

Design and manufacture of the axial wind turbine integrated with condenser

Dimas A. Prasetyo¹, Tandri B. Tejasyahputra¹, Budi Santoso²

¹Program Studi Diploma Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

²Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami No.36 A, Pucangsawit, Jebres, Surakarta 57126

Email korespondensi: budisant@staff.uns.ac.id

Abstrak

Tata udara ruangan yang menggunakan mesin pendingin banyak digunakan di ruang gedung bertingkat, ruang pertemuan, dan perkantoran. Salah satu komponen dari mesin pendingin adalah kondenser dengan kipas pembuang panas. Udara buangan dari kondenser bersifat bersih, kecepatan konstan, terbuang sia-sia dan memiliki kecepatan angin relatif lebih tinggi dari kecepatan angin alami. Udara buangan dari kipas kondenser dapat digunakan sebagai sumber penggerak turbin angin untuk menghasilkan listrik. Tujuan kajian ini adalah untuk merancang turbin angin yang terintegrasi dengan kondenser mesin pendingin. Pemilihan turbin angin aksial didasarkan pada pemanfaatan semua luasan udara buangan. Saluran pengarah atau ducted dibutuhkan untuk mengarahkan udara buangan dari kondenser ke turbin angin dan tidak seragam. Kondenser yang dipilih memiliki ukuran diameter kipas 0,63 m dengan aliran udara buangan vertikal. Kecepatan rata-rata udara buangan adalah 7,86 m/s. Sudu yang dipilih adalah airfoil jenis NACA 6409. Radius ujung airfoil adalah 0,25 m. Daya turbin yang dihitung adalah 20,1 Watt untuk koefisien daya 0,4 dan efisiensi mekanik 0,9. Hasil pengukuran daya turbin angin yang terintegrasi dengan kondenser adalah 10,7 Watt dengan jumlah sudu 10 buah dan sudut kemiringan 15°.

Kata kunci: udara buangan, turbin angin aksial, airfoil, kondenser, koefisien daya, menara pendingin.

Abstract

Air conditioners that use cooling machines are widely used in high rise building, meeting rooms, and offices. One component of the cooling machine is a condenser with a heat dissipation fan. The exhaust air from the condensers is clean, constant speed, just wasted and has a relatively higher wind speed than the natural wind speed. The exhaust air from the condenser fan can be used as a driving source for wind turbines to produce electricity. The purpose of this study is to design a wind turbine that is integrated with the condenser. The axial wind turbines chosen is based on the utilization of all exhaust air. A ducted duct is needed to adjust the direction of the exhaust air from the condenser to the wind turbine and this is not uniform. The condenser has a fan diameter of 0.63 m. The average speed of exhaust air is 7.86 m/s. The blades of wind turbine are airfoil NACA 6409. The tip radius of the airfoil is 0.25 m. The calculated turbine power is 20.1 Watt for a power coefficient of 0.4 and a mechanical efficiency of 0.9. The measurement of wind turbine power integrated with condenser is 10.7 Watt with 10 blades and 15° pitch angle.

Keywords: exhaust air, axial wind turbines, airfoil, condenser, power coefficient, cooling tower.

1. Pendahuluan

British Petroleum (BP) pada tahun 2017 menyatakan bahwa konsumsi energi di wilayah Asia Pasifik, 30% nya berasal dari energi minyak. Konsumsi minyak Indonesia menempati peringkat ke lima dengan total 1615 juta BPH (barell per hari). Laju produksi minyak Indonesia adalah sebesar 881 ribu BPH. Laju pertumbuhan produksi minyak Indonesia naik sebesar 4,8 % dari tahun 2015, namun jika dihitung dari tahun 2005-2015, laju pertumbuhan produksi minyak Indonesia turun sebesar 2,6 %. sehingga Indonesia pada tahun 2016 mengalami defisit minyak sebesar 734 BPH [1].

