

Studi Komputasi: Pengaruh Desain *Guide Vane* Terhadap Performa dan Pola Aliran di Sekitar Turbin Angin Savonius

Computational Study: The Influence of Guide Vane Design On The Performance and Flow Pattern Around Savonius Wind Turbine

Yoga Arob Wicaksono

Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Ponorogo, Indonesia

e-mail: yoga_arob@umpo.ac.id

Abstrak

Turbin angin adalah salah satu alternatif untuk mengurangi beban listrik di wilayah perkotaan. Di wilayah perkotaan terdapat gedung bertingkat dengan jumlah yang cukup banyak. Sehingga menjadi lokasi yang tepat untuk aplikasi turbin angin sekaligus mengurangi beban listrik. Tipe turbin yang tepat untuk aplikasi gedung bertingkat adalah turbin angin sumbu vertikal (VAWT). Salah satu jenis VAWT adalah turbin Savonius. Turbin angin Savonius konvensional memiliki kinerja yang rendah seperti koefisien daya dan torsi yang rendah dibandingkan dengan turbin angin jenis lain. Ini terjadi karena aliran angin dapat menyebabkan tekanan negatif pada salah satu sisi sudu. Untuk mengatasi masalah ini, turbin angin Savonius konvensional dikombinasikan dengan *guide vane*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh *guide vane* terhadap performa dan karakteristik pola aliran sekitar turbin angin Savonius. Model numerik dihitung menggunakan persamaan Navier-Stokes dengan model turbulen $k-\epsilon$ standar. Analisa menggunakan software ANSYS-Fluent R15. Simulasi dilakukan pada arah angin yang berbeda, antara lain: 0° , 30° , 60° pada kecepatan angin 2 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *guide vane* mampu menambah laju aliran udara yang menuju sudu turbin dan meningkatkan performa turbin angin Savonius sebesar 22,2%.

Kata kunci: CFD, *guide vane*, performa, pola aliran, turbin angin Savonius

Abstract

Wind turbines are an alternative to reduce electricity charges in urban areas. In urban areas there are quite a few high-rise buildings. Thus, it becomes the right place for wind turbine applications while reducing electricity loads. The correct type of turbine for high-rise building applications is the vertical axis wind turbine (VAWT). One type of VAWT is Savonius turbines. The conventional Savonius wind turbines have poor performance, such as low power and torque ratios compared to other types of wind turbines. This happens because the wind flow can cause negative pressure on one side of the blade. To overcome this problem, conventional Savonius wind turbines are combined with a *guide vane*. The purpose of this research is to study the effect of the *guide vane* on the performance and characteristics of flow patterns around Savonius wind turbines. The numerical model is calculated using the Navier-Stokes equation with the turbulent standard model $k-\epsilon$. Analysis using ANSYS-Fluent R15 software. Simulations performed in different wind directions, including: 0° , 30° , 60° at 2 m/s wind speed. The

results showed that the guide vane could increase the speed of airflow to the turbine blade and improve the performance of the Savonius wind turbine by 22.2%.

Keywords : CFD, flow pattern, guide vane, Savonius wind turbine,

1. PENDAHULUAN

Energi angin adalah sumber energi yang ramah terhadap lingkungan, kesehatan, aman dan dapat diperbarui (Damak et al. 2013). Turbin angin Savonius adalah alat untuk mengubah angin menjadi energi mekanik. Dibandingkan dengan turbin angin lainnya, turbin angin Savonius memiliki koefisien daya yang lebih rendah. Namun menawarkan sejumlah keunggulan karena sangat desain sederhana untuk dibuat, *self-starting* yang bagus dan tidak perlu diarahkan ke angin (Alessandro et al. 2010). Turbin angin Savonius tepat untuk diaplikasikan ke gedung bertingkat di daerah perkotaan. Hal itu disebabkan karena turbulensi sangat minim dan kecepatan angin lebih tinggi (Chong et al., 2013). Beberapa kelebihan turbin angin Savonius antara lain: mampu beroperasi pada kondisi angin yang turbulen dan fluktuatif pada lingkungan perkotaan (Ricci et al. 2016). Selain itu, konstruksinya sederhana, kemampuan mulai operasi yang tinggi, menerima angin dari segala arah dan kebisingan rendah (Akwa et al. 2012). Namun turbin Savonius memiliki kekurangan efisiensi yang lebih rendah dibanding turbin jenis lain (Soo et al. 2015). Turbin angin yang diletakkan di gedung tinggi semakin diminati sebagai bagian dari teknologi yang sesuai untuk aplikasi pembangkit mikro (Walker, 2011).

