

KINERJA TURBIN ANGIN DARRIEUS DUA SUDU GERAK BERPROFIL NACA 0028 SECARA EKSPERIMEN

Viktus Kolo Koten, Jeri Tangalajuk Siang, Apolonarius Alvi Patrin

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar
Jl. Tanjung Alang, No. 23, Makassar. Tlp. (0411) 871038. Fax. (0411) 870294
Email: viktus.koten@gmail.com

Abstract. *Wind energy is one type of renewable energy which is not only clean and environmentally friendly but also has abundant and is obtained free of charge in the natural. The process of converting kinetic energy in the wind into mechanical energy requires a turbine. Darrieus turbine is a device that converts wind energy that moves from various directions into mechanical energy on a shaft that moves in one direction. This study aims to determine the performance of a two-blade Darrieus turbine with the NACA 0028 profile experimentally. The wind tunnel, Darrieus turbine, and load-bearing construction were designed and manufactured by researchers. Data collection of wind velocity, load, and rotation using standard equipment. The results of the study show that the turbine power coefficients are 35.57%, 23.55%, 23.2%, and 20.05% at wind velocity of 6.04, 7.08, 7.25, and 7.59 m/s, respectively.*

Keywords: *Wind energy; Darrieus turbine performance; NACA 0028 profiled blade.*

1. PENDAHULUAN

Energi angin merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang ramah lingkungan, bersih, gratis, dan melimpah di alam bebas. Proses konversi energi angin menjadi energi mekanik membutuhkan turbin. Turbin yang sering dikembangkan untuk proses konversi tersebut adalah turbin type propeller, Savonius, Gorlov, Darrieus, dan beberapa jenis turbin angin lainnya.

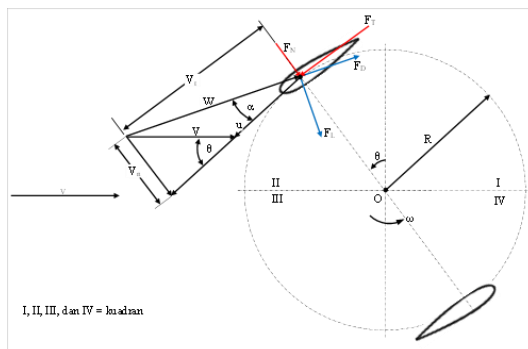
Turbin Darrieus adalah suatu jenis turbin angin yang dapat berputar pada satu arah meskipun angin bergerak dari berbagai arah. Jenis turbin ini cocok diterapkan di berbagai daerah karena arah angin yang sering berubah-ubah. Beberapa jenis turbin Darrieus yang sering dikembangkan untuk mengkonversi energi kinetik pada angin menjadi energi mekanis pada poros adalah turbin Darrieus dua blade, multi blade, type heliks, dan type kurva, Brian Handa and Andrew Cashman [1]. Dari sisi kesederhanaan konstruksi, turbin Darrieus dua blade lebih sederhana dan mudah untuk dikembangkan. Selain itu, turbin Darrieus dua blade memiliki koefisien daya yang lebih besar dari pada turbin Darrieus multi blade, Qing'an Li et al [2], and Marco Raciti Castelli et al [3].

Elemen utama yang paling menentukan kinerja turbin adalah blade. Untuk meningkatkan kinerja turbin atau keperluan lainnya, blade dibentuk dan dikembangkan berdasarkan kebutuhan. Bentuk profil blade yang sering dikembangkan pada turbin Darrieus adalah profil NRL, NACA tidak simetrik, NACA simetrik, dan bentuk khusus lainnya. Bentuk profil blade yang tebal dikembangkan untuk bilangan Reynolds yang kecil sedangkan bentuk profil blade yang tipis dikembangkan untuk bilangan Reynolds yang besar, Sung-Cheoul Roh and Seung-Hee Kang [4].

Bentuk profil NACA simetrik merupakan bentuk blade yang lebih mudah dibuat dan dikembangkan. Bentuk profil NACA simetris yang tipis seperti NACA 0010, 0012, 0015, dan bentuk profil yang lebih tipis lainnya dikembangkan untuk kecepatan angin yang cepat. Bentuk profil NACA simetris yang tebal seperti NACA 0020, 0022, 0024, dan bentuk profil yang lebih tebal lainnya dikembangkan untuk kecepatan angin yang lambat. Bentuk profil NACA simetris yang sedang seperti NACA 0018 dikembangkan untuk kecepatan angin yang cepat maupun yang lambat, Sung-Cheoul Roh and Seung-Hee Kang [4]. Selain itu, bentuk profil NACA 0018 yang diubah bentuk ekornya menjadi

setengah lingkaran maupun segi tiga juga dapat dimanfaatkan untuk kecepatan angin yang lambat maupun yang cepat, Viktus K. Koten dkk [5].

