

ANALISIS DAYA LISTRIK YANG DIHASILKAN GENERATOR DENGAN PENGGERAK TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL

SIGIT HERNOWO
FRENGKY LAHENGKING

*Program Studi Diploma IV Teknik Mesin
Politeknik Saint Paul Sorong*

Email : sghernowo219@gmail.com; frangki.lahengking@gmail.com

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat serta menurunnya cadangan energi fosil mendorong pengembangan sumber energi terbarukan, salah satunya energi angin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daya listrik yang dihasilkan generator dengan penggerak turbin angin sumbu horizontal serta mengetahui pengaruh perubahan kecepatan angin terhadap daya aktual dan efisiensi sistem. Turbin angin dirancang menggunakan kombinasi komponen hasil permesinan dan material bekas, dengan sudu berbahan polimer berdiameter 350 mm dan generator hasil modifikasi motor kipas. Pengujian dilakukan secara eksperimental di dalam ruangan menggunakan fan sebagai sumber aliran angin dengan variasi kecepatan antara 3,5 m/s hingga 6 m/s. Parameter yang diukur meliputi kecepatan angin, tegangan keluaran, dan arus listrik, sedangkan daya aktual dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan daya listrik yang dihasilkan generator. Daya output maksimum yang diperoleh sebesar 3,12 Watt pada kecepatan angin 6 m/s, sedangkan efisiensi sistem berada pada rentang 20,26% hingga 28,50% dengan rata-rata sebesar 24,4%. Hubungan antara daya aktual dan kecepatan angin menunjukkan tren eksponensial mengikuti persamaan $P_{akt} = 0,4677e0,3744V$. Hasil penelitian membuktikan bahwa turbin angin sumbu horizontal berpotensi digunakan sebagai pembangkit listrik skala kecil, khususnya untuk daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional.

Kata kunci: turbin angin sumbu horizontal, energi angin, generator listrik, daya listrik, efisiensi.

ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy and the depletion of fossil fuel reserves have encouraged the development of renewable energy sources, particularly wind energy. This study aims to analyze the electrical power generated by a generator driven by a horizontal-axis wind turbine and to investigate the effect of wind speed variation on actual power output and system efficiency. The wind turbine was constructed using a combination of machined components and recycled materials, employing polymer blades with a diameter of 350 mm and a modified fan motor as the generator. Experimental testing was conducted indoors using a fan as the wind source with wind speed variations ranging from 3.5 m/s to 6 m/s. The measured parameters included wind speed, output voltage, and electric current, while the actual power output was calculated based on voltage and current measurements.

The results indicate that increasing wind speed leads to higher electrical power generated by the system. The maximum output power obtained was 3.12 Watts at a wind speed of 6 m/s, while the system efficiency ranged from 20.26% to 28.50% with an average efficiency of 24.4%. The relationship between actual power and wind speed followed an exponential trend represented by the equation $P_{akt} = 0.4677e0.3744V$. The findings demonstrate that horizontal-axis wind turbines have significant potential for small-scale electricity generation, particularly in remote areas lacking access to conventional electrical grids.

Keywords: horizontal-axis wind turbine, wind energy, electric generator, electrical power, efficiency.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi di dunia terus meningkat akibat pertumbuhan penduduk, pertumbuhan ekonomi dan peningkatan pola konsumsi. Sedangkan cadangan sumber energi konvensional terus berkurang seiring waktu. Jika hal ini berlangsung secara kontinyu, krisis energi akan segera terjadi. Sehingga penggunaan sumber energi alternatif yaitu sumber energi baru dan terbarukan menjadi pilihan yang rasional.

Energi angin telah lama dikenal dan dimanfaatkan oleh manusia. Penggunaan terbesar di masa lalu terutama dalam bidang transportasi sebagai penggerak kapal dan perahu layar. Di samping itu kincir angin juga dimanfaatkan untuk memindahkan air, baik dalam bidang pertanian, rumah tangga, maupun drainase. Dalam industri pangan tradisional, kincir angin juga dimanfaatkan dalam penggilingan biji-bijian.