Penempatan turbin angin Savonius harus mempertimbangkan lokasi dan kecepatan angin. Kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 2 sampai 6 m/s. Sehingga generator energi angin yang dapat digunakan mulai skala kecil (10kW) sampai medium (10-100kW). Nominal kapasitas pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia sebesar 1,06 MW dari total pembangkit listrik pada tahun 2009 (Hasan et al. 2012).

Untuk meningkatkan performa dan karakteristik torsi statis turbin angin dapat menggunakan deflektor, *guide vane*, nosel, atau pelindung sudu. Namun, ini membuat sistem turbin lebih kompleks dan bergantung ke arah angin (Roy et al. 2015).

Untuk analisis tenaga angin dapat menggunakan software *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Sebagian besar model simulasi dilakukan, dianalisis, dan dioptimalkan tanpa membangun konstruksi fisik turbin angin dengan konfigurasi geometris yang berbeda. Dengan menggunakan simulasi CFD, torsi dan tekanan pada turbin dapat diprediksi (Pope et al., 2010).

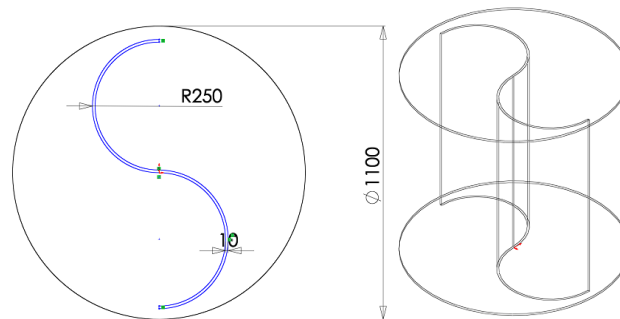
Beberapa peneliti mengeksplorasi konsep perangkat tambahan untuk meningkatkan kinerja turbin angin. Pope, membuat desain turbin angin *omni directional augmented*. Turbin angin ini terdiri dari konfigurasi stator dan rotor. Koefisien power C_p sekitar 0,12 (Pope et al., 2010). Chong mengusulkan desain *power augmentation guide vane* (PAGV) yang inovatif untuk turbin angin sumbu vertikal. Hasil numerik memperkirakan peningkatan daya 1,25 dibandingkan dengan rotor terbuka (Chong, Poh, Abdullah, Naghavi, & Pan, 2010). Dalam penelitian lain, Chong membuat desain *omni direction guide vane* untuk meningkatkan kinerja angin H-rotor 5-blade. Hasilnya menunjukkan bahwa kehadiran ODGV dapat meningkatkan output torsi sebesar 58% dan 39% pada TSR = 2.5 dan TSR = 5.1 (Chong et al., 2013). Nobile mengusulkan desain baru stator *omni directional* untuk turbin angin rotor Daerius. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perangkat meningkatkan daya dan koefisien torsi oleh arroud 30-35% dibandingkan dengan rotor terbuka (Nobile et al. 2013). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa stator atau guide vane arroud turbin angin sumbu vertikal dapat meningkatkan kinerja turbin angin.

Dalam penelitian ini dibuat sebuah desain *guide vane* multi arah yang dikombinasikan dengan turbin angin sumbu vertikal Savonius. Analisis CFD dilakukan untuk mempelajari karakteristik pola aliran di sekitar turbin angin Savonius. Dalam penelitian ini akan menganalisis performa turbin Savonius tanpa *guide vane* untuk mendapatkan nilai C_p dan C_t . Kemudian turbin angin Savonius dikombinasikan dengan *guide vane* multi arah dengan tujuan mengetahui seberapa besar pengaruh *guide vane* terhadap performa dan pola aliran disekitar turbin. Kasus ini menggunakan pendekatan *Sliding Mesh Model* (SMM) sementara persamaan Navier-Stokes diselesaikan menggunakan metode *finite volume method* (FVM) ANSYS-Fluent R15.

