

Analisis Penurunan Faktor Geometri Pada Pengujian Performa Rotor Turbin Angin Sumbu Horizontal Tipe Propeler Tiga Blade

Verdy A. Koehuan^{1*}, Muh. Guntur DM², Daud P. Mangesa³

¹⁻³) Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana
Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001, Tlp. (0380)881597

*Corresponding author: verdy.koehuan@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Penurunan faktor skala pengujian ataupun skala geometri pada kondisi laboratorium ini tentu sangat berpengaruh pada performa dari rotor secara signifikan sebagai akibat dari penurunan skala geometri maupun kondisi terowongan angin yang digunakan dalam pengujian. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan pengujian skala laboratorium terhadap performa turbin angin rotor tunggal melalui penurunan faktor skala geometri rotor turbin. Model blade rotor turbin angin menggunakan seri airfoil S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), diameter rotor pada skala lapangan (*full scale*) adalah 0,944 m. Penurunan faktor geometri rotor turbin dari 30%, 26,5 % dan 25 % menunjukkan presentasi koefisien daya turbin terhadap turbin *full scale* ($D=0,944\text{m}$) mengalami penurunan. Presentasi penurunan koefisien daya turbin 1 dengan $C_p/C_{p,\text{full}} = 8,94\%$, dan masing-masing turbin 2 dan turbin 3 adalah 1,74% dan 0,69 %. Sedangkan presentasi penurunan TSR turbin 1 dengan $TSR/TSR_{\text{full}} = 72,63\%$, dan masing-masing turbin 2 dan turbin 3 adalah 32,49 % dan 21,5 %.

ABSTRACT

Reducing the test scale factor or geometry scale in laboratory conditions is certainly very influential on the performance of the rotor significantly as a result of decreasing the geometry scale and wind tunnel conditions used in the test. Therefore, in this study a laboratory scale test was carried out on the performance of a single rotor wind turbine by reducing the turbine rotor geometry scale factor. The wind turbine rotor blade model uses the S826 airfoil series issued by the NREL (National Renewable Energy Laboratory), the rotor diameter on a full scale is 0.944 m. The decrease in the turbine rotor geometric factor from 30%, 26.5% and 25% shows that the presentation of the turbine power coefficient to a full-scale turbine ($D=0.944\text{m}$) has decreased. The percentage decrease in the power coefficient of turbine 1 with $C_p/C_{p,\text{full}} = 8.94\%$, and respectively turbine 2 and turbine 3 are 1.74% and 0.69%. While the presentation of the decrease in the TSR of turbine 1 with $TSR/TSR_{\text{full}} = 72.63\%$, and respectively turbine 2 and turbine 3 are 32.49% and 21.5%.

Keywords: *Wind turbine, geometry scale, power coefficient, tip speed ratio*

PENDAHULUAN

Dewasa ini banyak dikembangkan sumber energi terbarukan, seperti sumber energi angin, panas matahari, biogas, biomassa, gelombang air laut, panas bumi dan sebagainya. Turbin angin merupakan salah satu sistem konversi energi angin yang sudah sejak lama dikembangkan. Perkembangan teknologi turbin angin ini, khususnya turbin angin sumbu horisontal atau *horizontal axis wind turbine* (HAWT) tipe propeler tiga blade dewasa ini menunjukkan suatu kemajuan sangat pesat. Hal ini ditandai dengan adanya peningkatan efisiensi turbin dan penurunan

biaya per kWh yang cukup baik. Rotor turbin angin merupakan kunci utama dalam proses perubahan energi kinetik angin menjadi energi mekanik, sehingga rancangan geometri blade yang aerodinamis dengan efisiensi optimum mutlak dibutuhkan agar dapat memaksimalkan energi yang dapat dikonversi tersebut. Turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga blade dengan rotor tunggal (*single rotor*) yang dikenal dengan *single rotor wind turbine* (SRWT) memiliki satu rotor dengan posisi poros horisontal dapat membangkitkan daya listrik dengan atau tanpa menggunakan sistem transmisi. Studi tentang turbin angin sumbu horisontal tipe propeler

tiga blade rotor tunggal secara numerik maupun eksperimental terhadap parameter aerodinamika rotor turbin dengan tujuan untuk meningkatkan performanya. Parameter-parameter tersebut diantaranya geometri blade seperti sudut blade dan profil airfoil, *tip speed ratio* (TSR), solidity atau rasio luas penampang blade terhadap sapuan rotor, dan sebagainya.

