

STUDI PERFORMANCE TURBIN ANGIN AKSIAL KECEPATAN RENDAH 3 BLADE DENGAN PROFIL AIRFOIL NACA 6 DIGIT

Corrie Refwalu¹, Wulfilla M. Rumaherang², Salvester Maitimu³

¹S1 Teknik Mesin Universitas Pattimura
Email: corierefwalu27@gmail.com

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas ---
Email: max.rumaherang@fatek.unpatti.ac.id

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. 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 *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA) 6 digit pada data base NACA dengan melakukan eksperimen dengan pembebanan bertahap pada range kecepatan angin 2-6 m/s dengan putaran turbin sesuai nilai *tip speed ratio* (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 tracking titik *maximum power point* (MPP) yang diperoleh menunjukkan bahwa MPP model turbin dalam kasus ini adalah 0.86 kali daya turbin (Betz limit) atau 0.51 kali daya kinetic angin, sehingga profil airfoil NACA 6 digit ini dapat digunakan pada turbin angin dengan kecepatan 2-8 m/s.

Kata Kunci : model turbin angin 3 blade, NACA 6 digit, koefisien torsi, koefisien daya, MPP.

Abstract One of the challenges of developing wind turbines based on wind potential data in the Maluku region is that most areas have low-speed wind potential ranging from 2-6 m/s, so a precise analysis of the application of the technology is needed. The power coefficient of open flow turbines in several previous studies for bare turbines has low power coefficients. However, several hydrodynamic simulation results show that the power coefficient is close to the Betz limit value. In this case, the shape of the airfoil blade used has a significant role. This research is a review of the use of the 6-digit National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) airfoil profile in the NACA database by conducting experiments with gradual loading in the wind speed range of 2-6 m/s with turbine rotation according to the specified tip speed ratio (TSR) value. A comparison of maximum power or power at optimum rotational speed is carried out through tracking of maximum power point at TSR or optimum rotational speed to

determine airfoil performance. The maximum power point (MPP) tracking results obtained show that the MPP of the turbine model, in this case, is 0.86 times the turbine power (Betz limit) or 0.51 times the wind kinetic power, so that this 6-digit NACA airfoil profile can be used in wind turbines with speeds of 2- 8m/s.

Keywords: 3-blade wind turbine model, 6-digit NACA, torque coefficient, power coefficient, MPP

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* [1]. Salah satu sumber energi alternatif yang alami, terbarukan dan bersih adalah pembangkit listrik tenaga angin. Saat ini, kebutuhan listrik meningkat pesat karena kemajuan teknologi [2].

Permasalahan adalah tidak semua wilayah mempunyai potensi angin yang tinggi, bahkan pada kepulauan Maluku kecepatan angin berkisar antara 2-6 m/s [3][4] 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* [5] dan *dan sumbu vertikal* [6].

Teori momentum elementer Betz [7] digunakan untuk analisis konversi energi turbin angin dengan pemodelan aliran dua dimensi [8]. 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 [9].

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 $C_{p\text{blade max}} = 0.38$ [10][11]. Dan pada kecepatan angin 2-8 m/s koefisien daya berkisar antara C_p 0.25-0.5 at $TSR = 2 - 8$ [12]. Dalam beberapa penelitian sebelum koefisien daya untuk turbin 3 lebih kecil dari nilai Betz dimaksud [3][7][13]. 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* [14] dengan jumlah blade ideal dengan pembagian gaya dan keseimbangan yang baik adalah 3 blade [15] serta penggunaan ducted pada turbin yang dapat meningkatkan koefisien daya sampai 72% [16][3][17].

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 [2].

