

Studi Eksperimen Pengaruh Sudut *Pitch* terhadap Karakteristik Performa pada Turbin Angin *Counter-Rotating*

F.A. Azhar* dan M.A. Bramantya

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No.2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia,
Telp. (0274) 521673
e-mail: averoazhar@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan energi angin menjadi daya berguna menuntut peningkatan efisiensi turbin angin. Cara lain untuk meningkatkan efisiensi dengan menggunakan turbin angin *counter-rotating*. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan performa dari turbin angin *full Scale* model *counter-rotating* (CRWT) dengan sebuah generator dan roda gigi. Pengujian dilakukan pada kondisi lingkungan sebenarnya dan kecepatan angin yang fluktuatif. Rotor turbin depan dan belakang menggunakan 3 buah bilah dengan rasio diameter (D_1/D_2) = 0,5. Desain aerodinamika bilah turbin *counter-rotating* dibuat berdasarkan perhitungan menggunakan teori *Blade Element Momentum* (BEM). Sudut *pitch* rotor turbin diatur sebesar 0° , 10° dan 20° dan diamati daya elektrik keluaran dari generator untuk mengetahui perbedaan performa dari masing-masing variasi. Koefisien daya maksimum yang dihasilkan oleh rotor pada kecepatan angin 4 m/s sampai 7 m/s dengan sudut *pitch* 0° sebesar $4,5 \times 10^{-3}$. Sedangkan turbin angin dengan sudut *pitch* rotor 10° dan 20° koefisien daya tertinggi masing-masing tercapai sebesar $3,6 \times 10^{-3}$ dan $3,3 \times 10^{-3}$. Hasil pengujian menunjukkan semakin besar sudut *pitch* koefisien daya yang dihasilkan pada kecepatan angin rendah semakin besar, akan tetapi semakin tinggi kecepatan angin rotor dengan sudut *pitch* kecil menghasilkan koefisien daya yang lebih besar.

Kata kunci : *turbin angin counter-rotating, sudut pitch, performa, pengujian lingkungan.*

Abstract

In order to improve the efficiency of wind turbine, counter-rotating wind turbine was proposed. In this study the performance of a full-scale counter-rotating model of wind turbine was observed with a generator and gears. The test carried out in actual environmental conditions and fluctuating wind speeds. Front and rear turbine rotors use 3 blades with a diameter ratio (D_1 / D_2) = 0.5. The aerodynamic design of the counter-rotating turbine blades calculated based on the Blade Element Momentum (BEM) theory. The pitch angle of the turbine rotors were set at 0° , 10° and 20° and the electric power output of the generator was observed to determine the difference in performance of each variation. The maximum power coefficient produced by the rotor at wind speed 4 m/s – 7 m/s with pitch angle of 0° is $4,5 \times 10^{-3}$. Whereas wind turbines with rotor pitch angles of 10° and 20° the highest power coefficients were achieved at $3,6 \times 10^{-3}$ and $3,3 \times 10^{-3}$. The test results shows, increased pitch angle

produced more power coefficient at low wind speeds, but in the high wind speed, rotor with a small pitch angle performed better.

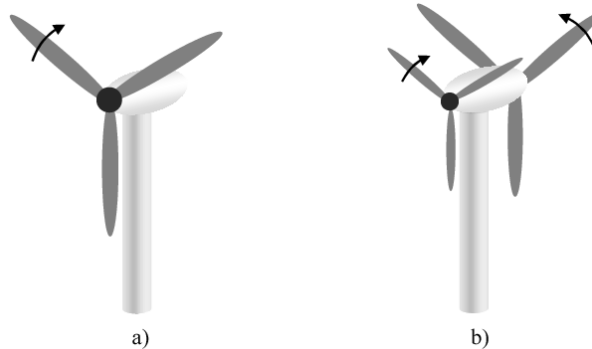
Keywords : counter-rotating wind turbine, pitch angle, performance, environmental test.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan turbin angin saat ini dilatar belakangi berkurangnya potensi energi fosil terutama minyak dan gas bumi, sehingga mendorong Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sebagai prioritas utama untuk menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Di Indonesia sendiri potensi energi baru terbarukan (EBT) belum dimanfaatkan secara maksimal termasuk di dalamnya sumber daya angin.

