

PENGARUH VARIASI DAYA TURBIN ANGIN TERHADAP EFISIENSI DAYA GENERATOR

**Siti Chalimah^a, Ramadhani Setyobudi, Amajida Sadrina, M Hendra Budi Satria,
Tria Puspa Sari**

^aTeknik Mesin, Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur

*Email Korespondensi: tria.puspa.tm@upnjatim.ac.id

[Phone: 089508266298](tel:089508266298)

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi daya turbin terhadap efisiensi daya generator. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi daya turbin dan daya generator yang diperoleh dari pengamatan langsung pada berbagai kondisi operasional. Analisis dilakukan dengan memeriksa korelasi antara daya turbin dan daya generator serta menghitung efisiensi daya generator pada berbagai tingkat daya turbin. Selain itu, efisiensi daya generator dihitung dengan membandingkan daya keluaran generator dengan daya masukan dari turbin. Hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi daya generator bervariasi sesuai dengan perubahan daya turbin, dengan beberapa nilai menunjukkan efisiensi yang sangat tinggi pada daya turbin tertentu. Dalam penelitian ini, daya turbin bervariasi dari 0,3374 W hingga 1,7833 W, sementara daya generator yang dihasilkan bervariasi dari 0,2452 W hingga 1,6332 W. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat hubungan linier yang signifikan antara daya turbin dan daya generator, yang dapat diwakili oleh persamaan linier sederhana. Temuan ini memberikan wawasan penting bagi pengoptimalan kinerja sistem pembangkit listrik berbasis turbin, serta dapat menjadi acuan dalam desain dan operasi pembangkit listrik untuk mencapai efisiensi energi yang lebih tinggi.

Keywords: Daya turbin, daya generator, efisiensi

1. PENDAHULUAN

Dunia saat ini menghadapi tantangan besar terkait perubahan iklim dan penurunan cadangan sumber energi fosil. Perubahan iklim yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca dari pembakaran bahan bakar fosil memperburuk efek cuaca ekstrem dan merusak lingkungan. Selain itu, penurunan sumber energi fosil, seperti minyak, gas, dan batubara, menyebabkan kekhawatiran tentang ketersediaan energi di masa depan. Untuk mengatasi masalah ini, ada kebutuhan mendesak untuk mencari solusi energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi angin banyak mendapat perhatian sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia [1]. Energi angin sangat cocok untuk dikembangkan di Indonesia. Indonesia memiliki kecepatan angin yang bervariasi antara 2 m/s hingga 6 m/s, yang memungkinkan pengoperasian pembangkit listrik tenaga angin berskala kecil hingga menengah. Indonesia mampu menghasilkan energi angin sekitar 978 MW, dengan potensi kecepatan angin rata-rata berkisar antara 3 m/s hingga 7 m/s tergantung pada lokasinya [2].

Turbin angin menjadi perangkat utama dalam konversi energi angin menjadi energi listrik. Turbin angin mengalami berbagai inovasi dan perkembangan teknologi untuk meningkatkan efisiensi. Turbin angin dapat diklasifikasikan dalam dua kategori yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal [3]. Meskipun turbin angin sumbu horizontal lebih lama digunakan dalam aplikasi skala besar, namun turbin angin sumbu vertikal mulai mendapatkan perhatian karena keunggulannya dalam kondisi angin yang bervariasi dan kemudahan instalasi. Aspek penting dari desain turbin angin poros vertikal ini adalah interaksi antara daya yang dihasilkan oleh turbin dan efisiensi daya generator dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Turbin angin sumbu vertikal dengan tipe Savonius terbukti efisien dalam memanfaatkan energi angin, terutama dalam kondisi angin yang memiliki kecepatan yang rendah. Desainnya memungkinkan untuk menghasilkan torsi yang besar [4].

