

RANCANG BANGUN TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL SEDERHANA DENGAN PANJANG SUDU 1 METER

SIGIT HERNOWO

Jurusan Teknik Mesin
Program Studi Diploma IV Teknik Mesin
Politeknik Saint Paul Sorong
Email : sigit_hernowo@yahoo.com

ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga angin merupakan salah satu jenis pemanfaatan energi terbarukan yang pengembangannya mulai digalakkan lagi seiring dengan keterbatasan bahan bakar fosil. Jenis pembangkit ini sesuai jika digunakan pada skala kecil untuk memenuhi kebutuhan energi di pemukiman-pemukiman terpencil yang jauh dari akses listrik konvensional, terutama pada desa-desa pantai yang memiliki potensi angin memadai. Salah satu jenis turbin angin adalah turbin angin sumbu horizontal. Perancangan turbin angin sumbu horizontal dengan 3 sudu dilakukan dengan memperhatikan aspek-aspek pembebanan dan pemilihan material. Kontruksi dilengkapi dengan menara dan disambungkan ke generator. Pengujian dengan pengoperasian pada kecepatan angin 3, 3,5, 4, 4,5, 5, 5,5, dan 6 m/s. Analisis dilakukan untuk mengetahui daya total, daya maksimal, dan daya aktual yang dihasilkan.

Kata Kunci : turbin angin, HAWT, pembangkit listrik, sudu, daya aktual.

ABSTRACT

Wind power stations is one kinds of utilization of renewable energy development began in earnest again along with limited fossil fuels. This type of plant is appropriate if used on a small scale to meet energy needs in remote settlements are far from conventional electricity access, especially in the villages of the coast have the potential of wind. One type of wind turbines are horizontal-axis wind turbine. The design of a horizontal axis wind turbine with three vanes is performed with attention to aspects of loading and material selection. He was equipped with a tower and is connected to a generator. Testing with operation at wind speeds 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, and 6 m/s. Analysis was conducted to find out the total power, maximum power, and the actual power generated.

Keyword : wind turbine, HAWT, electric generation, blades, actual power.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi angin sudah berlangsung selama ribuan tahun. Sejak lama manusia memanfaatkan angin untuk menggerakkan perahu layar. Penggunaan kincir angin sebagai alat konversi energi pertama kali ditemukan di Arab pada sekitar abad 9 M, yang dioperasikan di daerah perbatasan Persia dan Afganistan selama 2 abad sebelumnya (El-Wakil, 1988). Tetapi referensi sejarah yang ditemukan, mengindikasikan pemanfaatan pada masa yang lebih tua, yaitu dari tulisan Hero dari Alexandria (Manwell dkk., 2009). Hero yang hidup pada sekitar abad pertama sebelum Masehi dan abad pertama sesudah Masehi, menyajikan suatu peralatan yang mirip dengan kincir angin.

Dewasa ini upaya untuk melakukan pemanfaatan energi terbarukan termasuk tenaga angin kembali mendapat perhatian akibat persediaan energi yang berasal dari bahan bakar fosil mulai menipis. Ketergantungan terhadap energi minyak dan gas mulai dikurangi secara bertahap. Namun demikian pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia tergolong kecil. Misalnya energi listrik yang berasal dari tenaga angin, dilaporkan hanya 0,34 MW pada tahun 2013, tidak mengalami kenaikan secara signifikan sejak 2008 yang menghasilkan 0,3 MW (KESDM, 2014).

Statistik tersebut menunjukkan pemanfaatan energi angin untuk menghasilkan listrik masih sangat terbuka untuk dikembangkan. Pembuatan pusat pembangkit listrik tenaga angin dengan skala besar memang memerlukan biaya investasi

yang besar. Selain itu diperlukan lokasi dengan karakteristik angin yang baik. Meskipun demikian dalam skala kecil, teknologi ini dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik yang melayani wilayah-wilayah terpencil dengan total daya yang tidak terlalu banyak. Tipikal wilayah seperti ini banyak dijumpai di daerah-daerah pesisir dan pulau-pulau kecil di seluruh Indonesia.

