

Kesan Kepaduan Rotor Terhadap Prestasi Kuasa Turbin Angin Paksi Menegak

(Effect of Solidity on Power Performance of Vertical Axis Wind Turbine)

Muhamad Fadhli Ramlee, Ahmad Fazlizan*, Sohif Mat
Institut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

*Penulis koresponden; email: a.fazlizan@ukm.edu.my

Received 05 April 2019, Received in revised form 31 October 2019

Accepted 02 December 2019, Available online 30 August 2020

ABSTRAK

Tenaga angin merupakan salah satu sumber tenaga keterbaharuan yang berpotensi sebagai alternatif kepada penjanaan tenaga secara konvensional melalui pembakaran arang batu dan bahan api fosil yang menjadi penyumbang utama kepada perubahan iklim. Sejak kebelakangan ini, kajian tentang turbin angin lebih tertumpu kepada turbin angin paksi menegak jenis Darrieus berskala kecil yang lebih sesuai untuk digunakan di kawasan angin berkelajuan rendah. Justeru, kajian ini dijalankan bertujuan untuk menganalisa secara berangka, kesan kepaduan, dengan mengubah diameter turbin, terhadap prestasi kuasa VAWT menggunakan teknologi perkomputeran dinamik bendalir (CFD). Satu siri simulasi CFD dua dimensi telah dijalankan ke atas VAWT 3-bilah yang diperengkap dengan bilah jenis NACA0018. Penilaian prestasi kuasa terhadap 3 konfigurasi turbin dengan diameter yang berbeza, iaitu 1.0 m, 0.6 m dan 0.43 m telah dijalankan pada julat operasi kelajuan yang besar dengan kelajuan pengaliran masuk angin ditetapkan pada 8.0 m/s. Hasil simulasi jelas memperlihatkan bahawa turbin angin berdiameter besar menunjukkan prestasi yang baik pada nilai λ yang tinggi dan mempunyai julat operasi yang besar manakala turbin angin berdiameter kecil menjana kuasa lebih banyak pada nilai λ yang rendah dan mempunyai keupayaan mula diri yang lebih baik. Hasil kajian ini dapat membantu para penyelidik memahami dengan lebih mendalam kesan kepaduan turbin terhadap prestasi VAWT seterusnya menghasilkan rekaan ideal VAWT yang boleh beroperasi dalam keadaan angin yang kompleks.

Keywords: Kepaduan; perkomputeran dinamik bendalir; turbin angin paksi menegak; tenaga angin

ABSTRACT

Wind energy is one of the potential renewable energy sources and a great alternative to replace conventional power generation using coal and fossil fuel that heavily contribute to climate change. Recently, small scale vertical axis wind turbine (VAWT) has received growing interest as wind energy converter due to its suitability to be used in low wind speed area. Hence, this paper is intended to evaluate numerically the effect of solidity, by varying turbine diameter, on power performance of VAWT using computational fluid dynamic (CFD) technology. A series of two-dimensional CFD simulations was performed on a three-bladed H-type Darrieus rotor equipped with symmetrical NACA0018 blades. Performance evaluation on 3 turbine configurations with different diameter; i.e. 1.0 m, 0.6 m and 0.43 m was performed over a range of tip speed ratio, λ with an incoming velocity of 8.0 m/s. The simulation results clearly show that low solidity turbine performed better at high values of λ and has wider operating range while turbine with low solidity performed better at low λ and has better self-starting capability. The results lend substantially to our understanding of solidity effect on performance of VAWT in order to develop an ideal design of VAWT that can operate optimally in complex wind condition.

Keywords: Solidity; computational fluid dynamic; vertical axis wind turbine; wind energy

PENGENALAN

Pada masa kini, penjanaan tenaga elektrik di seluruh dunia banyak bergantung kepada bahan api fosil (petroleum, gas asli) dan arang batu. Walau bagaimanapun, peningkatan permintaan tenaga setiap tahun, hasil daripada perkembangan aktiviti ekonomi dan pertumbuhan bilangan penduduk, telah menjadi kebimbangan utama bagi setiap

negara. Hal ini diburukkan lagi dengan ketidakpastian pasaran dunia terhadap harga bahan bakar dan perubahan iklim yang disebabkan oleh pembakaran bahan api fosil dan arang batu. Kebimbangan ini telah memaksa pihak kerajaan dan para penyelidik untuk mencari sumber tenaga alternatif yang boleh diperbaharui dan lebih mesra alam. Tenaga angin merupakan salah satu dari sumber tenaga boleh keterbaharuan yang semakin mendapat perhatian. Hal

ini dibuktikan dengan peningkatan ketara bilangan kajian berkaitan tenaga angin, baik di peringkat industri mahupun di peringkat universiti.

