

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
*Corresponding author: a.fazlizan@ukm.edu.my

Received 5 April 2019, Received in revised form 31 October 2019
Accepted 15 December 2019, Available online 28 February 2020

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 were 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

ABSTRAK

Tenaga angin merupakan salah satu sumber tenaga keterbaharuan yang berpotensi sebagai alternatif kepada penjana 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 kesan kepaduan dengan mengubah diameter turbin, terhadap prestasi kuasa VAWT menggunakan teknologi perkomputeran dinamik bendalir (CFD) secara berangka. 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.

Kata kunci: Kepaduan; perkomputeran dinamik bendalir; turbin angin paksi menegak; tenaga angin

PENGENALAN

Pada masa kini, penjana 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 alat 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 (HAWT) dan turbin angin paksi menegak (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 unggul bilah (Li et al. 2018), reka bentuk bilah (Ferreira & Geurts, 2014), penggunaan komponen tambahan seperti ram pandu (Chong et al. 2013) dan keamatan gelora (Rezaeiha et al. 2018a).

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

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

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 et al. 2009; Sabaeifard et al. 2012) dan panjang rentas bilah (Chen et al. 2015; Mohamed 2013). Secara umumnya, hasil kajian menunjukkan turbin berkepaduan tinggi mampu beroperasi dengan lebih baik pada nisbah laju hujung, λ , yang rendah ($\lambda \leq 1$) serta mempunyai kemampuan mula diri yang tinggi. Hal ini disumbangkan oleh kemampuan turbin berkepaduan tinggi dalam melambatkan fasa pegun dinamik hasil interaksi yang baik di antara bilah dengan aliran angin mendatang. Tambahan pula, 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 yang tinggi. Kesan kepaduan turbin dan prestasi kuasa VAWT juga telah dikaji secara mendalam dengan menggunakan pelbagai pendekatan seperti kaedah

aliran tiub berganda (Roh & Kang 2013), model vorteks (Dumitrescu et al. 2010) dan terowong angin (Li et al. 2016).

Kaedah berangka fideliti tinggi seperti perkomputeran dinamik bendalir (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 (BEM) telah dijalankan dan disimpulkan bahawa CFD dapat memberikan hasil yang tepat dan boleh dipercayai, kerana keupayaannya menganalisis pola aliran yang kompleks seperti tegun dinamik 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 et al. 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 VAWT jenis *Darrieus* 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

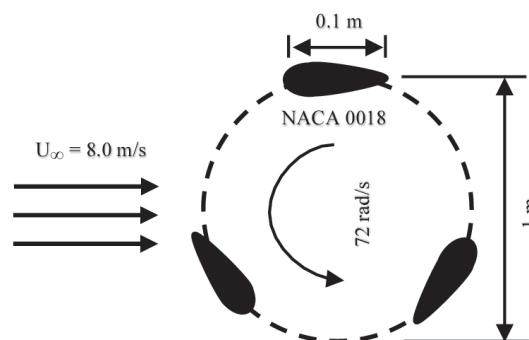
Untuk mengkaji kesan kepaduan turbin terhadap prestasi kuasa VAWT, satu model CFD 2 dimensi yang mengandungi *Darrieus* VAWT berbilah lurus telah dibangunkan. Turbin ini mempunyai kepaduan 0.3, dengan 3 bilah jenis NACA0018 bersimetri dan panjang rentas 0.1 m. Untuk menguji kecekapan turbin pada keadaan 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) berikut:-

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

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.

JADUAL 1. Parameter geometri dan operasi turbin

Parameter	Nilai
Bilangan bilah, N	3
Diameter turbin, D [m]	0.43 - 1
Jenis bilah	NACA0018
Panjang rentas, c [m]	0.1
Kepaduan, σ	0.3 - 0.7
Laju putaran, ω [rad/s]	72
Halaju angin, U_∞ [m/s]	8
Nisbah laju hujung, λ	1.5 - 4.5



RAJAH 1. Lukisan skema model turbin

Berdasarkan kajian-kajian terdahulu (Li et al. 2017; Peng et al. 2019; Rezaeiha et al. 2018b; Sagharichi et al. 2018; Subramanian et al. 2017), 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.

