

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JUMLAH SUDU TERHADAP DAYA PADA TURBIN ANGIN SUMBU VERTIKAL TIPE ROTOR CROSSFLOW UNTUK OPTIMALISASI ANGIN DI WILAYAH PANTAI KOTA BALIKPAPAN

Illa Rizianiza

Institut Teknologi Kalimantan
Jurusan Teknologi Industri dan Proses
Program Studi Teknik Mesin
rizianiza@lecturer.itk.ac.id

Diky Herfandi

Institut Teknologi Kalimantan
Jurusan Teknologi Industri dan Proses
Program Studi Teknik Mesin
herfandidiky@gmail.com

Wind energy was one of the renewable energy alternatives with the biggest potential in Indonesia to be used as a power plant. Balikpapan is an area with extensive coastal areas with great wind potential. Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) is an upright axis wind turbine whose movement of the shaft and rotor is parallel to the direction of the wind so that the rotor can rotate in all wind directions. Crossflow type VAWT is a type of VAWT that can operate at low wind speeds have a starting torque and a high value of power efficiency. VAWT is designed with specifications of rotor diameter 500 mm, rotor height 500 mm, 1:1 aspect ratio, 90° curvature angle, and length of blade 75 mm. The variations of the number of blades used are 8, 12, and 16 blades. The results showed that the number of blades affected the power produced by the wind turbine. VAWT with the number of blades 16 is the best performing turbine with the highest power value of 10,325 mW at a wind speed of 3,05 m/s. The best and optimal performance found in the variation of the number of blades 16. It is obtained a maximum C_p value of 0,00273 at Tip Speed Ratio 0,578 and maximum C_T value of 0,00485 at Tip Speed Ratio 0,496 so VAWT with the number of blades 16 is the most optimal wind turbine to be applied at Manggar Beach, Balikpapan City.

Keywords: Crossflow, Number of Blade, Power Coefficient, Tip Speed Ratio.

1. PENDAHULUAN

Salah satu kebutuhan energi yang paling dibutuhkan di Indonesia adalah energi listrik. Konsumsi energi listrik di Indonesia terus meningkat sebanding dengan pertumbuhan ekonomi nasional. Saat ini pemenuhan energi listrik di Indonesia masih didominasi oleh pembangkit listrik energi fosil. Energi fosil (batubara, gas dan minyak bumi) memiliki ketersediaan sumber daya yang terbatas yang akan habis dalam jangka waktu tertentu [1]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (Kementerian ESDM RI) pada tahun 2012 menyatakan bahwa penggunaan energi fosil paling banyak digunakan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik di Indonesia. Prosentase penggunaan energi fosil tersebut sebesar 89%. Cadangan energi fosil batu bara Indonesia pada tahun 2014 diperkirakan tersisa 120,5 miliar ton dan akan habis dalam kurun waktu sekitar 72 tahun jika digunakan secara terus menerus tanpa eksplorasi sumur baru [1, 2].

Selain energi non fosil, sumber energi di Indonesia yang memiliki potensi besar adalah energi angin. Energi angin yang ada di Indonesia jika dimanfaatkan secara optimal dapat menghasilkan listrik sebesar 9,29 GW. Namun, pemanfaatan energi angin di Indonesia belum optimal sebab kapasitas pembangkit listrik tenaga angin hanya menghasilkan 3,07 MW [2]. Beberapa daerah di Indonesia memiliki potensi energi angin yang besar namun belum dimanfaatkan dengan baik sehingga persediaan energi listrik masih kurang.

Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki potensi energi angin yang besar adalah Kota Balikpapan.

Secara posisi Kota Balikpapan terletak didekat laut timur dari Pulau Kalimantan, titik energi angin di Kota Balikpapan terdapat di bagian timur Kota Balikpapan yang berdekatan dengan Selat Makasar tepatnya di 1° Lintang Selatan dan $11,5^{\circ}$ - 117° Bujur Timur [3]. Lokasi tersebut tepatnya terletak sepanjang pantai di Kecamatan Balikpapan Timur. Kecepatan angin di Kota Balikpapan memiliki rentang 2,5 m/s sampai 4,0 m/s termasuk skala kecepatan angin rendah. Namun, letak Kota Balikpapan yang strategis tidak diimbangi dengan pemenuhan kebutuhan listrik yang baik. Pemenuhan kebutuhan listrik di beberapa daerah Balikpapan masih menggunakan sistem *on off*. Daerah yang mengalami sistem *on off* hanya bisa menikmati listrik pada hari-hari tertentu sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan.

