

PENENTUAN RADIUS OPTIMAL PADA POSISI PANJANG CHORD MAKSIMUM UNSHROUDED TURBIN ANGIN AKSIAL

Corie F Refwalu¹⁾, Wulfilla M. Rumaherang²⁾, A. Simanjuntak³⁾

¹⁾S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Pattimura

Email: corierefwalu27@gmail.com,

²⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura

Email: max.rumaherang@fatek.unpatti.ac.id,

³⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura

Email: antoni.simanjuntak.S15@gmail.com,

Abstrak salah satu tantangan pengembangan turbin angin berdasarkan data potensi angin pada wilayah Maluku adalah sebagian besar wilayah mempunyai potensi angin kecepatan rendah yang berkisar antara 2-6 m/s, sehingga diperlukan analisis tepat penerapan teknologinya. Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini dijalankan dengan pengujian secara simulasi hidrodinamika. Koefisien daya turbin aliran terbuka dalam banyak penelitian terdahulu untuk turbin aliran terbuka mempunyai koefisien daya cukup rendah walau beberapa hasil simulasi hidrodinamik menunjukkan koefisien daya mendekati nilai Betz limit, dimana bentuk *airfoil blade* yang digunakan mempunyai pengaruh yang besar. Penelitian ini merupakan tinjauan penggunaan profil *airfoil* (NACA) 5 digit pada data base NACA dengan melakukan eksperimen dengan pembebanan bertahap pada kecepatan angin 2-6 m/s dengan putaran turbin sesuai nilai (TSR) yang ditetapkan. Perbandingan daya maksimum atau daya pada kecepatan rotasi optimum dilakukan melalui tracking daya maksimum yaitu pada TSR atau kecepatan rotasi optimum untuk menentukan kinerja *airfoil*. Hasil yang optimal yaitu pada radius 237 mm dan pada panjang *chord* 83 mm. Dengan nilai efisiensi yang mencapai 0.546 – 0.555 dengan kecepatan V_0 2 m/s – 6m/s.

Kata kunci: Model turbin angin 3 blade, NACA 5 digit, Koefisien Daya

1. PENDAHULUAN

Isu penting saat ini adalah pemanasan global yang disebabkan oleh emisi CO₂ (Karbon dioksida) ke atmosfer yang menjadi perhatian global sehingga diperlukan upaya mitigasi dampak GRK dari sektor energi adalah dengan meningkatkan bauran pemanfaatan *renewable energy* sekaligus mensukseskan program transisi energi dan fosil ke *renewable energy*. Salah satu sumber energi alternatif yang alami, terbarukan dan bersih adalah pembangkit listrik tenaga angin. Saat ini, kebutuhan listrik meningkat pesat karena kemajuan teknologi

Permasalahan adalah tidak semua wilayah mempunyai potensi angin yang tinggi, bahkan pada kepulauan Maluku kecepatan angin berkisar antara 2-6 m/s dan terkadang mencapai 8 m/s, sehingga diperlukan analisis dan penerapan teknologi yang tepat. Konversi energi angin dilakukan dengan bantuan turbin angin. Turbin angin terdiri *turbin angin sumbu aksial* dan *dan sumbu vertikal*.

Teori momentum elementer Betz digunakan untuk analisis konversi energi turbin angin dengan pemodelan aliran dua dimensi. Besar kecilnya kecepatan aliran udara menentukan besar kecilnya energi kinetik angin diserap oleh rotor turbin angin. Blade membelokkan arah angin dan menyebabkan turbin berputar. Perubahan kecepatan angin menghasilkan perubahan putaran rotor sekaligus mengubah arah *tangensial* yang mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Performance atau kinerja turbin dinyatakan melalui parameter-

