

Influence of Guide Vane Number and Angle on Cross Flow Turbine Performance of Cooling Tower

Budi Santoso^{1,*}, Dominicus Danardono D.P. Tjahjana¹ dan Purwadi Joko Widodo¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret - Surakarta

*Korespondensi: msbudis@yahoo.co.id

Abstract. The purpose of this study is to determine the effect of the number and angle of the guide vane in the cross-flow turbine. Modeling is made of laboratory scale with turbine diameter 400 mm and height 380 mm. Wind turbine testing is done for the number of guide vane 2, 3, and 4 with a variation of inclination angle 30°, 45°, 60°, 75° and 90°. The cross-flow turbine position on the edge of the cooling tower outlet (30 cm from the center axis of the cooling tower) produces the best performance. The cross-flow turbine type with three guide vane capable of producing the power of 3.06 Watt and 67.3% higher than the power produced without guide vane. Installation of wind turbines as an energy recovery system in the cooling tower does not raise the power of the cooling tower motor.

Abstrak. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah dan sudut sudu pengarah pada turbin *cross-flow*. Pemodelan dibuat dari skala laboratorium dengan diameter turbin 400 mm dan tinggi 380 mm. Pengujian turbin angin dilakukan untuk jumlah sudu pengarah 2, 3, dan 4 dengan variasi sudut inklinasi 30°, 45°, 60°, 75° dan 90°. Posisi turbin *cross-flow* di tepi keluaran menara pendingin (30 cm dari sumbu tengah menara pendingin) menghasilkan kinerja terbaik. Tipe turbin *cross-flow* dengan tiga sudu pengarah mampu menghasilkan daya 3,06 Watt dan 67,3% lebih tinggi dari daya yang dihasilkan tanpa sudu pengarah. Pemasangan turbin angin sebagai sistem pemulihan energi di menara pendingin tidak menaikkan daya motor menara pendingin.

Kata kunci: cooling tower, guide vane, energy recovery, cross-flow turbine

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Cooling tower atau menara pendingin merupakan alat yang paling umum digunakan sebagai alat penukar panas pada industri dan mesin refrigerasi. *Cooling tower* menggunakan udara sebagai fluida pendingin dan air atau refrigeran sebagai fluida yang didinginkan dengan metode *mixed flow* dan *cross flow*. *Cooling tower* membutuhkan fan/kipas untuk mengalirkan udara dan udara yang keluar dari *Cooling tower* masih memiliki kecepatan udara yang relatif tinggi. Jenis *cooling tower* yang paling umum digunakan adalah *induced draft cooling tower*. Udara sekitar ditarik ke menara pendingin dan udara panas dipaksa keluar dari *outlet* menara pendingin dengan bantuan kipas. Sistem pembuangan udara ini cocok untuk pembangkit listrik karena dapat menghasilkan kecepatan angin hingga 18 m/s pada jarak 0,3 m di atas *outlet cooling tower*. Udara buangan dengan kecepatan tinggi dari *cooling tower* ini dapat dimanfaatkan sebagai penggerak dari turbin angin. Turbin angin dapat ditempatkan di atas *cooling tower* dimana kecepatan angin yang dihasilkan lebih tinggi dan konsisten jika dibandingkan dengan angin alami.

Cara yang dilakukan untuk meningkatkan performa turbin angin antara lain adalah memilih

jenis turbin angin, menempatkan *diffuser* atau penutup di sekeliling turbin dan menggunakan beberapa sudu pengarah (*guide vane*). Sudu pengarah ditempatkan di posisi aliran udara masuk yang akan menuju ke turbin angin. Sudu pengarah dengan sudut kemiringan yang optimum digunakan untuk mempercepat aliran angin dengan menciptakan efek venturi dan untuk mengarahkan aliran angin ke arah turbin angin. Dengan mengatur jumlah dan sudut kemiringan sudu pengarah pada kondisi optimal maka akan didapat daya turbin angin yang maksimal. Pengaruh jumlah dan sudut kemiringan tersebut diharapkan untuk meningkatkan performa turbin angin skala kecil yang terintegrasi dengan *cooling tower*.

