

Kesan Rekabentuk Parametrik dalam Pengoptimuman Prestasi Turbin Angin Berpaksi Menegak: Satu Ulasan

(Effect of Parametric Design in the Performance Optimization of Vertical Axis Wind Turbine: A Review)

Muhamad Fadhli Ramlee^a, Noorliyana Ramlee^b & Ahmad Fazlizan*

^aInstitut Penyelidikan Tenaga Suria (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

^bJabatan Senibina Landskap, Fakulti Senibina dan Ekistik, Universiti Malaysia Kelantan, Malaysia

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

Received 19 July 2022, Received in revised form 6 March 2023

Accepted 6 April 2023, Available online 30 September 2023

ABSTRACT

Wind energy is one of the renewable energy resources that is gaining attention from industry players and researchers. In the last few years, there is an increasing interest in small-scale wind turbines as a power generator in built environments as the urgency to reduce carbon footprint in urban areas increases as well as reducing adverse effects of fossil fuels on human health and the environment. Generally, wind turbines can be categorized into two categories which are horizontal axis wind turbines (HAWTs) and vertical axis wind turbines (VAWTs). VAWTs have good potentials to be developed considering their suitability to be used in complex wind conditions associated with built environments. However, the number of research, publications, as well as basic understanding of flow phenomena associated to the performance of VAWTs such as dynamic stall, flow separation, flow curvature effect and blade-wake interaction are scarce. These flow phenomena are attributed by operational and geometrical parameters that significantly affect the overall performance of VAWTs that includes turbine power generation and aerodynamic characteristics. This paper provides a review and discussion of the effects of various design parameters such as blade profile, blade pitch angle and turbine solidity on the performance of VAWTs and serves as a basic guideline to the designer in designing an ideal VAWT.

Keywords: Optimization; design parameter; vertical axis wind turbine; wind energy; renewable energy

ABSTRAK

Tenaga angin merupakan salah satu sumber tenaga keterbaharuan yang semakin mendapat perhatian dalam kalangan pemain industri dan penyelidik. Permintaan terhadap turbin angin berskala kecil sebagai penjana kuasa di persekitaran terbina meningkat sejak beberapa tahun ini disebabkan oleh desakan dalam mengurangkan jejak karbon di kawasan bandar sekaligus mengurangkan kesan buruk penggunaan bahan api fosil terhadap kesihatan manusia dan alam sekitar. Secara amnya, turbin angin boleh dikategorikan kepada dua jenis iaitu turbin angin paksi melintang (HAWT) dan turbin angin paksi menegak (VAWT). VAWT mempunyai potensi yang besar untuk dibangunkan memandangkan kesesuaiannya dengan dengan keadaan angin kompleks di persekitaran terbina. Walau bagaimanapun, masih terdapat kekurangan dari segi bilangan penyelidikan dan penerbitan serta kepongkapan dalam kefahaman asas terhadap pelbagai fenomena aliran yang berkaitan dengan prestasi VAWT seperti pegun dinamik, pemisahan aliran, kesan lengkung aliran dan interaksi antara bilah. Fenomena aliran ini dipengaruhi oleh pelbagai parameter operasi dan reka bentuk turbin yang memberi kesan terhadap prestasi VAWT secara keseluruhan meliputi penghasilan kuasa dan sifat aerodinamik turbin. Kertas ini memberikan ulasan dan perbincangan terhadap kesan pelbagai parameter reka bentuk VAWT seperti profil bilah, sudut anggul bilah dan kepaduan turbin terhadap prestasi VAWT di samping menjadi panduan asas kepada para pereka dalam menghasilkan reka bentuk VAWT yang ideal.

Kata kunci: Pengoptimuman; parameter reka bentuk; turbin angin paksi menegak; tenaga angin; tenaga keterbaharuan

PENGENALAN

Sejak beberapa tahun yang lalu, fokus terhadap penggunaan tenaga keterbaharuan meningkat dengan mendadak akibat daripada peningkatan kesan buruk pencemaran terhadap alam sekitar dan kesihatan awam, kenaikan permintaan tenaga dan kekurangan sumber bahan api fosil yang semakin kritikal. Hal ini turut disokong oleh pelbagai kajian dan usahasama yang dijalankan, baik di peringkat global mahupun setempat bagi mengurangkan impak buruk pembakaran bahan api fosil. Pelbagai sumber tenaga keterbaharuan, seperti tenaga suria, angin, ombak dan biojisim mula diterokai sebagai sumber tenaga alternatif bagi menggantikan penjaanaan tenaga secara konvensional melalui pembakaran arang batu, gas asli dan petroleum yang diketahui mendatangkan kemudaratatan yang besar terutamanya terhadap alam sekitar dan manusia. Dalam

kalangan sumber tenaga keterbaharuan ini, tenaga angin diketahui mampu menjana tenaga elektrik pada kos yang berpatutan (Caglayan et al. 2019). Justeru, pelbagai usaha dan kajian yang mendalam telah dijalankan untuk menambah baik teknologi penghasilan tenaga elektrik melalui tenaga angin.

Minat terhadap bidang tenaga angin yang semakin meningkat ini boleh dibuktikan melalui pelbagai kajian yang dijalankan oleh pelbagai pihak bagi menaikkan imej bidang tenaga ini sebagai tenaga alternatif yang berpotensi besar untuk dibangunkan. Pelbagai artikel ilmiah meliputi kertas penyelidikan dan kertas ulasan berkaitan tenaga angin telah diterbitkan bagi membantu para penyelidik memahami dengan lebih mendalam aspek-aspek penting kajian bidang tenaga ini. Jadual 1 menyenaraikan beberapa kertas ulasan dan artikel ilmiah yang dijadikan rujukan dalam kajian ulasan ini.

JADUAL 1. Senarai beberapa kertas ulasan dan kertas penyelidikan berkaitan bidang tenaga angin

Topik	Penyelidik
Turbin angin paksi melintang (HAWT)	Chen et al. (2021), O'Brien et al. (2017), Bai dan Wang (2016), Bavanish dan Thyagarajan (2013).
Turbin angin paksi menegak (VAWT)	Karmakar dan Chattopadhyay (2022), Zhao et al. (2022), Möllerström et al. (2019), Liu et al. (2019), Wong et al. (2017), Al-Kayiem et al. (2016), Chen et al. (2015), Tjiu et al. (2015)
Ladang angin/keracak turbin	Zhao et al. (2021), Kan et al. (2020), Haces-Fernandez et al. (2019), Zergane et al. (2018), Göçmen et al. (2016), Shaheen dan Abdallah (2016), Shakoor et al. (2016).
Turbin angin berskala kecil untuk kegunaan bandaran/domestik	KC et al. (2019), Kumar et al. (2018), Tummala et al. (2016), Shonhiwa dan Makaka (2016), Karthikeyan et al. (2015)
Operasi, kawalan dan penyelenggaraan turbin angin	Fernández-Guillamón et al. (2019), De Azevedo et al. (2016), Njiri dan Söffker (2016), Rahman et al. (2015), Hossain dan Ali (2015)
Aerodinamik turbin angin	Thé dan Yu (2017), Bedon et al. (2014)
Kaedah penilaian prestasi VAWT	Ghasemian et al. (2017), Balduzzi et al. (2016), Jin et al. (2014), Miller et al. (2013), Islam et al. (2008)
Tenaga angin	Zhao et al. (2022), Liu et al. (2020), Murthy dan Rahi (2017), Kumar et al. (2016), Han et al. (2016)

