

# Studi Eksperimen Pengaruh Penggunaan Partial Cut off Blades pada Turbin Angin Tipe Savonius

Rizky Wahyu Suhadak<sup>1</sup>, Saif Muizzadin Wadaullah<sup>2</sup>, Donny Albari<sup>3</sup>,

Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya<sup>1,3</sup>

Institut Teknologi Sepuluh Nopember<sup>2</sup>

e-mail: rizky.suhadak94@gmail.com<sup>1</sup>, wada.ullah.sw@gmail.com<sup>2\*</sup>, donnyalbari08@gmail.com<sup>3</sup>

## ABSTRACT

The Savonius wind turbine is one of the VAWT wind turbines that easily rotates at low wind speed conditions such as in Indonesia. However, the savonius turbine has a fairly low efficiency when compared to other types of turbines. Increasing the cross-sectional area of the Savonius single stage turbine can be done by using the partial cut off blades model. This research was conducted to compare the performance of the Savonius turbine with partial cut off blades and regular blades at various wind speeds. The research was conducted experimentally in an open space at a speed of 2-6 m/s. The results of the study are shown by graphs of torque, power and efficiency to changes in wind flow speed. Application of turbine blades with partial cut off blades model is less effective if applied to the Savonius turbine. This is because the partial cut off blades have a distance between the pieces. This condition causes the freestream fluid flowing downstream to not push the turbine blades optimally. To improve the application of partial cut off blades in the future, it can be done by reducing the distance between the blade pieces.

**Keyword:** Savonius, partial cut off blades, flushing

## ABSTRAK

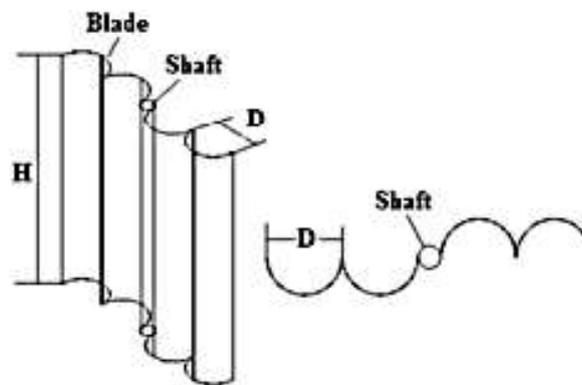
Turbin angin savonius adalah salah satu dari turbin angin VAWT yang mudah berputar pada kondisi kecepatan angin rendah seperti di Indonesia. Namun turbin savonius memiliki efisiensi yang cukup rendah bila dibandingkan dengan jenis turbin lainnya. Peningkatan luas penampang turbin Savonius *single stage* dapat dilakukan dengan menggunakan model potongan sudu parsial (*partial cut off blades*). Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan performa turbin savonius dengan sudu tipe *partial cut off blades* dan regular pada berbagai kecepatan angin. Penelitian dilakukan secara eksperimen di ruang terbuka pada kecepatan 2-6 m/s. Hasil penelitian ditunjukkan melalui grafik torsi, daya dan efisien terhadap perubahan kecepatan aliran angin. Pengaplikasian sudu turbin dengan model *partial cut off blades* kurang efektif jika diaplikasikan di turbin savonius. Hal ini dikarenakan sudu *partial cut off blades* memiliki jarak diantara potongannya. Kondisi ini menyebabkan fluida *freestream* yang mengalir dibagian *downstream* tidak mendorong bilah turbin secara maksimal. Untuk meningkatkan aplikasi *partial cut off blades* kedepannya dapat dilakukan dengan memperkecil jarak antara potongan sudu.

**Kata kunci:** Savonius, *partial cut off blades*, flushing

## PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi fosil saat ini menjadi isu penting karena jumlahnya yang terbatas dan menghasilkan emisi yang dapat menimbulkan efek rumah kaca. Pemanfaatan energi terbarukan saat ini banyak diminati oleh masyarakat untuk mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh energi fosil. Energi angin merupakan salah satu sumber daya yang berlimpah, ramah lingkungan dan bersifat renewable sehingga berpotensi untuk dikembangkan. Teknologi turbin angin menawarkan solusi yang efektif untuk mengeliminasi ketergantungan terhadap penggunaan sumber energi fosil. Berdasarkan kedudukan pada poros, jenis-jenis turbin angin dibagi dalam dua kategori, yaitu turbin angin sumbu Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) dan turbin angin sumbu Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Turbin angin savonius adalah salah satu dari turbin angin VAWT yang mudah berputar pada kondisi kecepatan angin rendah seperti di Indonesia [1]. Turbin angin savonius memiliki self starting yang baik sehingga mampu memutar rotor walaupun kecepatan angin rendah [2]. Turbin savonius memiliki efisiensi yang cukup rendah bila dibandingkan dengan jenis turbin lainnya. Untuk meningkatkan jenis efisiensi turbin savonius beberapa hal dapat dilakukan diantaranya dengan mengubah bentuk sudu turbin baik dengan memotong turbin dengan rasio tertentu dengan menggunakan *Tepering* model [3] atau dengan menggunakan bentuk potongan aerodinamis seperti turbin *Ice-Wind* [4]. Selain itu peningkatan performa turbin savonius dapat dilakukan dengan pemasangan *endplate* [5], mengatur nilai aspect ratio turbin [6], pemasangan pengarah aliran (*deflector*) [7], hingga mengkombinasikan turbin savonius dengan model wind turbine lain [8].

Peningkatan efisiensi turbin savonius juga dapat dilakukan dengan meningkatkan luas penampang daerah yang terkena sapuan angin. Peningkatan sapuan angin dapat dilakukan dengan menambahkan jumlah blade yang terpasang pada turbin. Namun langkah ini kurang efektif dilakukan, karena semakin banyak jumlah sudu pada turbin Savonius memungkinkan munculnya *negative vortex* di daerah *downstream*. Penggunaan dua buah sudu pada turbin Savonius menghasilkan nilai koefisien torsi yang dihasilkan oleh turbin [9]. Peningkatan performa turbin juga dapat dilakukan dengan menggunakan multistage turbine. Turbin yang di susun bertingkat menghasilkan performa yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin model tunggal [10]. Turbin savonius yang disusun bertingkat memiliki luas penampang area yang lebih besar sehingga torsi yang dihasilkan oleh turbin juga lebih besar. Namun turbin yang dipasang bertingkat menghasilkan momen yang lebih besar dibandingkan dengan turbin tunggal. Kondisi ini menyebabkan tower penyangga harus memiliki struktur yang lebih kuat. Peningkatan luas penampang turbin Savonius *single stage* dapat dilakukan dengan menggunakan model potongan sudu parsial (*partial cut off blades*). Turbin *partial cut off blades* merupakan model sudu yang terdiri dari beberapa potongan yang lebih kecil seperti yang di tunjukan oleh gambar 2.



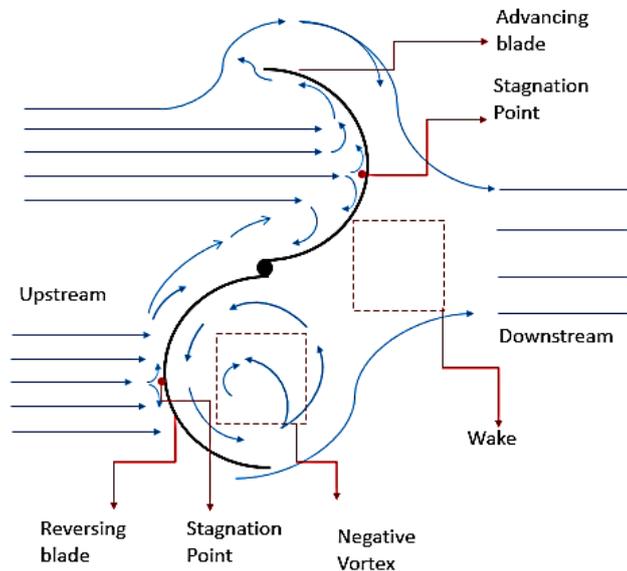
Gambar 1. Turbin Savonius dengan model *Partial Cut off blades* [11]

Penelitian Kassem & Çamur dilakukan dengan menggunakan simulasi numerik pada model turbin savonius dengan model *Partial Cut off blades* [11]. Penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan Savonius tipe straight 2 sudu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin savonius dengan *gap overlap* dan *endplate* menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin dengan *partial cut off blades* tanpa *gap*. Turbin tersebut di uji pada kecepatan *freestream* 2-6 m/s. Namun penelitian tersebut belum menjelaskan secara detail mengenai efek peningkatan performa penggunaan sudu *partial cut off blades* jika dibandingkan dengan turbin savonius tipe sederhana (regular Savonius). Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan performa turbin savonius dengan sudu tipe *partial cut off blades* dan regular pada berbagai kecepatan angin. Hasil penelitian ditunjukkan melalui grafik torsi, daya dan efisien terhadap perubahan kecepatan aliran angin.

## TINJAUAN PUSTAKA

Kondisi aerodinamis aliran fluida yang mengalir melalui turbin Savonius Tipe Straight mempengaruhi performa yang dihasilkan oleh turbin, meliputi daya dan efisiensi. Pada turbin dengan dua sudu, pola aliran fluida yang melintas melewati Savonius di tunjukan melalui gambar 1. Pada turbin Savonius Straight tanpa *overlap* aliran fluida yang mengalir dari *freestream* akan menabrak sudu turbin dan terseparasi menjadi dua arah. Titik pusat separasi aliran terdapat pada titik stagnasi di sudu turbin Savonius. Pada gambar 2, daerah yang terkena aliran *freestream* disebut dengan *upstream*. Sedangkan daerah yang tidak berinteraksi dengan aliran *freestream* secara langsung disebut dengan daerah *downstream*. Aliran fluida yang mengalir dibelakang *reversing blade* akan membentuk pusaran yang dapat menghambat putaran turbin. Pusaran tersebut disebut dengan *negative vortex*. Peningkatan performa turbin dapat dilakukan dengan mengarahkan aliran fluida dari *upstream* menuju *downstream* melalui celah dengan jarak tertentu seperti pada pemasangan *overlap*. Turbin savonius yang dilengkapi dengan *overlap* mengalami peningkatan

performa hingga koefisien momentum hingga 11,5% [12]. Peningkatan efisiensi disebabkan karena aliran fluida yang berasal dari daerah *upstream* mengalir kebelakang dan mendorong *negative vortex* yang muncul di area *downstream* turbin [13]. Fenomena mengalirnya aliran fluida dari *upstream* menuju *downstream* untuk mendorong *negative vortex* menjauhi bagian belakang turbin disebut dengan efek *flushing* [14]. Efek *flushing* dapat mengurangi ukuran *negative vortex* yang terjadi pada turbin savonius.



Gambar 2. Gambaran streamline aliran yang melalui turbin savonius

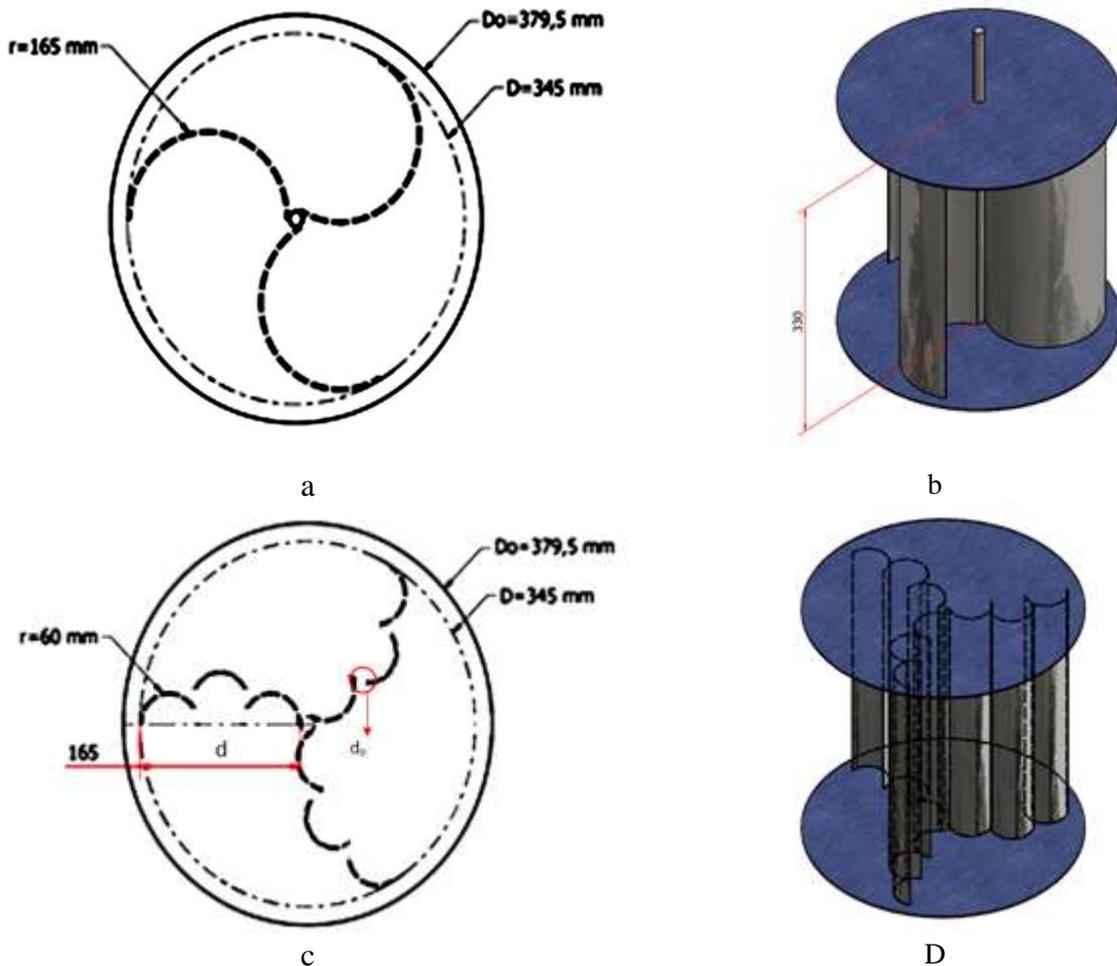
Bentuk turbin dapat di ubah untuk menimbulkan efek *flushing* pada turbin. Cara yang paling sederhana adalah dengan memasang *overlap* pada turbin Savonius. *Overlap* adalah celah sempit yang terbentuk di tengah turbin untuk mencegah pusaran negatif menumpuk di antara Sudu. Jarak *overlap* turbin paling optimum yang digunakan di tubin savonius adalah 20% D/H [15]. Pengaplikasian *overlap* menyebabkan pemasangan poros dilakukan di *endplate* turbine. Efek *flushing* juga masih dapat di lakukan pada turbin yang dilengkapi poros dengan menggunakan *slotted blades*. Konsep kerja *slotted blades* hampir sama dengan sama dengan *overlap*, dimana aliran free steam akan mendorong *negative vortex* yang terbentuk di belakang blade. Aplikasi *slotted blade* dapat meningkatkan koefisien daya hingga hampir 40% [16].

Sudu potongan parsial (*partial cut off blades*) dapat diaplikasikan untuk meningkatkan performa turbin [11]. Turbin *partial cut off blades* memiliki nilai koefisien daya and torsi yang lebih tinggi saat diaplikasikan pada Savonius dua sudu. Kondisi ini dibuktikan pada penelitian Penelitian Kassem & Çamur yang dilakukan dengan menggunakan simulasi numerik pada kecepatan angin 2-6 m/s. Penelitian ini dilakukan pada variasi savonius dengan dan tanpa *overlap* serta dengan dan tanpa *endplate*. Hasil penelitian menunjukan bahwa turbin savonius *partial cut off blade* yang dilengkapi dengan *overlap* menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan turbin angin Reguler. Performa turbin juga meningkat saat turbin savonius *partial cut off blades* di simulasikan dengan menggunakan *endplate*.

## METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental menggunakan turbin Savonius tipe *straight* dengan 3 sudu. Penelitian dilakukan pada turbin savonius satu tingkat (*single stage*) yang digerakkan oleh aliran udara eksternal. Udara digerakkan dengan menggunakan blower yang diatur pada kecepatan tertentu. Proses transmisi daya dilakukan dengan menghubungkan poros turbin ke generator yang dibebani lampu LED. Sudu turbin Reguler terbuat dari pipa PVC yang dipotong dua, sedangkan *endplate* di kedua ujungnya terbuat dari plat akrilik. Sudu turbin tipe *partial cut off blades* dibuat dari pipa PVC yang memiliki diameter lebih kecil dibandingkan sudu savonius Reguler. Ukuran diameter total sudu turbin Savonius tipe *partial cut off blades* yang digunakan pada penelitian sama dengan ukuran sudu turbin Savonius regular. Pada penelitian ini turbin yang digunakan tidak memiliki *overlap* setiap bagian tengah sudu turbin dihubungkan dengan sebuah poros. Namun bilah sudu pada turbin savonius *partial cut off blades* memiliki

celah sebesar 5 mm. Model turbin yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3. Dimensi yang digunakan untuk pembuatan turbin savonius tipe regular mengacu kepada penelitian Mahmoud et al[17].



Gambar 3. Bentuk turbin yang digunakan pada penelitian dengan tipe turbin savonius regular a) 3 sudu dalam bentuk potongan, b) tampak 3 dimensi, dan tipe turbin savonius *Partial Cut off blades* c) 3 sudu d) tampak 3 dimensi

Tabel 1. Dimensi turbin savonius

Bagian Turbin	Notasi	Ukuran	Satuan
Diameter Sudu	d	165	mm
Diameter poros	S	15	mm
Diameter Rotor	$D=2d+s$	345	mm
Diameter <i>Endplate</i>	$Do=1.1D$	379,5	mm
Ketebalan <i>Endplate</i>		3	mm
Jumlah <i>endplate</i>		2	
Aspect Ratio	D/H	1,04	
Tinggi	H	330	mm
Celah antara sudu parsial ( <i>Partial Cut off blades</i> )	$do = 0.1D$	3,45	mm

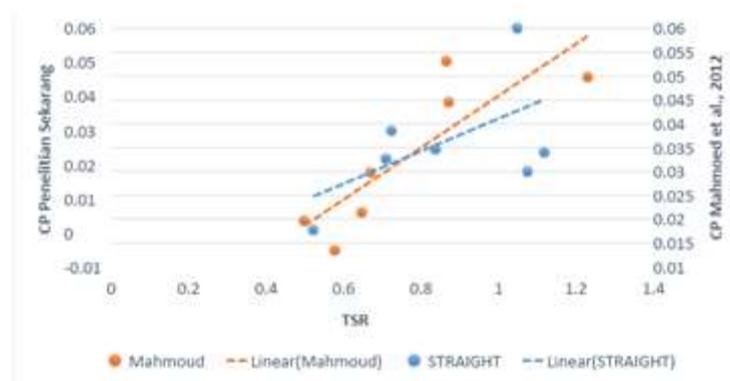
Setelah semua komponen terpasang dengan benar dan presisi, tahap selanjutnya adalah uji coba kinerja dari turbin angin tersebut. Benda uji diletakkan di atas permukaan tanah yang datar, kemudian alat bantu kipas

angin sebagai pengganti udara di lingkungan di letakkan searah terhadap benda uji dengan jarak 50 cm dengan kecepatan angin yang bervariasi antara 2 – 6 m/s. Setelah benda uji bekerja dengan optimal maka pengambilan data dapat dilakukan. setelah turbin berputar selama 3 menit. Hal ini dilakukan agar pengukuran tidak dilakukan setelah turbin melewati kondisi start dan berputar dengan stabil. Pengukuran kecepatan sudut turbin angin dilakukan dengan menggunakan tachometer yang dipasang pada rangka turbin. Pengukuran torsi turbin dilakukan dengan memasang nilon pada poros turbin, kemudian salah satu sisi benang digantung pada Timbangan Digital. Sisi lain dari nilon digantung dengan pemberat tambahan sampai turbin berhenti berputar. Massa beban balas dan timbangan digital dicatat untuk mendapatkan torsi turbin. Skema pengambilan data ini dilakukan pada penelitian sebelumnya pada turbin angin[14]. Untuk mendapatkan gaya turbin (F), dihitung torsi statik turbin angin Savonius, pada saat turbin berputar. Beban akan diberikan sampai turbin berhenti berputar. Hasil simulasi ini di validasi dengan menggunakan penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al[17].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Validasi Data

Penelitian ini dilakukan untuk membandingkan performa turbin savonius tipe *Partial Cut off blades* dibandingkan dengan turbin angin Reguler. Dimensi yang digunakan untuk pembuatan turbin savonius tipe regular mengacu kepada penelitian Mahmoud et al[17]. Penelitian dilakukan kecepatan angin 2-6 m/s yang dihembuskan oleh blower. Hasil simulasi ini di validasi dengan menggunakan penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al[17]. Gambar 4 merupakan grafik validasi antara hasil penelitian yang dilakukan oleh mahmoed dengan penelitian sekarang. Dari gambar 4 terlihat bahwa secara umum coefficient off power akan naik seiring dengan bertambahnya nilai Tip Speed ratio turbin. Penelitian yang dilakukan saat ini menghasilkan trendline yang serupa dengan hasil penelitian acuan.

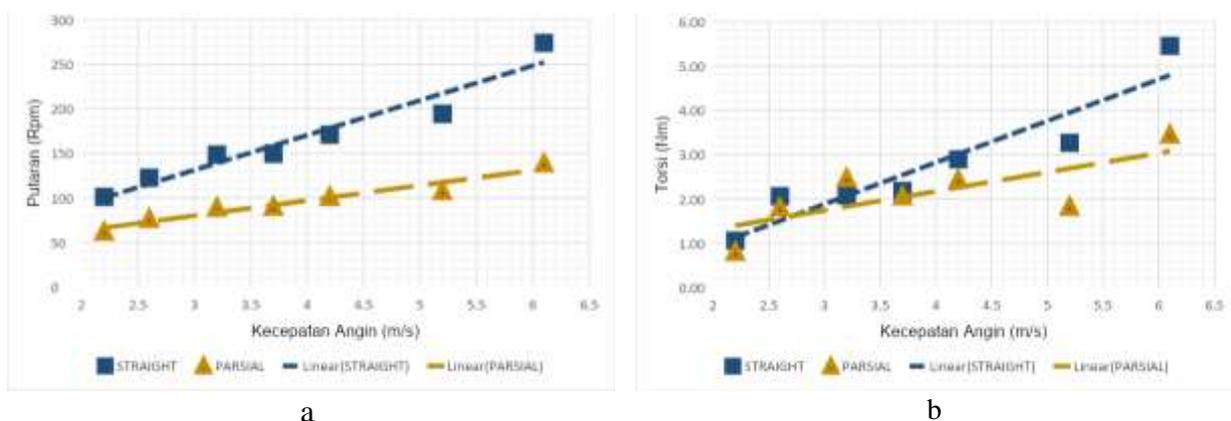


Gambar 4. Grafik validasi penelitian saat ini dengan penelitian acuan [17]

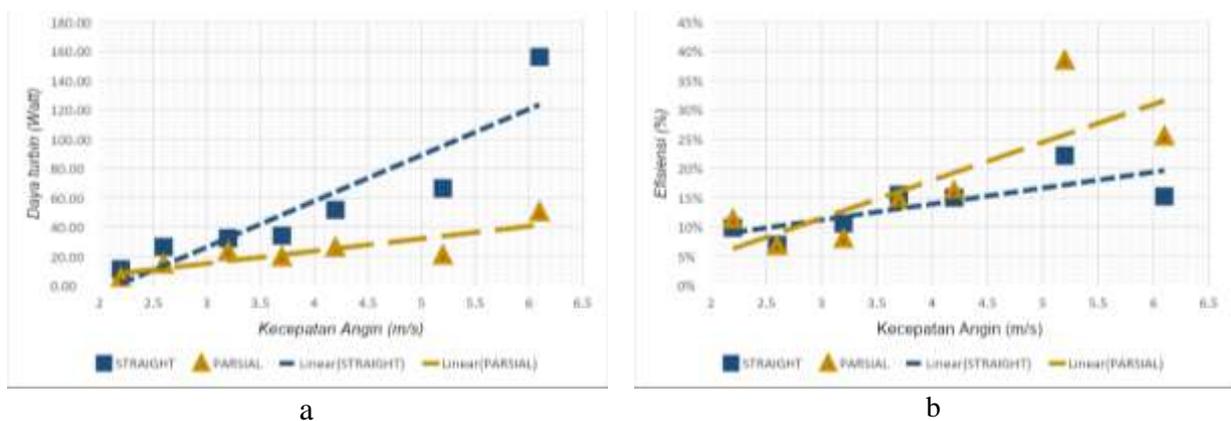
### Performa Turbin Savonius tipe *Partial Cut off blades* dan Reguler

Hasil penelitian menunjukkan perbedaan performa turbin savonius tipe *Partial Cut off blades* dibandingkan dengan turbin angin Reguler. Pada Gambar 5.a merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara putaran turbin angin savonius tipe *straight* dengan turbin angin savonius potongan parsial. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin dapat meningkatkan rpm. Rpm merupakan unit untuk frekuensi, rpm di gunakan untuk menentukan kecepatan revolusi (kecepatan). Dalam penelitian ini kecepatan putar dapat dilihat dengan alat Tachometer. Semakin tinggi kecepatan angin, menyebabkan gaya dorong pada sudu savonius meningkat. Sehingga semakin tinggi kecepatan angin maka semakin tinggi pula putaran yang di peroleh saat pengukuran. Gambar 5.b merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara kecepatan dengan torsi turbin. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin dapat meningkatkan torsi yang di hasilkan oleh turbin. Torsi merupakan gaya yang bekerja pada rigid body dengan arah tegak lurus pada jarak tertentu dari pusat massa. Dalam penelitian ini torsi di hitung dengan cara pengujian dengan menggukan tali nilon yang di lilitkan ke poros, kemudian tali tersebut di beri beban (massa) sampai sudu berhenti, setelah berhenti timbangan digital akan

menunjukkan angka. Semakin tinggi semakin tinggi kecepatan angin, menyebabkan gaya dorong pada sudu savonius meningkat. Sehingga semakin tinggi kecepatan angin maka semakin tinggi pula torsi yang di dapat. Pengaplikasian sudu turbin dengan model *partial cut off blades* kurang efektif jika diaplikasikan di turbin savonius. Hal ini dikarenakan sudu *partial cut off blades* memiliki jarak diantara potongannya. Jarak antara potongan sudu yang terlalu lebar menyebabkan fluida mengalir terlalu cepat diantar potongan sudu. Energi yang dibawa oleh angin tidak dapat digunakan untuk mendorong sudu secara optimum. Kondisi ini menyebabkan penurunan gaya dorong fluida *freestream* yang mengalir dibagian *downstream*. Untuk meningkatkan aplikasi *partial cut off blades* kedepannya dapat dilakukan dengan memperkecil jarak antara potongan sudu. Grafik 5 menunjukkan hubungan antara kecepatan putar dan torsi turbin terhadap perubahan kecepatan aliran angin. Torsi yang dihasilkan oleh turbin memiliki trendline garis lurus. Hal ini dikarenakan torsi turbin berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angular dan pembebanan statis pada turbin.



Gambar 5. Grafik a) kecepatan putar, b) torsi turbin sebagai fungsi kecepatan angin



Gambar 6. Grafik a) Daya Mekanik, b) efisiensi turbin sebagai fungsi kecepatan angin

Untuk membandingkan performa turbin savonius tipe *partial cut off blades* dan regular pada berbagai kecepatan angina, Hasil penelitian ditunjukkan melalui daya dan efisien terhadap perubahan kecepatan aliran angin. Gambar 6.a merupakan grafik yang membandingkan hubungan antara kecepatan angin dengan daya turbin. Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin maka daya yang di hasilkan akan semakin naik. Pada turbin angina savonius tipe straight memiliki daya yang lebih besar di bandingkan dengan turbin angin savonius potongan parsial. Daya turbin berhubungan dengan nilai torsi, jika torsi yang di dihasilkan kecil maka nilai daya akan kecil dan begitu pula sebaliknya. Gambar 6.b merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara efisiensi angin dengan kecepatan angin Grafik tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin efisiensi semakin tinggi. Semakin tinggi kecepatan angin,

menyebabkan gaya dorong pada sudu savonius meningkat. Sehingga semakin tinggi kecepatan angin maka semakin tinggi efisiensi yang di dapat.