Dalam penelitian ini akan dilakukan perancangan dan pembuatan kincir angin dengan sumbu horisontal yang langsung disambungkan dengan generator melalui suatu sistem transmisi. Bahan-bahan yang digunakan merupakan bahan yang mudah diperoleh dan beberapa di antaranya berupa limbah logam. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan kincir dan generator dengan mengukur kecepatan angin, dimensi elemen-elemen kincir dan analisa daya kincir angin.

KAJIAN PUSTAKA

Perkembangan turbin angin mengalami kemajuan yang cukup signifikan semenjak akhir 1960an. Beberapa studi dilakukan di dalam dan luar negeri. Howey dkk (2011) membuat turbin angin dengan diameter 2 cm dan diameter luar 3,2 cm. Fabrikasi dilakukan dengan proses permesinan konvensional dan pembuatan generator disertai dengan proses printing. Pengujian di terowongan angin menunjukkan bahwa turbin tersebut beroperasi pada kecepatan angin 3 m/s sampai 7 m/s dan menghasilkan daya listrik 80 μ W sampai 2,5 mW. Koefisien daya maksimal 9 % dan ratio kecepatan tip 0,6.

Pratama (2012) melakukan eksperimen dengan kincir angin aksial di sekitar waduk Gajah Mungkur, Wonogiri, Jawa Tengah. Kincir angin dengan menara setinggi 3 m menggunakan sudu yang terbuat dari serat kaca, berukuran panjang 70 cm dan lebar 20 cm. Jumlah sudu divariasikan 3 dan 4 buah. Poros turbin dihubungkan dengan rotor yang menggerakkan generator dengan sistem transmisi roda gigi. Pengujian dilakukan dengan mengukur kecepatan angin, putaran generator, serta tegangan dan arus keluaran generator. Dari hasil pengujian turbin dengan 4 sudu mampu menghasilkan energi listrik dengan tegangan 4 V dan arus 0,50 mA pada putaran generator 758 rpm dengan kecepatan angin 5,3 m/s. Sementara pada turbin dengan 3 sudu mampu menghasilkan listrik dengan tegangan 70 V dan arus 0,45 mA

pada putaran generator 807 rpm dan kecepatan angin 6 m/s.

Velan dkk (2012) melakukan studi untuk perencanaan turbin angin yang menggunakan 2 generator pada satu rotor. Pembahasan desain turbin meliputi dimensi, harga, dan keandalan. Dalam studi ini dibahas juga prosedur desain roda gigi pada sistem transmisi, umur pakai roda gigi, dan material untuk membuat roda gigi. Pada sisi output disajikan perencanaan generator, aliran energi listrik dari keluar generator sampai penyimpanannya. Disajikan juga detail konstruksi turbin angin, elemen-elemen yang digunakan, dan materialnya. Dari studi ini disimpulkan bahwa memungkinkan bagi turbin angin tunggal dengan satu rotor untuk melayani operasi 2 generator.

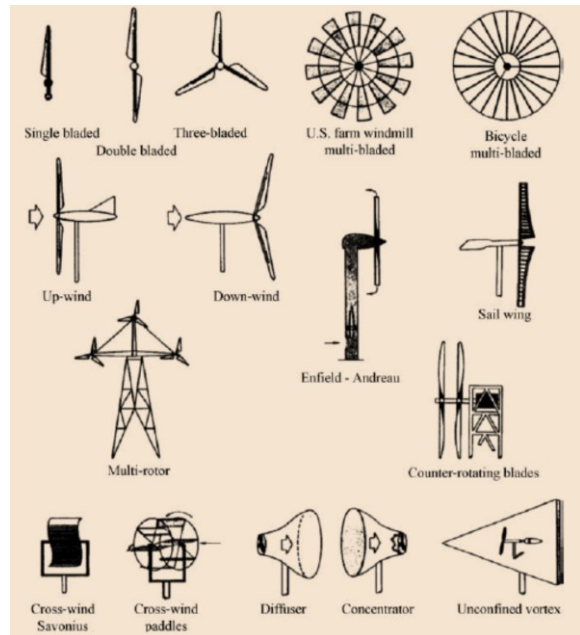
Aryanto dkk (2013) melakukan pengujian dengan terowongan angin sederhana terhadap model turbin angin dengan jumlah sudu dan kecepatan angin bervariasi. Pengukuran dilakukan terhadap arus dan tegangan generator serta putaran rotor. Selanjutnya dilakukan analisa untuk memperoleh daya keluaran dan tip speed ratio. Dari hasil pengujian dan analisa diperoleh nilai efisiensi terbaik 3,07% pada turbin dengan 5 sudu dan kecepatan angin 4 m/s. Efisiensi terendah diperoleh pada turbin dengan 3 sudu dan kecepatan angin 3 m/s. Tip speed ratio tertinggi sebesar $\lambda = 2,11$ dan terendah $\lambda = 1,49$ yang diperoleh pada kondisi efisiensi tertinggi dan terendah.