JENIS-JENIS TURBIN ANGIN

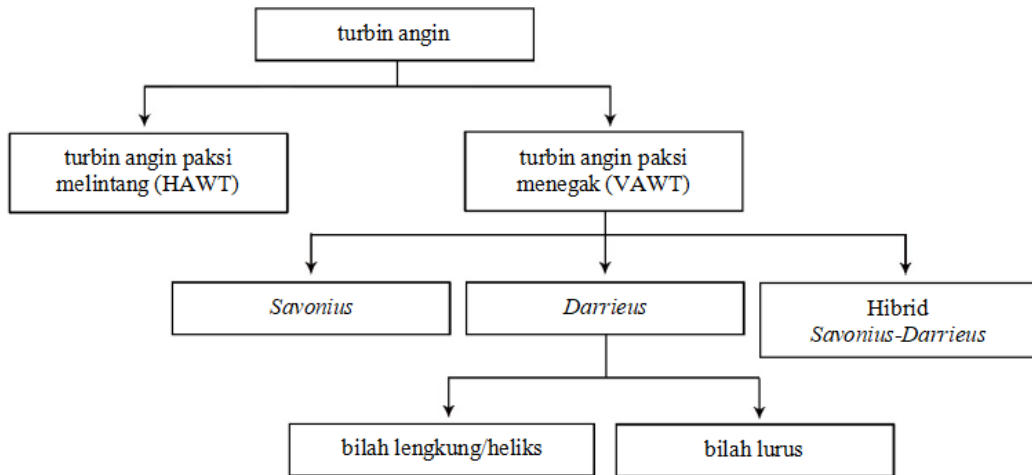
Turbin angin merupakan alatan utama yang digunakan untuk menukarkan tenaga kinetik angin kepada tenaga elektrik. Secara umumnya, terdapat dua kategori utama dalam pembahagian turbin angin iaitu berdasarkan paksi putaran bilahnya: turbin angin paksi melintang (HAWT) dan turbin angin paksi menegak (VAWT) (Goldstein, 2015). Perbezaan utama antara dua jenis turbin ini adalah pada paksi putaran rotor. Paksi putaran rotor HAWT adalah selari dengan permukaan bumi manakala paksi putaran rotor VAWT pula adalah serenjang dengan permukaan bumi. Dalam kategori VAWT, terdapat beberapa lagi pecahan turbin angin berdasarkan mekanisma penghasilan daya yang memutarakan bilah turbin tersebut iaitu VAWT

jenis *Savonius*, *Darrieus* dan Hibrid *Savonius-Darrieus*, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Perincian tentang setiap jenis turbin angin, sifat dan prinsip operasinya akan diterangkan dengan lebih terperinci dalam bahagian yang seterusnya.

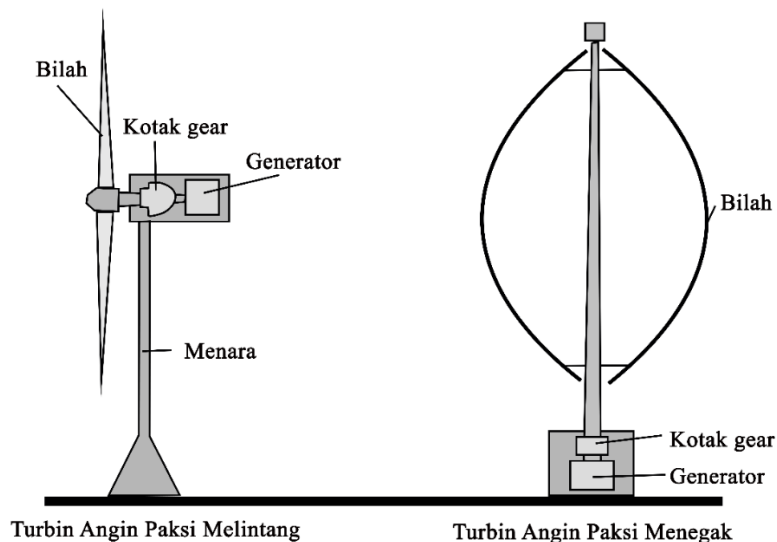
Seperti yang telah dinyatakan, turbin angin boleh dikategorikan kepada dua kumpulan utama, berdasarkan paksi putaran bilahnya iaitu HAWT dan VAWT. Untuk konfigurasi HAWT, rotor berada di atas menara dengan bilahnya dipasang menghadap arah aliran angin mendatang, manakala untuk VAWT pula, rotor dipasang secara menegak sekaligus memberikan kestabilan yang tinggi semasa turbin beroperasi di samping memudahkan proses penyelenggaraan turbin. Rajah 2 menunjukkan perbezaan terhadap struktur asas HAWT dan VAWT.

Berbeda dengan operasi VAWT yang tidak bergantung kepada arah angin, operasi HAWT sangat bergantung kepada arah dan kelajuan angin (Zhao et al. 2022). Oleh yang demikian, struktur HAWT moden dibina dengan beberapa bantuan kawalan pasif seperti kawalan penjajaran rotor dengan arah angin (Das Karmakar & Chattopadhyay, 2022). Hal ini menyebabkan menara terpaksa menanggung beban tambahan. Pemasangan HAWT berskala kecil di persekitaran terbuka pula menghadapi pelbagai kesukaran disebabkan oleh kelajuan dan arah angin yang berubah-

ubah serta keadaan angin yang kompleks dan bergelora yang dipengaruhi oleh geometri bangunan dan topografi kawasan (Sunderland et al. 2013). Keadaan rupa bumi ini akan menghasilkan ricih angin yang boleh memberi kesan ketara terhadap tahap penghasilan gelora dan pengeluaran tenaga keseluruhan turbin (Hedevang, 2014). Gelora angin bukan sahaja akan memberi kesan terhadap prestasi kuasa HAWT malah turut memberi kesan terhadap jangka hayat turbin (Dimitrov et al. 2015).



RAJAH 1. Jenis-jenis turbin angin



RAJAH 2. Perbezaan di antara HAWT dan VAWT

Perbezaan utama yang boleh diperhatikan di antara HAWT dan VAWT adalah pada struktur asas kedua-dua turbin. Setiap konfigurasi mempunyai kelebihan dan kekurangannya yang tersendiri. HAWT lebih tertumpu kepada penjanaaan angin berskala besar. Namun, untuk

penjanaaan tenaga berskala kecil terutamanya di kawasan angin berkelajuan rendah dan bergelora seperti di kawasan bandar, VAWT mempunyai lebih banyak kelebihan berbanding HAWT. Kelebihan utamanya adalah sistem penjananya yang berada pada aras bumi, sekaligus

memudahkan proses pengangkutan, pemasangan dan penyelenggaraan. Namun, aci pemacunya yang panjang menyebabkan turbin ini mengalami kesukaran untuk memulakan putaran. Hal ini kerana berat berlebihan pada aci pemacunya yang menyebabkan kelajuan angin rendah tidak mampu memutarakan rotor, berbanding HAWT yang mempunyai aci pemacu yang lebih pendek, seterusnya memudahkan rotor untuk mula berputar.

Selain itu, VAWT mempunyai beberapa kelebihan utama yang lain seperti kemampuan untuk beroperasi di kawasan angin berkelajuan rendah dan berkeadaan kompleks, kelajuan *cut-in* yang rendah untuk memulakan operasi, dan kos penyelenggaraan yang rendah. Dengan kelebihan-kelebihan yang dinyatakanmarinic ini, VAWT mempunyai potensi yang besar sebagai teknologi utama penjana tenaga angin di kawasan bandar. Jadual 2 memberikan perbandingan dengan lebih jelas terhadap perbezaan di antara HAWT dan VAWT.

JADUAL 2. Kelebihan dan kekurangan HAWT dan VAWT

Kriteria	HAWT		VAWT	
	Kelebihan	Kekurangan	Kelebihan	Kekurangan
Prestasi keseluruhan	Kecekapan tinggi	Memerlukan angin laju untuk beroperasi	Boleh beroperasi pada kelajuan angin rendah	Kecekapan rendah
	Kemampuan mula diri tinggi	Tidak sesuai untuk kawasan bandar	Sesuai dipasang di kawasan bandar	Kemampuan mula diri rendah
	Beban aerodinamik yang tetap	Gangguan bunyi yang tinggi	Gangguan bunyi yang rendah	Menghadapi masalah pegun dinamik
Mekanisma tambahan		Gegaran yang tinggi	Gegaran yang rendah	
		Memerlukan mekanisma rewang	Tidak memerlukan mekanisma rewang	
Bilah	Mampu menghasilkan daya lebih banyak	Kos penghasilan, pemasangan, dan selenggara yang tinggi	Kos penghasilan, pemasangan, dan selenggara yang rendah	
		Bentuk yang kompleks dan besar	Bentuk yang ringkas dan lebih kecil	Menghasilkan daya lebih rendah
Struktur keseluruhan	Aci pacu pendek, memudahkan turbin untuk mulakan operasi	Kos penghasilan, pemasangan, dan selenggara yang tinggi	Kos penghasilan, pemasangan, dan selenggara yang rendah	
		Komponen penting pada kedudukan yang tinggi	Komponen penting pada kedudukan yang rendah	Aci pacu panjang, menyukarkan turbin untuk mulakan operasi
		Sukar untuk dicapai	Mudah untuk dicapai	
		Kos pemasangan dan selenggara yang tinggi	Kos pemasangan dan selenggara yang rendah	