## KESIMPULAN

Pengaplikasian sudu turbin dengan model *Partial Cut off blades* kurang efektif jika diaplikasikan di turbin savonius. Hal ini dikarenakan sudu *Partial Cut off blades* memiliki jarak diantara potongannya. Kondisi ini menyebabkan fluida *freestream* yang mengalir dibagian *downstream* tidak mendorong bilah turbin secara maksimal. Untuk meningkatkan aplikasi *Partial Cut off blades* kedepannya dapat dilakukan dengan memperkecil jarak antara potongan sudu.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penyusunan penelitian ini tidak lepas dari dukungan ITATS yang telah memfasilitasi proses penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Lillahulhaq and V. S. Djanali, "Numerical Study of Savonius Wind Turbine with Fluid-Rotor Interactions," *IPTEK J. Proc. Ser.*, vol. 0, no. 1, p. 48, Apr. 2019, doi: 10.12962/j23546026.y2019i1.5106.
- [2] M. B. Salleh, N. M. Kamaruddin, Z. Mohamed-Kassim, and E. A. Bakar, "Experimental investigation on the characterization of self-starting capability of a 3-bladed Savonius hydrokinetic turbine using deflector plates," *Ocean Eng.*, vol. 228, p. 108950, May 2021, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.108950.
- [3] M. Zahariiev, T. Asim, R. Mishra, and B. Nsom, "Effects of blade tapering on the performance of vertical axis wind turbines analysed through advanced visualization techniques," *Int. J. COMADEM*, vol. 22, no. 2, Aug. 2019, Accessed: Apr. 29, 2021. [Online]. Available: <https://apscience.org/comadem/index.php/comadem/article/view/146>.
- [4] Z. Lillahulhaq and V. S. Djanali, "Unsteady simulations of Savonius and Icewind turbine blade design using fluid-structure interaction method," 2019, doi: 10.1063/1.5138264.
- [5] M. Goodarzi and S. Salimi, "Numerical assessment of the effect of different end-plates on the performance of a finite-height Savonius turbine," <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1976324>, 2021, doi: 10.1080/15567036.2021.1976324.
- [6] S. Roy, R. Das, and U. K. Saha, "An inverse method for optimization of geometric parameters of a Savonius-style wind turbine," *Energy Convers. Manag.*, vol. 155, pp. 116–127, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.088.
- [7] S. A. Payambarpour, A. F. Najafi, and F. Magagnato, "Investigation of deflector geometry and turbine aspect ratio effect on 3D modified in-pipe hydro Savonius turbine: Parametric study," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 44–59, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.12.002.
- [8] A. Roshan, A. Sagharichi, and M. J. Maghrebi, "Nondimensional parameters' effects on hybrid darrieus-savonius wind turbine performance," *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 142, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1115/1.4044517/958342.
- [9] M. Hadi Ali, "Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed," *Int. J. Mod. Eng. Res. www.ijmer.com*, vol. 3, no. 5, pp. 2978–2986, 2013.
- [10] L. B. Kothe, S. V. Möller, and A. P. Petry, "Numerical and experimental study of a helical Savonius wind turbine and a comparison with a two-stage Savonius turbine," *Renew. Energy*, vol. 148, pp. 627–638, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.10.151.
- [11] Y. Kassem and H. Çamur, "A Numerical Study of a Newly Developed of Savonius Wind Turbine Style on Increasing the Performance of Savonius Wind Rotor," *Am. J. Mod. Energy*, vol. 3, no. 6, pp. 115–120, 2017, doi: 10.11648/j.ajme.20170306.11.
- [12] M. Ebrahimpour, R. Shafaghat, R. Alamian, and M. S. Shadloo, "Numerical Investigation of the Savonius Vertical Axis Wind Turbine and Evaluation of the Effect of the *Overlap* Parameter in Both Horizontal and Vertical Directions on Its Performance," *Symmetry 2019, Vol. 11, Page 821*, vol. 11, no. 6, p. 821, Jun. 2019, doi: 10.3390/SYM11060821.

- [13] J. V. Akwa, G. Alves Da Silva Júnior, and A. P. Petry, "Discussion on the verification of the *overlap* ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics," *Renew. Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 141–149, Feb. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.07.013.
- [14] Z. Lillahulhaq, A. Muchyiddin, R. W. Suhadak, I. Amirullah, F. D. Sandy, and A. C. Embot, "Experimental Study Wind Turbine Performance of Straight-Savonius and Ice-Wind Type on the Similar proportion Aspect Ratio," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2117, no. 1, p. 012008, Nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2117/1/012008.
- [15] B. K. Debnath, A. Biswas, and R. Gupta, "Computational fluid dynamics analysis of a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus rotor at various *overlap* conditions," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 1, no. 3, p. 033110, Jun. 2009, doi: 10.1063/1.3152431.
- [16] D. D. D. P. Tjahjana, Z. Arifin, S. Suyitno, W. E. Juwana, A. R. Prabowo, and C. Harsito, "Experimental study of the effect of slotted blades on the Savonius wind turbine performance," *Theor. Appl. Mech. Lett.*, vol. 11, no. 3, p. 100249, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.TAML.2021.100249.
- [17] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, and M. H. Nasef, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance," *Alexandria Eng. J.*, vol. 51, no. 1, pp. 19–25, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.aej.2012.07.003.