Chong dkk. [1] melakukan penelitian tentang sistem pemulihan energi pada *cooling tower* menggunakan turbin angin. Udara buangan *cooling tower* dimanfaatkan sebagai penggerak turbin angin untuk menghasilkan energi listrik. Penelitian dilakukan dengan membuat model *cooling tower* skala kecil. Turbin angin sumbu vertikal tipe H rotor 5 sudu diletakkan di atas *cooling tower* berdiameter 0,4 m dan penutup yang terdiri dari dua plat *diffuser* dengan kemiringan 7° yang diletakkan pada kedua ujung turbin angin dan tiga sudu pengarah diletakkan

didekat outlet cooling tower, kecepatan angin yang digunakan konstan 8 m/s. Hasil penelitian menunjukkan setelah menggunakan diffuser dan sudu pengarah kecepatan putar turbin meningkat 30,4 %. Dimana dengan diffuser dan sudu pengarah menghasilkan kecepatan putar 150 rpm sedangkan tanpa diffuser hanya 115 rpm. Konsumsi daya cooling tower sebelum dan sesudah terpasang turbin angin tidak mengalami perubahan signifikan pada kisaran 96,08 Watt – 96,314 Watt.

Chong dkk. [2] melakukan penelitian sistem pemulihan energi dengan turbin angin pada sistem pembuangan udara. Model skala kecil cooling tower menggunakan kipas angin berdiameter 0,7 m dan dua buah turbin angin vertikal tipe H rotor 5 sudu serta penutup yang terdiri dari diffuser dengan kemiringan 7° dan tiga sudu pengarah dengan sudut masing-masing 100°, 70° dan 90°. Hasil penelitian menunjukkan performa turbin setelah terpasang sudu pengarah membuat koefisien torsi meningkat 24,3 % dari 0,029 ke 0,036. Hal ini dikarenakan sudu pengarah membuat angin langsung menuju ke daerah torsi positif turbin sehingga dapat meningkatkan performa turbin.

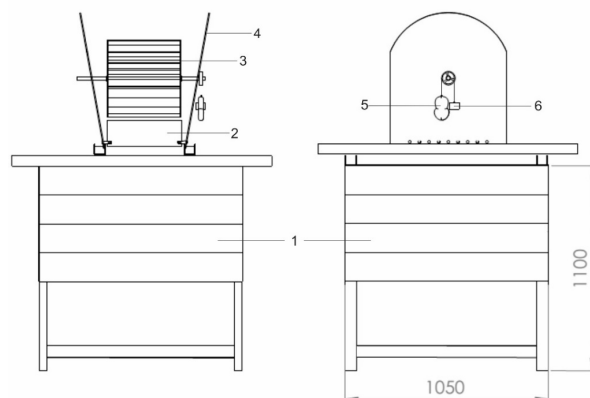
Chong dkk. [3] melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh sudu pengarah dan diffuser pada sistem pemulihan energi pada cooling tower. Penelitian dilakukan menggunakan kipas angin berdiameter 0,7 m, duct silinder berdiameter 0,8 m, dua buah turbin H rotor 5 sudu menggunakan airfoil MH114, diffuser dengan kemiringan 7°, dan empat sudu pengarah. Variasi sudut kemiringan sudu pengarah mulai dari 0°-180°. Hasil penelitian menunjukkan sudut optimal dari sudu pengarah adalah 40°, 70°, 70° dan 40° dengan masing-masing kecepatan putar turbin sebesar 471,7 rpm, 482,2 rpm, 478,9 rpm dan 480 rpm. Sudu pengarah pada sudut optimum membuat kecepatan putar turbin bertambah dan kecepatan rata-rata air intake meningkat 32,9 %.

Turbin angin tipe *cross flow* ditempatkan pada bagian *outlet cooling tower* untuk memanfaatkan udara buangan dari *cooling tower* untuk menghasilkan energi listrik. Integrasi ini terdiri dari sudu pengarah dan diffuser yang digunakan untuk meningkatkan kecepatan putar turbin sehingga daya yang dihasilkan meningkat. Untuk menghindari pengaruh negatif pada *cooling tower* dan untuk mengoptimalkan performa turbin angin, penentuan posisi turbin dan pengukuran konsumsi daya *cooling tower* juga dilakukan dalam eksperimen.