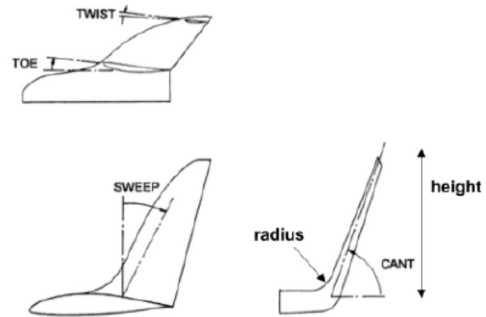
Indonesia merupakan salah satu Negara tropis yang memiliki sumber daya angin yang cukup, terutama di daerah pantai, pesisir, dan pulau-pulau kecil yang jumlahnya sangat banyak. Potensi energi ini belum banyak dikembangkan, tetapi bila dimanfaatkan akan membantu menaikkan tingkat elektrifikasi nasional terutama di daerah terpencil yang tidak terjangkau listrik konvensional.

KAJIAN PUSTAKA

Tinjauan Pustaka

Manikandan dan Stalin (2013) melakukan studi untuk meningkatkan keandalan sudu turbin angin dengan mengembangkan struktur airfoil dan menurunkan suara berisik selama turbin beroperasi. Sudu dioperasikan dengan bantalan pivot, karena bagian ini merupakan elemen terpenting pada sistem penyerapan energi. Konsekuensinya, sudu harus didesain dengan baik untuk memiliki kemampuan menyerap energi pada efisiensi terbaiknya. Prosedur desain dilakukan secara komputasi, menggunakan perangkat lunak Hypermesh Pro/E, untuk menganalisis profil airfoil NACA 63-215. Model sudu turbin angin dibuat dengan beberapa penampang melintang dari root sampai tip, dengan memberikan beberapa variasi terhadap model standar. Untuk meningkatkan efisiensi ditambahkan winglet (sayap kecil tambahan) pada tip sudu, yang juga bertujuan untuk menurunkan kegaduhan.

Desain winglet didasarkan pada parameter-parameter tinggi (height), sudut sapuan (swept angle), sudut kemiringan (cant angle), jari-jari kelengkungan (curvature radius), sudut tumpuan dasar (toe angle), dan sudut puntir (twist angle). Penggunaan perangkat lunak membantu memperoleh nilai-nilai untuk masing-masing parameter yang memberikan desain winglet dengan efisiensi terbaik. Pemilihan desain dengan bentuk dan ukuran yang berbeda membantu memberikan opsi yang lebih banyak untuk meningkatkan keandalan struktur turbin angin.



Gambar 1. Parameter Desain Winglet

Rodrigues dan Rossi (2016) melakukan penelitian tentang kinerja turbin angin kecil, dengan simulasi suplai listrik terhadap beban yang terhubung ke kebutuhan umum di wilayah terisolir. Produksi listrik dari dua jenis turbin angin kecil dibandingkan menggunakan simulasi dengan perangkat lunak HOMER. Kedua jenis turbin angin tersebut adalah model nasional Brazil ukuran 6 kW dan turbin impor ukuran 5 kW. Kondisi angin disimulasikan pada 3 wilayah berbeda, yaitu Campinas (Sao Paulo, Brazil), Cubatao (Sao Paulo, Brazil) dan Roscoe (Texas, Amerika Serikat). Sistem pembangkit bertenaga angin dihubungkan ke jaringan listrik dan sistem isolasi angin menggunakan baterai, selanjutnya dievaluasi. Hasilnya menunjukkan bahwa biaya energi (\$/kWh) sangat tergantung pada karakteristik kincir angin dan sumber daya angin lokal. Dengan menganggap sistem pembangkit tenaga angin terisolasi menggunakan baterai, jaminan suplai penuh terhadap beban listrik tersimulasi, hanya dicapai dengan menggunakan sejumlah besar baterai penyimpanan daya dan kincir angin, sehubungan dengan ketidakkontinyuan sumber daya angin.