2. METODE

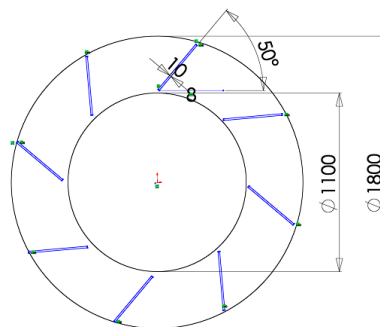
Komponen Turbin Angin

Model 3D dibuat dengan menggunakan software SolidWorks. Model 2D untuk Savonius dan *guide vane* diekstrapolasi dari bagian tengah model 3D. Simulasi dilakukan dengan model 2D untuk mengurangi waktu komputasi. Gambar 1 menggambarkan parameter geometri turbin angin Savonius. Turbin ini dibentuk oleh dua setengah lingkaran setengah lingkaran yang dicirikan oleh ketinggian $H = 1$ m, $d = 1$ mm dan tidak ada overlap antara sudu. Referensi desain ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Akwa (Akwa, et al. 2012).



Gambar 1. Parameter geometris turbin angin Savonius

Gambar 2. menunjukkan parameter geometri *guide vane*. Perangkat ini memiliki diameter dalam $D_{in} = 1,1$ m, diameter luar $D_{out} = 1,8$ m dan sudut *guide vane* = 50° .



Gambar 2. Parameter geometri *guide vane*

Persamaan Atur

Dengan menggunakan solusi persamaan konservasi dan model turbulensi, maka torsi turbin (T) dapat dihitung dengan mengintegrasikan perbedaan gaya yang dihasilkan dari tekanan dan tegangan geser pada turbin seperti yang diberikan dalam persamaan berikut:

$$T = \sum_f (F_f^{pressure} + F_f^{shear}) \cdot l = \sum_f [p_f - p_{ref}] A_f + (-\tau_f \cdot A_f)_{(concave)} \cdot l - (p_f - p_{ref}) A_f + (-\tau_f \cdot A_f)_{(convex)} \cdot l \tag{1}$$

Dimana $F_f^{pressure}$ dan F_f^{shear} adalah tekanan, (p) dan tegangan geser (τ) vektor yang bekerja pada vektor area depan turbin A_f .

Koefisien torsi dapat dihitung dari persamaan berikut:

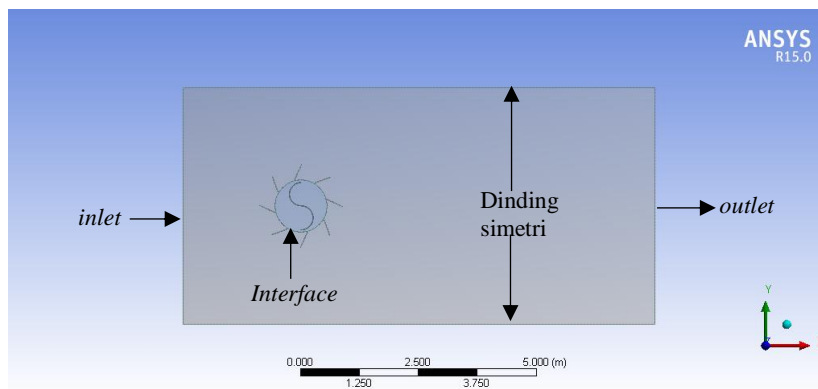
$$C_t = \frac{4T}{\rho U^2 D^2 H} \tag{2}$$

$$C_p = \frac{P}{P_w} = \frac{T\omega}{0.5\rho AU^3} = \frac{T(\omega D/2)}{0.5\rho AU^3 (D/2)} = C_t \lambda \tag{3}$$

Di mana P adalah tenaga mekanik yang dihasilkan, P_w adalah tenaga angin, ω adalah kecepatan sudut, U adalah kecepatan angin yang masuk, λ adalah *Tip Speed Ratio* (TSR) dan A adalah area sapuan turbin.

Domain Komputasi

Untuk menentukan operasi simulasi turbin turbin dan guide vane, maka diperlukan keterlibatan domain tetap dan rotasi. Seperti ditunjukkan gambar 3, domain fluida 2D terdiri dari dua komponen. Pertama, domain luar persegi panjang tetap dengan lubang bundar. Kedua, adalah domain lingkaran dalam diidentifikasi adalah domain turbin untuk Savonius turbin terbuka dan Savonius dengan domain *guide vane*. Geometri dimodelkan dalam software SolidWorks dan diimpor ke ANSYS DesignModeller 15.0. Mesh dihasilkan dengan ANSYS-ICEM CFD 15. Domain komputasi untuk turbin ditunjukkan pada Gambar. 3 memiliki dimensi 10 m x 5 m. Domain terdiri dari dua bagian yang dipisahkan oleh *interface*, yaitu wilayah turbin yang berputar dan wilayah *guide vane* yang stasioner. Turbin Savonius dan *guide vane* ditempatkan 2,5 m dari inlet.