TURBIN ANGIN PAKSI MENEGAK

VAWT mempunyai pelbagai kelebihan berbanding HAWT sebagai penjana tenaga bersih berskala kecil di kawasan bandar kerana kesesuaian operasinya dengan keadaan angin di kawasan tersebut. VAWT boleh dibahagikan lagi kepada beberapa kategori, berdasarkan prinsip operasi VAWT yang menggunakan daya seret (Savonius) atau daya angkat (Darrieus), seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. VAWT jenis *Darrieus* pula mempunyai pelbagai reka bentuk bilah seperti bilah lurus, bilah lengkung dan bilah heliks. Setiap reka bentuk bilah mempunyai fungsi yang berbeza bergantung kepada keadaan operasi turbin angin tersebut. Namun, *Darrieus* VAWT berbilah lurus lebih digemari kerana kos penghasilan dan penyelenggaraan bilah yang

lebih rendah berbanding bilah lengkung dan heliks tetapi *Darrieus* VAWT dengan bilah heliks mampu menjana daya angkat yang lebih tinggi seterusnya mempunyai prestasi kuasa turbin yang lebih baik (Marinić-Kragić et al. 2019)

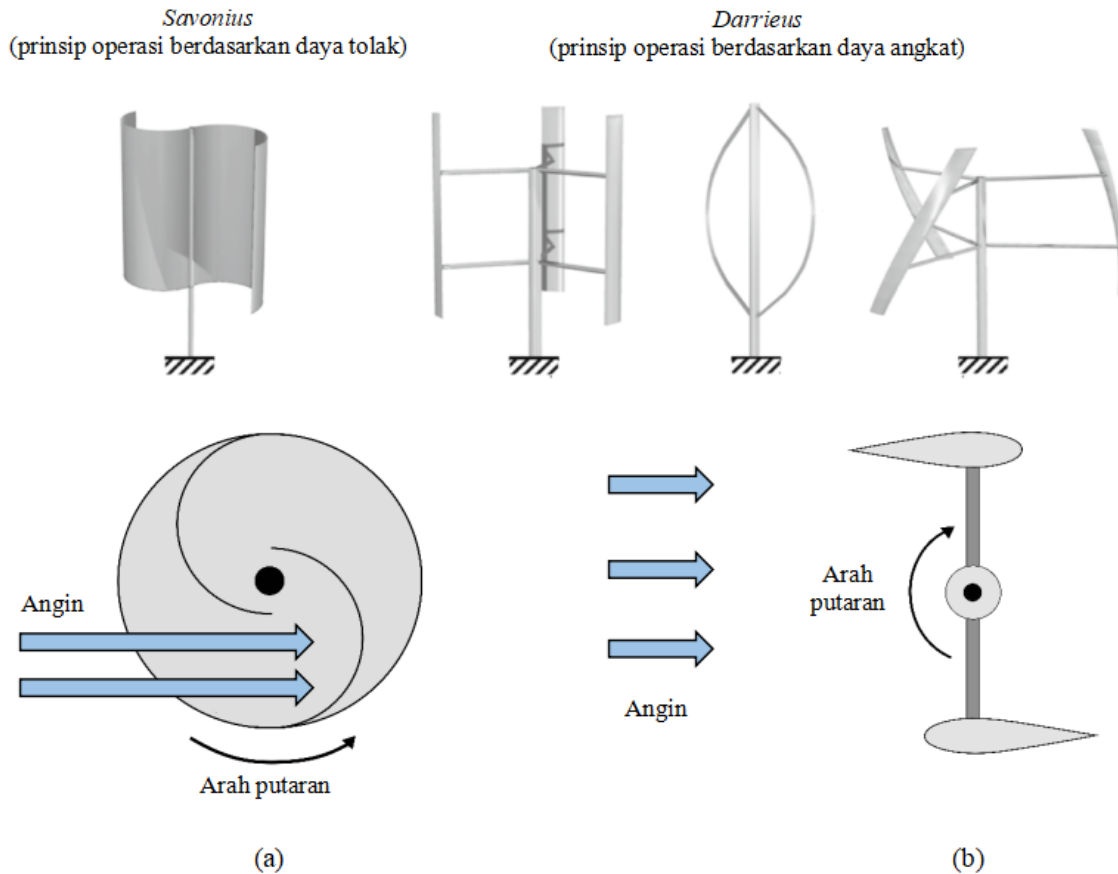
KESAN PARAMETER REKA BENTUK VAWT

PROFIL BILAH

Antara parameter reka bentuk yang boleh membantu meningkatkan prestasi turbin angin adalah penggunaan bilah yang bertepatan dengan keadaan operasi turbin kerana bilah merupakan antara komponen terpenting untuk

sebuah VAWT. Hal ini kerana jumlah daya yang dihasilkan pada bilah semasa operasi akan menentukan prestasi kuasa turbin tersebut secara keseluruhan. Oleh itu, penggunaan bilah yang bersesuaian sangat dititik beratkan dalam usaha untuk menghasilkan reka bentuk VAWT yang ideal, sama ada untuk meningkatkan keupayaan penghasilan

tenaga ke tahap maksimum mahupun untuk mengurangkan kos keseluruhan VAWT. Penggunaan bilah lurus lebih digemari kerana kos pembuatannya yang rendah dan struktur bilah yang lebih ringkas berbanding bilah lengkung dan bilah heliks. Pemilihan keratan bilah yang sesuai juga adalah penting dalam menentukan jumlah daya yang mampu dihasilkan pada bilah tersebut.



RAJAH 3. Jenis-jenis VAWT dan prinsip operasi (a) Savonius dan (b) Darrieus (Islam et al. 2008)

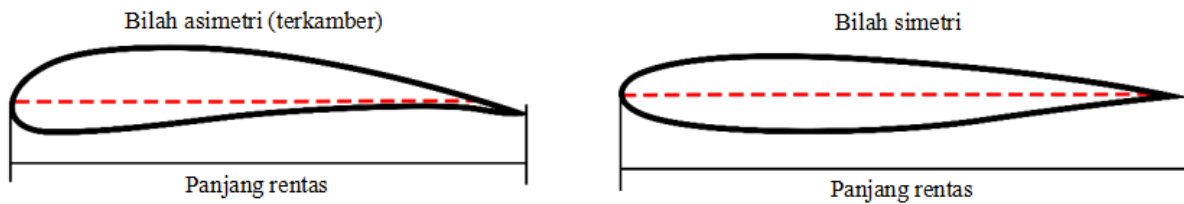
Penggunaan bilah terkamber (cambered blade) mempunyai beberapa kelebihan terhadap prestasi VAWT berbanding bilah simetri. Berdasarkan definisi, kamber merujuk kepada pembahagian asimetri di antara permukaan atas dan bawah bilah. Rajah 4 menunjukkan perbezaan bentuk di antara bilah terkamber dan bilah simetri.

Antara kelebihan penggunaan keratan bilah terkamber ini adalah dapat meningkatkan kemampuan mula diri VAWT pada keadaan nisbah laju hujung, λ yang rendah serta dapat meningkatkan prestasi kuasa VAWT. Seawal tahun 80-an lagi, pelbagai kajian telah dijalankan sama ada melalui kaedah eksperimen mahupun kaedah berangka untuk membuktikan pernyataan ini. Antaranya kajian awal yang dijalankan adalah oleh (Baker (1983) dan (Kirke,

1998). Dalam kajian tersebut, mereka mengesahkan bahawa penggunaan bilah terkamber memberikan impak yang besar terhadap prestasi turbin di kawasan hulu turbin, kawasan di mana tenaga yang dihasilkan oleh turbin adalah maksimum. Mereka turut menyatakan bahawa bilah terkamber mampu meningkatkan kemampuan mula diri turbin kerana kesan kamber pada bilah menjadikan turbin dapat beroperasi dengan lebih baik pada λ yang rendah. Hasil ini turut disokong oleh Claessens (2006) dalam kajiannya terhadap kesan bilah terkamber pada prestasi turbin. Apabila kamber bilah ditingkatkan dari 0% kepada 0.5% dan 0.8%, berlaku peningkatan ketara terhadap C_p maksimum yang dihasilkan oleh turbin. Sengupta et al. (2019) pula menjalankan perbandingan terhadap dua bilah

terkamber jenis S815 dan EN0005 dalam keadaan turbin berkepaduan tinggi dan angin berkelajuan rendah dengan menggunakan simulasi CFD 2D. Hasil kajian mereka selari dengan pendapat bahawa bilah terkamber mampu meningkatkan kemampuan mula diri VAWT melalui peningkatan penghasilan pekali tork, C_p . Kajian berkaitan kesan kamber pada bilah turut dikaji oleh Qamar dan Janajreh (2017) dengan menggunakan simulasi CFD dalam

keadaan angin kompleks, tidak tetap, dan bergelora. Hasil simulasi menunjukkan bahawa VAWT dengan bilah terkamber mampu mencapai C_p yang lebih tinggi pada keadaan λ rendah berbanding bilah simetri, seterusnya menjadikan turbin tersebut mampu menangani masalah keadaan angin berkelajuan rendah seperti kemampuan mula diri turbin dan penghasilan tork yang konsisten.