Turbin angin merupakan alatan yang biasanya digunakan untuk menukar tenaga kinetik angin kepada tenaga elektrik dan berdasarkan paksi putaran bilahnya, turbin angin boleh dibahagikan kepada dua kategori utama iaitu turbin angin paksi melintang (*horizontal axis wind turbine HAWT*) dan turbin angin paksi menegak (*vertical axis wind turbine VAWT*). Sejak kebelakangan ini, VAWT berskala kecil semakin mendapat perhatian sebagai alat penukar tenaga angin di persekitaran terbina seperti di kawasan bandar dan kawasan kediaman penduduk, yang diketahui dengan keadaan angin yang kompleks, tidak tetap dan berkelajuan rendah.

Pelbagai kajian telah dijalankan untuk mengkaji faktor-faktor yang mempengaruhi sifat aliran angin di sekitar bilah dan rotor dengan tujuan untuk menghasilkan rekaan VAWT yang unggul dan dapat beroperasi dengan baik dalam keadaan angin yang pelbagai. Antara faktor yang mempengaruhi prestasi penghasilan kuasa sesebuah VAWT adalah sudut angkul bilah (C. Li et al. 2018) its application in vertical axis wind turbines (VAWTs, reka bentuk bilah (Ferreira & Geurts 2014), penggunaan komponen tambahan seperti ram pandu (Chong et al. 2013) dan keamatan gelora (Rezaeiha, Montazeri & Blocken 2018a).

Kepaduan turbin, σ merupakan salah satu parameter geometri yang memberi pengaruh yang besar terhadap kecekapan sesebuah VAWT (Howell, Qin, Edwards & Durrani 2010). Kepaduan turbin merujuk kepada nisbah keluasan bilah kepada luas sapuan. Nilai kepaduan mempunyai kaitan secara terus dengan bilangan bilah, N , panjang rentas bilah, c dan diameter turbin, D berdasarkan persamaan (1).

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{D} \quad (1)$$

Seperti yang dinyatakan, perubahan pada bilangan bilah, panjang rentas bilah dan diameter turbin akan mengubah nilai kepaduan turbin, seterusnya memberi impak terhadap prestasi kuasa turbin. Walau bagaimanapun, perubahan pada panjang rentas bilah bukan sahaja akan mengubah nilai kepaduan, malah akan memberi impak tambahan seperti nisbah aspek turbin, kesan tegun dinamik dan kesan kelengkungan aliran.

Berdasarkan kajian lepas, kesan kepaduan turbin terhadap prestasi kuasa VAWT telah dikaji secara terperinci. Sebagai contoh, analisa terhadap prestasi turbin angin telah dijalankan berdasarkan perubahan pada bilangan bilah (Consul, Willden, Ferrer & McCulloch 2009; Sabaeifard, Razzaghi & Forouzandeh 2012) dan panjang rentas bilah (Chen, Yang, Yang & Xu 2015; Mohamed 2013). Hasil kajian menunjukkan pada nisbah laju hujung (tip speed ratio), λ yang tinggi, berlaku peningkatan terhadap

prestasi kuasa dan kecekapan turbin apabila nilai kepaduan menurun, manakala pada λ yang rendah, turbin berkepaduan tinggi beroperasi dengan lebih baik berbanding turbin berkepaduan rendah dan mempunyai kebolehan mula diri (self-starting) yang tinggi. Kesan kepaduan turbin dan prestasi kuasa VAWT juga telah dikaji secara mendalam dengan menggunakan pelbagai pendekatan seperti kaedah gandaan tiub alir (Roh & Kang 2013), model vorteks (Dumitrescu, Cardoso, Dumitrache & Frunzulic 2010) dan terowong angin (Q. Li et al. 2016).

Kaedah berangka fideliti tinggi seperti perkomputeran dinamik bendalir (*computational fluid dynamic CFD*) diketahui sebagai kaedah yang efektif untuk mengkaji prestasi sesebuah turbin kerana keupayaannya memberikan hasil penilaian yang tepat seterusnya memberi gambaran jelas aliran angin di sekitar turbin, di samping dapat menjimatkan kos penyelidikan yang tinggi yang melibatkan penggunaan instrumen seperti terowong angin. Contohnya, satu kajian perbandingan antara hasil simulasi CFD dengan kaedah momentum elemen bilah telah dijalankan dan disimpulkan bahawa CFD dapat memberikan hasil yang tepat dan boleh dipercayai, kerana keupayaannya menganalisis pola aliran yang kompleks seperti tegun dinamik (*dynamic stall*) dan pembentukan vorteks dengan lebih baik (Rossetti & Pavesi, 2013). Tambahan pula, simulasi CFD telah digunakan secara meluas oleh para penyelidik dalam mengoptimalkan rekaan VAWT (Jin, Zhao, Gao & Ju 2014).

