

## Kajian Bentuk *Wind Turbine* Aksial untuk Fasad Miring Bangunan Bertingkat Menengah

Ronald Samuel Budiman<sup>1</sup>, Lilianny Sigit Arifin<sup>2</sup>, Feny Elsiana<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Kristen Petra, 60236

<sup>1</sup>ronald.budiman@petra.ac.id; <sup>2</sup>lili@petra.ac.id,

<sup>3</sup>feny.elsiana@petra.ac.id

---

**Abstract.** The dwindling natural resources have heightened the importance of seeking alternative means to generate renewable energy. The emergence of uniquely designed mid-rise buildings in Indonesia, such as those with sloped facades, offers a greater potential for harnessing wind energy. However, the existing slopes make the implementation of vertical wind turbines challenging as they must align with the inclination. The shafts of the vertical wind turbines are set parallel to the ground to accommodate the facade's slope, enabling them to rotate axially and radially. This study examines six models, focusing on the impact of shape modifications and the D:H ratio on their ability to process wind axially ( $C_p$ ) and the minimum rotation speed required ( $TSR$ ). The findings indicate that axial wind turbines without shape modifications, with a D/H ratio of 1:2, are more suitable for slanted facades.

**Keywords:** renewable energy, axial wind turbine, mid-rise building.

**Abstrak.** Sumber daya alam yang semakin menipis menyadarkan akan pentingnya mencari alternatif lain untuk menghasilkan energi terbarukan. Kemunculan bangunan-bangunan bertingkat yang unik di Indonesia, seperti memiliki kemiringan pada fasad, memiliki potensi lebih besar untuk menghasilkan energi terbarukan melalui energi angin. Namun kemiringan yang ada membuat *wind turbine* vertikal sulit diterapkan dengan mengikuti kemiringan yang ada. Poros *wind turbine* vertikal diletakkan menjadi sejajar dengan permukaan tanah guna mengikuti kemiringan fasad yang membuatnya berputar secara aksial dan radial. Penelitian ini mengkaji 6 (enam) model yang berfokus melihat pengaruh modifikasi bentuk serta rasio D:H terhadap kemampuannya mengolah angin secara aksial ( $C_p$ ) dan kecepatan rotasi minimum yang dibutuhkan ( $TSR$ ). Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *wind turbine* aksial tanpa modifikasi bentuk dengan rasio D/H 1:2 lebih baik untuk diterapkan pada fasad miring.

**Kata Kunci:** energi terbarukan, *wind turbine* aksial, bangunan bertingkat.

---

## 1. Pendahuluan

Ketersediaan sumber daya alam guna menghasilkan energi semakin menipis. Terdapat sebuah penelitian yang melakukan perhitungan perkiraan habisnya cadangan bahan bakar fosil berupa minyak yang diperkirakan akan habis dalam 35 tahun (sekitar tahun 2042), batu bara dalam 107 tahun (sekitar tahun 2112), dan gas dalam 37 tahun (sekitar tahun 2044) <sup>[1]</sup>. Hal ini menyadarkan pentingnya untuk mencari alternatif lain (sumber daya terbarukan) guna menghasilkan energi.

Bangunan bertingkat mengkonsumsi sekitar 25% energi total di Indonesia pada kurun waktu 2017-2020 <sup>[1]</sup>. Meskipun mengkonsumsi banyak energi, bangunan bertingkat memiliki potensi besar untuk menghasilkan energi terbarukan, yaitu melalui memanfaatkan sumber daya angin. Hal ini dapat dicapai dengan menerapkan *wind turbine* ke dalam elemen bangunan atau yang dikenal sebagai BIWT (*Building Integrated Wind Turbine*). Pada konteks bangunan bertingkat menengah di Indonesia memiliki kecepatan angin yang relatif rendah, *wind turbine* tipe vertikal lebih sesuai untuk diterapkan <sup>[2]</sup>.

Fasad miring pada bangunan bertingkat memiliki potensi lebih besar untuk menghasilkan energi karena memiliki perbedaan tekanan dan koefisien *drag* yang lebih besar <sup>[3]</sup>. Seperti beberapa bangunan bertingkat di Surabaya, Indonesia yang memiliki kemiringan pada fasadnya berkisar antara 11°- 64°. Namun *wind turbine* vertikal tidak dapat dipasang mengikuti kemiringan dari fasad. Hal ini membuat adanya ruang antara kemiringan fasad dengan *wind turbine* yang dapat menimbulkan permasalahan estetika dan struktural.