Nawawi dan Fatkhurrozi (2014) merancang dan membangun turbin angin dengan 5 sudu yang dilengkapi dengan kontrol arah angin pada bagian ekor. Turbin tersebut juga dilengkapi dengan sistem pengereman yang akan membuat turbin berhenti berputar jika kecepatannya melebihi 90 km/jam. Turbin didesain untuk dipasang pada atap gedung bertingkat guna memperoleh karakteristik angin yang baik, sehingga tidak memerlukan tiang yang tinggi. Sistem juga dilengkapi dengan generator yang dibebani dengan bohlam lampu. Pada pengujian di atas permukaan tanah, kecepatan angin tercatat 1,53 m/s dan turbin tidak mampu menghasilkan listrik. Setelah pengujian dilakukan pada atap gedung lantai 4, kecepatan angin rata-rata diperoleh sebesar 5,5 m/s dan menghasilkan listrik dengan tegangan 78,47 voltAC. Daya maksimal yang dihasilkan 172 W dengan efisiensi inverter 80%. Kecepatan angin minimal yang diperlukan untuk mengoperasikan turbin adalah 2,5 m/s.

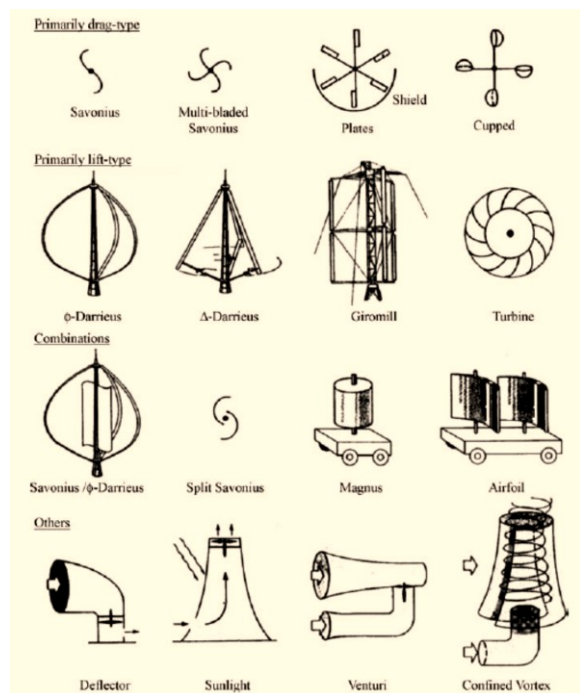
Navin Prasad dkk (2014) melakukan studi untuk menemukan jenis sudu yang sesuai bagi turbin angin horisontal kecil di daerah dengan kecepatan angin rendah. Desain sudu ditinjau dari segi dimensi dan diuji pada kondisi kerja optimal. Pengujian juga mengarah pada perilaku aerodinamika dengan menganalisa lift dan drag dipadukan dengan aliran udara yang dinilai dari bilangan Reynolds pada aliran laminar dan turbulen. Empat jenis profil sudu NREL dan NACA, yaitu S822, S833, NACA 4412, dan NACA 4415 diuji dengan metode komputasi dinamika fluida menggunakan software Reas 200000. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa profil NACA 4415 paling sesuai untuk digunakan dalam turbin angin horisontal yang beroperasi pada daerah dengan kecepatan angin rendah.

