

PENGARUH JUMLAH SUDU TERHADAP KARAKTERISTIK PUTARAN TURBIN ANGIN HORIZONTAL DENGAN MENGGUNAKAN METODE SIMULASI *BLADE ELEMENT MOMENTUM*

Ridway Balaka, Jenny Delly, Aditya Rachman, Yuspian Gunawan

Teknik Mesin Universitas Haluoleo Kampus Hijau Bumi Tridarma Andounohu Kendari Sulawesi Tenggara 93111
bridway@yahoo.com.au, jenydelly@yahoo.com, aditya_rchmn@yahoo.com, ygunawan@yahoo.com

Abstrak

Karakteristik putaran generator merupakan salah satu aspek penting dalam teknologi pembangkit listrik berbasis konversi tenaga angin. Karakteristik ini akan menentukan laju perubahan medan magnet yang dihasilkan persatuan waktu (fluk) oleh putaran relatif magnet permanen terhadap konduktor untuk menghasilkan Gaya Gerak Listrik (GGL) pada generator. Jika putaran relatif tersebut tidak dapat memenuhi kebutuhan spesifikasi generator, sangat memungkinkan energi yang dihasilkan tidak akan optimal. Sebagai sumber penggerak generator, turbin dapat menentukan karakteristik putaran generator. Sehingga dalam pendesainan turbin angin, sangat diperlukan adanya penyesuaian antara karakteristik putaran turbin dan karakteristik putaran generator. Jumlah sudu dipercaya bukan hanya menentukan konstruksi dan biaya pembuatan, namun juga karakteristik putaran turbin. Studi ini mencoba untuk meneliti pengaruh jumlah sudu terhadap karakteristik putaran turbin angin horizontal. Metodologi yang digunakan adalah studi parametrik dengan menggunakan model *Blade Element Momentum*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa turbin bersudu sedikit akan memiliki karakteristik putaran yang lebih tinggi dari pada turbin bersudu banyak. Hal ini disebabkan turbin bersudu sedikit mampu menghasilkan torsi pada putaran tinggi sedangkan turbin bersudu banyak tidak mampu menghasilkan torsi pada putaran tinggi. Diskusi mengenai alasan yang lebih dalam dari hasil penelitian dengan menghubungkan dengan aspek aerodinamis dan rekomendasi juga akan disajikan dalam studi ini.

Keywords: turbin angin, putaran, jumlah sudu, *Blade Element Momentum*, aerodinamis

Pendahuluan

Pertumbuhan ekonomi dan peningkatan standar hidup masyarakat secara langsung atau tidak langsung memiliki keterkaitan dengan meningkatnya penggunaan energi (Nguyen KQ, 2006). Saat ini mayoritas penggunaan energi di dunia bersumber dari bahan fosil. Namun, penggunaan energi dalam bentuk ini dihadapkan pada masalah keterbatasan dan kerusakan lingkungan.

Teknologi pembangkit energi berbasis turbin angin memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan energi fosil. Selain ramah lingkungan, teknologi ini relatif bebas dari masalah keterbatasan karena sumbernya dapat diperbaharui. Pada akhir tahun 2010, turbin angin yang terpasang di dunia dapat menghasilkan listrik setara 430 *TerraWattHours* (TWH) per tahun. Nilai ini sebanding dengan lebih dari 2 persen energi yang dikonsumsi di dunia (WWEA, 2011).

Salah satu aspek penting dalam pendesainan turbin angin adalah karakteristik putaran generator. Mekanisme konversi energi dalam generator didasarkan pada produksi Gaya Gerak Listrik (GGL) dinamis induksi. Hukum Faraday menyatakan bahwa GGL akan timbul ketika magnet permanen digerakan

relatif terhadap konduktor atau sebaliknya, untuk memberikan pengaruh perubahan fluks. Jumlah GGL yang timbul sebanding dengan perubahan laju fluks. Jika konduktor tersebut dihubungkan melalui beban listrik, arus akan mengalir. Sehingga, karakteristik putaran dari generator adalah aspek penting dalam menentukan daya output. Hal ini disebabkan karakteristik putaran generator akan menentukan jumlah gerakan relatif dari magnet terhadap konduktor, atau sebaliknya, untuk menghasilkan perubahan fluks.