RAJAH 4. Profil bilah asimetri dan simetri

Pelbagai kajian juga turut dijalankan bagi mencari profil bilah yang dapat meningkatkan prestasi VAWT. Antaranya, Mohamed (2015) menjalankan kajian penilaian terhadap 25 jenis bilah. Kajian ini dijalankan dengan objektif untuk mengkaji kesesuaian penggunaan bilah dari 25 jenis ini kerana kebanyakan bilah yang dikaji ini kerap digunakan untuk HAWT, sebaliknya sangat jarang atau tidak pernah digunakan untuk VAWT. Hasil kajian tersebut menunjukkan bahawa bilah LS (1)-0413 berupaya meningkatkan C_p sebanyak 10% berbanding bilah NACA 0018 yang kerap dipasang pada VAWT. Hal ini disumbangkan oleh kemampuan bilah tersebut dalam melewati berlakunya pegun atau pemisahan aliran pada bilah yang merupakan fenomena aliran utama yang mempengaruhi prestasi turbin angin. Hasil kajian juga menunjukkan bilah NACA 63-415 mempunyai julat operasi yang lebih besar berbanding bilah lain. Lositaño dan Danao (2019) pula menjalankan kajian terhadap prestasi turbin angin jenis *H-Darrieus* VAWT berkuasa 5kW dan dilengkapi dengan bilah NACA0025 terkamber dengan pinggir depan tuberkel (tubercle leading edge, TLE). Kajian dijalankan dengan menggunakan simulasi CFD 3D berfideliti tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bilah terkamber TLE mampu menambah baik prestasi bilah terkamber tanpa TLE melalui peningkatan penghasilan daya angkat pada bilah seterusnya dapat mengurangkan kesan pemisahan aliran yang boleh menjejaskan prestasi bilah.

SUDUT ANGGUL

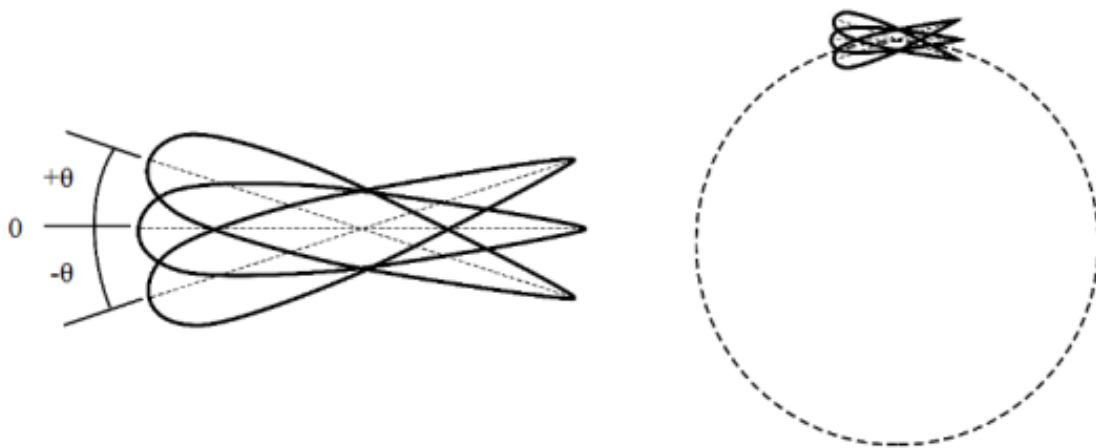
Sudut anggul (pitch angle), β memainkan peranan yang besar dalam menentukan sifat aerodinamik sesebuah

VAWT dan menjadi antara parameter reka bentuk penting dalam mengoptimumkan prestasi VAWT. Hal ini kerana sebarang perubahan yang ingin dilakukan pada parameter ini adalah mudah untuk dilaksanakan pada turbin tanpa memerlukan kos yang tinggi berbanding parameter yang lain seperti mengubah nisbah aspek turbin atau bentuk bilah. Secara umumnya, mengubah sudut anggul akan mengubah julat sudut serang (angle of attack), α yang dialami oleh bilah sepanjang tempoh putaran turbin. Penetapan sudut anggul pada bilah boleh dibuat melalui tiga cara: (i) dengan sudut anggul positif, (ii) dengan sudut anggul sifar dan (iii) dengan sudut anggul negatif. Gambaran sudut anggul bilah bagi ketiga-tiga keadaan boleh dilihat dalam Rajah 5. Sudut anggul bilah sama ada dengan sudut positif atau negatif akan memberi pengaruh terhadap prestasi VAWT. Misalnya, sudut anggul positif akan mengurangkan julat sudut serang, α yang dialami oleh bilah pada bahagian hulu turbin, tetapi akan meningkatkan julat sudut serang, α pada bahagian hilir (Rezaeiha et al. 2017)

Kesan sudut anggul terhadap prestasi VAWT telah dikaji oleh beberapa penyelidik (Rezaeiha et al. 2017; Jain & Abhishek, 2016; Paraschivoiu et al. 2009) dengan menggunakan pelbagai kaedah sama ada secara eksperimen mahupun berangka. Sebagai contoh, antara kajian awal mengenai kesan sudut anggul bilah terhadap prestasi VAWT berbilah lurus telah dijalankan (Paraschivoiu et al. 2009; Paraschivoiu, 2002) dengan menggunakan kaedah aliran tiub berkembar berganda (DMST). Berdasarkan kajian tersebut, sudut anggul yang optimum mampu menambah baik prestasi turbin selain mampu meningkatkan penghasilan tenaga tahunan sebanyak 30%. Namun, ketepatan hasil yang rendah oleh model berfideliti rendah

melalui kaedah momentum elemen bilah (BEM) dalam meramal fenomena aliran aerodinamik VAWT telah ditekankan oleh Ferreira et al. (2014). Ferreira dan Scheurich (2014) pula menggunakan model berfideliti sederhana iaitu model panel 2D dan model pengangkut kepusingan 3D untuk mengkaji kesan sudut anggul tetap. Kajian yang dijalankan melibatkan sudut anggul -3° , 0° dan $+3^\circ$ dan hasil kajian tersebut menunjukkan bahawa perubahan yang berlaku terhadap penghasilan beban seketika dan daya putaran di kawasan hulu dan hiliran

turbin adalah tidak ketara untuk tetapan sudut anggul yang dikaji. Rezaei et al. (2017) pula menggunakan kaedah simulasi CFD berfideliti tinggi untuk mengkaji kesan sudut anggul pada julat -7° hingga $+3^\circ$ dan hasil kajian menunjukkan terdapat peningkatan dalam penghasilan C_p sebanyak 6.6% dengan menggunakan sudut anggul -2° pada $\lambda = 4$. Kajian berkaitan kesan sudut anggul turut dijalankan oleh Yang et al. (2018), Sumantraa et al. (2014), Zhang et al. (2014) dan Chen dan Kuo (2013) dengan menggunakan simulasi CFD



RAJAH 5. Sudut anggul bilah, β

Selain daripada menggunakan kaedah berangka, kesan sudut anggul turut dikaji dengan menggunakan kaedah eksperimen. Klimas dan Worstell (1981) merupakan antara penyelidik terawal yang menjalankan eksperimen terhadap kesan sudut anggul bilah. Mereka menjalankan kajian terhadap sudut anggul -7° , -4° , -2° , -0.5° , $+1^\circ$ dan $+3^\circ$ untuk Darrieus VAWT berdiameter 5 m di kawasan lapangan. Mereka dapati bahawa sudut anggul -2° merupakan sudut anggul optimum berbanding sudut anggul yang lain. Kesan sudut anggul -7.8° , -3.9° , 0° , $+3.9^\circ$ dan $+7.8^\circ$ terhadap C_p turut dikaji oleh Fiedler & Tullis (2009) dengan menggunakan kaedah terowong angin. Kajian tersebut merumuskan bahawa sudut anggul negatif mampu memberikan prestasi turbin yang optimal. Kajian eksperimen yang lain berkaitan sudut anggul turut dijalankan oleh Guo et al. (2019) yang menggunakan kaedah terowong angin untuk mengkaji kesan paksi anggul condong bilah terhadap prestasi keseluruhan turbin. Bilah dengan paksi anggul condong dipasang pada VAWT dan diuji dalam terowong angin dengan kelajuan angin yang rendah. Hasil eksperimen menunjukkan bahawa berlaku pengurangan C_p sebanyak 62.5% dan 59% pada kedudukan paksi bilah condong 2° dan 13° berbanding kecondongan optimum paksi bilah iaitu pada 8° .