Berdasarkan analisa kondisi angin Kota Balikpapan yang memiliki kecepatan angin rendah, turbin angin yang sesuai untuk digunakan di Kota Balikpapan adalah Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). Sesuai hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada tahun 2005, kecepatan angin dengan rentang 2,5 m/s sampai 4,0 m/s termasuk dalam skala kecepatan angin rendah [4]. TASV merupakan turbin angin yang cocok digunakan pada kecepatan angin rendah [5, 6].

Jenis turbin angin dibedakan menjadi dua berdasarkan jenis rotornya yaitu turbin angin sumbu vertikal dan turbin angin sumbu horizontal. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) merupakan turbin angin sumbu tegak yang memiliki gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin. Gerakan poros ini menyebabkan rotor berputar pada semua arah angin [7]. TASV memiliki torsi tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah. Generator pada TASV dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga dapat mempermudah perawatan. Performa TASV tidak dipengaruhi arah angin. Disamping itu, TASV juga memiliki kecepatan angin sangat rendah di bagian bawah turbin. Kecepatan putaran turbin pada TASV dipengaruhi oleh pemasangan *tower* turbin yang disesuaikan dengan kondisi angin. TASV menghasilkan efisiensi lebih rendah dibandingkan Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) [8]. Performa TASH sangat dipengaruhi oleh arah angin, sehingga diperlukan pemasangan sudu pengarah khususnya pada turbin angin savonius [9].

TASV tipe rotor *crossflow* merupakan turbin angin yang sesuai untuk daerah yang memiliki kecepatan angin rendah. Turbin angin *crossflow* memiliki torsi awal dan nilai efisiensi daya yang tinggi. Hal tersebut disebabkan turbin *crossflow* memiliki serangkaian sudu yang melingkar. Aliran udara pada turbin angin *crossflow* akan melewati *runner* dua kali sehingga efisiensinya menjadi lebih tinggi [10]. Turbin angin tipe *crossflow* menghasilkan energi listrik dengan cara mengkonversi energi kinetik angin. Aliran udara pada turbin angin *crossflow* menyebabkan rotor berputar. Aliran angin menumbuk sudu pertama turbin, kemudian akan menyilang (*crossflow*) dan mendorong sudu tingkat kedua. Performa turbin angin *crossflow* dapat ditingkatkan dengan memperhatikan beberapa faktor diantaranya sudut kemiringan sudu, jumlah sudu dan kelengkungan sudu [11, 12].

Beberapa faktor yang mempengaruhi performa turbin angin *crossflow* adalah jumlah sudu, panjang radius kelengkungan sudu atau rasio diameter [13]. Panjang radius kelengkungan sudu sebanding dengan perbandingan antara diameter dalam dengan diameter luar turbin angin tipe *crossflow*. Peningkatan rasio diameter mengakibatkan jarak transfer energi antar sudu akan semakin dekat, sehingga dapat mempengaruhi nilai efisiensi turbin. Efisiensi turbin angin akan mencapai titik optimal pada rasio diameter tertentu [13]. Penggunaan rasio diameter yang ideal akan mempengaruhi nilai koefisien daya yang dihasilkan turbin. Panjang radius sudu yang terlalu kecil akan menyebabkan jumlah angin yang menumbuk sudu turbin tidak dapat mengalir melewati penampang yang terlalu kecil dan akan menyebabkan tekanan balik. Panjang radius sudu yang terlalu besar akan menyebabkan jarak transfer energi yang akan semakin besar dan meningkatkan turbulensi sehingga menyebabkan turunnya koefisien daya [14].

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi performa turbin *crossflow* adalah jumlah sudu. Semakin banyak jumlah sudu, maka jumlah torsi yang dihasilkan turbin juga semakin banyak. Secara umum, dengan penambahan jumlah sudu, energi kinetik aliran angin akan lebih efisien diubah menjadi energi mekanis oleh sudu-sudu tersebut. Namun, jika jumlah sudu terlalu banyak maka dapat menyebabkan penurunan efisiensi turbin [11]. Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh jumlah sudu 8, 12, dan 16 terhadap daya listrik yang dihasilkan serta menentukan konfigurasi jumlah sudu yang optimal. Turbin angin yang menghasilkan daya listrik maksimum dapat diterapkan di Pantai Balikpapan.