Disisi diperlukan tinjauan lebih lanjut untuk kondisi kecepatan angin diatas dengan menggunakan profil airfoil NACA [18] 6 digit pada data base untuk mendapatkan *performace* yang lebih baik. Posisi sudut serang pada setiap radius [9] 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 Cp tertinggi, yaitu pada *maximum power point* (MPPT) [19][20][21] koefisien daya Cp, koefisien thrust (Ct) dan koefisien torsi Cq terhadap nilai tip speed ratio (TSR) dan kecepatan turbin ω (rad/s) dengan melakukan eksperimen pada bangku uji model turbin [3].

2. METODE

2.1 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) [3], [22]

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

Dimana P_{ke} adalah daya kinetik, A adalah luasan *Swept* (m²) dan V_0 adalah kecepatan angin [10]. Daya yang dibangkitkan turbin dinyatakan dengan persamaan (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 [23], [24] :

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

Dimana ρ adalah densitas udara (kg/m³), C_p adalah koefisien daya turbin.

λ adalah *tip speed ratio* yang ditulis sebagai [11][19]:

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

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) [7].

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

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

Selanjutnya daya poros turbin ditentukan dengan persamaan [11]:

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

Gaya pada piringan aktuator yang disebabkan oleh penurunan tekanan juga dapat tidak didimensikan untuk memberikan koefisien dorong [25]

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

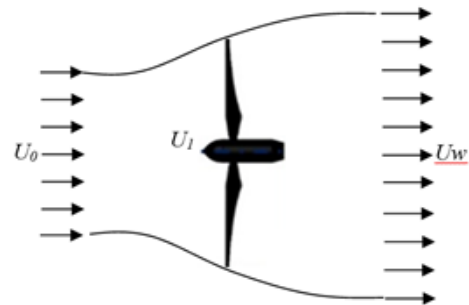
Dan koefisien daya Cp dinyatakan sebagai :

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

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 $C_p = 0.593$ [26].

2.2 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 [27]. *Disk* aktuator ekstraksi energi dan tabung aliran pada gambar 1 digunakan untuk melakukan analisis proses konversi energi kinetic angin, dimana kerja turbin tergantung pada interaksi antara rotor dan angin [28]. Disk diletakkan tegak lurus dengan kecepatan bebas U_0 dan berputar dengan kecepatan sudut ω [26].



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 [29].

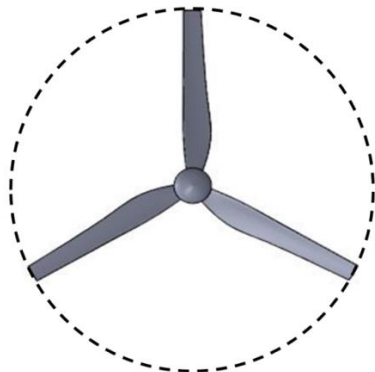
Desain turbin angin sumbu *horizontal* praktis membutuhkan *airfoil* untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi yang berguna. Setiap desain rotor mempunyai kelebihan dan kekurangan [30].

2.3 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 = 150 [mm]
- Thickness = 90 %

Dalam penelitian ini digunakan rotor turbin dengan 3 blade (Gambar 2). Pengujian dilakukan pada Laboratorium steam plant dengan objek penelitian yaitu model Unshrouded turbin dengan diameter impeller $D_1 = 1$ meter [3].



Gambar 2. Impeller Turbin

Proses pengujian didasarkan pada data kecepatan angin yang telah diperoleh dari hasil observasi data potensi energi angin, [3], [4] dan perhitungan parameter output dasar aliran energi angin dan turbin, desain konstruksi model dan komponen-komponen model dan turbin model, *assembling*, *setting* instalasi pengujian, pengujian model dan adaptasi proses *experimental*.

Penelitian ini dilakukan secara *experimental* pada bangku uji [3]. 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 ditupkan oleh blower.