Berdasarkan hasil survei potensi sumber daya angin dari beberapa daerah yang dihimpun, diperoleh kecepatan angin di Indonesia tergolong pada kecepatan angin rendah yaitu dalam rentang 3 – 5,5 m/s. Sehingga penting untuk dilakukan pengembangan turbin angin yang dapat memanfaatkan energi angin secara maksimal dengan kondisi kecepatan angin yang rendah namun menghasilkan daya yang tinggi.

Sebagian besar turbin angin yang digunakan saat ini memiliki desain turbin dengan rotor tunggal yang memiliki tiga bilah rotor yang dipasang pada *hub* di depan rumah generator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1a. Berdasarkan teori batas Betz, turbin angin sumbu horizontal rotor tunggal (HAWT) dapat menangkap energi angin maksimum 59,3% yang melewati luasan area turbin dengan asumsi aliran satu dimensi, stabil dan tidak dapat dimampatkan. Di sisi lain, untuk mencapai efisiensi aerodinamika 59,3% sesuai teori batas Betz tidak dapat direalisasikan oleh HAWT rotor tunggal. Hukum fisika dan kendala lain membatasi efisiensi tidak lebih besar dari sekitar 53%.



Gambar 1. a) Turbin angin rotor tunggal, b) Turbin angin *counter-rotating*

Cara lain untuk meningkatkan efisiensi turbin angin adalah dengan menggunakan metode turbin angin rotor ganda. Metode tersebut menggunakan 2 rotor dalam satu poros sehingga jika dibandingkan dengan turbin dengan rotor tunggal, luas penampang rotor yang sama akan menghasilkan daya lebih karena angin datang ditangkap oleh dua buah rotor. Dengan mempertimbangkan fenomena *wake* dan pembangkitan aliran vortex setelah udara melewati rotor depan, konfigurasi putaran pada turbin angin rotor ganda diatur berputar saling berlawanan arah yang saat ini dikenal dengan turbin angin *counter-rotating* seperti pada Gambar 1b. Model turbin angin *counter-rotating* berpotensi secara efektif dapat menghasilkan koefisien daya lebih besar dibandingkan turbin rotor tunggal disebabkan aliran *wake* di belakang rotor

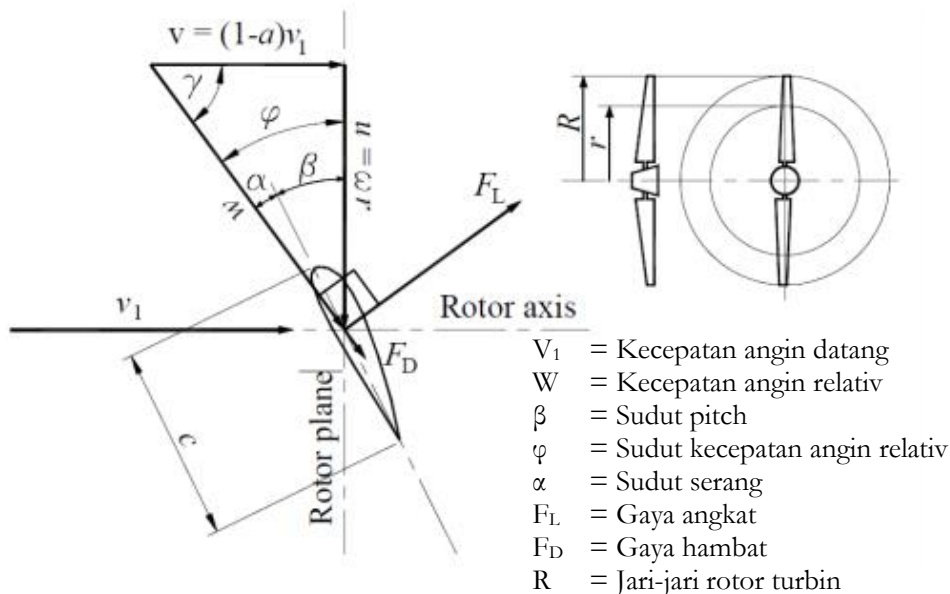
depan cenderung berputar berlawanan dengan arah rotasi rotor depan, sehingga rotor belakang harus berputar searah dengan putaran *wake* agar dapat menyerap energi angin lebih efektif. Hal tersebut dibuktikan oleh Wei dkk. dengan melakukan pengamatan pada 2 model turbin disusun segaris yang berputar *co-rotating* dan *counter-rotating* membuktikan daya yang dihasilkan kedua turbin dengan konfigurasi *counter-rotating* lebih besar dari pada *co-rotating*. Newman merumuskan model matematika dan melakukan simulasi numerik satu dimensi dari turbin rotor ganda dan rotor tak hingga, nilai batas koefisien daya teoritis diprediksi mampu mencapai 64% untuk turbin rotor ganda dan 66,7% untuk rotor tak hingga melebihi dari batas Betz untuk rotor tunggal dengan batas maksimum 59%.