Syahyuniar (2016) melakukan eksperimen dengan turbin angin horisontal yang memiliki diameter sapuan angin 2,8 m. Sudu turbin terbuat dari papan dengan bentuk airfoil NACA 2415. Turbin diletakkan di atas menara setinggi 8 m. Pengujian dilakukan dengan mengukur kecepatan angin dan putaran sudu turbin. Pengambilan data selama 2 minggu menghasilkan putaran poros rata-rata 41,47 rpm dengan putaran maksimal 590 rpm.

Turbin angin merupakan alat yang digunakan untuk mengkonversi energi kinetik yang tersimpan dalam angin menjadi energi listrik. Sementara kincir angin adalah peralatan yang digunakan untuk mengkonversi energi angin menjadi daya mekanik. Pada umumnya turbin angin diklasifikasikan menurut arah porosnya, yaitu turbin angin sumbu horisontal (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWT).



Gambar 1. Jenis-jenis turbin angin sumbu horisontal (sumber : Manwell dkk, 2009)



Gambar 2. Jenis-jenis turbin angin sumbu vertikal (Sumber : Manwell dkk., 2009)

HAWT adalah turbin angin yang memiliki poros rotasi sejajar dengan permukaan tanah. Pada umumnya HAWT diklasifikasikan menurut arah rotor (menghadap atau membelakangi angin), desain pangkal sudu (kaku atau bergoyang), pengatur rotor, jumlah sudu, dan cara mengatur posisi terhadap arah angin. Jenis-jenis turbin angin sumbu horisontal disajikan pada Gambar 1.

VAWT adalah turbin angin dengan sumbu rotasi tegak, sehingga jenis ini tidak dipengaruhi oleh arah angin. Umumnya diklasifikasikan menjadi turbin angin drag (misalnya Savonius), jenis lift (misalnya Darrieus), dan kombinasinya, seperti disajikan pada Gambar 2.

Turbin angin terdiri dari beberapa sub-sistem, diantaranya rotor, penerus gerak, nasel dan rangka utama, menara dan fondasi, sistem kontrol, dan penyeimbang sistem elektrik. Rotor terdiri sudu dan tangkai penopang sudu. Sistem penerus gerak merupakan bagian yang berputar selain rotor, yang biasanya terdiri dari poros, sistem transmisi, kopling, rem mekanik, dan generator. Nasel dan rangka utama merupakan bagian penopang dan pelindung yang terdiri dari rumah turbin, pelat dudukan (bedplate), dan sistem pembelok. Penyeimbang sistem elektrik meliputi kabel, transformator, konverter, dan sebagainya. Dalam perencanaan dan pembuatan turbin angin ada beberapa pilihan untuk menentukan parameter-parameter dasar, yaitu jumlah sudu, arah rotor, material sudu, bentuk dan metode pembuatan sudu, desain sambungan sudu ke poros, jenis generator, jenis kontrol, dan sistem transmisi.

Kinerja turbin angin berhubungan dengan 3 jenis skala kecepatan angin, yaitu kecepatan cut-in, kecepatan optimal, dan kecepatan cut-off. Kecepatan cut-in adalah kecepatan minimal yang diperlukan untuk menghasilkan daya generator. Kecepatan optimal adalah kecepatan angin yang menghasilkan daya maksimal. Sedangkan kecepatan cut-off adalah kecepatan maksimal turbin beroperasi, yang pada umumnya dipilih untuk keamanan konstruksi turbin angin.

Pada saat bekerja turbin angin akan mengalami pembebanan yang perlu diperhitungkan berkaitan dengan kebutuhan struktur. Pembebanan yang dialami turbin angin dapat dibedakan menjadi 5 jenis, yaitu beban tunak, siklik, transien, variatif, dan resonansi-beban induksi. Beban tunak adalah semua beban yang tidak bervariasi terhadap waktu, tetapi mempengaruhi struktur tak bergerak, misalnya beban yang berasal dari angin. Beban siklik adalah beban yang bervariasi secara periodik dan umumnya menyebabkan getaran pada struktur turbin. Beban transien merupakan beban yang bervariasi terhadap waktu yang muncul sebagai respon terhadap perubahan eksternal sementara. Termasuk dalam kategori beban transien adalah beban pukulan, misalnya pada turbin angin downwind (membelakangi angin), kehilangan

pasokan angin saat sudu berada di belakang menara yang menghalangi angin. Beban variatif meliputi semua beban yang bervariasi terhadap waktu, termasuk beban siklik dan transien yang terjadi secara acak. Sedangkan resonansi-beban induksi adalah hasil dari respon dinamik beberapa elemen turbin yang yang tereksitasi pada frekuensi alami. Sedapat mungkin beban ini dihilangkan.

