

OPTIMALISASI METODE *BLADE* TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL

Fathur Rahman¹, Ika Nurjannah², Handini Novita Sari³, Alexander Christian⁴, Muhammad Khoirul Hidayat⁵

^{1,2,3}Teknik Mesin, Universitas Negeri Surabaya

¹fathur.20066@mhs.unesa.ac.id

²ikajannah@unesa.ac.id

³handinisari@unesa.ac.id

⁴alexander.20071@mhs.unesa.ac.id

⁵muhammadkhoirul.20076@mhs.unesa.ac.id

Abstrak—Tenaga listrik dapat diperoleh dari pembangkit listrik berbahan baku yang tidak terbaharukan (*unrenewable energy*) maupun energi yang terbarukan (*renewable energy*). Namun ketersediaan dari bahan baku *unrenewable energy* saat ini semakin menipis. Salah satu sumber energi dengan potensi yang menjanjikan di Indonesia adalah angin. Tercatat dari sumber *DG of NREEC* bahwa Indonesia memiliki potensi energi angin sebesar 60,6 Giga Watt (GW) dengan potensi energi terbarukan total sebesar 442 GW. Pemanfaatan turbin angin mampu mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Salah satu jenis turbin angin yang paling umum adalah turbin angin sumbu horizontal. Penelitian ini menggunakan metode *study literature* yang bertujuan untuk membandingkan dan merangkum data optimalisasi variasi jumlah *blade* dan kecepatan angin pada turbin angin sumbu horizontal dari berbagai sumber. Hasil penelitian diketahui daya *pinwheel* yang dihasilkan oleh rotasi *blade pinwheel* menghasilkan energi yang dikonversi menjadi energi listrik. Kecepatan angin dan hasil rotasi *blade* secara langsung proporsional terhadap energi yang dihasilkan. Semakin besar kecepatan angin yang diberikan pada turbin, akan menghasilkan putaran yang semakin tinggi. Variasi jumlah *blade* menghasilkan variasi dalam sifat rotasi, karena efek dari rasio kecepatan ujung berbanding terbalik dengan kecepatan angin. Performa turbin angin sumbu horizontal dapat dioptimalkan dengan pengaplikasian desain *blade* menggunakan metode linierisasi *chord* dan *twist*. Efisiensi terbesar dari turbin angin poros horizontal kontra-rotasi dicapai pada sudut sudu 10° dan kecepatan angin 4,03m/s, menghasilkan efisiensi maksimum hingga 71,8%, yang lebih tinggi dari koefisien daya rotor tunggal optimal sebesar 59%. Ini berarti turbin angin rotor ganda lebih efisien dalam mengkonversi energi dibandingkan turbin angin rotor tunggal.

Kata Kunci— Tenaga Listrik; Turbin Angin; kecepatan; efisiensi.

Abstract—Electric power can be obtained from power plants made from unrenewable energy and renewable energy. However, the availability of unrenewable energy raw materials is currently running low. One of the energy sources with promising potential in Indonesia is wind. The utilization of wind turbines is able to convert wind energy into electrical energy. It is recorded from the *DG of NREEC* source that Indonesia has a wind energy potential of 60.6 Giga Watt (GW) with a total renewable energy potential of 442 GW. One of the most common types of wind turbines is the horizontal axis wind turbine. This study uses a literature study method that aims to compare and summarize data optimizing variations in the number of blades and wind speed on horizontal axis wind turbines from various sources. The results of the study are known that the *pinwheel* power generated by the rotation of the *pinwheel blade* produces energy that is converted into electrical energy. The wind speed and blade rotation yield are directly proportional to the energy produced. The greater the wind speed given to the turbine, the higher the rotation. Variations in the number of blades result in variations in rotational properties, since the effect of the ratio of tip speed is inversely proportional to wind speed. The performance of horizontal axis wind turbines can be optimized by applying blade design using *chord* and *twist* linearization methods. The greatest efficiency of the counter-rotational horizontal shaft wind turbine is achieved at a blade angle of 10° and a wind speed of 4.03m/s, resulting in a maximum efficiency of up to 71.8%, which is higher than the optimal single-rotor power coefficient of 59%. This means dual-rotor wind turbines are more efficient at converting energy than single-rotor wind turbines.