Kajian numerik turbin angin *counter-rotating* telah dilakukan oleh Buana dkk. dengan variasi rasio diameter rotor depan dan belakang sebesar 0,5 hingga 2,0. Selain itu, Lee, dkk. melakukan analisa karakteristik aerodinamika dengan membandingkan jumlah bilah pada turbin angin rotor tunggal dan rotor ganda. Dari kedua penelitian tersebut menunjukkan peningkatan pada koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin *counter-rotating*.

Melalui kajian eksperimental pada cerobong angin, Mitulet dkk. memvariasikan model bilah rotor dengan rasio diameter rotor 1:1 pada jarak rotor 1 m. Sementara Zhiqiang dkk. melakukan pengamatan terhadap berbagai rasio diameter dan sudut *pitch* turbin angin *counter-rotating*. Kedua penelitian tersebut membuktikan terdapat peningkatan daya pada turbin angin *counter-rotating* apabila dibandingkan dengan turbin angin rotor tunggal.

Dari beberapa studi literatur di atas pengujian turbin angin *counter-rotating* masih sebatas pengujian simulasi dan eksperimental pada cerobong angin. Sehingga dirasa perlu untuk dilakukan pengamatan terhadap hasil performa yang dihasilkan pada kondisi lingkungan langsung untuk membuktikan teori yang berkembang pada turbin angin *counter-rotating*. Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan performa dari turbin angin *full Scale* model *counter-rotating* dengan sebuah generator dan roda gigi. Desain rotor turbin disesuaikan dengan kondisi kecepatan angin rata-rata pada lokasi penelitian. Pengaruh perubahan sudut *pitch* pada rotor turbin lebih difokuskan pada pengujian performa turbin angin *counter-rotating*.

Gambar 2 menunjukkan informasi tentang kecepatan dan distribusi gaya yang tercipta pada elemen bilah rotor. Sudut *pitch* adalah sudut yang terbentuk antara *chordline* dan bidang rotasi rotor pada kondisi desain. Pada penelitian ini sudut *pitch* akan divariasikan sebesar 0°, 10°, dan 20°.