Biadgo dan Aynekulu (2017) melakukan desain aerodinamika sudu turbin angin sumbu horizontal. Studi tersebut bertujuan untuk

mencapai tingkatan kinerja yang memuaskan dimulai dengan pengetahuan gaya aerodinamika yang berkerja pada turbin angin. Pada studi ini metode desain didasarkan pada teori momentum elemen sudu yang diterapkan pada sudu turbin angin horizontal. Metode ini digunakan untuk optimisasi distribusi chord dan puntir pada sudu, yang pada akhirnya digunakan untuk mendesain rotor turbin angin 1000 W. Program komputer Visualbasic digunakan untuk memperkirakan kinerja aerodinamika sudu turbin angin yang telah eksis dan rotor yang didesain.

Pemakaian perangkat lunak memberikan parameter-parameter geometri sudu, yaitu distribusi chord dan puntiran, serta koefisien kinerja dan gaya aerodinamika, yaitu gaya batang dan torsi, untuk input-input yang terdiri dari : daya yang diperlukan turbin, jumlah sudu, kecepatan angin desain, dan jenis profil sudu (airfoil). Program komputer juga menunjukkan hasil-hasil dengan gambar, serta pandangan 3D elemen-elemen sudu menggunakan visualisasi AutoCAD.

Abolute dan Zhou (2017) melakukan analisis awal terhadap energi turbin angin puncak. Kenyataannya energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin tidak stabil, sehubungan dengan kondisi input angin yang terputus-putus. Pada saat kecepatan angin tinggi, listrik yang dihasilkan juga besar, sebaliknya ketika kecepatan angin rendah, energi listrik yang dihasilkan juga kecil. Dari hasil investigasi ditemukan bahwa ketika kecepatan angin kurang dari 3 m/s, energi listrik yang dihasilkan generator 0 watt (tidak ada sama sekali). Analisa dilakukan terhadap turbin angin berkapasitas 800 kW, dengan mengukur daya output secara terus menerus selama 1 menit, 5 menit, dan 15 menit. Periode tersebut diasumsikan mewakili pengukuran masing-masing selama 1 jam, 4 jam, dan 12 jam. Setelah pengukuran diketahui bahwa daya output yang dihasilkan oleh turbin angin hanya berkisar antara 5% - 48% dari daya nominalnya. Sehingga untuk memaksimalkan daya output perlu untuk mengatur arah turbin angin berhadapan dengan arah angin. Di samping itu juga perlu dilakukan manajemen jaringan dan optimasi daya angin.

Cianetti dkk (2018) melakukan penelitian yang berfokus pada pengembangan permodelan metode dinamis dan evaluasi perilaku kelelahan (fatigue behavior) pada turbin angin di Italia. Penelitian tersebut bertujuan untuk menghasilkan model simulasi yang mampu

memprediksi umur penggunaan turbin angin dan mengoptimalkan pengendalian untuk meminimalisasi kegagalan komponen.

Metode yang digunakan dengan membuat model multibody menggunakan bantuan perangkat lunak NREL-FAST yang sudah terbukti handal dan telah menjadi standar dalam analisis turbin angin. Selanjutnya dilakukan kalibrasi dan penyetelan model agar sesuai dengan kondisi aktual dengan pengujian terowongan angin.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dinilai kokoh (robust) dan representatif untuk menggambarkan scenario pembebanan pada turbin angin. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi positif dalam bidang teknik mesin terutama dalam aspek keselamatan, efisiensi operasional mesin konversi energi, dan optimasi pemeliharaan system energi.