Karakteristik putaran turbin merupakan salah satu aspek yang akan mempengaruhi karakteristik putaran generator. Hal ini disebabkan pada sistem pembangkit energi berbasis angin, turbin dan generator biasanya dihubungkan oleh sebuah sistem transmisi. Putaran turbin yang tinggi akan memungkinkan putaran tinggi pada generator, dan sebaliknya.

Jumlah sudu selain dapat mempengaruhi kinerja turbin, biaya pembuatan dan konstruksi, dapat juga mempengaruhi karakteristik putaran turbin. Dalam beberapa penelitian (Nishizawa (2011), Rachman (2010), Atmadi dkk (2010), Leung dkk (2010), Wang dkk (2008), Swanson dkk (2002)) pada turbin angin sumbu horizontal, dengan menggunakan metode eksperimen dan komputasi, terdapat indikasi adanya

kontribusi putaran pada perilaku penggaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin. Hasil studi-studi ini menunjukkan bahwa turbin dengan jumlah sudu banyak akan memiliki kinerja yang baik pada putaran rendah, sedangkan turbin bersudu sedikit akan memiliki kinerja yang baik pada putaran yang besar. Walaupun memberikan sedikit gambaran tentang hubungan antar putaran dan jumlah sudu, diskusi mengenai hal ini kurang didiskusikan lebih dalam karena kebanyakan tujuannya adalah studi – studi tersebut adalah untuk melakukan optimasi kinerja turbin (efisiensi) pada variasi jumlah sudu dan untuk mengetahui pengaruh jumlah sudu terhadap kinerja turbin. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi hubungan antara jumlah sudu dan karakteristik putaran pada turbin angin sumbu horisontal. Penelitian ini juga mencoba untuk membahas secara lebih mendalam alasan di balik fenomena dari hasil investigasi.

Metodologi

Penelitian ini dilakukan dengan studi parametrik dengan menggunakan persamaan matematika dari model *Blade Element Momentum Theory*.

Teori Blade Element Momentum

Persamaan ini dapat dimanfaatkan dalam merancang sudu dan dalam mengevaluasi kinerja turbin angin horisontal. Persamaan ini juga memungkinkan pengguna untuk mengevaluasi gaya yang bekerja pada sudu, torsi dan daya poros pada sudu dengan berbagai kecepatan angin (Lanzafame dkk 2010).

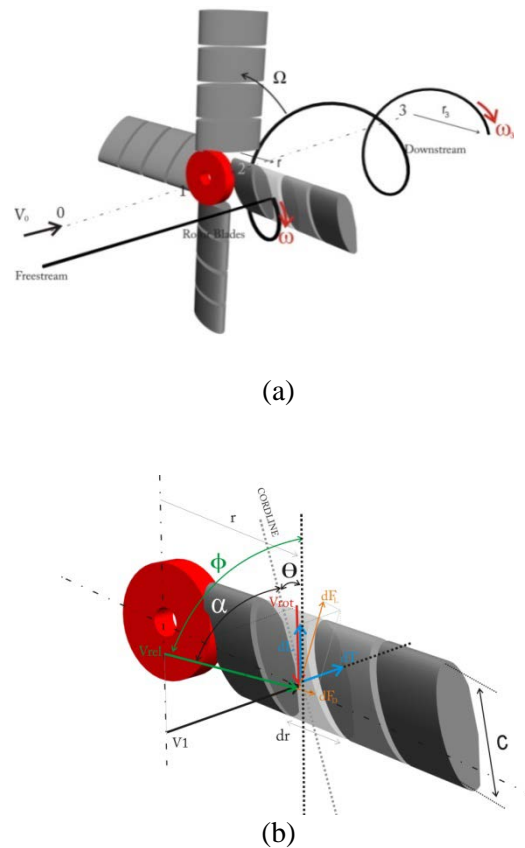
Dalam persamaan ini, sudu turbin dibagi menjadi beberapa bagian (*element*). Untuk jumlah sudu sebesar B, nilai gaya angkat (dL) untuk setiap elemen sudu, torsi (dQ) untuk setiap elemen sudu dan koefisien torsi (CQ) turbin dirumuskan sebagai

$$dL = B \rho \left(\frac{8 V_0}{(K+4) \sin \phi} \right)^2 (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) c \, dr \quad (1)$$

$$dQ = r \, dL \quad (2)$$

$$CQ = \frac{\int_{r_h}^R dQ}{0.5 \rho \pi R^3 V_0^2} \quad (3)$$

dimana V_0 adalah kecepatan fluida (m / s), ρ adalah massa jenis air (Kg/m³), R adalah jari-jari turbin (m), r_h adalah jari-jari *hub* turbin (m), r adalah jari-jari dari setiap elemen sudu (m), c adalah lebar sudu (m), ϕ adalah sudut relatif (°), C_L adalah koefisien angkat aerofoil (*lift coefficient*), C_D adalah koefisien drag aerofoil (*drag coefficient*) dan k adalah koefisien tahanan.