Permasalahan estetika dan struktural dapat diminimalkan dengan cara mengubah sumbu *wind turbine* menjadi sejajar dengan permukaan tanah. Hal ini membuat *wind turbine* vertikal dapat dipasang mengikuti kemiringan dari fasad. Namun perubahan orientasi sumbu ini menimbulkan perubahan perilaku dari *wind turbine* vertikal ketika menerima angin. Sumbu tegak lurus dengan permukaan tanah menerima angin secara radial (dari segala arah), sedangkan sumbu sejajar dengan permukaan tanah menerima angin dengan dua perilaku yaitu secara radial pada arah datang angin tegak lurus dengan poros dan secara aksial pada arah datang angin sejajar dengan poros.

Artikel ini bertujuan untuk melakukan kajian bentuk *wind turbine* vertikal supaya dapat bergerak secara aksial dengan maksimal dan diterapkan pada fasad miring bangunan bertingkat menengah pada bidang yang sejajar dengan arah datang angin. Pada bidang yang sejajar dengan arah datang angin lebih cenderung untuk menggerakkan *wind turbine* dengan cara aksial karena angin datang sejajar dengan poros dari *wind turbine*. Namun pada *wind turbine* vertikal tidak dirancang untuk menerima angin secara tegak lurus dengan poros atau aksial sehingga perlu adanya kajian lebih lanjut untuk menyesuaikan dengan kondisi tersebut.

## 2. Teori Wind Turbine

Terdapat bagian pada *wind turbine* yang bertindak sebagai penerima energi kinetik dari angin dan mengubahnya menjadi gaya seret maupun angkat, yaitu baling. Gaya yang dihasilkan dikonversi menjadi energi mekanik yang memutar poros dan diteruskan pada generator untuk diubah menjadi energi listrik <sup>[4]</sup>.

Performa dari rotor dapat diukur melalui nilai dari koefisien power ( $C_p$ ) yang dihasilkan.  $C_p$  dapat diperoleh melalui membandingkan antara tenaga yang dihasilkan oleh turbin ( $P_t$ ) dengan tenaga yang tersedia pada angin ( $P_a$ ). Perbandingan ini dituliskan menggunakan persamaan,

$$C_p = \frac{P_t}{P_a} \quad (1)$$

Sumber: Ali <sup>[5]</sup>

Dimana :

$$\begin{aligned} P_t &= \text{Power turbin (W)} \\ P_a &= \text{Power angin (W)} \end{aligned}$$

Tenaga yang dihasilkan oleh turbin dapat diperoleh melalui persamaan,

$$P_t = T \omega \quad (2)$$

Sumber: Ali <sup>[5]</sup>

Dimana:

$$\begin{aligned} T &= \text{Torsi (Nm)} \\ \omega &= \text{Kecepatan putar rotor (rad/s)} \end{aligned}$$

Tenaga yang tersedia pada angin dapat diperoleh melalui persamaan,

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (3)$$

Sumber: Ali <sup>[5]</sup>

Dimana:

$$\begin{aligned} \rho &= \text{Density udara (Nilai } \rho \text{ pada kondisi } \textit{sea level} \text{ adalah } 1.225 \text{ kg/m}^3\text{)} \\ S &= \text{Swept area (m}^2\text{)} \\ V &= \text{Kecepatan udara (m/s)} \end{aligned}$$

Keterkaitan antara diameter rotor, perputaran rotor, dan kecepatan angin pada titik tertentu dapat diketahui melalui parameter TSR (*Tip Speed Ratio*). TSR merupakan perbandingan kecepatan angin pada bagian *tip* rotor dengan kecepatan angin yang melaluinya <sup>[6]</sup>. Perbandingan ini dapat dituliskan menggunakan persamaan,

$$\text{TSR} = \frac{\Omega r}{V_w} \quad (4)$$

Sumber: Schubel dan Crossley <sup>[6]</sup>

Dimana,

$$\begin{aligned} \Omega &= \text{Kecepatan putar rotor (rad/s)} \\ r &= \text{Radius (m)} \\ V_w &= \text{Kecepatan angin (m/s)} \end{aligned}$$