Di Pesisir Barat dan Selatan Indonesia atau bagian terluar yang berhadapan langsung dengan samudra, kecepatan angin pada daerah-daerah tersebut mencapai lebih dari 8 m/s. Di bagian lain seperti di Nusa Tenggara dan sekitarnya, kecepatan anginnya berkisar 3,5 - 6,5 m/s sedangkan di pulau Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua memiliki kecepatan angin sekitar 2,7 - 4,5 m/s, Hero P. Dida dkk [6]. Sesuai dengan persamaan bilangan Reynolds, kecepatan angin yang cepat mengindikasikan bilangan Reynolds yang besar sedangkan kecepatan angin yang lambat mengindikasikan bilangan Reynolds yang kecil. Dengan demikian, penggunaan bentuk profil blade turbin Darrieus di suatu daerah berdasarkan bilangan Reynolds dan kondisi kecepatan angin. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kinerja turbin Darrieus dua blade berprofil NACA 0028 secara eksperimen. Hasil kajian ini dapat dijadikan sebagai acuan penentuan bentuk profil blade turbin Darrieus yang dikembangkan di daerah-daerah yang memiliki kecepatan angin yang lambat.



Gambar 1. Turbin Darrieus dua blade.
Sumber: Viktus K. Koten et al [5].

Gambar 1 memperlihatkan sebuah turbin Darrieus dua sudu gerak dengan berbagai parameter. Arah angin yang bergerak dari sisi kiri turbin dengan kecepatan V menabrak blade turbin yang berbentuk unik; NACA simetris. Keunikan bentuk blade mengakibatkan blade hanya bergerak berlawanan arah putaran jarum jam dengan kecepatan sudut ω meskipun arah angin berubah dari sisi kanan, atas,

maupun dari sisi bawah. Tabrakan angin pada blade yang berbentuk unik juga mengakibatkan arah angin yang awalnya hanya satu arah dengan kecepatan V terdistribusi menjadi kecepatan keliling u dan kecepatan relative W . Arah kecepatan relative W dan kecepatan keliling u diketahui berdasarkan angle of attack α yang terjadi. Hubungan antara ke tiga jenis kecepatan; kecepatan angin V , kecepatan relative W , dan kecepatan keliling turbin u mengikuti aturan penjumlahan vector kecepatan.

Akibat tabrakan angin ke blade, blade mengalami gaya drag F_D , gaya lift F_L , gaya normal F_N , dan gaya tangensial F_T . Gaya drag merupakan gaya seret yang berfungsi tidak hanya membantu tapi juga menghalangi pergerakan blade pada azimuth angle tertentu. Gaya lift merupakan gaya utama yang menggerakkan blade. Meskipun demikian, besarnya gaya lift yang dihasilkan selalu berubah sebagai fungsi dari perubahan azimuth angle. Gaya tangensial dan normal selalu mengalami perubahan karena gaya lift mengalami perubahan pada tiap azimuth angle.

Kinerja turbin Darrieus berawal dari hubungan antara kecepatan angin V dengan jumlah putaran n yang terjadi pada poros turbin. Penurunan maupun penghentian putaran poros membutuhkan peningkatan suatu beban atau gaya luar yang dikenakan ke poros turbin hingga mencapai besaran tertentu. Besarnya beban atau gaya yang dibutuhkan untuk menghentikan putaran poros turbin berdasarkan keseimbangan momen. Penghentian putaran poros turbin mengindikasikan bahwa semua energi mekanik pada poros yang terkonversi dari energi kinetic telah dimanfaatkan secara maksimal; turbin berada dalam torsi maksimal atau putaran mendekati nol. Fenomena perubahan putaran, pembebanan, dan bentuk geometric turbin menjadi dasar penentuan kinerja turbin Darrieus secara keseluruhan.