Keywords— Electric Power; Wind Turbine; speed; efficiency.

PENDAHULUAN

Tenaga listrik merupakan salah satu sistem energi yang memegang kontribusi penting dalam pembangunan ekonomi negara, terutama untuk kalangan masyarakat industri dan rumah tangga dalam melakukan usahanya. Seiring berjalannya waktu, peningkatan pertumbuhan ekonomi selaras dengan penggunaan energi listrik yang meningkat [1].

Minyak bumi dan batu bara merupakan bahan pokok yang tidak terbarukan (*unrenewable energy*), serta seiring bertambahnya tahun ketersediaannya akan semakin habis. Berdasarkan pencatatan pada tahun 2018, Indonesia memiliki total produksi batu bara sebesar 557 juta ton, porsi ekspor mencapai 357 juta ton (63%). Sementara itu, konsumsi batu bara domestik mencapai 115 juta ton, sedangkan target konsumsi batubara domestik sebesar 121 juta ton, dapat diartikan jumlah tersebut lebih kecil dari target. Salah satu faktor yang mempengaruhi hal tersebut adalah pengoperasian beberapa Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) program 35.000 Mega Watt (MW) tidak sesuai perencanaan dan terdapat beberapa kegiatan industri yang mengalami penurunan [1].

Angin adalah satu dari beberapa jenis energi alternatif terbarukan (*renewable energy*) yang memiliki potensi cukup menjanjikan untuk digunakan sebagai pembangkit listrik di Indonesia. Tercatat dari sumber *DG of NREEC* bahwa Indonesia memiliki potensi energi angin sebesar 60,6 Giga Watt (GW) dengan potensi energi terbarukan total sebesar 442 GW [1].

Turbin angin merupakan media yang dapat mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik. Untuk menentukan performa pembangkit listrik tenaga angin salah satunya dipengaruhi oleh desain turbin angin. Secara garis besar turbin angin terbagi atas turbin pada sumbu horizontal dan sumbu vertikal. Pada umumnya turbin angin yang sering digunakan yaitu turbin pada sumbu horizontal karena mampu menghasilkan energi listrik yang besar [2].

Studi terkait variasi rasio diameter antara rotor depan dengan rotor belakang $D1/D2 = 1$ pada turbin angin sumbu horizontal tipe *double rotor counter-rotation* menghasilkan torsi yang terbaik, daya dan efisiensi turbin meningkat serta mampu memberikan pengaruh terhadap *performance* aerodinamika dari (*Counter Rotating Wind Turbine*) CRWT [3].

Pengembangan turbin angin menunjukkan peningkatan karena dampak yang dirasakan dari penggunaan pembangkit listrik tenaga angin membutuhkan biaya yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan. Efisiensi konversi energi turbin angin dapat dilihat dengan koefisien daya yang bisa diperoleh dari perbandingan antara daya mekanik turbin angin dengan daya angin [4].

Penelitian pengembangan turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbin*) telah banyak dilakukan untuk menghasilkan sistem yang mampu bekerja secara optimal. Salah satu caranya dengan menggunakan sudu (*blade*) berjumlah banyak dan adanya pengaruh dari variasi kecepatan [5] [7] [8]. Untuk itu perlu adanya study lebih lanjut dalam membandingkan dan merangkum optimalisasi variasi jumlah

blade dan kecepatan angin pada turbin angin sumbu horizontal dari berbagai sumber.

Kincir angin merupakan sebuah alat yang menghasilkan energi mekanik atau gerak dengan memanfaatkan tenaga angin. Sedangkan kincir angin yang mampu menghasilkan sebuah energi listrik dengan cara mengubah energi angin menjadi energi mekanik yang memanfaatkan putaran kincir untuk memutar generator disebut turbin angin (*wind turbine*) [6].

Berdasarkan posisi porosnya, turbin angin dibedakan menjadi dua yaitu turbin angin poros horizontal dan turbin angin poros vertikal [6]. Turbin angin poros horizontal memiliki poros rotor utama dan generator listrik pada puncak menara, sedangkan turbin angin poros vertikal memiliki sumbu tegak yang gerakan poros dan rotornya sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin.