Metode Penelitian

Gambar 1 memperlihatkan peralatan yang digunakan. Udara keluar dari menara pendingin buatan menggerakkan turbin yang diukur putaran

dan torsi, sehingga daya turbin angin dapat dihitung. Motor listrik penggerak kipas menara pendingin juga diukur dengan wattmeter.



Gambar 1. Skema rangkaian eksperimen

Keterangan gambar:

1. Model *cooling tower*
2. Sudu pengarah
3. Turbin angin
4. *Diffuser*
5. Timbangan tangan digital
6. Beban pemberat

Perbandingan antara daya keluaran rotor terhadap daya total yang melalui penampang rotor disebut koefisien daya c_p . Dirumuskan dengan,

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A} \quad (1)$$

dimana:

- c_p = koefisien daya (*power coefficient*)
- P = daya mekanik yang dihasilkan rotor (Watt)
- P_0 = daya mekanik total yang terkandung dalam angin (Watt)
- A = luas area sapuan rotor (m^2)
- v_1 = kecepatan aliran udara sebelum melewati rotor (m/s)
- v_2 = kecepatan aliran udara setelah melewati rotor (m/s)

Tip speed ratio (rasio kecepatan ujung) adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, *tip speed ratio* akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor. *Tip speed ratio* dihitung dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{\pi D n}{60 v} \quad (1)$$

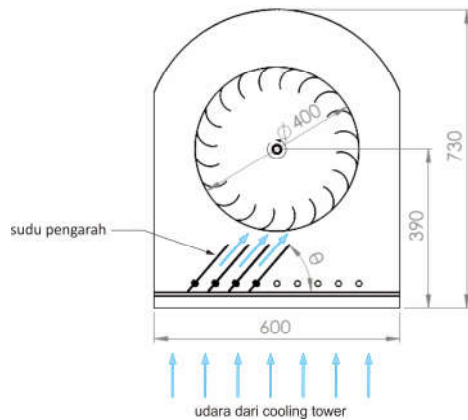
dimana:

- λ = *tip speed ratio*
- D = diameter rotor (m)
- n = putaran rotor (rpm)
- v = kecepatan angin (m/s)

Sudu pengarah yang digunakan dengan panjang 150 mm dan lebar 380 mm. sudu pengarah diletakkan diantara outlet *cooling tower* dan turbin angin. Adapun variasi sudu pengarah yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Variasi jumlah dan sudut kemiringan sudu pengarah.
 - Sudu pengarah aliran dengan jumlah 2 sudu dengan variasi sudut kemiringan 30°, 45°, 60°, 75°, 90°.
 - Sudu pengarah aliran dengan jumlah 3 sudu dengan variasi sudut kemiringan 30°, 45°, 60°, 75°, 90°.
 - Sudu pengarah aliran dengan jumlah 4 sudu dengan variasi sudut kemiringan 30°, 45°, 60°, 75°, 90°.

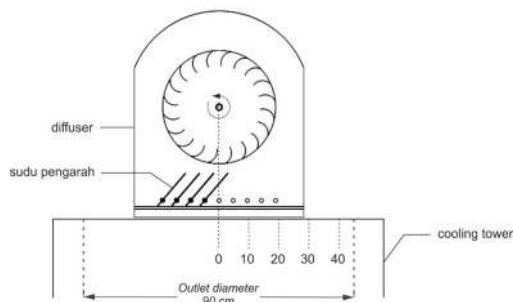
Skema variasi jumlah dan sudut kemiringan (θ) pada sudu pengarah ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Skema variasi jumlah dan sudut kemiringan (θ) sudu pengarah

2. Variasi posisi turbin angin.

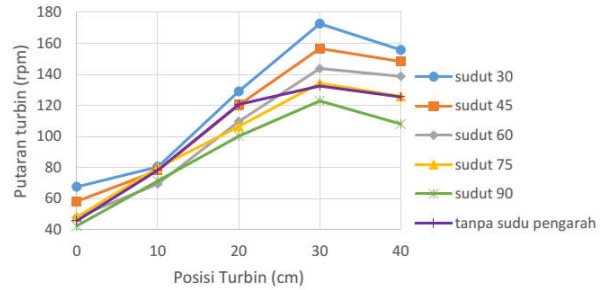
Untuk menentukan posisi optimal turbin dengan sudu pengarah, dibuat variasi posisi penempatan turbin terhadap model *cooling tower* pada sumbu horizontal dengan mengambil poros turbin angin dan bagian tengah *cooling tower* sebagai referensi titik nol. Perubahan posisi dilakukan tiap 10 cm dimulai dari bagian tengah outlet *cooling tower* sampai dengan posisi 40 cm. Skema dari variasi posisi turbin angin ditunjukkan pada gambar 3.



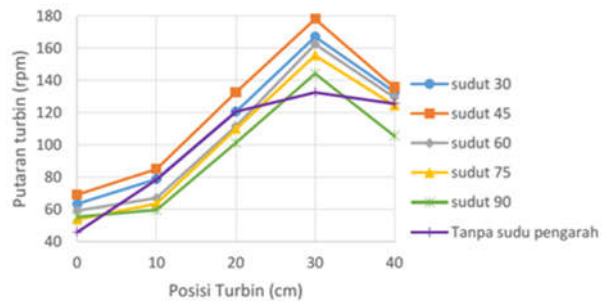
Gambar 3. Skema variasi posisi turbin angin

Hasil dan Pembahasan

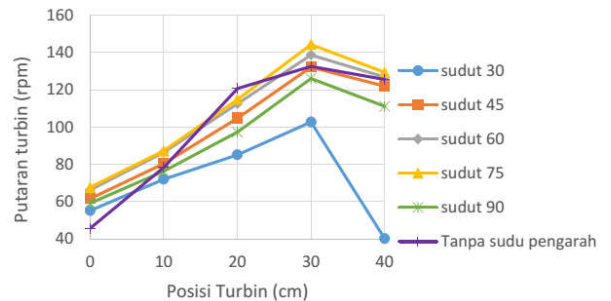
Pengujian turbin angin dengan jumlah 2, 3, dan 4 sudu pengarah dilakukan dengan variasi sudut kemiringan sudu pengarah 30°, 45°, 60°, 75° dan 90° pada setiap variasi posisi turbin 10 cm, 20 cm, 30 cm dan 40 cm.



a. Dua sudu pengarah



b. Tiga sudu pengarah



c. Empat sudu pengarah

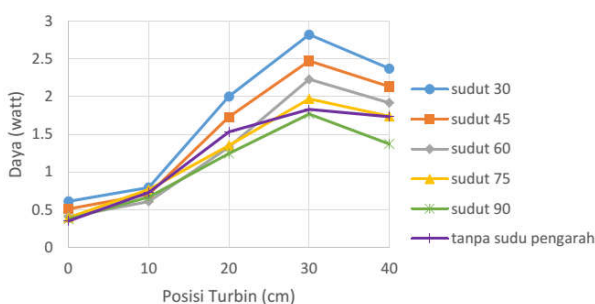
Gambar 4. Putaran turbin angin *cross flow* dengan 2 sudu pengarah

Gambar 4 menunjukkan hubungan putaran poros turbin terhadap posisi turbin angin pada variasi sudut kemiringan sudu pengarah 30°, 45°, 60°, 75° dan 90° dibandingkan dengan turbin tanpa sudu pengarah. Perbedaan posisi turbin angin dan kemiringan sudut sudu pengarah akan menghasilkan putaran poros turbin yang berbeda pula. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa putaran poros turbin pada semua variasi kemiringan sudu pengarah akan terus meningkat sampai dengan posisi turbin 30 cm kemudian mengalami penurunan pada posisi 40 cm. Pada variasi dengan 2 sudu pengarah (gambar 4a.), putaran turbin maksimum dihasilkan pada kemiringan sudu pengarah 30° yaitu

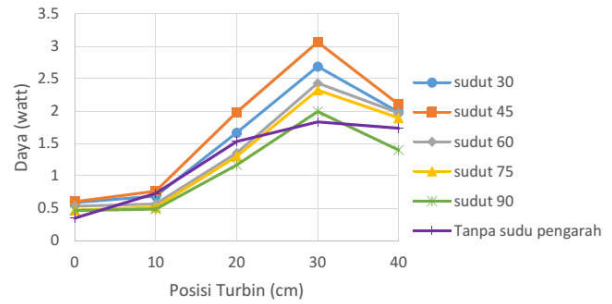
sebesar 67,7 rpm. Jika dibandingkan dengan turbin angin tanpa sudu pengarah, pada posisi turbin 30 cm putaran poros turbin meningkat sebesar 30,2 %. Pada variasi dengan 3 sudu pengarah (gambar 4b), putaran turbin maksimum dihasilkan pada kemiringan sudu pengarah 45° yaitu sebesar 69,1 rpm. Jika dibandingkan dengan turbin angin tanpa sudu pengarah, putaran poros turbin meningkat sebesar 34,41 %. Pada variasi dengan 4 sudu pengarah (gambar 4c), putaran turbin maksimal dihasilkan pada kemiringan sudu pengarah 75° yaitu sebesar 67,7 rpm. Jika dibandingkan dengan turbin angin tanpa sudu pengarah putaran poros turbin meningkat sebesar 8,90 %.

Gambar 5. menunjukkan hubungan daya dengan sudut kemiringan dari sudu pengarah. Perbedaan daya yang dihasilkan dari masing-masing variasi sudut terlihat pada posisi turbin 30 cm. Gambar 5a memperlihatkan bahwa daya yang dihasilkan variasi 2 sudu pengarah pada posisi 0 dan 10 cm tidak ada perbedaan yang signifikan di setiap variasi sudut kemiringan. Perbedaan daya tiap variasi sudut mulai terlihat pada posisi 20 cm sampai 40 cm. Daya paling besar dihasilkan pada kemiringan sudu 30°, yaitu 0,61 Watt. Peningkatan daya pada variasi 2 sudu pengarah pada posisi dan sudut kemiringan optimal jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengarah aliran adalah 54,19 %. Untuk 3 sudu pengarah (gambar 5b.) daya paling besar dihasilkan pada kemiringan sudu 45°, yaitu 0,60 Watt. Peningkatan daya pada variasi 3 sudu pengarah pada posisi dan sudut kemiringan optimal jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengarah aliran adalah 67,33 %. Variasi 4 sudu pengarah (gambar 5c) menghasilkan daya paling besar pada kemiringan sudu 75°, yaitu 0,57 Watt. Terjadi peningkatan daya pada variasi 4 sudu pengarah sebesar 22,21 % pada posisi dan sudut kemiringan optimal jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengarah aliran.

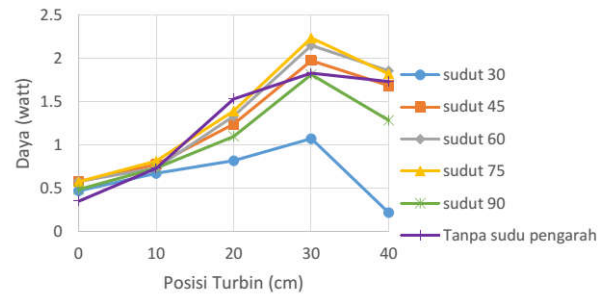
Daya turbin tertinggi dari tiap variasi jumlah sudu pengarah didapat pada posisi turbin 30 cm. Daya yang dihasilkan turbin *cross flow* akan meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, dimana daerah pinggir pada *cooling tower* merupakan area yang menghasilkan kecepatan angin paling besar.