Gambar 1.

(a) Model *Blade Element Momentum*
 (b) Kecepatan dan gaya yang bekerja pada sudu.
 Digambar oleh Rachman sumber Duran (2005) dan Manwell dkk (2002)

Sudut relatif (ϕ) adalah sudut yang dibentuk oleh kecepatan aksial angin di sudu (V_1) dan kecepatan putar angin di sudu (V_{rot}) yang merupakan fungsi dari kecepatan putar turbin (Ω).

Koefisien *lift* dan *drag* (C_L dan C_D) merupakan fungsi dari sudut serang (α) dan bilangan Reynolds (Re). Sudut serang (α) didefinisikan sebagai sudut antara garis tengah penampang sudu (c) dan kecepatan angin relatif (V_{rel}) (lihat Gambar 1b). Sudut ini memiliki hubungan $\alpha = \phi - \theta$, dimana θ adalah sudut sudu (sudut *pitch*).

Untuk menghitung gaya *lift* (dL) setiap elemen sudu, torsi (dQ) setiap elemen sudu dan koefisien torsi (CQ) pada sudu menggunakan persamaan-persamaan di atas dibutuhkan asumsi beberapa parameter, seperti kecepatan relatif (V_{rel}), koefisien angkat dan drag koefisien (C_L dan C_D), koefisien tahanan (k) dan sudut relatif (ϕ). Persamaan – persamaan di bawah ini dapat digunakan untuk mengoreksi parameter – parameter yang diasumsikan sebelumnya.

$$\frac{16 K}{[K+4]^2} = \frac{B V_{rel}^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) c}{2 V_0^2 \pi r} = F^* \quad (4)$$

atau

$$K_{i+1} = \frac{F*[K_i+4]^2}{16} \tag{5}$$

dan

$$\frac{4 a'}{K+4} = \frac{B \rho V_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c}{8 V_0 \Pi \rho \Omega r} = Q^* \tag{6}$$

atau

$$4 a'_{(i+1)} = (K_{(i+1)} + 4) Q^* \tag{7}$$

Dalam investigasi ini, faktor *tip loss* (rugi –rugi di ujung sudu) dimasukkan kedalam perhitungan. Faktor ini dimasukkan kedalam perhitungan gaya (*lift*) pada sudu dengan menggunakan metode perkiraan *Pradntl* sebagai berikut

$$TL = \frac{2}{\Pi} \arccos \left(\exp \left(\frac{(R-r).B.V_{rel}}{2 V_1 R} \right) \right) \tag{8}$$

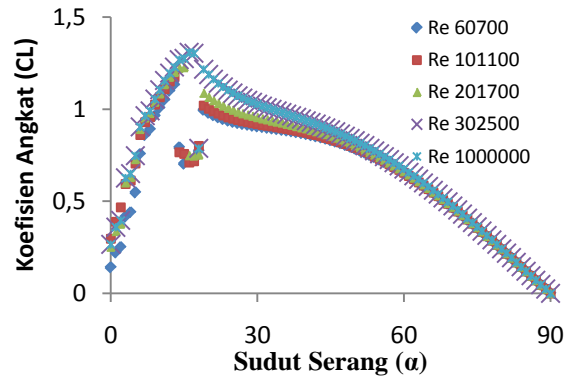
Data Penelitian

Dalam investigasi ini, parameter jari-jari (R) dari turbin yang dimasukkan adalah 3 meter. Pemilihan penampang sudu adalah aerofoil dengan jenis NACA 2415. Data koefisien *lift* dan *drag* (C_L dan C_D) diperoleh dari studi di Hughes (2009). Lebar sudu (c) adalah 0.2 m dan dijaga konstan sepanjang sudu. Sudut sudu (θ) adalah 8° dan dijaga konstan sepanjang sudu. Kecepatan angin (V_0) adalah 4 m/s. Nilai putaran turbin (Ω) divariasikan 0- 250 Putaran per Menit (RPM) dan jumlah sudu (B) divariasikan sebesar 2,4 dan 8 buah.