Untuk memudahkan dalam melakukan analisis data, diperlukan beberapa teori dan rumus sebagai berikut:

1. Besar daya turbin angin diperoleh dari torsi rotor dikalikan dengan kecepatan sudut.

$$P_{out} = \tau \cdot \omega \quad (1)$$

Dimana, τ = torsi rotor dan ω = kecepatan sudut.

2. Koefisien daya dapat dihitung sebagai perbandingan antara daya turbin angin keluar dan daya turbin angin masuk [4].

$$C_p = P_{out} / P_{in} \quad (2)$$

Dimana: C_p : Koefisien daya

3. Daya input turbin angin merupakan massa jenis udara dikali 1/2 luas baling-baling dan kecepatan angin atau daya angin sebelum melewati turbin [4]. Perlu diketahui, tidak semua daya yang ditangkap bisa dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin, sehingga untuk mencari daya input turbin bias menggunakan persamaan:

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

Dimana: P_{in} : Daya input; ρ = massa jenis udara; A: luas baling-baling; v = Kecepatan

4. Daya generator merupakan tegangan dikalikan arus listrik. Semakin kecil daya pada generator akan berakibat semakin kecil efisiensi generator [4]. Untuk menghitung nilai daya listrik dapat menggunakan persamaan (4).

$$P_{generator} = V \times I \quad (4)$$

Dimana: $P_{generator}$ = daya generator; V = tegangan; I = arus

5. Efisiensi generator diperoleh dari perbandingan daya generator dengan daya input dikali efisiensi maksimum (100%) [4].

$$N_g = P_{generator} / P_{in} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana: N_g : Efisiensi generator

6. Torsi merupakan produk dari gaya beban dan panjang lengan. [6].

$$T = F \cdot l \quad (6)$$

Dimana, T = Torsi; F = gaya pembebanan dan l = panjang lengan.

7. *Tip speed ratio* (TSR) adalah rasio kecepatan linier lingkaran luar turbin angin dengan kecepatan angin. [6].

$$tsr = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad (7)$$

Dimana, tsr = rasio kecepatan linier; r = jari-jari lingkaran; v = kecepatan angin.

8. Torsi merupakan gaya puli dikalikan jari puli. Persamaan dapat digunakan pada sistem pengereman dan penahan beban pada puli yang berputar dapat dihitung:

$$\mathbf{T} = \mathbf{F} \times \mathbf{r} \quad (8)$$

9. Daya turbin merupakan nilai keluaran dari turbin angin [5].

$$P_m = T \cdot \omega \quad \omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (9)$$

10. Koefisien torsi [5].

$$Cq = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R} \quad (10)$$

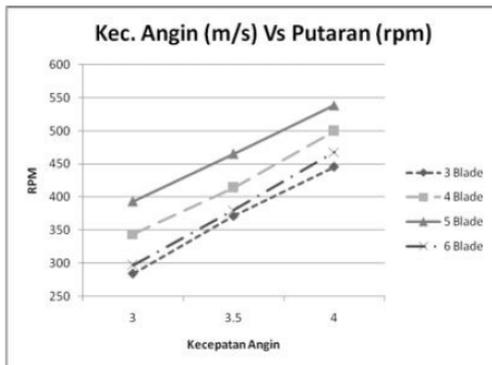
METODE

Penelitian menggunakan metode *study literature* dengan melakukan pengumpulan dan analisis data melalui pencarian pustaka yang berasal dari jurnal maupun dari sumber terpercaya lainnya. Tujuan penelitian ini untuk membandingkan dan merangkum optimalisasi variasi jumlah *blade* dan kecepatan angin pada turbin angin sumbu horizontal dari berbagai sumber.

HASIL DAN DISKUSI

Hubungan Kecepatan Angin Terhadap RPM

Grafik yang ditampilkan merupakan hubungan antara putaran baling-baling dan kecepatan angin sebesar 3 m/s, 3,5 m/s, dan 4 m/s dengan jumlah variasi *blade* 3, 4, 5 dan 6 [2]



Gbr 1. Grafik hubungan putaran turbin dan kecepatan angin

Berdasarkan gambar 1. Kecepatan angin berbanding lurus dengan putaran baling-baling pada turbin. besar jumlah putaran yang dihasilkan suatu turbin bergantung dari dari besar kecepatan angin yang diberikan. Dengan demikian, semakin besar kecepatan angin yang diberikan pada turbin, akan menghasilkan putaran yang semakin tinggi. Serta semakin besar kecepatan angin akan berdampak semakin besar daya *output* yang dihasilkan pada turbin angin [4] [9].

