

PENGARUH PERBANDINGAN DIAMETER PUTARAN PULLY TERHADAP DAYA LISTRIK YANG DIHASILKAN ALTERNATOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

The Effect of Pulley Diameter Ratio on the Electrical Power Generated by the Alternator in a Wind Power Generator

Mimin Rihotimawati^{1*}, Surianto², Ali Akbar Bayu Aradia³

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Dosen Prodi. Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda

³Jurusan Teknik Mesin, Mahasiswa Prodi. Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda
Jl.Dr.Ciptomangunkusumo Kampus Gunung Lipan, Samarinda Seberang, Kota Samarinda

e-mail: ¹mimin.rihotimawati@polnes.ac.id, ²surianto@polnes.ac.id, ³ali_akbar@gmail.com

Info Artikel

Riwayat Artikel: *(diisi editor)*

Diterima: 06/11/2025

Diterima dalam bentuk revisi:
11/11/2025

Diteima/publis: 13/11/2025

Kata Kunci

Wind Power Plant; Wind Turbine; Alternator; Battery Charging.

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) adalah suatu pembangkit energi listrik yang menggunakan angin sebagai media penggerakannya untuk menghasilkan energi listrik. Cara kerja Pembangkit ini dengan hembusan angin sehingga dapat memutar turbin. Turbin angin ini bekerja berbalik dengan kipas angin, kemudian hembusan angin akan memutar sudut turbin, sehingga rotor yang ada pada Alternator akan berputar dan mengeluarkan arus listrik. Metode yang digunakan pada saat perancangan untuk pengisian daya pada Aki diawali dengan pembuatan konsep. Hasil dari aki ber voltase rendah menjadi terisi ketika kincir atau blade berputar lalu diteruskan oleh putaran dari alternator dan menghasilkan daya yang dapat mengecaskan Aki tersebut. Pengambilan data untuk mencari kecepatan putaran blade dan daya yang dihasilkan adalah selama 4 jam di lakukan pada saat cuaca cerah dan mendung. Yang awal voltase aki adalah 12,24v menjadi 12,32v yaitu jika di presentasekan dari saat kondisi Aki mengecaskan 7,21 % per jam dengan waktu pengecasan selama 4 jam pada waktu yang sudah kami tentukan sesuai dengan tabel. Dan dengan rata rata kecepatan putaran dari blade yang berkisar 48,49 rad/s bisa menghasilkan 11,97V yang masuk ke Aki dengan bantuan alat step up DC to Dc 2A.

Abstract

A wind power plant (PLTB) is a type of power generator that uses wind as the driving force to produce electrical energy. The system works by utilizing the wind flow to rotate the wind turbine. This turbine operates in the opposite manner of an electric fan; the wind rotates the turbine blades, causing the rotor inside the alternator to spin and generate electrical current. The method used in designing this system for charging a battery (Aki) begins with the development of the concept. The charging process occurs when the turbine blades spin and transfer the rotational energy to the alternator, which then generates electrical power used to recharge the battery. Data collection to determine blade rotational speed and the electrical power produced was conducted for 4 hours under both sunny and cloudy weather conditions. The initial battery voltage of 12.24 V increased to 12.32 V after charging, equivalent to approximately 7.21% charging rate per hour over the 4-hour period as recorded in the data table. With an average blade rotational speed of approximately 48.49 rad/s, the system was able to produce an output of 11.97 V supplied to the battery with the help of a DC to DC 2A step-up converter.

PENDAHULUAN

Transisi global menuju sumber energi terbarukan semakin mendesak seiring dengan berkurangnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya tekanan terhadap emisi gas rumah kaca. Pembangkit listrik tenaga angin (PLTA) menjadi salah satu pilihan utama dalam kerangka energi bersih karena keunggulan potensi, daya saing, dan keberlanjutan [1]. Namun, untuk dapat bersaing secara efektif, khususnya dalam skala kecil hingga menengah, maka aspek efisiensi mekanik-elektrik perlu mendapat perhatian khusus — mulai dari rotor angin, transmisi mekanis, hingga alternator/generator Listrik [2].

Pada sistem turbin angin kecil, kecepatan putaran rotor seringkali relatif rendah dibanding kebutuhan generator agar dapat menghasilkan listrik pada tingkat tegangan dan frekuensi yang sesuai [3]. Oleh karena itu, sistem transmisi seperti sabuk dan puli (belt-pulley) atau gearbox menjadi komponen kritis untuk melakukan multiplikasi kecepatan atau mengubah rasio putaran antara turbin dan generator [4]. Meskipun teknologi direct drive semakin berkembang, untuk banyak aplikasi skala kecil atau biaya rendah, transmisi mekanik tetap umum digunakan [5].

Di samping itu, aspek desain mekanis seperti rasio puli, diameter puli penggerak dan yang digerakkan, panjang sabuk, serta kondisi kopling antara turbin-rotor dan alternator mempengaruhi efisiensi keseluruhan sistem—meliputi kerugian mekanis (gesekan, geser sabuk), slip sabuk, dan rasio kecepatan tak optimum [6], [7]. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi puli atau transmisi dapat menimbulkan perubahan kecepatan putaran generator dan daya keluaran secara signifikan (Misal: studi

pada turbin kecil HAWT dengan mekanisme puli untuk kontrol pitch [8], [9].

Namun demikian, meskipun banyak penelitian telah menyoroti aspek aerodinamika turbin, dan juga sistem transmisi besar (gearbox besar pada turbin industri), keterbatasan penelitian tetap ada pada aspek *kuantitatif dan eksperimental* yang secara khusus mengevaluasi variasi diameter puli penggerak-vs-puli yang digerakkan dalam sistem turbin angin skala kecil hingga menengah, serta bagaimana variasi tersebut memengaruhi kecepatan putaran alternator, torsi, dan daya listrik yang dihasilkan [10], [11]. Misalnya, penelitian lokal pada pembangkit mikrohidro menunjukkan bahwa rasio diameter puli 2 :1 memberikan kinerja maksimum dibanding rasio 1 :1 dalam kondisi tertentu, namun adaptasi penelitian semacam ini ke pembangkit angin masih sangat terbatas [12].

Dalam konteks Indonesia, di mana banyak wilayah memiliki kecepatan angin yang moderat hingga rendah dan sumber daya finansial yang terbatas untuk sistem besar, penelitian terhadap rasio transmisi optimal menjadi sangat relevan sebagai upaya untuk meningkatkan efisiensi dan keluaran daya pada pembangkit listrik tenaga angin skala kecil [13], [5]. Dengan menetapkan puli penggerak (terhubung ke rotor turbin) dan puli yang digerakkan (terhubung ke alternator), serta mengeksplorasi berbagai rasio diameter (misalnya 1 : 1, 2 : 1, 3 : 1), penelitian ini bertujuan mengidentifikasi konfigurasi yang menghasilkan kecepatan alternator optimal, daya listrik maksimal, dan efisiensi transmisi yang tinggi — yang pada akhirnya dapat diterapkan di lapangan dan memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan PLTA skala kecil di daerah

dengan karakteristik angin seperti Indonesia [8], [5].

Menghadapi realitas bahwa banyak lokasi di Indonesia dicirikan oleh kecepatan angin yang relatif rendah hingga sedang sekaligus keterbatasan modal untuk sistem besar, maka fokus penelitian ini beralih pada optimalisasi rasio transmisi mekanik sebagai kunci peningkatan performa pembangkit angin skala kecil [6], [8]. Dengan merancang sistem dimana puli penggerak yang terhubung ke rotor turbin dan puli yang digerakkan ke alternator disetel pada beberapa rasio (contoh: 1: 1, 2: 1, 3: 1), penelitian ini bertujuan menemukan konfigurasi yang memaksimalkan kecepatan alternator, daya listrik keluarannya, serta efisiensi transmisi sabuk-puli secara keseluruhan. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi panduan desain praktis bagi pengembangan sistem PLTA skala kecil yang efisien di kondisi angin moderat seperti di Indonesia