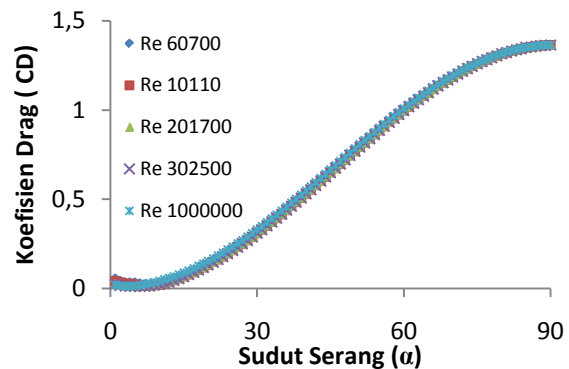
Hasil penelitian ini disajikan dalam grafik yang menunjukkan nilai koefisien torsi pada variasi putaran dan jumlah sudu. Grafik ini diharapkan dapat mengindikasikan hubungan operasi putaran terhadap variasi jumlah sudu supaya torsi dapat dihasilkan.

Untuk memperoleh informasi tambahan yang dapat dimanfaatkan untuk menjelaskan alasan dari hasil investigasi, studi ini menghitung data dari rasio kecepatan aliran aksial pada sudu dan kecepatan angin ($V_R = V_1/V_0$) dan sudut serang (α). Data tambahan ini didapatkan selama proses perhitungan dengan menggunakan persamaan *Blade Element Momentum*. Data–data dari rasio kecepatan (V_R) dan sudut serang (α) tersebut diambil dari nilai rata rata dari elemen-elemen sepanjang sudu.

Program MATLAB digunakan untuk mempermudah perhitungan koefisien torsi dan data-data tambahan. Salah satu alasannya adalah kebutuhan proses iterasi dalam perhitungan (lihat Persamaan (4) sampai (7)).



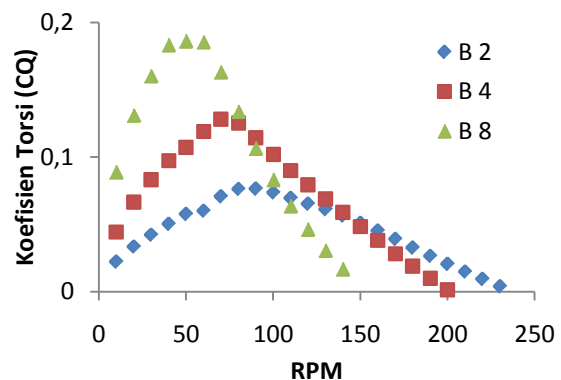
Gambar 2. Koefisien lift NACA 2415 (Hughes 2009)



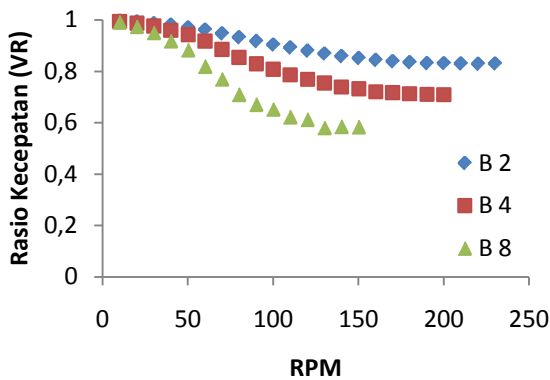
Gambar 3 . Koefisien drag NACA 2415 (Hughes 2009)

Hasil dan Pembahasan

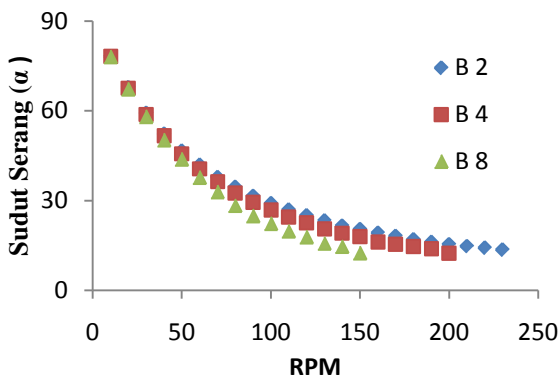
Gambar – gambar berikut adalah data hasil perhitungan dengan menggunakan model *Blade Element Momentum Theory*.