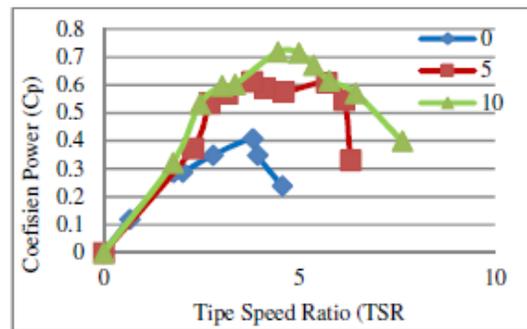
Putaran maksimum yang tampak dari gambar 1 adalah 538,60 rpm yang dimiliki jumlah *blade* 5 dengan kecepatan angin maksimum 4 m/s. Sedangkan, putaran minimum dimiliki oleh jumlah *blade* 3 dengan kecepatan angin 3m/s yaitu 284,27 rpm.

Analisa terkait jumlah *blade* juga ditunjukkan pada gambar 1. Jika dibandingkan dengan jumlah *blade* lainnya, tampak jumlah *blade* 5 memiliki putaran paling banyak. Studi ini menemukan bahwa dengan mengurangi jumlah *blade* yang digunakan, jumlah putaran berkurang. Hal ini disebabkan karena jarak antar sudu yang terlalu besar, sehingga mengakibatkan pemanfaatan energi angin yang diperoleh kurang efisien karena adanya celah pada *blade*. Sementara itu, turbin dengan lebih dari lima *blade* memberikan beban yang lebih besar pada turbin karena terjadi penurunan kecepatan angin saat melewati *blade*. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah *blade* yang berlebih akan mengakibatkan penurunan kinerja turbin. Serta desain dari *blade* juga sangat berpengaruh terhadap kinerja turbin [10].

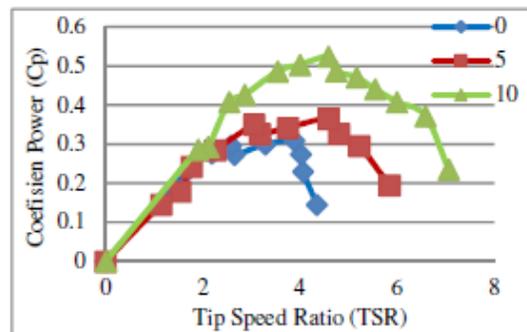
Analisis Turbin Angin Berdasarkan Sudut

Analisis ini dilakukan dengan tiga variasi sudut: 0°, 5°, dan 10° untuk 3 macam perubahan angin: 4,03 m/s, 5,05 m/s, dan 6,08 m/s. Diameter dual rotor masing-masing 50 cm dan 30 cm [5].

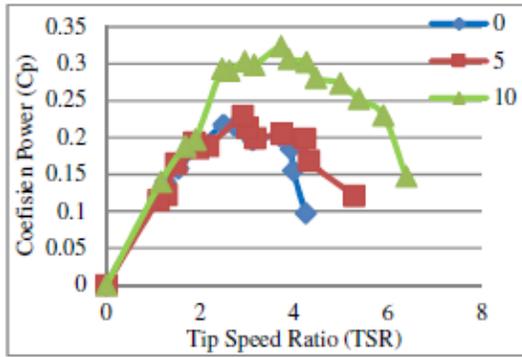
Grafik keterkaitan C_p terhadap TSR dengan variasi waktu.



Gbr 2. Grafik koefisien daya dan *tip speed ratio* terhadap kecepatan angin 4,03 m/s.

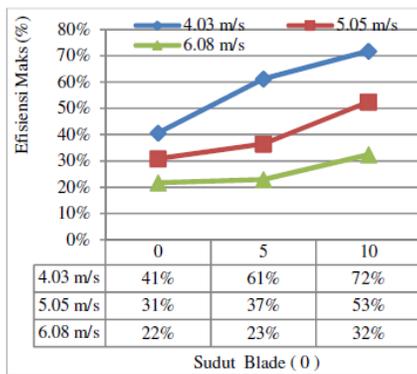


Gbr 3. Grafik koefisien daya dan *tip speed ratio* terhadap kecepatan angin 5,05 m/s.



