



## Analisis Kinerja Turbin Savonius Dua Tahap dengan Variasi *Phase-Shift Angle* Berbasis *Computational Fluid Dynamics*

Muhammad Khusni Mubarok<sup>1)</sup>, Fuad Hilmy<sup>1)\*</sup>, Raka Mahendra Sulisty<sup>1)</sup>, Arif Rahman Saleh<sup>1)</sup>, Arrizka Yanuar Adipradana<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang, 56116

<sup>2)</sup>Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang, 56116

e-mail: [fuadhilmy@untidar.ac.id](mailto:fuadhilmy@untidar.ac.id)

### ABSTRAK

Seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan kemajuan teknologi, kebutuhan energi terus mengalami peningkatan. Energi listrik menjadi salah satu bentuk energi yang paling banyak dikonsumsi masyarakat. Salah satu solusi untuk memenuhi kebutuhan ini adalah memanfaatkan sumber energi terbarukan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan menggunakan turbin hidrokinetik tipe Savonius. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh desain variasi *Phase-Shift Angle* (PSA) terhadap kinerja turbin Savonius 2-stage pada aliran Sungai Gending. Penelitian dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan variasi PSA sebesar 15°, 30°, dan 45°, serta Tip Speed Ratio (TSR) sebesar 0,8 dan kecepatan aliran sungai sebesar 0,7874 m/s. Model turbulensi yang digunakan adalah  $k-\omega$  SST dalam kondisi *steady-state*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa performa terbaik dicapai pada turbin Savonius 2-stage dengan variasi PSA 45°, menghasilkan torsi sebesar 1,85012 Nm, koefisien torsi ( $C_T$ ) sebesar 0,233, dan koefisien daya ( $C_P$ ) sebesar 0,186. Sedangkan, performa terendah turbin Savonius 2-stage dengan variasi PSA 15°, menghasilkan torsi sebesar 1,5529 Nm,  $C_T$  sebesar 0,195, dan  $C_P$  sebesar 0,156.

Kata Kunci: Energi, Turbin, Torsi

### ABSTRACT

Along with population growth and technological advances, energy demand continues to increase. Electricity has become one of the most widely consumed forms of energy by society. One solution to meet this demand is to utilize renewable energy sources, such as Microhydro Power Plants (PLTMH) that use Savonius-type hydrokinetic turbines. This study aims to analyze the influence of Phase-Shift Angle (PSA) design variations on the performance of a 2-stage Savonius turbine in the Gending River flow. The study was conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) with PSA variations of 15°, 30°, and 45°, a Tip Speed Ratio (TSR) of 0.8, and a river flow velocity of 0.7874 m/s. The turbulence model used was  $k-\omega$  SST under steady-state conditions. Simulation results showed that the best performance was achieved by the 2-stage Savonius turbine with a PSA variation of 45°, producing a torque of 1.85012 Nm, a torque coefficient ( $C_T$ ) of 0.233, and a power coefficient ( $C_P$ ) of 0.186. Meanwhile, the lowest performance of the 2-stage Savonius turbine with a PSA variation of 15° produced a torque of 1.5529 Nm, a  $C_T$  of 0.195, and a  $C_P$  of 0.156.

Keywords: Energy, Turbine, Torque

### 1. Pendahuluan

Kebutuhan energi terus meningkat seiring perkembangan teknologi dan pertumbuhan penduduk, dengan listrik sebagai energi utama yang dikonsumsi. Sebagian besar listrik masih dihasilkan dari PLTU berbahan bakar fosil yang tidak terbarukan dan beremisi tinggi [1]. Energi Baru dan Terbarukan (EBT) merupakan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan dan berpotensi mendukung keberlanjutan pasokan energi di masa depan [2]. Indonesia

mempunyai peluang besar dalam pemanfaatan energi baru dan terbarukan, seperti energi surya, energi angin, biomassa, energi gelombang laut, energi air (hidro), serta energi panas bumi (geotermal) [3]. Energi air merupakan salah satu EBT dengan potensi besar di Indonesia, mencapai 75.091 MW. Namun, pemanfaatannya masih terbatas, yakni sekitar 7,2% dari total potensi [1].