2. METODE

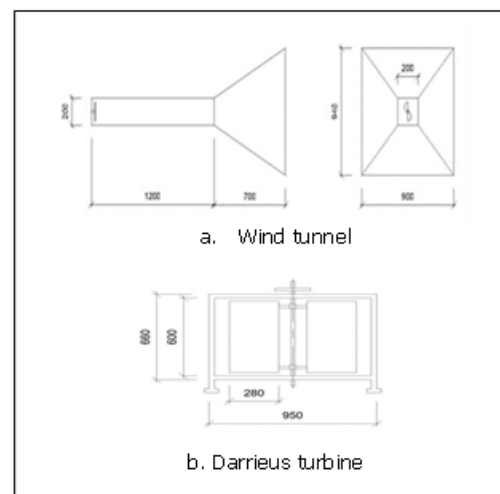
Penelitian ini dilakukan secara eksperimen. Kajian secara eksperimen juga telah dilakukan oleh para peneliti lainnya seperti Jna. Gavalde et al [7], David S. Miklosovic et al [8], Yasuo Takamatsu [9], M. Elkhoury et al [10], Qing'an Li et al [11], Okeoghene Eboibi et al [12], Alessandro

Bianchini et al [13], B. Zouzou et al [14], Louis Angelo Danao et al [15], R. Sree Vasthava et al [16], Alessandro Bianchini et al [17], A-J. Buchner et al [18], Alessandro Bianchini et al [19], David Wafula Wekesa et al [20]. Setelah melakukan kajian terhadap penelitian-penelitian tersebut, selain jenis profil NACA simetris yang digunakan berbeda, konstruksi terowongan angin yang digunakan dalam kajian ini juga berbeda.

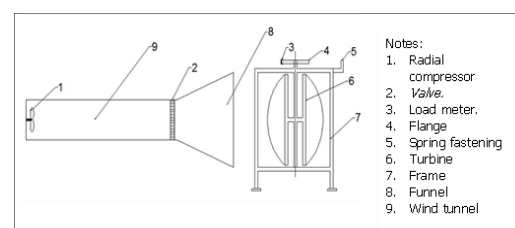
Terowongan angin dibuat sendiri oleh peneliti dari bahan kayu dengan bentuk dan ukuran seperti pada Gambar 2a. Blade turbin dibuat dari pelat 0.3 mm yang dilipat melengkung sehingga membentuk profil NACA 0028; blade yang terbentuk berongga sehingga pada ke dua ujung span blade terbuka. Ujung span blade yang terbuka tersebut ditutupi dengan pelat yang dilas merata. Metode pembuatan blade ini berbeda dengan metode pembuatan blade lainnya seperti yang dilakukan oleh Downon Han et al [21], Igor Palle et al [22]. Blade disambung ke poros turbin dengan pelat setebal 3 mm yang dilas pada sisi dalam blade pada ujung pelat yang satu dan poros pada ujung pelat lainnya. Teknik penentuan ukuran diameter poros mengikuti penentuan diameter poros yang dilakukan oleh Viktus K Koten et al [23], [24], and [25]. Meskipun pitch angle 0° tidak dianjurkan oleh Viktus K. Koten et al [26], J. J. Miao et al [27], Gebreel Abdalrahman et al [28], Abdolrahim Rezaeiha et al [29], and Bill Gutierrez [30], pemilihan pitch angle ini berdasarkan kemudahan pemasangan blade pada lengan turbin. Pada poros, selain dipasang bantalan untuk mengurangi gesekan antara poros dengan penyanggah juga dipasang flens sebagai tempat pemberian beban. Konstruksi penyanggah terbuat dari baja berongga yang disambung dengan las. Pada penyanggah dipasang alat pengukur beban. Secara lengkap, konstruksi turbin Darrieus diperlihatkan pada pada Gambar 2b. Terowongan angin dan turbin Darrieus yang digunakan dalam penelitian dilengkapi kompresor radial, anemometer, pengukur beban, dan taco meter.

Pengambilan data diawali dengan pembukaan katub masuk kompresor radial yang sedang berputar dengan kecepatan tertentu. Udara yang dikompresi kompresor radial dari sisi masuk terowongan bergerak melalui terowongan dan mengalir keluar

melalui corong. Kecepatan pergerakan angin diukur dengan anemometer. Angin dengan perlakuan tekanan dalam terowongan dan corong diarahkan ke turbin Darrieus yang diam. Akibat pergerakan angin yang mengarah ke turbin Darrieus, blade turbin yang terpasang pada turbin bergerak mengelilingi poros dengan kecepatan tertentu. Pada saat poros turbin sedang berputar, beban diberikan pada flens turbin yang ikut berputar bersama poros. Pemberian beban mengakibatkan penurunan putaran. Dalam keadaan flens yang terbebani dan putaran poros yang menurun maka proses pembacaan beban, pengukuran putaran, dan perhitungan momen sudah dapat dilakukan. Pembacaan beban dilakukan dengan timbangan pegas dan pengukuran putaran dilakukan dengan taco meter. Siklus seperti ini diulang lagi dengan menyetel kembali arus listrik yang mengalir ke kompresor radial hingga mencapai batasan kecepatan angin dalam penelitian ini. Susunan peralatan pengujian dan konstruksinya diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Wind tunnel dan turbin Darrieus.