2. METODE DAN BAHAN

2.1 Perancangan Turbin Angin

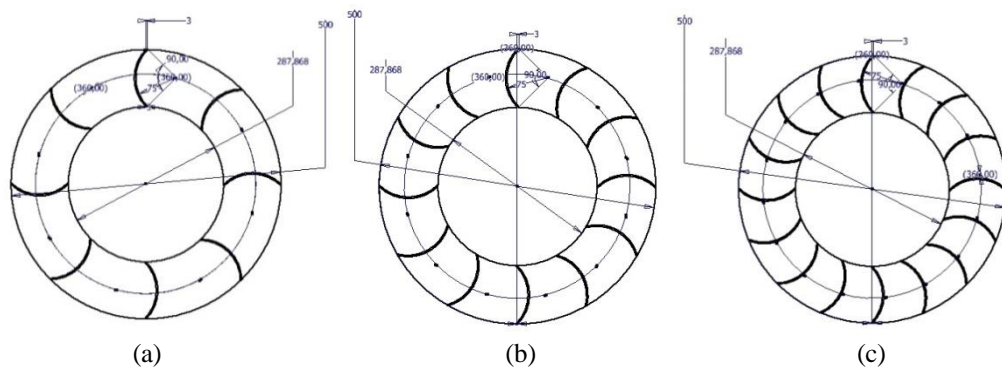
Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode studi eksperimental pembuatan turbin angin tipe rotor *crossflow*. Diameter *endplate upper* ataupun *lower* yang digunakan sebesar 500 mm dengan ketebalan $\pm 0,7$ mm. *Aspect ratio* yang digunakan sebesar 1 dan tinggi rotor turbin 500 mm. Desain turbin angin *crossflow* memiliki rasio perbandingan 1:1 terhadap diameter *endplate*. Material yang digunakan dalam pembuatan sudu

turbin adalah pipa PVC. Pipa PVC mudah didapatkan serta memiliki bentuk kelengkungan yang baik sesuai bentuk sudu rotor *crossflow*. Variasi jumlah sudu yang digunakan dalam pengujian adalah 8, 12 dan 16. Turbin *crossflow* memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 1.

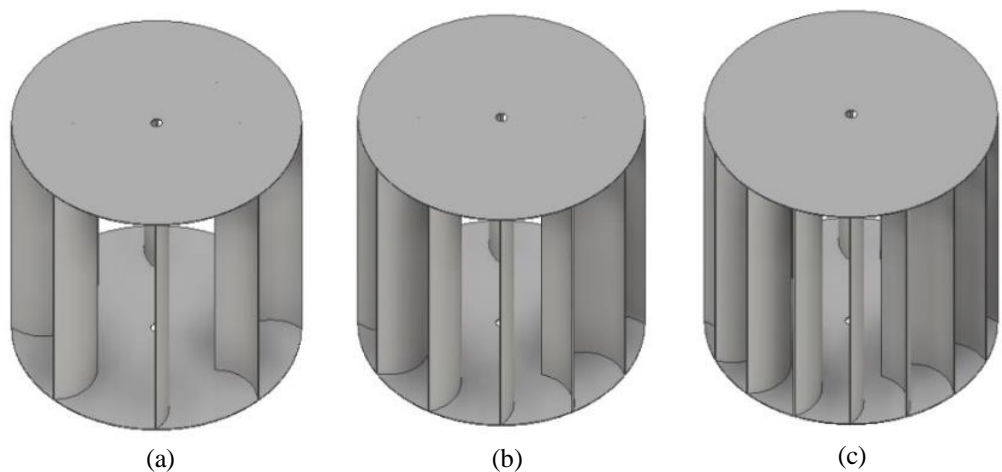
Tabel 1: Spesifikasi Turbin Angin *Crossflow*.

PARAMETER	DIMENSION
Diameter luar <i>endplate</i>	500 mm
Tinggi sudu turbin	500 mm
Sudut kelengkungan sudu	90°
Sudut serang	90°
Diameter poros	15 mm
Panjang radius sudu	75 mm
Jumlah sudu	8, 12 dan 16