### 3. Studi Modifikasi Bentuk

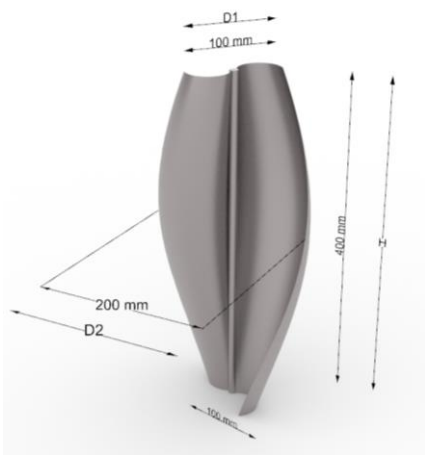
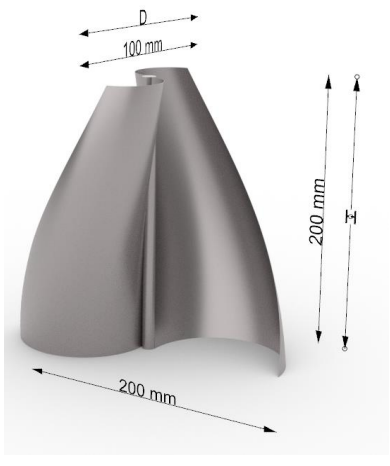
Modifikasi bentuk yang dilakukan berlandaskan pada beberapa penelitian terdahulu yang dapat dilihat pada tabel 1. Modifikasi bentuk berupa pengecilan bentuk pada rotor berpotensi menurunkan kebutuhan kecepatan minimum untuk dapat berotasi. Penelitian menerapkan 2 kombinasi pengecilan pada bagian dari rotor (bagian menerima dan tidak menerima angin secara langsung). Modifikasi seperti perbedaan besaran pada perbandingan rasio antara diameter (D) dan tinggi (H) juga diteliti karena dimensi dari rotor mempengaruhi besarnya torsi (T) yang mampu dihasilkan oleh turbin (Pt).

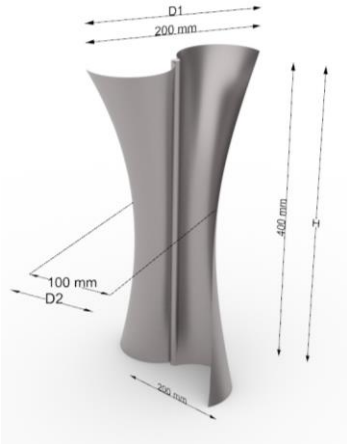
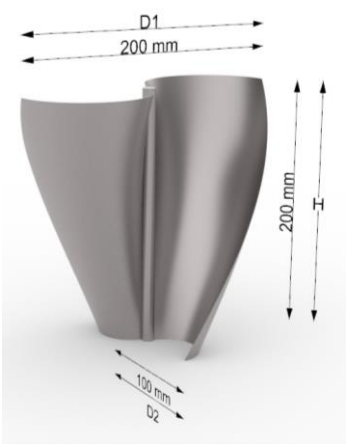
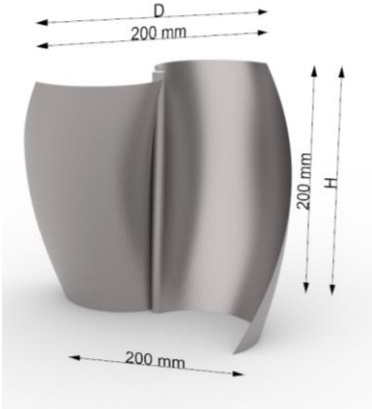
Tabel 1. Penelitian Terdahulu Mengenai Modifikasi Bentuk rotor  
Sumber: penulis

Sumber	Tipe rotor	Keterangan	Kelebihan
Darade et al. (2021) <sup>[7]</sup>	Savonius	Bentuk mengalami pengecilan keatas, berbentuk seperti daun.	Menurunkan kecepatan minimum untuk berotasi, sekitar kecepatan 1.94 m/s sudah bisa berotasi.
Raut et al. (2021) <sup>[8]</sup>	Savonius	Terdapat tiga rotor yang menjadi satu dengan sudut kemiringan antar rotor sebesar 45° secara harmonis.	Pergerakan angin menjadi yang menabrak rotor menjadi lebih baik.
Ali (2013) <sup>[5]</sup>	Savonius	Jumlah rotor yang efektif untuk tipe savonius.	Jumlah rotor sebanyak 2 rotor merupakan jumlah terbaik untuk tipe savonius.