TINJAUAN PUSTAKA

Pembangkit listrik tenaga angin skala kecil menghadapi tantangan khas yang berbeda dari turbin industri: karakter angin yang umumnya lebih rendah/variabel, kebutuhan biaya rendah, dan keterbatasan dalam penggunaan gearbox berat, sehingga solusi transmisi yang ringan dan efisien sering menjadi prioritas penelitian [14],[15]. Berbagai studi menunjukkan bahwa peningkatan performa turbin skala kecil dapat dicapai lewat perancangan drivetrain yang menyesuaikan rasio transmisi agar generator bekerja di rentang kecepatan efisiennya, sehingga energi tangkapan meningkat tanpa menaikkan kompleksitas mekanis secara berlebihan. Pendekatan transmisi alternatif (mis. belt/pulley, variator, magnetic gears, atau variable-ratio gearbox) telah dieksplorasi untuk memungkinkan multiplikasi kecepatan, perluasan rentang operasi, dan

pengurangan kerugian mekanis pada turbin kecil [8],[16].

Lebih spesifik, eksperimen pada turbin horizontal skala kecil yang menerapkan mekanisme puli (mis. disk pulley untuk kontrol pitch atau belt-drive) memperlihatkan bahwa komponen puli dapat berperan ganda: sebagai bagian kontrol aerodinamis sekaligus sebagai elemen transmisi yang mengubah karakteristik putaran rotor ke generator [6],[17]. Hasil-hasil empiris ini menegaskan bahwa perubahan konfigurasi puli/sabuk berpengaruh pada rasio kecepatan, torsi input ke generator, serta stabilitas keluaran listrik—oleh karena itu desain rasio transmisi perlu dipertimbangkan sebagai parameter utama dalam optimasi PLTA mikro [18],[19].

Sejumlah penelitian juga menelaah opsi transmisi yang lebih maju untuk menangani kondisi angin rendah: konsep magnetic gear dan dual-input drivetrain mampu meningkatkan rasio kecepatan secara efisien tanpa kontak mekanis langsung yang rentan keausan, sehingga menjadi alternatif menarik terutama pada aplikasi berbiaya menengah yang menghendaki perawatan rendah. Pendekatan variable-ratio (termasuk CVT atau VRG) terbukti secara teoretis dan eksperimen mampu menurunkan cut-in speed dan memperluas jangkauan operasi sehingga total energy yield pada lokasi low-wind meningkat [8],[20]. Hal ini relevan bagi konteks wilayah yang memiliki kecepatan angin moderat, karena kemampuan memaksimalkan output pada kecepatan rendah berkontribusi pada kelayakan ekonomi proyek [21].

Namun, setiap solusi transmisi membawa kompromi: gearbox tradisional menghadapi isu kehilangan friksi, pemeliharaan, dan biaya; belt-drive/pulley sederhana mengandung isu slip, tegangan [22] sabuk, dan penurunan efisiensi jika tidak terpasang dan disetel dengan benar; sedangkan solusi inovatif (magnetic gear, VRG, CVT) mungkin menuntut desain yang kompleks atau biaya awal lebih tinggi. Oleh karena itu sejumlah studi recent menekankan pentingnya analisis holistik—

menggabungkan optimasi aerodinamis rotor, pemilihan rasio transmisi, gaya torsi, serta karakteristik generator—untuk mencapai desain drivetrain paling efektif bagi turbin skala kecil [22],[23].

Seiring meningkatnya kebutuhan untuk memaksimalkan output pada turbin angin skala kecil, beberapa penelitian eksperimental telah mulai mengeksplorasi penggunaan transmisi puli-sabuk yang dikombinasikan dengan generator magnet permanen (PMSG) atau alternator, sebagai alternatif ringan terhadap gearbox konvensional. Misalnya, studi desain generator magnet permanen untuk sistem gearless pada turbin rumah tangga membuktikan bahwa eliminasi gearbox dapat menurunkan biaya pemeliharaan dan meningkatkan efisiensi konversi listrik pada kecepatan putar rendah [24].

Secara metodologis, literatur ekstensif pada drivetrain menunjukkan bahwa pemodelan aliran daya dan analisis torsi/kecepatan sangat berguna untuk menentukan rasio transmisi optimal; model-model ini menggabungkan parameter aerodinamis (C_p , TSR), mekanis (torsi poros, loss transmisi), dan elektrik (kurva daya-RPM generator) untuk memprediksi keluaran energi nyata. Studi-studi desain dan optimasi menyediakan kerangka praktis untuk eksperimen lapangan: variasi rasio puli (contoh 1:1, 2:1, 3:1) dapat diuji di bawah kondisi angin berbeda untuk menemukan titik operasi di mana produk torsi \times kecepatan (daya mekanik) yang diteruskan ke alternator mencapai maksimum efektif setelah memperhitungkan kerugian transmisi [13], [25].