Gambar 3. Domain komputasi

Set-up Komputasi

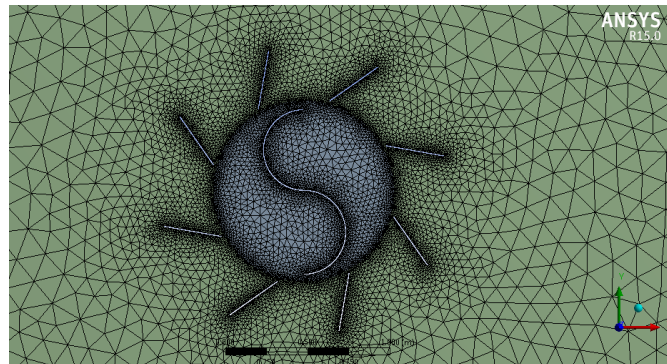
Angka Reynolds (Re_D) dihitung dengan rumus berikut:

$$Re_D = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (4)$$

Dimana ρ adalah kepadatan udara, U adalah kecepatan aliran bebas, D adalah diameter turbin, dan μ adalah viskositas dinamis udara. Dengan kecepatan angin 2 m/s, maka angka Reynolds sama dengan 132,322. Udara diasumsikan tidak mampu mampat. Densitas dan viskositas dinamis masing-masing adalah 1,205 kg/m³ dan 1,511E⁻⁵ Ns/m². Nilai kecepatan saluran masuk (*inlet*) adalah 2 m/s. Fluida adalah udara dengan parameter termodinamika tekanan 101325 Pa dan suhu 293 K. Nilai tekanan keluar (*outlet*) adalah 0 Pa. Model turbulen yang digunakan adalah $k-\varepsilon$ standar. Time step diatur selama 1000 s, ukuran time step 0,01 dan iterasi 50 setiap langkah waktu. Kriteria konvergensi residual ditetapkan 10⁻⁴ pada setiap time step. Perhitungan dilakukan pada komputer dengan prosesor 4-core dan *clock speed* 2,53 GHz.

Meshing

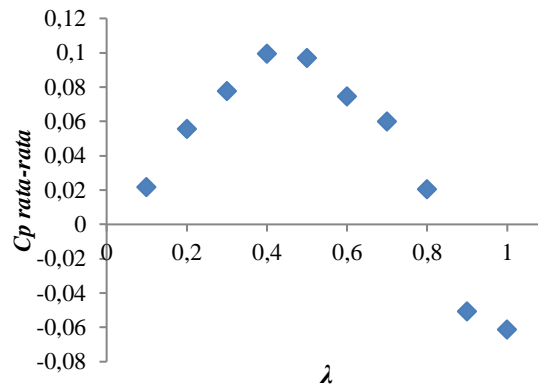
Mesh komputasi yang digunakan adalah tipe mesh segitiga tidak terstruktur. Mesh komputasi mencakup 13,187 sel untuk turbin Savonius dan 17,971 sel untuk turbin Savonius dengan *guide vane* dan lebar sel segitiga minimum 0,01 m. Berdasarkan studi independensi mesh menunjukkan bahwa ukuran mesh ini cukup untuk menghitung torsi rata-rata turbin.



Gambar 5. Grid komputasi di sekitar turbin Savonius dengan *guide vane*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6 dibawah menunjukkan hasil koefisien daya rata-rata (C_p) terhadap TSR (λ). Dibandingkan dengan data numerik sebelumnya yang diperoleh oleh (Mohamed et al. 2010) dan (Akwa et al. 2012), grafik C_p pada gambar 6 memiliki bentuk kurva yang serupa. Tetapi C_p rata-rata lebih rendah karena angka Reynolds berbeda dari studi numerik sebelumnya. C_p rata-rata maksimum mencapai pada $\lambda = 0,1$.