Berdasarkan kajian-kajian lepas yang dibentangkan, sama ada yang dijalankan menggunakan kaedah berangka mahupun kaedah eksperimen, menunjukkan bahawa perubahan pada sudut anggul bilah memberikan kesan terhadap prestasi VAWT bergantung kepada keadaan operasi turbin.

KEPADUAN

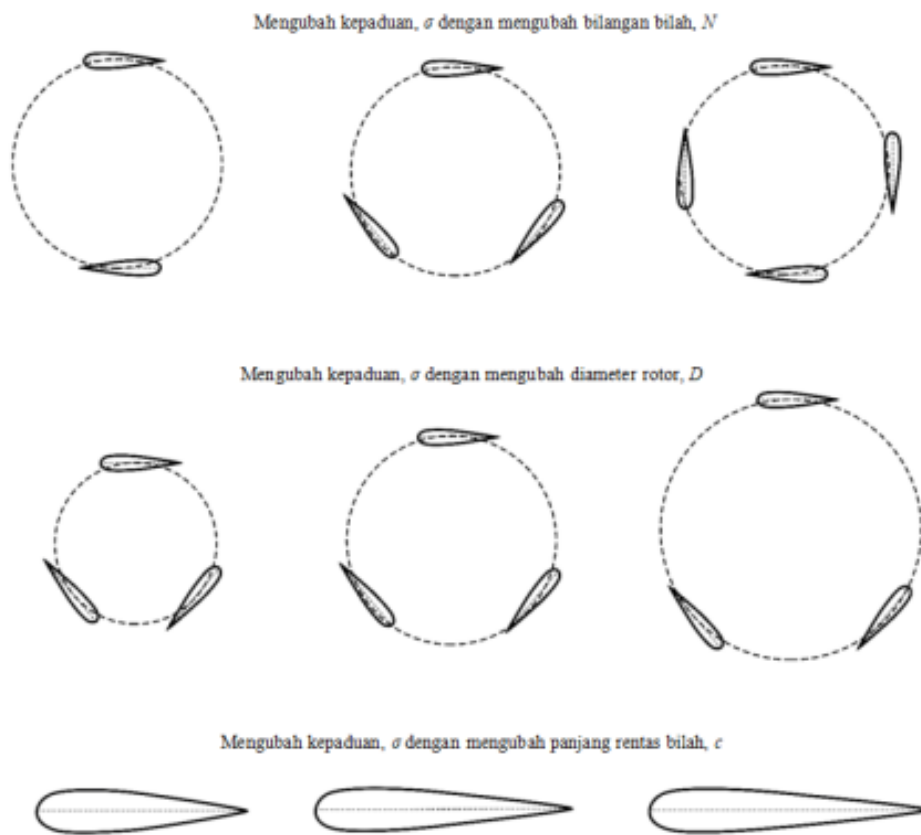
Kepaduan turbin memberi pengaruh yang ketara bukan sahaja terhadap penghasilan maksimum C_p malahan juga terhadap λ di mana turbin mencapai nilai maksimum C_p tersebut. Kepaduan turbin boleh didefinisikan sebagai nisbah luas bilah dengan luas sapuan, berdasarkan persamaan (1) berikut :

$$\sigma = Nc/D \quad (1)$$

di mana N adalah bilangan bilah, c adalah panjang rentas bilah dan D adalah diameter rotor. Merujuk kepada persamaan di atas, mengubah mana-mana di antara

ketiga-tiga parameter tersebut, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6, akan mengubah nilai kepaduan yang seterusnya memberi kesan terhadap prestasi turbin. Menentukan kepaduan turbin yang optimum adalah suatu tugas yang memerlukan pertimbangan yang tepat. Hal ini kerana turbin berkepaduan tinggi mencapai C_p maksimum pada λ lebih rendah berbanding turbin berkepaduan rendah. Hal ini bermaksud turbin tersebut mampu menghasilkan jumlah tenaga yang tinggi pada keadaan operasi λ yang rendah dan mempunyai kemampuan mula diri yang baik. Namun, kecekapan turbin tersebut menurun dengan mendadak selepas mencapai C_p maksimum, menghasilkan lengkung prestasi yang lebih tajam dan julat operasi yang lebih kecil. Dalam pada itu,

turbin berkepaduan rendah pula mencapai C_p maksimum lebih lewat, bermaksud turbin tersebut beroperasi dengan baik dan menjana tenaga lebih banyak pada keadaan operasi λ yang tinggi. Turbin ini juga mempunyai julat operasi yang lebih besar dan lengkung prestasi yang lebih mendatar. Hal ini disokong oleh pelbagai kajian berkaitan kepaduan yang dijalankan antaranya oleh Ramlee et al. (2022), Peng et al. (2019) dan Rezaeiha et al. (2018). Rajah 7 menunjukkan dengan lebih jelas hubungkait di antara kepaduan, λ dan C_p . Justeru, reka bentuk turbin dengan kepaduan yang optimum perlulah mengambil kira keadaan operasi turbin tersebut, sama ada hendak dipasang dikawasan angin berkelajuan tinggi atau rendah.



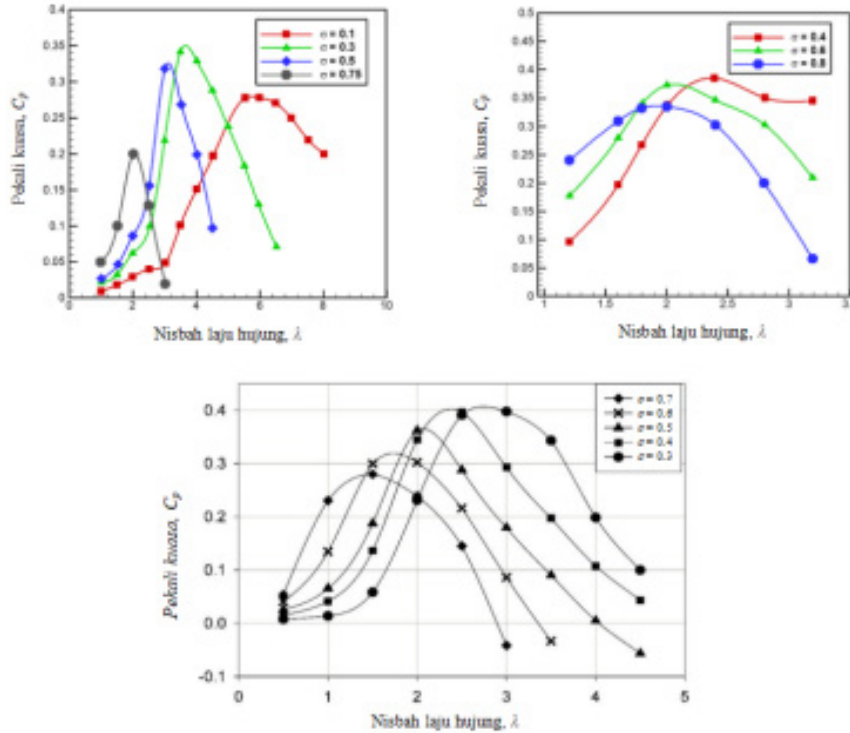
RAJAH 6. Parameter reka bentuk yang memberi kesan terhadap kepaduan turbin angin

Pelbagai kajian berkaitan kesan kepaduan terhadap prestasi VAWT telah dikaji sebelum ini. Misalnya, Gang dan Kau (2015) menjalankan kajian terhadap kesan panjang rentas bilah dan sudut pemasangan bilah. Hasil kajian tersebut menunjukkan C_p pada kepaduan yang optimum meningkat sebanyak 15%. C_p yang dijana oleh turbin meningkat pada mulanya dan kemudian menurun apabila kepaduan meningkat. Julat operasi turut mengecil apabila kepaduan turbin meningkat. Sementara itu, kajian lain berkaitan kepaduan turut dijalankan oleh Gosselin et al. (2013) yang menunjukkan turbin beroperasi secara

optimum apabila kepaduan bersamaan 0.2. Turbin berkepaduan rendah turut digalakkan untuk H-Darrieus VAWT bagi mendapat julat operasi yang lebih besar (Rezaeiha et al. 2018). Lee dan Lim (2015) pula mengkaji kesan pelbagai parameter seperti panjang rentas bilah, sudut helikal, sudut anggul dan diameter rotor terhadap prestasi VAWT. Hasil kajian yang dijalankan menunjukkan bahawa bilah dengan panjang rentas yang besar dan rotor berdiameter kecil, yang mana kedua-duanya merujuk kepada turbin yang mempunyai nilai kepaduan yang tinggi mampu meningkatkan prestasi kuasa turbin pada λ yang

rendah. Namun, turbin berkepaduan rendah menunjukkan prestasi yang lebih baik pada λ yang tinggi. Pemerhatian yang dilakukan menunjukkan kuasa dominan yang mempengaruhi bilah adalah daya angkat yang dihasilkan

pada λ yang rendah. Walau bagaimanapun, apabila λ meningkat, daya seret adalah daya dominan berbanding daya angkat yang menyebabkan berlaku perubahan pada prestasi turbin