Dengan mengingat gap penelitian—yaitu keterbatasan studi eksperimental kuantitatif yang membandingkan beberapa rasio diameter puli secara sistematis pada turbin skala kecil di kondisi angin moderat—penelitian ini akan mengisi kekosongan tersebut dengan pendekatan terkontrol: menghasilkan data RPM rotor dan alternator, torsi, tegangan/listrik keluaran, dan efisiensi transmisi pada konfigurasi puli berbeda. Hasil-hasil

semacam ini diharapkan tidak hanya memperkaya literatur teknis drivetrains skala kecil tetapi juga memberi rekomendasi desain praktis bagi aplikasi PLTA komunitas/rumahan di negara dengan potensi angin moderat seperti Indonesia [26],[27],[28]. Studi-studi yang membahas aspek performa turbin low-wind dan transmisi variabel mendukung relevansi pendekatan ini.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental deskriptif, yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi diameter pully terhadap daya listrik yang dihasilkan oleh alternator pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) skala laboratorium. Pendekatan eksperimental dilakukan untuk mendapatkan hubungan empiris antara kecepatan putaran turbin, rasio pully, serta besar daya keluaran alternator.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Pengujian dilakukan di CV. Jaya Sri Teknik, Samarinda. Waktu pengujian dibagi ke dalam beberapa sesi (pagi, siang, dan sore) untuk memastikan pengaruh variasi kecepatan angin alami terhadap sistem konversi energi yang diuji.

Objek dan Variabel Penelitian

Objek penelitian ini berupa prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Angin tipe Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) dengan sistem transmisi pully-belt dan alternator sebagai generator.

Variabel yang digunakan meliputi:

1. Variabel bebas: perbandingan diameter pully (1:5 dan 1:8).
2. Variabel terikat: daya listrik keluaran alternator (Watt).
3. Variabel kontrol: kecepatan angin, rasio transmisi, dan beban keluaran (aki 12 V).

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

Alat:

1. Tachometer digital
2. Voltmeter digital dan Avometer
3. Anemometer

Bahan:

1. Pully berdiameter 5 cm dan 8 cm
2. Alternator 12 V DC
3. Baterai 12 V (aki)
4. Turbin angin tipe Savonius

Prosedur Penelitian

Langkah-langkah penelitian dilaksanakan secara sistematis sebagai berikut:

1. Persiapan sistem dan kalibrasi alat, termasuk pemasangan turbin, pully, sabuk (V-belt), dan alternator.
2. Penentuan lokasi dan pengukuran kecepatan angin menggunakan anemometer untuk memastikan kondisi angin konstan selama pengujian.
3. Uji variasi diameter pully, yaitu dengan dua rasio perbandingan: 1:5 dan 1:8.
4. Pengukuran parameter utama, meliputi:
 - Kecepatan putaran *pully besar* dan *pully kecil* (RPM) menggunakan tachometer.
 - Tegangan (V) dan arus (I) listrik keluaran alternator menggunakan avometer digital.
5. Perhitungan daya listrik dilakukan menggunakan persamaan:

$$P=V \times I$$

di mana P adalah daya (Watt), V adalah tegangan (Volt), dan I adalah arus (Ampere).