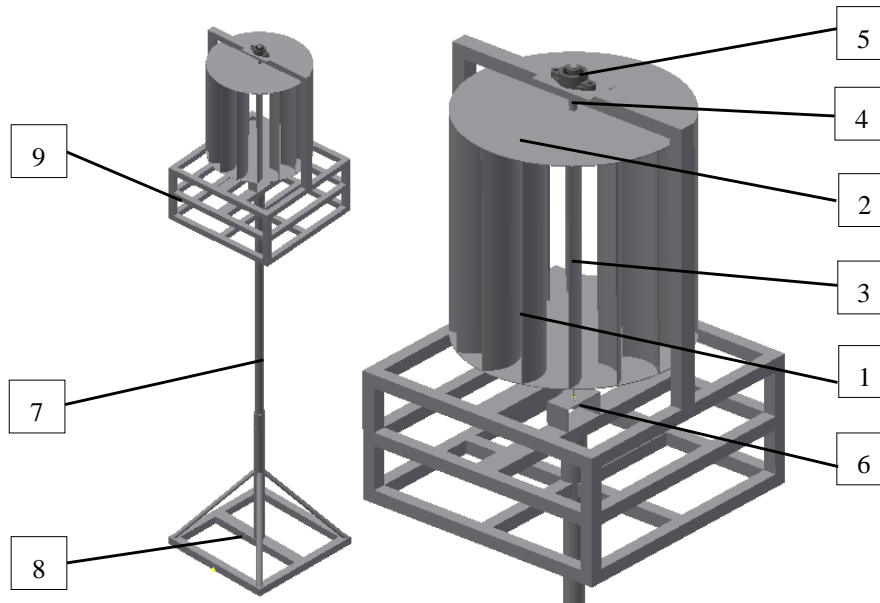
Poros (*shaft*) yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter 15 mm. Material yang digunakan untuk poros adalah *Carbon and Alloy Steel* ASTM A470. Roda gigi digunakan sebagai sistem transmisi berbahan dasar nilon dengan rasio transmisi roda gigi adalah 1:3. Bantalan (*bearing*) yang digunakan tipe *Pillow block bearing* UCFL 202 dengan diameter dalam 15 mm. Generator yang digunakan *Mini 3-phase* PMG dengan spesifikasi daya 0,5 W – 12 W pada 300 – 6000 rpm. Kerangka atas turbin angin terbuat dari material galvanis. Tiang dan dasar turbin terbuat dari pipa besi dan besi siku. Detail bagian sudu turbin angin *crossflow* ditunjukkan pada Gambar 1 dengan penampang 2D dan Gambar 2 dengan penampang 3D sebagai berikut.



Gambar 1: Rancangan sudu 2 dimensi dengan variasi jumlah sudu, (a) 8 sudu, (b) 12 sudu, (c) 16 sudu



Gambar 2: Rancangan sudu 3 dimensi dengan variasi jumlah sudu, (a) 8 sudu (b) 12 sudu (c) 16 sudu



Gambar 3: Desain turbin angin *crossflow*

Gambar 3 menunjukkan rancangan turbin angin tipe *crossflow* secara keseluruhan. Berdasarkan Gambar 3, berikut merupakan bagian-bagian TASV yang digunakan dalam penelitian.

- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| 1. Sudu | 6. Generator |
| 2. <i>Endplate</i> | 7. Tiang penyangga turbin |
| 3. Poros (<i>shaft</i>) | 8. Dasar tiang turbin |
| 4. <i>Bushing</i> | 9. Kerangka |
| 5. Bantalan (<i>bearing</i>) | |

Pengujian turbin angin *crossflow* dilakukan di Pantai Manggar, Kota Balikpapan pada hari Sabtu, 13 April 2019 dan Sabtu, 27 April 2019. Kecepatan angin di wilayah Pantai Manggar memiliki variasi yang berbeda-beda tergantung pada faktor cuaca, lingkungan dan waktu pengujian. Kecepatan angin yang di Pantai Manggar pada saat pengambilan data adalah sekitar 2,3 – 3,4 m/s. Pengujian turbin angin *crossflow* dilakukan pada kondisi cuaca pada suhu (28°C – 31°C) dan rentang waktu pada pukul 11.00 WITA – 17.45 WITA. Jeda waktu pengambilan data setiap 5 menit untuk 1 variasi dengan 3 kali pengulangan setiap variasinya. Pada penelitian ini terdapat 3 kombinasi variasi. Pengambilan data dilakukan secara langsung menggunakan alat ukur yang digunakan untuk melakukan penelitian yaitu *anemometer*, *multimeter*, dan *tachometer*. Data yang dihasilkan berupa kecepatan angin saat pengujian, tegangan dan arus aktual generator, serta putaran turbin angin *crossflow*.

2.2 Daya dan Performa Turbin Angin *Crossflow*

Energi kinetik angin dikonversikan menjadi energi mekanik oleh rotor turbin angin *crossflow*. Generator turbin berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Besarnya energi angin yang ditransfer ke rotor turbin angin dipengaruhi oleh massa jenis udara, luas area dan kecepatan angin. Daya aktual listrik adalah daya yang dihasilkan dari generator. Generator akan mengonversi putaran rotor menjadi energi listrik. Gaya gerak listrik (GGL) yang dihasilkan oleh generator akan menghasilkan tegangan dan kuat arus listrik. Besarnya daya listrik yang dihasilkan oleh turbin dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$P_g = V_{out} I_{out} \tag{1}$$

Nilai P_g adalah daya keluaran generator atau daya aktual listrik dalam satuan watt, V_{out} adalah tegangan listrik dalam satuan volt dan I_{out} adalah arus listrik dalam satuan ampere. Daya aktual listrik dapat disebut sebagai daya terukur dalam pengujian (P_{Aktual}) [9].