parameter koefisien daya (C_p), koefisien thrust (C_t) dan koefisien torsi (C_q). Koefisien daya yang merupakan perbandingan antara daya mekanik turbin angin dengan daya angin [9]. Turbin aliran terbuka (*bare turbine*) mempunyai koefisien daya mencapai maximum berada sekitar 0.35 dan C_p sekitar Betz Limit yaitu 0.593 serta $C_{p_{blade\ max}} = 0.38$. Dan pada kecepatan angin 2-8 m/s koefisien daya berkisar antara C_p 0.25-0.5 at $TSR = 2$ -. Dalam beberapa penelitian sebelum koefisien daya untuk turbin 3 lebih kecil dari nilai Betz dimaksud. . Berbagai penelitian dilakukan untuk meningkatkan performance turbin melalui analisis aerodinamika blade dan kinerja turbin.

Konstruksi *blade* untuk mendapatkan *performa* yang optimal dari sebuah turbin angin tergantung pada bentuk *aerodinamisnya* dengan jumlah blade ideal dengan pembagian gaya dan keseimbangan yang baik adalah 3 blade serta penggunaan ducted pada turbin yang dapat meningkatkan koefisien daya sampai 72%.

Kecepatan angin efektif sekitar bervariasi dari 2-6 m/s sehingga analisis parameter-parameter pada range kecepatan ini perlu dilakukan untuk menentukan posisi blade yang paling sesuai. Pada penelitian desain bilah turbin angin dengan analisis komputasi dinamika fluida (CFD) pada ditemukan sudut serang yang baik berada sekitar 5 derajat untuk profil blade NACA 0012.

Disini diperlukan tinjauan lebih lanjut untuk kondisi kecepatan angin diatas dengan menggunakan profil airfoil NACA 6 digit pada data base untuk mendapatkan performnace yang lebih baik. Posisi sudut serang pada setiap radius merupakan kajian penting yang harus dilakukan lebih lanjut.

Pada berbagai penelitian terdahulu yang diuraikan diatas, belum ditentukan dengan pasti performance turbin model dengan profil airfoil NACA 6 digit yang beroperasi pada kecepatan anging 2-6 m/s, sehingga masih perlu dilakukan studi performance turbin untuk turbin aliran terbuka atau *bare turbine* dengan profil blade NACA 6 digit pada range kecepatan angin 2-6 m/s. Tulisan ini menguraikan hasil penelitian performance turbin yaitu parameter-parameter, daya optimal, yaitu daya pada C_p tertinggi, yaitu pada *maximum power point* (MPPT) koefisien daya C_p , koefisien thrust (C_t) dan koefisien torsi C_q terhadap nilai tip speed ratio (TSR) dan kecepatan turbin ω (rad/s) dengan melakukan eksperimen pada bangku uji model turbin.

2. METODE

A. Energi Kinetik Angin

Energi kinetic aliran udara adalah yang mengalir melewati suatu luas penampang A dalam satuan waktu. Daya kinetic aliran udara dinyatakan dengan persamaan(1)

$$P_{ke} = \frac{1}{2}\rho AV_0^3 \quad (1)$$

Dimana P_{ke} adalah daya kinetik, A adalah luasan *Swept* (m²) dan V_0 adalah kecepatan angin (Aji Saputra et al., 2021). Daya yang dibangkitkan turbin dinyatakan dengan perasamaan (2)

$$P_t = \frac{1}{2}\rho C_p AV_0^3 \quad (2)$$

Dimana P_t adalah daya turbin (W). Daya juga merupakan fungsi dari putaran rotor yang dinyatakan sebagai

$$P_t = \frac{1}{2}\rho C_p AV_0^3 \lambda \quad (3)$$

Dimana ρ adalah densitas udara (kg/m³), C_p adalah koefisien daya turbin. λ adalah *tip speed ratio* yang ditulis sebagai

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0} \quad (4)$$

Dimana kecepatan rotasi di mana turbin beroperasi adalah pilihan mendasar dalam desain sudu. Ini didefinisikan dalam hal kecepatan ujung sudu relatif terhadap kecepatan angin bebas. Berdasarkan persamaan (3) maka untuk densitas udara (ρ) = 1,23 kg/m³, koefisien daya $C_p = 0,593$ (menurut nilai Betz limit).