Berbagai kajian yang telah dilakukan secara eksperimen dengan skala pengujian ataupun skala geometri pada kondisi laboratorium menunjukkan adanya perbaikan performa aerodinamika rotor blade SRWT. Penurunan faktor skala pengujian ataupun skala geometri pada kondisi laboratorium ini tentu sangat berpengaruh pada performa dari rotor secara signifikan sebagai akibat dari penurunan skala geometri maupun kondisi terowongan angin yang digunakan dalam pengujian. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan pengujian skala laboratorium terhadap performa turbin angin rotor tunggal melalui penurunan faktor skala geometri rotor turbin. Model blade rotor turbin angin menggunakan seri airfoil S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), diameter rotor pada skala lapangan (*full scale*) adalah 0,944 m.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian Eksperimen dilakukan untuk mengukur performansi rotor pada skala laboratorium dengan model turbin yang ditetapkan sebagai sampel untuk dilakukan pengujian.

Pengujian keseragaman aliran dengan profil kecepatan pada seksi uji dilakukan pengujian distribusi kecepatan angin pada seksi uji tanpa turbin dan dengan adanya turbin. Pemasangan benda uji dilakukan berdasarkan cara pengambilan sampel uji untuk setiap model blade dengan masing-masing variasinya. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Nusa Cendana Kupang. Waktu penelitian dilakukan selama 3 bulan. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah : baja

ringan, baling-baling kipas angin, baterai, kalsiboard, generator dan lampu LED. Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah baut dril, bor, gurinda, meter, spidol, dan mata gurinda.

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- Variabel bebas adalah variasi kecepatan angin, faktor skala dan beban
- Variabel terikat Variabel terikat yaitu putaran rotor, tegangan listrik DC dan kuat arus DC
- Variabel terkontrol terdiri atas solidity, sudut pitch, dan jumlah sudut tiga buah untuk rotor depan dan rotor belakang.

Tabel 1. Variabel rasio diameter rotor SRWT.

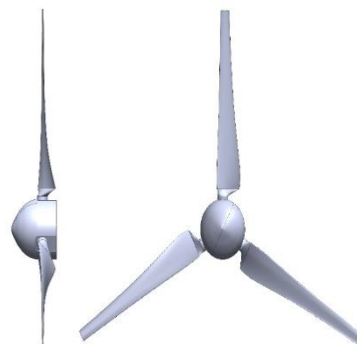
Faktor Skala	100%	30%	26,5%	25%
Diameter rotor D (m)	0,944	0,283	0,250	0,236
Nama turbin	Turbin 0	Turbin 1	Turbin 2	Turbin 3

Terowongan angin

Jalan penelitian ini diawali dengan proses persiapan dan pembuatan serta pemasangan komponen utama penelitian, yaitu: benda uji, terowongan angin, seksi uji, alat-alat ukur termasuk kalibrasi, sistem sensor dan kontrol, rotor turbin, rumah turbin, menara, dan sistem transmisi kemudian dilanjutkan dengan uji coba fungsional tiap komponen. Terowongan angin yang digunakan (Gambar 1) memiliki seksi uji dengan ukuran panjang 60 cm, lebar 30 cm dan tinggi 30 cm serta kecepatan angin maksimum 6 m/s yang digerakan oleh sebuah fan. Karakteristik aliran pada seksi uji sangat penting pada saat pengujian model pada terowongan angin, oleh karena itu diperlukan pengujian karakteristik aliran. Angin yang dihasilkan oleh fan aksial memiliki profil kecepatan yang tidak seragam dan untuk membandingkan dengan profil kecepatan pada seksi uji dilakukan pengujian distribusi kecepatan angin keluar dari fan aksial dan pada seksi uji.