PLTMH merupakan pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan sumber daya air seperti aliran sungai, irigasi, dan air terjun [4]. Magelang merupakan wilayah yang berpotensi untuk pengembangan PLTMH, didukung oleh keberadaan sejumlah mata air dan sungai. Salah satunya adalah Sungai Gending, yang memiliki aliran air relatif stabil sepanjang tahun, sehingga layak dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan. Penelitian sebelumnya oleh [5] menunjukkan bahwa Sungai Gending memiliki kecepatan aliran rata-rata 0,7874 m/s. Kecepatan aliran tersebut tergolong rendah.

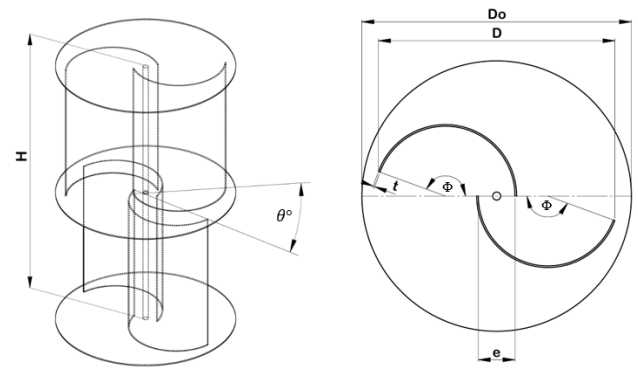
Pengembangan sumber energi air dengan kecepatan aliran rendah dapat dilakukan dengan teknologi hidrokinetik menggunakan turbin Savonius yang memiliki struktur sederhana [6]. Selain itu, turbin Savonius juga efektif pada aliran kecepatan rendah [7]. Turbin Savonius telah banyak dikaji melalui pendekatan numerik dan eksperimental untuk memahami karakteristik kinerjanya. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [8] telah mengkaji dampak perubahan desain *phase-shift angle* (PSA) terhadap turbin angin Savonius 2-stage dan 2-blade. Variasi PSA sebesar 0°, 30°, 60°, dan 90° diuji pada kecepatan angin 6 m/s menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic*. Hasil menunjukkan performa terbaik pada PSA 30° dengan  $C_{P_{max}}$  0,29 dan  $C_{T_{max}}$  0,71, sedangkan performa terendah terjadi pada PSA 90° dengan  $C_{P_{max}}$  0,16 dan  $C_{T_{max}}$  0,4.

Berdasarkan pada penelitian sebelumnya, diperlukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh variasi desain PSA pada turbin hidrokinetik Savonius 2-stage untuk aplikasi dalam fluida air. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui dampak dari perubahan desain PSA terhadap performa turbin hidrokinetik Savonius 2-stage dengan kecepatan aliran Sungai Gending sebesar 0,7874 m/s menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD).

## 2. Metode

### 2.1 Model fisik

Turbin hidrokinetik Savonius dalam penelitian ini memiliki dua tingkat (*stage*) saling bertumpuk yang ditunjukkan pada Gambar 1. Kedua stage memiliki bentuk dan dimensi geometris yang sama. Dimensi geometri turbin ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 1. Turbin hidrokinetik Savonius 2-stage

Tabel 1. Dimensi Geometri Turbin

Parameter	Nilai
Jumlah blade	2
Aspect ratio (H/D)	1,8
Overlap ratio (e/D)	0,15
Diameter turbin (D)	305,56 mm
Tinggi turbin (H)	550 mm
Diameter <i>endplate</i> (Do)	336,116 mm
Blade arc angle ( $\Phi$ )	160°
Ketebalan <i>blade</i> (t)	2 mm
Phase-Shift Angle ( $\theta^\circ$ )	15°, 30°, 45°