Mamanpush dkk (2018) melakukan penelitian yang membahas pemanfaatan kembali limbah sudu turbin angin (wind turbine blade) yang telah habis masa pakainya melalui proses daur ulang mekanis (mechanical recycle). Penelitian berfokus pada pengembangan material komposit berbasis daur ulang sudu turbin angin thermoset untuk mengevaluasi potensinya penggunaannya sebagai material teknik baru. Penelitian tersebut bertujuan untuk menyajikan data sifat mekanik komposit daur ulang dan menganalisis pengaruh dari beberapa parameter dalam proses manufaktur daur ulangnya. Parameter tersebut di antaranya kadar resin, kadar kelembaban, ukuran saringan pada proses penghancuran material bekas, dan densitas material komposit. Penelitian ini penting karena limbah material komposit sulit terurai secara alami sehingga perlu dilakukan pendekatan berkelanjutan untuk mengurangi efek pada lingkungan serta meningkatkan nilai ekonomi material bekas.

Sudu kincir angin bekas dihancurkan dengan mesin penumbuk (hammer mill) sampai pada ukuran partikel tertentu dan dipisahkan menggunakan saringan yang bervariasi ukuran meshnya. Material yang sudah dihancurkan tersebut kemudian dicampur dengan resin polimerik methylene diphenyl diisocyanate (pMDI) sebagai bahan perekat, selanjutnya dibentuk secara manual dan diproses tekan dengan metode hot pressing pada temperature 138oC selama 5 menit. Pengujian sifat mekanik dilakukan secara eksperimental berdasarkan standar ASTM D1037-12. Parameter mekanik yang dianalisis meliputi Modulus of Rupture

(MOR), Modulus of Elasticity (MOE), dan Internal Bond (IB). Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi kadar resin, kadar air, ukuran partikel, dan densitas berpengaruh signifikan terhadap kualitas mekanik komposit yang dihasilkan. Peningkatan densitas dan kadar resin cenderung meningkatkan kekuatan lentur dan kekakuan material, sedangkan ukuran partikel yang lebih sesuai menghasilkan ikatan internal yang lebih baik pada struktur komposit. Berdasarkan hasil pembahasan, penelitian ini menunjukkan bahwa limbah bilah turbin angin dapat dimanfaatkan kembali secara efektif sebagai bahan baku komposit melalui metode daur ulang mekanis yang relatif sederhana dan ekonomis. Material komposit hasil daur ulang memiliki sifat mekanik yang memadai untuk aplikasi tertentu, terutama apabila parameter proses manufaktur dioptimalkan dengan tepat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan daur ulang mekanis tidak hanya mampu mengurangi permasalahan limbah komposit thermoset, tetapi juga memberikan peluang pengembangan material berkelanjutan yang bernilai tambah tinggi.

El Mouhsine dkk (2018) melakukan penelitian dengan analisis aerodinamika dan struktur bilah turbin angin horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine/HAWT) guna meningkatkan reliabilitas dan efisiensi penyerapan energi angin. Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan desain bilah turbin optimum melalui pemilihan karakteristik airfoil yang tepat serta melakukan analisis aerodinamika dan struktur statis pada bilah turbin. Metodologi penelitian dimulai dengan penentuan desain awal bilah menggunakan metode Blade Element Momentum (BEM), kemudian memanfaatkan profil airfoil S818, S825, dan S826 yang digunakan pada turbin angin NREL fase 2 dan fase 3. Data koefisien gaya angkat (lift coefficient) dan gaya hambat (dragcoefficient) digunakan dalam pemrograman MATLAB untuk memperoleh koordinat geometri bilah turbin. Selanjutnya, analisis aliran fluida dilakukan menggunakan perangkat lunak FLUENT berbasis metode Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) dengan model turbulensi k- ω Shear Stress Transport (SST) dan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi bentuk bilah dan parameter aerodinamika mampu meningkatkan efisiensi penyerapan

energi serta menghasilkan distribusi beban yang lebih baik pada struktur bilah turbin.