Penelitian akan mengunci bentuk *wind turbine* memiliki *twist* atau bentuk memutar dengan sudut sebesar  $90^\circ$  dan jumlah rotor supaya penelitian tidak melebar. Terdapat 6 (enam) model dengan kombinasi besaran rasio (D/H), bagian yang mengalami modifikasi berupa pengecilan pada D1 maupun D2, dan tidak mengalami modifikasi bentuk sama sekali. Keseluruhan model dapat dilihat pada tabel 2. Model 1, dan 2 menggunakan rasio (D/H) sebesar 1:2. Model 3, 4, dan 5 menggunakan rasio (D/H) sebesar 1:1. Model 1 dan 3 mengalami modifikasi pengecilan pada bagian penerima angin secara langsung (D1). Model 2 dan 4 mengalami modifikasi pengecilan pada bagian yang tidak menerima angin secara langsung (D2). Model 5 tidak mengalami modifikasi sama sekali.

Tabel 2. Model *wind turbine* aksial  
Sumber: penulis

	
<p>MODEL 1 D1 = 100 mm D2 = 200 mm H = 400 mm</p>	<p>MODEL 3 D1 = 100 mm D2 = 200 mm H = 200 mm</p>

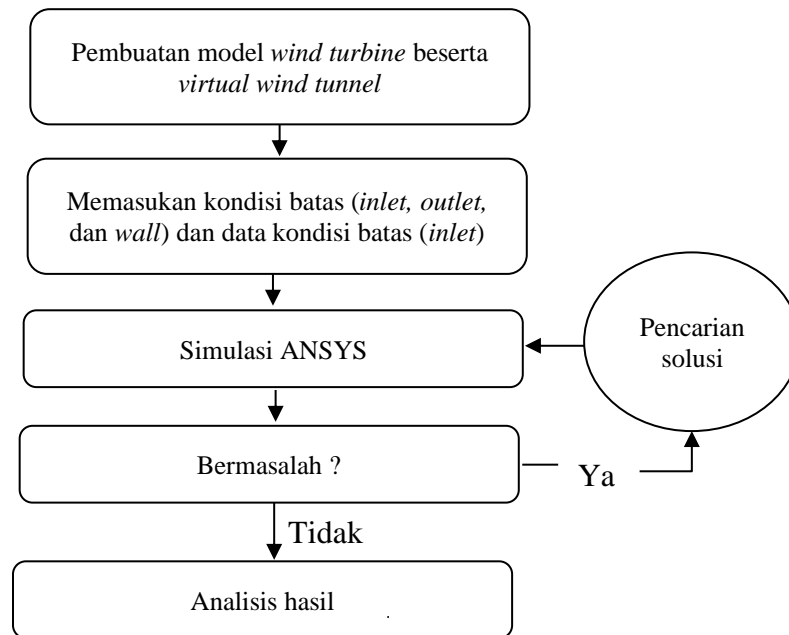
	
<p>MODEL 2  D1 = 200 mm  D2 = 100 mm  H = 400 mm</p>	<p>MODEL 4  D1 = 200 mm  D2 = 100 mm  H = 200 mm</p>
	
<p>MODEL 5  D = 200 mm  H = 200 mm</p>	

#### 4. Metode Penelitian

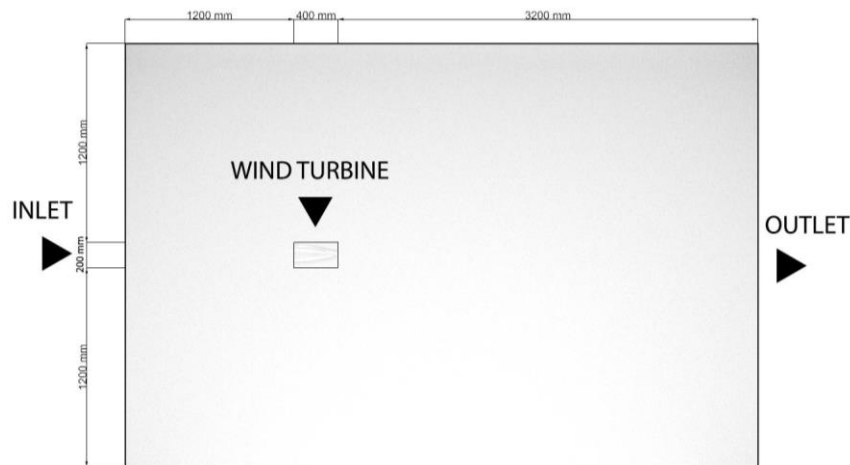
Penelitian ini menggunakan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) untuk melihat pengaruh bentuk rotor aksial terhadap performanya dalam menerima energi kinetik dari angin. Simulasi menggunakan *software* ANSYS CFX. Pembuatan model yang akan digunakan dalam simulasi menggunakan *software* *Rhinceros*. Tahapan serta urutan simulasi dijelaskan melalui skema seperti pada gambar 1.