TSR merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan suatu turbin angin. TSR yang dinotasikan λ merupakan perbandingan antara kecepatan ujung sudu turbin angin yang berputar melingkar

dengan kecepatan angin yang melewatinya. Nilai TSR dihitung berdasarkan Persamaan 2.

$$\lambda = \frac{\pi r n}{30v} \tag{2}$$

Dimana λ adalah TSR, n adalah putaran poros dalam *rpm* dan v adalah kecepatan angin dalam satuan m/s [15].

Koefisien daya (C_p) adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh generator (P_g) dengan daya yang dihasilkan oleh angin (P_A). Koefisien daya (C_p) dapat dikatakan sebagai ukuran yang menandakan sebuah efisiensi daya pada turbin angin. Koefisien daya dinyatakan dalam Persamaan 3.

$$C_p = \frac{P_g}{P_A} = \frac{2VI}{\rho A v^3} \tag{3}$$

Dimana P_g adalah daya listrik keluaran generator dalam satuan Watt dan P_A adalah daya energi angin dalam satuan Watt [10].

Koefisien torsi (C_T) adalah perbandingan antara torsi aktual turbin angin dengan torsi teoritis. Persamaan (4) menunjukkan persamaan yang digunakan untuk menghitung koefisien torsi.

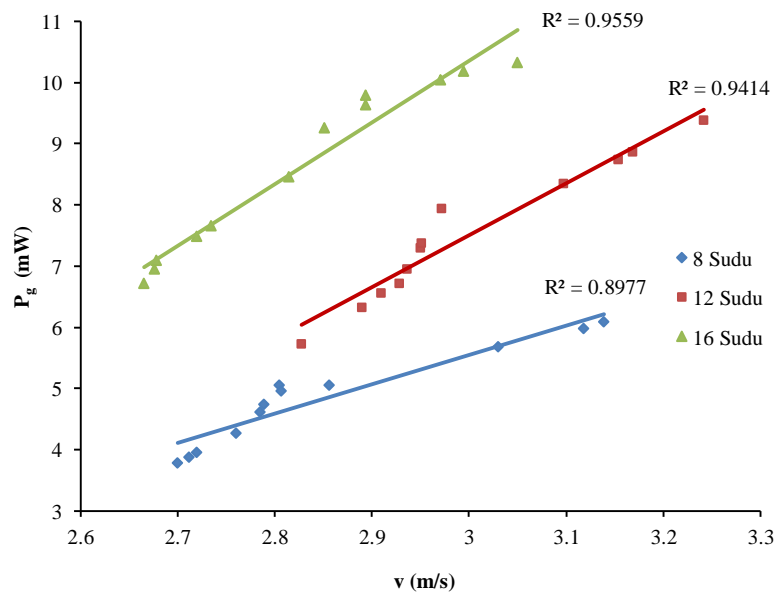
$$C_T = \frac{T_{Aktual}}{T_{Teoritis}} = \frac{2 T_{Aktual}}{\rho A v^2 r} \tag{4}$$

Dimana T_{Aktual} adalah torsi aktual turbin angin dalam satuan N.m dan $T_{Teoritis}$ adalah torsi teoritis dalam satuan N.m. [10]. Hubungan antara C_p , C_T dan TSR dapat dihubungkan dengan persamaan 5.

$$\lambda = \frac{C_p}{C_T} \tag{5}$$

3. HASIL DAN DISKUSI

Pengujian turbin angin *crossflow* dilakukan di Pantai Manggar Balikpapan dengan kecepatan angin rendah 2,3 m/s – 3,4 m/s. Turbin angin *crossflow* memiliki *starting* torsi yang baik. Pada saat pengujian turbin angin *crossflow* mampu berputar dengan kecepatan awal yang rendah yaitu 2 m/s. Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 4, jumlah sudu memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin angin *crossflow*.