Dimana ω adalah kecepatan sudut rotor turbin (rad/s) dan R adalah jari-jari turbin (m). Persamaan (5) digunakan untuk menentukan torsi yang dikembangkan pada poros turbin

$$T = \frac{1}{2} \rho \omega^2 R^3 A C_p(\lambda, \theta_p) / \lambda^3 \quad (5)$$

Selanjutnya daya poros turbin ditentukan dengan persamaan

$$P_p = \omega T \quad (6)$$

Gaya pada piringan aktuator yang disebabkan oleh penurunan tekanan juga dapat tidak didimensikan untuk memberikan koefisien dorong

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A_d} \quad (7)$$

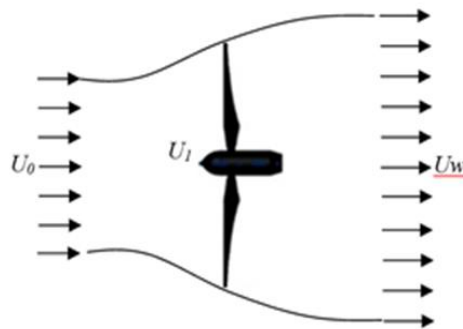
Dan koefisien daya C_p dinyatakan sebagai :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^3 A_d} \quad (8)$$

Dimana a adalah *factor* induksi aliran *axial*, yaitu perbandingan selisih kecepatan udara bebas V_∞ dan kecepatan pada disk V_d . Nilai koefisien daya maksimum pada turbin angin tanpa *shroud* setara dengan nilai Betz limit yaitu $C_p = 0.593$

B. Aliran Pada Turbin Terbuka (Bare Turbine)

Sebagian besar konverter energi angin sumbu horizontal menggunakan rotor yang terdiri dari sejumlah blade yang berputar. Cakram sapuan blade tergantung pada desain aerodinamis dan sirkulasi yang mengembangkan perbedaan tekanan pada cakram dan torsi pada sumbu rotor. *Disk* aktuator ekstraksi energi dan tabung aliran pada gambar 1 digunakan untuk melakukan analisis proses konversi energi kinetik angin, dimana kerja turbin tergantung pada interaksi antara rotor dan angin. Disk diletakkan tegak lurus dengan kecepatan bebas U_0 dan berputar dengan kecepatan sudut ω .



Gambar 1. Disk aktuator dan tabung aliran untuk turbin angin

Tabung aliran memiliki luas penampang disk yang lebih kecil pada sisi hulu dan luas lebih besar dari bagian hilir. Laju total massa yang memasuki volume atur adalah sama dengan laju total massa yang keluar.

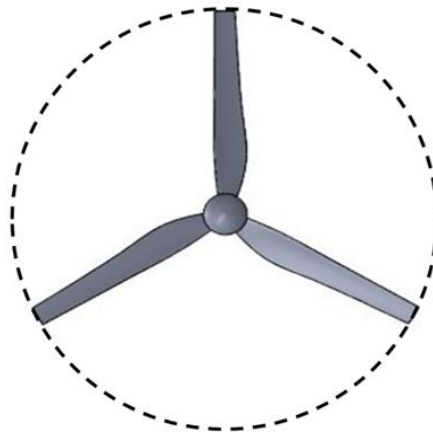
Desain turbin angin sumbu *horizontal* praktis membutuhkan *airfoil* untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi yang berguna. Setiap desain rotor mempunyai kelebihan dan kekurangan.