Variasi daya turbin angin dipengaruhi oleh beberapa faktor kunci yang mempengaruhi kinerja dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Salah satu faktor utama adalah desain bilah (blade) turbin. Desain bilah yang mencakup bentuk, panjang, ketebalan, dan sudut kelengkungan, menentukan seberapa efektif bilah dapat menangkap energi angin. Bilah yang dirancang dengan baik dapat memaksimalkan aliran angin dan mengoptimalkan konversi energi mekanik menjadi daya rotasi yang lebih tinggi. Kecepatan angin juga berperan penting dalam variasi daya turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin angin sebanding dengan kecepatan angin yang diterima; semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar daya yang dihasilkan. Namun, turbin angin memiliki batasan kecepatan angin maksimum dan minimum di mana mereka dapat beroperasi

dengan efisien. Pada kecepatan angin di luar batas ini, efisiensi daya turbin bisa menurun, atau turbin bahkan bisa mengalami kerusakan. Konfigurasi sistem meliputi cara turbin, generator, dan komponen lainnya terintegrasi dan bekerja bersama. Misalnya, sistem transmisi dan pengaturan sudut bilah yang tepat dapat mempengaruhi seberapa baik daya mekanik dari turbin dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi daya yang dihasilkan oleh turbin angin poros vertikal terhadap efisiensi daya generator. Dalam konteks ini, efisiensi daya generator menjadi indikator utama dari seberapa efektif energi angin dikonversi menjadi energi listrik. Studi ini akan menganalisis hubungan antara output daya turbin angin dan efisiensi daya generator melalui berbagai pengujian dengan kondisi angin yang berbeda-beda. Dengan melakukan analisis terhadap pengaruh variasi daya turbin terhadap efisiensi generator, diharapkan dapat ditemukan strategi untuk meningkatkan efisiensi konversi energi angin dan memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi turbin angin yang lebih efektif dan efisien.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini menggunakan dua pendekatan utama, yaitu analisis eksperimental terhadap turbin angin sumbu vertikal dan studi literatur. Pendekatan eksperimental dilakukan dengan menggunakan turbin angin sumbu vertikal yang telah dirancang dan didesain secara khusus untuk pengujian ini. Turbin tersebut dibuat dari bahan polyvinyl chloride (PVC) dengan ketebalan dan sudut kelengkungan tertentu, disesuaikan dengan parameter yang diharapkan mampu mengoptimalkan kinerja dalam kondisi kecepatan angin yang bervariasi. Eksperimen ini bertujuan untuk mengukur berbagai parameter kinerja, seperti putaran poros, tegangan, arus listrik, dan efisiensi sistem, dengan tujuan utama mengevaluasi sejauh mana turbin mampu mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Setiap data yang dihasilkan dari pengujian ini dianalisis secara mendalam untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja turbin, baik dari segi mekanis maupun listrik.

Kemudian sebagai pelengkap dari pendekatan eksperimental, penelitian ini juga melakukan studi literatur yang berfungsi untuk memperkaya landasan teoritis dan memberikan konteks terhadap hasil eksperimen. Studi literatur ini mencakup tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang relevan, baik mengenai desain turbin angin sumbu vertikal, material yang digunakan, serta metode pengujian yang telah dilakukan oleh para peneliti lain. Dengan memadukan hasil eksperimen langsung dengan hasil studi literatur, penelitian ini tidak hanya berfokus pada data empiris, tetapi juga memberikan wawasan yang lebih luas terkait perkembangan teknologi turbin angin. Studi literatur ini juga membantu dalam mengkaji kesesuaian hasil penelitian dengan teori-teori yang ada, serta memberikan peluang untuk mengidentifikasi potensi inovasi dan perbaikan dalam desain serta performa turbin angin di masa depan.



Gambar 1 Desain Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Savonius yang Digunakan Dalam Metode Eksperimental

Turbin angin sumbu vertikal dibangun dengan bahan bilah dari PVC dengan ketebalan bilah 3 mm dan sudut kelengkungan 110° . Untuk poros turbin angin sumbu vertikal menggunakan poros aluminium dengan diameter 8 mm dengan tinggi 600 mm dan poros generator menggunakan poros aluminium ukuran 6 mm dengan tinggi 100 mm. Sedangkan gear yang digunakan adalah *timing belt* tipe GT2 M6-280 mm. Generator atau dinamo untuk turbin angin poros vertikal menggunakan ukuran 24V.