Model Rotor

Model rotor ditunjukkan pada Gambar 2 dan merupakan model turbin skala laboratorium yang akan diuji performanya pada penerunan skala. Pengujian performa rotor turbin mengukur pembebanan yang diberikan pada generator mini DC pada poros rotor. Model *blade* yang digunakan dalam penelitian ini yang selanjutnya disebut sebagai prototipe blade adalah *blade* turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga yang diadopsi dari model *blade* yang dikembangkan oleh NORCOWE (*Norwegian Centre for Offshore Wind Energy*) dan *Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology NTNU, Trondheim, Norway*. *Blade* rotor turbin ini menggunakan seri airfoil S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), dimana diameter rotor 0,944 m [7].



Gambar 2. Geometri rotor.

Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk menentukan besar koefisien daya turbin angin sumbu horizontal rotor tunggal.

Metode analisis untuk menghitung kesalahan pengukuran digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{RMSE}(i) \text{ (Root Mean Square Error)} \\ = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{error} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{x}}$$

Keterangan:

RMSE(i) adalah RMSE data ke-(i)

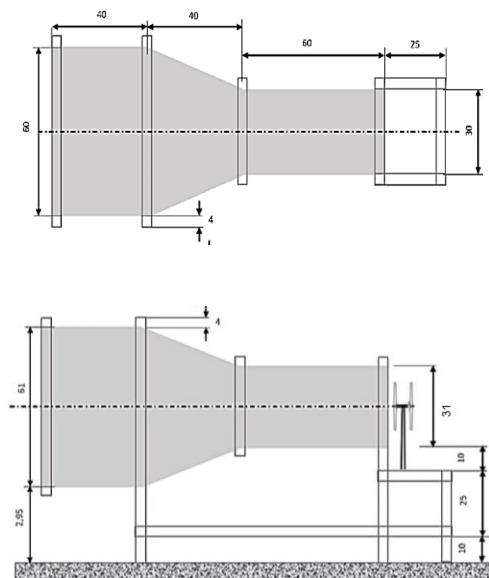
$\overline{\text{RMSE}}$ = rata-rata nilai RMSE

x_i = data hasil pengukuran index (i) menunjukkan jumlah data

\bar{x} = rata-rata hasil pengukuran.

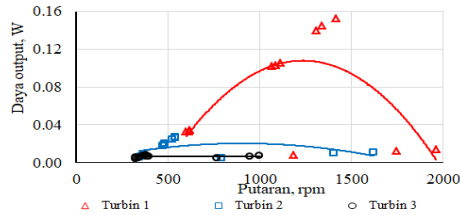
HASIL DAN PEMBAHASAN

Performa rotor turbin rotor tunggal atau SRWT yang dinyatakan dengan hubungan daya output terhadap putaran rotor, daya output terhadap kecepatan angin, dan koefisien daya turbin terhadap *tip speed ratio* (TSR). Gambar 4.8 hingga Gambar 4.10 menunjukkan dengan variasi rasio geometri rotor turbin dari 30% (turbin 1), 26,5 % (turbin 2) dan 25 % (turbin 3) terjadi peningkatan daya output terhadap putaran rotor dan kecepatan angin maupun peningkatan koefisien daya turbin terhadap TSR. Terlihat dari hasil analisis, turbin 1 dengan rasio geometri 30%, menunjukkan daya output dan

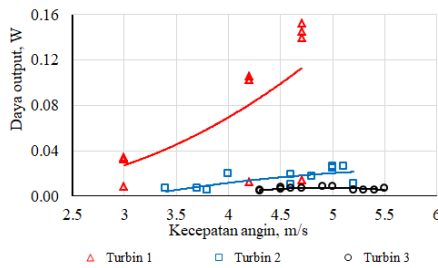


Gambar 1. Terowongan Angin, dalam satuan cm

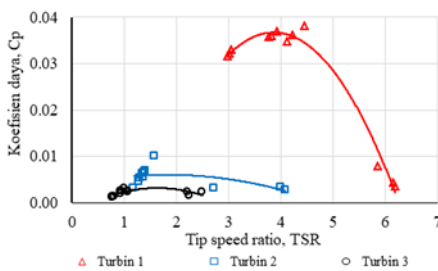
koefisien daya jauh lebih tinggi dari turbin 2 dan turbin 3.



Gambar 3. Hubungan daya output terhadap putaran rotor turbin dengan skala geometri 30%, 26,5%, dan 25% untuk masing-masing turbin 1, turbin 2, dan turbin 3.