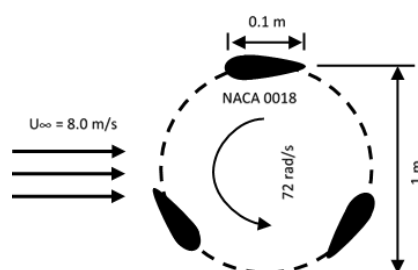
Ulasan kajian diatas menunjukkan secara jelas bahawa perubahan nilai kepaduan turbin memberi kesan yang besar terhadap kecekapan dan prestasi kuasa sesebuah VAWT. Mengubah kepaduan berpotensi meningkatkan penghasilan tork pada keadaan angin tertentu, seterusnya memaksimumkan penghasilan kuasa turbin. Walau bagaimanapun, kajian-kajian terhadap kesan kepaduan yang terdahulu kebanyakannya tertumpu kepada perubahan bilangan bilah dan panjang rentas bilah. Justeru, objektif utama kajian ini dijalankan adalah untuk menganalisa kesan kepaduan turbin, dengan mengubah diameter rotor, terhadap prestasi kuasa Darrieus VAWT bilah lurus, menggunakan teknologi CFD. Kajian ini dapat membantu para penyelidik memahami dengan lebih mendalam pola aliran angin yang berlaku disekitar rotor, seterusnya menghasilkan rekaan VAWT berskala kecil yang ideal.

METODOLOGI

Untuk mengkaji kesan kepaduan turbin terhadap prestasi kuasa VAWT, satu model CFD 2 dimensi yang mengandungi Darrieus VAWT berbilah lurus telah dibangunkan. Turbin ini mempunyai kepaduan 0.3, dengan 3 bilah jenis NACA0018 bersimetri dan panjang rentas 0.1 m. Untuk menguji kecekapan turbin pada keadaan kelajuan yang berbeza, λ ditetapkan pada julat operasi yang besar iaitu $1.5 \leq \lambda \leq 4.5$. Nilai σ dan λ boleh dikira berdasarkan persamaan (1) dan (2).

JADUAL 1. Parameter geometri dan operasi turbin

Parameter	Nilai
Bilangan bilah, N	3
Diameter turbin, D [m]	1
Jenis bilah	NACA0018
Panjang rentas, c [m]	0.1
Kepaduan, σ	0.3
Laju putaran, ω [rad/s]	72
Halaju angin, U_∞ [m/s]	8
Nisbah laju hujung, λ	4.5



RAJAH 1. Lukisan skema model turbin

JADUAL 2. Perbezaan konfigurasi turbin

D [m]	c [m]	N	σ
1.00	0.1	3	0.3
0.60	0.1	3	0.5
0.43	0.1	3	0.7

$$\lambda = \frac{\omega r}{U_\infty} \quad (2)$$

di mana ω adalah laju putaran turbin, r adalah jejari rotor dan U_∞ adalah halaju angin mendatang. Dalam kajian ini, nilai λ diubah dengan mengubah laju putaran turbin, ω tanpa mengubah halaju angin, U_∞ yang ditetapkan pada nilai 8 m/s. Jadual 1 dan Rajah 1 menunjukkan tetapan parameter geometri dan operasi yang digunakan di dalam kajian ini.

Berdasarkan kajian-kajian terdahulu, kebiasaannya kepaduan turbin diubah dengan menambah atau mengurangkan bilangan bilah, atau dengan mengubah panjang rentas bilah. Namun, dalam kajian ini, diameter rotor diubah untuk mengkaji kesan kepaduan turbin. Kajian dijalankan terhadap 3 konfigurasi turbin, dengan julat diameter rotor dari 0.43 hingga 1 m, sementara bilangan bilah dan panjang rentas bilah tidak berubah. Senarai konfigurasi turbin yang dikaji boleh dilihat seperti dalam jadual 2.

Berdasarkan objektif utama kajian ini, iaitu untuk mengkaji prestasi VAWT yang mempunyai diameter berbeza, adalah penting untuk memastikan aliran angin di sekitar bilah dan rotor disimulasi secara tepat dan terperinci. Justeru, kaedah jejaring gelangsar (*sliding mesh*) telah

digunapakai di dalam kajian ini. Domain perkomputeran yang digunakan terbahagi kepada dua komponen penting:

1. Domain tetap segi empat tepat di bahagian luar.
2. Domain membulat di bahagian dalam, yang mengandungi rotor dan bilah dan berputar pada kelajuan sudut yang sama.

Rajah 2 menunjukkan lukisan skema domain perkomputeran 2 dimensi yang digunakan. Untuk menghasilkan simulasi turbin di persekitaran terbuka, keluasan domain tetap segi empat tersebut perlu dipastikan mencukupi, untuk mengelakkan kesan sekatan yang boleh mengganggu aliran angin mendatang dan menjejaskan kualiti hasil simulasi. Justeru, kelebaran domain, jarak salur masuk dan keluar dari titik tengah turbin ditetapkan pada nilai 20D (D; diameter turbin), 15D dan 10D.