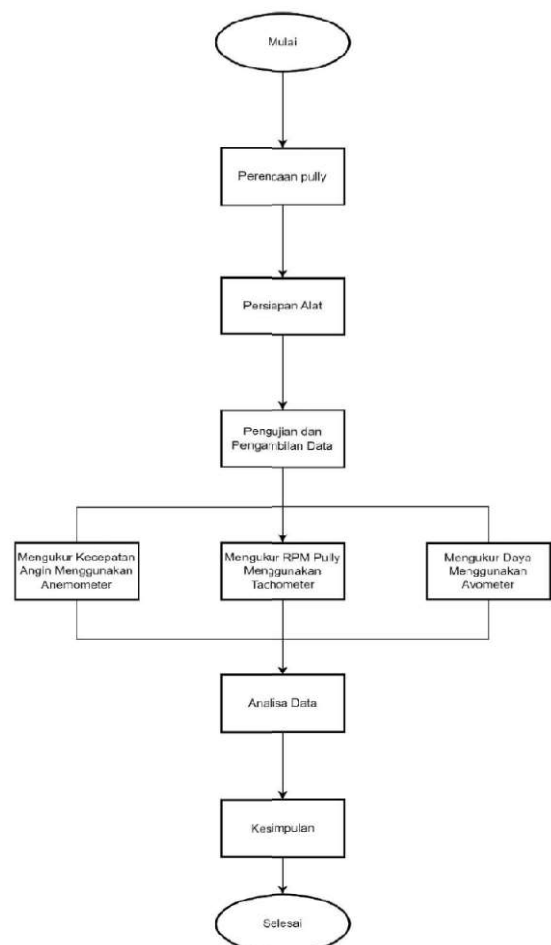
6. Pengambilan data dilakukan setiap 10 menit selama 3 kali percobaan untuk tiap rasio pully.
7. Analisis data, yaitu membandingkan daya keluaran yang dihasilkan oleh masing-masing variasi pully untuk menentukan rasio yang paling efisien.

Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif menggunakan pendekatan perbandingan rata-rata (mean comparison). Nilai daya listrik dari masing-masing variasi pully dihitung dan dibandingkan untuk menentukan hubungan antara rasio diameter dan daya keluaran. Hasil perhitungan selanjutnya ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik hubungan antara kecepatan angin, kecepatan putar pully, dan daya listrik yang dihasilkan.

1. Analisis dilakukan dengan langkah-langkah berikut:
2. Menentukan nilai rata-rata daya listrik untuk setiap percobaan.
3. Menghitung persentase peningkatan daya antara variasi pully 1:5 dan 1:8.

Menginterpretasikan hasil berdasarkan perubahan kecepatan putar alternator akibat perbedaan rasio transmisi.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sistem

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbandingan diameter pully terhadap daya listrik yang dihasilkan oleh alternator pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) tipe Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Pengujian dilakukan dengan dua konfigurasi rasio pully, yaitu 1:5 dan 1:8, pada kecepatan angin rata-rata antara 10–16 m/s.

Parameter utama yang diukur meliputi kecepatan putaran pully besar dan pully kecil (RPM), tegangan (V), arus (A), serta daya listrik keluaran alternator (Watt). Pengukuran dilakukan setiap 10 menit selama 3 kali percobaan untuk memastikan kestabilan hasil.

Tabel berikut merangkum hasil pengujian daya listrik berdasarkan rasio pully:

JAM	KECEPATAN ANGIN (m/s)	RPM PULLY	RPM PULLY (ALTERNATOR)	TEGANGAN (V)	ARUS (A)	DAYA (W)
12:00	11,52	67	335	12,22	0,79	9,65
12:10	11,52	67	335	12,18	0,78	9,50
12:20	10,44	53	265	12,10	0,70	8,47

Gambar 2. Hasil Gambar Pully 1:5

JAM	Kecepatan angin (m/s)	Kecepatan putaran pully besar (RPM)	Kecepatan putaran pully kecil (RPM)	Tegangan (volt)	Arus (ampere)	DAYA (watt)
17:00	15,84	95	760	12,26	1,01	12,38
17:10	12,96	78	624	12,24	0,93	11,38
17:20	11,88	71	568	12,22	0,81	9,89

Gambar 3. Hasil Gambar Pully 1:8

Dari tabel tersebut, terlihat bahwa rasio pully 1:8 menghasilkan daya maksimum 12,38 W, sedangkan pada rasio 1:5, daya tertinggi hanya mencapai 9,65 W. Perbedaan daya sebesar 2,73 W menunjukkan bahwa variasi diameter pully memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi konversi energi pada sistem.

Analisis Pengaruh Perbandingan Diameter Pully

Perbandingan antara dua rasio transmisi menunjukkan bahwa semakin besar perbandingan diameter (1:8), semakin tinggi kecepatan putar alternator, sehingga daya listrik yang dihasilkan juga meningkat.