Defisit ini mendorong pemerintah Indonesia untuk membuat peraturan tentang kebijakan energi nasional. Hasilnya, pemerintah melakukan pengurangan

penggunaan energi fosil minyak bumi. Sebagai gantinya pemerintah akan meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan (EBT) seperti energi angin, air, panas bumi, dan bio energi. Pada tahun 2015 penggunaan EBT Indonesia hanya sekitar 2 % dari total potensi EBT yang ada. Penggunaan energi air menjadi yang terbesar dengan nilai 6,4 %. Selanjutnya penggunaan EBT akan ditingkatkan hingga 23 % pada tahun 2025 dan 31 % pada 2050 [2]. Salah satu sumber energi alternatif yang potensial untuk dimanfaatkan sebagai pengganti energi fosil adalah energi angin. Energi angin tidak akan pernah habis dan bisa langsung dimanfaatkan tanpa perlu dilakukan pengolahan. Akan tetapi kecepatan angin yang berhembus tidak konstan pada tiap waktu. Rata-rata kecepatan aliran angin bebas, kurang dari 4 m/s dari 90% total waktu angin berhembus. Namun, angin

tidak hanya didapat dari alam. Menara pendingin atau *cooling tower* adalah sebuah perangkat *Air Conditioner* (AC) yang menghasilkan keluaran berupa udara yang berhembus. Udara yang dihasilkan memiliki karakteristik yang kuat dan kecepatan yang konstan jika dibandingkan dengan kecepatan angin alami. *Outlet cooling tower* memiliki bentuk lingkaran. Kecepatan udaranya yang keluar memiliki karakteristik yang unik. Pada bagian pusat, kecepatan udaranya adalah hampir tidak ada (0 m/s), namun semakin keluar kecepatan udaranya adalah semakin besar dan mencapai nilai maksimum pada 8 m/s [3].

Usaha untuk memanfaatkan seluruh energi kinetik udara yang dihasilkan *cooling tower*, dapat dilakukan dengan mengganti jenis turbin angin yang digunakan. Pemilihan turbin angin didasarkan pada luasan sapuan sudunya yang mampu memanfaatkan seluruh aliran udara pada *outlet cooling tower*. Turbin angin *axial flow* adalah jenis turbin angin yang arah rotasinya tegak lurus dengan arah aliran udara. Akibatnya, seluruh aliran udara yang berhembus menuju turbin angin *axial flow* dapat digunakan untuk menggerakkan sudu turbinnya. Chong dkk. 2013 [4] melakukan penelitian tentang pemanfaatan energi dari *outlet cooling tower* sebagai media penggerak turbin angin. Kajian dilakukan dengan menggunakan *colling tower* skala kecil dengan diameter *exhaust air outlet* 400 mm dan kecepatan angin konstan 8 m/s. Jenis turbin angin yang digunakan adalah turbin angin sumbu vertikal tipe H rotor 5 sudu dengan diameter 300 mm. Turbin angin diletakkan di atas *cooling tower* dengan jarak 220 mm dari pusatnya. Aliran angin buangan *cooling tower* diarahkan ke turbin angin dengan menggunakan *diffuser* dan *guide vane* (sudu pengarah). *Diffuser* dipasang pada kedua ujung turbin dengan kemiringan 7° . Sudu pengarah dipasang didekat *cooling tower* dan berjumlah 3. Pemasangan *diffuser* dan sudu pengarah mampu meningkatkan kecepatan putar dari turbin angin sebesar 30,4 %. Turbin angin berputar pada kecepatan 115 rpm tanpa pemasangan *diffuser* dan sudu pengarah. Setelah pemasangan *diffuser* dan sudu pengarah kecepatan turbin angin menjadi 150 rpm. Turbin angin dipasang pada sisi luar *outlet* untuk memanfaatkan kecepatan udara maksimal yang dihasilkan. Akan tetapi, pemasangan turbin pada sisi luar *outlet* hanya memanfaatkan seperempat luasan dari *outlet cooling tower*. Bagian *outlet* yang tidak dipasang turbin, terdapat aliran udara yang terbuang.

Budi Santoso et al. [5] mengembangkan turbin angin lintas aliran yang terintegrasi dengan menara pendingin. Turbin angin *cross-flow* adalah desain baru VAWT yang cepat dan cocok untuk kecepatan angin rendah. Kajian ini bertujuan untuk memahami pengaruh sudu pengarah dalam turbin angin yang terintegrasi dengan menara pendingin dengan memvariasikan posisi dan sudut kemiringan. Terlihat bahwa pemasangan *guide vane* pada posisi yang tepat menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam

koefisien daya (C_p) dibandingkan dengan turbin angin yang terintegrasi dengan menara pendingin tanpa *guide vane*.