Perisian ANSYS Fluent pakej komersial telah digunakan untuk menjalankan semua simulasi CFD dan pengiraan perkomputeran dibuat berdasarkan persamaan Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS). Model gelora (*turbulence model*) jenis Transition shear-stress transport (SST) dengan 4 persamaan telah dipilih kerana ketinggian ketepatannya dalam mensimulasi aliran bendalir dan putaran rotor (Rezaeiha, Kalkman, & Blocken, 2017).

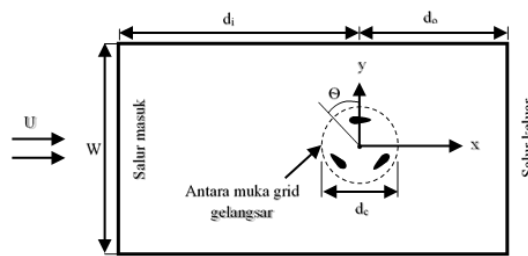
HASIL KAJIAN DAN ANALISA

PENGESAHAN MODEL KAJIAN

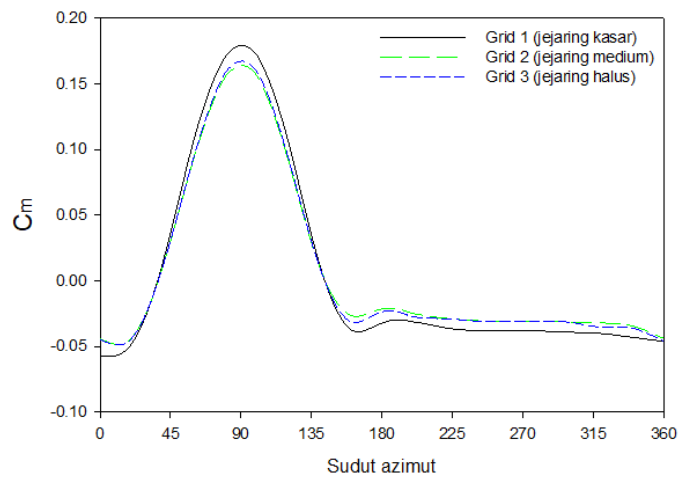
Kajian kebebasan grid model telah dijalankan dengan menggunakan 3 grid yang mengandungi jumlah sel yang berbeza iaitu grid 1 mengandungi 280,000 sel, grid 2 mengandungi 440,000 sel dan 600,000 sel. Rajah 3 menunjukkan perbandingan hasil simulasi pekali momen seketika, C_m yang dihasilkan oleh bilah tunggal semasa putaran terakhir untuk ketiga-tiga jenis grid dan seperti yang dapat dilihat dalam rajah tersebut, grid 2 (jejaring

medium) dan grid 3 (jejaring halus) menunjukkan hasil simulasi yang hampir sama, manakala grid 1 (jejaring kasar) menunjukkan perbezaan hasil yang ketara, terutama ketika bilah berada di bahagian hiliran ($180^\circ < \Theta \leq 360^\circ$). Selepas meneliti kesesuaian saiz grid yang akan digunakan pada setiap domain, konfigurasi grid yang optimal telah dipilih. Oleh itu, grid 2 digunakan dalam semua simulasi yang dijalankan.

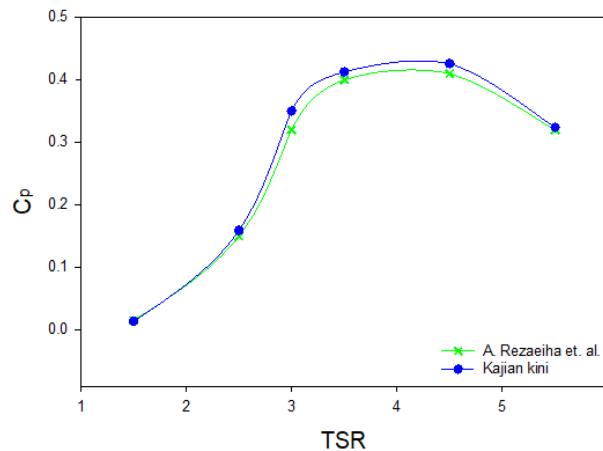
Kajian yang dijalankan oleh (Rezaeiha, Montazeri, & Blocken, 2018b) such as azimuthal increment, domain size and number of turbine revolutions before reaching a statistically steady state condition (convergence telah



RAJAH 2. Lukisan skema domain perkomputeran



RAJAH 3. Perbandingan hasil simulasi yang dijalankan menggunakan 3 saiz grid yang berbeza (kasar, medium dan halus)



RAJAH 4. Pebandingan kajian pengesahan kaedah simulasi

dipilih sebagai perbandingan untuk ujian pengesahan model kajian ini. Perbandingan dibuat terhadap pekali kuasa, C_p pada 6 nisbah laju hujung, λ yang berbeza iaitu 1.5, 2.5, 3.0, 3.5, 4.5 dan 5.5, seperti yang ditunjukkan dalam rajah 4 dan diperincikan dalam jadual 3. Hasil perbandingan menunjukkan simulasi yang dijalankan memberikan hasil yang memuaskan jika dibandingkan dengan data simulasi dalam kajian yang telah diterbitkan, dengan perbezaan maksimum sebanyak 9.8% pada $\lambda = 1.5$.