Menentukan luas penampang baling-baling turbin angin dengan diameter turbin (D) adalah 0,5 meter, jari-jari turbin (R) adalah 0,25 meter, dan diameter dalam turbin (d) adalah 0,3 meter. Nilai $0,1 d$ sama dengan 0,03 meter, sementara $0,4 d$ adalah 12 meter, dan $0,42 d$ atau r adalah 0,126 meter. Tinggi turbin diketahui sebesar 0,5 meter, dengan derajat kelengkungan turbin sebesar 110° . Untuk menghitung panjang sisi lengkung turbin, rumus yang digunakan adalah $2\pi(110^\circ/360^\circ) \times 0,42 d$. Dengan substitusi nilai, panjang sisi lengkungnya adalah $2\pi(110^\circ/360^\circ) \times 0,126$ m, sehingga diperoleh panjang sisi lengkung sebesar 0,24178 meter. Panjang sisi keseluruhan kemudian dihitung dengan menjumlahkan panjang sisi lengkung dan $0,42 d$, yaitu 0,24178

meter + 0,126 meter, yang menghasilkan panjang sisi keseluruhan sebesar 0,36178 meter. Selanjutnya, luas penampang (A) dihitung dengan mengalikan panjang sisi keseluruhan dengan tinggi turbin, yaitu $A = 0,36178 \text{ meter} \times 0,5 \text{ meter}$, sehingga luas penampang yang diperoleh adalah 0,18089 meter persegi.

2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah perangkat yang mekanisme kerjanya memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik. Di negara-negara maju, turbin angin digunakan sebagai pembangkit listrik utama. Turbin angin yang digunakan di sana mampu untuk menghasilkan kapasitas listrik yang sangat tinggi dan dapat memenuhi kebutuhan energi dalam skala besar [3]. Komponen utama turbin angin terdiri dari bilah, poros, gear box, generator, dan beban [1].

2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal merupakan turbin angin di mana gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, hal itu memungkinkan rotor berputar dari segala arah angin. Karena desain ini turbin angin sumbu vertikal memiliki beberapa karakteristik unik dan keunggulan dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuan untuk menangkap angin dari segala arah tanpa perlu mekanisme tambahan untuk mengarahkan turbin ke arah angin. Turbin angin sumbu vertikal memiliki tiga tipe rotor yaitu Savonius, Darrieus, dan H rotor [5].

2.3 Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Savonius

Turbin angin tipe Savonius merupakan perangkat yang digunakan untuk mengonversi energi angin menjadi energi gerak melalui poros vertikal. Memiliki desain yang sederhana membuatnya mudah untuk diproduksi dan diimplementasikan. Secara umum, turbin angin Savonius memiliki desain yang terdiri dari dua setengah silinder yang dipindahkan sedikit sehingga membentuk huruf 'S'. Desain ini memungkinkan bilah turbin untuk menangkap angin secara optimal dengan memanfaatkan gaya drag yang dihasilkan saat angin melewati bilah-bilah turbin. Ketika angin menerpa satu sisi bilah, bilah akan didorong ke belakang sementara sisi lainnya memberikan resistansi minimal, sehingga rotor akan berputar [6].

2.4 SKEA

SKEA atau Sistem Konversi Energi Angin merupakan sistem yang dirancang untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Sistem ini melibatkan beberapa komponen utama yang bekerja sama untuk menangkap energi angin, mengubahnya menjadi gerakan mekanik, dan mengonversinya menjadi energi mekanik [7]. Komponen-komponen yang digunakan adalah:

1. Turbin Angin
Dirancang khusus untuk menangkap energi kinetik angin, turbin angin memiliki bilah-bilah yang dipasang pada poros. Ketika angin bertiup, bilah-bilah tersebut akan berputar dan mengubah energi angin menjadi energi gerak [8].
2. Poros
Poros memiliki fungsi untuk mentransfer energi kinetik dari putaran turbin angin ke mekanisme penggerak yang terhubung [8].
3. Mekanisme Penggerak
Mekanisme penggerak bertugas untuk mengubah gerakan putaran poros menjadi gerakan yang dapat diarahkan ke generator. Hal ini dapat melibatkan penggunaan gear atau *belt* dalam mengubah putaran menjadi gerakan linier [8].
4. Generator
Generator merupakan alat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pada umumnya, generator terdiri dari kumparan kawat yang berputar di dalam medan magnet. Ketika kumparan kawat berputar, maka akan menghasilkan arus listrik melalui induksi elektromagnetik [8].
5. Sistem Penyimpanan Energi
Untuk menjaga konsistensi dan kestabilan daya yang dihasilkan, energi listrik yang dihasilkan oleh generator dapat disimpan dalam baterai atau sistem penyimpanan energi lainnya, sehingga dapat digunakan ketika angin tidak cukup kencang untuk memutar turbin.

