

Pengaruh Bentuk Sudu terhadap Efisiensi Turbin Air Gravitasi Aliran Vortex

Jorfri Boike Sinaga¹, David Sinaga², Ahmad Yonanda³, Tri Topan⁴, Gomes Bahtera⁵

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedung H Lt.2, Bandar Lampung, Lampung, Indonesia

²Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedung H Lt.2, Bandar Lampung, Lampung, Indonesia

*Corresponding author: jorfri6@yahoo.com

Abstract

This paper presents the results of a study on the effect of blade shape on the efficiency of a free-vortex water turbine. Laboratory experiments were conducted to measure the shaft power output and overall turbine efficiency. Water turbines with six blades and three different blade shapes (flat blade, twisted blade, and curved blade) were designed and tested to determine the most optimal blade profile. The turbines were tested in a conical basin with an inlet diameter of 600 mm, an outlet diameter of 100 mm, and a height of 800 mm, at flow rates of 0.0088 m³/s, 0.0105 m³/s, and 0.0108 m³/s. The results showed that the turbine with a curved blade profile achieved the highest efficiency, reaching 30,46% at a flow rate of 0.0108 m³/s.

Keywords: Turbine, Vortex, and Efficiency

Abstrak

Makalah ini menyajikan hasil penelitian mengenai pengaruh bentuk sudu terhadap efisiensi turbin air free-vortex. Serangkaian eksperimen laboratorium dilakukan untuk mengukur keluaran daya poros dan efisiensi keseluruhan turbin. Tiga bentuk sudu—sudu datar, sudu twisted, dan sudu melengkung dirancang untuk turbin dengan enam sudu, dan kinerjanya diuji untuk menentukan bentuk yang paling optimal. Pengujian dilakukan di dalam bak kerucut dengan diameter inlet 600 mm, diameter outlet 100 mm, dan tinggi 800 mm, pada laju aliran 0.0088 m³/s, 0.0105 m³/s, dan 0.0108 m³/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk sudu melengkung mencapai efisiensi tertinggi, yaitu 30,46% pada laju aliran tertinggi 0.0108 m³/s.

Kata kunci: Turbin, Vortex, dan Efisiensi.

1. Pendahuluan

Produksi energi fosil, terutama minyak bumi, serta komitmen global dalam pengurangan emisi gas rumah kaca telah mendorong peningkatan peran energi baru dan terbarukan secara terus menerus oleh pemerintah sebagai bagian dari upaya menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Bauran energi baru dan terbarukan ditargetkan dalam Kebijakan Energi Nasional untuk mencapai paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 [1]. Potensi energi baru terbarukan di Indonesia dinilai cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer tersebut, dengan salah satu sumbernya

adalah energi hidro. Dari total potensi energi hidro sebesar 95 GW, hanya sekitar 7% atau 6,784 GW yang telah dimanfaatkan hingga tahun 2023, sehingga peningkatan pemanfaatan potensi ini diperlukan [2].

Pembangkit listrik tenaga mikrohidro merupakan pembangkit listrik tenaga air skala kecil dengan kapasitas berkisar antara 5 kW hingga 100 kW [3], dan pembangkit listrik tenaga picohidro didefinisikan sebagai pembangkit dengan kapasitas di bawah 5 kW [4]. Teknologi ini sangat sesuai untuk diterapkan di daerah terpencil karena mampu memanfaatkan sumber daya air lokal dan menghasilkan listrik bersih dengan biaya rendah.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v13i2.3689>

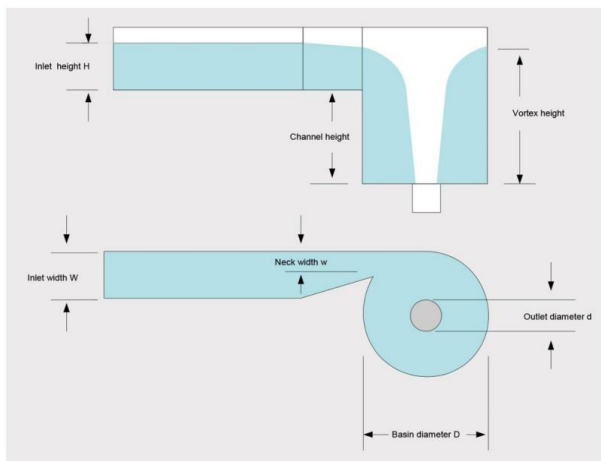
Received September 24, 2024; Received in revised form December 21, 2024; Accepted December 28, 2024