Ahmadi, 2016 [6] melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penambahan jumlah sudu pada turbin serta investigasi unjuk kerja turbin yang ditempatkan pada sebuah saluran tertutup (*ducted*). Percobaan dilakukan dengan menggunakan tiga tipe bentuk sudu, di mana variasi yang dilakukan adalah pada jumlah sudu yang digunakan dan sudut serang antara *chord line* sudu dengan arah aliran angin. Turbin bekerja maksimal pada bentuk sudu CW, yaitu sudu yang memiliki lebar konstan dan tidak berubah sepanjang sudu. Pada variasi jumlah sudu, semua bentuk sudu bekerja maksimal ketika dipasang dengan 2 buah sudu. Penambahan jumlah sudu akan menurunkan kecepatan putar dari turbin. Terlepas dari bentuk sudu, secara umum penambahan tiap sudu turbin akan menurunkan kecepatan putar sebesar 10-12,5 %. Pada variasi sudut serang, semua bentuk sudu turbin bekerja optimal pada sudut serang 75° . Secara umum peningkatan sudut serang akan meningkatkan kecepatan putar dari turbin. pada sudu turbin bentuk CW dengan jumlah sudu 2 buah dan sudut serang 75° , kecepatan putar turbin yang dihasilkan adalah 797 rpm. Hal ini terjadi ketika turbin berada pada sebuah aliran tertutup (*ducted*). Pada keadaan terbuka kecepatan putar yang dihasilkan hanya 332 rpm. Sehingga pengujian pada saluran tertutup (*ducted*), akan meningkatkan kecepatan putar turbin 240,06 %. Untuk mengoptimalkan unjuk kerja dari turbin angin *axial flow* dapat dilakukan dengan menempatkan turbin pada sebuah saluran *converging-diverging duct*. Penggunaan saluran *converging-diverging duct* mampu meningkatkan kecepatan aliran udara pada daerah leher saluran (*throat*) yang disebabkan oleh penyempitan luasan. Kecepatan putar turbin dapat meningkat hingga 2,3 kali jika dibandingkan dengan turbin angin tanpa saluran.

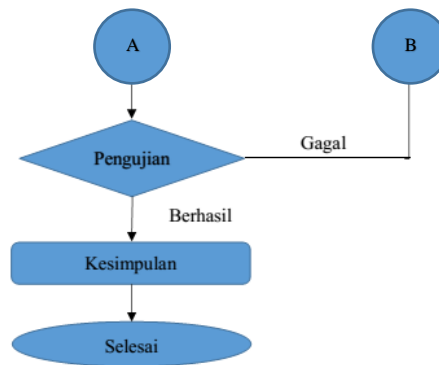
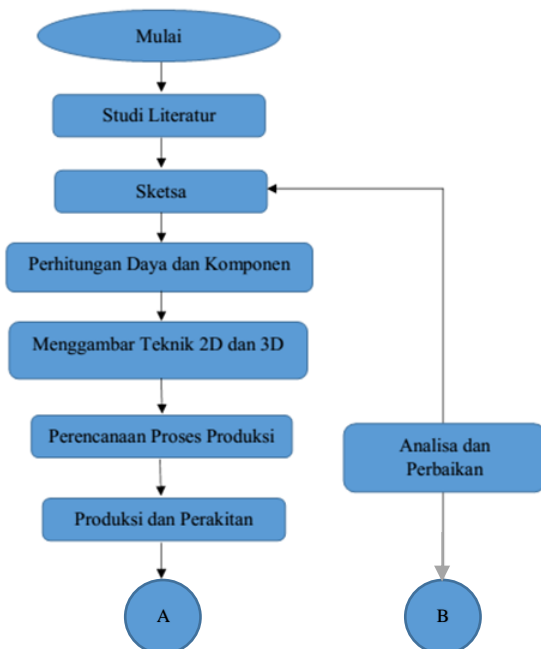
Wang, 2008 [7] melakukan penelitian tentang pengaruh jumlah sudu turbin angin yang terpasang pada saluran tertutup (*ducted wind turbine*) terhadap koefisien daya (C_p), koefisien torsi (C_T), dan *tip speed ratio* (λ). Turbin dengan jumlah sudu lebih dari 3 dianggap mampu mengkonversi energi angin menjadi torsi secara maksimal pada desain *ducted wind turbine*. Kajian dilakukan dengan dua model sudu dan saluran yang digunakan memiliki dimensi diameter *inlet* 1,506 m, diameter *exit* 2 m, diameter *throat* 1,44 m dan diletakkan sejauh 0,3 m dari *inlet*. Hasilnya penambahan jumlah sudu akan menghasilkan torsi awal yang lebih besar, mengurangi *cut-in speed*, dan menyediakan luasan sudu yang cukup untuk mentransfer energi angin. Jumlah sudu yang semakin banyak akan mendorong efek penyumbatan (*blockage effect*) lebih besar sehingga mengurangi kecepatan aliran udara yang masuk ke sudu, akhirnya koefisien daya (C_p) akan berkurang. Unjuk kerja turbin angin *axial flow* dapat diketahui dengan mengatur jumlah