Gbr 4. Grafik koefisien daya dan tip speed ratio terhadap kecepatan angin 6,08m/s.

Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2–4 di atas, dimana nilai Cp naik dengan bertambahnya sudut blade tetapi turun dengan bertambahnya kecepatan angin. Sebagian, ini disebabkan oleh fakta bahwa Cp maksimum diamati pada kecepatan angin rendah ketika TSR tinggi; sebaliknya, Cp terendah terjadi ketika TSR tinggi pada kecepatan angin tinggi. Dengan kata lain, ketika kecepatan angin rendah, rotor turbin lebih efisien dalam mengubah energi angin menjadi listrik. Ada kemungkinan bahwa nilai Cp dari sudut blade 10° dapat dua kali lebih besar ketika kecepatan level angin rendah dibandingkan pada kecepatan level angin tinggi. Peningkatan kecepatan angin menghasilkan peningkatan daya yang diterima oleh turbin, menyebabkan peningkatan drag dan penurunan lift, yang dibuktikan dengan penurunan torsi yang dihasilkan.



Gbr 5. Grafik hubungan sudut blade dengan efisiensi (Cp).

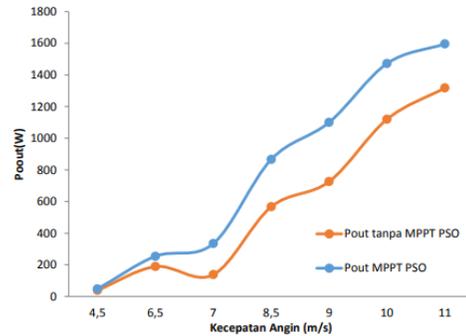
Berdasarkan data di atas untuk menghitung double rotor untuk setiap sudut dan perubahan kecepatan angin, sudut blade berpengaruh terhadap nilai efisiensi maksimum turbin angin contra-rotating.

Menurut Gambar 5, efisiensi terbesar dari turbin angin poros horizontal kontra-rotasi dicapai pada sudut sudu 10° dan kecepatan angin 4,03m/s, menghasilkan efisiensi maksimum hingga 71,8%, yang lebih tinggi dari koefisien daya rotor tunggal optimal sebesar 59%. Ini berarti turbin angin rotor

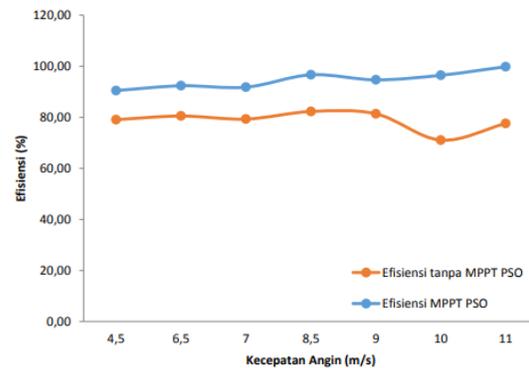
ganda lebih efisien dalam mengkonversi energi dibandingkan turbin angin rotor tunggal.

Perbandingan sistem turbin angin dengan MPPT dan tanpa MPPT

Penelitian ini [7],[13] menjelaskan bahwa kecepatan angin berubah, penelitian ini menggunakan algoritma MPPT (Maximum Power Point Tracking) dan PSO (Particle Swarm Optimization) untuk menjaga stabilitas sistem pada turbin angin. Hal ini memungkinkan peningkatan efisiensi sistem dan stabilitas daya keluaran dibanding dengan turbin angin tanpa menggunakan algoritma MPPT.



Gbr 6. Perbandingan daya listrik sistem turbin angin menggunakan M.P.P.T dan tanpa M.P.P.T



Gbr 7. Perbandingan efisiensi sistem turbin angin menggunakan M.P.P.T dan tanpa M.P.P.T

Menurut ilustrasi tersebut, pengimplementasian M.P.P.T teknik algoritme PSO pada sistem turbin angin memproduksi daya listrik lebih maksimal daripada non-M.P.P.T algoritme PSO. Kincir angin non-MPPT memiliki efisiensi berkisar antara 71 hingga 83%, sedangkan efisiensi penggunaan MPPT pada sistem kincir angin lebih dari 90% dan stabil.