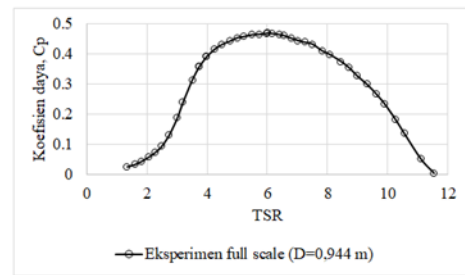
Gambar 4. Hubungan daya output terhadap kecepatan angin pada turbin dengan skala geometri 30%, 26,5%, dan 25% untuk masing-masing turbin 1, turbin 2, dan turbin 3.



Gambar 5. Hubungan koefisien daya terhadap tip speed ratio (TSR) turbin dengan skala geometri 30%, 26,5%, dan 25% untuk masing-masing turbin 1, turbin 2, dan turbin 3.

Hasil eksperimen turbin angin rotor tunggal pada *full scale* ($D=0,944m$), dimana nilai TSR mulai dari $TSR = 1$ hingga $TSR = 12$ dan koefisien daya maksimum, $C_p = 0,468$

pada $TSR = 6$ [7]. Jika dihitung rata-rata koefisien daya turbin dan TSR mulai dari TSR terendah hingga TSR tertinggi diperoleh masing-masing $C_p = 0,3077$ dan $TSR = 5,915$. Sementara penurunan faktor geometri rotor turbin dari 30%, 26,5 % dan 25 % menunjukkan presentasi koefisien daya turbin terhadap turbin *full scale* ($D=0,944m$) yang sangat rendah, terutama pada turbin dengan faktor geometri 25%, yaitu hanya sebesar 0,69%. Sedangkan presentasi TSR turbin karena adanya penurunan faktor skala geometri juga mengalami penurunan, namun tidak serendah seperti pada koefisien daya. Presentasi penurunan TSR akibat penurunan faktor skala geometri untuk masing-masing turbin dari 30%, 26,5 % dan 25 % adalah 72,63%, 32,49% dan 21,50%.



Gambar 6. Performa turbin skala penuh ($D=0,944 m$)

Hasil penelitian ini dengan penurunan faktor geometri rotor turbin dari 30%, 26,5 % dan 25 % menunjukkan presentasi koefisien daya turbin terhadap turbin *full scale* ($D=0,944m$) mengalami penurunan, terutama pada turbin dengan faktor geometri 25%, yaitu hanya sebesar 0,69%. Sedangkan presentasi TSR turbin karena adanya penurunan faktor skala geometri juga mengalami penurunan, namun tidak serendah seperti pada koefisien daya. Presentasi penurunan TSR akibat penurunan faktor skala geometri untuk masing-masing turbin dari 30%, 26,5 % dan 25 % adalah 72,63%, 32,49% dan 21,50%. Hasil penelitian menunjukkan dari ketiga variasi rasio geometri rotor turbin ini (30%,

26,5 % dan 25 %), dari hubungan daya output terhadap putaran rotor dan kecepatan angin maupun koefisien daya turbin terhadap TSR, turbin 1 dengan rasio geometri 30%, menunjukkan daya output dan koefisien daya jauh lebih tinggi dari turbin 2 dan turbin 3.

Presentasi koefisien daya turbin 1 dengan $C_p/C_{p,full} = 8,94\%$, dan masing-masing turbin 2 dan turbin 3 adalah 1,74% dan 0,69 %. Sedangkan presentasi TSR turbin 1 dengan $TSR/TSR_{full} = 72,63\%$, dan masing-masing turbin 2 dan turbin 3 adalah 32,49 % dan 21,5 %. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan faktor geometri turbin mengakibatkan penurunan presentasi koefisien daya turbin maupun presentasi *tip speed ratio* (TSR). Namun penurunan koefisien daya turbin jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan penurunan *tip speed ratio* (TSR).