2.5 Perhitungan

1. Daya angin
Energi yang terdapat pada angin adalah energi kinetik, yaitu energi yang dimiliki oleh angin karena gerakannya. Energi kinetik ditangkap oleh turbin angin yang kemudian digunakan untuk memutar rotor turbin [9].
$$W = \frac{1}{2} V^2 \rho A V \tag{1}$$
2. Daya turbin

Daya turbin angin merupakan energi yang dihasilkan oleh rotor turbin akibat dari interaksinya dengan hembusan angin. Daya yang dihasilkan oleh turbin angin tidak sama dengan daya total yang dimiliki angin. Hal ini disebabkan oleh adanya koefisien daya yang menjadi presentase dari energi angin yang dapat diubah menjadi energi mekanik oleh turbin[9].

$$P = C_p \cdot W \quad (2)$$

3. Daya generator

Daya generator merupakan jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh generator per satuan waktu. Generator bekerja dengan mengubah energi mekanik, yang biasanya diperoleh dari sumber eksternal seperti turbin angin, menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Generator menghasilkan listrik dengan tegangan bolak-balik [10].

$$P_g = V \times I \quad (3)$$

2.6 Proses Pengujian dan Pengambilan Data

Berikut merupakan proses pengujian dan pengambilan data pada turbin angin poros vertikal:

1. Memilih lokasi pengujian
Lokasi pengujian dilakukan di area terbuka yang memiliki kecepatan angin yang memadai. Lokasi yang ideal adalah tempat dengan sedikit penghalang sehingga aliran angin dapat diukur dengan lebih akurat dan maksimal. Pada proses pengujian turbin angin poros vertikal ini lokasi pengujian dilakukan di lapangan terbuka.
2. Melakukan pengukuran angin
Pada proses pengujian turbin angin poros vertikal kecepatan angin harus diukur. Pengukuran kecepatan angin dilakukan dengan menggunakan anemometer. Setelah dilakukan pengukuran maka mencatat kecepatan angin.
3. Melakukan pengukuran kinerja turbin angin
Proses pengukuran putaran poros turbin angin poros vertikal menggunakan tachometer. Kemudian menggunakan multimeter atau voltmeter untuk mengukur tegangan (V) dan arus listrik (A) yang dihasilkan selama proses pengujian. Setelah itu mencatat data yang telah diperoleh.
4. Indikator kerja turbin
Memasang lampu sebagai indikator visual untuk menunjukkan bahwa turbin menghasilkan aliran listrik. Lampu akan menyala ketika generator turbin menghasilkan listrik yang cukup untuk mengalirkan ke lampu.
5. Proses pengumpulan data
Proses pengumpulan data dilakukan secara sistematis dan berulang. Data yang dikumpulkan untuk dapat mencakup kecepatan angin, putaran poros turbin, tegangan, arus, serta daya listrik yang dihasilkan.

3. HASIL DAN DISKUSI

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap turbin angin sumbu vertikal yang menggunakan bilah berbahan polyvinyl chloride (PVC) dengan ketebalan 3 mm dan sudut kelengkungan 110°. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja turbin pada berbagai kecepatan angin, dengan parameter-parameter yang diamati meliputi kecepatan angin, putaran poros (RPM), tegangan (V), dan arus (I). Dari data pengujian, terlihat bahwa pada kecepatan angin 3 m/s, putaran poros mencapai 55 RPM dengan tegangan 0,4 V dan arus 0,613 A. Seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, terjadi peningkatan signifikan pada putaran poros dan parameter-parameter listrik lainnya. Pada kecepatan angin 4,5 m/s, putaran poros mencapai 129,2 RPM dengan tegangan 1,315 V dan arus 1,242 A, menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar daya yang dihasilkan oleh turbin. Berikut ini adalah data yang didapat dari pengujian:

Tabel 1 Data Pengujian

Kecepatan angin (m/s)	Putaran Poros (RPM)	Tegangan (V)	Arus (I)
3	55	0,4	0,613
3,1	74,7	0,521	0,696
3,3	89	0,425	0,63
3,5	98,2	0,933	0,979
3,7	103,8	0,513	0,69
3,9	105,7	1,044	1,055
4,1	117,2	0,619	0,763
4,3	120,4	1,215	1,163

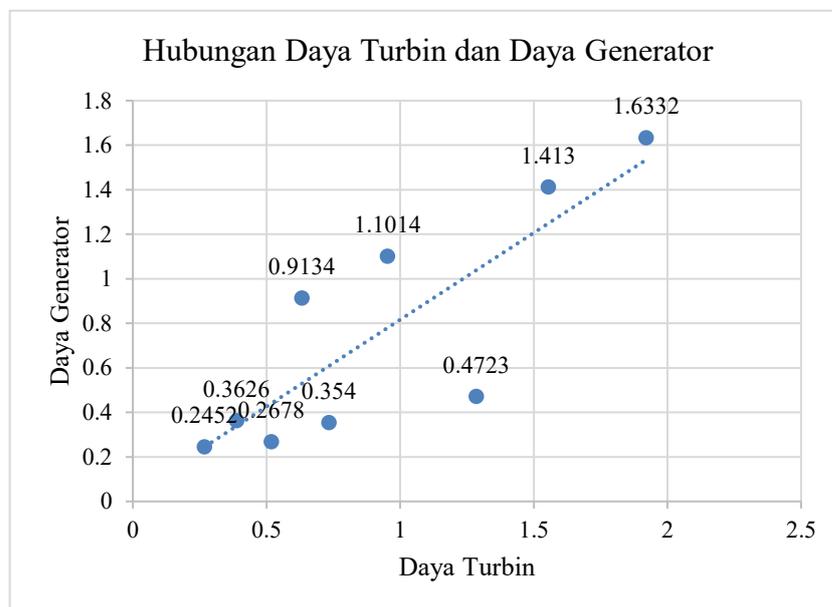
4,5	129,2	1,315	1,242
-----	-------	-------	-------

Pengolahan data lebih lanjut menunjukkan hubungan antara daya angin, torsi, koefisien daya, daya turbin, daya generator, dan efisiensi sistem. Pada kecepatan angin rendah dengan daya angin 2,8449 W, efisiensi sistem tercatat 9,4%, dengan daya turbin sebesar 0,2685 W dan daya generator 0,2452 W. Namun, saat daya angin meningkat menjadi 9,6017 W, efisiensi sistem juga meningkat signifikan hingga 20%, dengan daya turbin mencapai 1,9201 W dan daya generator 1,6332 W. Hal ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, sistem turbin angin bekerja lebih efisien dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik, ditunjukkan oleh peningkatan efisiensi, torsi, dan koefisien daya seiring bertambahnya kecepatan angin. Dari hasil pengolahan data, turbin angin sumbu vertical yang diuji ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2 Data Hasil Pengolahan

Daya angin (W)	Torsi (Nm)	Koefisien daya	Daya turbin (P)	Daya generator (P _g)	Efisiensi (%)
2,8449	0,0467	0,0944	0,2685	0,2452	9,4%
3,1390	0,0496	0,1236	0,3880	0,3626	12,4%
3,7866	0,0556	0,1368	0,5181	0,2678	13,7%
4,5177	0,0616	0,1401	0,6330	0,9134	14,0%
5,3372	0,0676	0,1375	0,7340	0,3540	13,8%
6,2503	0,0862	0,1525	0,9532	1,1014	15,3%
7,2621	0,1048	0,1770	1,2855	0,4723	17,7%
8,3775	0,1234	0,1856	1,5549	1,4130	18,6%
9,6017	0,1420	0,2000	1,9201	1,6332	20,0%