Pengaruh variabel twist (sudut puntir) dan titik chord [10] ditunjukkan pada tabel 1 di bawah.

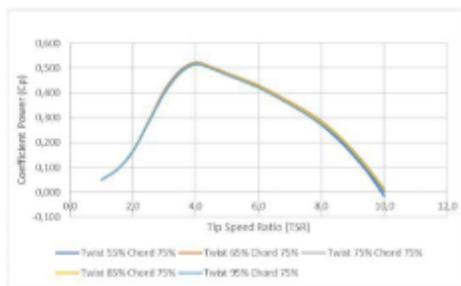
Tabel 1. Hasil uji Variasi Twist terhadap Chord pada 75%

Titik Linearisasi	Twist Linear	Chord Linear (m)	Hasil Uji	
	Sebelum Degree (°)		Twist	Chord
Twist 5%, Chord 75%	19.61 -- -32.29	0.077 - 0.016	Tidak	Lolos
Twist 15%, Chord 75%	17.76 - -15.68	0.077 - 0.016	Tidak	Lolos
Twist 25%, Chord 75%	15.68 - -7.34	0.077 - 0.016	Tidak	Lolos
Twist 35%, Chord 75%	13.78 - -2.92	0.077 - 0.016	Tidak	Lolos
Twist 45%, Chord 75%	12.15 - -0.47	0.077 - 0.016	Tidak	Lolos
Twist 55%, Chord 75%	10.77 - 0.91	0.077 - 0.016	Lolos	Lolos
Twist 65%, Chord 75%	9.60 - 1.69	0.077 - 0.016	Lolos	Lolos
Twist 75%, Chord 75%	8.59 - 2.12	0.077 - 0.016	Lolos	Lolos
Twist 85%, Chord 75%	7.73 - 2.34	0.077 - 0.016	Lolos	Lolos
Twist 95%, Chord 75%	6.98 - 2.42	0.077 - 0.016	Lolos	Lolos

Menurut temuan tes dalam tabel di atas, ada lima situs linierisasi yang gagal tes karena nilai sudut *twist* negatif dalam hasil tes sudut *twist*. Akibatnya, lima hasil tidak dapat dievaluasi lebih lanjut menggunakan perangkat lunak *QBlade*. Tabel dan gambar berikut menggambarkan hasil simulasi CP (*coefficient power*) versus TSR (*tip speed ratio*):

Hasil simulasi CP – TSR pada variasi sudut puntir (*twist*) dan *chord* pada 75%

Titik Linearisasi	Cp	TSR
Twist 55%, Chord 75%	52.2 %	4
Twist 65%, Chord 75%	52.1 %	4
Twist 75%, Chord 75%	51.9 %	4
Twist 85%, Chord 75%	51.8 %	4
Twist 95%, Chord 75%	51.6 %	4



Gbr 8. Simulasi koefisien daya – Tip speed ratio dengan ragam sudut puntir (*Twist*) dan *chord* pada 75% memakai perangkat lunak *QBlade*

Koefisien daya dengan nilai 52,2% dan Tip speed ratio 4 diperoleh dengan menggunakan sudu airfoil. SG6043 Taper pada titik akord 75% dan sudut puntir pada putaran 55%, 65%, 75%, 85%, dan 95%.

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian analisis data, didapatkan poin-poin kesimpulan sebagai berikut:

1. Hubungan antara kecepatan angin dan kecepatan putaran diperoleh info bahwa semakin besar kecepatan angin yang diberikan pada turbin, akan menghasilkan putaran yang semakin tinggi.
2. Jumlah blade maksimal yang disarankan pada turbin sebanyak 5 *blade*, jika jumlah blade kurang dari 5 mengakibatkan pemanfaatan energi angin yang diperoleh kurang efisien karena adanya celah pada *blade*.

Sementara itu, turbin dengan lebih dari lima *blade* memberikan beban yang lebih besar karena terjadi penurunan kecepatan angin saat melewati *blade*.