RAJAH 7. Kesan kepaduan terhadap prestasi VAWT pada λ yang berbeza (Lee & Lim, 2015; Sabaeifard et al. 2012; Ramlee et al. 2022)

Selain itu, turbin berkepaduan tinggi mempunyai kemampuan mula diri yang lebih baik berbanding turbin berkepaduan rendah disebabkan oleh penghasilan purata pekali tork, C_T statik yang tinggi pada permulaan operasi (Mohamed 2013). Tambahan pula, konfigurasi turbin tersebut mampu mencapai C_p yang tinggi pada λ yang rendah, yang bermaksud turbin tersebut mampu beroperasi dengan kelajuan putaran yang rendah (Li et al. 2015). Hal ini boleh memberi kelebihan kepada VAWT berskala besar kerana dengan operasi kelajuan yang rendah, daya emparan berlebihan akan dapat dikurangkan. Jadual 3 merumuskan kajian-kajian terdahulu berkaitan kepaduan yang dijalankan secara berangka mahupun secara eksperimen.

LAIN-LAIN LANGKAH PENGOPTIMUMAN VAWT

Lazimnya, langkah-langkah yang dilakukan untuk mengoptimumkan prestasi VAWT lebih tertumpu kepada perubahan parameter reka bentuk termasuklah profil bilah, sudut angkul dan kepaduan seperti yang telah dibincangkan dalam bahagian sebelum ini. Namun,

terdapat juga pelbagai langkah lain yang boleh dilakukan, selain dari mengubah parameter reka bentuk, seperti penggunaan peralatan tambahan yang dipasang bersama turbin untuk menghasilkan aliran angin yang lebih tertumpu. Misalnya, Chong et al. (2013) menjalankan penyelidikan terhadap kesan penggunaan ram pandu terhadap prestasi VAWT. Mereka dapati bahawa penghasilan tork meningkat sebanyak 58% dan 39% pada $\lambda = 2.5$ dan $\lambda = 5.1$. Wong et al. (2018) pula mengkaji kesan penggunaan pemesong di bahagian hulu turbin. Hasil kajian mereka menunjukkan penggunaan pemesong dapat meningkatkan halaju angin di bahagian hulu sebanyak 25% seterusnya mampu meningkatkan lagi prestasi VAWT terutamanya di kawasan angin berkelajuan rendah. Li et al. (2018) menggunakan kaedah eksperimen untuk mengkaji kesan penggunaan pengumpul angin berbentuk kon terpenggal pada kemampuan mula diri *Darrieus* VAWT. Mereka menyimpulkan bahawa purata tork statik yang dihasilkan oleh turbin meningkat sebanyak 24.2% disebabkan oleh penggunaan pengumpul angin tersebut.

Di samping itu, terdapat juga pelbagai konsep reka bentuk baru yang diperkenalkan dalam beberapa kajian bagi meningkatkan prestasi VAWT. Xu et al. (2018)

JADUAL 3. Rumusan kajian-kajian berkaitan parameter reka bentuk yang memberi kesan terhadap kepaduan turbin angin

Tahun	Kaedah	Parameter reka bentuk yang terlibat	Objektif	Hasil kajian
Ramlee et al. (2022)	CFD 2D	Diameter rotor	Mengkaji kesan perubahan diameter rotor dengan nilai $\sigma = 0.3 - 0.7$ terhadap prestasi turbin	Menurunkan σ dari 0.7 ke 0.3 akan meningkatkan maksimum C_p sebanyak 30%. Namun, pada λ rendah, turbin $\sigma = 0.7$ mampu menjana pekali momen seketika, C_m lebih tinggi berbanding turbin $\sigma = 0.3$ seterusnya meningkatkan kemampuan mula diri turbin.
Peng et al. (2019)	Terowong angin	Panjang rentas bilah	Mengkaji kesan perubahan parameter tertentu terhadap penghasilan daya aerodinamik pada bilah	Turbin berkepaduan tinggi mempunyai kemampuan mula diri yang lebih baik dan mampu mencapai prestasi tinggi pada λ rendah
Rezaeieha et al. (2018)	CFD 2D	Bilangan bilah Panjang rentas bilah	Mengkaji kesan perubahan pada σ turbin dan bilangan bilah terhadap prestasi aerodinamik turbin	Berlaku peningkatan pada maksimum C_p sebanyak 22.5% apabila kepaduan meningkat. Nilai maksimum C_p juga bergerak ke arah λ yang rendah
Sagharichi et al. (2018)	CFD 2D	Bilangan bilah	Mencari σ yang optimum pada turbin yang mempunyai sudut angkul boleh ubah	Sudut angkul boleh ubah pada turbin berkepaduan tinggi mampu meningkatkan kemampuan mula diri turbin
Subramanian et al. (2017)	CFD 3D	Bilangan bilah	Mengkaji kesan σ dan profil bilah terhadap prestasi turbin	Turbin dengan dua bilah menjana kuasa lebih tinggi berbanding tiga bilah
Li et al. (2017)	Kaedah panel	Panjang rentas bilah	Mengkaji kesan nisbah bidang dan σ terhadap prestasi kuasa turbin	Nisbah bidang turbin mampu meningkatkan penghasilan maksimum C_p
Li et al. (2016)	Terowong angin	Bilangan bilah	Mengkaji kesan bilangan bilah berbeza terhadap penghasilan daya aerodinamik pada bilah	Peningkatan pada kepaduan menyebabkan berlaku penurunan pada perbezaan tekanan bilah. Peningkatan kepaduan juga meningkatkan C_T tetapi mengurangkan C_p .
Eboibi et al. (2016)	Terowong angin	Panjang rentas bilah	Mengkaji kesan perubahan pada σ terhadap prestasi turbin	Turbin berkepaduan tinggi mempunyai prestasi keseluruhan lebih baik berbanding turbin berkepaduan rendah dan menghasilkan lengkung prestasi yang lebih kecil dan tinggi kecerunan.
Joo et al. (2015)	CFD 3D	Panjang rentas bilah	Mengkaji kesan σ dan laju putaran turbin pada sifat aerodinamik turbin	Meningkatkan σ mampu meningkatkan penghasilan tork. Namun, mengurangkan σ mampu mengurangkan kesan sekatan angin dan interaksi bilah.
Singh et al. (2015)	Ujian lapangan	Diameter rotor	Mengkaji kemampuan mula diri turbin dengan σ yang berbeza	Turbin berkepaduan tinggi mempunyai prestasi keseluruhan yang lebih baik berbanding turbin berkepaduan rendah dan mampu berpusing lebih baik pada permulaan operasi

mengkaji prestasi turbin angin dengan rotor berbentuk cakera melalui kaedah eksperimen dan berangka. Pengaruh λ , sudut angkul dan sudut bukaan terhadap prestasi kuasa turbin tersebut telah dikaji. Model turbin yang diperkenalkan mampu menghasilkan C_p yang lebih tinggi berbanding turbin angin jenis lain. (Kishore et al. 2013) membangunkan turbin tenaga mudah alih berskala kecil yang diberi nama SWEPT (small wind energy portable turbine) dan dilengkapi dengan peresap angin. Mereka mendapati bahawa turbin tersebut mempunyai kelajuan angin *cut-in* yang rendah, iaitu pada 2.7 m/s serta mampu menghasilkan 0.83W tenaga elektrik pada kelajuan angin terkadar 5 m/s. Ying et al. (2015) pula menjalankan penyelidikan berangka dan eksperimen terhadap novel turbin angin dengan aliran-omni yang direka bentuk khusus untuk kawasan bandar. Turbin tersebut mempunyai kemampuan mula diri pada kelajuan angin 1.6 m/s dan C_p maksimum sekitar 0.17. Reka bentuk turbin angin baru yang diberi nama turbin angin paksi silang (cross-axis wind turbine, CAWT) pula diperkenalkan oleh Chong et al. (2017). Turbin tersebut, yang menggabungkan kelebihan HAWT dan VAWT, dilengkapi dengan tiga bilah menegak, enam bilah melintang dan satu pemegang pada sudut 45°. Kajian terhadap prestasi turbin tersebut yang dijalankan mendapati bahawa kelajuan putaran turbin meningkat sebanyak 70% dan C_p yang dihasilkan adalah 2.8 kali lebih tinggi berbanding reka bentuk turbin konvensional.