Adam, Harahap, dan Nasution (2019) melakukan penelitian tentang pemanfaatan energi angin sebagai sumber energi terbarukan untuk menghasilkan energi listrik melalui generator arus searah (Direct Current/DC). Cakupan penelitian difokuskan pada analisis pengaruh perubahan kecepatan angin terhadap daya listrik yang dihasilkan generator DC pada sistem pembangkit listrik tenaga angin. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh meningkatnya kebutuhan energi listrik nasional yang belum diimbangi dengan ketersediaan energi fosil yang bersifat tidak terbarukan. Oleh karena itu, penelitian bertujuan untuk mengetahui hubungan antara kecepatan angin, putaran turbin, dan keluaran daya generator DC, sekaligus mengevaluasi kesesuaian daya yang dihasilkan sistem pembangkit tenaga angin skala kecil. Selain itu, penelitian juga membahas karakteristik turbin angin horizontal dan vertikal, prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin, serta komponen utama sistem seperti turbin, gearbox, generator, dan sistem pengendalian energi.

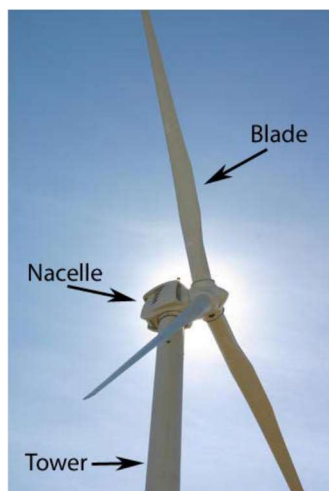
Metodologi penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara dengan menggunakan turbin angin sebagai penggerak utama generator DC. Penelitian diawali dengan studi literatur mengenai teknologi pembangkit listrik tenaga angin dan karakteristik turbin angin. Peralatan yang digunakan meliputi generator DC, baling-baling turbin, alat ukur listrik, tachometer digital, baterai, charge controller, inverter, dan perangkat pendukung lainnya. Pengujian dilakukan dengan mengamati perubahan kecepatan angin, putaran turbin (rpm), tegangan keluaran generator, serta daya yang dihasilkan selama periode pengamatan dari pukul 09.00 hingga 19.00 WIB. Analisis daya angin dan daya generator dilakukan menggunakan persamaan matematis berbasis luas sapuan turbin, kecepatan angin, efisiensi generator, dan efisiensi transmisi mekanik. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis melalui tabel dan grafik untuk mengetahui hubungan antara perubahan kecepatan angin dan performa generator DC.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan kecepatan angin berpengaruh langsung terhadap peningkatan putaran turbin dan daya listrik yang dihasilkan generator DC. Berdasarkan hasil

pengukuran dan perhitungan selama satu hari pengujian, diperoleh tegangan rata-rata sebesar 2,56 Volt, daya angin sebesar 27,6 Watt, dan daya generator sebesar 136,3 Watt. Energi kinetik angin dapat dikonversi menjadi energi listrik secara efektif melalui sistem turbin angin dengan generator DC, meskipun performa sistem sangat dipengaruhi oleh kondisi kecepatan angin dan efisiensi komponen mekanik. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pembangkit listrik tenaga angin memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, khususnya pada daerah yang belum terjangkau jaringannya.

Komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Sistem pembangkit listrik tenaga angin modern umumnya memiliki komponen-komponen utama yang terdiri dari rotor yang di dalamnya termasuk sudu/bilah (blade), nasek yang berisi controller, gearbox, dan generator, serta menara. Konfigurasi komponen-komponen tersebut dijelaskan pada Gambar 2 dan Gambar 3.

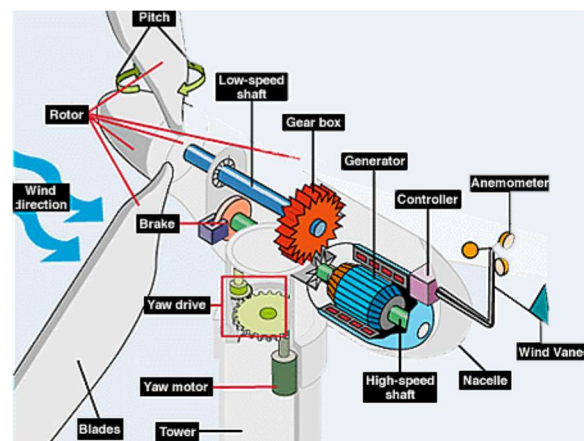


Gambar 2. Komponen-komponen Utama Turbin Angin (Sumber: Rogowsky dkk, 2009)