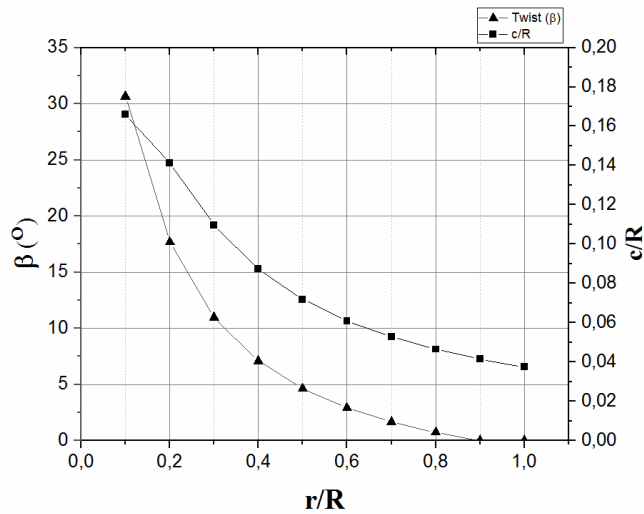


Gambar 2. Diagram vektor kecepatan dan gaya yang bekerja pada bilah turbin

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain Bilah Turbin

Desain aerodinamika bilah turbin counter-rotating dibuat berdasarkan perhitungan menggunakan teori *Blade Element Momentum* (BEM). Profil NACA 4415 dipilih sebagai bentuk dasar bilah dari pangkal bilah hingga ujung bilah karena memiliki perbandingan koefisien gaya angkat dan koefisien gaya hambat (C_L/C_D) yang tinggi dibandingkan dengan beberapa tipe profil *airfoil* lain (S822, S833, NACA 4412) pada kecepatan angin rendah [12]. Rotor turbin depan dan belakang menggunakan 3 buah bilah dengan rasio diameter (D_1/D_2) = 0,5. Kecepatan angin perancangan ditentukan sebesar 5,5 m/s sesuai dengan kondisi angin di wilayah pengujian dan RPM yang ingin dicapai sebesar 500 RPM berdasarkan putaran kerja optimal dari generator. Sehingga dengan menggunakan teori BEM dan pengembangan yang dilakukan oleh Schmitz terbentuk distribusi panjang *chord* (c) dan sudut puntir pada bilah (β) untuk rotor depan maupun belakang sesuai dengan Gambar 3. Selanjutnya pada Tabel 1 memperlihatkan spesifikasi rotor turbin angin yang digunakan.



Gambar 3. Distribusi chord dan sudut twist

Tabel 1. Spesifikasi Rotor Turbin

Spesifikasi	Rotor Depan	Rotor Belakang
Diameter	75 cm	150 cm
Jumlah Bilah	3	3
<i>Airfoil</i>	NACA 4415	NACA 4415
Sudut Serang desain	6°	6°
RPM desain	500	500
Arah Putaran	<i>Counter-clockwise</i>	<i>Clockwise</i>

2.2. Prosedur Pengambilan Data

Penelitian Turbin angin *counter-rotating* ini dilakukan secara eksperimental, dimana turbin angin dipasang dipinggir pantai selatan Yogyakarta dengan kecepatan angin rata-rata 5,5 m/s. Pengumpulan data dilakukan berdasarkan kecepatan angin yang tercapai saat pengujian. Alat ukur kecepatan angin menggunakan anemometer mangkok yang ditempatkan di depan rotor dengan jarak 1 m. Variasi sudut *pitch* rotor turbin sebesar 0°, 10° dan 20° dengan sudut ujung bilah sebagai acuan pengaturan sudut dan dilakukan pengamatan terhadap daya elektrik yang dihasilkan dari generator untuk mengetahui perbedaan performanya dari masing-masing variasi. Selanjutnya kontrol variabel pada penelitian ini adalah jumlah bilah rotor 3 buah pada rotor depan dan belakang, jarak aksial antara kedua buah rotor 0,4 m dan rasio diameter rotor 0,5. Bilah rotor terbuat dari material komposit *fiberglass*. Generator turbin menggunakan generator DC merek RAE Corporation dengan tegangan maksimum yang dihasilkan sebesar 20 VDC. Generator dihubungkan dengan 2 buah lampu AC yang masing-masing lampu memiliki daya maksimum 25 Watt dan disusun secara paralel. Perekaman data kecepatan angin, putaran rotor, tegangan dan arus dilakukan menggunakan data logger setiap 4 detik untuk melihat karakteristik performa rotor. Selanjutnya dari data yang diperoleh diambil daya maksimum yang mampu dihasilkan oleh generator pada tiap kecepatan angin.