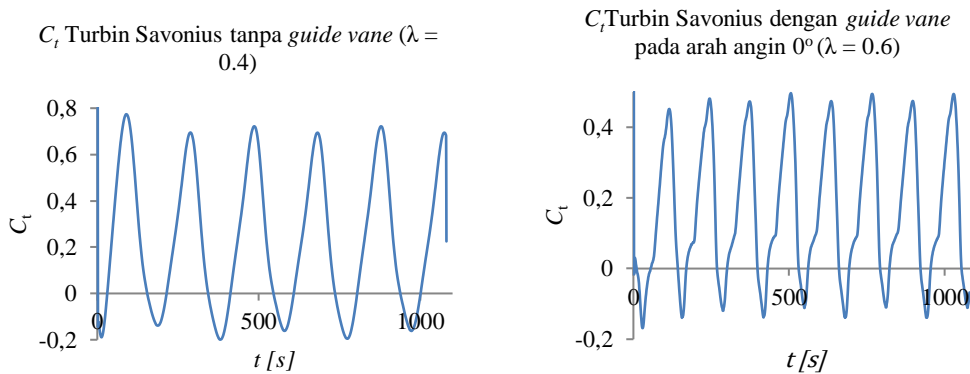


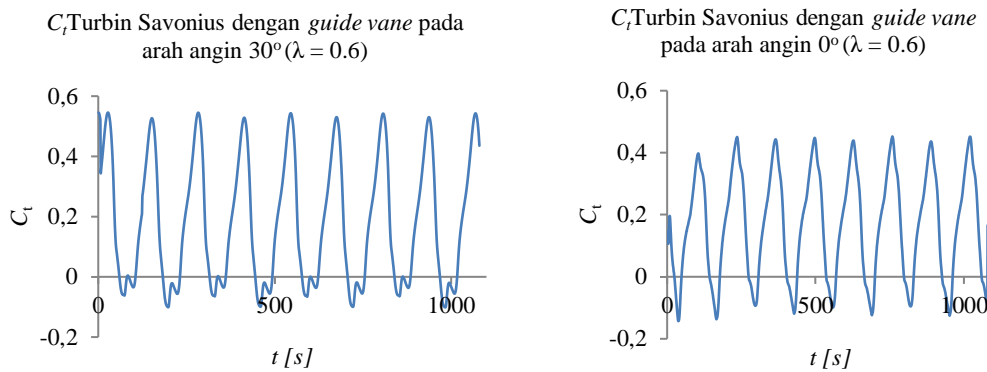
Gambar 6. Grafik C_p rata-rata versus TSR dari Savonius tanpa *guide vane*

Perbedaan karakteristik aliran udara pada masing-masing konfigurasi memengaruhi koefisien torsi (C_t). Gambar 7 di bawah ini, menunjukkan kurva C_t terhadap waktu (t). Pada awal operasi turbin angin Savonius, grafik C_t tidak stabil pada detik awal operasi. Setelah siklus operasi kedua turbin Savonius, nilai C_t menjadi hampir siklis. Perhitungan dimulai dengan kondisi dan proses yang telah ditentukan sebelumnya ke pengaturan yang realistis.

C_t rata-rata untuk Savonius tanpa *guide vane* sama dengan 0,225 pada $\lambda = 0,4$. Jadi dengan persamaan (3), C_p sama dengan 0,09. Untuk Savonius dengan *guide vane* rata-rata C_t sama dengan 0,16, 0,18, dan 0,17 untuk arah angin 0° , 30° , dan 60° . C_p rata-rata sama dengan 0,095, 0,11, dan 0,099 untuk arah angin 0° , 30° , dan 60° .

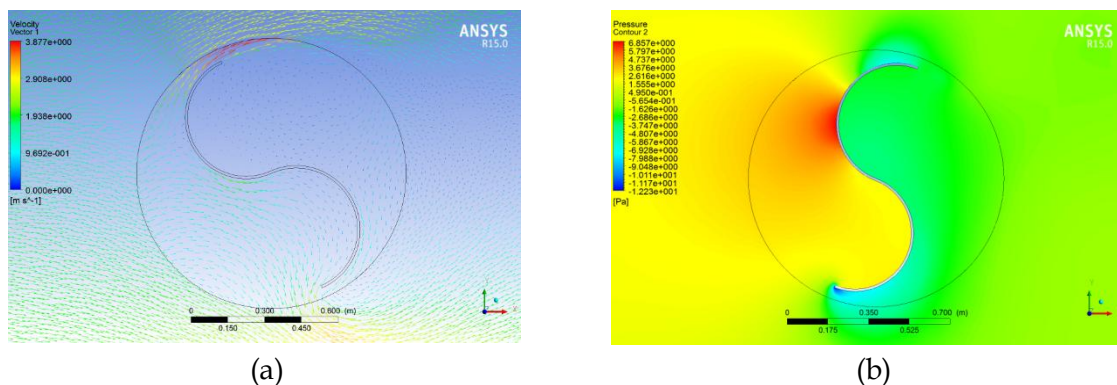
C_p tertinggi diperoleh dari Savonius dengan *guide vane* dalam arah angin 30° . Dibandingkan dengan Savonius tanpa *guide vane*, dengan konfigurasi ini C_p meningkat 22,2%. Mengacu pada vektor kecepatan dan analisis kontur tekanan seperti dijelaskan sebelumnya, sirkulasi aliran dan tekanan dalam konfigurasi ini lebih baik dibanding pada arah angin 0° dan 60° .