sudu dan sudut kemiringan sudunya. Penambahan jumlah sudu turbin angin *axial flow* dapat meningkatkan torsi dan daya mekanik yang mampu dihasilkannya. Peningkatan torsi dan daya mekanik diikuti dengan penurunan nilai *cut-in speed* dan peningkatan *starting torque*. Kemiringan sudu turbin angin *axial flow* akan mempengaruhi besarnya *lift force* dan *drag force* yang dihasilkan sudu. Peningkatan kemiringan sudu turbin menghasilkan penurunan nilai *lift force* dan penambahan nilai *drag force*. Penurunan nilai *lift force* menyebabkan kecepatan putar sudu menurun, sehingga unjuk kerja turbin angin *axial flow* menurun [8].

Dalam kajian ini, turbin angin aliran aksial, yang merupakan desain baru HAWT, dikembangkan dan diintegrasikan dengan kondenser. Pilihan turbin aksial yang terintegrasi dengan kondenser adalah semua area udara buang untuk menggerakkan turbin angin. Sudut *pitch blade* bervariasi untuk mendapatkan torsi dan daya maksimum. Alasan yang mendasari variasi sudut *pitch blade* adalah perubahan sudut *pitch blade* akan mempengaruhi besarnya gaya seret dan gaya angkat yang dihasilkan oleh *blade* sehingga semakin besar sudut *pitch blade*, semakin rendah gaya angkat yang dihasilkan, tetapi gaya seret akan semakin besar.

2. Metode

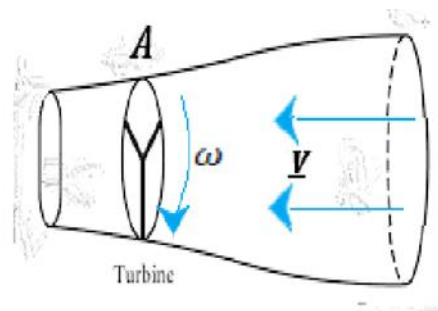
Diagram alir proses perencanaan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses perencanaan.

Perhitungan Daya

Perhitungan daya angin yang digunakan untuk memutar baling-baling turbin dari Turbin Angin Aksial Yang Terintegrasi Kondenser membutuhkan data awal yaitu mencari kecepatan angin buangan dari kondenser, luas area sapuan baling-baling, dan massa jenis angin. Skema kerja angin pada turbin dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema kerja angin pada turbin.

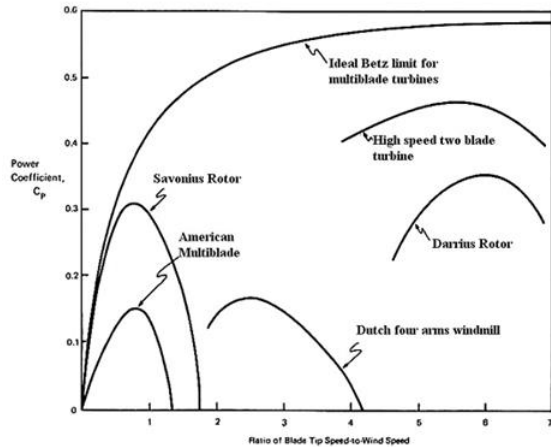
Data perancangan diasumsikan dengan massa jenis angin (ρ) = 1,2 kg/m³, luas area sapuan (A) = $\rho \cdot r^2$ di mana (r = 0,25 m), kecepatan angin (v) = 8 m/s, putaran turbin (ω) = 500 rpm. Daya angin yang dihasilkan oleh angin buangan kondenser dapat dicari dengan perhitungan menggunakan Persamaan (1),

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

Dari perhitungan di atas diperoleh nilai daya angin (P) sebesar 21,703 Watt yang akan digunakan untuk memutar baling-baling turbin. Untuk dapat mengetahui nilai daya turbin yang dihasilkan, dilakukan perhitungan nilai *Tip Speed Ratio* (TSR). Sebelum mencari nilai TSR dihitung nilai ω , yaitu 52,33 rad/detik, sehingga:

$$TSR = \frac{\omega \cdot x \cdot r}{v} \quad (2)$$

TSR turbin angin yang diperoleh dari perhitungan yaitu sebesar 0,98. Koefisien daya (C_p) yaitu nilai efisiensi dari daya angin. Nilai C_p dapat ditentukan dengan menggunakan Gambar 3. Pada nilai TSR sebesar 0,98 didapati nilai C_p sebesar 0,4 untuk jenis turbin *multiblade*.



Gambar 3. Hubungan tip speed ratio (TSR) dengan koefisien daya (C_p) dari jenis-jenis kincir angin [9].

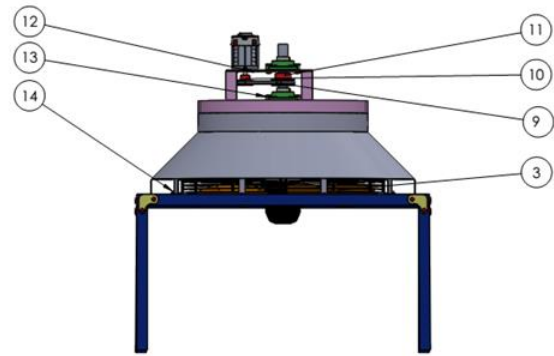
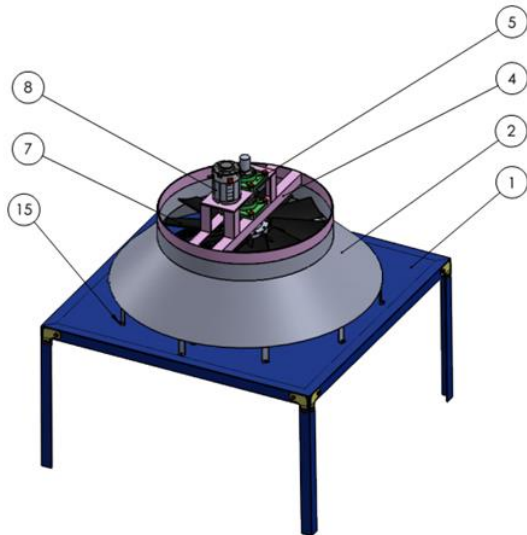
Daya turbin (P_t) dapat dihitung dengan Persamaan 3, yaitu sebesar 20,1 Watt dengan efisiensi mekanik sebesar 0,9.

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3} \quad (3)$$

Generator yaitu generator yang dipilih memiliki spesifikasi daya maksimum generator 100 Watt dengan kecepatan maksimal 500 rpm sesuai yang tersedia di pasaran.

Sketsa Perancangan

Sketsa perancangan dapat dilihat pada Gambar 4 yang memperlihatkan komponen-komponen yang diperlukan.



Keterangan:

- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1. Rangka kondenser | 8. Generator |
| 2. Duct | 9. Sabuk V |
| 3. Fan model kondenser | 10. Puli 1 |
| 4. Rangka turbin | 11. Puli 2 |
| 5. Bantalan | 12. Sekrup |
| 6. Poros turbin | 13. Baut dan Mur M12 |
| 7. Sudu turbin | 14. Baut dan Mur M5 |

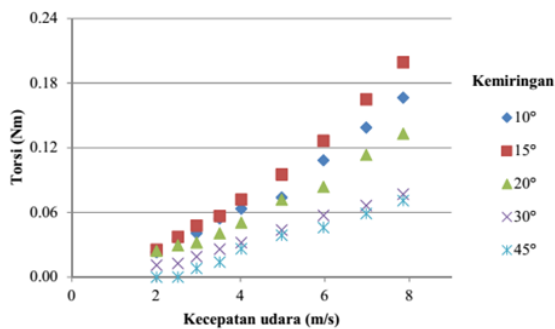
Gambar 4. Sketsa perancangan.

Kondenser merupakan alat yang digunakan untuk mempersejuk udara pada ruangan dengan cara menghisap udara keluar. Untuk memanfaatkan udara buangan tersebut, diciptakanlah alat multifungsi yang dapat menghisap udara keluar sekaligus mampu menghasilkan energi listrik. Alat tersebut yaitu turbin angin aksial yang terintegrasi kondenser. Alat ini memiliki cara kerja yaitu saat alat dihubungkan dengan sumber arus AC maka arus listrik mengalir dari sumber arus listrik menuju kontrol panel. Saat di kontrol panel, arus listrik AC dari sumber frekuensinya diubah oleh *inverter* guna mengatur kecepatan putar dari motor listrik yang akan digerakkan. Setelah arus listrik AC frekuensinya diubah menggunakan *inverter*, maka arus listrik ini diteruskan menuju motor penggerak yang berupa motor listrik AC 3 *phase*. Motor listrik digunakan untuk memutar rotor atau kipas kondenser sehingga udara yang berada di sekitar alat akan terhisap menuju kondenser. Udara yang terhisap ini dimanfaatkan untuk memutar sudu turbin angin yang berada di atasnya. Udara buangan dari kondenser ditangkap dan diarahkan oleh saluran *duct*. Putaran dari baling-baling turbin diteruskan menuju generator listrik melalui poros untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik hasil dari pemanfaatan angin buangan kondenser dapat digunakan untuk menghidupkan peralatan yang memerlukan energi listrik atau disimpan dalam baterai.

3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara torsi yang dihasilkan turbin angin *axial flow* dengan jumlah sudu sepuluh dengan variasi kemiringan sudu dan kecepatan aliran udara. Kemiringan sudu yang

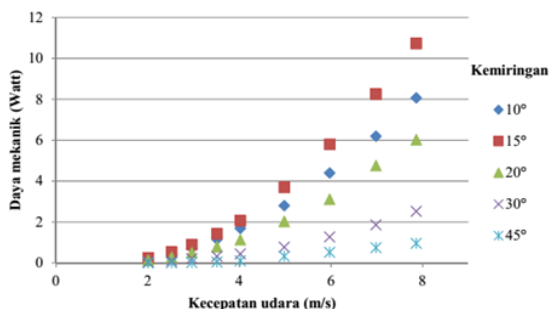
digunakan adalah 5°, 10°, 15°, 20°, 30° dan 45°. Pada grafik terlihat semakin bertambahnya kecepatan udara, torsi yang dihasilkan turbin mengalami peningkatan.



Gambar 5. Hubungan torsi dan kecepatan udara pada jumlah sudu sepuluh.

Torsi tertinggi yang mampu dihasilkan turbin angin *axial flow* dengan jumlah sudu sepuluh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 adalah sebesar 0,199 Nm. Torsi tertinggi yang dihasilkan diperoleh ketika kemiringan sudu turbin diatur sebesar 15°. Kemiringan sudu turbin *axial flow* dengan jumlah sudu sepuluh tidak dapat diatur pada sudut 5°, karena susunan sudunya akan saling berbenturan satu sama lain. Berdasarkan persamaan gerak rotasi yakni ($\tau = I \cdot \alpha$), dimana τ adalah torsi, I adalah momen inersia, dan α adalah percepatan putar, maka torsi berbanding lurus dengan momen inersia. Semakin banyak jumlah sudu turbin maka massa dari turbin akan semakin besar, akibatnya momen inersianya juga akan semakin besar. Semakin besar momen inersia, torsi yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Grafik hubungan antara daya mekanik turbin dengan variasi kemiringan sudu pada jumlah sudu sepuluh dapat dilihat pada Gambar 6. Pada grafik terlihat semakin bertambahnya kecepatan udara, daya turbin yang dihasilkan turbin juga mengalami peningkatan.



Gambar 6. Hubungan daya mekanik dan kecepatan udara pada jumlah sudu sepuluh.

Turbin angin *axial flow* dengan jumlah sudu sepuluh mampu menghasilkan daya mekanik sebesar 10,717 Watt. Besarnya daya mekanik yang dihasilkan turbin angin *axial flow* dipengaruhi karena torsi yang dihasilkan juga besar. Akan tetapi, kecepatan putar yang dihasilkan semakin kecil. Sesuai dengan

persamaan gerak rotasi di atas, di mana momen inersia (I) berbanding terbalik dengan percepatan putar (α). Hal ini terbukti bahwa kecepatan putar yang dihasilkan turbin angin *axial flow* pada jumlah sudu sepuluh lebih kecil jika dibandingkan turbin angin *axial flow* dengan jumlah sudu lima dan jumlah sudu dua. Besarnya kecepatan putar terbesar pada tiap jumlah sudu secara berurutan adalah 513,67 rpm, 653,60 rpm dan 813,97 rpm.