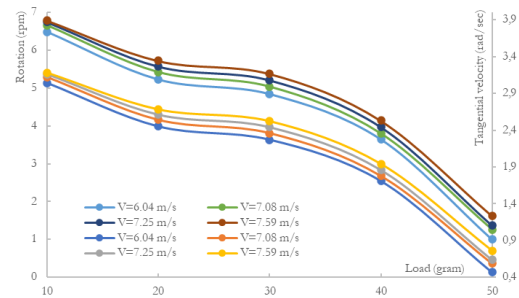
Gambar 3. Instalasi penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 4 - 7 memperlihatkan beberapa grafik kinerja turbin Darrieus. Parameter kinerja turbin yang dikaji terdiri dari beban, putaran, kecepatan tangensial, kecepatan sudut, tip velocity ratio, momen, koefisien momen, daya, dan koefisien daya. Selain kecepatan angin, beban, dan putaran, parameter lainnya diperoleh dengan perhitungan teoritis seperti yang dilakukan oleh Viktus Korten et al [25]. Dalam kajian ini, peningkatan beban pada turbin mengindikasikan terjadinya proses konversi energi mekanik dari turbin menjadi jenis energi lainnya. Hasil kajian memperlihatkan hubungan antara beban dengan putaran dan kecepatan tangensial, kecepatan sudut dan tip velocity ratio, momen dan koefisien momen, dan hubungan antara beban dengan daya dan koefisien daya. Hubungan antara berbagai parameter kinerja turbin tersebut tersebut diuraikan sebagai berikut.

3.1. Hubungan antara Beban dengan Putaran dan Kecepatan Keliling.

Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara beban dengan putaran dan kecepatan keliling. Sumbu vertical sebelah kiri adalah sumbu putaran dan sumbu vertical sebelah kanan adalah sumbu kecepatan tangensial. Sumbu horisontal adalah sumbu beban. Setiap perubahan beban di sumbu horisontal menyebabkan perubahan putaran pada sumbu vertical sebelah kiri dan kecepatan tangensial di sebelah kanan pada tiap perubahan kecepatan angin. Empat garis grafik yang terbentuk bagian atas adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan putaran untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Empat garis grafik yang terbentuk bagian bawah adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan kecepatan tangensial untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Garis-garis grafik yang terbentuk memperlihatkan perubahan putaran dan kecepatan tangensial yang berbanding terbalik dengan perubahan beban. Peningkatan beban menyebabkan penurunan putaran dan kecepatan tangensial.



Gambar 4. Hubungan antara beban dengan putaran dan kecepatan keliling.

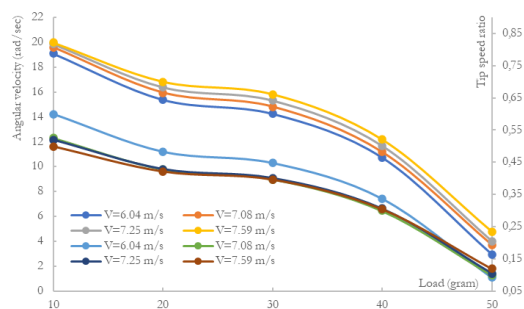
Pada kecepatan angin yang konstan 6.04 m/s dan pemberian beban 10 gram menghasilkan putaran turbin sebesar 3.04 rps. Pada kecepatan angin yang sama tapi penambahan beban 20, 30, 40, dan 50 gram menyebabkan penurunan putaran sebesar 19.4079%, 25.3289%, 43.75 %, dan 84.5395 % secara berturut-turut. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi kecepatan angin yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola penurunan putaran turbin yang hampir sama. Peningkatan kecepatan angin 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s pada beban 10 gram menyebabkan peningkatan putaran turbin sebesar 2.6316%, 3.9474%, dan 4.6053% secara berturut-turut. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi beban yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola peningkatan putaran yang hampir sama pada beban 20, 30, 40, dan 50 gram.

Fenomena yang terjadi pada hubungan antara beban dengan putaran juga terjadi pada hubungan antara beban dengan kecepatan tangensial. Pada diameter turbin yang sama tapi putaran yang berbeda, itu menghasilkan kecepatan tangensial yang berbeda. Peningkatan putaran menyebabkan peningkatan kecepatan tangensial. Penurunan putaran menyebabkan penurunan kecepatan tangensial. Hal ini mengindikasikan putaran berbanding lurus dengan kecepatan tangensial turbin.

3.2. Hubungan antara Beban dengan Kecepatan Sudut dan Tip Velocity Ratio.

Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara beban dengan kecepatan sudut dan tip velocity ratio. Sumbu vertical sebelah kiri

adalah sumbu angular velocity dan sumbu vertical sebelah kanan adalah sumbu tip velocity ratio. Sumbu horisontal adalah sumbu beban. Setiap perubahan beban di sumbu horisontal menyebabkan perubahan angular velocity di sumbu vertical sebelah kiri dan tip velocity ratio di sumbu vertical sebelah kanan untuk tiap perubahan kecepatan angin. Empat garis grafik yang terbentuk bagian atas adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan angular velocity untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Empat garis grafik yang terbentuk bagian bawah adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan tip velocity ratio untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Garis-garis grafik yang terbentuk memperlihatkan perubahan angular velocity dan tip velocity ratio berbanding terbalik dengan perubahan beban. Peningkatan beban menyebabkan penurunan angular velocity dan tip velocity ratio pada tiap perubahan kecepatan angin.



Gambar 5. Hubungan antara beban dengan kecepatan sudut dan tip speed ratio.

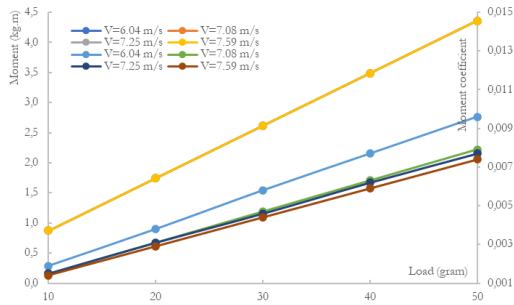
Pada kecepatan angin 6.04 m/s dan pemberian beban 10 gram menghasilkan kecepatan sudut turbin sebesar 19.09 rad/sec. Pada kecepatan angin yang sama tapi penambahan beban 20, 30, 40, dan 50 gram menyebabkan penurunan kecepatan sudut turbin sebesar 19.4079%, 25.3289%, 43.75 %, dan 84.5395 % secara berturut-turut. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi kecepatan angin yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola penurunan kecepatan sudut turbin yang hampir sama. Pada peningkatan kecepatan angin 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s tapi beban 10 gram menyebabkan peningkatan kecepatan sudut turbin sebesar 2.6316%, 3.9474%, dan 4.6053% secara berturut-turut. Hal yang sama juga terjadi pada

kondisi beban yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola peningkatan kecepatan sudut turbin yang hampir sama pada beban 20, 30, 40, dan 50 gram.

Fenomena yang terjadi pada hubungan antara beban dengan angular velocity juga terjadi pada hubungan antara beban dengan tip velocity ratio. Meskipun pada kecepatan angin 6.04 m/s menghasilkan tip velocity ratio yang berbeda dengan tip velocity ratio pada kecepatan angin yang lainnya, penurunan tip velocity ratio pada berbagai beban menunjukkan pola yang hampir sama. Pada diameter turbin yang sama dilalui oleh kecepatan angin yang sama tapi pada putaran turbin yang berbeda, itu menghasilkan tip velocity ratio yang berbeda. Peningkatan putaran menyebabkan peningkatan tip velocity ratio dan penurunan putaran menyebabkan penurunan tip velocity ratio. Putaran berbanding lurus dengan tip velocity ratio pada kecepatan angin yang sama.

3.3. Hubungan antara Beban dengan Momen dan Koefisien Momen.

Gambar 6 memperlihatkan hubungan antara beban dengan momen dan koefisien momen. Sumbu vertical sebelah kiri adalah sumbu momen dan sumbu vertical sebelah kanan adalah sumbu koefisien momen. Sumbu horisontal adalah sumbu beban. Setiap perubahan beban di sumbu horisontal menyebabkan perubahan momen di sumbu vertical sebelah kiri dan koefisien momen di sumbu vertical sebelah kanan pada tiap perubahan kecepatan angin. Empat garis grafik yang terbentuk bagian atas adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan momen untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Empat garis grafik yang terbentuk bagian bawah adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan koefisien momen untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Garis-garis grafik yang terbentuk memperlihatkan perubahan momen dan koefisien momen sebanding dengan peningkatan beban. Peningkatan beban menyebabkan peningkatan momen dan koefisien momen.



Gambar 6. Hubungan antara beban dengan momen dan koefisien momen.