Sumber-sumber beban berasal dari aerodinamika, gravitasi, interaksi dinamika, dan kontrol mekanik. Beban aerodinamika berasal dari angin yang berkaitan pembangkitan daya. Beban gravitasi berasal dari berat elemen-elemen turbin angin. Beban interaksi mekanik muncul pada elemen-elemen penerus gerak dan kontrol mekanik adalah sistem kontrol yang memanfaatkan efek samping angin.

Kebanyakan komponen-komponen penting turbin angin merupakan elemen mesin, baik seluruhnya atau sebagian. Sehingga perancangan dan manufakturnya mengikuti kaidah-kaidah dalam elemen mesin. Elemen mesin utama yang banyak digunakan adalah poros, kopling, bantalan, roda gigi, dan peredam.

Poros adalah elemen mesin berbentuk silinder panjang yang didesain untuk berputar dan fungsi utamanya untuk meneruskan torsi. Umumnya disambungkan dengan roda gigi, puli, atau kopling. Pada turbin angin poros digunakan pada rotor, sistem transmisi, dan generator. Selain menahan beban torsi, poros umumnya juga menahan beban lentur. Material poros umumnya pada karbon atau baja paduan yang dimanufaktur dengan proses permesinan.

Kopling merupakan elemen yang digunakan untuk menghubungkan 2 buah poros pada sumbu yang sama dan digunakan untuk meneruskan torsi antara kedua poros tersebut. Kopling biasanya digunakan untuk menyambungkan generator dengan poros berkecepatan tinggi pada gearbox. Bantalan digunakan untuk menurunkan tahanan gesek di antara 2 permukaan bergerak yang berimpit. Biasanya gerakan berupa rotasi dan elemen lainnya adalah poros. Bantalan banyak digunakan pada turbin angin, misalnya pada sambungan dudukan poros utama, gearbox, generator, sistem pembelok rotor, sistem pengatur arah sudu dan sebagainya. Bantalan memiliki banyak variasi dalam bentuk dan material. Sedangkan roda gigi adalah elemen yang digunakan untuk memindahkan torsi dari satu poros ke poros yang lain. Roda gigi terutama digunakan dalam gearbox.

Gearbox berfungsi untuk menaikkan kecepatan putar poros rotor ke generator. Pada umumnya putaran poros yang diperoleh dari angin ke sudu relatif rendah, sementara putaran generator cukup tinggi. Generator konvensional umumnya beroperasi pada putaran 1500 rpm (50 Hz) dan 1800 rpm (60 Hz). Gearbox terdiri dari elemen-elemen pemindah torsi, elemen pendukung, dan komponen struktural. Elemen pemindah torsi adalah poros dan roda gigi, bantalan dan perapat termasuk pada elemen pendukung, sedangkan komponen struktural adalah komponen pengukung beban gravitasi seperti rumah gearbox. Perancangan gearbox harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti tipe gearbox, pemasangan, rasio kecepatan, jumlah tingkat, berat dan harga, beban, pelumasan, pengaruh terhadap operasi, kegaduhan, dan keandalan. Gearbox dapat dipasang terpisah atau menyatu dengan poros utama. Jumlah tingkat mungkin diperlukan mengingat rasio kecepatan setiap tingkat disarankan tidak melebihi 6 : 1.