3.1 Hubungan Antara Daya Turbin dan Daya Generator

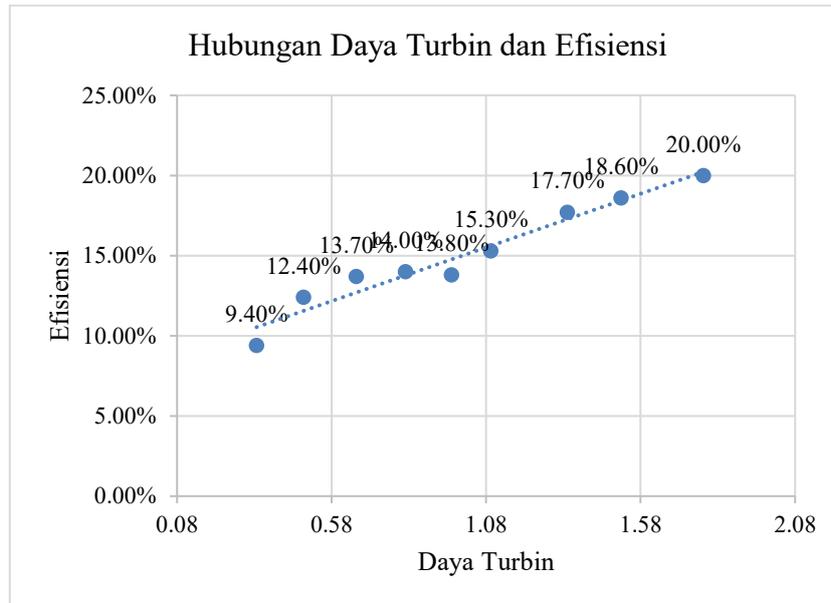


Gambar 2 Grafik daya turbin vs daya generator

Grafik menunjukkan bahwa ada korelasi langsung antara peningkatan daya turbin dan peningkatan daya generator. Saat daya turbin meningkat, maka daya yang dihasilkan oleh generator juga mengalami peningkatan, yang menunjukkan bahwa sebagian besar energi mekanik dari turbin diubah menjadi energi listrik oleh generator. Sebagai contoh ketika daya turbin mencapai 0,3374, daya generator tercatat sebesar 0,2452, dan saat daya turbin meningkat menjadi 1,7833 W, maka daya generator juga meningkat menjadi 1,6332 W. Ini mengindikasikan bahwa generator memiliki kemampuan konversi energi yang baik, meskipun tidak sempurna, karena ada faktor efisiensi yang berperan dalam proses tersebut.

Namun, pada titik tertentu, grafik menunjukkan adanya penurunan daya generator, seperti yang terlihat pada data ke-5 dan ke-7, meskipun daya turbin tidak mengalami penurunan yang signifikan. Hal ini dapat terjadi karena adanya kehilangan energi akibat gesekan di bagian-bagian yang bergerak seperti rotor dan poros, yang menyebabkan konversi energi mekanik ke energi listrik menjadi kurang efisien. Selain itu, generator memiliki efisiensi yang kurang dari 100%, yang berarti tidak semua energi mekanik dapat diubah menjadi energi listrik sepenuhnya. Kehilangan energi lainnya juga dapat terjadi diakibatkan oleh resistensi listrik di dalam kumparan generator, yang menyebabkan sebagian energi hilang dalam bentuk panas.