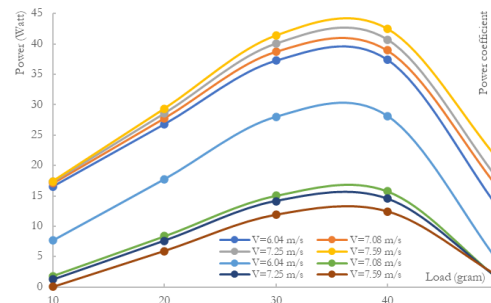
Pada kecepatan angin 6.04 m/s dan beban 10 gram menghasilkan momen sebesar 0.872 kg.m. Pada kecepatan angin yang sama tapi penambahan beban 20, 30, 40, dan 50 gram menyebabkan peningkatan momen sebesar 100%, 200%, 300%, dan 400% secara berturut-turut. Peningkatan kecepatan angin 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s pada beban yang tetap 10 gram tidak menghasilkan perubahan momen. Hal yang sama juga terjadi pada beban 20, 30, 40, dan 50 gram. Ke empat garis grafik yang terbentuk saling berimpit.

Fenomena yang terjadi pada hubungan antara beban dengan momen berbeda dengan hubungan antara beban dengan koefisien momen. Meskipun memiliki pola peningkatan yang sama, perubahan beban dan kecepatan angin menghasilkan koefisien momen yang berbeda. Perubahan koefisien momen lebih ditentukan oleh kecepatan angin yang menerpa turbin. Kecepatan angin dalam formulasi koefisien momen terletak di bagian penyebut. Hal ini menyebabkan koefisien momen berbanding terbalik dengan kecepatan angin. Semakin cepat kecepatan angin, koefisien momen semakin kecil.

Pada kecepatan angin 6.04 m/s dan pemberian beban 10 gram menghasilkan koefisien momen sebesar 0.002. Pada kecepatan angin yang sama tapi penambahan beban 20, 30, 40, dan 50 gram menyebabkan peningkatan koefisien momen sebesar 100%, 200%, 300%, dan 400% secara berturut-turut. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi kecepatan angin yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola peningkatan koefisien momen yang hampir sama.

3.4. Hubungan antara Beban dengan Daya dan Koefisien Daya.

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara beban dengan daya dan koefisien daya. Sumbu vertical sebelah kiri adalah sumbu daya dan sumbu vertical sebelah kanan adalah sumbu koefisien daya. Sumbu horizontal adalah sumbu beban. Setiap perubahan beban pada sumbu horizontal menyebabkan perubahan daya di sumbu vertical sebelah kiri dan koefisien daya di sumbu vertical sebelah kanan pada tiap perubahan kecepatan angin. Empat garis grafik yang terbentuk bagian atas adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan daya untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Satu garis grafik yang terbentuk di tengah dan tiga garis grafik bagian bawah adalah hubungan antara perubahan beban dengan perubahan koefisien daya untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s. Garis-garis grafik yang terbentuk memperlihatkan perubahan daya dan koefisien daya berbanding lurus dengan perubahan beban dari 10 sampai 30 gram. Peningkatan beban selanjutnya menyebabkan penurunan daya dan koefisien daya.



Gambar 7. Hubungan antara beban dengan daya dan koefisien daya

Pada kecepatan angin 6.04 m/s dan beban 10 gram menghasilkan daya turbin 16.56 Watt. Pada kecepatan angin yang sama tapi penambahan beban 20, 30, dan 40 gram menyebabkan peningkatan daya sebesar 61.9565%, 125.0603%, dan 125.9662% secara berturut-turut. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi kecepatan angin yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola peningkatan daya turbin yang hampir sama. Pada kecepatan angin yang sama; 6.04 m/s tapi pada beban 50

gram menyebabkan penurunan daya turbin 22.343%. Hal yang sama juga terjadi pada kecepatan angin yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola penurunan daya turbin yang hampir sama.

Pada peningkatan kecepatan angin menjadi 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s tapi beban tetap 10 gram menyebabkan peningkatan daya turbin sebesar 3.2005%, 4.529 %, dan 5.1328%, secara berturut-turut. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi beban yang lainnya. Meskipun memiliki nilai yang berbeda, garis grafik yang terbentuk menunjukkan pola peningkatan daya turbin yang hampir sama.