Gambar 4 . Koefisien torsi (CQ) pada variasi jumlah sudu (B)



Gambar 5 . Rasio kecepatan (VR) pada variasi jumlah sudu (B)



Gambar 6. Sudut serang (α) pada variasi jumlah sudu (B)

Turbin dengan sudu 8, memiliki daerah putaran 0 - 150 RPM dalam menghasilkan torsi. Koefisien torsi (CQ) maksimum adalah 0.2 yang diperoleh pada saat turbin beroperasi pada 60 RPM. Turbin dengan sudu 4 memiliki daerah putaran 0- 200 RPM. Koefisien torsi maksimum adalah 0.13 yang diperoleh pada saat turbin beroperasi pada 75 RPM. Turbin dengan sudu 2 memiliki daerah putaran 0- 230 RPM. Koefisien torsi maksimum adalah 0.6 yang diperoleh pada saat turbin beroperasi pada 100.

Dari fenomena hasil investigasi diatas, turbin yang memiliki sudu yang sedikit memiliki daerah operasi putaran yang lebih besar dibandingkan dengan turbin bersudu lebih banyak. Selain itu, turbin bersudu banyak akan mencapai nilai koefisien torsi maksimum pada daerah putaran yang lebih rendah daripada putaran pada saat torsi maksimum dicapai oleh turbin bersudu lebih sedikit.

Sudut serang (α) untuk turbin bersudu banyak akan mendekati 15° pada putaran rendah, sedangkan sudut serang (α) pada turbin bersudu sedikit akan mendekati 15° pada putaran tinggi. Karena aerofoil NACA 2014 memiliki nilai koefisien angkat yang tinggi pada sudut disekitar 15° (lihat Gambar 2), turbin bersudu sedikit lebih akan memiliki gaya angkat yang lebih besar pada putaran tinggi, sedangkan turbin bersudu lebih banyak akan memiliki gaya angkat yang lebih besar pada

putaran rendah. Gaya angkat ini akan berkontribusi dalam menghasilkan torsi. Hal ini menyebabkan turbin bersudu sedikit dapat beroperasi pada putaran yang lebih tinggi daripada turbin bersudu banyak.

Pada putaran tinggi, kecepatan sudu pada turbin bersudu sedikit lebih besar dibandingkan dengan turbin bersudu yang lebih banyak. Hal ini dapat dilihat dari rasio kecepatan turbin bersudu sedikit yang lebih tinggi dari pada turbin bersudu banyak pada putaran tinggi (lihat Gambar 5). Menurut penjelasan dalam teori Blade Elemen, sudut serang (α) merupakan selisih dari sudut realtif (ϕ) dan sudut sudu (θ). Sudut relatif (ϕ) merupakan sudut antara kecepatan aksial angin di sudu (V_1) dan kecepatan putar angin di sudu (V_{rot}) yang merupakan fungsi dari kecepatan putar turbin (Ω). Kombinasi dari kecepatan putaran (V_{rot}) tinggi, yang disebabkan oleh putaran operasi tinggi, dan kecepatan sudu (V_1) tinggi pada turbin bersudu sedikit sangat memungkinkan untuk menghasilkan sudut relatif (ϕ) yang akan menghasilkan sudut serang (α) yang cukup untuk menghasilkan nilai koefisien lift yang besar. Untuk turbin bersudu besar, pada putaran tinggi, kecepatan sudu (V_1) adalah sangat kecil. Hal ini sangat memungkinkan untuk menghasilkan sudut serang yang terlalu kecil, sehingga koefisien lift yang dihasilkan adalah kecil pada putaran tinggi.

Salah satu alasan pada fenomena kecepatan sudu yang lebih rendah pada putaran yang lebih tinggi untuk turbin bersudu banyak adalah pengaruh tahanan (*blockade effect*). Hal ini disebabkan oleh banyaknya intraksi antara permukaan sudu dengan aliran akibat banyaknya sudu.

Untuk turbin bersudu sedikit, karena pengaruh interaksi permukaan dan aliran relatif lebih kecil, dibanding dengan turbin bersudu banyak, pengaruh tahanan lebih kecil. Hal ini menyebabkan kecepatan sudu pada putaran tinggi relatif lebih besar yang memungkinkan turbin beroperasi pada sudut serang yang relatif lebih besar dibanding dengan turbin bersudu banyak.

Kesimpulan dan Rekomendasi

Studi ini telah menginvestigasi pengaruh jumlah sudu terhadap karakteristik putaran turbin angin horisontal. Berikut ini beberapa kesimpulan yang dapat diambil.

Turbin bersudu sedikit dapat beroperasi pada putaran yang lebih tinggi dari pada turbin bersudu banyak. Hal ini disebabkan oleh kemampuan turbin bersudu lebih sedikit untuk menghasilkan torsi pada putaran yang lebih tinggi dari pada turbin bersudu lebih banyak.

Turbin bersudu banyak akan memiliki sudut serang yang mendekati 15° (sudut dimana koefisien gaya angkat (*lift*) tinggi) pada putaran rendah. Sebaliknya,

untuk turbin bersudu kecil, sangat memungkinkan untuk mendapatkan sudut serang 15° pada putaran tinggi. Hal ini disebabkan oleh kemampuan turbin bersudu sedikit untuk menjaga kecepatan angin yang tinggi pada putaran tinggi sebagai akibat dari rendahnya pengaruh hambatan sudu.

Pemilihan rasio transmisi merupakan hal yang sangat penting diperhatikan ketika seorang perencana (*designer*) memutuskan jumlah sudu pada sebuah desain turbin angin. Ketika jumlah sudu besar, rasio transmisi yang dibutuhkan harus besar, dan sebaliknya. Hal

ini disebabkan oleh karakteristik putaran rendah pada turbin bersudu banyak. Hal ini ditujukan untuk menjaga putaran generator pada suatu kondisi yang telah disyaratkan untuk menjaga gerakan relatif mahnet permanen terhadap konduktor untuk menghasilkan GGL listrik.

Referensi

- Atmadi S, Fitroh A J, Analisis dan Optimasi Sudu SKEA 5 KW untuk Pemompaan, Jurnal Teknologi Dirgantara, Vol 8 no 2, Desember, Hal 108 – 115 (2010)
- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E, Wind Energy Hdanbook, John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England (2001)
- Duran S, Computer-aided design of horizontal-axis wind turbine blades, Master's thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey. Available online iats09.karabuk.edu.tr/press/bildiriler_pdf/IATS09_06-01_1290.pdf (2005)
- Hughes L, Optimization of small HAWTs and remote area power supply design, Bachelor Degree Thesis, University of Wollongong, Faculty of Engineering, NSW Australia (2009)
- Lanzafame R, Messina M, Horizontal axis wind turbine working at maximum power coefficient continuously, Journal Renewable Energy Vol35 Hal. 301–306 (2010)
- Leung DYC, Deng Y, Leung MKH, Design Optimization of a Cost-Effective Micro Wind Turbine, Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol II WCE June 30 - July 2, London, U.K. available online www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010_pp988-993.pdf (2010)
- Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL, Wind Energy Explained; Theory, Design dan Application, University of Massachusetts, Amherst, USA JOHN WILEY & SONS, LTD (2002)
- Nishizawa Y, An Experimental Study of the Shapes of Rotor for Horizontal-Axis Small Wind Turbines, Wind Turbines, Ibrahim Al-Bahadly (Ed.), ISBN: 978-953-307-221-0, InTech, Available: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/an-experimental-study-of-the-shapes-of-rotor-for-horizontal-axis-small-wind-turbines> (2011)
- Nguyen K Q, Alternatives to grid extension for rural electrification: Decentralized renewable energy technologies in Vietnam, Energy Policy, Vol 35, Hal. 2579–2589 (2007)
- Rachman A, Parametric Study of a Horizontal Axis Ducted Wind Turbine, Master Engineering Thesis, University of Wollongong, Faculty of Engineering, NSW Australia (2010)
- Swanson J, Visser K, Improving the Efficiency of Small Wind Turbines by Optimizing Blade Number and Solidity, available online www.clarkson.edu/reu/archives/2002/abstracts/Swanson.pdf (2002)
- Wang SH, Cheng SH, Blade number effect for a ducted wind turbine, Journal Mechanical Science Technology Vol22, Hal 1984-1992 (2008)
- World Wind Energy Association (WWEA), World Wind Energy Report 2010, Date of publication: April (2011)