Ahmadi, 2016 [11] melakukan penelitian tentang penambahan jumlah sudu turbin yang berpengaruh terhadap penurunan kecepatan putar pada rotor. Pada *ducted wind turbine*, semakin banyak jumlah sudu, maka pada bagian leher saluran (*throat*) akan semakin terisi. Hal ini menyebabkan adanya efek hambatan (*blockage effect*) yang akan meningkatkan tekanan pada bagian depan rotor. Oleh karena itu, kecepatan putar yang dihasilkan turbin akan semakin menurun. Penurunan kecepatan putar ini berkisar antara 10-12,5 % pada tiap penambahan sudu. Faktanya, semakin banyak jumlah sudu, gaya angkat (*lift force*) yang dihasilkan akan semakin meningkat sebagai akibat dari peningkatan area sudu. Sehingga, total gaya angkat (*lift force*) dan torsi yang dihasilkan akan meningkat. Akan tetapi, besar gaya angkat (*lift force*) pada tiap sudu dan kecepatan putar akan semakin menurun seiring bertambahnya jumlah sudu.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis terhadap data hasil pengujian tentang pengaruh sudut kemiringan sudu turbin dengan jumlah 10 sudu terhadap unjuk kerja turbin angin *axial flow*, dapat disimpulkan bahwa turbin angin *axial flow* dengan jumlah sudu dua menghasilkan torsi dan daya mekanik terbesar pada sudut kemiringan 15°, yaitu 0,199 Nm dan 10,717 Watt. Daya turbin pengukuran adalah 50 % dari daya turbin perhitungan. Hasil ini dapat dibuat kajian lanjutan agar daya turbin perhitungan mendekati daya pengukuran.

Ucapan Terima Kasih

Kajian ini mendapat dukungan dari DP2M DIKTI melalui Skim Hibah Penelitian Terapan Tahun Anggaran 2019.

Daftar Pustaka

- [1] British Petroleum. 2017. BP Statistical Review of World Energy, 66th Edition, June. 2017. English.
- [2] Republik Indonesia. 2017. Keputusan Presiden No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional, Sekretariat Kabinet RI, Jakarta
- [3] W. T. Chong, S.Y. Yip, A. Fazlizan, S.C. Poh, W.P. Hew, E.P. Tan, et al. 2014, Design of an exhaust air energy recovery wind turbine generator for energy conservation in commercial buildings, *Renewable Energy*. 67, 252–256.

- [4] W.T. Chong, A. Fazlizan, S.C. Poh, K.C. Pan, W.P. Hew, F.B. Hsiao. 2013. The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane, *Applied Energy*. 112, 601–609.
- [5] B. Santoso, D.P.D. Danardono. 2018. The Influence of Guide Vane to the Performance of Cross-Flow Wind Turbine on Waste Energy Harvesting System. In: B.H. Setiadji, A.L. Han, A. Widodo, J.D. Setiawan, O. Kurdi and J.U.D. Hatmoko (Eds.) *IJCAET & ISAMPE 2017, MATEC Web of Conferences*. 159, 02014, pp. 1-6. EDP Sciences, United Kingdom.
- [6] H. Ahmadi, R. Kamali, M. Rad. 2017. Experimental investigation of blade number and design effects for a ducted wind turbine, *Renewable Energy*. 105, 334–343 (2017).
- [7] S.H. Wang and S.H. Chen. 2008. Blade number effect for a ducted wind turbine, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 22(10), 1984–1992.
- [8] A.R. Sudhamshu, M.C. Pandey, N. Sunil, N.S. Satish, V. Mugundhan, R.K. Velamati. 2016. Numerical study of effect of pitch angle on performance characteristics of a HAWT, *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 19(1), 632–641 (2016).
- [9] M. Ragheb et al. 2019. Wind Turbines Theory-The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, <https://www.intechopen.com/books/fundamental-and-advanced-topics-in-wind-power/wind-turbines-theory-the-betz-equation-and-optimal-rotor-tip-speed-ratio>, (diakses tanggal 23 April 2019).