Jika dilihat dari hubungan masing-masing variabel tak berdimensi ini terhadap faktor geometri turbin, fungsi *tip speed ratio* dan koefisien daya turbin dapat diturunkan dari teori kesebangunan menggunakan metode analisis non-dimensional tentang kesebangunan dan berdasarkan teorai PI Buckingham seperti persamaan berikut [12]:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n) \quad (1)$$

Dimana:

Π_1 adalah variabel terikat

$\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_n$ adalah variabel bebas,

dengan n adalah jumlah fungsi

Daya turbin P dipengaruhi oleh beberapa variabel yang dapat ditulis sebagai fungsi:

$$P = f(R, V, \rho, \omega, \mu, \tau) \quad (2)$$

Dari Persamaan 2 dengan menggunakan metode PI Buckingham, menjadikan fungsi tersebut menjadi non-dimensional. Menentukan jumlah fungsi (n), pengulangan variabel (r=3), yaitu: R, V, dan ρ , dengan jumlah variabel dari Persamaan 2, (k=7). Sehingga jumlah fungsi (Π) adalah $n = k - r = 7 - 3 = 4$.

Sehingga Persamaan 1 ditulis:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) \quad (3)$$

Atau menjadi:

$$\frac{P}{\rho R^2 V^3} = f\left(\frac{\tau}{\rho R^3 V^2}, \frac{\mu}{\rho R V}, \frac{\Omega R}{V}\right) \quad (4)$$

Dimana dari persamaan 4 diperoleh:

$$\frac{P}{\rho R^2 V^3} = \text{koefisien daya turbin}$$

$$\frac{\tau}{\rho R^3 V^2} = \text{koefisien torsi}$$

$$\frac{\mu}{\rho R V} = \text{Re}^{-1} \text{ (angka Reynold)}$$

$$\frac{\Omega R}{V} = \text{tip speed ratio (TSR)}$$

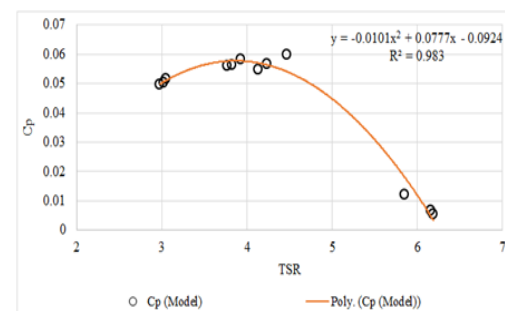
Dari Persamaan ini terlihat bahwa koefisien daya turbin merupakan fungsi dari koefisien torsi, bilangan Reynold dan *tip speed ratio* (TSR). Selanjutnya berdasarkan hasil eksperimen, Persamaan dapat diplot dalam grafik berupa hubungan antar variabel bebas dan variabel terikat seperti Gambar 7 berupa hubungan antara koefisien daya terhadap *tip speed ratio* (TSR). Kurva ini adalah kurva dengan *tren line* berupa fungsi polynomial orde-2 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{P}{\rho R^2 V^3} = -0.0101\left(\frac{\Omega R}{V}\right)^2 + 0.0777\left(\frac{\Omega R}{V}\right) - 0.0924 \quad (5)$$

Atau,

$$P = [-0.0101\left(\frac{\Omega R}{V}\right)^2 + 0.0777\left(\frac{\Omega R}{V}\right) - 0.0924] \rho R^2 V^3 \quad (6)$$

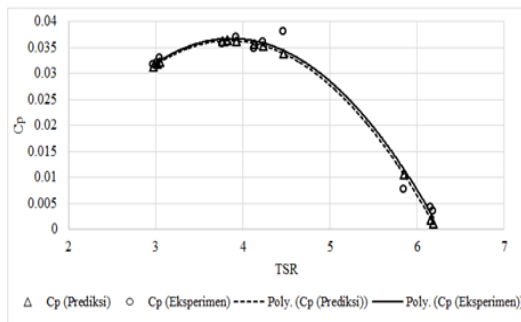
$$P = [-0.0101(TSR)^2 + 0.0777(TSR) - 0.0924] \rho R^2 V^3 \quad (7)$$



Gambar 7. Hubungan koefisien daya terhadap TSR.

Dari Persamaan 6 dan Persamaan 7 dapat dihitung daya turbin dan koefisien daya berdasarkan model pada Gambar 7, hasil prediksi daya turbin dan koefisien daya turbin dibandingkan dengan hasil eksperimen seperti Gambar 8 menunjukkan tren yang berimpit. Hal ini menunjukkan model yang diperoleh tervalidasi dengan baik pada eksperimen. Model ini dapat digunakan untuk memprediksi koefisien daya turbin pada

penurunan maupun peningkatan faktor skala geometri turbin.