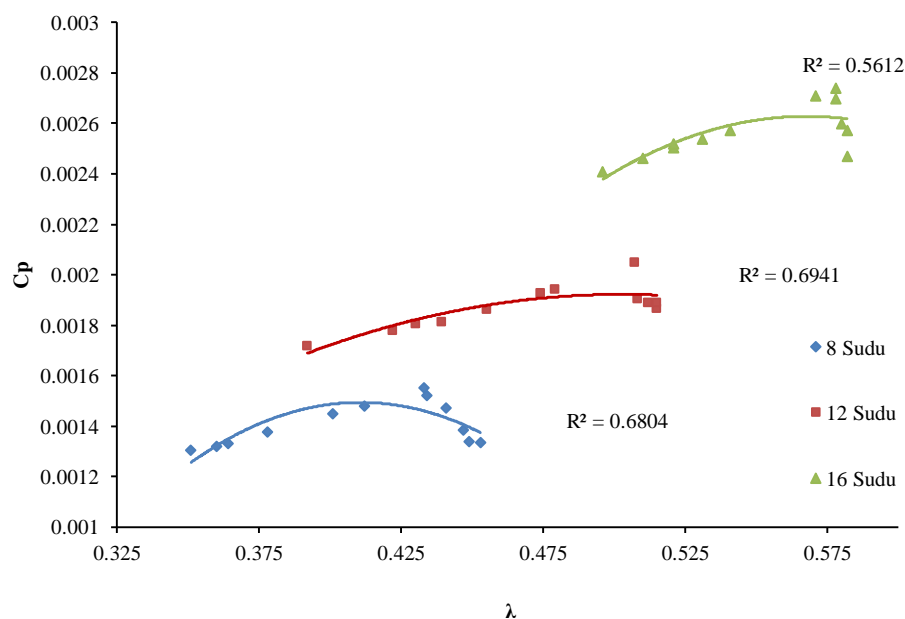


Gambar 4: Hubungan antara kecepatan angin terhadap daya listrik yang dihasilkan berdasarkan jumlah sudu

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara jumlah sudu terhadap daya listrik aktual generator (P_g) dan

kecepatan angin. Turbin angin *crossflow* jumlah sudu 16 menghasilkan daya listrik terbesar, sedangkan daya listrik terkecil dihasilkan pada turbin angin *crossflow* dengan jumlah sudu 8. Daya listrik terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin *crossflow* mencapai 10,325 mW pada kecepatan angin 3,05 m/s. Sedangkan turbin angin *crossflow* dengan jumlah sudu 8 memiliki hasil daya maksimum sebesar 6,084 mW pada kecepatan angin 3,139 m/s. Pada turbin angin *crossflow* dengan jumlah sudu 12 memiliki hasil daya maksimum 9,386 mW pada kecepatan angin 3,242 m/s. Turbin angin *crossflow* dengan jumlah sudu 16 memiliki daya listrik terbesar sebab struktur bilah sudu yang tersusun rapat, sehingga angin pantai akan menabrak sudu berulang-ulang kali. Jumlah intensitas angin yang menumbuk permukaan sudu yang tersusun rapat tersebut menyebabkan gaya dorong yang semakin besar kepada sudu turbin sehingga putaran rotor turbin akan berputar semakin cepat dan daya yang dihasilkan juga akan meningkat. Turbin angin *crossflow* dengan jumlah sudu 8 menghasilkan daya listrik terendah sebab konstruksi pada sudu rotor turbin yang tersusun tidak rapat, sehingga menyebabkan jumlah intensitas angin yang melewati rotor tidak menumbuk sudu. Turbin angin *crossflow* dengan jumlah sudu lebih sedikit memiliki jumlah putaran yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin yang memiliki jumlah sudu lebih banyak. Perbedaan jumlah putaran disebabkan oleh jarak antar sudu yang satu dengan yang lain agak jauh sehingga banyak energi yang hilang melalui celah sudu tersebut.

Pengujian turbin angin *crossflow* dengan jumlah sudu 8,12 dan 16 menghasilkan daya listrik yang sebanding dengan kecepatan angin. Semakin besar kecepatan angin, maka jumlah putaran turbin semakin besar, sehingga daya listrik yang dihasilkan juga semakin besar. Kecepatan angin yang meningkat menyebabkan *drag force* sudu turbin bertambah besar sehingga jumlah putaran juga bertambah. Pada pengujian turbin *crossflow* dengan jumlah sudu 16 tepatnya pada pengujian dengan kecepatan angin 2,894 m/s memiliki jumlah putaran turbin yang berbeda sebesar 0,1 rpm. Perbedaan jumlah putaran ini disebabkan karena kondisi arah angin pada saat pengambilan data tidak konstan serta faktor teknis turbin angin.