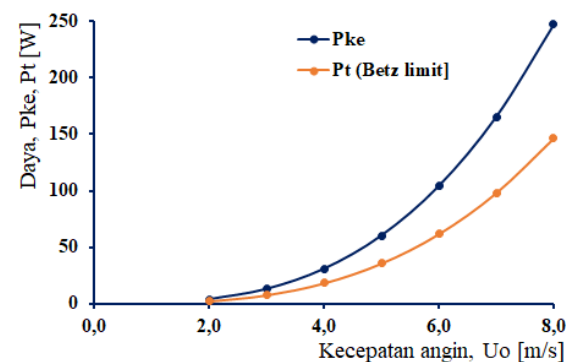
Selanjutnya pada kurva daya dilakukan tracking daya maksimum atau daya pada TSR optimum dimana daya yang diekstraksi maksimal [29]. Metode ini memerlukan pengukuran kecepatan angin dan kecepatan turbin serta memerlukan pengetahuan tentang TSR optimal turbin agar sistem dapat mengekstraksi daya semaksimal mungkin.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Daya Kinetic

Berdasarkan teori disk aktuator yang dinyatakan melalui persamaan (1), persamaan (2), maka daya kinetik angin dan daya turbin pada interval kecepatan angin $U_o = 2 - 8$ m/s ditampilkan pada gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan bahwa daya yang dipeoleh turbin memiliki tren yang sama berdasarkan kecepatan angin dan interaksi U_o pada rotor. Pada interval kecepatan angin diatas daya kinetik berada pada interval $3,8 \div 247$ Watt.



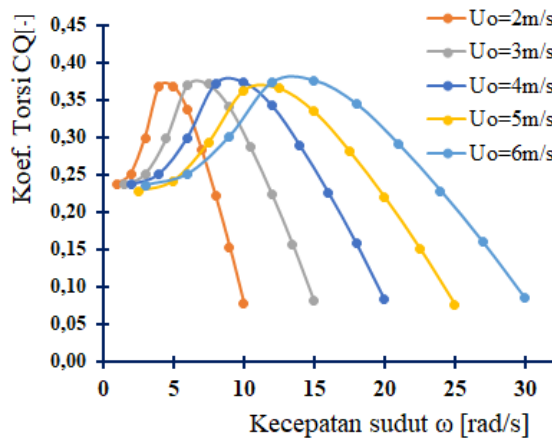
Gambar 3. Kurva daya kinetik dan daya turbin HAWT

3.2. Rotor performance.

Besaran mekanik yang akan menghubungkan angin turbin dengan generator

adalah torsi dan kecepatan putaran pada poros, dimana torsi tergantung pada kecepatan putaran ω [31]. Hasil yang diperoleh menunjukkan hubungan torsi yang diinduksi oleh blade turbin terhadap kecepatan rotasi yang berhubungan dengan tip speed ratio λ dan kecepatan angin (persamaan 4).

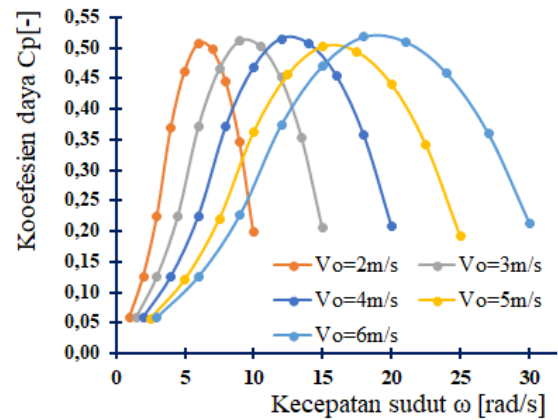
Torsi yang dibangkitkan blade pada poros turbin dengan kecepatan rotasi ω ditampilkan pada gambar 4. Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai koefisien torsi sangat ditentukan oleh kecepatan angin dan kecepatan rotasi. Pada nilai ω yang rendah koefisien torsi $C_q = 0,23 \div 0,24$ dan meningkat sampai mencapai maksimum $C_Q=0.37 \div 0.375$, kemudian turun pada peningkatan kecepatan rotasi. Pada kecepatan angin $U_o=2$ m/s koefisien torsi maksimum diperoleh pada putaran $\omega=6$ rad/s atau pada $\lambda = 1.5$. Pada kecepatan angin $U_o=2$ m/s koefisien torsi maksimum diperoleh pada putaran $\omega=6$ rad/s atau pada $\lambda = 1.5$. dan selanjutnya secara berturut-turut untuk kecepatan 3 \div 6 m/s dalam eksperimen ini nilai C_Q maksimum diperoleh pada nilai $\omega = 9,12, 15$ dan 18 rad/s.