Prosedur desain turbin angin mengikuti langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Menentukan penggunaan
- b. Melihat kembali pengalaman perencanaan terdahulu
- c. Memilih lokasi
- d. Memperkirakan beban-beban awal
- e. Mengembangkan desain tentatif
- f. Memprediksi kinerja
- g. Mengevaluasi desain
- h. Memperkirakan biaya
- i. Menyempurnakan desain
- j. Membuat prototipe
- k. Menguji prototipe
- l. Mendesain produksi

Daya total yang dihasilkan oleh turbin angin sama dengan laju aliran energi kinetik masukan :

$$P_{tot} = \dot{m} ke_i = \dot{m} \frac{V_i^2}{2} \quad (1)$$

Dimana :

P_{tot} = daya total, Watt

\dot{m} = laju aliran massa (udara), kg/s

ke_i = energi kinetik spesifik masukan, J/kg

V_i = kecepatan angin, m/s

Laju aliran massa diperoleh dari persamaan kontinuitas :

$$\dot{m} = \rho A V_i \quad (2)$$

Dengan :

ρ = densitas udara, kg/m³

A = luas sapuan rotor, m²

Sehingga persamaan daya total menjadi :

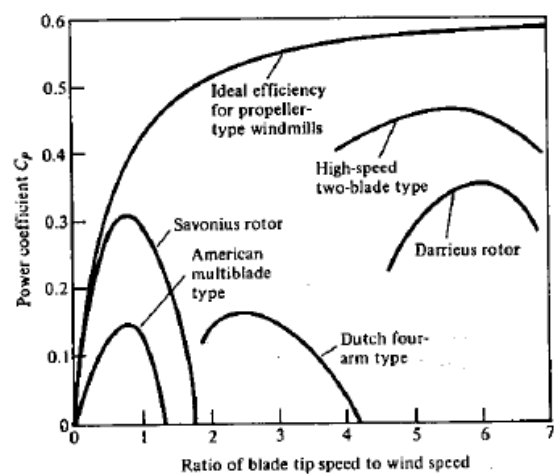
$$P_{tot} = \frac{1}{2} \rho A V_i^3 \quad (3)$$

Daya maksimal turbin angin sebesar :

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho A V_i^3 \quad (4)$$

Pada kenyataannya daya yang dihasilkan turbin angin tidak mampu mencapai nilai maksimal. Selisih daya yang dihasilkan dengan daya total turbin angin dinyatakan dengan parameter koefisien daya, C_p . Koefisien daya maksimal yang bisa dicapai adalah P_{max} / P_{tot} atau 0,593. Sedangkan koefisien daya untuk beberapa jenis turbin angin disajikan pada gambar 3. Sehingga daya aktual turbin angin adalah :

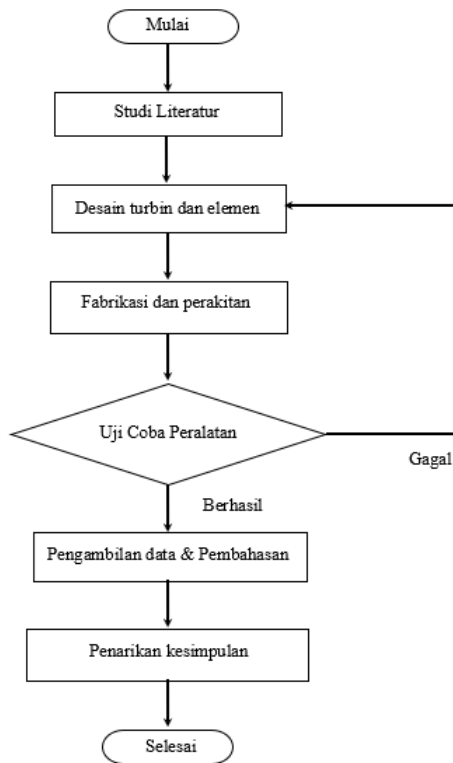
$$P_{act} = C_p P_{tot} \quad (5)$$



Gambar 3. Koefisien daya untuk beberapa jenis turbin angin (sumber: El-Wakil, 1988)

METODOLOGI

Penelitian dilakukan mengikuti prosedur seperti diagram alir pada Gambar 4. Pada tahap permulaan desain, dipilih beberapa opsi parameter perencanaan. Turbin direncanakan dengan sumbu rotor horizontal, dengan 3 sudu yang dibuat dari pelat aluminium dengan metode permesinan tradisional. Sambungan sudu ke poros dibuat kaku. Sedangkan sistem transmisi menggunakan gearbox yang elemen utamanya adalah roda gigi, bantalan dan perapat, poros, serta casing.