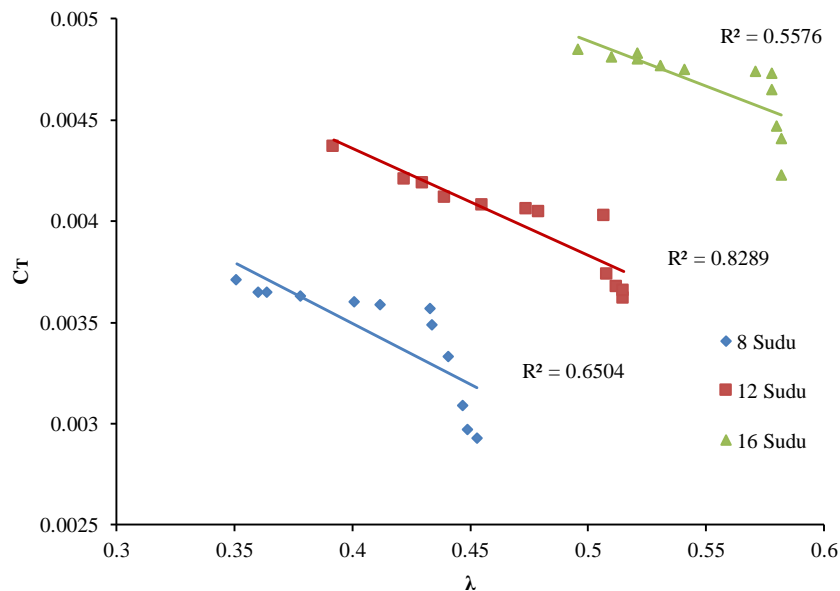
Gambar 5: Hubungan TSR terhadap C_p berdasarkan jumlah sudu

Gambar 5 menunjukkan tentang hubungan antara TSR dengan C_p berdasarkan jumlah sudu. Nilai C_p terbesar dihasilkan pada turbin dengan jumlah sudu 16, sedangkan nilai C_p terkecil terdapat pada turbin dengan jumlah sudu 8. Pada turbin angin dengan jumlah sudu 16 dihasilkan C_p maksimum sebesar 0,00273 pada TSR 0,578. Sedangkan pada turbin dengan jumlah sudu 8 memiliki C_p maksimum 0,00155 pada TSR 0,433 dan pada turbin dengan jumlah sudu 12 memiliki hasil C_p maksimum 0,00204 pada TSR 0,507. Perbedaan jumlah sudu turbin menghasilkan hasil C_p yang berbeda-beda. Turbin dengan jumlah sudu 16 memiliki performa C_p yang baik. Performa terbaik ini disebabkan oleh energi kinetik angin yang melewati rotor turbin. Sudu yang tersusun rapat menyebabkan gaya dorong yang besar terhadap permukaan sudu sehingga turbin dapat meningkatkan jumlah putaran. Perubahan energi kinetik dari angin menjadi energi mekanis sudu pada turbin angin dengan jumlah sudu lebih banyak menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan pada turbin angin dengan jumlah sudu lebih sedikit.

Turbin angin dengan luas penampang sudu yang besar memiliki nilai C_p tertinggi. Turbin angin ini

mampu melakukan transfer energi secara optimal sehingga gaya dorong yang dihasilkan menjadi lebih besar. Gaya dorong yang besar menghasilkan efisiensi dan performa turbin yang optimal. Semakin meningkatnya jumlah sudu pada turbin angin *crossflow* akan meningkatkan C_P sampai jumlah sudu tertentu. Hal ini dikarenakan perbedaan jumlah sudu yang digunakan dapat mempengaruhi aliran angin yang melewati sudu turbin [16].

Jumlah sudu pada turbin angin *crossflow* mempengaruhi nilai TSR dan koefisien torsi (C_T) yang dihasilkan. Nilai C_T terbesar dihasilkan pada turbin angin dengan jumlah sudu 16, sedangkan nilai C_T dengan terkecil dihasilkan pada turbin angin dengan variasi jumlah sudu 8 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6: Hubungan antara TSR terhadap C_T berdasarkan jumlah sudu

Nilai C_T optimum dihasilkan oleh turbin angin dengan jumlah sudu terbanyak pada TSR 0,496. Nilai C_T yang dihasilkan pada TSR 0,496 yaitu 0,00485. Sedangkan pada turbin angin dengan jumlah sudu 8 memiliki C_T maksimum 0,00371 pada TSR 0,351. Turbin angin dengan jumlah sudu 12 memiliki hasil C_T maksimum 0,00437 pada TSR 0,392. Turbin angin dengan jumlah sudu 16 menghasilkan nilai C_T tertinggi jika dibandingkan keseluruhan variasi yang diujikan. Salah satu faktor yang menyebabkan perbedaan nilai C_T berdasarkan jumlah sudu turbin adalah jarak antar sudu turbin. Jarak antar sudu yang berdekatan dapat menyebabkan besarnya energi kinetik angin yang mendorong berputarnya sudu semakin besar. Koefisien torsi pada turbin angin dengan jumlah sudu 16 memiliki C_T yang relatif lebih besar. Pertambahan nilai C_T sebanding dengan nilai TSR. Jumlah sudu pada turbin sangat berpengaruh terhadap C_T yang dihasilkan. Perubahan nilai C_T tersebut disebabkan oleh jarak antar sudu. Jarak antar sudu yang semakin besar menyebabkan efisiensi turbin semakin kecil. Semakin bertambahnya jumlah sudu maka akan semakin tinggi performa efisiensi yang dihasilkan turbin angin *crossflow*. Jumlah sudu yang semakin banyak akan berpengaruh terhadap performa yang dihasilkan turbin angin *crossflow*. Semakin cepat putaran rotor maka energi kinetik angin disekitar sudu turbin angin tidak dapat masuk ke celah sudu karena jarak antar sudu lebih rapat.