3.2 Hubungan Antara Daya Turbin dan Efisiensi

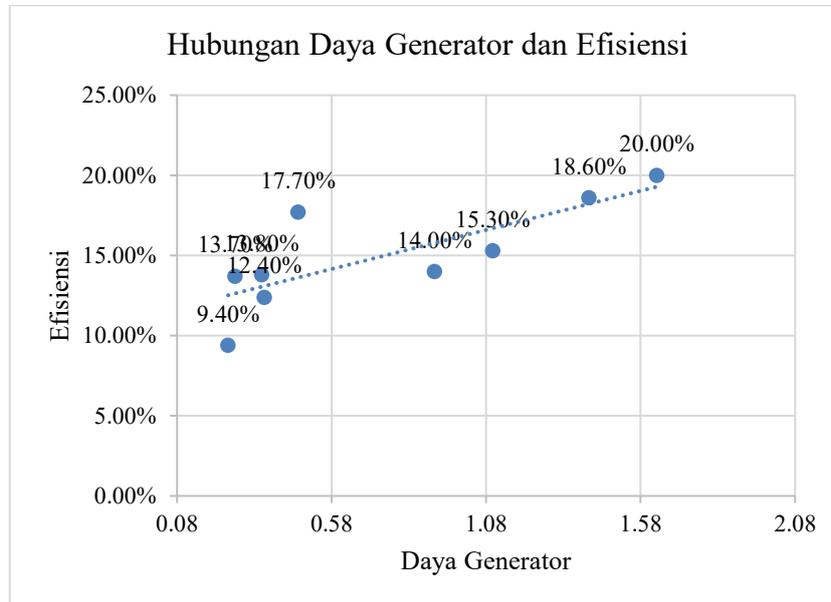


Gambar 3 Grafik daya turbin vs efisiensi

Dari gambar di atas, terlihat bahwa pada titik tertentu, sistem mencapai efisiensi yang cukup tinggi, seperti ketika daya angin mencapai 4,6534 W, daya turbin yang dihasilkan adalah 0,8199 W, dengan efisiensi sistem sebesar 18%. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang optimal dan kondisi operasional yang sesuai, turbin dan generator mampu bekerja secara efisien dalam mengonversi energi angin menjadi energi mekanik dan kemudian menjadi energi listrik. Efisiensi yang tinggi ini menandakan bahwa semakin besar daya angin yang diterima, semakin baik pula kinerja sistem dalam menghasilkan listrik, meskipun efisiensi masih jauh dari 100%.

Sebaliknya, pada kondisi angin yang lebih lemah, seperti pada daya angin sebesar 2,9304 W, daya turbin hanya mencapai 0,3374 W, dengan efisiensi sistem yang menurun menjadi 12%. Penurunan efisiensi ini mengindikasikan bahwa dalam kondisi angin yang lebih rendah, turbin dan generator kurang efektif dalam mengubah energi angin menjadi listrik. Faktor-faktor seperti kecepatan angin yang tidak mencukupi, gesekan pada komponen turbin, dan karakteristik generator itu sendiri turut mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan. Ini menunjukkan bahwa kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh daya angin, dan pada kecepatan angin yang lebih rendah, sistem bekerja kurang optimal.

3.3 Hubungan Antara Daya Generator dan Efisiensi



Gambar 4 Grafik daya generator vs efisiensi

Dari gambar di atas, terlihat bahwa pada titik tertentu, seperti ketika daya angin mencapai 4,6534 W, daya yang dihasilkan oleh generator adalah 0,9134 W, dengan efisiensi sistem mencapai 18%. Ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin dan kondisi operasional tersebut, sistem turbin dan generator mampu bekerja dengan efisiensi tinggi dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Efisiensi ini mengindikasikan bahwa semakin besar daya angin yang diterima, semakin besar pula energi yang dapat dikonversi oleh generator menjadi listrik, mencerminkan performa optimal dari sistem.

Sebaliknya, pada daya angin yang lebih rendah, seperti 2,9304 W, daya yang dihasilkan oleh generator hanya sebesar 0,2452 W dengan efisiensi yang turun menjadi 12%. Hal ini menandakan bahwa pada kondisi angin yang lebih lemah, turbin dan generator kurang efisien dalam mengubah energi angin menjadi listrik. Penurunan efisiensi ini bisa disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk gesekan pada komponen turbin serta ketidakmampuan sistem untuk mengonversi energi angin dengan optimal pada kecepatan yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa efisiensi sistem sangat bergantung pada kecepatan angin, di mana kinerja generator menurun saat angin melemah.

4. KESIMPULAN

- Hubungan antara daya turbin dan daya generator dalam sistem pembangkit listrik turbin angin sangat erat, karena daya yang dihasilkan oleh generator secara langsung bergantung pada daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Daya mekanik ini diperoleh dari konversi energi kinetik angin yang mendorong bilah turbin, dan kemudian ditransfer ke generator untuk diubah menjadi energi listrik. Efisiensi keseluruhan sistem sangat dipengaruhi oleh seberapa baik generator dapat mengonversi daya mekanik ini menjadi daya listrik. Jika daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin tinggi, namun generator tidak bekerja secara efisien, maka daya listrik yang dihasilkan akan tetap rendah. Oleh karena itu, efisiensi konversi antara turbin dan generator adalah kunci dalam menentukan seberapa optimal sistem dapat bekerja.
- Optimisasi desain turbin menjadi salah satu langkah penting untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem. Desain yang baik dapat meningkatkan koefisien daya turbin, yaitu seberapa banyak energi angin yang dapat diambil dan diubah menjadi daya mekanik. Selain itu, peningkatan efisiensi generator, misalnya dengan mengurangi kerugian akibat gesekan, resistansi, atau panas, juga akan berdampak langsung pada peningkatan daya listrik yang dihasilkan. Analisis ini menekankan pentingnya memahami interaksi antara berbagai komponen dalam sistem turbin angin, seperti turbin,