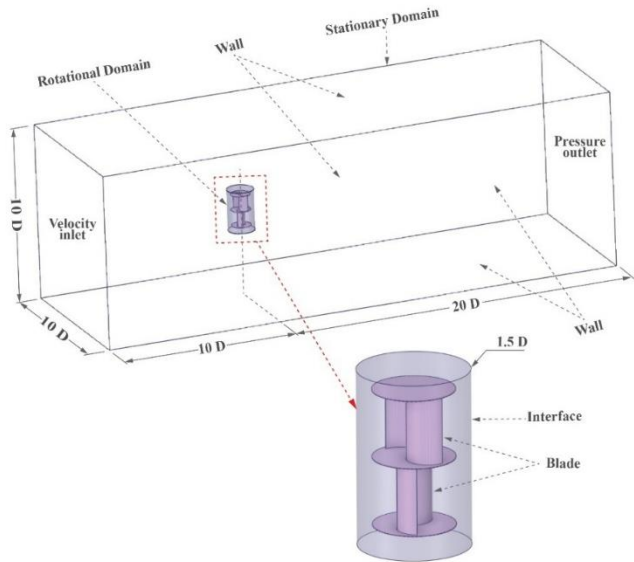
Rotor atas diputar dengan sudut 15°, 30°, 45° dan disebut sebagai *phase-shift angle* (PSA). Diameter *endplate* (Do) sebesar 1,1 dari diameter turbin, dan setiap *stage* memiliki *endplate*. Aspek rasio (H/D) dan *overlap ratio* (e/D) masing-masing sebesar 1,8 dan 0,15 untuk seluruh turbin.

### 2.2 Domain komputasi dan kondisi batas

Domain terdiri dari *stationary domain* dan *rotational domain* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kedua domain tersebut dipisahkan menggunakan *interface* untuk memastikan kontinuitas medan aliran. Pengukuran domain dilakukan dengan kelipatan diameter turbin (D). *Stationary domain* memiliki ukuran  $30D \times 10D \times 10D$ , sesuai penelitian [9]. Jarak dari pusat turbin dan inlet adalah  $10D$ , sesuai penelitian [10]. Diameter *rotational domain* sebesar  $1,5D$ .

Batas kiri dan kanan ditetapkan sebagai inlet dan outlet. Kecepatan aliran inlet dijaga pada 0,7874 m/s dengan *turbulent viscosity ratio* dan *intensity* sebesar 10% dan 5%. Outlet ditetapkan dengan kondisi batas *pressure-based*, dan *gauge pressure* ditetapkan nol. Permukaan turbin dianggap sebagai dinding berputar dan ditetapkan sebagai *no-slip boundary condition*. Turbin berputar pada kecepatan yang sesuai dengan nilai TRS sebesar 0,8. Fluida kerja yang

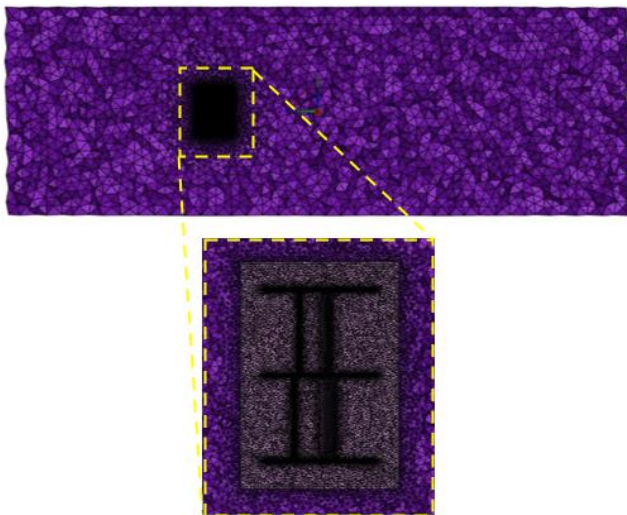
digunakan adalah air dengan densitas  $998 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas dinamis  $0,001003 \text{ kg/ms}$ .



**Gambar 2.** Domain Komputasi

**2.3 Meshing**

Jenis *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *tetrahedral*. Zona *stationary* menggunakan elemen *mesh* kasar, sedangkan zona *rotational* dan turbin menggunakan elemen *mesh* lebih halus ditunjukkan pada Gambar 3. Kualitas *mesh* dievaluasi menggunakan kualitas *orthogonal* dan *skewness*. Pada penelitian ini, kualitas *orthogonal* dan *skewness* masing-masing memiliki nilai 0,23 dan 0,49. Mesh disekitar turbin menggunakan jenis *inflation layer* dengan jumlah 10 untuk menangkap pengaruh lapisan batas dengan benar pada kinerja turbin. Untuk mengevaluasi mesh disekitar turbin menggunakan nilai  $y^+$  dan pada penelitian ini memiliki nilai  $y^+$  kurang dari 5, sesuai penelitian oleh [9].



