroler. Perubahan tegangan Hall (yang menunjukkan bahwa magnet telah melewati sensor) dihitung sebagai "peristiwa".

Mikrokontroler menghitung jumlah kejadian (atau sinyal) dalam jangka waktu tertentu. Dengan mengetahui jarak antar magnet (misalnya keliling roda) dan waktu yang dibutuhkan magnet untuk melewati sensor, mikrokontroler dapat menghitung kecepatan putar atau linier dari komponen yang bergerak.

Rangkaian proses pada Prototype simulasi yang di proses oleh arduino uno dengan intput data yang didapat dari sensor untuk memberi monitoring data pengukuran pada arus, tegangan, daya, serta kecepatan putaran. Setelah data diproses oleh arduino uno output data dari arduino uno akan berupa tampilan pada LCD. Tampilan data arus, tegangan, daya, dan kecepatan putaran yang didapat dari masing-masing sensor. Selain LCD imana uno juga akan mengirim output ke sistem untuk data program yang akan berjalan dengan memberi tanda pada LCD yang akan menjadi tombol mulai untuk sistem.

Pada output tegangan dari LM2596 akan diparalel ke sensor ACS712, Voltage Devider, Hall Effect RPM, LCD 20x4. Dan berikut adalah *flowchart* dari sistem ini




**Gambar 3.** Flowchart Sistem

Dari *Flowchart* perancangan alat dapat dilihat bahwa pertama dilakukan studi literatur kemudian setelah didapat literatur yang dibutuhkan dilakukan perancangan desain sistem yang akan di gunakan, dan setelah dari kedua kegiatan tersebut yang dapat dilakukan adalah, perancangan elemen sensing sistemyang akan digunakan. Setelah peracangan elemen sensing termasuk kedalam perancangan *Hardware.* Dari *Hardware* yang harus diselesaikan adalah dari perancangan sistem monitoring yang dilakukan, yaitu dalam bentuk *Software* dan koding dari sensor, dan perancangan sistem elektrik dari sensor yang digunakan, dan sensor yang digunakan ada 3 yaitu sensor Arus ACS712, dan voltase *Voltage Divider, dan Hall Effect RPM.* Setelah perancangan hardware, dilakukan pengujian sensor, apakah pembacaan output sensor sudah sesuai dengan set point. Jika pembacaan sensor sudah sesuai dengan set point, maka dilakukan perancangan tampilan pada PC dengan visual studio community 2022. Setelah itu dilakukan pengujian pada tampilan dan database yang telah dibuat. Selanjutnya dilakukan pengintegrasian visual studio dengan akusisi data menggunakan jaringan internet. Setelah dilakukan pengintgrasian, dilakukan pengkalibrasian pada sensor, pengambilan data

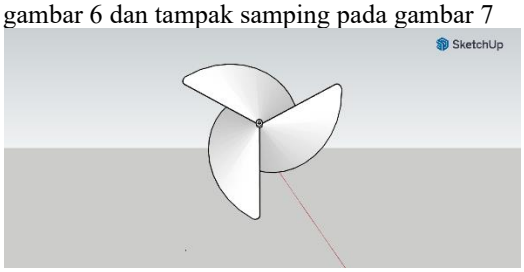
karakteristik, dan pengambilan data pada *wind turbine*. Dan yang terakhir adalah dilakukan analisis sehingga menjadi kesimpulan,dan tugas akhir ini dapat dikatakan selesai setelah semua analisa dan perancangan dapat dimasukkan kedalam laporan.

Selanjutnya untuk menempatkan semua komponen dibutuhkan perancangan mekanik menggunakan box dengan ukuran 35x25x15 sebagai box simulasi Gambar box kontrol dapat dilihat pada gambar 5

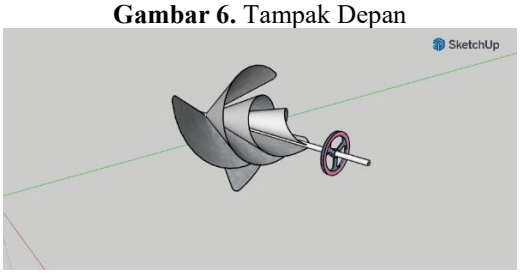



**Gambar 5.** Desain Panel box

Desain turbin tampak depan ditampilkan pada gambar 6 dan tampak samping pada gambar 7