Pada tahap memasukan kondisi batas untuk simulasi, *wind turbine* diletakkan dengan posisi simetris secara vertikal dari *virtual wind tunnel* dan berjarak 1200 mm dari *inlet*. Simulasi menggunakan kecepatan angin (*inlet*) sebesar 5 m/s yang mengambil referensi dari penelitian sejenis <sup>[9]</sup> yang membahas mengenai *wind turbine* aksial (horizontal) berukuran kecil. Kecepatan angin sebesar 5 m/s berada pada ketinggian 25 m diatas permukaan tanah di kota Surabaya, sekitar

lantai 7 dengan asumsi *floor to floor* setinggi 4m. Jarak antara *wind turbine* dengan *outlet* sejauh 3200 mm untuk melihat pergerakan angin turbulen yang dihasilkan oleh *wind turbine*. Bidang selain *inlet* dan *outlet* pada *virtual wind tunnel* didefinisikan sebagai *no-slip wall*.



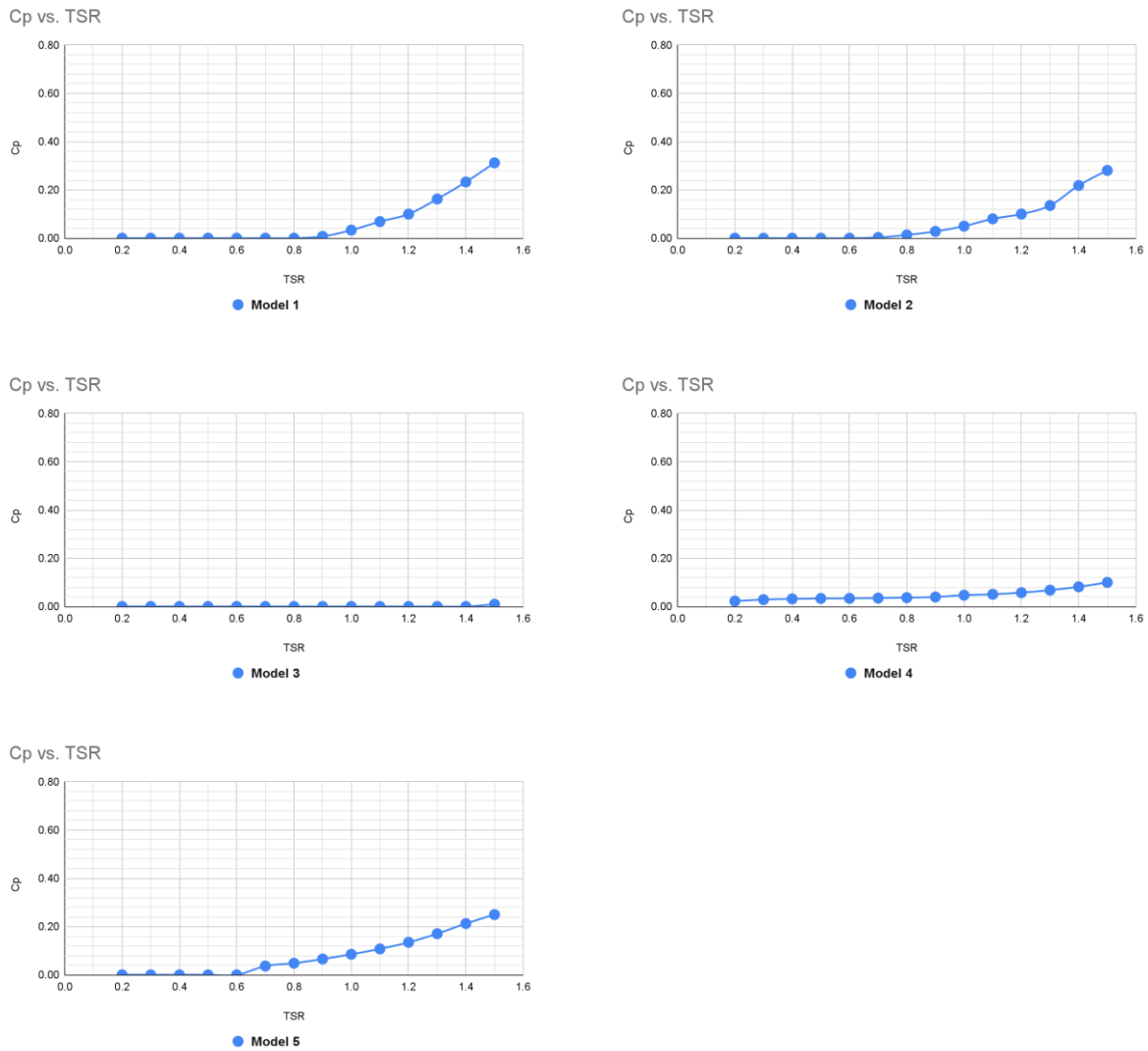
Gambar 1. Skema Tahapan dan Alur Simulasi