C. Prosedur Penelitian

Profil airfoil yang digunakan dalam penelitian ini adalah airfoil NACA xx-XXX. Ukuran profil pada panjang chord maksimum adalah sebagai berikut :

- Chord maksimum= 97 [mm]
- Radius = 500 [mm]
- Thickness = 12 %

Dalam penelitian ini digunakan rotor turbin dengan 3 blade (Gambar 6) Pengujian dilakukan pada Laboratorium steam plant dengan objek penelitian yaitu model Unshrouded turbin dengan diameter impeller $D_1 = 1$.



Gambar 2. Impeller turbin

Proses pengujian didasarkan pada data kecepatan angin yang telah diperoleh dari hasil observasi data potensi energi angin, dan perhitungan parameter output dasar aliran energi angin dan turbin, desain konstruksi model dan komponen-komponen model dan turbin model, *assembly*, *setting* instalasi pengujian, pengujian model dan adaptasi proses *experimental*.

Penelitian ini dilakukan secara *experimental* pada bangku uji. Kecepatan angin diatur pada variasi 2 - 6 m/s melalui pengaturan kerja blower dan diukur dengan anemometer. Pada setiap variasi kecepatan, diukur torsi pada poros turbin dengan bantuan dynamometer dan prony break pada interval kecepatan dan kecepatan putar yang ditetapkan.

Pembebanan dilakukan secara bertahap untuk mendapatkan nilai putaran yang diinginkan, kemudian dicatat gaya pengereman dan torsi. Pengulangan pengujian dilakukan untuk semua nilai kecepatan angin yang ditiupkan oleh blower. Selanjutnya pada kurva daya dilakukan tracking daya maksimum atau daya pada TSR optimum dimana daya yang diekstraksi maksimal. Metode ini memerlukan pengukuran kecepatan angin dan kecepatan turbin serta memerlukan pengetahuan tentang TSR optimal turbin agar sistem dapat mengekstraksi daya semaksimal mungkin.

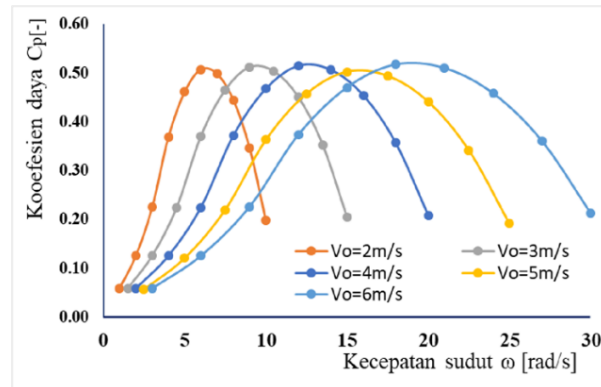
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Performance Turbin Pada Berbagai $R_{Lmax} = 150$

Pada Gambar 3 ditunjukkan bahwa nilai koefisien daya juga sangat ditentukan oleh

kecepatan angin dan kecepatan rotasi. Pada nilai ω yang rendah koefisien daya $C_p \approx 0,05$ dan meningkat sampai mencapai maksimum $C_p = 0.50 - 0.51$, kemudian turun pada peningkatan kecepatan rotasi dan mencapai minimum pada $C_p \approx 0.1$.

Selanjutnya sama dengan hasil yang peroleh untuk koefisien torsi C_p maksimum yang diperoleh pada interval angin $V_0 = 2 - 6$ m/s koefisien daya maksimum pada $\lambda = 1.5$ dengan nilai $\omega = 9,12, 15$ dan 18 rad/s.



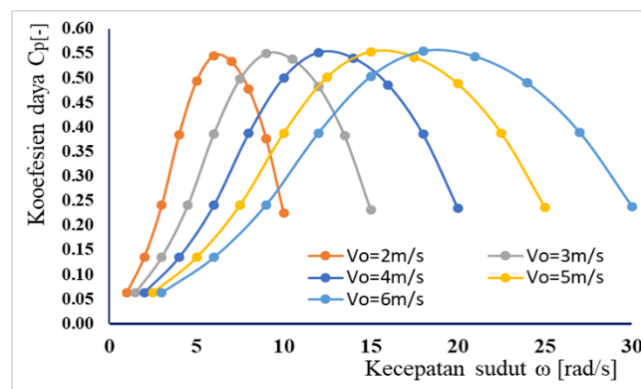
Gambar 3. Hubungan koefisien daya terhadap kecepatan rotasi poros pada berbagai nilai v_0

Nilai koefisien daya yang diperoleh dalam kasus turbin ini lebih rendah dari nilai Betz limit. Secara keseluruhan hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya dimana pada kurva koefisien daya C_p yang diperoleh the range of C_p 0.250.5 at $TSR = 2 - 8$ (Muheisen et al., 2023) hasil pengukuran pada turbin 3 blade (Predescu et al., 2009) dan sedikit lebih tinggi dari hasil penelitian pengaruh bilangan Reynolds pada optimalisasi sudu turbin angin untuk efisiensi aerodinamis maksimum (Ge et al., 2016) serta hasil validasi experimental untuk bare turbin (Kanya & Visser, 2018) serta terkonfirmasi dengan beberapa penelitian sejenis sebelumnya (Kleusberg et al., 2020)(Papi et al., 2021) turbin 3 blade (Muheisen et al., 2023)(Mühle et al., 2016)(Adeyeye et al., 2021).

B. Performance Turbin Pada Berbagai $R_{L,max} = 237$

Pada Gambar 4 ditunjukkan bahwa nilai koefisien daya juga sangat ditentukan oleh kecepatan angin dan kecepatan rotasi. Pada nilai ω yang rendah koefisien daya $C_p \approx 0,06$ dan meningkat sampai mencapai maksimum $C_p = 0.54 - 0.55$, kemudian turun pada peningkatan kecepatan rotasi dan mencapai minimum pada $C_p \approx 0.2$.

Selanjutnya sama dengan hasil yang peroleh untuk koefisien torsi C_p maksimum yang diperoleh pada interval angin $V_0 = 2 - 6$ m/s koefisien daya maksimum pada $\lambda = 1.5$ dengan nilai $\omega = 9,12, 15$ dan 18 rad/s.



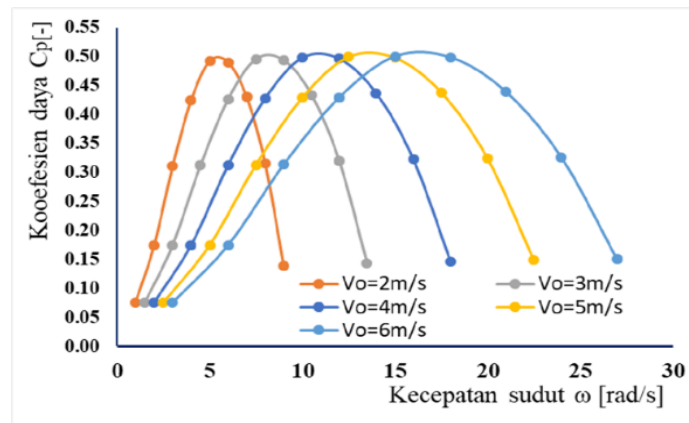
Gambar 4. Hubungan koefisien daya terhadap kecepatan rotasi poros pada berbagai nilai v_0

Nilai koefisien daya yang diperoleh dalam kasus turbin ini lebih rendah dari nilai Betz limit. Secara keseluruhan hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya dimana pada kurva koefisien daya C_p yang diperoleh the range of C_p 0.250.5 at $TSR = 2 - 8$ (Muheisen et al., 2023) hasil pengukuran pada turbin 3 blade (Predescu et al., 2009) dan sedikit lebih tinggi dari hasil penelitian pengaruh bilangan Reynolds pada optimalisasi sudu turbin angin untuk efisiensi aerodinamis maksimum (Ge et al., 2016) serta hasil validasi experimental untuk bare turbin (Kanya & Visser, 2018) serta terkonfirmasi dengan beberapa penelitian sejenis sebelumnya (Kleusberg et al., 2020)(Papi et al., 2021) turbin 3 blade (Muheisen et al., 2023)(Mühle et al., 2016)(Adeyeye et al., 2021).

C. Performance Turbin Pada Berbagai $R_{Lmax} = 325$

Pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa nilai koefisien daya juga sangat ditentukan oleh kecepatan angin dan kecepatan rotasi. Pada nilai ω yang rendah koefisien daya $C_p \approx 0,07$ dan meningkat sampai mencapai maksimum $C_p = 0.492 - 0.50$, kemudian turun pada peningkatan kecepatan rotasi dan mencapai minimum pada $C_p \approx 0.1$.

Selanjutnya sama dengan hasil yang peroleh untuk koefisien torsi C_p maksimum yang diperoleh pada interval angin $V_o = 2 - 6$ m/s koefisien daya maksimum pada $\lambda = 1.5$ dengan nilai $\omega = 9,12, 15$ dan 18 rad/s.



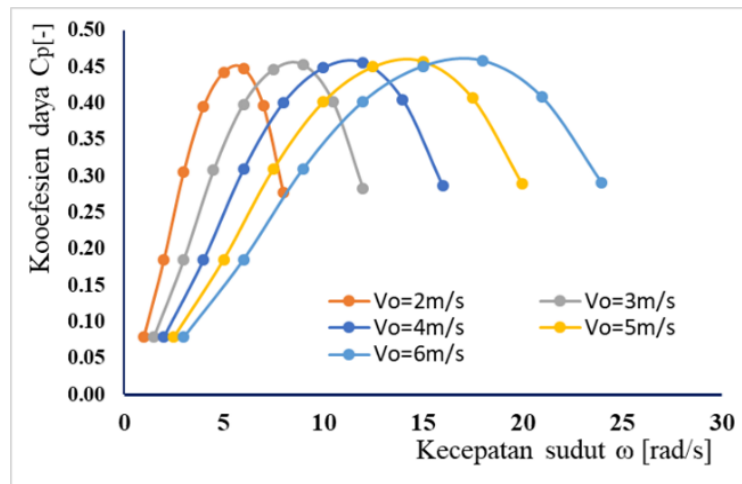
Gambar 5. Hubungan koefisien daya terhadap kecepatan rotasi poros pada berbagai nilai v_o .

Nilai koefisien daya yang diperoleh dalam kasus turbin ini lebih rendah dari nilai Betz limit. Secara keseluruhan hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya dimana pada kurva koefisien daya C_p yang diperoleh the range of C_p 0.250.5 at $TSR = 2 - 8$ (Muheisen et al., 2023) hasil pengukuran pada turbin 3 blade (Predescu et al., 2009) dan sedikit lebih tinggi dari hasil penelitian pengaruh bilangan Reynolds pada optimalisasi sudu turbin angin untuk efisiensi aerodinamis maksimum (Ge et al., 2016) serta hasil validasi experimental untuk bare turbin (Kanya & Visser, 2018) serta terkonfirmasi dengan beberapa penelitian sejenis sebelumnya (Kleusberg et al., 2020)(Papi et al., 2021) turbin 3 blade (Muheisen et al., 2023)(Mühle et al., 2016)(Adeyeye et al., 2021).

D. Performance Turbin Pada Berbagai $R_{Lmax} = 412$

Pada Gambar 6 ditunjukkan bahwa nilai koefisien daya juga sangat ditentukan oleh kecepatan angin dan kecepatan rotasi. Pada nilai ω yang rendah koefisien daya $C_p \approx 0,07$ dan meningkat sampai mencapai maksimum $C_p = 0.448 - 0.458$, kemudian turun pada peningkatan kecepatan rotasi dan mencapai minimum pada $C_p \approx 0.2$.

Selanjutnya sama dengan hasil yang peroleh untuk koefisien torsi C_p maksimum yang diperoleh pada interval angin $V_o = 2 - 6$ m/s koefisien daya maksimum pada $\lambda = 1.5$ dengan nilai $\omega = 9,12, 15$ dan 18 rad/s.



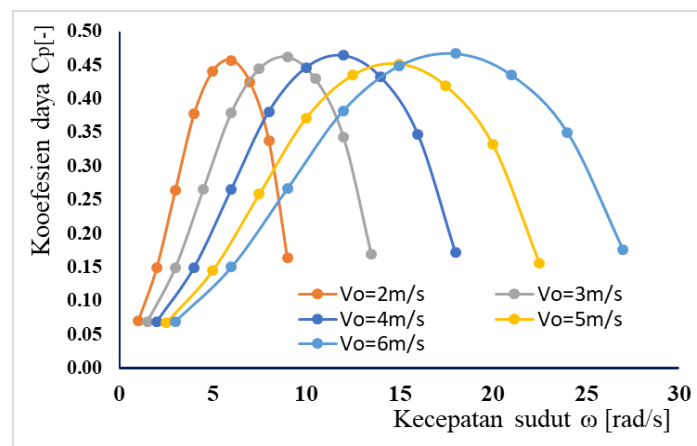
Gambar 6. Hubungan koefisien daya terhadap kecepatan rotasi poros pada berbagai nilai vo

Nilai koefisien daya yang diperoleh dalam kasus turbin ini lebih rendah dari nilai Betz limit. Secara keseluruhan hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya dimana pada kurva koefisien daya C_p yang diperoleh the range of C_p 0.250.5 at $TSR = 2 - 8$ (Muheisen et al., 2023) hasil pengukuran pada turbin 3 blade (Predescu et al., 2009) dan sedikit lebih tinggi dari hasil penelitian pengaruh bilangan Reynolds pada optimalisasi sudu turbin angin untuk efisiensi aerodinamis maksimum (Ge et al., 2016) serta hasil validasi experimental untuk bare turbin (Kanya & Visser, 2018) serta terkonfirmasi dengan beberapa penelitian sejenis sebelumnya (Kleusberg et al., 2020)(Papi et al., 2021) turbin 3 blade (Muheisen et al., 2023)(Mühle et al., 2016)(Adeyeye et al., 2021).

E. Performance Turbin Pada Berbagai $R_{L,max} = 500$

Pada Gambar 7 ditunjukkan bahwa nilai koefisien daya juga sangat ditentukan oleh kecepatan angin dan kecepatan rotasi. Pada nilai ω yang rendah koefisien daya $C_p \approx 0,06$ dan meningkat sampai mencapai maksimum $C_p = 0.452 - 0.467$, kemudian turun pada peningkatan kecepatan rotasi dan mencapai minimum pada $C_p \approx 0.1$.

Selanjutnya sama dengan hasil yang peroleh untuk koefisien torsi C_p maksimum yang diperoleh pada interval angin $V_o = 2 - 6$ m/s koefisien daya maksimum pada $\lambda = 1.5$ dengan nilai $\omega = 9,12, 15$ dan 18 rad/s.



Gambar 7. Hubungan koefisien daya terhadap kecepatan rotasi poros pada berbagai nilai vo

Nilai koefisien daya yang diperoleh dalam kasus turbin ini lebih rendah dari nilai Betz limit. Secara keseluruhan hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian sebelumnya

dimana pada kurva koefisien daya C_p yang diperoleh the range of C_p 0.250.5 at $TSR = 2 - 8$ (Muheisen et al., 2023) hasil pengukuran pada turbin 3 blade (Predescu et al., 2009) dan sedikit lebih tinggi dari hasil penelitian pengaruh bilangan Reynolds pada optimalisasi sudu turbin angin untuk efisiensi aerodinamis maksimum (Ge et al., 2016) serta hasil validasi experimental untuk bare turbin (Kanya & Visser, 2018) serta terkonfirmasi dengan beberapa penelitian sejenis sebelumnya (Kleusberg et al., 2020)(Papi et al., 2021) turbin 3 blade (Muheisen et al., 2023)(Mühle et al., 2016)(Adeyeye et al., 2021).