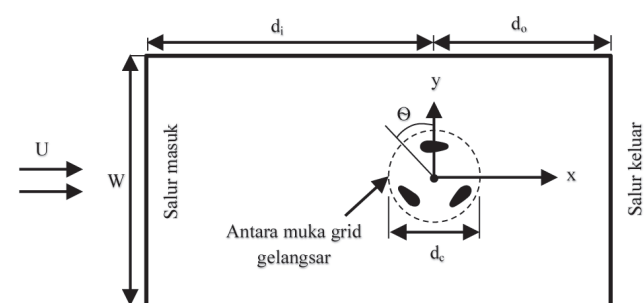
JADUAL 2. Perbezaan konfigurasi turbin

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

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 gelangсар (sliding mesh) telah digunakan 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 seterusnya menjejaskan kualiti hasil akhir simulasi. Justeru, kelebaran domain, jarak salur masuk dan keluar dari titik tengah turbin ditetapkan pada nilai $20D$ (D ; diameter turbin), $15D$ dan $10D$. Tetapan ini dibuat berdasarkan kajian kepekaan yang dijalankan oleh Rezaeiha et al. (2018b) di mana kajian tersebut memberikan panduan yang menyeluruh dalam menetapkan had sempadan domain pengkomputeran yang digunakan dalam simulasi CFD 2 dimensi.



RAJAH 2. Lukisan skema domain perkomputeran

Aliran tidak tetap di sekitar bilah dan turbin disimulasi secara berangka menggunakan perisian *ANSYS Fluent* pakej komersial dan pengiraan perkomputeran dibuat berdasarkan persamaan *incompressible, unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS). Model gelora jenis *Transition shear-stress transport* (SST) dengan 4 persamaan telah dipilih kerana ketepatan ketepatannya dalam mensimulasi aliran bendalir dan putaran rotor (Rezaeiha et al. 2019).

Untuk mendapatkan penghasilan C_m yang konsisten sepanjang putaran turbin, proses pengiraan ditetapkan untuk 21 putaran bagi satu simulasi memandangkan penghasilan C_m pada beberapa putaran di awal proses pengiraan adalah tidak konsisten. Penghasilan C_m direkodkan pada putaran turbin terakhir, iaitu pada putaran yang ke-21. C_m yang direkodkan tersebut akan digunakan untuk mengira purata pekali kuasa, C_p berdasarkan persamaan (3) berikut:-

$$C_p = C_m \cdot \lambda \quad (3)$$

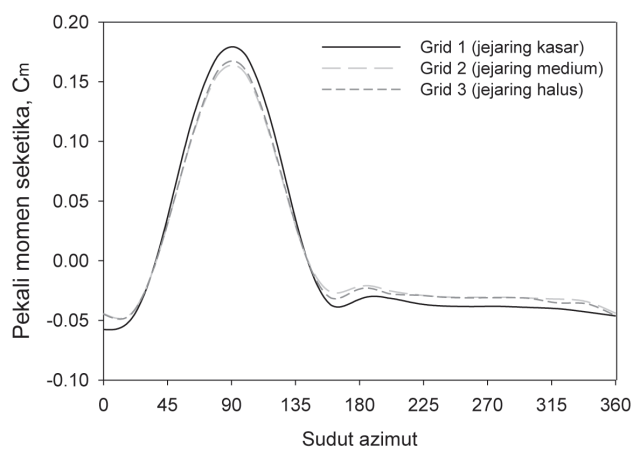
HASIL KAJIAN DAN ANALISA

PENGESAHAN MODEL KAJIAN

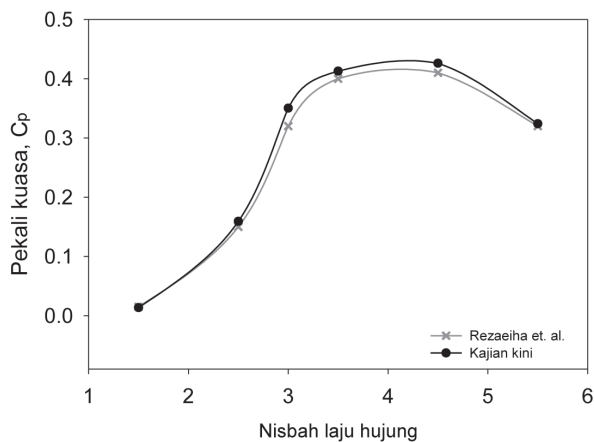
Ujian kebebasan grid telah dijalankan dengan menggunakan 3 grid yang mengandungi jumlah sel yang berbeza iaitu grid 1 mengandungi 280,000 sel, grid 2 mengandungi 440,000 sel dan 650,000 sel. Rajah 3 menunjukkan perbandingan hasil simulasi pekali momen seketika, C_m yang dihasilkan oleh bilah tunggal 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 perbezaan pada hasil simulasi yang tidak ketara, manakala grid 1 (jejaring kasar) menunjukkan perbezaan hasil yang ketara, terutama ketika bilah berada di bahagian hiliran ($180^\circ < \theta \leq 360^\circ$). Oleh itu, grid 2 dipilih sebagai saiz grid pilihan untuk digunakan dalam semua simulasi yang dijalankan memandangkan grid tersebut mampu memberikan hasil simulasi yang tepat berbanding grid 1, dengan kos dan masa pengkomputeran yang berpatutan (berbanding grid 3).