Gambar 2. Setup Virtual Wind Tunnel Simulasi

## 5. Hasil Dan Pembahasan

Eksperimen yang dilakukan melalui metode simulasi menggunakan *virtual wind tunnel* yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh bentuk terhadap performa yang diberikan, serta membuat perbandingan dalam mencari bentuk terbaik untuk diterapkan secara aksial. Performa dari masing-masing bentuk ( $C_p$ ) dibandingkan menggunakan parameter TSR untuk melihat kecepatan minimum yang dibutuhkan untuk berotasi dengan efektif dan kemampuan bentuk untuk mengekstrak energi angin.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Cp dan TSR

Gambar 2 menunjukkan grafik perbandingan antara Cp dengan TSR masing-masing model. Model 1 yang memiliki rasio D/H sebesar 1:2 dengan  $D_1 < D_2$ , membutuhkan kecepatan angin sebesar 4.5 m/s atau TSR 0.9 untuk *self-starting*. Model 2 yang memiliki rasio D/H sebesar 1:2 dengan  $D_1 > D_2$ , membutuhkan kecepatan angin sebesar 4 m/s atau TSR 0.8 untuk *self-starting*.

Modifikasi bentuk berupa pengecilan pada D1 (bagian yang menerima angin secara langsung) membutuhkan kecepatan angin minimum untuk *self-starting* pada *wind turbine* yang lebih besar. Meskipun membutuhkan kecepatan angin minimum yang lebih tinggi, modifikasi ini mampu mengekstrak energi angin dengan lebih baik dari pada bentuk yang mengalami pengecilan pada D2.

Model 3 yang memiliki rasio D/H sebesar 1:1 dengan  $D_1 < D_2$ , membutuhkan kecepatan angin sebesar 7,5 m/s atau TSR 1.5 untuk *self-starting*. Model 4 yang memiliki D/H sebesar 1:1 dengan  $D_1 > D_2$ , membutuhkan kecepatan angin sebesar 1 m/s atau TSR 0.2 untuk *self-starting*. Model 5

yang memiliki D:H sebesar 1:1 dengan tidak mengalami modifikasi bentuk, membutuhkan kecepatan angin sebesar 1 m/s atau TSR 0.2 untuk *self-starting*.

Modifikasi bentuk berupa pengecilan pada D1 (bagian yang menerima angin secara langsung) membuat *wind turbine* menjadi sangat tidak efektif. D1 yang lebih kecil membuat lebih sedikit tenaga angin untuk memutar *wind turbine* dan D2 yang lebih besar memberikan torsi negatif yang menjadi hambatan untuk *wind turbine* guna berputar. Hal ini karena pada Model 1 yang sama-sama mengalami pengecilan juga pada bagian penerima angin sudah bisa *self-starting* pada kecepatan angin sebesar 4 m/s, terlepas dari perbedaan pada rasio D/H.