Gambar 8. Performa turbin hasil prediksi terhadap hasil eksperimen

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Penurunan faktor geometri rotor turbin dari 30%, 26,5 % dan 25 % menunjukkan presentasi koefisien daya turbin terhadap turbin *full scale* ($D=0,944\text{m}$) mengalami penurunan. Presentasi penurunan koefisien daya turbin 1 dengan $Cp/Cp_{full} = 8,94\%$, dan masing-masing turbin 2 dan turbin 3 adalah 1,74% dan 0,69 %. Sedangkan presentasi penurunan TSR turbin 1 dengan $TSR/TSR_{full} = 72,63\%$, dan masing-masing turbin 2 dan turbin 3 adalah 32,49 % dan 21,5 %.
- Parameter koefisien daya turbin berbanding terbalik dengan pangkat tiga dari geometri turbin (jari-jari rotor, R), sedangkan *tip speed ratio* (TSR) berbanding lurus terhadap pangkat tiga dari geometri turbin (jari-jari rotor, R). Hal ini menunjukkan bahwa untuk penurunan faktor geometri rotor turbin, koefisien daya turbin mengalami penurunan lebih rendah dibandingkan dengan penurunan TSR.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, and A. Crespo, "Wind turbine wake aerodynamics," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 39, pp. 467–510, 2003, Accessed: Jun. 16, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037604210300072>.
- [2]. T. Kanemoto and A. M. Galal, "Development of intelligent wind turbine generator with tandem wind rotors and double rotational armatures (1st report, superior operation of tandem wind rotors)," *JSME Int. J. Ser. B Fluids Therm. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 450–457, 2006. 3, no. 1, 2015.
- [3]. V. A. Koehuan and J. F. Mandala, "Simulasi CFD Performa Aerodinamika Rotor Turbin Angin Counter-Rotating melalui Variasi Rasio Kecepatan Tip Blade dengan Solidity Konstan," *LONTAR J. Tek. Mesin Undana (LJTMU)*, vol. 7, no. 02, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1234/ljtmu.v9i02.3342.
- [4]. V. A. Koehuan, Sugiyono, and S. Kamal, "Numerical Analysis on Aerodynamic Performance of Counter-rotating Wind Turbine through Rear Rotor Configuration," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 140–257, 2019.
- [5]. R. Supreeth, A. Arokiaswamy, N. J. Raikar, and H. P. Prajwal, "Experimental investigation of performance of a small scale horizontal axis wind turbine rotor blade," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 4, pp. 1983–1994, 2019.
- [6]. T. T. Tien, P. Q. Hung, and N. K. Hieu, "Designing a test rig for ultimate load test of small horizontal axis wind turbine rotor blades," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 673, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/673/1/012002.
- [7]. T. T. Tien, P. Q. Hung, and N. K. Hieu, "Designing a test rig for ultimate load test of small horizontal axis wind turbine rotor blades," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 673, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/673/1/012002.

- [8]. H. Canet, P. Bortolotti, and C. L. Bottasso, "On the scaling of wind turbine rotors," *Wind Energy Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 601–626, 2021, doi: 10.5194/wes-6-601-2021.
- [9]. K. V. T.-J. of E. Resources and undefined 2015, "Small-scale wind turbine testing in wind tunnels under low Reynolds number conditions," ... *.asmedigitalcollection.asme.org*, Accessed: Jun. 16, 2018. [Online]. Available: <https://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2294057>.
- [10]. D. M. Eggleston and F. Stoddard, "Wind turbine engineering design," 1987.
- [11]. V. Koehuan, Sugiyono, and S. Kamal, "Investigation of Counter-Rotating Wind Turbine Performance using Computational Fluid Dynamics Simulation," *iopscience.iop.org*, vol. IOP Conf., no. 267 012034, 2017, Accessed: Jun. 10, 2018. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/267/1/012034/meta>.
- [12]. Sutrisno, S. Iswahyudi, and S. B. Wibowo, "Dimensional Analysis of Power Prediction of a Real-Scale Wind Turbine Based on Wind-Tunnel Torque Measurement of Small-Scaled Models," *Energies*, vol. 11, no. 9, pp. 1–12, 2018, doi: 10.3390/en11092374.