Kajian yang dijalankan oleh Rezaeiha et al. (2018c) telah dipilih sebagai perbandingan untuk ujian pengesahan model kajian ini. Perbandingan dibuat terhadap pekali kuasa,



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



RAJAH 4. Perbandingan kajian pengesahan kaedah simulasi

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 9.0% pada $\lambda = 3.0$. 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 $\lambda \leq 3.0$ disebabkan oleh kehadiran aci tengah (central shaft) yang diambil kira dalam model simulasi yang dijalankan oleh kajian tersebut 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. Jumlah momen yang dihasilkan oleh setiap bilah adalah sama untuk setiap kali putaran, melainkan hanya fasa beranjak (Chandramouli et al. 2014) Maka, dalam kajian ini, pemerhatian terhadap penghasilan momen oleh satu bilah sahaja dibuat berbanding hasil gabungan momen oleh ketiga-tiga bilah. Berdasarkan rajah-rajah tersebut, terdapat dua pemerhatian utama yang boleh dibuat. Yang pertama, C_m yang dihasilkan oleh ketiga-tiga konfigurasi turbin mengalami keadaan tidak tetap sepanjang putaran turbin pada λ rendah ($\lambda = 1.0$) manakala penghasilan C_m pada λ tinggi ($\lambda = 2.5$) adalah lebih stabil di sepanjang putaran turbin. Hal ini disebabkan oleh pelbagai fenomena aerodinamik yang berlaku pada bilah seperti pegun dinamik dan aliran sangkut (flow attachment) yang mempengaruhi penghasilan daya pada bilah.

JADUAL 3. Perbandingan pengesahan hasil simulasi

Nisbah laju hujung, λ	1.5	2.5	3.0	3.5	4.5	5.5
C_p (Rezaeiha et al. 2018c)	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 $ (%)	8.9	6.0	9.0	3.1	3.8	1.2

Pemerhatian kedua yang boleh dibuat pula adalah turbin berkepaduan tinggi beroperasi dengan baik pada λ rendah ($\lambda = 1.0$) manakala pada λ tinggi ($\lambda = 2.5$), turbin berkepaduan rendah menjana lebih banyak tenaga berbanding turbin berkepaduan tinggi. Seperti dalam Rajah 5a, turbin berkepaduan tinggi ($\sigma = 0.7$) menghasilkan C_m keseluruhan yang tinggi terutamanya semasa bilah berada di bahagian hulu ($0^\circ < \theta \leq 180^\circ$) manakala turbin berkepaduan rendah ($\sigma = 0.3$) mengalami penurunan awal selepas mencapai C_m maksimum dan menghasilkan C_m negatif sepanjang baki putaran akibat daripada fenomena pegun dinamik (dynamic stall) yang berlaku pada bilah sekaligus merencatkan penghasilan tenaga oleh turbin tersebut. Hal ini secara tidak langsung membuktikan keupayaan turbin berkepaduan tinggi dalam melambatkan proses pegun dinamik.

Walau bagaimanapun, pada λ yang tinggi, keupayaan turbin berkepaduan tinggi dalam menjana tenaga semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh kesan sekatan terhadap angin mendatang kerana saiz diameter turbin yang kecil dan menyebabkan angin mendatang terhalang dari melepasi turbin lalu tertolak ke bahagian sisi. Hal ini kemudiannya 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. Jika diperhatikan dalam Rajah 5b, penghasilan C_m oleh turbin berkepaduan tinggi begitu ketara, terutamanya semasa bilah berada di bahagian hiliran ($180^\circ < \theta \leq 360^\circ$). Penghasilan C_m negatif yang ketara ini turut disumbangkan oleh peningkatan interaksi di antara keracak (wake) yang dihasilkan oleh bilah dan aliran angin mendatan.