Berdasarkan jadual 3, hasil simulasi yang dijalankan pada kesemua nilai λ berada di bawah paras 10 %, iaitu tanda aras yang ditetapkan oleh penulis. Perbezaan di antara kedua-dua hasil simulasi, terutamanya pada nilai $\lambda < 3.0$ disebabkan oleh kehadiran aci tengah (*central shaft*) yang diambil kira dalam model simulasi yang dijalankan oleh Rezaeiha et. al. sedangkan ia tidak diambil kira dalam kajian ini. Hal ini menyebabkan berlaku perbezaan (*over-prediction*) hasil simulasi dalam kajian ini, terutama pada nilai λ yang rendah.

KESAN KEPADUAN TURBIN

Mengubah mana mana tiga parameter ini, iaitu bilangan bilah, N , panjang rentas bilah, c , atau diameter rotor, D , akan mengubah nilai kepaduan turbin, seterusnya memberi kesan terhadap prestasi kuasa sesebuah VAWT. Berbeza dengan kajian yang lain, di mana kesan kepaduan lebih tertumpu kepada perubahan panjang rentas bilah, yang berkemungkinan dipengaruhi oleh kesan nombor Reynolds, dalam kajian ini, diameter rotor diubah untuk memberi gambaran jelas kesan kepaduan rotor terhadap prestasi kuasa VAWT tanpa dipengaruhi oleh kesan - kesan dinamik yang lain.

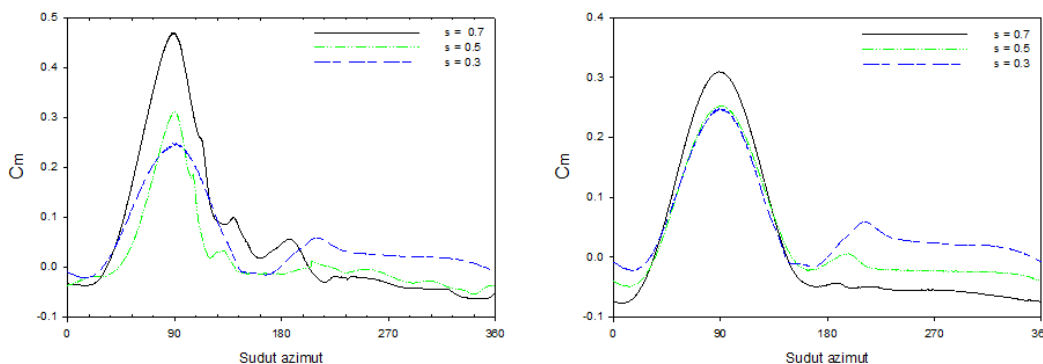
Rajah 5a-b menunjukkan pekali momen seketika, C_m yang dihasilkan oleh bilah tunggal semasa putaran turbin yang terakhir pada $\lambda = 1.0$ dan 2.5. Berdasarkan kajian,

jumlah momen yang dihasilkan oleh setiap bilah adalah sama untuk setiap kali putaran, melainkan hanya fasa beranjak (Sumantraa, 2015) Maka, dalam kajian ini, pemerhatian terhadap penghasilan momen oleh satu bilah sahaja dibuat berbanding hasil gabungan momen oleh ketiga-tiga bilah. Berdasarkan rajah tersebut, turbin berkepaduan tinggi ($\sigma = 0.7$) menghasilkan C_m positif yang lebih tinggi ketika bilah berada di bahagian hulu ($0^\circ < \Theta \leq 180^\circ$), berbanding turbin berkepaduan sederhana ($\sigma = 0.5$) dan rendah ($\sigma = 0.3$), sementara C_m negatif dihasilkan ketika bilah berada di bahagian hiliran ($180^\circ < \Theta \leq 360^\circ$) pada kedua-dua keadaan λ . Hal ini kerana turbin berkepaduan tinggi mempunyai interaksi yang lebih baik dengan angin mendatang, terutamanya pada nilai λ yang rendah, seterusnya menjana kuasa yang lebih banyak. Walau bagaimanapun, pada nilai λ yang tinggi, kesan sekatan oleh saiz diameter turbin yang kecil menjadi semakin ketara. Hal ini menyebabkan angin mendatang terhalang dari melepasi turbin dan tertolak ke bahagian sisi, seterusnya menghasilkan kawasan angin berkelajuan rendah di bahagian hiliran turbin. Disebabkan itu, penghasilan momen oleh bilah semasa berada di bahagian hiliran semakin berkurangan apabila λ meningkat dan mendorong kepada penghasilan jumlah bersih kuasa negatif oleh turbin. Hal ini jelas menunjukkan ketidakupayaan turbin berkepaduan tinggi untuk menghasilkan tenaga secara optimum dan ketidaksesuaiannya untuk digunakan pada nilai λ yang tinggi.

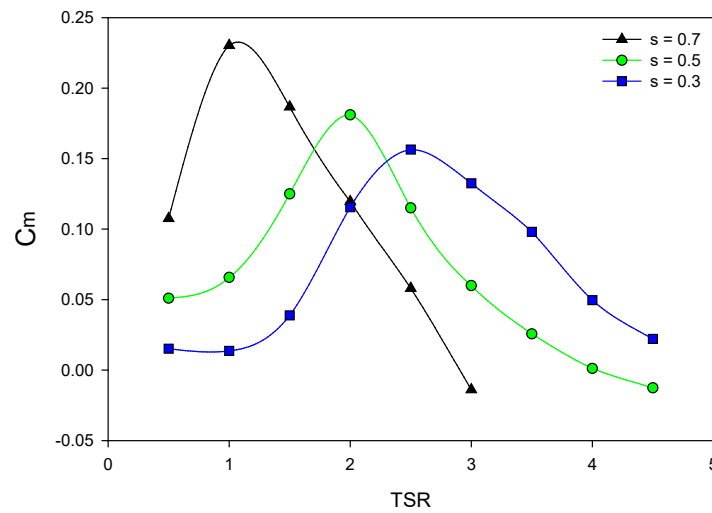
Rajah ini juga menunjukkan hubungan di antara C_m dan kedudukan azimuth bagi bilah tunggal semasa putaran. Daripada rajah tersebut, dapat dilihat bahawa C_m maksimum yang dicapai oleh turbin adalah ketika bilah berada di bahagian hulu, di mana pada masa itu, bilah rotor mengalami sudut serang yang tinggi, dan berlaku kecerunan tekanan yang ketara di bahagian atas dan bawah bilah, lalu menghasilkan daya angkat yang tinggi pada bilah. Hal ini membuktikan bahawa penghasilan tenaga maksimum

JADUAL 3. Perbandingan pengesahan hasil simulasi

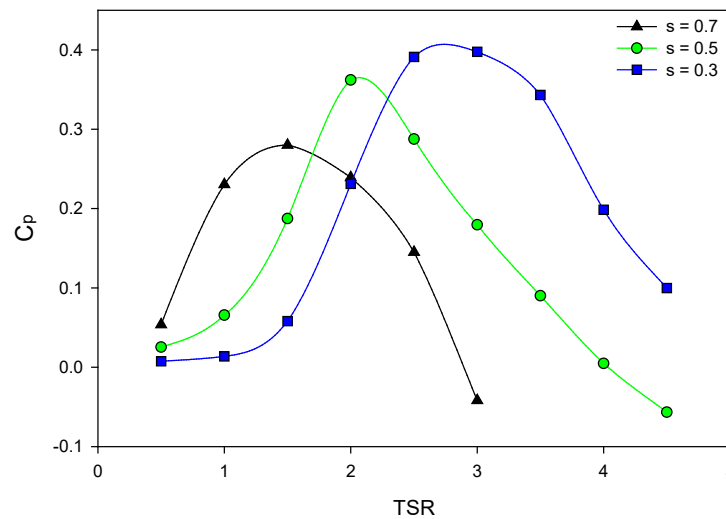
λ	1.5	2.5	3.0	3.5	4.5	5.5
C_p (A. Rezaeiha et. al., 2018)	0.015	0.15	0.32	0.4	0.41	0.32
C_p (Kajian kini)	0.0164	0.1592	0.3502	0.4128	0.4260	0.3240
$ \Delta C_p $ (%)	9.8	6.1	9.4	3.2	3.9	1.2



RAJAH 5. Lengkung C_m untuk $\sigma = 0.3, 0.5$ dan 0.7 pada nilai λ (a) 1.0, (b) 2.5



RAJAH 6. Lengkung C_m untuk $\sigma = 0.3, 0.5$ dan 0.7 pada nilai λ yang berbeza



RAJAH 7. Lengkung C_p untuk $\sigma = 0.3, 0.5$ dan 0.7 pada nilai λ yang berbeza

JADUAL 4. Nilai C_p maksimum untuk $\sigma = 0.3, 0.5$ dan 0.7 pada λ yang berbeza

σ	0.7	0.5	0.3
λ	1.5	2.0	2.8
C_{pmax}	0.280	0.362	0.391

dalam satu putaran penuh adalah ketika bilah berada di bahagian hulu. Kedudukan bersudut bagi C_m maksimum untuk ketiga-tiga konfigurasi turbin adalah di sekitar 90° .