Gambar 4. Hubungan koefisien torque terhadap kecepatan rotasi poros pada berbagai nilai U_o .

Standar universal untuk menilai kinerja turbin angin adalah plot kurva kinerja koefisien daya versus tip speed ratio (TSR) λ . Kurva ini menunjukkan seberapa efisien turbin mengubah energi angin menjadi listrik. Berbagai metode digunakan untuk memplot kurva ini, dan hasil

yang diperoleh pada penelitian ini ditampilkan dalam gambar 5.



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

Sama dengan hasil yang diperoleh untuk koefisien torsi, pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa nilai koefisien daya juga sangat ditentukan oleh kecepatan angin dan kecepatan rotasi. Pada nilai ω yang rendah koefisien torsi $C_p \approx 0,06$ dan meningkat sampai mencapai maksimum $C_p = 0.51 - 0.52$, kemudian turun pada peningkatan kecepatan rotasi dan mencapai minimum pada $C_p \approx 0.2$.

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

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 0.25-0.5 at $TSR = 2 - 8$ [12] hasil pengukuran pada turbin 3 blade [32] dan sedikit lebih tinggi dari hasil penelitian pengaruh bilangan Reynolds pada optimalisasi sudu turbin angin untuk efisiensi aerodinamis maksimum [33] serta hasil validasi ekperimental experimental untuk bare turbin [34] serta terkonfirmasi dengan beberapa penelitian sejenis sebelumnya [35][36] turbin 3 blade [12][37][38].

3.3. Perbandingan daya maksimum MPPT dengan daya Turbin Betz Limit

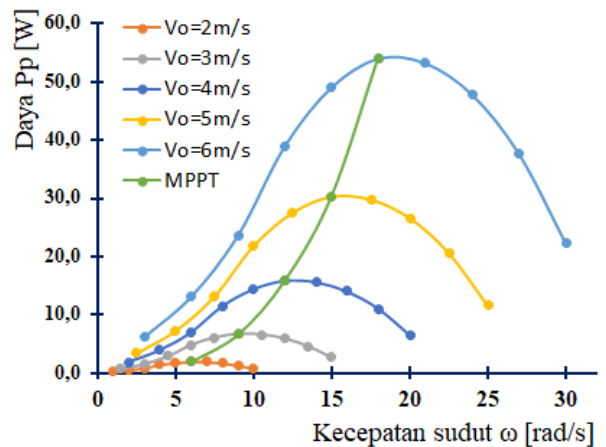
Perubahan daya mekanis dengan berdasarkan nilai putaran yang dibangkitkan turbin dapat diamati melalui kurva daya pada terhadap nilai putaran untuk berbagai nilai kecepatan angin dan TSR. Nilai dapat diukur menggunakan sensor mekanis. Dalam penelitian ini nilai daya maksimum pada pada berbagai nilai parameter-parameter diatas diplot untuk melihat maksimum daya trackingnya. Daya maksimum turbin pada kurva daya (gambar 3) akan dibandingkan dengan tracking yang dilakukan untuk nilai daya maksimum dalam hubungan dengan putaran turbin.

Pada sistem energi angin yang berkecepatan variabel diperlukan perangkat elektronika daya yang dapat mengekstraksi daya maksimum dari angin, meringankan beban puncak di drive train, dan menyuplai daya reaktif sesuai permintaan [39]. Ekstraksi energi maksimum, kecepatan turbin harus divariasikan dengan kecepatan angin sehingga tip speed rasio optimal yang dijaga konstan.