3. Turbin angin dengan sudut 10° dan kecepatan angin rendah mengubah lebih banyak energi daripada turbin dengan kecepatan angin tinggi. Ini karena konversi energi dikendalikan oleh rasio kecepatan ujung, yang berbanding terbalik dengan kecepatan angin.
4. Turbin angin rotor ganda lebih efisien dalam mengkonversi energi dibandingkan turbin angin rotor tunggal.
5. Performa turbin angin sumbu horizontal dapat dioptimalkan dengan pengaplikasian desain *blade* menggunakan metode linierisasi *chord* dan *twist*.

REFERENSI

- [1] Suharyati, Sadmoko Hesti Pambudi, Jamaludin Lastiko Wibowo, dan Nurina Indah Pratiwi, *Indonesia Energy Outlook 2019*. (<https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-indonesia-energy-outlook-2019-english-version.pdf>). Diakses pada 4 Mei 2022.
- [2] Firman Aryanto, I Made Mara, dan Made Nuarsa, *Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah Sudu terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal*, *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 3 no. 1, ISSN: 2088-088X, 2013.
- [3] Setiadi Wira Buana, Verdi A. Koehuan, A.Riszal, Samsul Kamal, dan Sugiyono, *Analisis Pengaruh Rasio Diameter Sebagai Parameter Kinerja Aerodinamika Dual Rotor Counter-Rotating Wind Turbine*. [Website] jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek, p-ISSN:2407-1846.
- [4] Lutfi Laili Salim, Ridwan, Sri Poernomo Sari, dan Iwan Setyawan, *Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tipe U dengan Memvariasikan Jumlah Sudu Turbin*, *Jurnal Penelitian Enjiniring (JPE)*, vol. 24, no.2, 2020.
- [5] Fredrikus M. Bere, Verdy A. Koehuan, dan Jahirwan Ut. Jason, *Analisis Peforma Turbin Angin Poros Horizontal Model Double Rotor Contra Rotating dengan Posisi Rotor Saling Berhimpitan*, [Online] Homepage: <http://ejournal-fst-unc.com/index.php/LJTMU>: vol. 02, no.1, 2015.
- [6] J. Victor Tuapetel, Ikbal Arif Triprayoga, dan Putu M. Santika, *Analisis dan Pengujian Kinerja Turbin Angin Savonius 4 Sudu*, *Jurnal Teknik Mesin – ITI*, vol. 3, no. 2, 2019.
- [7] Meriem Otmene Rachedi, Mohammed Larbi Saidi, and Faycel Arbaoui, *MPPT Control Design for Variable Speed Wind Turbine*, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 5, 2020.
- [8] Mohammadreza Mohammadi, Alireza Mohammadi, and Said Farahat, *A New Method for Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Optimization*, [Online] Homepage: <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijred>: Int. Journal of Renewable Energy Development 5 (1) 2016: 1-8.
- [9] Arif Budi Wicaksono, Risdiono, dan Mohammad Farid Najmul Hilmi, *Desain dan Analisis Wind Turbine Prototype Tipe Propeller Poros Horizontal Menggunakan Air Flow AH79-100 C Berbahan Dasar Komposit*, *Teknoin*, vol. 22, no. 5, 2016.
- [10] Bramandhika Augustiantyo dan Reza Setiawan, *Optimasi Desain Bilah dengan Metode Linearisasi Chord dan Twist terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal*, *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 22, no. 2.

- [11] Zhen Chen, Josep M. Guerrero, and Frede Blaabjerg, *A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 8, 2009.
- [12] Peter J. Schubel, and Richard J. Crossley, *Wind Turbine Blade Design*, Energies, 2012.
- [13] Bibie Albar Whiencaka, *Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Pada Sektor Sistem Turbin Angin Menggunakan Maximum Power Point Tracking (MPPT) dengan Metode Particle Swarm Optimization (PSO) di PLTH Bayu Baru, Bantul, D.I. Yogyakarta*, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2018
- [14] M. Jureczko, M. Pawlak, A. Mezyk, *Optimisation of Wind Turbine Blades*, Journal Of Materials Processing Technology 167 (2005) 463-471.
- [15] M. Balat, *A Review of Modern Wind Turbine Technology*, Energy Sources, Part A, 31:1561-1572, 2009.