Rajah 6 menunjukkan graf lengkung C_m - λ untuk ketiga-tiga VAWT. Seperti yang dapat dilihat dalam rajah, terdapat peningkatan C_m yang ketara apabila kepadatan turbin meningkat pada nilai λ yang rendah ($\lambda < 1$). Turbin berkepadatan tinggi ($\sigma = 0.7$) mencapai tahap maksimum C_m pada $\lambda = 1$ sementara C_m maksimum dicapai oleh turbin berkepadatan rendah ($\sigma = 0.3$) pada nilai λ yang tinggi, iaitu $\lambda = 2.5$. Penghasilan momen yang tinggi pada nilai λ yang rendah adalah penting untuk menanggung beban mula semasa permulaan operasi, seterusnya meningkatkan keupayaan mula diri VAWT untuk memulakan putaran (Singh, Biswas, & Misra, 2015) fast depleting or non-renewable (coal, fuel,

natural gas. Justeru, seperti dalam rajah 6, peningkatan dalam penghasilan C_m oleh turbin berkepadatan tinggi pada nilai λ yang rendah membuktikan rekaan turbin dengan nilai kepadatan tinggi mampu menyelesaikan masalah mula diri yang dihadapi oleh kebanyakan rekaan VAWT konvensional masa kini.

Rajah 7 menunjukkan graf lengkung C_p - λ untuk kepadatan $\sigma = 0.3, 0.5$ dan 0.7 . Berdasarkan rajah tersebut, dapat dilihat bahawa perubahan pada diameter turbin memberi impak yang besar terhadap pekali kuasa, C_p yang terhasil. Pengurangan nilai kepadatan turbin, dengan menambah saiz diameter turbin, akan menganjak puncak lengkung ke kanan, menandakan bahawa keupayaan turbin berkepadatan rendah menjana lebih banyak kuasa pada nilai λ yang tinggi.

Disamping itu, jika dilihat pada rajah, turbin berkepaduan rendah juga mempunyai julat operasi yang lebih besar berdasarkan keupayaannya menghasilkan nilai C_p positif terutamanya pada $\lambda > 1.5$ dan mencapai C_p maksimum, C_{pmax} pada $\lambda = 2.8$. Hal ini berbeza dengan turbin berkepaduan tinggi yang hanya mampu menghasilkan nilai C_p positif sehingga $\lambda = 2.8$ dan mula menghasilkan nilai C_p negatif pada $\lambda \geq 3$.

Secara umumnya, trend yang ditunjukkan oleh ketiga-tiga σ dalam rajah 7 menunjukkan persamaan dengan hasil kajian kesan kepaduan yang lain (Joo, Choi & Lee 2015; Q. Li et al. 2017), di mana dalam kajian tersebut, turbin berkepaduan rendah mempunyai julat operasi yang lebih luas dan menunjukkan prestasi yang lebih baik pada nilai λ yang tinggi sementara turbin berkepaduan tinggi menjana lebih banyak kuasa pada nilai λ yang rendah. Walau bagaimanapun, hasil simulasi dalam kajian ini menunjukkan beberapa perbezaan berbanding hasil kajian eksperimen (Lam, Liu, Peng, Lee & Liu 2018), di mana dalam kajian tersebut, C_{pmax} mempunyai nilai yang sama atau berkurangan jika nilai σ dan λ meningkat, berbeza dengan kajian ini di mana nilai C_{pmax} meningkat apabila apabila nilai σ dan λ meningkat (rujuk jadual 4). Hal ini disebabkan oleh kesan 3 dimensi yang diambil kira dalam kajian eksperimen seperti pembentukan vorteks pada hujung bilah serta kehadiran aci tengah dan topang (*strut*) yang menghasilkan daya seret tambahan, seterusnya menjejaskan keupayaan turbin untuk menghasilkan kuasa putaran. Kesan tambahan ini membawa kepada perbezaan (over-prediction) oleh kajian berangka menggunakan CFD seperti yang dijalankan dalam kajian ini.

KESIMPULAN

Berdasarkan kepada analisis ke atas hasil simulasi yang dijalankan, kesimpulan berikut telah diperolehi :

1. Perubahan pada nilai kepaduan turbin memberi kesan yang besar terhadap kecekapan dan prestasi kuasa VAWT.
2. Penjanaan kuasa secara maksimum berlaku ketika bilah berada di bahagian hulu, terutamanya pada sudut 90° .
3. Turbin yang mempunyai nilai kepaduan rendah mencapai C_{pmax} pada λ yang tinggi dan mempunyai julat operasi yang lebih besar manakala turbin berkepaduan tinggi mampu menghasilkan lebih banyak kuasa pada λ yang tinggi dan mempunyai kebolehan mula diri yang lebih baik berbanding turbin berkepaduan rendah.
4. Penggunaan teknologi simulasi CFD mampu menghasilkan keputusan analisa yang mencukupi dan berkeupayaan memberi gambaran yang jelas terhadap kecekapan dan prestasi kuasa VAWT.