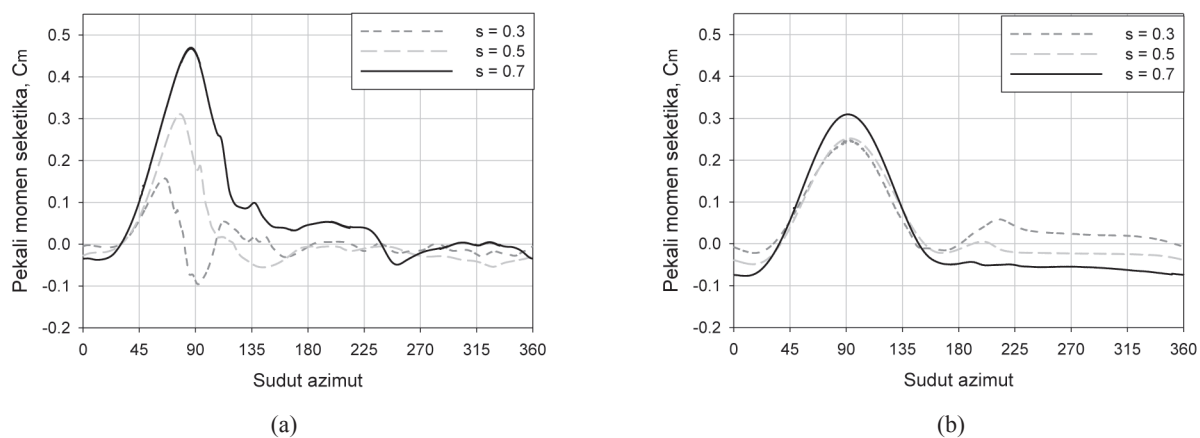
Dalam pada itu, kesan sekatan dan interaksi antara keracak bilah tidak begitu dirasai oleh turbin berkepaduan rendah pada λ yang tinggi. Berdasarkan Rajah 5b, hanya turbin berkepaduan rendah sahaja yang mempunyai keupayaan untuk menghasilkan C_m positif semasa bilah berada di kawasan hiliran yang menyumbang kepada penghasilan C_m keseluruhan positif. Hal ini menjadi

membuktikan keupayaan turbin berkepaduan rendah untuk beroperasi dengan baik pada λ yang tinggi

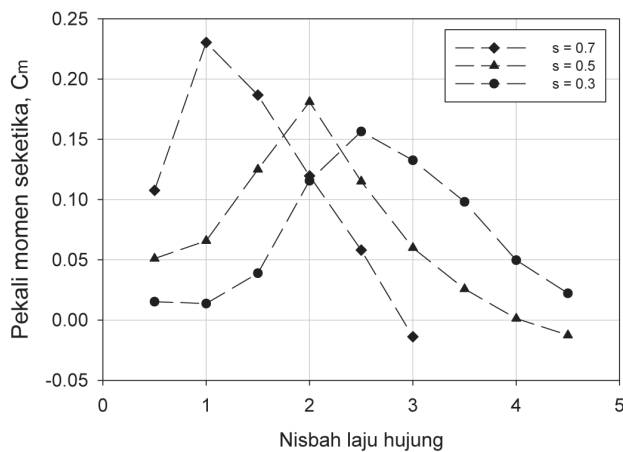
Rajah 5a-b juga menunjukkan hubungan di antara C_m dan kedudukan azimut bagi bilah tunggal semasa putaran. Daripada rajah tersebut, dapat dilihat bahawa C_m maksimum yang dicapai oleh turbin adalah ketika bilah berada di bahagian hulu, di mana pada masa itu, bilah rotor mengalami sudut serang yang tinggi, 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 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 kepaduan turbin meningkat pada nilai λ yang rendah ($\lambda < 1$). Turbin berkepaduan tinggi ($\sigma = 0.7$) mencapai tahap maksimum C_m pada $\lambda = 1$ sementara C_m maksimum dicapai oleh turbin berkepaduan 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 et al. 2015). Justeru, seperti dalam Rajah 6, peningkatan dalam penghasilan C_m oleh turbin berkepaduan tinggi pada nilai λ yang rendah membuktikan rekaan turbin dengan nilai kepaduan tinggi mampu menyelesaikan masalah mula diri yang dihadapi oleh kebanyakan rekaan VAWT konvensional.

Walau bagaimanapun, C_m yang dihasilkan oleh turbin berkepaduan tinggi mengalami penurunan yang ketara selepas mencapai nilai maksimum dan menghasilkan C_m negatif pada $\lambda \geq 2.8$. Hal ini disumbangkan oleh dua fenomena utama yang dialami oleh turbin berkepaduan tinggi pada λ yang tinggi, seperti yang diterangkan sebelum ini, iaitu kesan sekatan terhadap aliran angin mendatang dan kesan interaksi antara bilah yang semakin ketara terutama pada λ yang tinggi.