**Gambar 3.** Mesh dari domain komputasi

**2.4 Solusi numerik**

Model turbulensi  $k-\omega$  SST *steady-state* digunakan untuk menganalisis pengaruh PSA pada kinerja turbin hidrokinetik

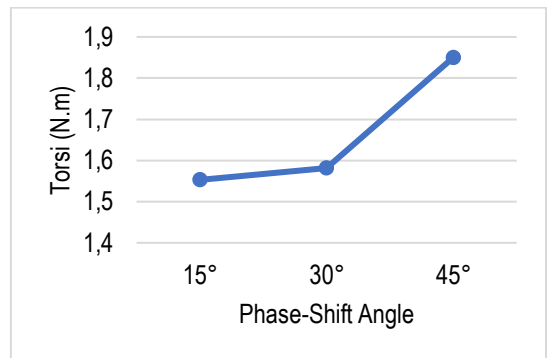
Savonius dua tingkat. Model turbulensi ini digunakan karena memiliki kombinasi elemen superior dari model turbulensi  $k-\omega$  dan  $k-\epsilon$  sehingga cocok untuk simulasi pada turbin.

Metode *SIMPLE* digunakan untuk memisahkan kecepatan dan tekanan. Kriteria konvergensi untuk semua residual ditetapkan pada  $10^{-4}$ .

**3. Hasil dan Pembahasan**

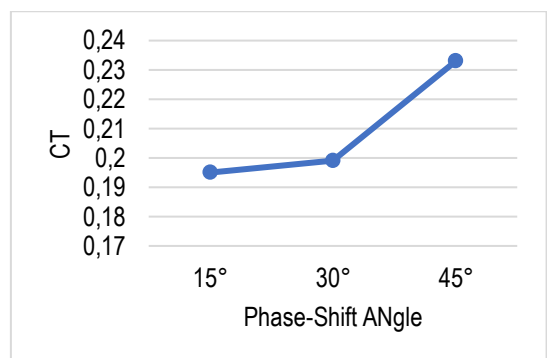
**3.1 Perbandingan kinerja turbin dengan variasi PSA**

Data yang digunakan untuk menganalisis performa turbin berdasarkan variasi desain *phase-shift angle* (PSA) meliputi nilai torsi, koefisien torsi ( $C_T$ ), dan koefisien daya ( $C_P$ ) pada kondisi kecepatan aliran air sebesar  $0,7874 \text{ m/s}$  dan *tip speed ratio* (TSR) sebesar 0,8. Seluruh data yang diperoleh kemudian diolah dan disajikan dalam bentuk grafik perbandingan untuk masing-masing variasi PSA guna mempermudah interpretasi perbedaan performa antar desain.

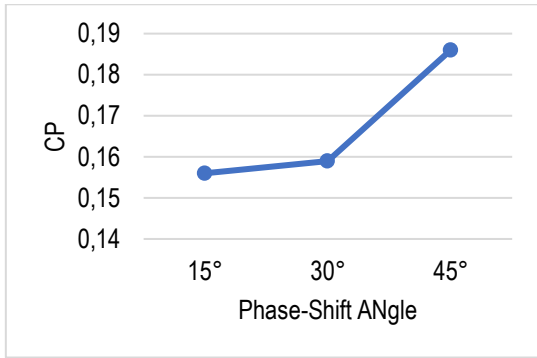


**Gambar 4.** Grafik torsi vs PSA

Berdasarkan Gambar 4. Terlihat bahwa perubahan PSA pada turbin sangat berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan oleh turbin. Grafik pada Gambar 4. menunjukkan torsi turbin mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan PSA pada turbin. Torsi mengalami peningkatan signifikan pada PSA  $45^\circ$  dengan nilai torsi sebesar  $1,85012 \text{ Nm}$ . Sedangkan, desain variasi turbin dengan PSA  $15^\circ$  dan  $30^\circ$  menghasilkan torsi yang hampir sama dan lebih rendah dari PSA  $45^\circ$ , masing-masing sebesar  $1,55290 \text{ Nm}$  dan  $1,58109 \text{ Nm}$ .