Gambar 7. Grafik C_p terhadap waktu

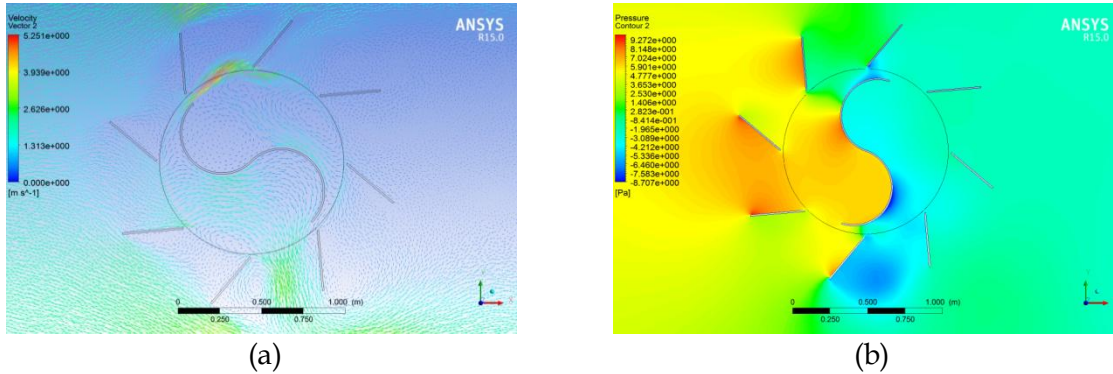
Gambar 8. dibawah menunjukkan vektor kecepatan dan tekanan di sekitar Savonius tanpa *guide vane* ($\lambda = 0,4$). Pada bagian samping turbin Savonius, kecepatan udara meningkat secara progresif. Interaksi pertama terjadi di bagian depan turbin, ketika semua aliran udara langsung mengenai sudu yang cembung dan cekung. Kemudian mengalir melintasi ujung masing-masing sudu turbin dan interaksi kedua terjadi di belakang ketika udara keluar. Di depan turbin ditandai oleh vektor dengan kecepatan tinggi. Vektor dengan kecepatan rendah terletak di permukaan cekung sudu. Di belakang sudu, nilai vektor kecepatan meningkat hingga keluar dari seksi uji. Fenomena turbulensi dapat diamati dalam sudu yang bergerak maju. Kecepatan vektor lebih tinggi terjadi di samping sudu maju, karena aliran udara mengikuti bentuk cembung sudu. Titik separasi vektor kecepatan berada di permukaan sudu maju. Di titik separasi ini, nilai vektor kecepatan rendah sehingga tekanannya tinggi. Gambar 8. (b) tekanan yang lebih tinggi di permukaan sudu yang maju dapat mengurangi daya total pada sumbu turbin. Pada sudu cekung, vektor kecepatan rendah karena bentuk cekung sudu menahan partikel udara sebelum keluar ke luar sudu. Sehingga akan membuat tekanan di sudu yang cembung dan menghasilkan torsi negatif di sumbu turbin.



Gambar 8. (a) Vektor kecepatan turbin angin Savonius tanpa *guide vane* ($\lambda = 0,4$) (b). Kontur tekanan turbin angin Savonius tanpa *guide vane* ($\lambda = 0,4$)