Rotor merupakan peralatan yang digunakan untuk menangkap energi angin yang diteruskan dengan gerak berputar sudu. Rotor merupakan gabungan dari sudu turbin dan hub, komponen dimana sudu diletakkan. Turbin angin modern umumnya memiliki 3 sudu, meskipun beberapa jenis hanya memiliki 2 sudu. Ukurannya bervariasi tergantung pada besarnya daya listrik yang ingin dibangkitkan.

Rumah nasek merupakan komponen utama turbin angin, yang di dalamnya berisi

peralatan kontrol, sistem transmisi, poros, dan generator. Peralatan kontrol (controller) menjadi salah satu dasar pengoperasian turbin. Umumnya turbin angin menggunakan mekanisme pengereman (brake) untuk menjaga agar putaran poros pada sistem transmisi (gearbox) tetap pada kondisi yang aman ketika kecepatan angin melebihi batas normal. Wind vane controller digunakan untuk menggerakkan yaw-drive dan yaw-motor mengikuti perubahan arah angin agar energi yang ditangkap tetap optimal. Anemometer berfungsi untuk mengukur kecepatan angin.



Gambar 3. Konfigurasi Komponen Turbin Angin Dalam Nacelle (Sumber: Rogowsky dkk., 2009)

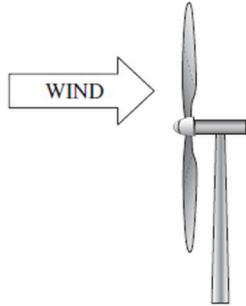
Sistem transmisi (gearbox) berfungsi untuk menaikkan putaran poros penggerak generator. Pada kecepatan rendah, putaran poros rotor diteruskan ke sistem transmisi, sedangkan pada putaran tinggi jika kecepatan angin tinggi langsung diteruskan ke generator. Ada beberapa jenis generator yang mampu beroperasi pada putaran input rendah, sehingga turbin yang menggunakan generator jenis ini tidak memerlukan sistem transmisi.

Generator berfungsi mengkonversi energi mekanik putaran sudu dan poros menjadi energi listrik. Sistem turbin angin umumnya menggunakan generator AC, namun turbin dengan desain yang berbeda bisa menggunakan generator DC.

Menara (tower) digunakan untuk menempatkan sudu turbin di tempat yang tinggi dimana kecepatan angin lebih tinggi karena hambatan yang lebih rendah sehubungan dengan tidak adanya obyek-obyek yang menghalangi. Menara umumnya dibuat dari kolom baja bulat dengan diameter dan tinggi yang bervariasi tergantung pada geometri sudu dan nasek.

Analisis Konversi Energi

Turbin angin menghasilkan listrik dengan memanfaatkan energi angin untuk memutar generator. Angin bergerak melewati sudu turbin, menghasilkan daya angkat (lift) dan gaya putar yang menggerakkan sudu turbin seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Turbin Angin Sumbu Horizontal (Sumber Anaya-Lara dkk., 2009)

Selanjutnya putaran sudu diteruskan ke poros rotor menuju sistem transmisi yang menaikkan putaran ke putaran yang sesuai dengan yang diperlukan generator serta meneruskannya ke generator. Di dalam generator medan magnet akan mengkonversi energy putaran menjadi energi listrik.

Turbin angin mengekstraksi energy kinetic dari luasan sapuan sudu. Daya aliran udara merupakan daya total yang ditangkap oleh turbin angin (persamaan 1), namun tidak seluruhnya dapat dikonversi menjadi energi listrik dan dikurangi oleh faktor koefisien daya turbin angin (C_p).