**Gambar 5.** Grafik  $C_T$  vs PSA

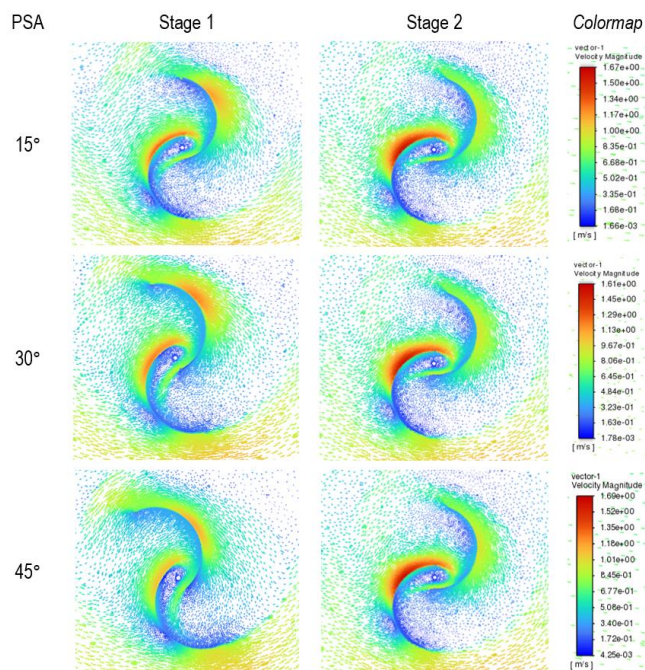


**Gambar 6.** Grafik  $C_p$  vs PSA

Gambar 5. dan Gambar 6. Menunjukkan turbin dengan variasi desain PSA 45° memiliki nilai  $C_T$  dan  $C_p$  tertinggi, masing-masing sebesar 0,233 dan 0,188. Turbin dengan variasi PSA 30° memiliki nilai  $C_T$  dan  $C_p$  masing-masing sebesar 0,199 dan 0,159. Turbin dengan variasi desain PSA 15° memiliki nilai  $C_T$  dan  $C_p$  terendah, masing-masing sebesar 0,195 dan 0,156. Grafik nilai  $C_T$  dan  $C_p$  memiliki tren yang sama dengan grafik torsi. Ini disebabkan karena torsi yang dihasilkan oleh turbin, sangat berpengaruh terhadap nilai  $C_T$  dan  $C_p$ . Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Mohanad [11], dimana modifikasi bilah yang dilakukan dapat meningkatkan torsi dan berdampak langsung pada peningkatan nilai  $C_T$  dan  $C_p$ .

### 3.2 Analisis kinerja turbin dengan variasi PSA

Vektor kecepatan aliran digunakan untuk menganalisis fenomena aliran fluida disekitar turbin yang ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Vektor kecepatan aliran air

Berdasarkan Gambar 7, distribusi vektor kecepatan pada stage 1 sama untuk semua variasi PSA, karena konfigurasi sudu sama. Sedangkan, pada stage 2 terlihat perbedaan pada pola vektor kecepatan antar variasi, yang dipengaruhi oleh perubahan nilai PSA, terutama di sekitar sudu yang bergerak melawan arah aliran (*advancing blade*).

Gambar 7 menunjukkan konfigurasi PSA 45° memiliki area *dragging flow* di sisi cembung *advancing blade* yang paling sempit dibandingkan dengan variasi PSA lainnya. Hal ini berdampak pada peningkatan torsi positif. Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian [12], yang menyatakan bahwa besarnya *dragging flow* di sisi cembung *advancing blade* dapat mengurangi torsi positif dan menurunkan efisiensi kerja turbin.

Selain itu, konfigurasi PSA 45° memiliki pola vektor kecepatan yang lebih terarah dan merata menuju sisi cekung *advancing blade*. Distribusi ini menandakan konsentrasi energi kinetik yang lebih tinggi di area tersebut. Aliran dengan kecepatan lebih besar ke sisi cekung *advancing blade* berpotensi meningkatkan torsi, daya keluaran, dan efisiensi turbin secara keseluruhan [13].