Fenomena yang terjadi pada hubungan antara beban dengan daya juga terjadi pada hubungan antara beban dengan koefisien daya. Peningkatan beban dari 10 sampai 30 gram menunjukkan peningkatan koefisien daya turbin. Peningkatan beban dari 40 sampai 50 gram menunjukkan penurunan koefisien daya. Hal ini menunjukkan bahwa koefisien daya maksimum berada antara beban 30 dengan 40 gram. Berdasarkan pola garis grafik yang terbentuk pada gambar 7, koefisien daya maksimum pada turbin Darrieus dalam kajian ini adalah 35.57%, 23.55%, 23.2%, dan 20.05% untuk kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s secara berturut-turut.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Kecepatan angin yang konstan yang menerpa turbin dengan peningkatan beban menyebabkan penurunan putaran, kecepatan keliling, kecepatan sudut, dan tip velocity ratio turbin. Peningkatan kecepatan angin menyebabkan peningkatan putaran, kecepatan keliling, kecepatan sudut, dan tip velocity ratio pada beban yang sama.
- Kecepatan angin yang konstan yang menerpa turbin dengan peningkatan beban menyebabkan peningkatan momen dan koefisien momen. Peningkatan kecepatan angin hanya menyebabkan peningkatan koefisien momen pada beban yang sama. Peningkatan kecepatan angin tidak menyebabkan perubahan momen.
- Kecepatan angin yang konstan yang menerpa turbin dengan peningkatan beban menyebabkan peningkatan daya turbin hanya sampai pada beban tertentu. Peningkatan beban selanjutnya menyebabkan daya turbin mengalami penurunan. Koefisien daya turbin maksimum berada di antara beban 30 dan 40 gram. Koefisien daya turbin Darrieus dua sudu gerak NACA 0028 adalah 35.57%, 23.55%, 23.2%, dan 20.05% pada kecepatan angin 6.04, 7.08, 7.25, dan 7.59 m/s secara berturut-turut. Efisiensi maksimum diperoleh pada kecepatan angin yang lambat.

DATAR PUSTAKA

- [1] B. Hand and A. Cashman, "A Review on the Historical Development of the Lift-Type Vertical Axis Wind Turbine: From onshore to offshore floating application," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 38, no. February, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100646.
- [2] T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, and K. Furukawa, "Effect of Number of Blades on Aerodynamic Forces on A Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine," *Energy*, pp. 1–12, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.115.
- [3] M. R. Castelli, S. De Betta, and E. Benini, "Effect of Blade Number on a Straight-Bladed Vertical-Axis Darrieus Wind Turbine," *Int. J. Mech. Aerospace, Ind. Mechatron. Manuf. Eng. Vol6*, vol. 6, no. 1, pp. 68–74, 2012.
- [4] S. Roh and S. Kang, "Effects of A Blade Profile, The Reynolds Number, and The Solidity on The Performance of A Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbine," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, no. 11, pp. 3299–3307, 2013, doi: 10.1007/s12206-013-0852-x.
- [5] V. K. Koten, S. Himran, N. Salam, and L. Sule, "Numerical Study of Darrieus Wind Turbine Blade Characteristic with Shape Changes of Trailing," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res. Vol.*, vol. 9, no. 8, pp. 1088–1096, 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.8.1088-1096.
- [6] H. P. Dida, S. Suparman, and D. Widhiyanuriyawan, "Mapping of Wind Energy Potential in Indonesian Waters