Selain itu, kedudukan VAWT dengan posisi yang tepat dan gabungan beberapa VAWT dalam susunan yang betul juga dapat membantu meningkatkan prestasi turbin. Pelbagai kajian telah dijalankan bagi mengesahkan pernyataan ini. Misalnya, Dabiri (2011) dan Kinzel et al. (2012) menjalankan satu siri ujian lapangan terhadap sepasang VAWT yang diletakkan bersebelahan dengan putaran yang berlawanan antara satu sama lain. Hasil kajian menunjukkan bahawa VAWT yang diletakkan berhampiran mampu mengekstrak tenaga dari keracak turbin lain seterusnya berpotensi meningkatkan pengeluaran tenaga. Hal ini turut dipersetujui oleh Vergaerde et al. (2020), yang menjalankan ujian terowong angin terhadap susunan turbin yang sama. Peningkatan C_p sebanyak 13% - 16% direkodkan untuk VAWT yang diletakkan berpasangan berbanding VAWT secara tunggal. Zheng et al. (2020) pula menggunakan kaedah simulasi CFD 2D bagi membandingkan prestasi kuasa daripada empat susunan VAWT yang berbeza, iaitu VAWT susunan tunggal, VAWT susunan berkembar secara selari dan bersilang serta kluster 3-VAWT. Mereka mendapati bahawa kluster 3-VAWT mempunyai prestasi yang lebih baik berbanding VAWT susunan tunggal dan berkembar, dengan purata C_p sekitar 11.1% lebih tinggi berbanding VAWT tunggal.

KESIMPULAN

VAWT merupakan turbin angin yang sesuai untuk digunakan sebagai penjana tenaga bersih berskala kecil di kawasan angin berkelajuan rendah dengan keadaan angin yang kompleks dan bergelora seperti di kawasan bandar. Kemampuannya untuk beroperasi dengan baik di persekitaran terbina menjadikan turbin angin jenis ini mempunyai potensi yang besar untuk bangunkan. Namun begitu, prestasi kuasa yang lebih rendah berbanding turbin jenis HAWT terutamanya dari segi kemampuan mula diri dan penghasilan C_p merupakan antara kekurangan utama VAWT yang memerlukan pelbagai kajian mendalam perlu dijalankan bagi mengatasi permasalahan ini. Kertas ini memberikan ulasan terhadap kesan pelbagai parameter reka bentuk VAWT seperti profil bilah, sudut angkul bilah dan kepaduan turbin terhadap prestasi VAWT yang boleh dijadikan sebagai panduan asas kepada para pereka dalam menghasilkan reka bentuk VAWT yang ideal

PENGHARGAAN

Setinggi-tinggi penghargaan diberikan kepada Kementerian Pengajian Tinggi di atas tajaan menjalankan penyelidikan ini melalui *Fundamental Research Grant Scheme* FRGS/1/2019/TK03/UKM/02/6

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada

RUJUKAN

- Al-Kayiem, H. H., Bhayo, B. A., & Assadi, M. 2016. Comparative critique on the design parameters and their effect on the performance of S-rotors. *Renewable Energy* 99: 1306–1317. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.015>
- Bai, C. J., & Wang, W. C. 2016. Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63: 506–519. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.078>
- Baker, J. R. 1983. Features to aid or enable self starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 15(1–3): 369–380. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(83\)90206-4](https://doi.org/10.1016/0167-6105(83)90206-4)
- Balduzzi, F., Bianchini, A., Maleci, R., Ferrara, G., & Ferrari, L. 2016. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy* 85: 419–435. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.048>

- Bavanish, B., & Thyagarajan, K. 2013. Optimization of power coefficient on a horizontal axis wind turbine using bem theory. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26: 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.009>
- Bedon, G., Antonini, E. G. A., De Betta, S., Raciti Castelli, M., & Benini, E. 2014. Evaluation of the different aerodynamic databases for vertical axis wind turbine simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 386–399. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.126>
- Beri, H., & Yao, Y. 2011. Effect of Camber Airfoil on Self Starting of Vertical Axis Wind Turbine. *Journal of Environmental Science and Technology* 4(3): 302–312. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.302.312>
- Caglayan, D. G., Ryberg, D. S., Heinrichs, H., Linßen, J., Stolten, D., & Robinius, M. 2011). The techno-economic potential of offshore wind energy with optimized future turbine designs in Europe. *Applied Energy* 255. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113794>
- Chen, C. C., & Kuo, C. H. 2013. Effects of pitch angle and blade camber on flow characteristics and performance of small-size Darrieus VAWT. *Journal of Visualization* 16(1): 65–74. <https://doi.org/10.1007/s12650-012-0146-x>
- Chen, J., Yang, H., Yang, M., Xu, H., & Hu, Z. 2015. A comprehensive review of the theoretical approaches for the airfoil design of lift-type vertical axis wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 1709–1720. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.065>
- Chen, Y., Wu, D., Yu, Y., & Gao, W. 2021. An improved theory in the determination of aerodynamic damping for a horizontal axis wind turbine (HAWT). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 213: 104619. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104619>
- 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>
- Claessens, M. C. 2006. The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines. *Masters Thesis*: 1–137.
- das Karmakar, S., & Chattopadhyay, H. 2022. A review of augmentation methods to enhance the performance of vertical axis wind turbine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 53: 102469. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102469>
- De Azevedo, H. D. M., Araújo, A. M., & Bouchonneau, N. 2016. A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56: 368–379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.032>
- Dimitrov, N., Natarajan, A., & Kelly, M. 2015) Model of wind shear conditional on turbulence and its impact on wind turbine loads. *Wind Energy* 18(11): 1917–1931. <https://doi.org/10.1002/we.1797>
- Eboibi, O., Danao, L. A. M., & Howell, R. J. 2016. Experimental investigation of the influence of solidity on the performance and flow field aerodynamics of vertical axis wind turbines at low Reynolds numbers. *Renewable Energy* 92: 474–483. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.028>
- Fernández-Guillamón, A., Gómez-Lázaro, E., Muljadi, E., & Molina-García, Á. 2019. Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
- Ferreira, C. S., & Scheurich, F. 2014. Demonstrating that power and instantaneous loads are decoupled in a vertical-axis wind turbine. *Wind Energy* 17(3): 385–396. <https://doi.org/10.1002/we.1581>
- Ferreira, C Simˆao, H Aagaard Madsen, M Barone, B Roscher, P Deglaire, I. A. 2014. *Comparison of aerodynamic models for Vertical Axis Wind Turbines*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012125>
- Fiedler, A. J., & Tullis, S. 2009. Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine. *Wind Engineering* 33(3): 237–246. <https://doi.org/10.1260/030952409789140955>
- Gang, D., & Kau, W. C. 2015. Unsteady flow numerical simulation of vertical axis wind turbine. *Procedia Engineering* 99: 734–740. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.595>
- Ghasemian, M., Ashrafi, Z. N., & Sedaghat, A. 2017. A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management* 149: 87–100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.016>
- Göçmen, T., Laan, P. Van Der, Réthoré, P. E., Diaz, A. P., Larsen, G. C., & Ott, S. 2016. Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 752–769. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.113>
- Goldstein, L. 2015. A proposal and a theoretical analysis of a novel concept of a tilted-axis wind turbine. *Energy* 84: 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.110>
- Gosselin, R., Dumas, G., & Boudreau, M. 2013. *Parametric study of H-Darrieus vertical-axis turbines using uRANS simulations*.
- Guo, J., Zeng, P., & Lei, L. 2019. Performance of a straight-bladed vertical axis wind turbine with inclined pitch axes by wind tunnel experiments. *Energy* 174: 553–561. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.177>
- Haces-Fernandez, F., Li, H., & Ramirez, D. 2019. Improving wind farm power output through deactivating selected wind turbines. *Energy Conversion and Management* 187: 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.028>