Gambar 4. Diagram alir penelitian

Fabrikasi menggunakan perkakas permesinan konvensional seperti mesin pemotong, mesin bubut, mesin frais, mesin las, dan sebagainya. Mesin pemotong digunakan untuk memotong pelat, batang-batang baja untuk rangka, baja silinder untuk material roda gigi dan poros. Mesin bubut dan mesin frais digunakan untuk mengerjakan poros dan roda gigi. Sementara mesin las untuk membuat sambungan las. Metode sambungan lain yang digunakan adalah paku keling dan sambungan mur-baut. Untuk proses *finishing* menggunakan mesin gerinda dan proses pengecatan.

Peralatan yang digunakan untuk pengambilan data adalah anemometer, tachometer, dan thermometer. Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin, tachometer digunakan untuk mengukur putaran rotor, sedangkan thermometer digunakan untuk mengukur temperatur lokasi pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sudu turbin angin dibuat dari pelat aluminium dengan tebal 0,2 mm. Panjang sudu 1000 mm dengan lebar pada bagian *hub* 250 mm dan bagian *tip* 120 mm. Untuk menaikkan kekakuan sudu, pelat disusun rangkap tiga. Pelat kedua memiliki panjang 850 mm dengan lebar bagian *hub* 200 mm dan *tip* 100 mm, sedangkan

pelat ketiga memiliki panjang 600 mm dan lebar pada bagian *hub* 150 mm serta lebar *tip* 80 mm. Ketiga pelat disambung dengan lem logam dan diperkuat dengan paku keling.

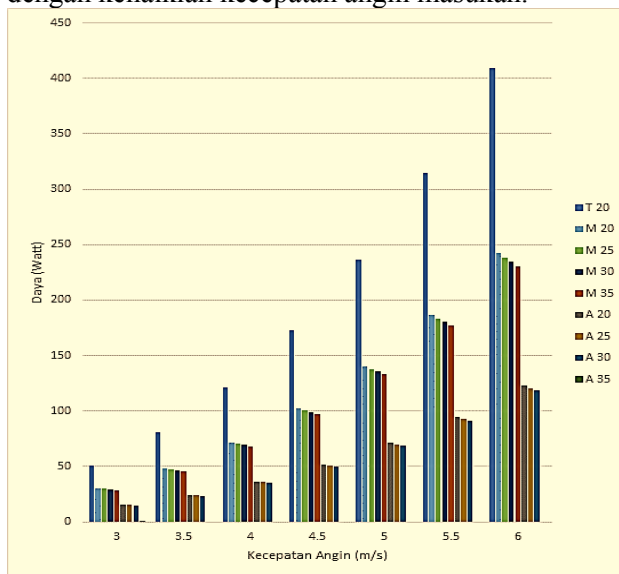
Tabel 1. Hasil Pengukuran Kecepatan Angin dan Perhitungan Daya

Kecepatan Angin m/s	Temperatur °C	Efisiensi	Daya (watt)		
			Total	Maksimal	Aktual
3	20	0.3	51.1062	30.2851	15.3318
3	25	0.3	50.2487	29.7770	15.0746
3	30	0.3	49.4195	29.2856	14.8258
3	35	0.3	48.6172	28.8102	14.5852
3.5	20	0.3	81.1547	48.0917	24.3464
3.5	25	0.3	79.7930	47.2848	23.9379
3.5	30	0.3	78.4763	46.5045	23.5429
3.5	35	0.3	77.2023	45.7495	23.1607
4	20	0.3	121.1405	71.7870	36.3422
4	25	0.3	119.1079	70.5825	35.7324
4	30	0.3	117.1425	69.4178	35.1427
4	35	0.3	115.2408	68.2908	34.5722
4.5	20	0.3	172.4833	102.2123	51.7450
4.5	25	0.3	169.5892	100.4973	50.8768
4.5	30	0.3	166.7907	98.8390	50.0372
4.5	35	0.3	164.0831	97.2344	49.2249
5	20	0.3	236.6026	140.2089	70.9808
5	25	0.3	232.6327	137.8564	69.7898
5	30	0.3	228.7939	135.5816	68.6382
5	35	0.3	225.0797	133.3806	67.5239
5.5	20	0.3	314.9180	186.6181	94.4754
5.5	25	0.3	309.6341	183.4869	92.8902
5.5	30	0.3	304.5247	180.4591	91.3574
5.5	35	0.3	299.5811	177.5295	89.8743
6	20	0.3	408.8492	242.2810	122.655
6	25	0.3	401.9893	238.2159	120.597
6	30	0.3	395.3558	234.2849	118.607
6	35	0.3	388.9377	230.4816	116.681