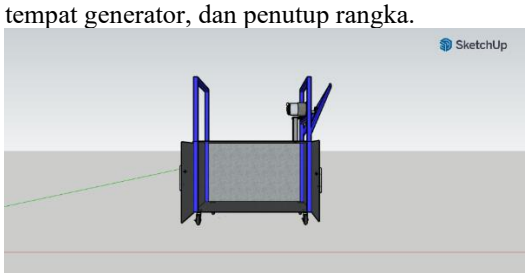



**Gambar 6.** Tampak Depan

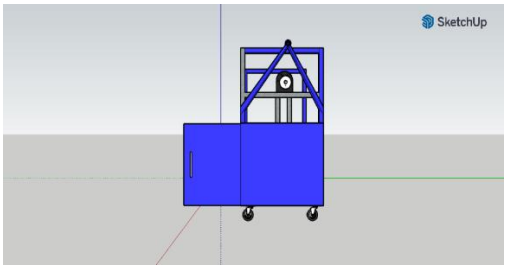



**Gambar 7.** Tampak samping

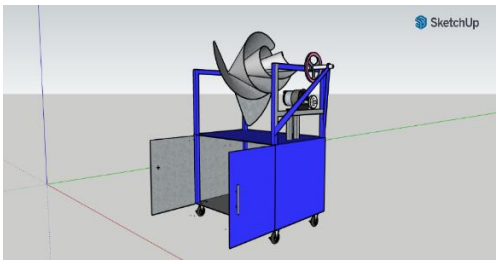
Desain base platform dapat dilihat pada gambar 8,9, dan 10dibawah. Terlihat pada gambar terdapat beberapa komponen seperti rangka, tempat generator, dan penutup rangka.




**Gambar 8.** Gambar Rangka Platform




**Gambar 9.** Gambar Rangka Platform dan Generator




**Gambar 10.** Gambar Alat Keseluruhan

**Pengujian Dan Analisa Alat**

Pada saat melakukan pengukuran alat dan benda kerja, tujuannya adalah untuk memperoleh data spesifikasi dan titik ukur dari alat yang akan diproduksi, melakukan analisa secara cepat dan akurat jika terjadi kesalahan atau kerusakan, serta dapat dengan mudah menelusuri kesalahan (troubleshooting). Sedangkan alat ini diuji untuk menguji rangkaian yang ada di dalam alat untuk memastikan alat dapat bekerja dengan baik sesuai konsep yang dibuat.

**Pengujian Pada Turbin**

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem pada pembangkit listrik tenaga bayu dengan turbin archimedes 3 sudu seperti : efisiensi turbin angin, kecepatan angin di depan turbin dan di belakang turbin yang paling efektif yang mampu diekstrak oleh turbin angin, dan variasi kecepatan angin terhadap daya teoritisturbin yang dihasilkan. Pengujian dengan variasi kecepatan angin ini penting untuk mengetahui karakteristik kinerja turbin angin dalam kondisi yang bervariasi. Pengujian ini juga memberikan gambaran tentang kecepatan angin minimum yang diperlukan untuk menghasilkan daya yang cukup untuk beban tertentu dan bagaimana efisiensi sistem berubah sesuai dengan kecepatan angin, didapatkan hasil pengukuan seperti Tabel 1 berikut.

**Tabel 1.** Data Pengujian Turbin Angin

| No | V1 (m/s) | V2 (m/s) | V2/V1 (m/s) | $P_{teoritis}$ (W) | $C_p$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,5 | 1,05 | 0,42 | 0,2475 | 0,0404 |
| 2 | 3,0 | 1,5 | 0,5 | 0,2521 | 0,0452 |
| 3 | 3,9 | 2,0 | 0,512 | 0,3200 | 0,0471 |
| 4 | 4,9 | 2,8 | 0,571 | 0,5102 | 0,0458 |
| 5 | 5,7 | 3,3 | 0,578 | 0,7789 | 0,0431 |
| 6 | 6,3 | 4,3 | 0,682 | 0,8551 | 0,0447 |

Mengacu pada persamaan energi kinetik yang bergerak di udara dengan laju aliran massa yang melewati sudu pada persamaan. Untuk contoh perhitungan data diambil dari pengujian nomer 1 dengan kecepatan angin di depan rotor sebesar 2,5 m/s, kecepatan angin di belakang rotor sebesar 1,05 m/s, serta kecepatan angin teoritis mengacu pada pembagian antara kecepatan angin didepan rotor dan dibelakang rotor. Maka, kecepatan angin teoritisnya sebesar 0,3714 m/s.