2.2.1. Pengukuran Performa Turbin Angin *Counter-Rotating*

Parameter performa dari turbin angin bergantung pada daya keluaran dari turbin dan koefisien daya yang akan dievaluasi menggunakan persamaan (1) dan (2)

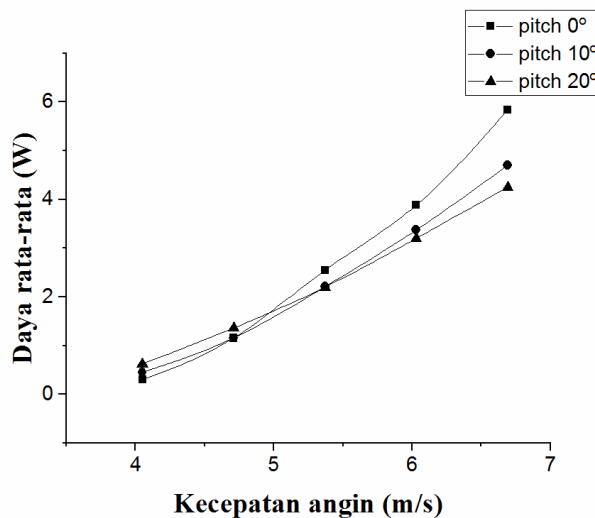
$$P_T = VI \tag{1}$$

$$C_P = \frac{P_T}{P_W} = \frac{VI}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3 \eta_{gen} \eta_{gearbox}} \tag{2}$$

Daya dari turbin dihitung berdasarkan perkalian tegangan (V) dan arus (I) yang dihasilkan generator. adapun koefisien daya (C_p) merupakan bilangan tak berdimensi yang merepresentasikan efisiensi turbin. Koefisien daya didapat dari perbandingan antara daya rotor yang dihasilkan dan daya yang terdapat pada hembusan angin seperti yang dirumuskan pada persamaan (2) dimana, ρ merupakan densitas udara (kg/m^3) yang ditentukan sebesar $1,224 \text{ kg/m}^3$, A adalah luas area rotor yang dalam penelitian ini diambil luas area rotor terbesar, dan V_∞ adalah kecepatan angin.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

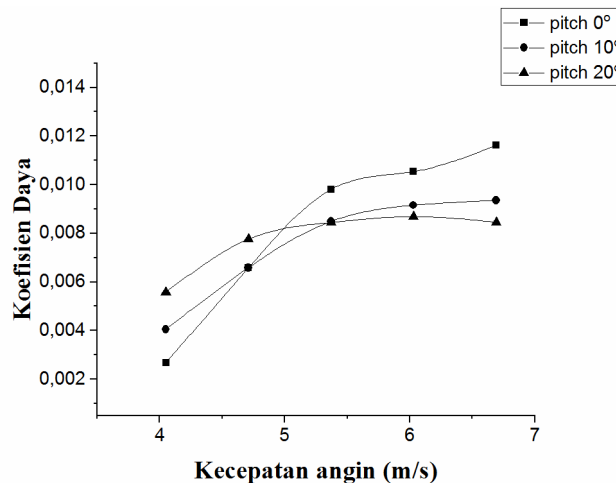
Pada Gambar 4 menunjukkan daya keluaran rata-rata yang dihasilkan generator pada rentang kecepatan angin 4 m/s hingga 7 m/s. Daya yang dihasilkan oleh rotor dengan berbagai variasi sudut *pitch* menunjukkan tren yang sama dimana peningkatan daya berbanding lurus terhadap peningkatan kecepatan angin. Daya terbesar yang dihasilkan turbin dengan sudut *pitch* 0° sebesar 5,84 watt. Selanjutnya untuk rotor dengan sudut *pitch* 10° dan 20° rata-rata daya maksimum yang dihasilkan sebesar 4,71 dan 4,25 watt. Tren yang sama juga ditunjukkan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sutrisno dkk. bahwa pembangkitan daya akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan angin. Daya keluaran yang semakin meningkat tersebut dikarenakan putaran rotor yang semakin tinggi akibat penyerapan daya angin oleh bilah rotor. Daya merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang dihasilkan generator. Peningkatan putaran generator yang dipengaruhi putaran rotor turbin menimbulkan gaya gerak listrik untuk menghasilkan tegangan dan arus.