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

dimana,

- P_{air} = daya total (watt)
- ρ = densitas udara ($1,225 \text{ kg/m}^3$)
- A = luas sapuan sudu (m^2)
- v = kecepatan angin (m/s)

Dasar-dasar Elektrikal pada Turbin Angin

Listrik berkaitan dengan muatan partikel atom dan gerakannya. Partikel tersebut adalah elektron yang membawa muatan listrik dari kutub negatif ke kutub positif. Kuat arus listrik adalah kecepatan aliran muatan elektron melalui penghantar. Muatan listrik diukur dalam satuan coulomb dan kuat arus listrik diukur dalam satuan ampere (A).

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \text{ Ampere} \quad (2)$$

Tegangan adalah energi yang diperlukan untuk menggerakkan muatan. Energi potensial (PE) untuk menggerakkan muatan listrik, dibagi muatan listrik disebut beda potensial (beda tegangan) dan dinyatakan dalam satuan volt.

$$V = \frac{PE}{q}, \text{ Volt} \quad (3)$$

Daya dalam suatu rangkaian listrik adalah beda potensial dikalikan dengan kuat arus listrik.

$$P = V \cdot I, \text{ Watt} \quad (4)$$

METODOLOGI PENELITIAN

Konstruksi turbin angin menggunakan kombinasi elemen hasil permesinan dengan barang bekas. Sudu turbin berasal dari sudu kipas angin berdiameter 350 mm dengan 5 bilah sudu yang terbuat dari polimer. Poros rotor langsung disambungkan dengan generator yang dimodifikasi dari motor kipas. Rotor dipasang pada palang penyangga di atas nasel, dan pada bagian belakangnya dipasang sayap penyeimbang dari lembaran polimer. Generator disambungkan dengan batere dan inverter yang selanjutnya dihubungkan dengan beban listrik.

Peralatan yang digunakan untuk pengujian adalah fan, anemometer, voltmeter dan amperemeter. Pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan temperatur yang dijaga konstan. Angin masukan disuplai dari sebuah fan besar dan dilengkapi dengan pengatur kecepatan. Kecepatan angin diukur dengan menggunakan anemometer, sedangkan daya output dihitung dari listrik yang dihasilkan dengan pengukuran tegangan dan arus yang dihasilkan untuk menyalakan beban lampu.

PEMBAHASAN

Data yang diperoleh dari pengujian dan hasil perhitungan daya disajikan pada Tabel 1. Pengambilan data dilakukan pada temperatur ruangan 20°C . Daya total dihitung secara teoritis berdasarkan kecepatan angin, sedangkan daya aktual dihitung dari output listrik yang dihasilkan.

Tabel 1. Data Pengukuran dan Analisa

Kecepatan Angin m/s	Tegangan output volt	Kuat Arus Output mA
3.50	12.00	60.00
4.00	12.00	80.00
4.80	12.00	110.00
5.40	12.00	180.00

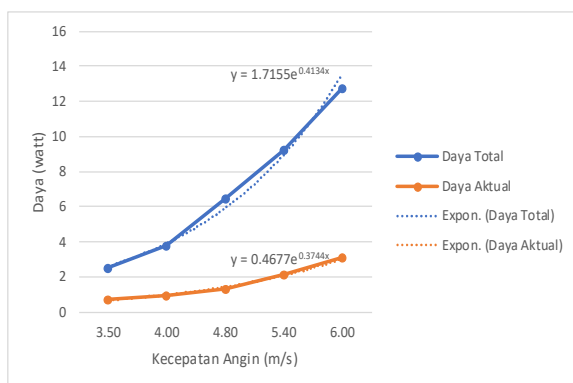
Kecepatan Angin	Tegangan output	Kuat Arus Output
6.00	12.00	260.00

Tabel 2. Hasil Perhitungan Daya Total, Daya Aktual dan Efisiensi

Kecepatan Angin m/s	Daya Total Watt	Daya Aktual Watt	Efisiensi %
3.50	2.5263	0.72	28.50
4.00	3.7710	0.96	25.46
4.80	6.5164	1.32	20.26
5.40	9.2782	2.16	23.28
6.00	12.7273	3.12	24.51

Efisiensi turbin dan generator berkisar antara 20,26 % sampai 28,5 %, dengan efisiensi rata-rata 24,4 %. Nilai efisiensi ini adalah kombinasi efisiensi generator dengan koefisien daya turbin angin. Tetapi nilai efisiensi ini belum bisa dikomparasi, karena jenis sudu yang digunakan tidak termasuk dalam salah satu jenis dalam klasifikasi turbin yang umum. Sudu turbin merupakan kombinasi antara sudu berkecepatan tinggi dengan tipe Amerika yang memiliki jumlah bilah banyak.