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dibuat kesimpulan bahwa panjang *chord* dengan hasil yang optimal yaitu pada radius 237 mm dan pada panjang *chord* 83 mm. Dengan nilai efisiensi yang mencapai 0.546 – 0.555 dengan kecepatan V_0 2 m/s – 6m/s.

TSR 1.5 dengan koefisien daya pada kecepatan V_0 2m/s mengalami kenaikan dengan nilai 0.546, dan pada kecepatan V_0 3m/s mengalami kenaikan dengan nilai 0.558, dan pada kecepatan V_0 4m/s mengalami kenaikan dengan nilai 0.552, dan pada kecepatan V_0 5m/s mengalami kenaikan dengan nilai 0.554, dan pada kecepatan 6m/s mengalami kenaikan dengan nilai 0.555 jadi, rata-rata nilai dengan koefisien daya tertinggi pada kecepatan V_0 3m/s pada TSR 1.5

DAFTAR PUSTAKA

- C. Yiğit and U. Durmaz, "Wind Turbine Blade Design with Computational Fluid Dynamics Analysis," *Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 44–49, 2017, doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijcesen/issue/31604/346639>.
- W. M. Rumaherang, B. Laconawa, N. Titahelu, and J. Louhenapessy, "Kajian Perbandingan Performance Energi Turbin Angin Model Ducted Dengan Un-Ducted," *J. Tek. Mesin, Elektro, Inform. Kelaut. dan Sains*, vol. 2, no. 1, pp. 56–64, 2022, doi: 10.30598/metiks.2022.2.1.56-64.
- S. J. Etwan Sarwuna, W. M. Rumaherang, and C. S. Edwina Tupamahu, "Sosialisasi & Pelatihan EBT untuk Menciptakan Kemandirian Penyediaan Listrik Secara Mandiri," *J. Pengabd. Masy.*, vol. 2, no. 1, pp. 161–169, 2022, doi: 10.31004/abdira.v2i1.48.
- M. D. Nursidik, I. N. Gusniar, V. Naubnome, and O. -, "Manufaktur Bilah Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Tipe Taperless Menggunakan Airfoil S3024 dengan Daya 500 WATT di PT. Lentera Bumi Nusantara," *Infomatek*, vol. 32, no. 2, pp. 79–90, 2021, doi: 10.23969/infomatek.v23i2.4405.
- H. Eftekhari, A. S. Mahdi Al-Obaidi, and S. Eftekhari, "Aerodynamic Performance of Vertical and Horizontal Axis Wind Turbines: A Comparison Review," *Indones. J. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 65–88, 2022, doi: 10.17509/ijost.v7i1.43161.
- Z. Zhang, "Conceptual Errors in Actuator Disc Theory and Betz's Law for Wind Turbines," *Energies*, vol. 15, no. 16, 2022, doi: 10.3390/en15165902.
- A. Fadila and I. Zakaria, "Rancang Bangun Turbin Angin Tipe Darrieus Tiga Sudu Rangkap Tiga dengan Profil NACA 0006," *Eksergi*, vol. 15, no. 3, p. 102, 2020, doi: 10.32497/eksergi.v15i3.1785.
- P. Kecepatan Angin and F. Aryanto, "(0370) 636087; 636126," *Din. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 1, p. 636087, 2013.
- R. Aji Saputra, C. G. Indra Partha, and I. W. Sukerayasa, "Rancang Bangun Sistem Pemanen Energi Angin Exhaust Fan Turbin Angin Sumbu Horizontal Dengan Pengarah Angin (Wind Tunnel)," *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 2, p. 229, 2021, doi: 10.24843/spektrum.2021.v08.i02.p26.