4. KESIMPULAN

1. Pengujian dilakukan pada turbin angin dengan variasi jumlah sudu 8, 12 dan 16. Turbin angin dengan jumlah sudu 16 menghasilkan daya paling tinggi yaitu 10,325 mW.
2. Turbin angin sumbu vertikal tipe rotor *crossflow* dengan jumlah sudu 16 merupakan turbin angin yang paling optimal untuk diterapkan di Pantai Balikpapan dengan kecepatan angin 2,3 m/s – 3,4 m/s

5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) ITK yang telah mendanai penelitian ini melalui Program Penelitian Unggul Perguruan Tinggi.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM, *Blueprint Kajian Supply Demand Energi*, Jakarta, 2013.
- [2] ESDM, *Blueprint Rencana Strategi Kementerian ESDM 2015-2019*, Jakarta, 2015.
- [3] BAPPEDA BALIKPAPAN, *Kajian Energi Terbarukan Di Kota Balikpapan*, Balikpapan, 2015.
- [4] LAPAN, *Blueprint Data Kecepatan Angin di Pulau Jawa*, Jakarta, 2005.
- [5] HALSEY, N., *Modeling the Twisted Savonius Wind Turbine Geometrically and Simplifying its Construction*, Oregon Episcopal School, Oregon, 2011.
- [6] HAU, E., *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Munich, Springer Science & Business Media, 2006.
- [7] PUTRANTO, A., PRASETYO, A., ZATMIKO, A., “Rancang bangun turbin angin untuk penerangan rumah tangga”, Skripsi, Universitas Diponegoro: Fakultas Teknik Program Studi Diploma III Teknik Mesin, Semarang, 2011.
- [8] WIRANTO, ANTONIUS., “Unjuk kerja kincir angin poros horizontal empat sudu berbahan komposit berdiameter 100 cm lebar maksimum 13 cm dengan jarak 20 cm dari pusat poros”, Skripsi, Universitas Sanata Dharma: Program Studi Teknik Mesin, Yogyakarta, 2016.
- [9] ULLY, D.N., SOEPARMAN, S., HAMIDI, N. “Pengaruh pemasangan sudu pengarah dan variasi jumlah sudu rotor terhadap performance turbin angin savonius”. *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 5, n. 2, pp. 127-134, 2014.
- [10] HENDRAWAN, M. I. F., DANARDONO. D., HADI S., “Studi simulasi penggunaan airfoil naca 6412 sebagai sudu pada turbin angin crossflow melalui permodelan CFD 2 dimensi”, *Jurnal Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret*, v. 13, n. 1, pp. 28-31, 2018.
- [11] PERMADI, M. F., SIREGAR, I. H., “Uji eksperimental turbin angin sumbu vertikal jenis crossflow dengan variasi jumlah blade”, *Jurnal Teknik Mesin Universitas Negeri Surabaya*, v. 06, n. 01, pp. 15-31, 2018.
- [12] HENDRAWAN, M. I. F., DANARDONO. D., HADI S., “Studi Simulasi Penggunaan Airfoil Naca 6412 Sebagai Sudu Pada Turbin Angin Crossflow Melalui Permodelan CFD 2 Dimensi”, *Jurnal Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret*, v. 13, n. 1, pp. 28-31, 2018.
- [13] JEON, K. S., JEONG, J. I., & PAN, J. K. “Effects of end plates with various shapes and sizes on helical savonius”, *Journal of Elsevier*, pp. 1-10, 2014.
- [14] BARIYYAH, KHOLIFATUL, “Uji Eksperimental Pengaruh Sudut Kemiringan Sudu, Radius Kelengkungan Sudu dan Kecepatan Angin Pada Turbin Crossflow Terhadap Daya yang Dihasilkan Pada Sistem Pemulihan Energi yang Terintegrasi dengan Menara Pendingin”, Skripsi, Universitas Sebelas Maret: Program Studi Teknik Mesin, Surakarta, 2016.
- [15] HAU, E., *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, Munich, Springer Science & Business Media, 2005.
- [16] KURNIAWATI, D.M., DANARDONO. D, BUDI, S., “Experimental investigation on performance of crossflow wind turbine as effect of blades number”, In : *Proceeding of International Conference on Industrial Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering*, Surakarta, Sept. 2018.