$$P_{teoritis} = \frac{1}{2}\, x\, 1{,}225\, x\, (2{,}5)^3\, x\, \left(\frac{1}{4}\, \pi\, x\, 0{,}25^2\right)$$

$$= 0{,}6125\, x\, 15{,}625\, x\, 0{,}785\, x\, 0{,}0625$$

$$= 0{,}469 \text{ W}$$

contoh perhitungan data diambil dari tabel 1 pengujian nomer 1 dengan v1 = 2,5 m/s dan v2 = 1,05 m/s. Perhitungan daya mekaniknya seperti berikut :

$$P_{teoritis} = \frac{1}{4}\, 1{,}225\, x\, \left(\frac{1}{4} x\, 3{,}14\, x\, 0{,}25^2\right) x\, (2{,}5^2 - 1{,}05^2)\, x\, (2{,}5 + 1{,}05)$$

$$P_{teoritis} = 0{,}30625\, x\, 0{,}785\, x\, 0{,}0625\, x\, 5{,}1475\, x\, 3{,}55$$

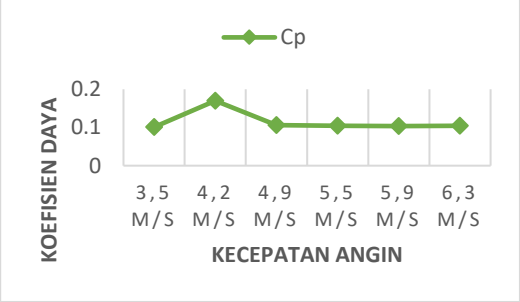
$$P_{teoritis} = 0{,}2475 \text{ W}$$

Contoh perhitungan data diambil dari tabel 1 pengujian nomor 1 dengan P_real = 0,01 W dan P_teoritis = 0,0404 W . Maka Koefisien Daya dapat dengan menggunakan penyelesaian seperti dibawah ini:

$$C_p = \frac{0{,}01}{0{,}2475}$$

$$C_p = 0{,}0404$$

Data lengkap tentang perbandingan kecepatan angin di depan rotor dan daya teoritis disajikan pada Grafik 1




**Grafik 1** Hubungan V1 dengan Pteoritis

Grafik 5.1 menjelaskan tentang korelasi antara perubahan kecepatan angin yang terjadi dengan daya yang dihasilkan secara teoritis. Pada kecepatan angin 3,5 m/s pertama, belum menghasilkan daya listrik. Sedangkan pada interval kedua dan ketiga (kecepatan 4,2 m/s – 6,3 m/s), terjadi peningkatan daya secara bertahap. Secara teoritis, semakin kencang anginnya, maka sama saja pula daya yang dihasilkan. Oleh karena itu, daya terbesar terjadi pada angin 6,3 m/s.

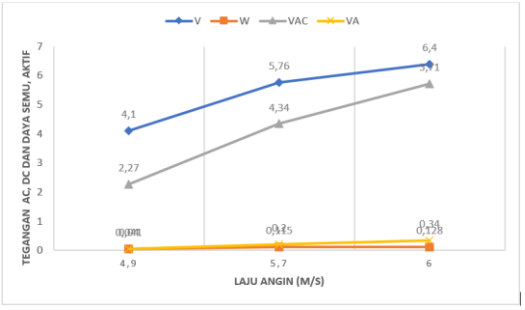
**Pengujian Tanpa Beban**

Pengujian tanpa beban dilakukan dengan cara mengukur tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator. Menentukan karakteristik tegangan keluaran generator dalam kondisi tanpa beban. Bagian ini menjelaskan tujuan dari pengujian generator DC tanpa beban. Umumnya, tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi performa generator DC pada berbagai putaran (rpm), mengidentifikasi hubungan antara kecepatan putaran rotor dan tegangan keluaran tanpa adanya beban eksternal. Berikut tabel 2 yang berisi pengujian generator dc tanpa beban.

**Tabel 2** Hasil Pengujian Tanpa Beban

| No | Laju Angin (m/s) | V AC (V) | I AC (A) | Daya Semu (VA) | V DC (V) | I DC (A) | DAYA NYATA (W) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4,9 | 2,27 | 0,02 | 0,04 | 4,10 | 0,01 | 0,041 |
| 2 | 5,7 | 4,34 | 0,05 | 0,20 | 5,76 | 0,02 | 0,115 |
| 3 | 6,0 | 5,71 | 0,06 | 0,34 | 6,40 | 0,02 | 0,128 |

Laju angin pada tabel 2 dapat dibuat grafik pengaruh laju angin terhadap kecepatan putar motor dan kecepatan generator seperti yang ditunjukkan pada Grafik 2.




**Grafik 2** Hubungan Laju Angin dengan Tegangan Keluaran

Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa semakin kecil laju angin yang menggerakkan turbin, semakin lambat putaran turbin dan generator ac begitupun sebaliknya, jika laju angin yang diberikan semakin besar, maka kecepatan putar turbin dan generator semakin cepat. Hal tersebut dikarenakan kecepatan angin secara langsung mempengaruhi momentum kinetik yang diterima oleh bilah-bilah turbin. Saat angin bergerak lebih cepat, energi kinetik yang ditransfer ke turbin meningkat, sehingga menghasilkan torsi yang lebih besar pada poros turbin. Torsi ini kemudian diteruskan ke generator AC, yang pada gilirannya meningkatkan kecepatan putaran rotor di dalam generator. Kecepatan putar yang lebih tinggi ini meningkatkan frekuensi pemotongan medan magnet oleh kumparan dalam generator, sehingga menghasilkan tegangan yang lebih besar

Dengan demikian, hubungan antara kecepatan angin, dan output daya generator menunjukkan ketergantungan langsung sistem pada kondisi angin yang menggerakkan turbin, yang merupakan prinsip dasar dalam pembangkitan listrik tenaga angin.

Dalam pengujian tanpa beban juga tegangan tetap ada karena generator masih berputar dan menghasilkan gaya gerak listrik (EMF). Sedangkan arus sangat kecil atau bahkan mendekati nol karena tidak ada beban yang terhubung ke generator untuk mengalirkan arus. Karena arus yang mengalir sangat kecil, maka daya yang dihitung juga akan sangat kecil atau mendekati nol. Dengan demikian, meskipun tegangan terukur, nilai daya listrik yang dihasilkan oleh generator pada pengujian tanpa beban praktis dapat diabaikan. Jadi, pengukuran daya dalam kondisi tanpa beban tidak memberikan informasi yang berarti tentang kemampuan generator untuk menghasilkan daya listrik ketika beban terhubung. Pengujian daya biasanya dilakukan dengan beban terhubung

**Pengujian dengan Beban**

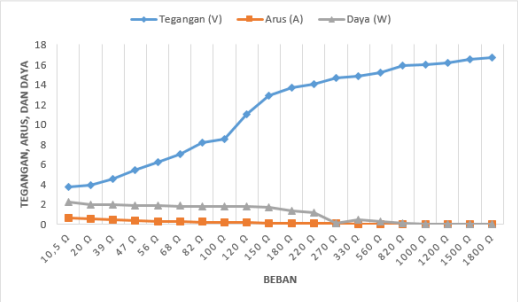
Pengujian menggunakan beban dilakukandengan cara memberikan variasi beban yang berbeda pada tegangan keluaran generator dc. Pengujian generator dc dengan beban bertujuan untuk mengamati bagaimana kinerja generator dalam kondisi beroperasi dengan beban eksternal, menilai kemampuan generator dalam mempertahankan tegangan keluaran pada kondisi beban tertentu dan mengamati perubahan efisiensi generator saat beban bertambah. Pada pengujian ini, generator dihubungkan dengan rangkaian beban dalam kasus ini adalah panel kontrol dan baterai untuk mengetahui karakteristik arus, tegangan, dan daya yang dihasilkan saat bekerja pada kondisi yang lebih realistis dibandingkan pengujian tanpa beban.

Pengujian dengan beban resistif dilakukan dengan memberikan laju angin konstan sebesar 6,3 m/s serta menggunakan berbagai jenis dan nilai resistor merupakan metode penting untuk memahami kinerja generator dc saat dihubungkan dengan beban yang berbeda. Dalam pengujian, penting untuk meminimalkan jumlah variabel yang dapat mempengaruhi hasil. Jika kecepatan angin bervariasi selama pengujian, hasil yang diperoleh akan sulit dianalisis karena perubahan output listrik mungkin disebabkan oleh perubahan kecepatan angin, bukan oleh perubahan beban resistif. Dengan menjaga kecepatan angin konstan, hanya resistansi beban yang menjadi variabel utama, sehingga memudahkan dalam memahami hubungan antara beban dan output listrik dari generator. Pengujian generator DC dengan beban resistor kapur 5 Watt dapat dilihat pada tabel 3.