Available online December 31, 2024

574



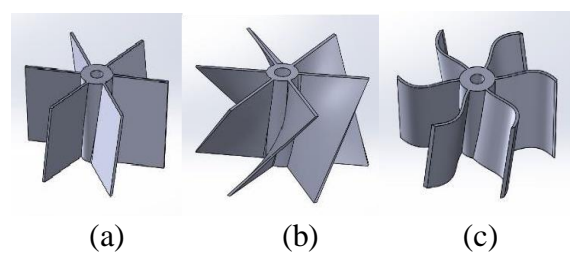
Pembangkit listrik tenaga air skala kecil telah dikenal sebagai solusi andal untuk menyediakan energi listrik yang ramah lingkungan dan efisien secara ekonomi [5]. Namun pembangkit listrik ini dirancang dengan memanfaatkan ketinggian potensi energi air yang tinggi untuk menggerakkan turbin secara optimal [6]. Oleh karena itu, pengembangan teknologi yang mampu memanfaatkan energi dari sumber air dengan *head* rendah menjadi langkah strategis dalam memenuhi kebutuhan listrik yang terus meningkat, khususnya di daerah pedesaan terpencil yang memiliki potensi energi aliran dengan ketinggian jatuh yang rendah. Salah satu inovasi yang mampu mengatasi hal tersebut adalah sistem *Gravitational Water Vortex Power Plant* (GWVPP) [7]. Menurut Zotloterer [8], sistem pembangkit listrik ini tidak memerlukan bendungan seperti halnya pembangkit listrik konvensional, sehingga lebih ramah lingkungan dan hemat biaya. Turbin vortex pada sistem ini dapat berfungsi dengan ketinggian air minimal 0,7 meter, menjadikannya solusi ideal untuk daerah dengan keterbatasan potensi ketinggian air.



Gambar 1. Skema pembangkit listrik tenaga air aliran *vortex*.

Dhakai. et al. [9] membandingkan kekuatan pusaran air yang dihasilkan oleh basin berbentuk kerucut dan silinder, dan menemukan bahwa turbin dalam basin kerucut mampu mencapai efisiensi maksimum sebesar 29,63%, yang secara

signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan basin silinder. Selanjutnya, Dhakai, et al. [10] mengoptimalkan tiga bentuk runner dengan sudu *flat*, *twisted*, dan *curved* untuk meningkatkan efisiensi GWVPP (*Gravitational Water Vortex Power Plant*). Analisis CFD menggunakan Ansys CFX menunjukkan bahwa sudu melengkung memberikan efisiensi tertinggi sebesar 82%, dibandingkan dengan 46% untuk sudu lurus dan 63% untuk sudu *twisted*. Hasil uji eksperimen mengonfirmasi prediksi tersebut, dengan efisiensi puncak 71% pada ketinggian air 0,5 m. Sritram and Suntivarakorn [11] mempelajari efek jumlah sudu dan plat baffle terhadap efisiensi turbin *free-vortex*, menemukan bahwa turbin dengan 5 sudu menghasilkan torsi terbesar, dan pemasangan plat baffle pada bagian atas dan bawah sudu, yang mencakup 50% dari total sudu, meningkatkan efisiensi hingga 43,83%, atau 6,59% lebih tinggi dibandingkan tanpa plat *baffle*. Sementara itu, Dhakai. S., et al. [12] meneliti posisi optimal sudu dalam *basin* untuk memaksimalkan keluaran daya GWVPP, dan menemukan bahwa daya maksimum dicapai saat runner diposisikan pada 65–75% dari ketinggian total *basin*, baik pada *basin* berbentuk silinder maupun kerucut.



Gambar 2. Bentuk skema 3D sudu turbin (a) *flat*, (b) *twisted*, dan (c) *curved*

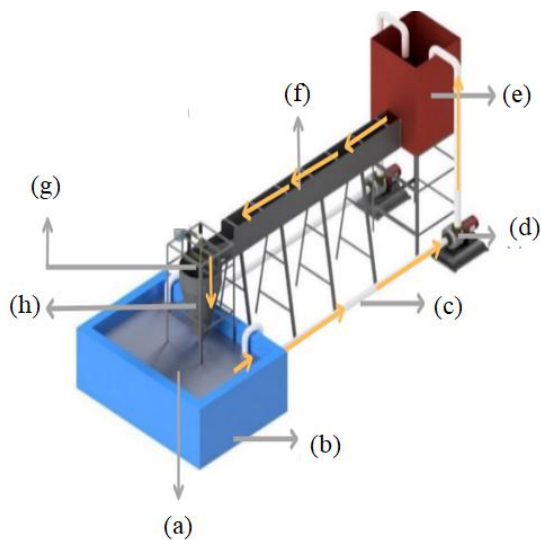
Penelitian yang dilakukan oleh Sinaga, et al. [13] sebelumnya menunjukkan bahwa hasil pengujian rancangan alat pengujian turbin *vortex* dihasilkan efisiensi tertinggi sebesar 22,04% dengan penggunaan enam sudu turbin pada laju aliran 10 lit/s. Nilai efisiensi ini masih tergolong rendah untuk aplikasi GWVPP, yang menuntut efisiensi lebih tinggi guna

mencapai kinerja yang optimal. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengkaji lebih dalam pengaruh bentuk sudu terhadap efisiensi turbin *vortex* sehingga diperoleh pengoperasian turbin yang optimal.

2. Metode Penelitian

2.1 Alat Pengujian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi turbin *vortex* dengan menggunakan variasi bentuk sudu. Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Fluida, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung. Skema peralatan pengujian yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3. Peralatan pengujian ini terdiri dari tangki penyimpanan yang berkapasitas 1 m³, yang terhubung ke saluran untuk mengalirkan air menuju *conical basin* dengan diameter *inlet* 600 mm dan tinggi 800 mm. Di bagian bawah *basin*, terdapat lubang keluar air dengan diameter 100 mm. Pompa air dengan kapasitas 1.000 liter per menit digunakan untuk mensirkulasikan air saat pengujian.



Gambar 3. Skema peralatan pengujian (a) media air, (b) bak penampung, (c) pipa, (d) pompa, (e) tangki penampung, (f) canal, (g) turbin, (h) *conical basin*.

Seperti dapat dilihat pada Gambar 3, pengujian dilakukan dengan memompakan air dari bak penampung melalui pipa menuju tangki penampung. Selanjutnya, air mengalir melalui saluran (*canal*) menuju

conical basin. Di dalam *basin*, turbin dipasang dengan poros yang disusun secara konsentris untuk menangkap energi aliran air yang mengalir ke dalam *conical basin*. Aliran air yang memasuki *basin* ini akan membentuk pusaran yang secara langsung menumbuk turbin, sehingga menghasilkan energi mekanik pada turbin tersebut. Setelah melewati turbin, air akan mengalir kembali melalui lubang yang ada dibagian bawah *basin* ke bak penampung, dimana air tersebut dipompa ulang untuk digunakan kembali dalam siklus pengujian. Sistem ini berfungsi untuk mengonversi energi kinetik dari aliran air menjadi energi mekanik turbin.

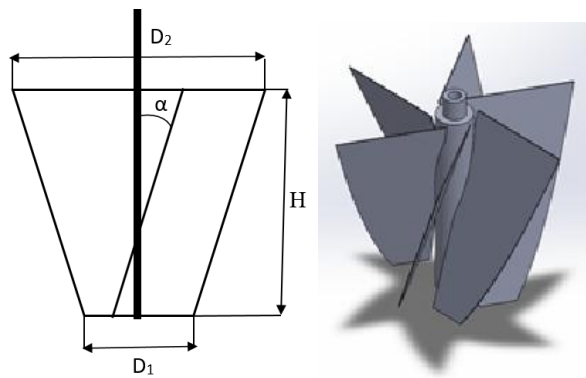
2.2 Turbin

Skema turbin yang digunakan dalam pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 4. Parameter turbin yang diuji mencakup tinggi turbin (H), diameter atas dan bawah turbin (D_2 dan D_1), bentuk sudu, jumlah sudu (n), serta sudut kemiringan sudu (α). Turbin yang diuji memiliki bentuk sudu yang berbeda, yaitu *flat*, *twisted*, dan *curved*, yang masing-masing turbin memiliki enam buah sudu. Nilai diameter atas dan bawah untuk setiap turbin dapat dilihat pada Tabel 1, dimana diameter atas dan bawah turbin mengikuti bentuk *conical basin* untuk semua turbin. Sudut kemiringan sudu (α) yang terpasang pada poros turbin diatur sebesar 18° [14], dan tinggi (H) sudu turbin 288 mm [15].

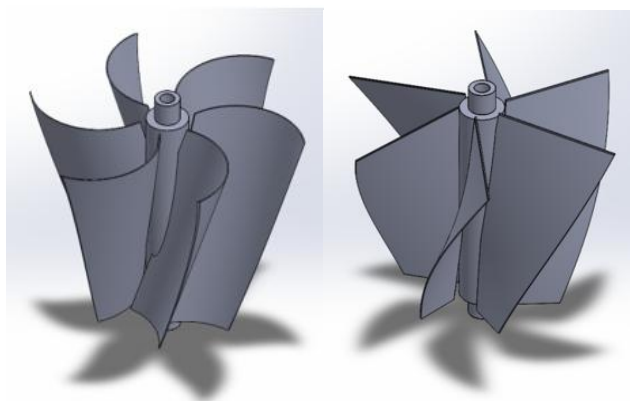
Tabel 1. Nilai diameter atas dan bawah turbin

No.	Sudu turbin	D_1 (mm)	D_2 (mm)
1	<i>Flat</i>	200	380
2	<i>Twisted</i>	200	380
3	<i>Curved</i>	200	380

Instrumen pengukuran yang digunakan dalam pengujian ini adalah *torque meter* untuk mengukur torsi pada poros turbin (N.m), *tacho meter* untuk mengukur kecepatan rotasi turbin (rpm), dan *propeller flow meter* untuk mengukur kecepatan aliran air (m/s), seperti dapat dilihat pada Gambar 5.



(a) (b)



(c) (d)

Gambar 4. (a) Parameter turbin. (b) Skema bentuk turbin *flat*, (c) Skema bentuk turbin *curved*, dan (d) Skema bentuk turbin *twisted*.



(a) (b) (c)

Gambar 5. Alat ukur yang digunakan: (a) *Tacho meter*, (b) *Torque meter*, dan (c) *Propeller flow meter*

2.3 Metode Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengatur debit aliran air pada 0,0088 m³/s, 0,0105 m³/s, dan 0,0108 m³/s. Debit aliran air ini diatur dengan mengatur tinggi aliran di dalam saluran saat pengujian. Data hasil pengukuran yang dicatat saat pengujian tersebut meliputi kecepatan putaran turbin, torsi turbin, kecepatan aliran di saluran, dan tinggi aliran di dalam saluran. Selanjutnya, data-data tersebut digunakan untuk

menghitung nilai daya aliran *vortex*, daya turbin, dan efisiensi turbin. Efisiensi turbin (η) dihitung menggunakan persamaan [16]:

$$\eta_t = \frac{P_t}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_v} \quad (1)$$

dimana P_t adalah daya poros turbin (W), ρ adalah massa jenis air (kg/m³), Q adalah debit aliran, dan H_v adalah tinggi aliran *vortex*. Daya turbin dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P_t = T \frac{2\pi N}{60} \quad (2)$$

dimana T adalah torsi turbin (Nm) yang diukur menggunakan *torque meter*, dan N adalah kecepatan rotasi turbin (rpm) yang diukur menggunakan *tacho meter*.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada Gambar 6, ditampilkan foto perangkat eksperimen yang telah dibangun, sedangkan Gambar 7 memperlihatkan turbin yang digunakan dalam pengujian. Saluran air memiliki panjang 4 meter dengan tinggi dan lebar penampang adalah 250 mm dan 400 mm. Sudut notch aliran air sebelum masuk *basin* diatur sebesar 18° [17] dengan lebar *inlet notch* 100 mm. Gambar 8 menunjukkan *conical basin* yang telah dibuat dan siap digunakan untuk pengujian.



Gambar 6. Sistem peralatan pengujian yang dibangun

Gambar 9, 10, dan 11 menunjukkan hubungan antara daya poros turbin dan kecepatan untuk tiga jenis turbin dengan bentuk sudu *flat*, *twisted*, dan *curved*. Masing-masing turbin diuji pada laju aliran volumetrik sebesar 0,0088 m³/s, 0,0105 m³/s, dan 0,0108 m³/s. Hasil pengujian mengindikasikan bahwa daya meningkat hingga mencapai titik maksimum sebelum akhirnya menurun seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran. Penurunan ini disebabkan oleh torsi yang dihasilkan untuk mengatasi beban pada poros turbin, yang berkurang secara linear seiring dengan peningkatan kecepatan turbin. Puncak daya terjadi pada kecepatan yang berbeda-beda untuk setiap jenis sudu dan laju aliran.



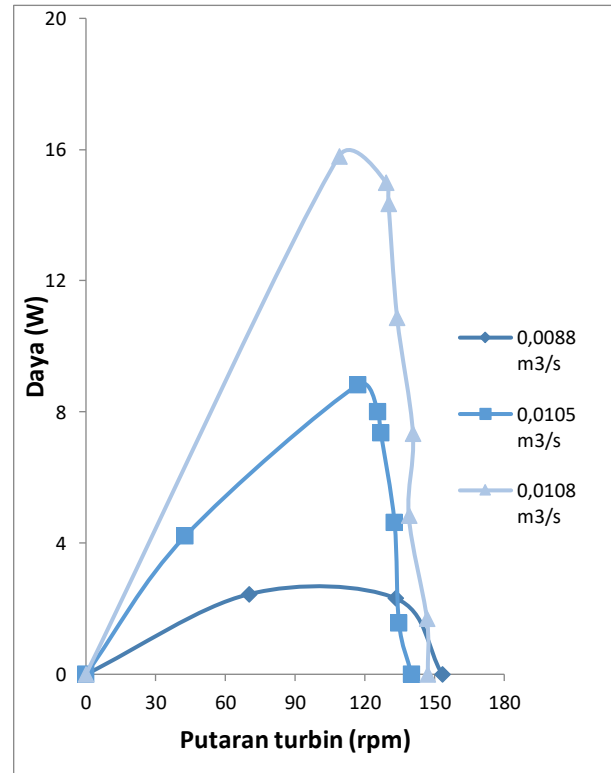
Gambar 7. Turbin yang digunakan dalam pengujian.



Gambar 8. Basin berbentuk kerucut yang dibuat.

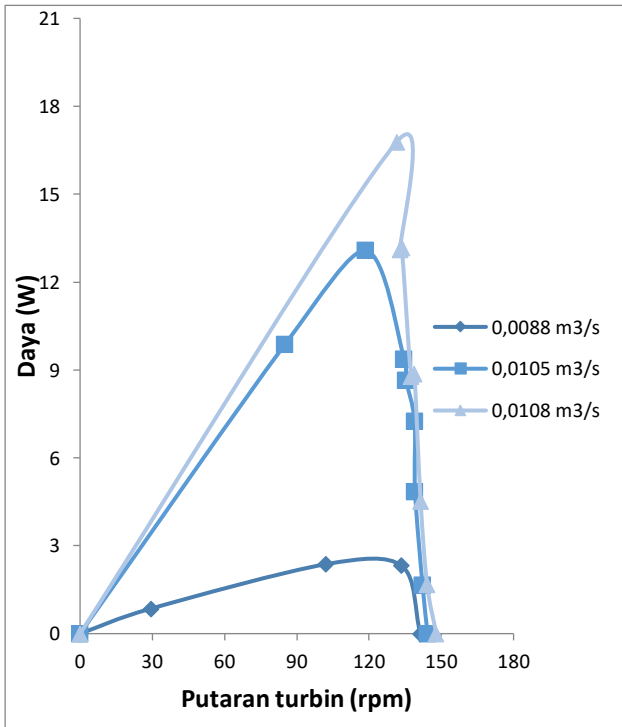
Pada Gambar 9, turbin dengan sudu *flat* menghasilkan daya maksimum sebesar 15,79 W pada laju aliran 0,0108 m³/s. Gambar 10 memperlihatkan bahwa turbin

dengan sudu *twisted* mencapai daya maksimum sebesar 16,78 W pada laju aliran yang sama, sedikit lebih tinggi dibandingkan sudu *flat*. Sedangkan pada Gambar 11, turbin dengan sudu *curved* menunjukkan performa terbaik dengan daya maksimum sebesar 25,82 W pada laju aliran yang sama. Hasil ini menunjukkan bahwa bentuk sudu *curved* lebih efisien dalam memanfaatkan energi aliran air dibandingkan dua bentuk lainnya. Keunggulan sudu *curved* ini berdasarkan faktor bentuknya yang memungkinkan distribusi tekanan yang lebih merata dan luas permukaan yang lebih besar, sehingga lebih efektif dalam menyerap energi kinetik dari aliran air. Hal yang mengarah pada peningkatan torsi dan efisiensi konversi energi menjadi lebih baik, meskipun sedikit turbulensi terbentuk. Bentuk *curved* ini memungkinkan aliran air diarahkan lebih efisien menuju pusat turbin, yang dapat mengurangi hambatan dan menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan sudu *flat* dan *twisted*.



Gambar 9. Hubungan antara putaran terhadap daya turbin menggunakan sudu *flat*

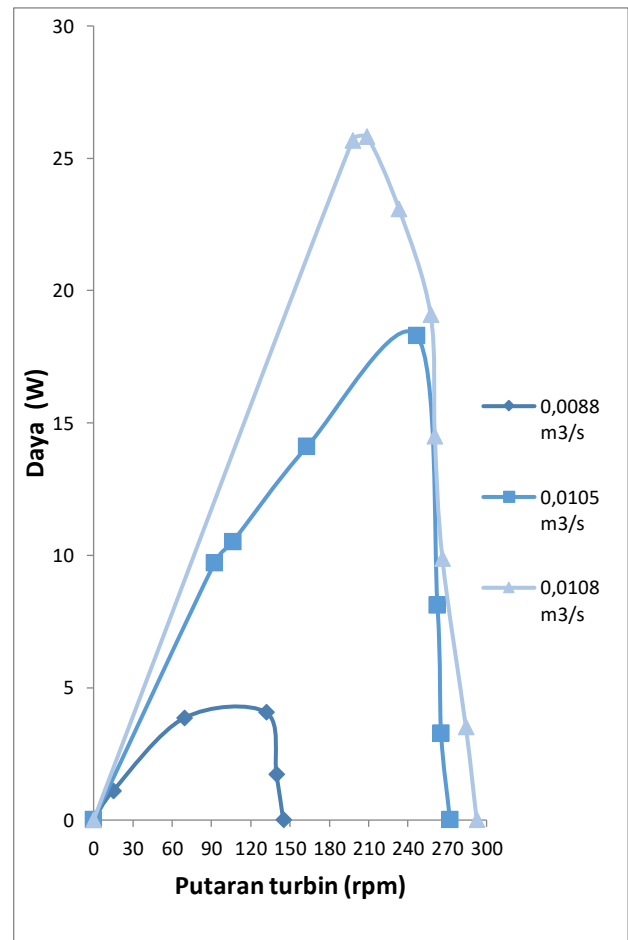
Penurunan daya setelah mencapai titik maksimum disebabkan oleh peningkatan resistensi pada sudu turbin akibat kecepatan putaran yang lebih tinggi, sehingga mengurangi efisiensi transfer energi kinetik air menjadi energi mekanik. Pengujian lebih lanjut mengungkapkan bahwa turbin dengan bentuk sudu *curved* mampu menghasilkan daya maksimum yang lebih tinggi pada laju aliran volumetrik yang sama dibandingkan dengan turbin dengan sudu *flat* dan *twisted*. Hal ini disebabkan oleh kemampuan bentuk sudu *curved* yang lebih baik dalam mengarahkan aliran air secara optimal sepanjang permukaan sudu, sehingga mengurangi turbulensi dan hambatan. Selain itu, bentuk melengkung sudu ini juga mempercepat aliran air di sepanjang sudu, meningkatkan torsi dan daya output. Dengan demikian, sudu *curved* lebih unggul dalam mengonversi energi kinetik air menjadi energi mekanik dibandingkan dengan sudu *flat* dan *twisted*, yang cenderung mengalami kehilangan energi lebih besar akibat turbulensi.



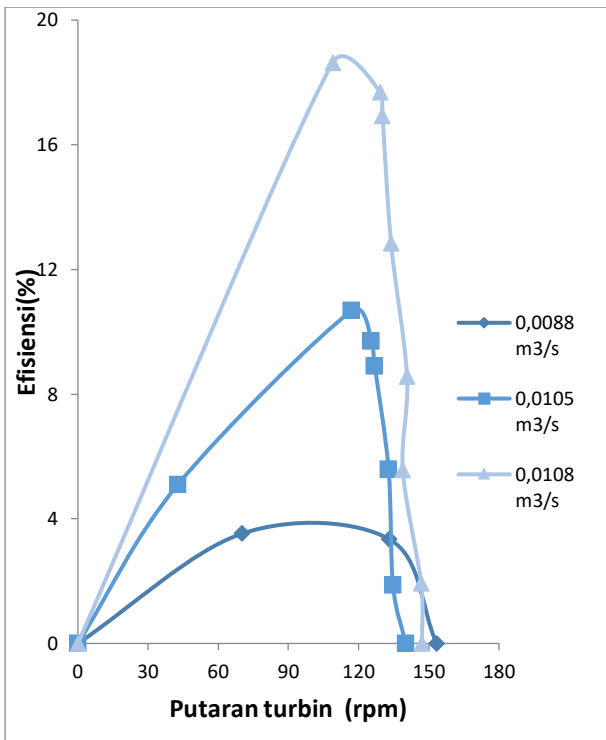
Gambar 10. Hubungan antara putaran terhadap daya turbin menggunakan sudu *twisted*

Hasil pengujian efisiensi turbin terhadap kecepatan dilihat pada Gambar 12,

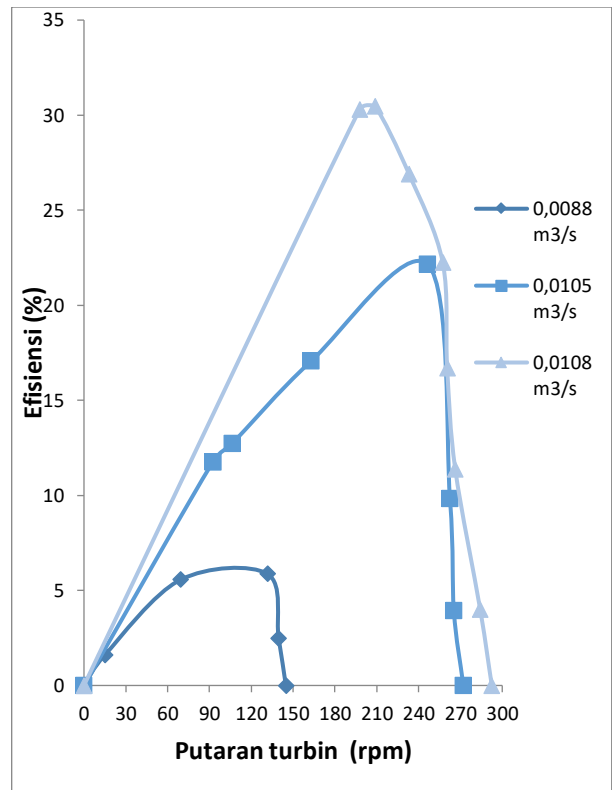
13, dan 14. Ketiga gambar ini menunjukkan pola yang konsisten, di mana kurva efisiensi meningkat hingga mencapai titik puncaknya, kemudian menurun dengan bertambahnya kecepatan pada setiap laju aliran. Pada Gambar 12, turbin dengan bentuk sudu *flat* mencapai efisiensi maksimum sebesar 18,63% pada laju aliran 0,01 m³/s. Selanjutnya, Gambar 13 menunjukkan turbin dengan bentuk sudu *twisted* yang mencapai efisiensi puncak sebesar 19,80% pada laju aliran yang sama. Sementara itu, Gambar 14 memperlihatkan turbin dengan bentuk sudu *curved* yang menghasilkan efisiensi tertinggi, yaitu 30,46% pada laju aliran 0,01 m³/s. Keunggulan ini terjadi karena turbin dengan sudu *curved* mampu menghasilkan daya maksimum saat menerima pancaran air, berbeda dengan turbin berbentuk sudu *flat* maupun *twisted*, yang tidak seefisien dalam memanfaatkan energi aliran air.



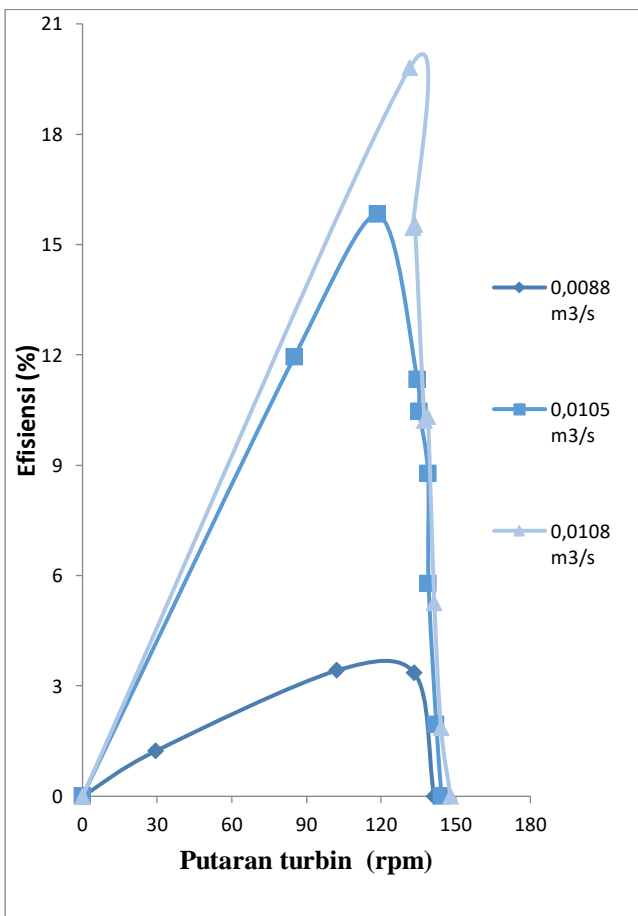
Gambar 11. Hubungan antara putaran terhadap daya turbin menggunakan sudu *curved*



Gambar 12. Hubungan antara putaran terhadap efisiensi turbin menggunakan menggunakan sudu *Flat*.



Gambar 14. Hubungan antara putaran terhadap efisiensi turbin menggunakan menggunakan sudu *Curved*.



Gambar 13. Hubungan antara putaran terhadap efisiensi turbin menggunakan sudu *twisted*

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengungkapkan bahwa bentuk sudu turbin memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi turbin *free vortex*. Pengujian dilakukan pada turbin dengan bentuk sudu *flat*, *twisted*, dan *curved* pada laju aliran volumetrik 0,0088 m³/s, 0,0105 m³/s, dan 0,0108 m³/s. Hasil pengujian menunjukkan bahwa bentuk sudu *curved* memberikan kinerja terbaik dibandingkan bentuk sudu *flat* dan *twisted*. Hal ini disebabkan oleh kemampuan bentuk *curved* yang lebih efektif dalam menangkap aliran air sentrifugal, sehingga menghasilkan daya dan efisiensi yang lebih tinggi.

Dari hasil pengujian, turbin dengan bentuk sudu *curved* mencapai efisiensi maksimum sebesar 30,46% pada laju aliran 0,0108 m³/s, sedangkan turbin dengan sudu *flat* dan *twisted* masing-masing mencapai efisiensi maksimum sebesar 18,63% dan 19,80% pada laju aliran yang sama. Hasil ini mengindikasikan bahwa sudu *curved*

memiliki keunggulan dalam memaksimalkan konversi energi kinetik air menjadi energi mekanik, menjadikannya lebih unggul dibandingkan sudu *flat* dan *twisted*.

Ucapan terimakasih

Penelitian ini didukung oleh Penelitian Dasar Grant 2024. Penulis ingin menyampaikan penghargaan atas dukungan finansial dari LPPM, Universitas Lampung.

Referensi

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2019. *Outlook Energi Indonesia 2019*. Informasi dari <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-outlook-energi-indonesia-2019-bahasa-indonesia.pdf> (diakses pada 26 September 2024).
- [2] Muhamad, N., 2024. Kapasitas terpasang pembangkit listrik EBT Indonesia berdasarkan sumber energi (2023). Available at: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2024/01/19/kapasitas-ebt-indonesia-13-ribu-mw-pada-2023-mayoritas-energi-air> (diakses pada 26 September 2024).
- [3] Alternative Energy Promotion Centre, 2011. *Renewable energy data book*. Alternative Energy Promotion Centre, Government of Nepal, Khumaltar, Lalitpur.
- [4] Smith, N.P.A., 1996. Induction generators for stand-alone micro-hydro systems. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, New Delhi.
- [5] Dhakal, R. A. et al., 2017. Technical and economic prospects for the site implementation of a gravitational water vortex power plant in Nepal. *Proceedings of International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2016)*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Danvers, MA, 1001–1006.
- [6] Yah, N. F., Oumer, A. N., dan Idris, M. S., 2017. Small scale hydro-power as a source of renewable energy in Malaysia: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 228–239.
- [7] Zotloeterer, F., 2014. Energy systems [Updated]. Available at: <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/zotloeterer-turbine/> (diakses pada 10 Desember 2024).
- [8] Zotloeterer, 2007. Zotloeterer Gravitational Vortex Plant. Informasi dari <http://www.zotloeterer.com/welcome/> (diakses pada 10 Desember 2024).
- [9] Dhakal., S. et al., 2014. Development and testing of runner and conical basin for gravitational water vortex power plant. *Journal of the Institute of Engineering*, 10, 140–148.
- [10] Dhakal, R., et al., 2017. Computational and experimental investigation of runner for gravitational water vortex power plant. In: *Proceedings of a meeting held 5–8 November 2017, San Diego, California, USA*, 365–373.
- [11] Sritram, P and Suntivarakorn, R., 2019. The effect of blade number and turbine baffle plates on the efficiency of a free-vortex water turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 100, 198–202.
- [12] Dhakal, S., et al., 2015. Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 662–669. *Reviews* 48, pp. 662-669.
- [13] Sinaga, J. B., et al., 2024. Development of testing equipment for gravitational water vortex turbine. In: *The 4th International Conference on Applied Sciences, Mathematics, and*

- Informatics, AIP Conf. Proc. 2970, 020021-1–020021-11.
- [14] Acharya, R., et al., 2019. Design study of runner for gravitational water vortex power plant with conical basin. In: Proceedings of IOE Graduate Conference, 2019-Summer, 100–108.
- [15] Sinaga, J.B., et al., 2024. The effects of blade height on the efficiency of gravitational water vortex turbine. *Engineering and Technology Journal*, 09(04), 3717–3721.
- [16] Wichian, P., and Suntivarakorn, R., 2016. The effects of turbine baffle plates on the efficiency of water free vortex turbines. *Energy Procedia*, 100, 198–202.
- [17] Hudan, A. K. dan Priyo, H. A., 2017. Pengaruh sudut inlet notch pada turbin reaksi aliran vortex terhadap daya dan efisiensi. *Jurnal Teknik Mesin*, 5, 61–69.