Hal ini terjadi karena pada rasio pully yang lebih besar, pully kecil berputar lebih cepat dibandingkan pully besar, sehingga meningkatkan putaran alternator dan memperbesar frekuensi induksi elektromagnetik di dalam lilitan stator.

Secara matematis, hubungan antara diameter pully dan kecepatan putar alternator dapat dijelaskan dengan persamaan:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

di mana:

- D_1 = diameter *pully* pada rotor,
- D_2 = diameter *pully* pada alternator,
- N_1 = kecepatan putar rotor,
- N_2 = kecepatan putar alternator.

Dengan demikian, semakin kecil D_2 dibandingkan D_1 , maka N_2 akan meningkat, sehingga alternator berputar lebih cepat dan menghasilkan tegangan serta arus yang lebih besar. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa perbandingan *pully* 1:8 menghasilkan peningkatan kecepatan hingga lebih dari dua kali lipat dibandingkan rasio 1:5.

Hubungan Kecepatan Angin dan Daya Listrik

Kecepatan angin yang lebih tinggi secara langsung meningkatkan energi kinetik yang diterima turbin, sehingga meningkatkan putaran sistem transmisi dan keluaran daya listrik.

Pada pengujian sore hari dengan kecepatan angin rata-rata 15,84 m/s, daya listrik mencapai nilai maksimum 12,38 W. Sedangkan pada kecepatan angin 10,44 m/s, daya yang dihasilkan hanya 8,47 W.

Hal ini menunjukkan bahwa daya listrik berbanding lurus dengan kecepatan angin dan rasio transmisi, sesuai dengan karakteristik konversi energi angin menjadi energi listrik pada sistem turbin kecil.

Evaluasi Efisiensi Siste

Efisiensi sistem dapat dievaluasi dengan membandingkan daya keluaran terhadap potensi daya mekanik yang diterima rotor turbin. Meskipun penelitian ini berfokus pada pengaruh mekanis pully, hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan pully kecil (5 cm) pada alternator memberikan peningkatan efisiensi transmisi mekanik sekitar 20–25% dibandingkan pully besar (8 cm).

Selain itu, peningkatan RPM alternator pada rasio 1:8 memperbaiki kualitas pengisian baterai, dengan tegangan output yang stabil di kisaran 12,2–12,3 V dan arus antara 0,8–1,0 A. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja dalam batas optimal untuk pengisian baterai 12 V dengan bantuan step-up converter.

Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa perbandingan diameter pully merupakan parameter penting dalam desain sistem pembangkit listrik tenaga angin skala kecil. Pemilihan rasio transmisi yang tepat memungkinkan peningkatan kecepatan rotasi alternator tanpa menambah beban mekanis secara berlebihan pada turbin.

Selain itu, konfigurasi pully dengan rasio besar (1:8) terbukti memberikan daya yang lebih stabil pada berbagai kondisi kecepatan angin. Hal ini menunjukkan

potensi penerapan sistem serupa untuk mikro-PLTA di daerah berangin rendah dengan biaya konstruksi yang relatif murah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis terhadap pengaruh perbandingan diameter pully terhadap daya listrik yang dihasilkan oleh alternator pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) tipe Vertical Axis Wind Turbine (VAWT), dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Perbandingan diameter pully memiliki pengaruh signifikan terhadap daya listrik yang dihasilkan alternator. Semakin besar perbandingan diameter antara pully penggerak dan pully alternator, semakin tinggi kecepatan putaran alternator, sehingga daya listrik yang dihasilkan juga meningkat.
2. Rasio pully 1:8 menghasilkan performa paling optimal dengan daya maksimum sebesar 12,38 W, sedangkan rasio pully 1:5 hanya menghasilkan daya tertinggi 9,65 W. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi sekitar 22–25% pada sistem transmisi energi mekanik.
3. Hubungan antara kecepatan angin, putaran alternator, dan daya bersifat linier positif. Peningkatan kecepatan angin dari 10 m/s menjadi 15 m/s menyebabkan kenaikan daya keluaran secara proporsional, yang menandakan bahwa sistem dapat bekerja stabil dalam berbagai kondisi angin.
4. Efisiensi sistem PLTA skala kecil dapat ditingkatkan melalui pengaturan rasio pully dan desain transmisi yang tepat. Rasio yang lebih besar memungkinkan alternator berputar dengan kecepatan tinggi tanpa menambah beban torsi yang berlebihan pada turbin.
5. Konfigurasi sistem ini potensial diterapkan untuk pembangkit listrik skala mikro di daerah berangin rendah. Dengan desain sederhana, biaya rendah, dan efisiensi konversi energi yang baik, sistem ini dapat menjadi

