Pengaruh Jarak Celah Sudu Pada Modifikasi Blade Savonius Potongan Parsial Terhadap Performa Turbin VAWT

Donny Albari[1], Roni Akustik Kurniawan[2], Zain Lillahulhaq[3], Nasyith Hananur Rohiem[4] dan Novian Patria Uman Putra[5]

Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya[1,2,3,4,5]

e-mail: zain@itats.ac.id[*]

ABSTRACT

The Savonius wind turbine is a VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) type wind turbine that rotates due to the drag force of the wind flow. This turbine which has a simple design and is made of 2 circular cylinders mounted in opposite directions. Several steps have been taken to improve turbine efficiency, including adjusting the aspect ratio, using endplates, adjusting the number of blades and modifying the blade design. Modifications that are often used in the development of the Savonius turbine aim to cause a flushing effect on the negative wake formed at the back of the turbine blade. Flusing effect can be caused by utilizing overlap, slotted blade and vent on the Savonius turbine. This research was conducted to determine the performance of the Savonius turbine with a partial cut. Turbine performance that is used as a benchmark in this study is the angular speed of the turbine and the power produced by the turbine. The results showed that the gap made between the partial blade pieces caused an over-flushing effect on the blade. The fluid flow with high momentum is wasted due to the emergence of a wide gap between the partial blade pieces. The over-flusing effect can be reduced by reducing the gap between the partial blade pieces.

Kata kunci: *Partial Cut-off blades, Over-Flushing, Savonius VAWT*

ABSTRAK

Turbin angin Savonius merupakan turbin angin Jenis VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) yang berputar akibat gaya drag dari aliran angin. Turbin ini yang memiliki desain sederhana dan terbuat dari 2 silinder sirkular yang dipasang berlawanan arah. Beberapa Langkah telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi turbin diantaranya dengan mengatur aspect ratio, penggunaan endplate, mengatur jumlah sudu hingga modifikasi desain sudu. Modifikasi yang sering digunakan dalam pengembangan turbin savonius bertujuan untuk menimbulkan efek flushing pada negative wake yang terbentuk dibagian belakang sudu turbin. Efek flusing dapat ditimbulkan dengan pemanfaatan overlap, slotted blade dan vent pada turbin Savonius. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa turbin Savonius dengan potongan parsial. Performa turbin yang di jadikan tolak ukur dalam penelitian ini adalah kecepatan angular turbin dan daya yang dihasilkan oleh turbin. Hasil penelitian menunjukan bahwa celah yang dibuat diantara potongan sudu parsial menyebabkan munculnya efek flushing yang berlebih (over-flushing) pada sudu. Aliran fluida dengan momentum tinggi terbuang akibat munculnya gap yang lebar diantara potongan sudu parsial. Pengurangan efek over flusing dapat dilakukan dengan mengurangi jarak gap antara potongan sudu parsial.

Kata kunci: Sudu Potongan Parsial, Over-Flushing, Savonius VAWT

PENDAHULUAN

Sistem konversi energi alternatif menjadi memiliki peran penting untuk mengurangi ketergantungan masyarakat terhadap bahan bakar fosil. Energi alternatif yang diaplikasikan di masyarakat diantaranya adalah energi surya, biofuel, air dan angin. Pemanfaatan energi surya menjadi energi listrik diaplikasikan dengan skala kecil misalnya sebagai alat penerangan jalan[1]. Pemanfaatan energi surya secara massif di Indonesia saat ini masih tehalang oleh besar investasi awal yang harus dikeluarkan[2]. Pengembangan biofuel dari minyak nabati menjadi alternatif bahan bakar kendaaraan bermotor[3]. Namun pemanfaatan biofuel mesih menghasilkan sisa jejak carbon yang masih tinggi[4]. Energi hydrokinentik air dan angin lebih banyak diminati masyrakat untuk diaplikasikan dilingkungan karena dianggap lebih praktis dan memerlukan investasi lebih rendah[5], [6]. Pemanfaatan energi angin di Indonesia saat ini masih lebih rendah dibandingkan

dengan hydrokinentik[7]. Hal ini dikarenakan rata-rata wilayah Indonesia memiliki kecepatan angin rendah sekitar 3-7 m/s[8].

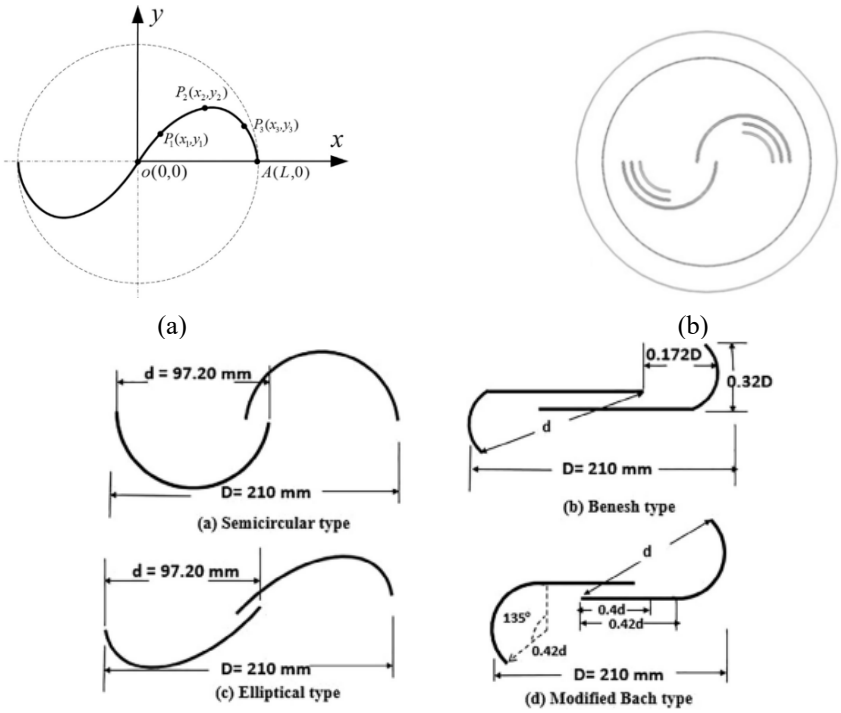
Turbin angin Savonius merupakan turbin angin Jenis VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) yang berputar akibat gaya drag dari aliran angin. Turbin ini yang memiliki desain sederhana dan terbuat dari 2 silinder sirkular yang dipasang berlawanan arah[9]. Turbin savonius cocok diaplikasikan pada daerah dengan kecepatan angin rendah. Namun turbin angin savonius menghasilkan efisiensi dan daya yang cukup rendah bila dibandingkan dengan Turbin tipe HAWT[10]. Beberapa Langkah telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi turbin diantaranya dengan mengatur aspect ratio[11], penggunaan endplate[12], mengatur jumlah barel sudu yang digunakan [13] hingga mengembangkan geometri desain sudu[14]. Peningkatan performa turbin juga dapat dilakukan dengan menambahkan airfoil[15] atau kombinasi dengan turbin darieuss tipe eggbeater[16]. Kombinasi antara turbin savonius dengan airfoil dan turbin darieuss tipe *eggbeater* dapat meningkatkan gaya lift turbin. Peningkatan luas penampang sudu turbin dapat menyebabkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (COP) turbin. Luas penampang turbin ditentuhan oleh diameter blade dan tinggi turbin yang disebut dengan *Aspect Ratio* (AR). Peningkatan luas penampang harus memperhatikan Struktur penyangga turbin. Turbin dengan Aspect Ratio (H/D) < 1 membutuhkan ruang yang lebih lebar untuk berputar. Namun turbin dengan turbin dengan AR <1 menghasilkan daya yang lebih tinggi pada kecepatan angin rendah[11][17]. Sedangkan turbin dengan H/D > 1 menyebabkan getaran tinggi saat berputar pafda kecepatan tinggi. Turbin dengan H/D > 1 memerlukan struktur penyangga yang kuat[18]. Penentuan Aspect ratio sangat penting untuk mendapatkan daya optimum turbin tanpa menimbulkan getaran pada struktur penyangga. Peningkatan luas permukaan turbin tanpa mengubah Aspect ratio dapat dilakukan dengan menggunakan model sudu potongan parsial.

Turbin potongan parsial memiliki lengkungan diantara sambungannya dan dapat merubah streamline aliran fluida. Bentuk streamline aliran menyebabkan perubahan ukuran negative vortex yang muncul dibelakang turbin. Ukuran negative vortex dapat direduksi dengan mengaplikasikan celah diantara sudu turbin. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh performa turbin Savonius dengan model sudu potongan parsial. Bagian potongan sudu parsial diberikan jarak untuk memberikan efek flushing pada turbin. Jarak diantara sudu turbin serupa dengan simple vents. Dengan demikian diharapkan turbin potongan parsial ini memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan sudu turbin Savonius regular. Performa turbin yang di jadikan tolak ukur dalam penelitian ini adalah kecepatan angular turbin dan daya yang dihasilkan oleh turbin.

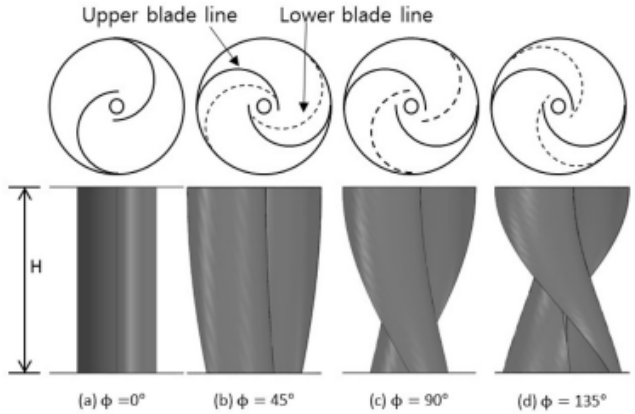
TINJAUAN PUSTAKA

Turbin angin savonius berputar akibat dorongan dari aliran udara freestream. Sisi sudu yang terdorong oleh aliran freestream disebut dengan advancing blade. Sedangkan sisi blade yang berlawanan arah disebut dengan *returning blade*[19]. Dibagian belakang sudu akan muncul recirculation vortex yang menghambat putaran turbin. Penurunan torsi turbin juga terjadi akibat returning turbin terdorong berlawanan arah dengan putaran turbin. Kondisi ini disebut dengan negative torque[20]. Peningkatan kecepatan putaran turbin dapat dilakukan dengan memperkecil ukuran vortex yang terbentuk dibagian belakang turbin. Salah satu Langkah yang digunakan untuk mengurangi ukuran negative vortex dibagian belakang turbin adalah dengan mengaplikasikan overlap di antara sudu turbin. Overlap merupakan celah yang dipasang pada bagian tengah turbin untuk memberikan jarak antara blade[21]. Pemasangan overlap bertujuan untuk menimbulkan efek flushing dimana aliran fluida freestream yang melewati celah memiliki momentum yang tinggi untuk mengurangi ukuran wake yang muncul dibelakang tubin[10]. Pengurangan negative vortex pada savonius wind turbine juga dapat dilakukan dengan memasang deflector dibagian upstream turbin[22] atau dengan melakukan modifikasi bentuk sudu turbin. Modifikasi bentuk turbin dapat dilakukan dengan mengaplikasikan model *twisted blade*[23], tapering[24], atau menggunakan sudu dengan bentuk elliptical[25][26]. Modifikasi bentuk sudu sulit diaplikasikan dilingkungan

masyarakat. Perubahan sudut kelengkungan sudu turbin dapat menyebabkan perubahan streamline aliran yang melintasi turbin[27]. Selain mengubah kelengkungan sudu, Modifikasi sudu turbin juga dapat dilakukan dengan menggunakan multiple quarter semi circular blade. Pada model sudu tersebut ditambahkan potongan sudu dengan ukuran yang lebih kecil untuk memperlebar luas permukaan yang berinteraksi dengan aliran udara[28]. Namun penambahan potongan sudu pada turbin savonius tidak dapat meningkatkan performa turbin secara signifikan. Peningkatan Coefficient of Power yang dihasilkan oleh quarter semi circular kurang dari 12 %.

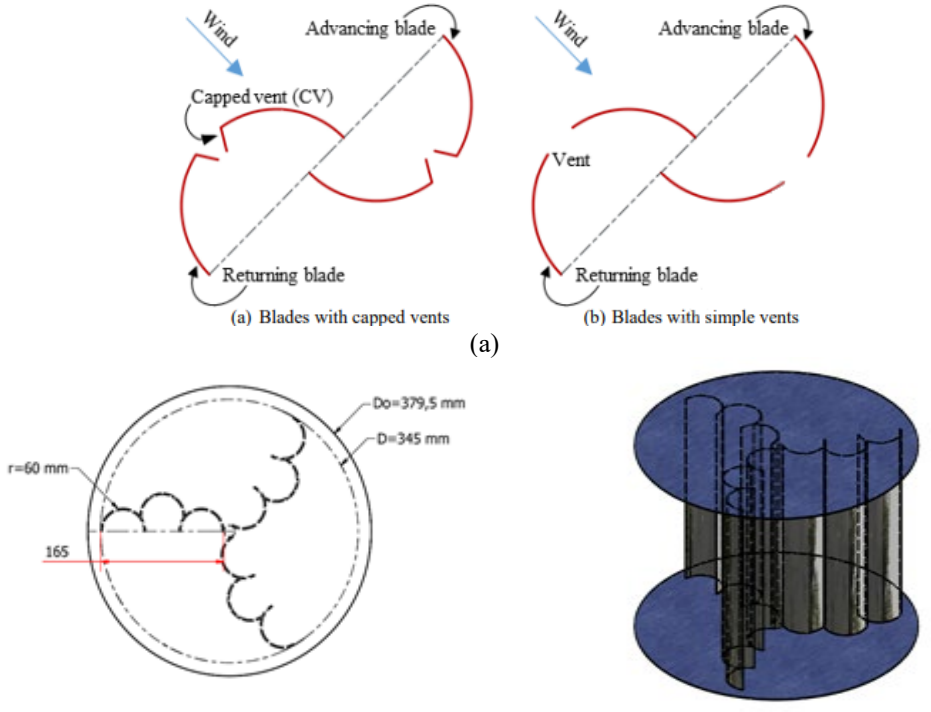


Gambar 1. (a) Bentuk Sudu Eliptical [25] (b) bentuk sudu multiple Quarter semi-circular [28] (c) Bentuk sudu dengan tambahan overlap [26]



Gambar 2. Bentuk Sudu Savonius twisted [23]

Modifikasi yang sering digunakan dalam pengembangan turbin savonius bertujuan untuk menimbulkan efek flushing pada negative wake yang terbentuk dibagian belakang sudu turbin. Aliran fluida dengan momentum tinggi memperkecil ukuran wake yang timbul dibelakang sudu. Fluida tersebut dapat mengalir mealalui celah overlap yang terdapat diantara sudu turbin [29]. Selain itu aliran fluida freestream dengan momentum tinggi juga dapat menyebabkan efek flushing saat melalui turbin dengan model *Icewind*[30][31] dan tapering blades[24]. Kemunculan celah diantara sudu turbin mampu menekan ukuran negative vortex yang muncul di belakang turbin savonius. Selain dengan menggunakan overlap dibagian antar sudu turbin, efek flushing juga dapat muncul pada blade yang memiliki lubang atau celah. Lubang yang desain diantara blade disebut dengan slotted blade[32] atau vent[33]. Slotted blade memiliki ukuran yang lebih kecil bila dibandingkan dengan vent. Celah Vent pada blade memiliki pengarah dan Panjangnya sama dengan tinggi sudu. Slotted atau vent pada blade harus memiliki ukuran yang optimum untuk menjaga luas permukaan turbin yang berinteraksi dengan fluida. Semakin lebar celah yang terdapat di sudu menyebabkan pengurangan luas permukaan pada turbin. Kondisi ini menyebabkan nilai Coefficient of Power (COP) tubin menurun. Untuk memperluas sebaran fluida pada permukaan blades turbin, maka dapat dilakukan dengan menggunakan model sudu potongan partial[34]. Namun turbin potongan parsial memiliki lengkungan diantara sambungannya dan dapat merubah streamline aliran fluida. Perubahan Stream line aliran dapat menyebabkan perubahan gaya drag dan lift pada turbin.



Gambar 3. (a) Bentuk sudu Savonius dengan Vent [35] (b) bentuk sudu Savonius dengan tipe parsial tampak atas dan (c) Tampak samping [12]

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa turbin Savonius dengan potongan parsial. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui daya dan kecepatan putar turbin. Turbin savonius

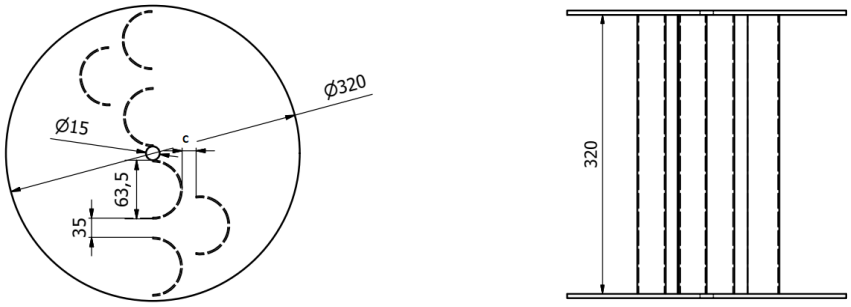
yang diteliti merupakan turbin tipe straight dengan dua buah sudu semi-circular. Sudu turbin terbuat dari pipa PVC yang dipotong dan dihaluskan ujung-ujungnya melalui proses pengaplasan. Dimesi turbin yang digunakan mengacu pada penelitian eksperimen turbin savonius terdahulu[36]. Turbin savonius ini memiliki Aspect ratio (AR) = 1.58 dengan tinggi rotor 320 mm. Turbin Savonius yang digunakan dalam pengujian memiliki poros 15 mm. Sudu turbin regular memiliku diameter (d) = 155 mm dan diameter rotor 170 mm. Kedua ujung turbin dilengkapi dengan endplate ukuran D_0/D = 1.1 yang terbuat dari Acrylics. Diantara sudu parsial terdapat celah yang dapat dilintasi oleh udara. Pada penelitian sebelumnya [12] lebar celah diantara potongan sudu parsial bernilai 0.1 D = 34.5 mm. Pada penelitian ini lebar celah tersebut divariasikan sesuai dengan ukuran yang ditunjukan pada table 1. Dimensi dan bentuk potongan sudu di tunjukkan pada gambar 3. Proses pengambilan data dilakukan dengan blower di ruang tertutup tanpa menggunakan wind tunnel.

Tabel 1. Variasi Jarak Gap antara potongan parsial sudu

Variasi Turbin	Jarak Gap antara celah sudu parsial (c)
Penelitian sebelumnya[12]	34,5 mm
A	5 mm
B	10 mm
C	15 mm

Performa turbin yang diambil pada penelitian ini meliputi daya dan kecepatan putar turbin. Data yang performa yang dibandingkan merupakan data langsung yang diambil dengan menggunakan alat ukur. Kecepatan angular turbin diukur dengan menggunakan Tachometer digital. Daya output turbin yang di hitung dalam penelitian ini merupakan daya listrik dan daya mekanis turbin. Daya listrik merupakan yang dihasilkan oleh generator yang di hubungkan dengan poros turbin. Daya listrik diperoleh dari pengukuran arus dan tegangan yang dihasilkan generator, ditunjukan pada pers 1. Daya mekanis turbin merupakan daya yang melaui perkalian antara torsi dan kecepatan putaran turbin, pers 2. Torsi yang dihasilkan oleh turbin merupakan hasil pembebanan turbin hingga mencapai kondisi statis. Skema pengambilan data torsi yang digunakan ditunjukkan pada penelitian sebelumnya[11]. Performa turbin yang di jadikan tolak ukur dalam penelitian ini adalah kecepatan angular turbin dan daya yang dihasilkan oleh turbin.

$$P_{listrik} = VI \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \ldots(1)$$
$$P_{meknis} = \sigma.\omega \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

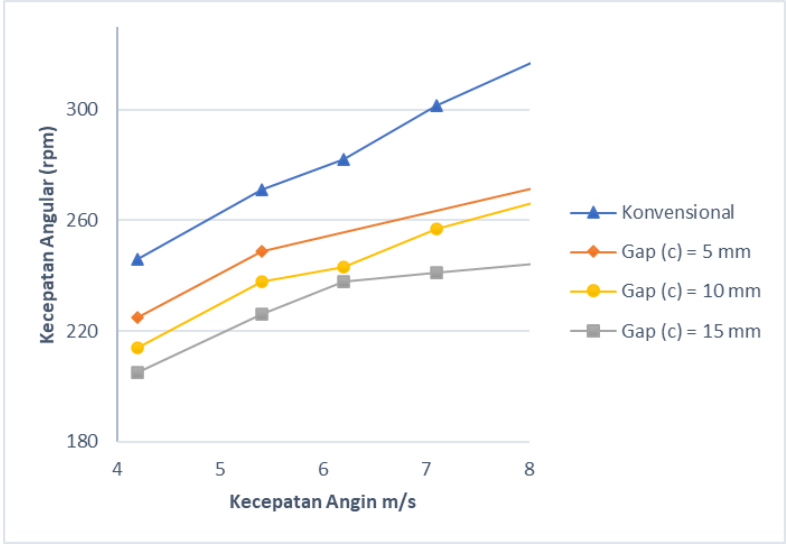


(a) (b)

Gambar 4. Bentuk dan dimensi sudu tampak (a) atas (b) tampak samping

HASIL DAN PEMBAHASAN

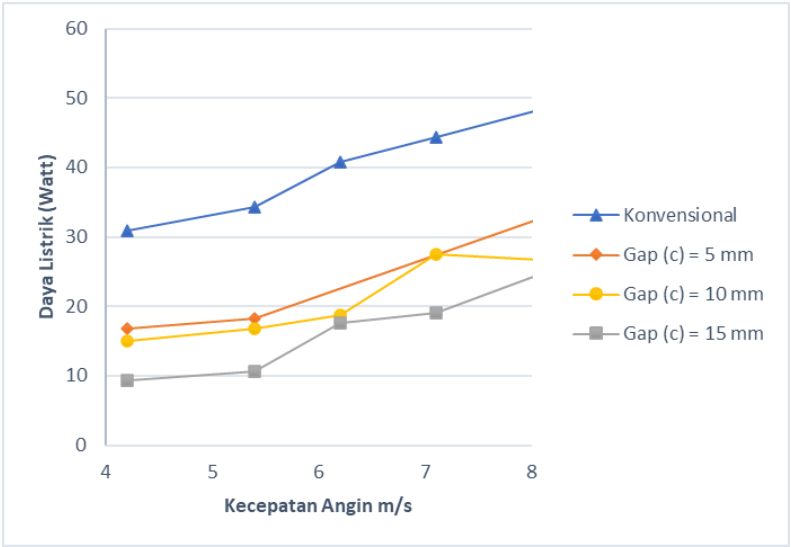
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa turbin savonius dengan model sudu parsial dibandingkan dengan turbin savonius tipe konvensional. Penelitian dilakukan pada turbin savonius tipe straight dengan 2 sudu. Perubahan performa turbin savonius terjadi akibat perubahan kecepatan aliran *freestream* angin yang meniltasi turbin. Semakin tinggi kecepatan aliran angin yang melintasi turbin, menyebabkan peningkatan kecepatan putar turbin. Kondisi ini ditunjukan pada gambar 5. Kecepatan aliran fluida yang di gunakan pada penelitian ini bekisar antara 4 – 8 m/s.



Gambar 5. Grafik Perubahan Kecepatan Angular turbin Savonius terhadap kecepatan angin

Kecepatan angin yang tinggi memiliki potensi energi kinentik yang cukup besar. Aliran fluida mendorong sudu turbin dan menghasilkan torsi pada turbin. Semakin tinggi kecepatan angin menyebabkan putaran turbin bertambah. Kondisi seperti ini menunjukkan bahwa turbin angin savonius lebih cocok di kembangkan di Indonesia. Gambar 5 menunjukan bahwa turbin angin savonius konvensional dengan tipe straight menghasilkan kecepatan putar turbin yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin savonius yang sudunya di modifikasi dengan tipe parsial. Semakin besar celah (gap) antar sudu menyebabkan penurunan putaran kecepatan turbin. Semakin besar gap

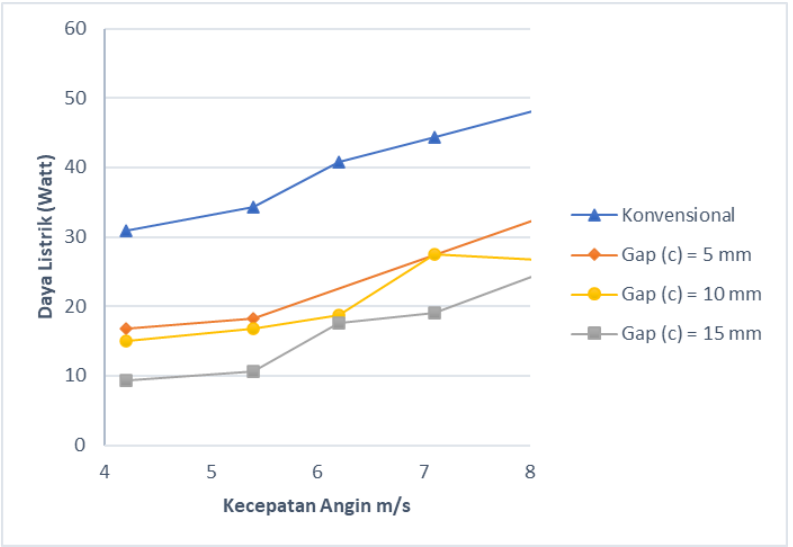
antar potongan menyebabkan aliran fluida hanya melintas saja diantara sudu. Akibatnya momentum yang ada dalam aliran fluida terbuang percuma.



Gambar 6. Grafik Perubahan Daya mekanis turbin Savonius terhadap kecepatan angin

Selain melalui kecepatan putar turbin, performa turbin Savonius juga ditunjukkan melalui daya yang dihasilkan oleh putaran rotor turbin. Turbin yang memutar poros dan mentransmisikan daya turbin menuju generator. Gambar 6 menunjukan hubungan antara daya turbin terhadap perubahan kecepatan angin. Turbin savonius konvensional dengan model sudu lurus menghasilkan peningkatan Daya mekanis turbin yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin savonius modifikasi potongan turbin parsial. Celah antara potongan sudu parsial menyebabkan efek flushing yang berlebih pada turbin. Aliran fluida dengan momentum tinggi terbuang akibat munculnya gap yang terlalu lebar diantara potongan sudu parsial. Semakin lebar gap antara sudu turbin menyebabkan penurunan interaksi antara aliran fluida pada permukaan turbin. Kondisi ini ditunjukan pada gambar 6, dimana semakin lebar gap potongan sudu parsial menyebabkan penuruan daya mekanis turbin.

Daya yang dikeluarkan yang dimanfaatkan dari hasil konversi energi kenentik turbin Savonius merupakan daya listrik. Turbin yang berputar dihubungkan dengan generator sehingga menghasilkan listrik. Daya listrik yang dihasilkan oleh turbin di ukur melalui perubahan Voltase dan arus. Gambar 7 menunjukan hubungan antara perubahan daya listrik turbin terhadap peningkatan kecepatan aliran fluida freestream. Hasil penelitian menunjukan bahwa turbin savonius dengan tipe straight konvensional menghasilkan energi listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin savonius modifikasi potongan parsial. Kondisi ini disebabkan akibat terjadi penurunan torsi pada turbin savonius modifikasi. Celah antara gab potongan parsial yang semakin lebar menyebabkan munculnya kondisi over-flusing dimana aliran fluida melintas saja diantar potongan parsial turbin. Kondisi over-flusing perlu di hindari agar energi aliran angin dapat dimanfaatkan dengan maksimum. Pengurangan efek over flusing dapat dilakukan dengan mengurangi jarak gap antara potongan sudu parsial. Untuk mendapatkan hasil yang lebih valid dan mengurangi biaya pengambilan data kedepannya penelitian ini dapat dilakukan dengan meggunakan metode simulasi numerik. Metode simulasi numerik saat ini banyak dilakukan untuk mengoptimalkan waktu pengambilan data dan biaya[37]. Selain itu malalui model simulasi, factor ekstenal seperti kekasaran permukaan dan kesalahan pemotongan sudu dapat diabaikan.



Gambar 7. Grafik Perubahan Daya listrik turbin Savonius terhadap kecepatan angin

KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa turbin savonius bentuk profil sudu parsial. Hasil penelitian menunjukan bahwa modifikasi turbin potongan parsial dengan gab lebar menyebabkan efek over flusing. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan performa turbin yang ditandai dengan penurunan kecepatan putar dan daya turbin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Proses penelitian ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Oleh karenanya, kami ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada YPTS ITATS yang telah memfasilitasi proses penelitian dan pengambilan data.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Ulum *et al.*, "PENGABDIAN MASYARAKAT PENYULUHAN PERAKITAN LAMPU PENERANGAN BERTENAGA SURYA KEPADA MASYARAKAT NAMBANGAN," *J. Sci. Soc. Dev.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, Sep. 2020, Accessed: Oct. 24, 2020. [Online]. Available: https://journal.unusida.ac.id/index.php/jssd/article/view/285.

[2] J. M. Kadang and J. Windarta, "Optimasi Sosial-Ekonomi pada Pemanfaatan PLTS PV untuk Energi Berkelanjutan di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 2, pp. 74–83, Jul. 2021, doi: 10.14710/JEBT.2021.11113.

[3] Y. Wulandari Mirzayanti *et al.*, "Pemanfaatan Tempurung Kelapa sebagai Katalis pada Proses Konversi Minyak Curah Menjadi Biodiesel," *J. Res. Technol.*, vol. VI, no. 2, pp. 173–183, Dec. 2020, Accessed: Jan. 02, 2021. [Online]. Available: https://journal.unusida.ac.id/index.php/jrt/article/view/351.

[4] D. Yao *et al.*, "Carbon footprint and water footprint analysis of generating synthetic natural gas from biomass," *Renew. Energy*, vol. 186, pp. 780–789, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2022.01.014.

[5] C. Arnold, "Manta Ray: A Hydrokinetic and Solar Power Generator for the Desalination and Purification of Freshwater and Saltwater for Disaster Relief Hydro Relief," *Student Res. Symp.*, Nov. 2021, Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available:

https://commons.erau.edu/db-srs/2021/poster-session-two/24.

[6] M. M. Frysztacki, J. Hörsch, V. Hagenmeyer, and T. Brown, "The strong effect of network resolution on electricity system models with high shares of wind and solar," *Appl. Energy*, vol. 291, p. 116726, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.116726.

[7] J. Langer, J. Quist, K. Blok, S. Ulgiati, H. Schnitzer, and R. Santagata, "Review of Renewable Energy Potentials in Indonesia and Their Contribution to a 100% Renewable Electricity System," *Energies 2021, Vol. 14, Page 7033*, vol. 14, no. 21, p. 7033, Oct. 2021, doi: 10.3390/EN14217033.

[8] S. F. Pamungkas, D. S. Wijayanto, H. Saputro, and I. Widiastuti, "Performance 'S' Type Savonius Wind Turbine with Variation of Fin Addition on Blade," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 288, no. 1, p. 012132, Jan. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/288/1/012132.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Z. Lillahulhaq and I. Masfufiah, "Studi eksperimen pengaruh penggunaan endplate berlubang pada turbin savonius an experimental study of circular cut off endplate effect on the savonius turbine," vol. 7, no. 1, pp. 63–72, 2022, doi: 10.20527/sjmekinematika.v7i.

[12] R. W. Suhadak *et al.*, "Studi Eksperimen Pengaruh Penggunaan Partial Cut off blades pada Tubin Angin Tipe Savonius," *Pros. SENASTITAN Semin. Nas. Teknol. Ind. Berkelanjutan*, vol. 2, no. 0, pp. 401–408, Mar. 2022, Accessed: Sep. 15, 2022. [Online]. Available: http://ejournal.itats.ac.id/senastitan/article/view/2698.

[13] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, "An Experimental Study on the Performance of Savonius Wind Turbines Related With The Number Of Blades," *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 297–304, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.03.259.

[14] A. Al Noman, Z. Tasneem, M. F. Sahed, S. M. Muyeen, S. K. Das, and F. Alam, "Towards next generation Savonius wind turbine: Artificial intelligence in blade design trends and framework," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 168, p. 112531, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112531.

[15] A. M. Abdelsalam, M. A. Kotb, K. Yousef, and I. M. Sakr, "Performance study on a modified hybrid wind turbine with twisted Savonius blades," *Energy Convers. Manag.*, vol. 241, p. 114317, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114317.

[16] A. S. Siddiqui, S. N. Mian, M. Alam, M. S. Ul Haq, A. H. Memon, and M. S. Jamil, "Experimental Study to Assess the Performance of Combined Savonius Darrieus Vertical Axis Wind Turbine at Different Arrangements," *Proc. 21st Int. Multi Top. Conf. INMIC 2018*, Dec. 2018, doi: 10.1109/INMIC.2018.8595538.

[17] K. Sobczak, "Numerical investigations of an influence of the aspect ratio on the Savonius rotor performance," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1101, no. 1, p. 012034, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1101/1/012034.

[18] J. V. Akwa, H. A. Vielmo, and A. P. Petry, "A review on the performance of Savonius wind turbines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3054–3064, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2012.02.056.

[19] P. A. Setiawan, T. Yuwono, and W. A. Widodo, "Effect of a circular cylinder in front of advancing blade on the savonius water turbine by using transient simulation," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 151–159, 2019.

[20] K. Takamure, H. Wang, T. Uchiyama, S. Iio, and T. Ikeda, "Vortex-in-cell simulation of the flow and performance of a Savonius hydraulic turbine with S-shaped blades," *J.*

Renew. Sustain. Energy, vol. 13, no. 4, p. 044501, Jul. 2021, doi: 10.1063/5.0051203.

[21] K. A. H. Al-Gburi, F. B. I. Alnaimi, B. A. Al-quraishi, E. Sann Tan, and M. M. Maseer, "A comparative study review: The performance of Savonius-type rotors," *Mater. Today Proc.*, vol. 57, pp. 343–349, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.09.226.

[22] E. Fatahian, F. Ismail, M. Hafifi Hafiz Ishak, and W. Shyang Chang, "An innovative deflector system for drag-type Savonius turbine using a rotating cylinder for performance improvement," *Energy Convers. Manag.*, vol. 257, p. 115453, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.115453.

[23] J. H. Lee, Y. T. Lee, and H. C. Lim, "Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 231–244, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2015.12.012.

[24] C. M. Shashikumar, H. Vijaykumar, and M. Vasudeva, "Numerical investigation of conventional and tapered Savonius hydrokinetic turbines for low-velocity hydropower application in an irrigation channel," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 43, p. 100871, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SETA.2020.100871.

[25] C. M. Chan, H. L. Bai, and D. Q. He, "Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm," *Appl. Energy*, vol. 213, pp. 148–157, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.01.029.

[26] S. Fanel Dorel, G. Adrian Mihai, and D. Nicusor, "Review of Specific Performance Parameters of Vertical Wind Turbine Rotors Based on the SAVONIUS Type," *Energies*, vol. 14, no. 7, p. 1962, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14071962.

[27] W. Tian, B. Song, J. H. Van Zwieten, and P. Pyakurel, "Computational Fluid Dynamics Prediction of a Modified Savonius Wind Turbine with Novel Blade Shapes," *Energies 2015, Vol. 8, Pages 7915-7929*, vol. 8, no. 8, pp. 7915–7929, Jul. 2015, doi: 10.3390/EN8087915.

[28] S. Sharma and R. K. Sharma, "Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 127, pp. 43–54, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.08.087.

[29] 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.

[30] R. Afify, "Experimental Studies of an IceWind Turbine," 2019. Accessed: May 05, 2021. [Online]. Available: http://www.ripublication.com.

[31] Z. Lillahulhaq and V. S. Djanali, "Unsteady simulations of Savonius and Icewind turbine blade design using fluid-structure interaction method," in *AIP Conference Proceedings*, Dec. 2019, vol. 2187, no. 1, p. 020009, doi: 10.1063/1.5138264.

[32] T. Gad, A. Shokry, R. Afify, E. Saber, and M. Hassan, "Experimental Study of Two, Two-Reversed, Three and Four Blade IceWind Turbine," 2020. Accessed: May 08, 2021. [Online]. Available: http://www.ripublication.com.

[33] N. Alom and U. K. Saha, "Performance evaluation of vent-augmented elliptical-bladed savonius rotors by numerical simulation and wind tunnel experiments," 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.03.136.

[34] 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.

[35] U. H. Rathod, P. K. Talukdar, V. Kulkarni, and U. K. Saha, "Effect of Capped Vents on Torque Distribution of a Semicircular-Bladed Savonius Wind Rotor," *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 141, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.1115/1.4043791.

[36] 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.
[37] Z. Lillahulhaq and H. S. Maulana, "Pengaruh Model Turbulensi Aliran Terhadap Simulasi Numerik Aircurtain," *Mek. J. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 02, pp. 40–45, Jan. 2020, doi: 10.12345/JM.V5I02.3008.G2579.