poros, dan generator. Dengan demikian, desain dan pengelolaan komponen yang tepat tidak hanya akan meningkatkan efisiensi energi tetapi juga memaksimalkan potensi daya listrik yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik tenaga angin.

- c. Efisiensi sistem pembangkit listrik turbin angin sangat dipengaruhi oleh daya turbin dan daya generator. Peningkatan daya turbin umumnya meningkatkan daya generator, dan efisiensi sistem mencapai nilai tertinggi pada daya turbin yang lebih tinggi, dengan efisiensi maksimum tercatat sekitar 20%. Untuk mencapai efisiensi optimal, penting untuk merancang dan mengoperasikan turbin dan generator dalam kondisi yang sesuai dengan karakteristik angin setempat serta kapasitas sistem konversi energi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. D. Octari, “Analisis Pemanfaatan Energi Angin sebagai Pembangkit Listrik Alternatif pada Turbin Angin Sumbu Vertikal dan Horizontal,” vol. 8, pp. 23497–23502, 2024.
- [2] M. Ridwan, R. Nuhasanah, and T. Atmajaya, “Uji Kinerja Hubungan Variasi Bilah terhadap Daya Turbin Angin Pada Sumbu Horizontal,” *J. Pendidik. Tambusai*, vol. 6, pp. 1–5, 2022, [Online]. Available: <https://www.jptam.org/index.php/jptam/article/view/5053>
- [3] E. R and S. R, “PROSES MANUFAKTUR TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL TIPE DARRIEUS,” *Сахарный Диабет*, vol. 22, no. 4, pp. 1–6, 2019.
- [4] S. S. Putri, Sudarti, and Yushardi, “Analisis Cara Kerja Turbin Angin Sumbu Vertikal,” *J. Pendidikan, Sains Dan Teknol.*, vol. 2, no. 4, pp. 2021–2023, 2023.
- [5] M. Usman, Kadaryono, M. D. Hariska, and M. Ali, “Perencanaan Lampu Penerangan Jalan Menggunakan Turbin Angin Sumbu Vertikal Savonius,” *J. FORTECH*, pp. 99–105, 2023.
- [6] I. Arif, “Analisis Dan Pengujian Kinerja Turbin Angin Savonius 4 Sudu,” *J. Tek. Mesin ITI*, vol. 3, no. 2, p. 46, 2019, doi: 10.31543/jtm.v3i2.307.
- [7] P. Siagian and Fahreza, “Rekayasa Penanggulangan Fluktuasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dengan Vehicle to Grid (V2G),” *Semin. Nas. Teknol. Komput. Sains*, pp. 356–361, 2020, [Online]. Available: <https://prosiding.seminar-id.com/index.php/sainteks>
- [8] D. Tsusayya, S. Saputra, and B. Eriyanto, “Konversi Energi Angin: Investigasi Komprehensif terhadap Teknologi Turbin Angin,” *J. Ilm. Multidisiplin*, vol. 1, no. 12, pp. 277–280, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10436936>
- [9] M. A. G. Hutabarat, “2024 Madani : Jurnal Ilmiah Multidisiplin Analisa Kemiringan Sudut Tiga Bilah dan Empat Bilah Pada Turbin Angin Hawt 2024 Madani : Jurnal Ilmiah Multidisiplin,” vol. 2, no. 7, pp. 136–148, 2024.
- [10] Gunawan, “Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Pembaruan Menggunakan Tenaga Generator Ac,” *MeSTeRI*, vol. 1, no. 1, pp. 33–40, 2022.