Sama dengan hasil yang peroleh untuk koefisien torsi dan koefisien daya, pada Gambar 6 ditunjukkan hubungan daya dengan kecepatan rotasi pada berbagai nilai kecepatan angin. Daya minimum diperoleh pada nilai ω yang rendah dan meningkat dengan peningkatan putaran dan kecepatan angin.

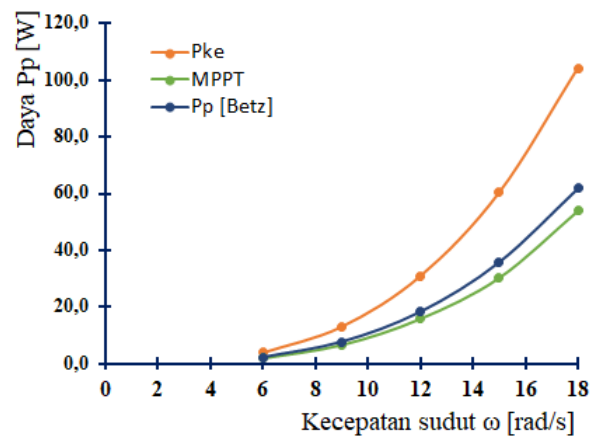
Titik daya maksimum (MPP) ditentukan pada kecepatan rotasi optimal atau tip speed rasio optimal. Pada gambar 6, daya maksimum pada kecepatan $\omega = 9, 12, 15$ dan 18 rad/s pada TSR optimal ($\lambda = 1.5$) dan berturut-turut adalah $P_p = 2, 6, 7, 15, 9, 30, 4$ dan $54, 0$ Watt.

Berdasarkan data tracking daya maksimum pada gambar 6, selanjutnya dapat ditentukan perbandingan kinerja turbin dengan daya kinetic P_{ke}, daya turbin (Betz limit) dan daya turbin aktual berdasarkan tracking daya pada TSR maksimum tersebut. Gambar 7 menunjukkan hubungan kombinasi daya kinetic dan daya turbin (Betz) pada gambar 3 serta hasil tracking pada gambar 6.



Gambar 6. Kurva Daya dan MPP turbin

Gambar 7 menunjukkan bahwa daya masukan turbin Betz sedikit lebih besar daripada daya yang dibangkitkan oleh kerja blade yang dihasilkan akibat kerugian aliran dan aliran pada blade. Garis MPP merupakan daya ekstraksi yang relatif optimal. Hasil ini menunjukkan kesesuaian dengan hasil penelitian pemodelan dan pengendalian variable kecepatan untuk sistem konversi energi angin [29].



Gambar 7. Kurva daya P_{ke}, P_t [Betz] dan MPP turbin

Perbandingan kurva MPP, P_{tBetz} dan P_{ke} menunjukkan bahwa daya maksimum actual pada poros turbin MPP adalah 0.86 kali daya turbin (Betz limit) atau 0.51 kali daya kinetic angin.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dibuat kesimpulan bahwa ekstraksi energi maksimum pada tip speed rasio optimal yang dijaga konstan, dan kecepatan rotasi bergantung pada besarnya kecepatan angin. Daya maksimum aktual pada poros turbin MPP adalah 0.86 kali daya turbin (Betz limit) atau 0.51 kali daya kinetic angin. Hal ini menunjukkan bahwa profil airfoil NACA 6 digit (NACA xx-xxxx) yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai performance aerodinamika yang baik dan cocok digunakan untuk turbin angin dengan kecepatan $2 \div 8$ m/s.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] “,Penurunan Emisi Sektor Energi 2021 Berhasil Lampau Target,” *Kementerian ESDM*, 2021. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2022/09/08/3254/penurunan.emisi.sektor.energi.2021.berhasil.lampau.target>
- [2] 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>.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] P. Kecepatan Angin and F. Aryanto, “(0370) 636087; 636126,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 1, p. 636087, 2013.
- [10] 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.
- [11] M. Suzuki, “Numerical Analysis of Horizontal-Axis Wind Turbine Characteristics in Yawed Conditions,” *Open J. Fluid Dyn.*, vol. 02, no. 04, pp. 331–336, 2012, doi: 10.4236/ojfd.2012.24a041.
- [12] A. H. Muheisen, M. A. R. Yass, and I. K. Irthia, “Enhancement of horizontal wind turbine blade performance using multiple airfoils sections and fences,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 69–81, 2023, doi: 10.1016/j.jksues.2021.02.014.
- [13] R. Vennell, S. W. Funke, S. Draper, C. Stevens, and T. Divett, “Designing large arrays of tidal turbines: A synthesis and review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*,

- vol. 41, pp. 454–472, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.022.
- [14] J. Zhu, X. Cai, and R. Gu, “Aerodynamic and Structural Integrated Optimization Design of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades,” *Energies*, vol. 9, no. 2, p. 66, 2016, doi: 10.3390/en9020066.
- [15] I. Sadrehaghghi, “Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT) with Case Studies,” *Annapolis, Md*, no. 02, pp. 1–112, 2022, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/338670555>
- [16] B. A. J. Al-Quraishi, N. Z. B. Asmuin, S. Bin Mohd, W. A. Abd Al-Wahid, A. N. Mohammed, and D. H. Didane, “Review on diffuser augmented wind turbine (DAWT),” *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 178–206, 2019, doi: 10.30880/ijie.2019.11.01.021.
- [17] K. Watanabe, Y. Ohya, and T. Uchida, “Power output enhancement of a ducted wind turbine by stabilizing vortices around the duct,” *Energies*, vol. 12, no. 16, 2019, doi: 10.3390/en12163171.
- [18] Pranoto and A. Akbar, “Analisa Daya Turbin Angin Sumbu Horizontal Profil NACA 0015 Dengan Variasi Jumlah Blade,” pp. 147–152, 2018.
- [19] A. E. M. M. Hassan, M. A. Sayed, and E. E. M. Mohamed, “Three-Phase Matrix Converter Based Sliding Mode Controller Applied to Wind Energy Conversion System with Wind Speed Estimation,” vol. 2, no. 5, pp. 22–30, 2016, doi: 10.11648/j.ajme.20160205.11.
- [20] M. S. Haider Khan and S. Kumar Mallik, “Mechanical sensorless control of a rotor-tied DFIG wind energy conversion system using a high gain observer,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.jksues.2022.05.005.
- [21] X. Zhang, J. Jia, L. Zheng, W. Yi, and Z. Zhang, “Maximum power point tracking algorithms for wind power generation system: Review, comparison and analysis,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 430–444, 2023, doi: 10.1002/ese3.1313.
- [22] W. M. Rumaherang, “The effect of diameter ratio on energy parameters of the tidal turbine tidal turbine,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.29303/dtm.v10i1.306.
- [23] M. L. Hansen, N. N. Sørensen, and R. G. J. Flay, “Effect of Placing a Diffuser around a Wind Turbine,” *Wind Energy*, vol. 3, pp. 2007–2013, 2000, doi: <https://doi.org/10.1002/we.37>.
- [24] K. K. M. S. Kariyawasam, K. K. N. P. Karunaratna, R. M. A. Karunaratne, M. P. D. S. C. Kularathne, and K. T. M. U. Hemapala, “Design and Development of a Wind Turbine Simulator Using a Separately Excited DC Motor,” *Smart Grid Renew. Energy*, vol. 04, no. 03, pp. 259–265, 2013, doi: 10.4236/sgre.2013.43031.
- [25] A. T. De Oliveira, A. Carolina, and R. Maia, “ANALYSIS OF A VERTICAL-AXIS WIND TURBINE WITH BLADE PITCH CONTROL ANALYSIS OF A VERTICAL-AXIS WIND TURBINE WITH BLADE PITCH CONTROL MECHANISM by Kimberlly Costa Carvalho , Rafael Alves da Silva Oriented by: Dietmar Rempfer Final Report for Summer Researc,” no. July 2016, 2017.
- [26] G. A. M. Van Kuik, “On the velocity at wind turbine and propeller actuator discs,” *Wind Energy Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 855–865, 2020, doi: 10.5194/wes-5-855-2020.
- [27] D. J. Sharpe, “A general momentum theory applied to an energy-extracting actuator disc,” *Wind Energy*, vol. 7, pp. 177–188, 2004, doi: <https://doi.org/10.1002/we.118>.
- [28] G. A. M. Van Kuik, J. N. Sørensen, and V. L. Okulov, “Rotor theories by Professor Joukowsky: Momentum theories,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 73, no. February, pp. 1–18, 2015, doi: 10.1016/j.paerosci.2014.10.001.
- [29] B. Maghni, A. Saadoun, D. Dib, and A. Yassine, “Modeling and Control of a Variable-Speed for Permanent Magnet