## 4. Kesimpulan

Turbin hidrokinetik Savonius 2-stage memiliki performa terbaik dengan desain variasi PSA 45°. Torsi yang dihasilkan sebesar 3,44705 Nm,  $C_T$  sebesar 0,235 dan  $C_p$  sebesar 0,188. Pada kecepatan aliran yang sama, turbin hidrokinetik Savonius 2-stage dengan variasi PSA 15°. Torsi yang dihasilkan sebesar 2,88019 Nm,  $C_T$  sebesar 0,196 dan  $C_p$  sebesar 0,157.

Vektor kecepatan aliran menunjukkan konfigurasi PSA 45 memiliki pola aliran yang paling bagus karena mampu meningkatkan torsi positif yang dihasilkan turbin.

## Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Tidar atas segala dukungan dan fasilitas yang diberikan selama proses penelitian ini. Tanpa dukungan dari Universitas Tidar, penyusunan jurnal ini tidak akan dapat terlaksana dengan baik.

## Daftar Pustaka

- [1] A. Taufiqurrahman and J. Windarta, "Overview Potensi dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 3, pp. 124–132, Oct. 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.10036.
- [2] J. S. Setyono, F. H. Mardiansjah, and M. F. K. Astuti, "Potensi Pengembangan Energi Baru Dan Energi Terbarukan Di Kota Semarang," 2019. Available: <http://ripteck.semarangkota.go.id>

- [3] P. A. Pratama, M. Malyadi, and Y. A. Wicaksono, "Studi Eksperimental Variasi Bentuk Sudu Dan Sudut Terhadap Kinerja Turbin Pelton," *AutoMech J. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 01, pp. 31–38, 2021, doi: 10.24269/jtm.v1i01.4254.
- [4] Y. Apriani, Z. Saleh, R. K. Dillah, and I. M. Sofian, "Analysis of the local energy potential connection with power plants based on archimedes turbine 10 kW," *J. Robot. Control*, vol. 1, no. 5, pp. 162–166, Sep. 2020, doi: 10.18196/jrc.1533.
- [5] A. Y. Adipradana, F. Hilmy, H. T. Setiawan, A. R. Prabowo, and I. Yaningsih, *Energi Kinetik Air: Potensi, Desain, dan Simulasi*. Samarinda: Mulaawarman University Press, 2022.
- [6] V. Patel and R. Patel, "Experimental investigations to improve the performance of the savonius hydrokinetic turbines using wavy edge vanes," *Appl. Ocean Res.*, vol. 161, no. August 2023, 2025, doi: 10.1016/j.apor.2025.104606.
- [7] D. M. Prabowoputra, S. Hadi, A. R. Prabowo, and J. M. Sohn, "Performance investigation of the savonius horizontal water turbine accounting for stage rotor design," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 184–189, Feb. 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.2.184-189.
- [8] D. M. Prabowoputra and A. R. Prabowo, "Effect of the Phase-Shift Angle on the vertical axis Savonius wind turbine performance as a renewable-energy harvesting instrument," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 57–66, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.06.092.
- [9] A. S. Saad, A. Elwardany, I. I. El-Sharkawy, S. Ookawara, and M. Ahmed, "Performance evaluation of a novel vertical axis wind turbine using twisted blades in multi-stage Savonius rotors," *Energy Convers. Manag.*, vol. 235, no. November 2020, p. 114013, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114013.
- [10] A. Rezaeiha, I. Kalkman, and B. Blocken, "CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio : Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment," *Renew. Energy*, vol. 107, pp. 373–385, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.02.006.
- [11] M. Al-Ghriyah and D. H. Didane, "Performance Improvement of a Savonius Wind Turbine using Wavy Concave Blades," *CFD Lett.*, vol. 15, no. 9, pp. 32–44, 2023, doi: 10.37934/cfdl.15.9.3244.
- [12] A. Sanusi, "Simulasi Aliran Fluida pada Blade Rotor Turbin Angin Savonius dengan Computation Fluid Dynamics (CFD)," *Lontar J. Tek. Mesin Undana*, vol. 4, no. 1, pp. 11–15, 2017, <http://ejournal-fst-unc.com/index.php/LJTMU>
- [13] A. H. Elbatran, Y. M. Ahmed, and A. S. Shehata, "Performance study of ducted nozzle Savonius water turbine, comparison with conventional Savonius turbine," *Energy*, vol. 134, pp. 566–584, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.041.