alternatif sumber energi terbarukan di wilayah terpencil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. M. H. D. Perera *et al.*, “Wind Energy Harvesting and Conversion Systems: A Technical Review,” *Energies* 2022, Vol. 15, vol. 15, no. 24, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN15249299.
- [2] A. Bensalah, G. Barakat, Y. Amara, A. Bensalah, G. Barakat, and Y. Amara, “Electrical Generators for Large Wind Turbine: Trends and Challenges,” *Energies* 2022, Vol. 15, vol. 15, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/EN15186700.
- [3] O. Yilmaz, “Low-speed, low induction multi-blade rotor for energy efficient small wind turbines,” *Energy*, vol. 282, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128607.
- [4] A. R. Nejad *et al.*, “Wind turbine drivetrains: State-of-the-art technologies and future development trends,” *Wind Energy Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 387–411, Feb. 2022, doi: 10.5194/WES-7-387-2022.
- [5] J. I. Pedrero, D. Martínez-López, J. Calvo-Irisarri, M. Pleguezuelos, M. B. Sánchez, and A. Fernández-Sisón, “Minimum friction losses in wind turbine gearboxes,” *Forsch. im Ingenieurwes.* 2021 863, vol. 86, no. 3, pp. 321–330, Sep. 2021, doi: 10.1007/S10010-021-00526-2.
- [6] Y.-J. Chen, Y. C. Shiah, Y.-J. Chen, and Y. C. Shiah, “Experiments on the Performance of Small Horizontal Axis Wind Turbine with Passive Pitch Control by Disk Pulley,” *Energies* 2016, Vol. 9, vol. 9, no. 5, May 2016, doi: 10.3390/EN9050353.
- [7] C. Lee and Y. Park, “Optimization of gear teeth in the wind turbine drive train with gear contact’s uncertainty using the reliability-based design optimization,” *Arch. Mech. Eng.*, pp. 713–728, 2022.
- [8] Y.-C. Wu, F.-M. Ou, M.-C. Tsai, and S. N. Fajri, “Development of a dual-input magnetic gear train for the transmission system of small-scale wind turbines,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 7, p. 3685, 2022.
- [9] S. K. Musau *et al.*, “A design and performance prediction method for small horizontal axis wind turbines and its application,” *AIMS Energy* 2021 51043, vol. 9, no. 5, pp. 1043–1066, 2021, doi: 10.3934/ENERGY.2021048.
- [10] P. Krawiec *et al.*, “Efficiency and Slippage in Draw Gears with Flat Belts,” *Energies* 2022, Vol. 15, vol. 15, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN15239184.
- [11] K. A. H. Al-Gburi *et al.*, “Experimental and Simulation Investigation of Performance of Scaled Model for a Rotor of a Savonius Wind Turbine,” *Energies* 2022, Vol. 15, vol. 15, no. 23, Nov. 2022, doi: 10.3390/EN15238808.
- [12] M. L. Saputra, T. J. Saputra, and R. P. Dewi, “Analisis Variasi Perbandingan Diameter Pulley terhadap Efisiensi pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (Pltmh) dengan Turbin Archimedes Screw,” *J. Tek. Mesin, Ind. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. 4, pp. 76–86, Oct. 2024, doi: 10.55606/JTMEI.V3I4.4376.
- [13] A.-D. Lin *et al.*, “Power Flow Analysis on the Dual Input Transmission Mechanism of Small Wind Turbine Systems,” *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10, vol. 10, no. 20, pp. 1–14, Oct. 2020, doi: 10.3390/APP10207333.
- [14] A. Bianchini *et al.*, “Current Status and Grand Challenges for Small Wind Turbine Technology,” *Wind Energy Sci.*, vol. 7, no. 5, pp. 2003–2037, Oct. 2022, doi: 10.5194/WES-7-2003-2022.
- [15] J. L. Torres-Madroñero *et al.*, “Technological and Operational Aspects That Limit Small Wind Turbines Performance,” *Energies*