- Direct Drive Wind Energy Conversion Systems,” no. May 2016, 2020.
- [30] C. S. Yusuf Ismail Nakhoda, “Pembangkit Listrik Tenaga Angin Sumbu Vertikal Untuk Penerangan Rumah Tangga Di Daerah Pesisir Pantai,” *Inst. Teknol. Nas. Malang*, vol. 7, no. 1, pp. 20–28, 2017.
- [31] A. Benatiallah, D. Benatiallah, T. Ghaitaoui, A. Harrouz, and S. Mansouri, “Modelling and simulation of renewable energy systems in Algeria,” *Int. J. Sci. Appl. Inf. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 17–22, 2017, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/325313792_Modelling_and_Simulation_of_Renewable_Energy_Systems_in_Algeria/figures?lo=1
- [32] M. Predescu, A. Bejinariu, O. Mitroi, and A. Nedelcu, “Influence of the number of blades on the mechanical power curve of wind turbines,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 7, pp. 825–830, 2009, doi: 10.24084/repqj07.519.
- [33] M. Ge, D. Tian, and Y. Deng, “Reynolds Number Effect on the Optimization of a Wind Turbine Blade for Maximum Aerodynamic Efficiency,” *J. Energy Eng.*, vol. 142, no. 1, 2016, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000254.
- [34] B. Kanya and K. D. Visser, “Experimental validation of a ducted wind turbine design strategy,” *Wind Energy Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 919–928, 2018, doi: 10.5194/wes-3-919-2018.
- [35] E. Kleusberg, P. Schlatter, and D. H. S., “Wind Energy - 2020 - Kleusberg - Parametric dependencies of the yawed wind-turbine wake development.pdf,” *Wind Energy*, vol. 23, pp. 1367–1380, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/we.2395>.
- [36] F. Papi, A. Nocentini, G. Ferrara, and A. Bianchini, “On the use of modern engineering codes for designing a small wind turbine: An annotated case study,” *Energies*, vol. 14, no. 4, 2021, doi: 10.3390/en14041013.
- [37] F. Mühle, M. S. Adaramola, and L. Sretran, “The effect of the number of blades on wind turbine wake - A comparison between 2-and 3-bladed rotors,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 753, no. 3, 2016, doi: 10.1088/1742-6596/753/3/032017.
- [38] K. A. Adeyeye, N. Ijumba, and J. Colton, “The Effect of the Number of Blades on the Efficiency of A Wind Turbine,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 801, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/801/1/012020.
- [39] M. Kesraoui, N. Korichi, and A. Belkadi, “Maximum power point tracker of wind energy conversion system, Renewable Energy,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2655–2662, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.028>.