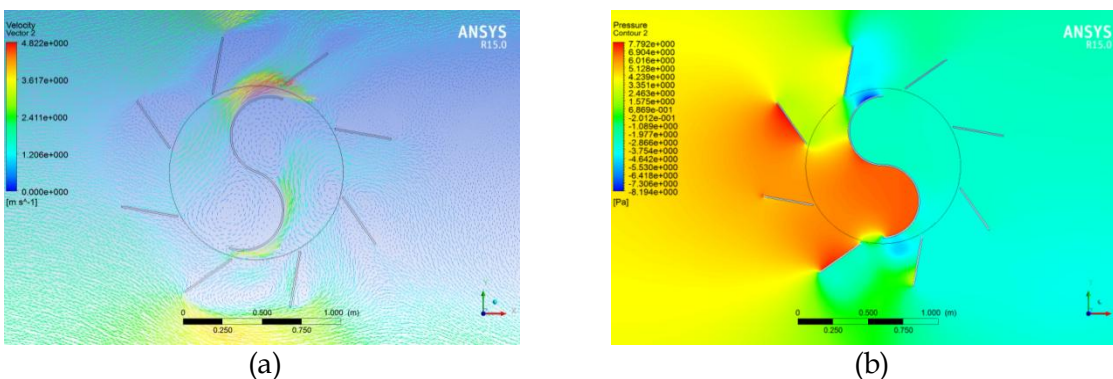
Gambar 9. (a) menyajikan medan vektor kecepatan di sekitar turbin Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 0° ($\lambda = 0,6$). Sebelum resirkulasi aliran udara mencapai sudu, *guide vane* memandu aliran udara mengikuti sudut *guide vane* dan memasuki saluran *guide vane*. Sebagian besar udara mengalir ke sudu yang kembali dan menabraknya. *Guide vane* mampu meminimalkan kecepatan angin di depan dari sudu yang maju. Sehingga tekanan hulu

memajukan bucket berkurang. Gambar 8. (b) ketika tekanan di depan turbin yang maju berkurang, sudu yang kembali lebih mudah menghasilkan tenaga di poros turbin, karena torsi negatif yang disebabkan oleh bucket maju yang diperkecil oleh *guide vane*.



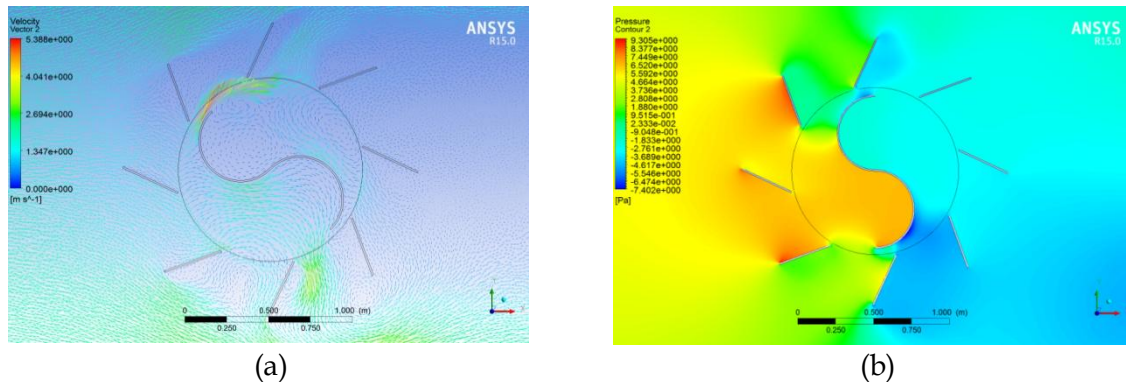
Gambar 9. (a) Vektor kecepatan Savonius dengan *guide vane* pada 0° arah angin ($\lambda = 0,6$) (b). Kontur tekanan Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 0° ($\lambda = 0,6$)

Gambar 10. (a) menyajikan medan vektor kecepatan di sekitar turbin Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 30° ($\lambda = 0,6$). Karakteristik resirkulasi aliran udara berbeda dibandingkan Gambar 9 dan 11. Ini terjadi karena arah angin berubah menjadi 30° . Efek dari perubahan ini ditunjukkan pada gambar 10 (a) dan (b). Aliran udara melalui saluran *guide vane* lebih mudah untuk mencapai sisi cekung sudu. Tekanan hulu lebih terkonsentrasi di sisi cekung, sehingga tekanan positif di sudu meningkat. *Guide vane* meminimalkan tekanan negatif di sudu cembung.



Gambar 10. (a) Vektor kecepatan Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 30° ($\lambda = 0,6$) (b). Kontur tekanan Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 30° ($\lambda = 0,6$)

Gambar 11. (a) menyajikan medan vektor kecepatan di sekitar turbin Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 60° ($\lambda = 0,6$). Dibandingkan dengan gambar 9, karakteristik resirkulasi aliran udara menurun. Hal itu terjadi karena arah angin berubah menjadi 60° derajat. Selain itu timbul vortex pada *guide vane*. Sehingga menyebabkan hilangnya momentum, akibatnya tekanan dalam sudu turbin kembali berkurang.