Gearbox terdiri dari roda gigi, poros, bantalan dan perapat, serta rumah (*casing*). Poros dan roda gigi dibuat dari baja karbon komersial. Poros dan perapat menggunakan elemen yang tersedia di pasaran, sehingga ukuran poros disesuaikan dengan ukuran bantalan. Rumah *gearbox* dibuat dari pelat baja dengan proses pemotongan dan pengelasan. Selanjutnya poros transmisi disambungkan ke generator dengan kopling.

Hasil pengujian dan perhitungan daya total, daya maksimal dan daya aktual disajikan pada Tabel 1. Tren perubahan daya terhadap perubahan kecepatan angin dan temperatur terlihat pada diagram di Gambar 5. Pada kecepatan yang sama daya total, maksimal dan aktual berkurang mengikuti kenaikan temperatur, yang disebabkan oleh tren penurunan densitas.

Daya mengalami kenaikan signifikan seiring dengan kenaikan kecepatan angin masukan.



Gambar 5. Diagram Daya Turbin vs Kecepatan Angin

PENUTUP

Turbin angin menghasilkan daya aktual yang nilainya tergantung pada kecepatan angin, luas permukaan sapuan angin dan densitas udara. Besarnya densitas udara dipengaruhi temperatur, jika temperatur naik semakin tinggi, densitas udara menurun dan menyebabkan penurunan daya turbin angin.

Daya aktual turbin angin dipengaruhi oleh koefisien daya, C_p , yang nilai maksimalnya 0,593 yang bisa dicapai jika turbin angin bisa dibuat dalam kondisi ideal. Nilai koefisien daya sendiri sendiri dipengaruhi oleh rasio kecepatan tip dan jenis turbin angin.

DAFTAR PUSTAKA

Aryanto, F., Mara, I M., & Nuarta, M., 2013, Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah Sudu terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal, *Dinamika Teknik Mesin*, Vol. 3, No. 1, pp. 50 – 59.

El-Wakil, M. M., 1988, *Powerplant Technology*, International Ed., 2nd printing, McGraw-Hill Book Company, Singapore.

Howey, D. A., Bansal, A., & Holmes, A. S., 2011, Design and Performance of a cm-scale Shrouded Wind Turbine for Energy Harvesting, *Smart Material Structure*, Vol. 20, pp. 1 – 27.

Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L., 2009, *Wind Energy Explained:*

Theory, Design and Application, 2nd ed., John Wiley and Sons Ltd., Chichester.

Navin Prasad, E., Janakiram, S., Prabu, T., & Sivasubramaniam, S., 2014, Design and Development of Horizontal Small Wind Turbine Blade for Low Wind Speed, *International Journal for Engineering & Advanced Technology*, Vol-4, Issue-1, pp. 75 – 84.

Nawawi, I., & Fatkhurrozi, B., 2014, Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Skala Kecil pada Bangunan Bertingkat, *Fakultas Teknik Universitas Tidar*, Magelang.

Pratama, A. G., 2012, Perancangan Kincir Angin Tipe Aksial Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik, *Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*, Surakarta.

Syahyuniar, R., 2016., Rancang Bangun Pembuatan Turbin Angin Type Horizontal Berdiameter 2,8 meter dan Output Daya Listrik 1000 Watt, *Jurnal Elemen*, Vol. 3, No. 1, pp. 30 – 33.

Velan, S. S. S., Muthukumar, G., & Balasubramaniam, S., 2012, Windmill Power Generation Using Mult-Generator and Single Rotor (Horizontal and Vertical Blade), *Journal of Technology and Policy*, Vol. 2, No. 4, pp. 11 – 20.

-, 2014, *Statistik Ketenagalistrikan 2014*, Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta.