

Pengaruh Ratio Overlap Sudu Terhadap Performa Turbin Air Poros Horizontal Savonius

(1)* Rendi

⁽¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Islam Kalimantan
Jl. Adhyaksa No.2 Kayi Tangi Banjarmasin Kalimantan Selatan, Indonesia

*Email: rendi.teknikmesin@gmail.com

Diterima: 12.03.2023, Disetujui: 12.05.2023, Diterbitkan: 24.05.2023

ABSTRACT

The Savonius air turbine has the ability to generate electricity from low-flow water sources and can be used in various types of water sources. However, the efficiency of this turbine is still low compared to other types of water turbines. Previous studies have shown that the overlap ratio of the blades can affect the turbine efficiency and power generated. Therefore, this study aims to investigate the effect of blade overlap ratio on the performance of horizontal-axis Savonius water turbine. The purpose of this research is to study the influence of blade overlap ratio. It is hoped that the results of this study can be used as a reference in the production of horizontal-axis Savonius water turbines.

Keywords: Savonius Air Turbine, overlap ratio, performance.

ABSTRAK

Turbin air Savonius memiliki kemampuan untuk menghasilkan listrik dari arus air rendah dan dapat digunakan pada berbagai jenis sumber air. Namun, efisiensi turbin ini masih rendah dibandingkan dengan jenis turbin air lainnya. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengungkapkan bahwa rasio overlap sudu dapat mempengaruhi efisiensi turbin dan daya yang dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh rasio overlap sudu terhadap performa turbin air poros horizontal Savonius. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh rasio overlap sudu. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pembuatan turbin air Savonius poros horizontal.

Kata kunci: Turbin Air Savonius, rasio overlap, performa

I. Pendahuluan

Ketersediaan energi yang mencukupi adalah kebutuhan penting dalam kehidupan modern sekarang ini (Nguyen, V. T., Nguyen, V. D., Nguyen, D. T., & Huynh, V. L. 2019). Namun nyatanya masih banyak negara di seluruh dunia ini yang masih mengalami kekurangan energi atau kesulitan dalam memenuhi kebutuhan energi masyarakatnya (Araya, D., LaFave, J. and Kimball, R. 2013) & (Rahman, M., Hasanuzzaman, M., Hasan, M., Ahmed, S. and Ali, M. 2019). Kondisi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti ketergantungan pada sumber energi fosil, krisis ekonomi, atau faktor lingkungan yang menghambat pengembangan infrastruktur energi (Arifin, J., 2019) & (Rendi, R., 2017). Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan mengembangkan energi terbarukan, seperti energi air, angin, surya (Burek, S. and Hankey,

W.1980) & (Rendi, R. and Hartadi, B., 2018). Meskipun teknologi energi terbarukan telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, namun pemanfaatannya masih belum optimal di beberapa negara (Hartadi, B., 2018) & (Rendi, R., Ihsan, S. and Ma'arif, S., 2020). Salah satu jenis energi terbarukan yang belum banyak dimanfaatkan adalah energi air (Bhattacharya, S., Saha, U. K., & Bandyopadhyay, S. 2015) & (Rendi, R. and Herlina, F., 2022). Energi air dapat dimanfaatkan melalui pembangkit listrik tenaga air yang menggunakan turbin air untuk mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik, dan selanjutnya menjadi energi listrik (Hatradi, B., Irfansyah, M. and Puteri, P., 2021) & (Rendi, R., Arifin, J., Mujiburrahman, M. and Trianiza, I., 2020). Ada beberapa jenis turbin air yang berbeda, salah satunya adalah turbin air Savonius (Gandhidasan, P., & Mohanraj, M. 2016) & (Rendi, R. and Sidiq, A., 2018). Turbin air Savonius adalah jenis

turbin air poros horizontal yang dirancang oleh seorang insinyur Prancis, bernama Georges Jean Marie Darrieus Savonius pada tahun 1922. (Hartadi, B., 2022) & (Gandhidasan, P., & Mohanraj, M. 2016). Turbin air Savonius memiliki bentuk seperti setengah silinder dengan dua sudu membentuk huruf "S" dan beroperasi dengan prinsip aksi dan reaksi (Jain, R., & Gupta, N. K. 2017) & (Rendi, R., Hartadi, B., Firman, M. and Irfansyah, M., 2022). Keunggulan dari turbin air Savonius adalah kemampuannya untuk menghasilkan listrik dari arus air rendah dan bisa digunakan pada berbagai jenis sumber air seperti sungai, air laut, dan air limbah (Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. 2009) & (Sharma, R. and Kumar, N. 2013). Turbin ini juga dapat beroperasi pada kecepatan aliran air rendah yang tidak dapat dijangkau oleh jenis turbin aliran air lainnya (Karami, H., Faramarzi, A., & Bina, M. A. 2017) & (Singh, R. K., & Sarviya, R. M. 2020). Namun, kelemahan dari turbin air Savonius adalah efisiensi yang masih rendah dibandingkan dengan jenis turbin air lainnya. (Khan, N., & Energy, N. (2009) & (Veeramalai, K., Raja, M. T., & Venkatesan, M. 2021). Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi turbin air Savonius adalah rasio overlap sudu. (rendi dan abdurahim Sidiq, 2019) & (Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M., & Streimikiene, D. 2018). Penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan. Burek dan Hankey (1980) melakukan penelitian mengenai pengaruh rasio overlap sudu terhadap performa turbin Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan rasio overlap sudu dari 0.25 hingga 1.0 dan mengukur efisiensi turbin pada setiap variasi rasio. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio overlap sudu yang optimal untuk mencapai efisiensi maksimum adalah sekitar 0.25 hingga 0.35. kemudian dilakukan oleh Sharma dan Kumar (2013) melakukan penelitian numerik mengenai pengaruh rasio overlap sudu pada turbin Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulasi numerik dengan variasi rasio overlap sudu dari 0.2 hingga 0.8. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio overlap sudu yang optimal adalah sekitar 0.3 hingga 0.4 untuk mencapai efisiensi maksimum. Kemudian dilakukan oleh Araya, LaFave, dan Kimball (2013) melakukan penelitian mengenai pengaruh rasio overlap sudu pada turbin aliran air Savonius. Penelitian ini

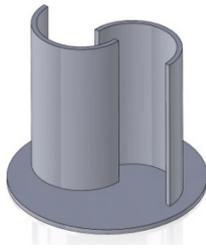
dilakukan dengan memvariasikan rasio overlap sudu dari 0.1 hingga 0.5 dan mengukur daya yang dihasilkan pada setiap variasi rasio. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio overlap sudu yang optimal adalah sekitar 0.2 hingga 0.3 untuk mencapai daya maksimum. Kemudian dilakukan oleh Rahman et al. (2019) melakukan penelitian mengenai pengaruh rasio overlap sudu pada turbin Savonius dengan sudu melengkung. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan rasio overlap sudu dari 0.2 hingga 0.8 dan mengukur efisiensi turbin pada setiap variasi rasio. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio overlap sudu yang optimal adalah sekitar 0.3 hingga 0.4 untuk mencapai efisiensi maksimum.

Ratio overlap sudu mempengaruhi karakteristik aliran yang masuk ke dalam sudu-sudu turbin. Dalam beberapa penelitian sebelumnya, ditemukan bahwa rasio overlap sudu yang optimal dapat meningkatkan efisiensi turbin dan daya yang dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh rasio overlap sudu terhadap performa turbin air poros horizontal Savonius perlu dilakukan. Penelitian ini bermaksud untuk mempelajari pengaruh rasio overlap sudu terhadap performa turbin air poros horizontal Savonius. Dengan mempelajari pengaruh rasio overlap sudu, diharapkan dapat ditemukan nilai rasio yang optimal untuk meningkatkan efisiensi dan daya yang dihasilkan oleh turbin air Savonius.

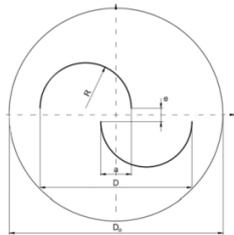
II. Bahan dan Metode

1. Geometri

Dalam penelitian ini, rotor turbin di teliti melalui metode simulasi CFD. Untuk mengkaji pengaruh rasio overlap terhadap performa turbin dilakukan simulasi 2D dengan skala penuh sesuai dengan gambar rancangan. Dimensi model simulasi mengacu pada penelitian sebelumnya, ini dilakukan untuk mempermudah dalam proses verifikasi hasil penelitian. Dimensi model simulasi yaitu dengan tinggi $H = 32$ cm ; diameter $D = 32$ cm ; aspek rasio $H/D = 1$; diameter pelat ujung $Do/D = 1,2$; jarak antar bilah $e = 0$. Rasio overlap diuji dalam rentang: $a/D = 0,0-0,5$.



Gambar 1 Turbin air Savonius



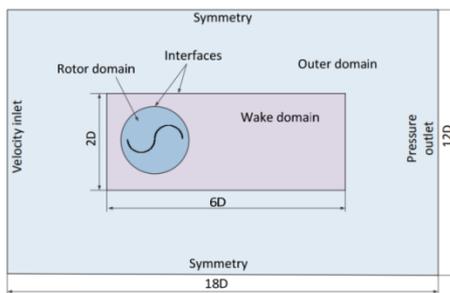
Gambar 2 Parameter Geometri

2. Domain Komputasi

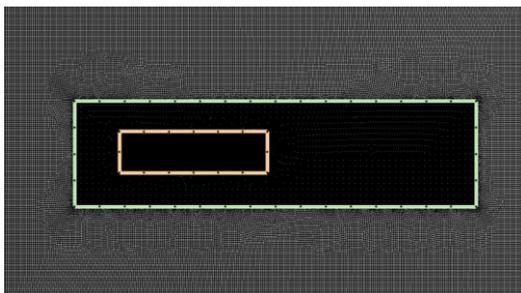
Studi ini menggunakan simulasi 2D dengan ANSYS Fluent. Model terdiri dari dua domain utama, yaitu domain yang berputar yang mencakup baling-baling turbin dan end pelat, dan domain yang diam yang mensimulasikan aliran air.

3. Struktur Mesh

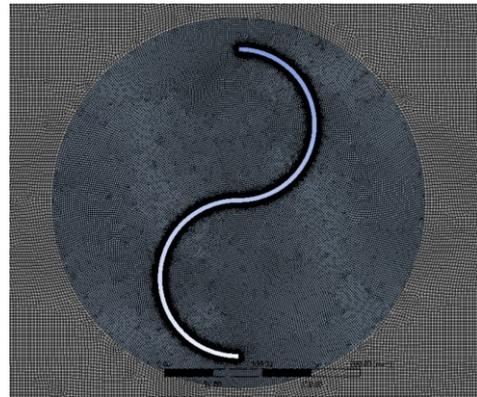
Mesh yang digunakan adalah mesh heksagonal tidak terstruktur dengan layer heksagonal tegak lurus pada sumbu rotor. Model terdiri dari 430885 node dan 428572 element.



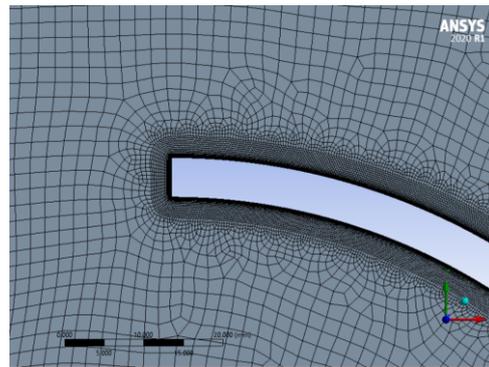
Gambar 3 Domain Komputasi



Gambar 4. Struktur Mesh



Gambar 5 Struktur Mesh Turbin



Gambar 6. Detail Mesh

4. Perhitungan Kinerja

Koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_m) adalah parameter kinerja yang penting dalam analisis kinerja turbin atau baling-baling. Kedua parameter ini didefinisikan sebagai berikut: C_p adalah rasio antara daya yang dihasilkan oleh baling-baling dengan daya yang tersedia pada aliran udara yang melalui baling-baling. Secara matematis, C_p dapat didefinisikan sebagai:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \dots\dots\dots(1)$$

koefisien daya (C_p) menunjukkan efisiensi baling-baling dalam mengubah energi kinetik aliran air menjadi energi mekanik. Nilai maksimum dari C_p terjadi pada suatu nilai tip rasio kecepatan tertentu, yang disebut tip speed ratio (TSR) yang optimal. Sedangkan C_m adalah rasio antara torsi yang dihasilkan oleh baling-baling dengan momen inersia baling-baling. Secara matematis, C_m dapat didefinisikan sebagai:

$$C_m = \frac{|M|}{\frac{1}{2} \rho v^2 AR} \dots\dots\dots(2)$$

koefisien torsi (Cm) menunjukkan kemampuan baling-baling dalam menghasilkan torsi yang diperlukan untuk menggerakkan generator listrik. Nilai maksimum dari Cm terjadi pada TSR yang berbeda dengan nilai maksimum dari Cp. Koefisien daya dan koefisien torsi sangat penting untuk memaksimalkan kinerja turbin angin atau baling-baling. Dengan mengetahui fungsi Cp dan Cm sebagai fungsi dari tip speed ratio pada setiap posisi sudut rotor, kita dapat menentukan desain yang optimal untuk baling-baling agar menghasilkan daya mekanik yang maksimum. Sedangkan Tip Speed Ratio (TSR) adalah rasio antara kecepatan ujung baling-baling (tip speed) dan kecepatan aliran udara yang melalui baling-baling. Secara matematis, TSR dapat didefinisikan sebagai:

$$\lambda = \frac{|\omega|R}{v} \dots\dots\dots(3)$$

TSR adalah salah satu parameter kunci dalam desain turbin atau baling-baling, karena menentukan efisiensi konversi energi dari aliran fluida menjadi energi mekanik. Nilai optimal dari TSR tergantung pada bentuk dan ukuran baling-baling, serta kecepatan fluida yang tersedia di lokasi instalasi.

5. Metode Numberik

Untuk mengkaji karakteristik aliran turbulen di sekitar rotor, dilakukan simulasi dinamika fluida dengan menggunakan teknik *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dalam simulasi ini, persamaan matematika yang digunakan adalah berdasarkan pada persamaan Navier-Stokes.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

Persamaan momentum

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho u_i u_j)}{\partial x_j}$$

Dimana $(-\rho u_i u_j)$ didefinisikan sebagai :

$$(-\rho u_i u_j) = \mu_t \left(\frac{\partial x_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Dalam penelitian ini, kami telah memanfaatkan model turbulensi k-ε. Untuk memodelkan kinetika turbulen, digunakan

persamaan transportasi yang sesuai dengan model tersebut.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon \frac{\epsilon^2}{k}$$

Viskositas turbulen ditentukan oleh :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \dots\dots\dots(4)$$

6. Model Turbulensi dan Solusi

Dalam penelitian ini, digunakan model turbulensi RNG k-ε yang terkenal akurat untuk memprediksi mesin berputar karena memasukkan efek swirl pada turbulensi. Selain itu, model RNG k-ε memberikan rumus diferensial secara analitik untuk viskositas efektif yang memperhitungkan efek Reynold rendah. Setiap kasus disimulasikan dengan variasi tip speed ratio dari 0,4 sampai 1,2. Model sliding mesh digunakan untuk mensimulasikan rotasi rotor. Setiap simulasi berlangsung selama lima revolusi untuk memungkinkan konvergensi. Konvergensi ditentukan oleh perbedaan skala residu yang kurang dari 1×10^{-5} .

7. Metode Input Data di Ansys Fluent

Sebagai contoh, kita gunakan data kecepatan fluida 4 m/s. untuk menjalankan simulasi di Ansys Fluent kita akan menghitung nilai Time Step Size (TSS) Berikut adalah langkah-langkah perhitungannya :

Menghitung Kecepatan putaran turbin dengan TSR =0.5

$$\omega = \frac{2(TSR * V)}{D}$$

$$\omega = \frac{2(0.5 * 4 \text{ m/s})}{0.32 \text{ m}} = 15.62 \text{ rad/s}$$

Menghitung Time Step Size (TSS) dengan TSR =0.5

Kecepatan putaran per menit (rpm)

$$RPM = \frac{\omega * 60}{2 * V}$$

$$RPM = \frac{15.62 \text{ rad / s} * 60}{2 * 4 \text{ m / s}} = 149.2$$

Kecepatan putaran per sekon (rps)

$$RPS = \frac{RPM}{60}$$

$$RPS = \frac{149.2}{60} = 2.488$$

Waktu yang dibutuhkan untuk satu kali putaran (T/1 putaran)

$$T / 1 \text{ putaran} = RPS^{-1}$$

$$T / 1 \text{ putaran} = 2.488^{-1} = 0.4019$$

Time Step tiap satu deg (TST 1 deg)

$$TST \text{ 1 deg} = 360 / 1 = 360$$

Time Step Size (TSS)

$$TSS = \frac{T / 1 \text{ putaran}}{TST \text{ 1 deg}}$$

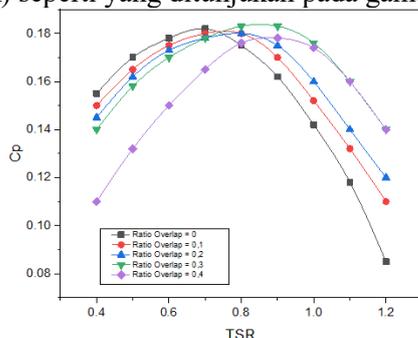
$$TSS = \frac{0.4019}{360} = 0.001116$$

Dari perhitungan diatas, parameter yang digunakan dalam simulasi adalah nilai dari Omega = 15.62 rad/s dan Time Step Size (TSS) = 0.00116

III. Hasil dan Pembahasan

1. Analisa koefisien Power (Cp)

Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh rasio overlap sudu terhadap performa turbin air poros horizontal Savonius. Untuk mempelajari pengaruh rasio overlap sudu diperlukan perbandingan performa dari setiap variasi overlap rasio sudu. Pada penelitian ini, yang menjadi indikator utama perbandingan performa adalah koefisien power (CP). koefisien power (Cp) menunjukkan efisiensi sudu dalam mengubah energi kinetik aliran air menjadi energi mekanik. Untuk mendapatkan koefisien power (CP) pada proses simulasi dengan Ansys Fluent harus ditetapkan terlebih dahulu nilai Tip Speed Ratio (TSR), dimana nilai TSR menunjukkan perbandingan antara kecepatan ujung sudu turbin dengan kecepatan aliran air. penetapan nilai Tip Speed Ratio (TSR) seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Grafik Cp-TSR pada Overlap Ratio 0 sampai 0.4

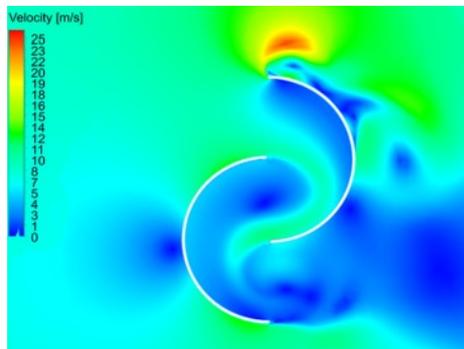
Grafik Cp-TSR pada Overlap Ratio 0 sampai Overlap Ratio 0.40 (gambar 6) menunjukkan bahwa nilai maksimum Cp untuk masing-masing variasi diperoleh pada TSR berkisar antara 0,4 hingga 1,2. Pada pengujian masing-masing Overlap Ratio (OR), nilai Cp maksimum pada variasi Overlap Ratio 0, adalah 0,182 pada TSR 0,7; untuk variasi Overlap Ratio 0.1, nilai maksimum yang diperoleh adalah 0.18 pada TSR 07; untuk variasi Overlap Ratio 0.2, nilai maksimum yang diperoleh adalah 0.18 pada TSR 08; untuk variasi Overlap Ratio 0.3, nilai maksimum yang diperoleh adalah 0.183 pada TSR 09; dan untuk variasi Overlap Ratio 0.4, nilai maksimum yang diperoleh adalah 0.178 pada TSR 09. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa nilai Cp maksimum terjadi pada variasi Overlap Ratio 0,3 dengan nilai Cp=0,183 dan TSR=0,9.

Hasil ini sama dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa Overlap Ratio 0,2 sampai 0,30 dapat mengurangi torsi negatif dan meningkatkan kinerja turbin. Torsi negatif terjadi ketika baling-baling turbin berputar pada kecepatan yang lebih rendah daripada kecepatan aliran air. Dengan menerapkan Overlap Ratio yang tepat, hambatan yang terjadi dapat diminimalkan sehingga kinerja turbin dapat meningkat. Selain itu, nilai Cp maksimum pada TSR yang lebih tinggi (0,9) pada variasi Overlap Ratio 0,30 menunjukkan bahwa karakteristik model turbin dengan Overlap Ratio 0,30 lebih efisien dalam menyerap energi aliran air pada kecepatan aliran air yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan Overlap Ratio 0,30 dapat menghasilkan daerah perisai yang lebih kecil, sehingga kehilangan energi aliran air karena gesekan di daerah perisai dapat diminimalkan. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan karakteristik model turbin dengan Overlap Ratio 0,30 dapat meningkatkan kinerja turbin dan menghasilkan nilai Cp maksimum yang lebih baik pada TSR yang lebih tinggi. Namun, perlu diingat bahwa nilai Cp hanya merupakan salah satu indikator kinerja turbin dan masih banyak faktor lain yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan model turbin yang tepat.

2. Analisa Aliran Fluida

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, bahwa turbin dengan rasio overlap 0.3 adalah

yang terbaik dari yang diteliti antara 0 sampai 0.4 ini bersesuaian dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa overlap ratio terbaik adalah antara 0.2 – 0.3. untuk menyatakan overlap ratio 0.3 lebih baik perlu di pelajari karakteristik aliran fluidanya seperti yang ditunjukkan pada gambar 7



Gambar 7 Overlap Ratio 0,30 pada saat posisi sudut putaran 0 derajat

Gambar 7 menunjukkan turbin dengan Rasio Overlap 0.30, di mana pola aliran kelihatan teratur aliran air yang melewati celah antara dua rotor akan menciptakan efek Venturi pada bagian atas rotor, sehingga tekanan air lebih rendah di atas rotor dibandingkan dengan bagian bawah rotor. Aliran air yang teratur dapat mengoptimalkan penggunaan energi kinetik yang dihasilkan dan meningkatkan efisiensi turbin. Efek lapisan batas juga ditangani dengan lebih baik karena adanya celah antara dua rotor. Celah ini memungkinkan aliran udara mengalir ke dalam celah, sehingga lapisan batas pada bagian atas rotor menjadi lebih tipis. Akibatnya, tekanan air pada bagian atas rotor lebih rendah, sehingga produksi energi kinetik lebih efisien. Selain itu, celah ini juga membantu mencegah kebocoran tekanan di belakang rotor, sehingga meningkatkan efisiensi turbin. Efek wake pada rotor juga lebih kecil karena adanya celah antara dua rotor. Celah ini memungkinkan aliran air mengalir ke dalam celah, mengurangi kebocoran tekanan di belakang rotor, sehingga menghasilkan pola wake yang lebih kecil dan teratur. Akibatnya, tekanan air di belakang rotor lebih tinggi, sehingga meningkatkan efisiensi turbin.

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penerapan karakteristik model turbin dengan Overlap Ratio (OR) sebesar 0,30 dapat meningkatkan kinerja turbin

dan menghasilkan nilai koefisien daya (CP) maksimum yang lebih baik pada Tip Speed Ratio (TSR) yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, nilai maksimum Cp pada variasi Overlap Ratio 0,30 diperoleh sebesar 0,183 pada TSR 0,9. Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa Overlap Ratio sebesar antara 0,2 hingga 0,30 membantu meminimalkan torsi negatif dan meningkatkan kinerja turbin. Namun, perlu diingat bahwa nilai Cp hanya merupakan salah satu indikator kinerja turbin dan masih banyak faktor lain yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan model turbin yang tepat.

Daftar Pustaka

- Araya, D., LaFave, J. and Kimball, R. (2013). The Effect of Overlap Ratio on the Performance of a Savonius Turbine. *Journal of Energy Engineering*, 139(4), pp.173-181.
- Arifin, J., 2019. Desain Diffuser Turbin Air Arus Sungai untuk Meningkatkan Laju Arus Sungai. *Al Jazari: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(2).
- Burek, S. and Hankey, W. (1980). The effect of overlap ratio on the performance of a Savonius rotor. *Journal of Energy*, 4(2), pp.83-86.
- Hartadi, B., 2018. Pengaruh Gerak Bebas Sudu pada Rotor Savonius Modifikasi untuk Turbin Air. *AL JAZARI: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN*, 3(1).
- Bhattacharya, S., Saha, U. K., & Bandyopadhyay, S. (2015). Design and performance analysis of a Savonius water turbine. *Renewable Energy*, 75, 180-188.
- Gandhidasan, P., & Mohanraj, M. (2016). An Overview of Savonius Vertical Axis Wind Turbine for Sustainable Energy Generation. *Procedia Technology*, 25, 765-772.
- Hatradi, B., Irfansyah, M. and Puteri, P., 2021. Desain Underwater Rotor Untuk Memanfaatkan Laju Aliran Sungai Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Air. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 5(2), pp.77-82.

- Hartadi, B., 2022. Pengaruh Kelengkungan Deflektor Turbin Savonius Modifikasi Untuk Turbin Hidrokinetik. *Al Jazari: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 7(1).
- Jain, R., & Gupta, N. K. (2017). A review on design and development of Savonius wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 434-447.
- Kamoji, M. A., Kedare, S. B., & Prabhu, S. V. (2009). Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. *Applied Energy*, 86(7-8), 1064-1073.
- Khan, N., & Energy, N. (2009). *Performance of Savonius rotor as a water current turbine. April 2016*.
- Karami, H., Faramarzi, A., & Bina, M. A. (2017). Experimental and numerical investigation of Savonius wind turbine using nanofluid. *Renewable Energy*, 102, 359-367.
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M., & Streimikiene, D. (2018). Review of the energy supply and demand trends and prospects for renewable energy development in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 3021-3031.
- Nguyen, V. T., Nguyen, V. D., Nguyen, D. T., & Huynh, V. L. (2019). Experimental study on the performance of Savonius turbine using different blade shapes. *Energy Conversion and Management*, 191, 95-104.
- Rahman, M., Hasanuzzaman, M., Hasan, M., Ahmed, S. and Ali, M. (2019). Numerical investigation of the effect of overlap ratio on the performance of a curved blade Savonius rotor. *Energy Reports*, 5, pp.813-821.
- Rendi, R., 2017. Analisa Distribusi Tekanan dan Aliran Disekitar Rotor Savonius Water Turbine. *AL JAZARI: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN*, 2(1).
- Rendi, R. and Hartadi, B., 2018. Pengaruh Penambahan Nozzle Guide Vane Pada Rotor Savonius Modifikasi Untuk Turbin Air. *Al-Jazari Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 3 (1), 74-79.
- Rendi, R., Ihsan, S. and Ma'arif, S., 2020. Turbin Air Arus Sungai Model Sudu Propeller Menggunakan Nozzel-Diffuser. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 4(1), pp.27-33.
- Rendi, R. and Herlina, F., 2022. Penambahan Lingkaran Pelindung Pada Turbin Air Rotor Savonius. *Prosiding Penelitian Dosen UNISKA MAB*, (1).
- Rendi, R., Arifin, J., Mujiburrahman, M. and Trianiza, I., 2020. Potensi pembangkit listrik tenaga air mikrohidro di sungai Pintab dan sungai Amandit Kalimantan Selatan. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 4(2), pp.46-52.
- Rendi, R. and Sidiq, A., 2018. Pengaruh Twist Angle Blade Turbin Savonius Berpengaruh Aliran Aplikasi Pada Turbin Air. *INFO-TEKNIK*, 19(2), pp.203-210.
- Rendi, R., Hartadi, B., Firman, M. and Irfansyah, M., 2022. Peningkatan Kinerja Rotor Savonius Dengan Mengembangkan Sudu Baru Berbasis Airfoil. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 6(2), pp.08-15.
- Sharma, R. and Kumar, N. (2013). Numerical Investigation of Overlap Ratio on the Performance of Savonius Turbine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(11), pp.196-201.
- Singh, R. K., & Sarviya, R. M. (2020). A comprehensive review on Savonius wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109689.
- Veeramalai, K., Raja, M. T., & Venkatesan, M. (2021). A comprehensive review on Savonius wind turbine technology. *Journal of Renewable Energy Science and Engineering*, 9(1), 27-42.
- Yusuf, M. A., Rahman, M. M., Abdullah, M. A., & Rahim, N. A. (2016). Review on recent trends in Savonius wind turbine technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 132-145.