**Tabel 3 Pengujian Generator dengan Beban**

| No | Tegangan (V) | Arus (mA) | Daya (W) | Beban (Ω) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,70 | 600 | 2,22 | 10 |
| 2 | 3,90 | 500 | 1,95 | 20 |
| 3 | 4,50 | 430 | 1,935 | 39 |
| 4 | 5,40 | 350 | 1,89 | 47 |
| 5 | 6,20 | 300 | 1,86 | 56 |
| 6 | 7,00 | 260 | 1,82 | 68 |
| 7 | 8,20 | 220 | 1,804 | 82 |
| 8 | 8,50 | 210 | 1,785 | 100 |

Berdasarkan tabel 3, Penurunan daya ini berhubungan langsung dengan menurunnya arus yang dihasilkan oleh generator, karena daya merupakan hasil perkalian tegangan dan arus. Meski tegangan terus meningkat, arus yang jauh lebih rendah menyebabkan daya keseluruhan menurun. Generator DC ini menunjukkan karakteristik khas dimana tegangan meningkat saat arus menurun dengan beban yang semakin tinggi. Ini menunjukkan bahwa generator beroperasi mendekati karakteristik "tegangan tetap" untuk beban tinggi, di mana arus yang dihasilkan sangat kecil. Penggunaan beban resistor kapur 5 watt memperlihatkan batasan daya yang dihasilkan oleh generator. Pada beban rendah, daya mendekati batas watt resistor, sementara pada beban tinggi, daya yang dihasilkan oleh generator jauh di bawah kapasitas resistor. Generator DC ini lebih efektif dalam menghasilkan daya pada beban rendah hingga menengah sekitar 10 Ω hingga 100 Ω. Pada beban tinggi, meskipun tegangan meningkat, daya yang dihasilkan menurun drastis karena arus yang sangat kecil.Untuk aplikasi yang memerlukan daya lebih besar, generator ini perlu bekerja dengan beban yang lebih rendah untuk mengoptimalkan output daya. Analisis ini menunjukkan bahwa hubungan antara tegangan, arus, dan daya sangat dipengaruhi oleh nilai resistansi, dengan generator cenderung menghasilkan tegangan lebih tinggi tetapi arus yang lebih rendah saat resistansi meningkat.Grafik perubahan tegangan arus dan daya terhadap meningkatnya nilai beban ditunjukkan kepada grafik 3.




**Grafik 3** Hubungan Arus, Tegangan dan Daya terhadap resistansi Beban

**Generator DC cenderung menghasilkan** tegangan yang lebih tinggi saat beban yang dihubungkan memiliki resistansi lebih besar. Hal ini terkait dengan dua aspek utama yaitu generator DC menghasilkan tegangan yang bergantung pada laju putaran rotor (RPM) dan medan magnet. Saat beban rendah (resistansi kecil), arus yang mengalir lebih besar, dan ini menyebabkan hilangnya energi di dalam generator, yang menurunkan tegangan output. Ketika beban bertambah (resistansi meningkat), arus yang mengalir berkurang, sehingga tegangan yang dihasilkan lebih dekat ke tegangan ideal yang bisa dihasilkan oleh generator.

Pada saat resistansi meningkat, generator tidak perlu mengalirkan arus besar untuk mempertahankan tegangan output yang lebih tinggi. Karena arus yang dihasilkan oleh generator berkurang dengan bertambahnya resistansi, daya yang dihasilkan juga menurun. Resistansi tinggi membatasi arus yang dapat mengalir di rangkaian. Pada beban rendah (resistansi kecil), generator DC perlu menghasilkan arus yang lebih besar, yang seringkali mengurangi efisiensinya karena terdapat lebih banyak kerugian pada komponen internal. Ketika resistansi bertambah, generator bekerja lebih efisien karena arus yang lebih kecil mengurangi kerugian pada kumparan, tetapi ini juga berarti generator hanya menghasilkan daya yang lebih kecil.