Gambar 4. Daya generator terhadap kecepatan angin

Koefisien daya pada turbin angin sebagai indikator kemampuan turbin angin dalam menyerap energi yang terdapat pada angin ditunjukkan pada Gambar 5. Dari gambar tersebut menunjukkan karakteristik performa turbin angin *counter-rotating* terhadap perubahan sudut *pitch* dari hasil perhitungan menggunakan persamaan 2. Pada pengujian ini koefisien daya tertinggi dicapai oleh turbin angin dengan sudut *pitch* 0° dengan nilai $11,6 \times 10^{-3}$. Sedangkan turbin angin dengan sudut *pitch* rotor 10° koefisien daya tertinggi tercapai sebesar $9,4 \times 10^{-3}$ dan untuk rotor dengan sudut *pitch* 20° koefisien daya tertinggi tercapai sebesar $8,7 \times 10^{-3}$.

Dari Gambar 5 menunjukkan pengaruh perubahan sudut *pitch* terhadap performa dari turbin angin *counter-rotating*, dimana semakin besar sudut *pitch* koefisien daya yang dihasilkan pada kecepatan angin kurang dari 5 m/s akan semakin besar, akan tetapi semakin tinggi kecepatan angin, rotor turbin yang memiliki sudut *pitch* 0° mampu menghasilkan koefisien daya lebih besar. Fenomena tersebut dipengaruhi oleh sudut serang yang terbentuk dari masing-masing variasi sudut *pitch* rotor. Perubahan sudut *pitch* akan mempengaruhi sudut serang yang terbentuk pada permukaan bilah rotor. Hal tersebut mempengaruhi terbentuknya separasi pada permukaan bilah rotor yang mampu memperburuk kinerja dari rotor. Asumsi tersebut perlu dibuktikan dengan melakukan pengamatan terhadap medan aliran di area bilah dengan menggunakan CFD pada penelitian lebih lanjut. Pada kecepatan angin kurang dari 5 m/s rotor dengan sudut *pitch* 20° menghasilkan sudut serang optimum, sehingga rasio gaya angkat dan gaya hambat (C_L/C_D) berada pada kondisi maksimum untuk desain bilah dipakai dalam penelitian ini. Sebaliknya untuk rotor dengan sudut *pitch* 0° , sudut serang dan C_L/C_D optimum dicapai ketika kecepatan angin lebih dari 5,5 m/s.



Gambar 5. Koefisien daya terhadap kecepatan angin

4. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian eksperimen turbin angin *counter-rotating* yang dilakukan pada kondisi lingkungan aktual telah berhasil dilakukan. Pengujian turbin angin *counter-rotating* berhasil dilakukan pada rentang kecepatan angin 4 m/s hingga 7 m/s. Dapat disimpulkan bahwa perubahan sudut *pitch* pada rotor mempengaruhi performa turbin angin. Pada rentang kecepatan angin 4-5 m/s semakin besar sudut *pitch* koefisien daya yang dihasilkan semakin besar. Akan tetapi dengan meningkatnya kecepatan angin, rotor dengan sudut *pitch* kecil menghasilkan

koefisien daya lebih besar. Koefisien daya maksimum yang dihasilkan oleh rotor dengan sudut *pitch* 0° sebesar $11,6 \times 10^{-3}$. Sedangkan turbin angin dengan sudut *pitch* rotor 10° dan 20° koefisien daya tertinggi masing-masing tercapai sebesar $9,4 \times 10^{-3}$ dan $8,7 \times 10^{-3}$.

Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa rotor dengan sudut *pitch* tinggi memberikan manfaat pada *cut-in speed* yang rendah sehingga menjadikan turbin mudah berputar saat kecepatan angin rendah. Hal tersebut tidak terjadi pada rotor dengan sudut *pitch* rendah, akan tetapi untuk rotor dengan sudut *pitch* rendah mampu menghasilkan putaran rotor paling tinggi. Pengaruh perubahan sudut *pitch* terhadap *cut-in speed* tersebut lebih lanjut perlu dilakukan dengan menggunakan cerobong angin.

5. DAFTAR PUSTAKA

- A. Rosenberg, S. Selvaraj, and A. Sharma, "A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture," J. Phys. Conf. Ser., vol. 524, no. 1, 2014.
- B. Newman, "Multiple Actuator-Disc Theory for Wind Turbines," vol. 24, pp. 215–225, 1986.
- Hermawan, M. A. Bramantya, N. K. Majid, and A. Febrianto, "Experimental study effect of flange addition on mechanical power of diffuser augmented counter rotating wind turbine," AIP Conf. Proc., vol. 2001, pp. 3–10, 2018.
- L. A. Mituleț, G. Oprina, R. A. Chihaia, S. Nicolaie, A. Nedelcu, and M. Popescu, "Wind tunnel testing for a new experimental model of counter-rotating wind turbine," Procedia Eng., vol. 100, no. January, pp. 1141–1149, 2015.
- L. Zhiqiang, W. Yunke, H. Jie, Z. Zhihong, and C. Wenqi, "The study on performance and aerodynamics of micro counter-rotating HAWT," Energy, vol. 161, pp. 939–954, 2018.
- M. Bakırcı and S. Yılmaz, "Theoretical and computational investigations of the optimal tip-speed ratio of horizontal-axis wind turbines," Eng. Sci. Technol. an Int. J., vol. 21, no. 6, pp. 1128–1142, 2018.
- R. J. Conzemius, "WIND TURBINE AND SODAR OBSERVATIONS OF WAKES IN A LARGE WIND FARM," 19th Symp. Bound. Layers Turbul., 2010.
- R. K. Singh and M. R. Ahmed, "Blade design and performance testing of a small wind.
- S. Lee, H. Kim, and S. Lee, "Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine," Curr. Appl. Phys., vol. 10, no. 2 SUPPL., pp. S339–S342, 2010.
- S. Lee, H. Kim, E. Son, and S. Lee, "Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine," Renew. Energy, vol. 42, pp. 140–144, 2012.
- S. Martosaputro and N. Murti, "Blowing the wind energy in Indonesia," Energy Procedia, vol. 47, pp. 273–282, 2014.
- S. S. Navin Prasad E, Janakiram S, Prabu T, "Design and development of horizontal small wind turbine blade for low wind speeds," Int. J. Eng. Sci. Adv. Technol., no. 1, pp. 75–84, 2014.
- S. W. Buana, V. A. Koehuan, A. Riszal, S. Kamal, and S. Sugiyono, "Analisi Pengaruh Rasio Diameter sebagai Parameter Kinerja Aerodinamika Dual Rotor Counter-rotating Wind Turbine," Pros. Semnastek, no. November, pp. 1–10, 2016.
- Y. Wei, T. Wei, O. Ahmet, and H. U. Hui, "An experimental study on the effects of relative rotation direction on the wake interferences among tandem wind turbines," Sci. China Physics, Mech. Astron., vol. 57, no. 5, pp. 935–949, 2014.
- Z. Wang, W. Tian, A. Ozbay, A. Sharma, and H. Hu, "An experimental study on the aeromechanics and wake characteristics of a novel twin-rotor wind turbine in a turbulent boundary layer flow," Exp. Fluids, vol. 57, no. 9, pp. 1–17, 2016.