- Based on QuikScat and WindSat Satellite Data," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 7, no. 2, pp. 95–101, 2016, doi: 10.21776/ub.jrm.2016.007.02.7.
- [7] J. Gavalda, J. Massons, and F. Díaz, "Experimental Study On A Self-Adapting Darrieus-Savonius Wind Machine," *Sol. Wind Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 457–461, 1990, doi: 10.1016/0741-983X(90)90030-6.
- [8] U. S. N. Academy and N. Carolina, "Experimental Evaluation of Sinusoidal Leading Edges," *AIRCRAFT*, vol. 44, no. 4, pp. 2–5, 2007, doi: 10.2514/1.30303.
- [9] K. T. Yasuo Takamatsu, "Experimental Considerations in an Approximate Method for Estimating the Blade Performance of Darrieus Type Cross Flow Water Turbines," *JSME*, vol. 36, pp. 135–142, 1993.
- [10] M. Elkhoury, T. Kiwata, and E. Aoun, "Experimental and Numerical Investigation of a three-Dimensional Vertical-Axis Wind Turbine with Variable-Pitch," *Jnl. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 139, pp. 111–123, 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.01.004.
- [11] Q. Li, T. Maeda, Y. Kamada, Y. Hiromori, A. Nakai, and T. Kasuya, "Study on Stall Behavior of A Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine With Numerical and Experimental Investigations," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 164, no. April 2016, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.02.005.
- [12] O. Eboibi, L. A. M. Danao, and R. J. Howell, "Experimental Investigation of the Influence of Solidity on the Performance and Flow Field Aerodynamics of Vertical Axis Wind Turbines at Low Reynolds Numbers," *Renew. Energy*, vol. 92, pp. 474–483, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.028.
- [13] A. Bianchini, F. Balduzzi, J. M. Rainbird, J. M. R. Graham, G. Ferrara, and L. Ferrari, "An Experimental and Numerical Assessment of Airfoil Polars for Use in Darrieus Wind Turbines — Part II: Post-stall Data Extrapolation Methods," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 138, no. March, pp. 1–10, 2016, doi: 10.1115/1.4031270.
- [14] B. Zouzou, I. Dobrev, F. Massouh, and R. Dizene, "Experimental and Numerical Analysis of A Novel Darrieus Rotor With Variable Pitch Mechanism at Low TSR," *Energy*, vol. 186, p. 115832, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.162.
- [15] L. Angelo, O. Eboibi, and R. Howell, "An Experimental Investigation in to the Influence of Unsteady Wind on the Performance of A Vertical Axis Wind Turbine," *Appl. Energy*, vol. 107, pp. 403–411, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.012.
- [16] R. S. Vasthava and K. A. Kumar, "Modification of Straight Bladed Hollow Cored Wind Turbine Through Experimental Analysis," *International Journal of Science and Research*, vol. 4, no. 8, pp. 1359–1364, 2015.
- [17] A. Bianchini, F. Balduzzi, J. M. Rainbird, J. M. R. Graham, and G. Ferrara, "An Experimental and Numerical Assessment of Airfoil Polars for Use In Darrieus Wind Turbines. Part 2 - Post-Stall Data Extrapolation Methods," in *Turbine Technical Conference and Exposition*, 2017, pp. 1–13.
- [18] A. Buchner, M. W. Lohry, L. Martinelli, J. Soria, and A. J. Smits, "Dynamic stall in vertical axis wind turbines: Comparing experiments and computations," *Jnl. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 146, pp. 163–171, 2015, doi: 10.1016/j.jweia.2015.09.001.
- [19] A. Bianchini, F. Balduzzi, P. Bachant, G. Ferrara, and L. Ferrari, "Effectiveness of Two-Dimensional CFD Simulations for Darrieus VAWTs: A Combined Numerical and Experimental Assessment," *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 318–328, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.01.026.
- [20] D. Wafula, C. Wang, Y. Wei, and W. Zhu, "Experimental and Numerical Study of Turbulence Effect on Aerodynamic Performance of A Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine," *Jnl. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 157, pp. 1–14, 2016, doi: 10.1016/j.jweia.2016.07.018.
- [21] T. Ratio, "Design, Fabrication, and Performance Test of a 100-W Helical-Blade Vertical-Axis Wind Turbine at Low Tip-Velocity Ratio," *Energies*, pp. 1–17, 2018, doi: 10.3390/en11061517.

- [22] P. P. Data, P. E. K. Look, and A. E. Hanan, "(12) United States Patent," vol. 2, no. 12, 2007.
- [23] V. Kolo and D. Hasan, "Theoretical Determination of the Relationship Between Lateral and Radial Deflection of Steel Shafts at Various Types of Support," *Cylinder* vol. 2, no. 1, pp. 57–63.
- [24] V. K. Koten and C. E. Tanamal, "Design and Construction Multi Output Power Transmition with Single Prime Mover on Agricultural Products Machine," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 755, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/755/1/011001.
- [25] Victus Kolo Koten, Stevy Thioritz "Characteristics of Darrieus Turbine with and without Fixed Blade in the Process of Utilizing Low Pressure Water Flow into Mechanical Energy," *Jurnal Mekanikal*, vol. 8, no. 2, pp. 742–751, 2017.
- [26] V. K. Koten, S. Himran, N. Salam, and L. Sule, "Pitch Angle on The Darrieus Wind Turbine with Changes In The Shape of Blade Trailing Edge," *J. Mech. Eng. Res. Dev.*, vol. 43, no. 3, pp. 198–210, 2020.
- [27] J. J. Miao *et al.*, "Design and Test of a Vertical-Axis Wind Turbine with Pitch Control," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 225, pp. 338–343, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.225.338.
- [28] G. Abdalrahman, W. Melek, and F. S. Lien, "Pitch Angle Control for A Small-Scale Darrieus Vertical Axis Wind Turbine with Straight Blades (H-Type VAWT)," *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 1353–1362, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.07.068.
- [29] A. Rezaeiha, I. Kalkman, and B. Blocken, "Effect of Pitch Angle on Power Performance and Aerodynamics of A Vertical Axis Wind Turbine," *Appl. Energy*, vol. 197, pp. 132–150, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.128.
- [30] B. Gutierrez, P. E. K. Look, and A. E. S. Lee, "Articulated Blade with Automatic Pitch and Camber Control," *Paten*, 5,193,978, 1993.