- Han, J., Ouyang, L., Xu, Y., Zeng, R., Kang, S., & Zhang, G. 2016. Current status of distributed energy system in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55: 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.147>
- Hedevang, E. 2014. Wind turbine power curves incorporating turbulence intensity. *Wind Energy* 17(2): 173–195. <https://doi.org/10.1002/we.1566>
- Hossain, M. M., & Ali, M. H. 2015. Future research directions for the wind turbine generator system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 481–489. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.126>
- Islam, M., Ting, D. S. K., & Fartaj, A. 2008. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(4): 1087–1109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.023>
- Jain, P., & Abhishek, A. 2016. Performance prediction and fundamental understanding of small scale vertical axis wind turbine with variable amplitude blade pitching. *Renewable Energy* 97: 97–113. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.056>
- 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>
- Kan, C., Devrim, Y., & Eryilmaz, S. 2020. On the theoretical distribution of the wind farm power when there is a correlation between wind speed and wind turbine availability. *Reliability Engineering & System Safety* 203: 107115. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.107115>
- Karthikeyan, N., Kalidasa Murugavel, K., Arun Kumar, S., & Rajakumar, S. 2015. Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 801–822. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.086>
- KC, A., Whale, J., & Urmee, T. 2019. Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. *Renewable Energy* 131: 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.050>
- Kirke, B. 1998. Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications. *Vasa*: 281–285. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kishore, R. A., Coudron, T., & Priya, S. 2013. Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 116: 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.01.010>
- Klimas, P. C., & Worstell, M. H. 1981. *Effects of blade preset pitch/offset on curved-blade Darrieus vertical axis wind turbine performance.*
- Kumar, R., Raahemifar, K., & Fung, A. S. 2018. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 89(February): 281–291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.033>
- Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S. S., Devabhaktuni, V. K., Lee, J. W., Nikolaidis, E., Andersen, B., & Afjeh, A. 2016. Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.200>
- Lee, Y. T., & Lim, H. C. 2015. Numerical study of the aerodynamic performance of a 500W Darrieus-type vertical-axis wind turbine. *Renewable Energy* 83: 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.043>
- Li, Q., Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Shimizu, K., Ogasawara, T., Nakai, A., & 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>
- Li, Y., Zhao, S., Tagawa, K., & Feng, F. 2018. Starting performance effect of a truncated-cone-shaped wind gathering device on small-scale straight-bladed vertical axis wind turbine. *Energy Conversion and Management* 167: 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.062>
- Liu, H., Li, Y., Duan, Z., & Chen, C. 2020. A review on multi-objective optimization framework in wind energy forecasting techniques and applications. *Energy Conversion and Management* 224: 113324. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113324>
- Liu, J., Lin, H., & Zhang, J. 2019. Review on the technical perspectives and commercial viability of vertical axis wind turbines. *Ocean Engineering* 182(May): 608–626. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.086>
- Lositaño, I. C. M., & Danao, L. A. M. 2019. Steady wind performance of a 5 kW three-bladed H-rotor Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) with cambered tubercle leading edge (TLE) blades. *Energy* 175: 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.033>
- Marinić-Kragić, I., Vučina, D., & Milas, Z. 2019. Concept of flexible vertical-axis wind turbine with numerical simulation and shape optimization. *Energy* 167: 841–852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.026>
- Miller, A., Chang, B., Issa, R., & Chen, G. 2013. Review of computer-aided numerical simulation in wind energy. *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews* 25: 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.059>
- Mohamed, M. H. 2012. Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy* 47(1): 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.044>
- Möllerström, E., Gipe, P., Beurskens, J., & Ottermo, F. 2019. A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.022>
- Murthy, K. S. R., & Rahi, O. P. 2017. A comprehensive review of wind resource assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72: 1320–1342. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.038>
- Njiri, J. G., & Söffker, D. 2016. State-of-the-art in wind turbine control: Trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60: 377–393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.110>
- O'Brien, J. M., Young, T. M., O'Mahoney, D. C., & Griffin, P. C. 2017. Horizontal axis wind turbine research: A review of commercial CFD, FE codes and experimental practices. *Progress in Aerospace Sciences* 92: 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.05.001>
- Paraschivoiu, I. 2002. *Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept*. Presses Inter Polytechnique.
- Paraschivoiu, I., Trifu, O., & Saeed, F. 2009. H-Darrieus wind turbine with blade pitch control. *International Journal of Rotating Machinery* 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/505343>
- 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(September 2018): 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.11.005>
- Peng, Y. X., Xu, Y. L., Zhu, S., & Li, C. 2019. High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Numerical simulation and validation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 193. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.103960>
- Qamar, S. B., & Janajreh, I. 2017. Investigation of Effect of Cambered Blades on Darrieus VAWTs. *Energy Procedia* 105: 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.353>
- Rahman, M., Ong, Z. C., Chong, W. T., Julai, S., & Khoo, S. Y. 2015. Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.078>
- Ramlee, M. F., Zishan, S., Muzammil, W. K., & Fazlizan, A. 2022. Numerical investigation of solidity effect based on variable diameter on power performance of h-type darrieus Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). *International Journal of Renewable Energy Development* 11(3): 647–660. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.44431>
- 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. 2018. Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades. *Energy* 165: 1129–1148. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.192>
- Riziotis, V. A., & Voutsinas, S. G. 2000. Fatigue loads on wind turbines of different control strategies operating in complex terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85(3): 211–240. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00127-0](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00127-0)
- 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*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.160>
- Sengupta, A. R., Biswas, A., & Gupta, R. 2019. Comparison of low wind speed aerodynamics of unsymmetrical blade H-Darrieus rotors-blade camber and curvature signatures for performance improvement. *Renewable Energy* 139: 1412–1427. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.054>
- Shaheen, M., & Abdallah, S. 2016. Development of efficient vertical axis wind turbine clustered farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 63: 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.062>
- Shakoor, R., Hassan, M. Y., Raheem, A., & Wu, Y. K. (2016). Wake effect modeling: A review of wind farm layout optimization using Jensen's model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58: 1048–1059. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.229>
- Shonhiwa, C., & Makaka, G. 2016. Concentrator Augmented Wind Turbines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59: 1415–1418. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.067>
- 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>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.118>
- Sumantraa, B., Sumantraa, B. R., P, P. T., & Ratna

- Kishore, V. 2014. Numerical analysis of effect of pitch angle on a small scale vertical axis wind turbine numerical analysis of a vertical axis wind turbine view project prognostics for future offshore/ onshore wind farms view project. *International Journal of Renewable Ene.* 4(4): 2–9. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2869.7447>
- Sunderland, K., Woolmington, T., Conlon, M., & Blackledge, J. 2013. Urban deployment of small wind turbines: Power performance and turbulence. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference.* <https://doi.org/10.1109/UPEC.2013.6714858>
- Thé, J., & Yu, H. 2017. A critical review on the simulations of wind turbine aerodynamics focusing on hybrid RANS-LES methods. *Energy* 138: 257–289. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.028>
- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., & Sopian, K. 2015. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: Challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development. *Renewable Energy* 75: 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.039>
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraj, V., & Krishna, V. H. 2016. A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56: 1351–1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Wagner, R., Antoniou, I., Pedersen, S. M., Courtney, M. S., & Jørgensen, H. E. 2009. The influence of the wind speed profile on wind turbine performance measurements. *Wind Energy* 12(4): 348–362. <https://doi.org/10.1002/we.297>
- Wong, K. H., Chong, W. T., Poh, S. C., Shiah, Y. C., Sukiman, N. L., & Wang, C. T. 2018. 3D CFD simulation and parametric study of a flat plate deflector for vertical axis wind turbine. *Renewable Energy* 129: 32–55. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.085>
- Wong, K. H., Chong, W. T., Sukiman, N. L., Poh, S. C., Shiah, Y. C., & Wang, C. T. 2017. Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73: 904–921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.160>
- Xu, Z., Feng, Y. H., Zhao, C. Y., Huo, Y. L., Li, S., Hu, X. J., & Zhong, Y. J. 2018. Experimental and numerical investigation on aerodynamic performance of a novel disc-shaped wind rotor for the small-scale wind turbine. *Energy Conversion and Management* 175: 173–191. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.003>
- Yang, Y., Guo, Z., Song, Q., Zhang, Y., & Li, Q. 2018. *Effect of Blade Pitch Angle on the Aerodynamic Characteristics of a Straight-bladed Vertical Axis.* <https://doi.org/10.3390/en11061514>
- Ying, P., Chen, Y. K., Xu, Y. G., & Tian, Y. 2015. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine. *Applied Energy* 146: 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.067>
- Zergane, S., Smali, A., & Masson, C. 2018. Optimization of wind turbine placement in a wind farm using a new pseudo-random number generation method. *Renewable Energy* 125: 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.082>
- Zhang, L. X., Liang, Y. bin, Liu, X. H., & Guo, J. 2014. Effect of blade pitch angle on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine. *Journal of Central South University* 21(4): 1417–1427. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2080-7>
- Zhao, E., Sun, S., & Wang, S. 2022. New developments in wind energy forecasting with artificial intelligence and big data: a scientometric insight. *Data Science and Management* 5(2): 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2022.05.002>
- Zhao, J., Fang, Y., He, Y., Fang, J., Wen, L., Liang, Y., & Xiao, S. 2021. Active power control strategy of wind farm considering fatigue load of wind turbines. *Energy Reports* 7: 1466–1476. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.096>
- Zhao, Z., Wang, D., Wang, T., Shen, W., Liu, H., & Chen, M. 2022. A review: Approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 49: 101789. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101789>