Prestasi kuasa VAWT dalam kajian ini hanya dianalisa melalui penghasilan C_m dan C_p tanpa mengambil kira kesan kepaduan terhadap aerodinamik turbin. Oleh itu, pengaruh kepaduan terhadap aerodinamik turbin boleh dimasukkan

dalam kajian yang akan datang. Kajian lebih mendalam juga boleh dijalankan dengan menggunakan kaedah simulasi CFD 3 dimensi dan eksperimen terowong angin yang akan memberikan hasil yang lebih tepat dan gambaran yang lebih jelas.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia di atas tajaan menjalankan penyelidikan ini melalui Geran Galakan Penyelidik Muda GGPM-2017-094. Penulis juga ingin merakamkan penghargaan kepada editor, para penilai dan semua pihak yang terlibat dalam International Conference on Resilient Smart Technology, Environment and Design (ReSTED) 2018.

RUJUKAN

- Chen, J., Yang, H., Yang, M. & Xu, H. 2015. The effect of the opening ratio and location on the performance of a novel vertical axis Darrieus turbine. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.136>
- 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. *Applied Energy* 112: 601–609. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.064>
- Consul, C. A., Willden, R. H. J., Ferrer, E. & McCulloch, M. D. 2009. Influence of Solidity on the Performance of a Cross-Flow Turbine, 484–493.
- Dumitrescu, H., Cardoso, V., Dumitrache, A., & Frunzulic, F. 2010. Low-frequency noise prediction of vertical axis wind turbines, 11(1): 47–54.
- Ferreira, C. S. & Geurts, B. 2014. Aerofoil optimization for vertical-axis wind turbines. <https://doi.org/10.1002/we>
- Howell, R., Qin, N., Edwards, J. & Durrani, N. 2010. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy* 35(2): 412–422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.025>
- Jin, X., Zhao, G., Gao, K. & Ju, W. 2014. Darrieus vertical axis wind turbine: Basic research methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 212–225. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.021>
- Joo, S., Choi, H., & Lee, J. 2015. Aerodynamic characteristics of two-bladed H-Darrieus at various solidities and rotating speeds. *Energy* 90: 439–451. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.051>
- Lam, H. F., Liu, Y. M., Peng, H. Y., Lee, C. F. & Liu, H. J. 2018. Assessment of solidity effect on the power performance of H-rotor vertical axis wind turbines in turbulent flows. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10(2). <https://doi.org/10.1063/1.5023120>

- Li, C., Xiao, Y., Xu, Y. lin, Peng, Y. xin, Hu, G. & Zhu, S. 2018. Optimization of blade pitch in H-rotor vertical axis wind turbines through computational fluid dynamics simulations. *Applied Energy* 212(December 2017): 1107–1125. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.035>
- Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Shimizu, K., Ogasawara, T. & Kasuya, T. 2016. Effect of solidity on aerodynamic forces around straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel experiments (depending on number of blades). *Renewable Energy* 96: 928–939. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.054>
- Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Shimizu, K., Ogasawara, T., Nakai, A. & Kasuya, T. 2017. Effect of rotor aspect ratio and solidity on a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis by the panel method. *Energy* 121: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.112>
- Mohamed, M. H. 2013. Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance. *Energy* 57: 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.004>
- Rezaeiha, A., Kalkman, I. & Blocken, B. 2017. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy* 197: 132–150. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.128>
- Rezaeiha, A., Montazeri, H. & Blocken, B. 2018a. Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters. *Energy Conversion and Management* 169(May): 45–77. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.042>
- Rezaeiha, A., Montazeri, H. & Blocken, B. 2018b. Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy Conversion and Management* 156(November 2017): 301–316. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.026>
- Roh, S. C. & Kang, S. H. 2013. Effects of a blade profile, the Reynolds number, and the solidity on the performance of a straight bladed vertical axis wind turbine. *Journal of Mechanical Science and Technology* 27(11): 3299–3307. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0852-x>
- Rossetti, A. & Pavesi, G. 2013. Comparison of different numerical approaches to the study of the H-Darrieus turbines start-up. *Renewable Energy* 50: 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.025>
- Sabaeifard, P., Razzaghi, H. & Forouzandeh, A. 2012. Determination of vertical axis wind turbines optimal configuration through CFD simulations. *2012 International Conference on Future Environment and Energy* 28: 109–113.
- Singh, M. A., Biswas, A. & Misra, R. D. 2015. Investigation of self-starting and high rotor solidity on the performance of a three S1210 blade H-type Darrieus rotor. *Renewable Energy* 76: 381–387. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.027>
- Sumantraa, B. 2015. Numerical Analysis of Effect of Pitch Angle on a Small Scale Vertical Axis Wind Turbine, (November 2014), 2–9. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2869.7447>