Diagram hubungan daya total dan daya aktual disajikan pada Gambar 5. Secara teoritis nilai daya total berbanding lurus eksponensial terhadap kecepatan angin. Gejala yang sama terjadi pada daya aktual, tetapi dengan kemiringan yang lebih landai.



Gambar 5. Diagram Daya vs Kecepatan Angin

PENUTUP

Perencanaan dan konstruksi turbin angin menghasilkan peralatan pembangkit listrik yang mampu bekerja dengan daya output mencapai 3,12 Watt pada kecepatan angin 6 m/s. Daya aktual yang dihasilkan memiliki trend kenaikan mengikuti kenaikan kecepatan angin dengan persamaan $P_{akt} = 0,4677 e^{0,3744V}$. Efisiensi turbin angin dan generator rata-rata mencapai 24,4%.

DAFTAR PUSTAKA

- Abolute, A., & Zhou, A., 2017, A Preliminary Analysis of Wind Turbine Energy Yield, *Energy Procedia*, Vol. 138, pp. 423 – 428.
- Adam, M., Harahap, M., & Nasution, M.R., 2019, Analisa Pengaruh Perubahan Kecepatan Angin pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) terhadap Daya yang Dihasilkan Generator Dc, RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): *Jurnal Teknik Elektro*, Vol. 2, No. 1, ISSN 2622 – 7002, pp. 30 – 36.
- Anaya-Lara, O., Jenkins, N., Ekanayake, J., Cartwright, P., & Hughes, M., 2009, *Wind Energy Generation : Modelling and Control*, John Wiley and Sons, Ltd., West Sussex.
- Biadgo, A. M., & Aynekulu, G., 2017, Aerodynamics Design of Horizontal Axis Wind Turbine Blades, *FME Transactions*, Vol. 45, pp. 647 – 660.
- Cianetti, F., Cetrini, A., Becchetti, M., Castellani, F., & Braccisi, C., 2018, Dynamics Modeling of Wind Turbines. Experimental Turning of a Multibody Model, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 8, pp. 56 – 66.
- El Mouhsine, S., Oukassou, K., Ichenial, M. M., Kharbouch, B., & Hajraoui, A., 2018, Aerodynamics and Structural Analysis of Wind Turbine Blade, *Procedia Manufacturing*, Vol. 22, Pp. 747 -756.
- Mamanpush, S. H., Tabatabaei, A. T., Li, H., & Englund, K., 2018, Data on Mechanical Properties of Recycled Wind Turbine Blade Composites, *Data in Brief*, Vol. 19, pp. 230 – 235.
- Manikandan, N., & Stalin, B., 2013, Design of NACA63215 Airfoil for a Wind Turbine, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, Vol. 10, pp. 18 – 26.

- Nelson, V., 2009, Wind Energy : Renewable Energy and the Environment, CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL 33487-2742.
- Rodrigues, R. V., & Rossi, L. A., 2016, Performance of Small Wind Turbines: Simulation of Electricity Supply to Load Connected to the Public or Isolated Grid, Journal of The Brazilian Association of Agricultural Engineering, Vol. 36, pp. 281 – 290.
- Rogowsky, R.A., Laney-Cummings, K., David, A.S., Reed, M., & Anderson, M., 2009, Wind Turbine Industry and Trade Summary, Secretary to the Commission United States International Trade Commission Washington, DC 20436.
- Wood, D., 2011, Small Wind Turbines : Analysis, Design, and Application, Springer Verlag London Ltd., London.