a. Dua sudu pengarah



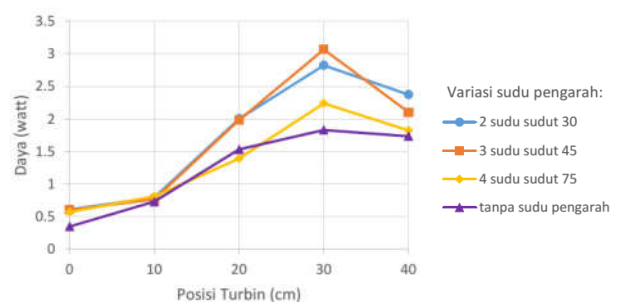
b. Tiga sudu pengarah



c. Empat sudu pengarah

Gambar 5. Daya turbin angin *cross flow* dengan sudu pengarah

Perbandingan antara daya yang dihasilkan turbin angin setiap variasi jumlah sudu pengarah pada sudut kemiringan optimal ditunjukkan pada gambar 6. Gambar 6 menunjukkan pada variasi 2 dan 3 sudu pengarah, kemiringan sudu 30° dan 45° memiliki performa paling baik dibandingkan turbin tanpa sudu pengarah. Hal ini terjadi karena dengan semakin berkurangnya nilai sudut kemiringan sudu pengarah, maka bagian cembung dari turbin akan semakin tertutup. Sudu cembung dari turbin akan semakin tertutup oleh sudu pengarah ketika sudut kemiringan pengarah berkurang sehingga aliran udara yang mengakibatkan torsi negatif pada turbin angin akan berkurang. Selain itu, dengan berkurangnya sudut kemiringan sudu maka luas area sapuan pada pengarah akan semakin luas sehingga, kecepatan angin yang memasuki turbin akan meningkat. Turbin *cross flow* dengan sudu pengarah dapat mencegah gaya *drag* yang berlawanan dengan arah rotasi rotor, membuat lebih banyak fluida yang masuk melewati turbin serta meningkatkan kecepatan putar turbin [4].



Gambar 6. Daya tiap variasi sudu pengarah

Tren berbeda terjadi pada variasi 4 sudu pengarah dimana performa paling baik dihasilkan pada kemiringan sudu 75°. Namun dibandingkan variasi 2 dan 3 sudu pengarah performa turbin angin justru menurun. Penurunan performa tersebut terjadi karena dengan mengurangi nilai sudut kemiringan aliran udara yang mengarah ke bagian cekung turbin justru terbuang. Hal ini terlihat jelas pada sudu pengarah dengan sudut 30° dimana semakin kecil nilai sudut kemiringan maka aliran udara yang mengarah ke turbin semakin sedikit sehingga dapat mengakibatkan sudut serang efektif berubah. Jika sudut serang efektif berubah maka torsi yang dihasilkan juga berubah sehingga putaran poros yang dihasilkan juga berkurang. Pengurangan putaran poros tersebut akan menurunkan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin.

Analisis Koefisien Daya dengan Tip Speed Ratio

Setelah didapat hasil perhitungan dari koefisien daya dan tip speed ratio pada setiap variasi pengujian, kemudian dibuat tabel koefisien daya (c_p) dan tip speed ratio (λ) pada setiap variasi jumlah sudu pengarah turbin angin. Dimana nilai A disini adalah luasan dari penampang turbin angin, yaitu $A = 0,152 \text{ m}^2$. Densitas udara dalam suhu ruang (27 °C) adalah $1,1614 \text{ kg/m}^3$. Koefisien daya pada setiap variasi pengujian dihitung, kemudian dibandingkan hasilnya terhadap setiap variasi.

Tabel 1. Nilai koefisien daya (c_p) dan tip speed ratio (λ)

No	Variasi	c_p	TSR
1	Turbin Tanpa sudu pengarah	0,26	0,64
2	Turbin dengan 2 sudu pengarah	0,34	0,76
3	Turbin dengan 3 sudu pengarah	0,45	0,87
4	Turbin dengan 4 sudu pengarah	0,29	0,70

Tabel 1. adalah grafik hubungan koefisien daya (c_p) dengan tip speed ratio (λ) pada variasi pengujian. Tabel 1 menunjukkan nilai koefisien daya dengan tip speed ratio tiap variasi sudu pengarah pada posisi turbin angin 30 cm. Koefisien daya (c_p) merupakan perbandingan antara daya output mekanik turbin dengan daya ideal yang dapat dikonversi oleh angin. Koefisien daya dan tip speed ratio meningkat kemudian mengalami penurunan pada variasi 4 sudu pengarah. Turbin angin cross flow dengan 3 sudu pengarah memiliki koefisien daya yang paling besar yaitu 0,45 dengan tip speed ratio sebesar 0,86. Sedangkan pada turbin dengan 4 sudu pengarah nilai koefisien daya tidak terjadi perubahan signifikan jika dibandingkan dengan turbin angin tanpa sudu pengarah.

Untuk mengetahui pengaruh dipasangnya turbin angin baik dengan sudu pengarah maupun tanpa sudu pengarah terhadap performa dari model cooling tower maka dilakukan pengukuran terhadap konsumsi daya motor pada model cooling tower.

Perbandingan konsumsi daya sebelum dan sesudah terpasang turbin angin dapat dilihat pada Tabel 2. Konsumsi daya meningkat 0,81 % setelah turbin angin tanpa sudu pengarah terpasang kemudian menurun setelah turbin angin menggunakan sudu pengarah. Hasil percobaan menunjukkan dengan terpasangnya sudu pengarah, konsumsi daya motor dari model cooling tower justru mengalami penurunan 0,87 % sampai 2,46 %.

Tabel 2. Nilai rerata konsumsi daya motor

No	Variasi	Konsumsi Daya Motor Cooling Tower (watt)	%
1	Cooling tower tanpa turbin	447,0	-
2	Turbin Tanpa sudu pengarah	450,6	0,81
3	Turbin dengan 2 sudu pengarah	443,1	-0,87
4	Turbin dengan 3 sudu pengarah	436,1	-2,46
5	Turbin dengan 4 sudu pengarah	438,3	-1,99

Pemasangan turbin angin diatas cooling tower mengakibatkan adanya efek blocking yang menyebabkan aliran udara yang keluar dari cooling tower terganggu sehingga terjadi kenaikan konsumsi daya pada motor cooling tower. Konsumsi daya dari cooling tower kemudian mengalami penurunan dengan penambahan sudu pengarah yang diletakkan diantara outlet cooling tower dan turbin angin, dimana dengan adanya sudu pengarah aliran udara yang keluar dari cooling tower menjadi lebih baik yang mengakibatkan kerja dari motor cooling tower lebih ringan sehingga terjadi penurunan konsumsi daya.

Secara teori, hal ini mungkin terjadi karena dengan adanya sudu pengarah kecepatan turbin menjadi lebih tinggi daripada kecepatan angin yang keluar dari cooling tower. Ketika kecepatan turbin lebih tinggi dari angin yang masuk, akan tercipta daerah bertekanan rendah di sekitar luas area sapuan turbin angin yang dapat membantu cooling tower untuk menarik lebih banyak udara karena efek hisap. Kondisi ini berpengaruh terhadap peningkatan kecepatan asupan angin (air intake) dan pengurangan konsumsi daya motor fan [3].

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. Penggunaan sudu pengarah pada jumlah dan sudut yang tepat dapat meningkatkan performa dari turbin angin. Turbin dengan variasi 3 sudu pengarah pada posisi 30 cm dan sudut kemiringan 45° menghasilkan daya paling tinggi yaitu 3,06 Watt.
2. Pemasangan Turbin angin sebagai sistem pemulihan energi pada cooling tower tidak memberikan pengaruh negatif terhadap konsumsi daya motor dari cooling tower

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini mendapat dukungan dari DP2M DIKTI melalui Hibah Penelitian Strategis Nasional. Peneliti memberikan apresiasi kepada Galih Permana atas kerjasamanya dalam penelitian ini.

Referensi

- [1] Chong, W. T., 2013. Early Development of an Energy Recovery Wind Turbine Generator for Exhaust Air System, *Applied Energy* 112 Hal. 568–575.
- [2] Chong, W. T., 2014. Design of an Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator for Energy Conservation in Commercial Buildings, *Renewable Energy* Vol. 67 Hal. 252–256.
- [3] Chong, W. T., 2014. The Experimental Study on The Wind Turbine's Guide Vanes and Diffuser of an Exhaust Air Energy Recovery System Integrated with The Cooling Tower, *Energy Conversion and Management* Vol. 87 Hal. 145–155.
- [4] Kawamura, T., 2002. Numerical Study of the Flow Around the High-torque Wind Turbine of Vertical Axis Type, *Computational Fluid Dynamics* Hal. 649-654.