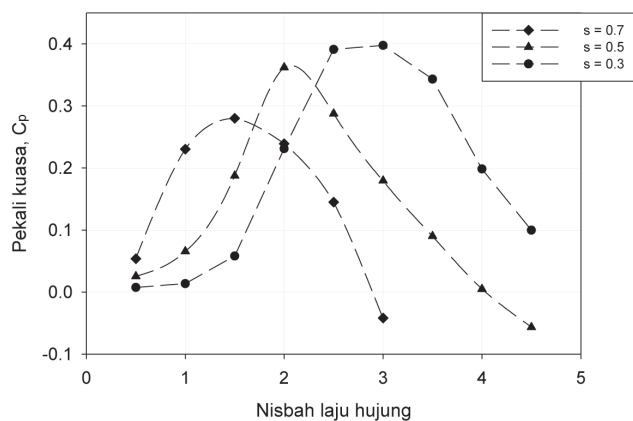
RAJAH 5. Lengkung C_m untuk $\sigma = 0.3, 0.5$ dan 0.7 pada nilai λ (a) 1.0, (b) 2.5



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

Rajah 7 menunjukkan graf lengkung C_p - λ untuk kepaduan $\sigma = 0.3, 0.5$ 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 kepaduan turbin, dengan menambah saiz diameter turbin, akan menganjak puncak lengkung ke kanan, menandakan bahawa keupayaan turbin berkepaduan rendah menjana lebih banyak kuasa pada nilai λ yang tinggi.

Di samping itu, jika dilihat pada rajah tersebut, 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 $\lambda \geq 3$.



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_{opt}	1.5	2.0	3.0
C_{pmax}	0.280	0.362	0.391

Secara umumnya, trend yang ditunjukkan oleh ketiga-tiga σ dalam Rajah 7 menunjukkan persamaan dengan hasil kajian kesan kepaduan yang lain (Joo et al. 2015; 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. 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. Kehadiran aci tengah dan topang ini juga menambah kesan sekatan terhadap aliran angin yang melalui turbin, terutamanya pada keadaan λ yang tinggi. Hal ini menyebabkan bilah pada bahagian hiliran tidak mampu menjana tenaga dengan baik kerana kesan sekatan tersebut. 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.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia di atas tajaan menjalankan penyelidikan

ini melalui Geran Universiti Penyelidikan, GUP-2018-131. 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

- Chandramouli, S., Premsai, T. P., Prithviraj, P., Mugundhan, V. & Velamati, R. K. 2014. Numerical analysis of effect of pitch angle on a small scale vertical axis wind turbine. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 4(4), 929-935.
- 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* 89:819-834.
- 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 omnidirection-guide-vane. *Applied Energy* 112: 601-609.
- Consul, C. A., Willden, R. H. J., Ferrer, E. & McCulloch, M. D. 2009. Influence of solidity on the performance of a cross-flow turbine. *Proceedings of the 8th European wave and tidal energy conference, Uppsala, Sweden*, 484-493.
- Dumitrescu, H., Cardos, V., Dumitrache, A. & Frunzulica, F. 2010. Low-frequency noise prediction of vertical axis wind turbines. *Proceedings of the Romanian Academy* 11(1), 47-54.
- Ferreira, C. S. & Geurts, B. 2014. Aerofoil optimization for vertical-axis wind turbines.
- 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.
- 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.
- Joo, S., Choi, H. & Lee, J. 2015. Aerodynamic characteristics of two-bladed H-Darrieus at various solidities and rotating speeds. *Energy* 90: 439-451.
- 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: 1107-1125.
- Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Shimizu, K., Ogasawara, T., Nakai, A., et al. 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.
- 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.
- Mohamed, M. H. 2013. Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance. *Energy* 57: 495-504.
- Peng, Y. X., Xu, Y. L., Zhan, S. & Shum, K. M. 2019. High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Aerodynamic force measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 184: 34-48.
- 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: 45-77.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H. & Blocken, B. 2018b. Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades. *Energy* 165: 1129-1148.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H. & Blocken, B. 2018c. 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: 301-316.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. 2019. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy* 180, 838-857.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sagharichi, A., Zamani, M. & Ghasemi, A. 2018. Effect of solidity on the performance of variable-pitch vertical axis wind turbine. *Energy* 161: 753-775.
- 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.
- Subramanian, A., Yogesh, S. A., Sivanandan, H., Giri, A., Vasudevan, M., Mugundhan, V. & Velamati, R. K. 2017. Effect of airfoil and solidity on performance of small scale vertical axis wind turbine using three dimensional CFD model. *Energy* 133: 179-190.