## Kesimpulan

1. Variasi Laju Angin: Laju angin 3,5–6,3 m/s dapat diatur manual. Kecepatan angin tinggi meningkatkan efisiensi (0,1033–0,1699), sedangkan angin rendah menurunkan efisiensi hingga 0,1009.
2. Pengaruh Laju Angin: Pada uji tanpa beban, laju angin 5,5 m/s menghasilkan tegangan 9,57 V dan 6,3 m/s menghasilkan 15,07 V.
3. Efisiensi Generator: Efisiensi generator mencapai 56,318% pada angin tinggi, tapi menurun dengan angin rendah atau beban tidak sesuai.
4. Pengaruh Beban: Pada laju angin 6,3 m/s, beban lampu LED 15 W menghasilkan 7,404 V, motor DC 5 W menghasilkan 10,132 V, dan beban resistif 10,5 Ω menghasilkan daya tertinggi 2,22 W.
5. Rugi Mekanis: Sistem kehilangan 13,71% energi karena faktor mekanis, dengan 86,29% energi digunakan efektif.

## Saran

1. Gunakan bantalan berkualitas, tingkatkan aerodinamika sudu, dan evaluasi sudut serang untuk efisiensi energi.
2. Monitor kecepatan angin secara real-time untuk penyesuaian otomatis, keamanan, dan peningkatan efisiensi.
3. Arahkan aliran udara lebih efisien dan tingkatkan distribusi serta jangkauan angin.
4. Pilih generator modern untuk mengurangi rugi energi dan meningkatkan efisiensi sistem.

**Daftar Pustaka**


1. `Syuk hur Putraji, Anggito Pringgo Tetuko, dan Djuhana, 2021. "Simulasi Kekuatan Mekanik Sudu Turbin Angin Sumbu Horizontal Menggunakan Bahan Steel". Tangerang Selatan: Universitas Pamulang, Journal of Technical Engineering: Piston Vol. 4, No. 2, (2021) 71-76
2. R. Y. Pratama and M. Yuhendri, 2020. "Monitoring Turbin Angin Menggunakan Smartphone Android," JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional), vol. 6, no. 2, p. 64, doi: 10.24036/jtev.v6i2.108517.
3. `Dimas Priyambodo, A., & Agung, A. I, 2020. "Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Generator DC Di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya Achmad Imam Agung". Jurnal Teknik Elektro, 8(2), 285–292.
4. Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Tengah, 2023. Kecepatan Angin Rata-Rata Bulan Juli - Desember 2023. Jawa Tengah : Badan Pusat Statistika.
5. A. D. Priyambodo, & A. Imam Agung, 2019. "Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Generator DC Di Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya". Surabaya : Universitas Negeri Surabaya. Jurnal Teknik Elektro, 8(2). https://doi.org/10.26740/jte.v8n2.p%p
6. Trian Nur Nugroho, 2017. "Pembuatan Dan Pengujian Turbin Angin Archimides". Bandung: Politeknik Negeri Bandung 025 / 2017 / TEN.
7. Mursid, M., 2021. "Rancang bangun pembangkit listrik tenaga angin dan surya menerapkan konsep hybrid technology berbasis Internet of Things". Laporan Akhir Penelitian Pakerti DRPM ITS.
8. Dedi Setiawan, 2019. "Perbandingan Hasil Pengujian Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Alternator Mobil dan Generator DC". Fakultas Teknik, Universitas Muhammaddiyah Sumatera Utara.
9. Darwinson, E., 2011. Analisis penentuan tahanan kritis untuk pembangkitan tegangan pada generator arus searah penguatan shunt (aplikasi pada Laboratorium Konversi Energi Listrik FT – USU).
10. P. R. Indonesia, 2017. "Undang-Undang Republik Indonesja Nomor 30 Tahun 2007 Tentang Energi". Republik Indonesia, 2014. Peraturan Pemerintah No. 79 tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional (KEN). Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 No. 300.
11. R. Y. Pratama and M. Yuhendri, 2020."Monitoring Turbin Angin Menggunakan Smartphone Android," JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional), vol. 6, no. 2, p. 64, doi: 10.24036/jtev.v6i2.108517.Lorenz.2016."Coulomb Counting State-of-Charge Algorithm for Electric Vehicles with a Physics-Based Temperature Dependent Baterai Model".Madison.Jurnal IEEE Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium (WEMPEC).
12. ARRASID, Rosalina. "KENDALI DAN MONITORING CHARGING-DISCHARGING BATERAI LITHIUM-ION 12 VOLT BERBASIS INTERNET OF THINGS". 2021. Universitas Siliwangi.
13. Ramadhani, Aldanur Istianingrum. "DESAIN DAN IMPLEMENTASI BATTERY CHARGER VALVE REGULATED LEAD ACID DENGAN MONITORING STATE OF CHARGE MENGGUNAKAN METODE COULOMB COUNTING PADA LAMPU TAMAN." *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro* 11.1 (2022): 63-68.