Modifikasi bentuk berupa pengecilan pada D2 (bagian yang tidak menerima angin secara langsung) mampu meningkatkan kemampuan *wind turbine* dalam mengekstrak energi angin hingga kecepatan 3.5 m/s. Namun pada kecepatan lebih besar dari pada 3.5 m/s, bentuk yang tidak mengalami modifikasi sama sekali mampu mengekstrak energi angin dengan lebih maksimal. Hal ini karena lebih banyak bidang dari *wind turbine* yang menerima angin.

Secara keseluruhan, rasio D:H yang lebih besar (1:2) mampu mengekstrak energi angin dengan lebih maksimal. Namun terdapat kelemahan berupa kecepatan angin minimum yang lebih besar (berkisar antara 3-4 m/s) untuk mulai *self-starting*. Modifikasi bentuk berupa pengecilan pada bagian yang tidak menerima angin mampu menurunkan kecepatan angin minimum untuk mulai *self-starting* dan mampu mengekstrak energi angin dengan lebih baik pada kecepatan angin yang lebih rendah (hingga kecepatan angin sebesar 3.5 m/s). Modifikasi bentuk berupa pengecilan pada bagian yang menerima angin secara langsung membuat *wind turbine* menjadi lebih tidak efektif karena membutuhkan kecepatan angin yang lebih tinggi untuk *self-starting*. Bentuk yang lebih besar pada bagian ujung dari *wind turbine* yang tidak menerima angin secara langsung menjadi hambatan bagi *wind turbine* untuk *self-starting*. Semakin banyak bidang dari *wind turbine* yang menerima angin semakin banyak pula energi angin yang mampu diekstrak.

## 6. Kesimpulan Dan Saran

Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah *wind turbine* aksial yang memiliki twist atau memutar  $90^\circ$  dengan rasio D/H 1:1 tanpa mengalami modifikasi bentuk sama sekali merupakan bentuk terbaik untuk diterapkan pada fasad miring bangunan bertingkat di Indonesia, seperti pada Model 5. Hal ini karena sudah bisa mengekstrak energi angin pada kecepatan angin yang relatif sangat rendah, dan mampu mengekstrak lebih banyak energi seiring meningkatnya kecepatan angin. Bentuk *wind turbine* ini dapat diterapkan pada fasad pada semua ketinggian dari permukaan tanah. Namun pada lantai yang memiliki kecepatan angin lebih kecil dari 3.5 m/s, disarankan menggunakan *wind turbine* dengan Model 4 karena mampu mengekstrak energi angin dengan lebih maksimal. Dalam penerapan *wind turbine* ke dalam desain fasad perlu untuk memperhatikan jarak minimum antar *wind turbine* supaya dapat menghasilkan energi dengan maksimal. Jarak antar *wind turbine* aksial untuk model 5 sebesar 2 H secara horizontal dan 1 D secara vertikal.

### Daftar Pustaka

1. Badan Pusat Statistik. (2022). *Listrik Yang Didistribusikan Kepada Pelanggan (GWh)*. <https://www.bps.go.id/site/resultTab>
2. Tjahjana, D. D. D. P., Purbaningrum, P., Hadi, S., Wicaksono, Y. A., & Adiputra, D. (2018). *The study of the influence of the diameter ratio and blade number to the performance of the cross flow wind turbine by using 2D computational fluid dynamics modeling*. 030034. <https://doi.org/10.1063/1.5024093>



3. Mintorogo, D. S., Elsiana, F., & Budhiyanto, A. (2020). Effect of tilt angle of building-integrated wind turbine and photovoltaic façade on wind pressure and solar radiation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 520, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/520/1/012016>
4. Saputra, M. (2016). *Kajian literatur sudu turbin angin untuk skala kecepatan angin rendah*. 2(1), 10.
5. Ali, M. H. (2013). Experimental comparison study for savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*.
6. Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Wind turbine blade design. *Energies*, 5(9), 3425–3449. <https://doi.org/10.3390/en5093425>
7. Darade, P. P., Gupta, R. S., Gaikar, J. S., & Mondal, P. (2021). *Power plant—Portable micro power generation*. 1(4), 5.
8. Raut, S., Sawant, K., Yadhav, M., Sawant, H., & Patel, V. D. (2021). Design and Development of Harmony Wind Turbine. *International Journal of Engineering Research*, 9(3), 6.
9. Noronha, N. P., & Krishna, M. (2021). Aerodynamic performance comparison of airfoils suggested for small horizontal axis wind turbines. *Materials Today: Proceedings*, 46, 2450–2455. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.359>