Gambar 11. (a) Vektor kecepatan Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 60° ($\lambda = 0,6$)
 (b). Kontur tekanan Savonius dengan *guide vane* pada arah angin 60° ($\lambda = 0,6$)

Kehadiran *guide vane* dan pengaruh arah angin berpengaruh terhadap performa dan karakteristik aliran udara turbin angin Savonius. Studi tentang struktur aliran fluida di sekitar wilayah turbin Savonius dengan *guide vane* berguna untuk mendukung fenomena dinamika fluida yang menentukan peningkatan performa. *Guide vane* dapat menghindari gaya hambat yang disebabkan oleh tekanan dinamis dari aliran udara masuk yang bekerja pada sudu turbin yang bergerak maju. Desain *guide vane* berfungsi sama seperti deflektor yang diteliti oleh (Tartuferi et al. 2015), yaitu untuk mengurangi hambatan yang disebabkan oleh tekanan dinamis dari aliran masuk yang bekerja pada sudu cembung. Dengan demikian, efek gabungan dari tambahan aerodinamis tersebut memungkinkan turbin untuk mengekstraksi energi yang lebih efisien dari angin, sehingga meningkatkan *output* daya dari sistem.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Studi komputasi pengaruh desain *guide vane* terhadap performa dan pola aliran di sekitar turbin angin Savonius telah dilakukan. Hasil simulasi, seperti performa, vektor kecepatan, kontur tekanan tekanan disajikan. Menurut hasil simulasi, turbin angin Savonius dengan *guide vane* memiliki efek pada performa karakteristik aliran. Dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa *guide vane*, sirkulasi aliran fluida pada turbin terbukti meningkat. *Guide vane* memiliki efek positif untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius. Namun, kinerja Savonius turbin dengan *guide vane* bergantung pada arah datang angin. Tiga variasi arah angin diselidiki dalam makalah ini. Performa turbin angin Savonius dengan *guide vane* paling tinggi ketika arah datang angin 30° . Dibandingkan dengan Savonius tanpa *guide vane*, C_p meningkat sebesar 22,2%. Jadi, dapat disimpulkan bahwa *guide vane* tepat untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius untuk aplikasi di gedung bertingkat.

DAFTAR RUJUKAN

- Akwa, J. V., Alves, G., & Petry, A. P. (2012). Discussion on the verification of the overlap ratio in influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *38*, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.013>
- Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(5), 3054–3064. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056>
- Alessandro, V. D., Montelpare, S., Ricci, R., & Secchiaroli, A. (2010). Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance. *Energy*, *35*(8), 3349–3363. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.021>

- Chong, W. T., Fazlizan, A., Poh, S. C., Pan, K. C., Hew, W. P., & Hsiao, F. B. (2013). The design , simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane q. *APPLIED ENERGY*, 5-8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.064>
- Chong, W. T., Poh, S. C., Abdullah, N., Naghavi, M. S., & Pan, K. C. (2010). *Vertical Axis Wind Turbine with Power-Augmentation-Guide-Vane for Urban High Rise Application 3 . Building integrated wind-solar hybrid energy generation system and rain water collector.* (September), 1-6.
- Damak, a., Driss, Z., & Abid, M. S. (2013). Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180?? *Renewable Energy*, 52, 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.043>
- Hasan, M. H., Muzammil, W. K., Mahlia, T. M. I., Jannifar, A., & Hasanuddin, I. (2012). A review on the pattern of electricity generation and emission in Indonesia from 1987 to 2009. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3206-3219. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.075>
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., & Thévenin, D. (2010). Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. *Renewable Energy*, 35(11), 2618-2626. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.007>
- Nobile, R., Vahdati, M., & Barlow, J. F. (2013). *Unsteady flow simulation of a vertical axis wind turbine : a two-dimensional study.* (July), 1-10.
- Pope, K., Rodrigues, V., Doyle, R., Tsopelas, a., Gravelins, R., Naterer, G. F., & Tsang, E. (2010). Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(5), 1043-1051. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.10.012>
- Ricci, R., Romagnoli, R., Montelpare, S., & Vitali, D. (2016). Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems q. *Applied Energy*, 161, 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.012>
- Roy, S., & Saha, U. K. (2015). Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Applied Energy*, 137, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.022>
- Soo, K., Ik, J., Pan, J., & Ryu, K. (2015). Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 79, 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.035>
- Tartuferi, M., D'Alessandro, V., Montelpare, S., & Ricci, R. (2015). Enhancement of Savonius wind rotor aerodynamic performance: a computational study of new blade shapes and curtain systems. *Energy*, 79, 371-384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.023>
- Walker, S. L. (2011). Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale – A review of methods of estimating urban wind resource. *Energy & Buildings*, 43(8), 1852-1862. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.032>