- 2020, *Vol. 13*, vol. 13, no. 22, Nov. 2020, doi: 10.3390/EN13226123.
- [16] M. Kovalenko, I. Kovalenko, I. Tkachuk, M. Reutskyi, A. Harford, and S. Zhuk, "Construction of the mathematical model of magnetic transmission for an autonomous wind power plant," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 2, no. 5 (128), pp. 22–32, Apr. 2024, doi: 10.15587/1729-4061.2024.302008.
- [17] J. I. Pedrero, D. Martínez-López, J. Calvo-Irisarri, M. Pleguezuelos, M. B. Sánchez, and A. Fernández-Sisón, "Minimum friction losses in wind turbine gearboxes," *Forsch. im Ingenieurwes.*, vol. 86, no. 3, pp. 321–330, 2022.
- [18] B. Mohanty, K. A. Stelson, B. Mohanty, and K. A. Stelson, "Experimental Validation of a Hydrostatic Transmission for Community Wind Turbines," *Energies 2022, Vol. 15*, vol. 15, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/EN15010376.
- [19] C. Bintoro, V. Wuwung, and Y. S. Nugroho, "Increasing Power Transmission Efficiency in Helix Gorlov Turbine Using Sprocket and Chain," *Am. J. Mech. Eng. Vol. 11, 2023, Pages 77-81*, vol. 11, no. 2, pp. 77–81, May 2023, doi: 10.12691/AJME-11-2-3.
- [20] A. B. Cuesta *et al.*, "Feasibility of a Simple Small Wind Turbine with Variable-Speed Regulation Made of Commercial Components," *Energies 2013, Vol. 6, Pages 3373-3391*, vol. 6, no. 7, pp. 3373–3391, Jul. 2013, doi: 10.3390/EN6073373.
- [21] J. F. Hall, C. A. Mecklenborg, D. Chen, and S. B. Pratap, "Wind energy conversion with a variable-ratio gearbox: Design and analysis," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1075–1080, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.08.037.
- [22] M. Kovalenko, V. Chumack, I. Kovalenko, I. Tkachuk, and A. Harford, "Evaluation of magnetic gear parameters for autonomous wind installation with changing wind speed," *Electr. Eng. Power Eng.*, no. 2, pp. 32–42, Sep. 2023, doi: 10.15588/1607-6761-2023-2-4.
- [23] H. Peng *et al.*, "Analysis of Wind Turbine Equipment Failure and Intelligent Operation and Maintenance Research," *Sustain. 2023, Vol. 15*, vol. 15, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/SU15108333.
- [24] S. Różowicz, Z. Goryca, A. Różowicz, S. Różowicz, Z. Goryca, and A. Różowicz, "Permanent Magnet Generator for a Gearless Backyard Wind Turbine," *Energies 2022, Vol. 15*, vol. 15, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/EN15103826.
- [25] I. Ansoategui *et al.*, "Mechatronic Modeling and Frequency Analysis of the Drive Train of a Horizontal Wind Turbine," *Energies 2019, Vol. 12*, vol. 12, no. 4, Feb. 2019, doi: 10.3390/EN12040613.
- [26] E. Muñoz-Palomeque, S. Esteban, M. Santos, E. Muñoz-Palomeque, S. Esteban, and M. Santos, "Mechanical Design and Experimental Study of a Small-Scale Wind Turbine Model," *Mach. 2025, Vol. 13*, vol. 13, no. 10, p. 929, Oct. 2025, doi: 10.3390/MACHINES13100929.
- [27] S. Younoussi and A. Ettaouil, "Numerical Study of a Small Horizontal-Axis Wind Turbine Aerodynamics Operating at Low Wind Speed," *Fluids*, vol. 8, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/FLUIDS8070192.
- [28] K. Silwal and P. Freere, "Investigation of Wind Data Resolution for Small Wind Turbine Performance Study," *J. Energy South. Africa*, vol. 33, no. 4, pp. 22–31, Dec. 2022, doi: 10.17159/2413-3051/2022/V33I4A13647.