

Analisis kinerja turbin vortex dengan variasi sudu biomimetik berbentuk rumah keong

Alfito Dinova Prayoga^{a,b}, Iwan Kurniawan^{a,1}, Herisiswanto^{a,b}

^aDepartemen Teknik Mesin, universitas Riau, Pekanbaru, 28293

^bProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru, 28293

¹iwan.kurniawan@lecturer.unri.ac.id

Abstract. The demand for renewable energy continues to grow as fossil fuel reserves decline and global energy needs increase. One promising alternative is the vortex turbine, which can operate effectively in low-head regions. This study investigates the effect of blade geometry variations on the performance of a vortex turbine, with a particular focus on curved blades enhanced with biomimetic spiral-shaped fins. The research was conducted experimentally using three blade types: flat blades, curved blades, and curved blades with additional spiral-shaped fins resembling a snail shell structure. Tests were performed on a laboratory-scale vortex turbine prototype to measure torque, power, and efficiency. The results showed that the flat blades produced the lowest efficiency (17.6%), the curved blades achieved a moderate efficiency (21.0%), whereas the curved blades with additional spiral-shaped fins reached the highest efficiency (33.01%). The significant improvement observed in the biomimetic blades is attributed to the spiral geometry, which effectively directs the flow, reduces separation, and enhances momentum transfer from the fluid to the blades. These findings demonstrate that the biomimetic approach improves the performance of small-scale vortex turbines, making it a promising solution for renewable energy generation in low-head regions.

Keywords: vortex turbine, biomimetic, blade, efficiency, renewable energy

Received: 30 September, 2025; Presented: 9 October 2025; Publication: 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/gbz8f971>

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global yang terus meningkat masih sangat bergantung pada sumber energi fosil. Namun, pemanfaatan energi fosil tidak hanya menyebabkan cadangan menipis, tetapi juga menimbulkan dampak lingkungan serius, seperti emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, eksplorasi energi terbarukan menjadi sangat penting, salah satunya melalui pemanfaatan energi air. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) konvensional umumnya beroperasi pada *head* air yang tinggi, yang tidak sesuai dengan kondisi di banyak daerah aliran sungai pedesaan. Untuk mengatasi masalah ini, teknologi turbin vortex (*Gravitational Water Vortex Hydro Turbine/GWVHT*) menjadi solusi potensial karena mampu beroperasi pada *head* rendah dan debit aliran sedang [1].

Penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa konfigurasi turbin dan karakteristik sudu sangat memengaruhi performa sistem GWVHT. Dhakal et al. [2] melakukan studi eksperimental untuk menentukan pengaruh jumlah dan jari-jari sudu pada performa turbin di basin silinder dan kerucut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa posisi turbin paling efektif berada di dasar basin, di mana kecepatan fluida meningkat dengan kedalaman. Jumlah sudu yang lebih sedikit meningkatkan efisiensi karena jumlah yang terlalu banyak menyebabkan distorsi pusaran yang signifikan, sementara peningkatan jari-jari sudu menurunkan efisiensi akibat gesekan dengan permukaan basin. Basin kerucut meningkatkan pembentukan pusaran, sehingga efisiensi maksimum sebesar 29,63% dapat dicapai.

Studi selanjutnya oleh Dahal et al. [3] meneliti efek penambahan *booster turbine* pada sistem GWVHT. Mereka menemukan bahwa sistem dengan *booster turbine* optimal menghasilkan peningkatan daya sebesar 3,84 W atau 20,4% dibandingkan dengan sistem dengan hanya turbin utama. Hal ini menegaskan pentingnya desain turbin sekunder untuk meningkatkan ekstraksi energi. Yadav et al. [4] melakukan simulasi tiga dimensi menggunakan ANSYS 2020 R2 untuk meneliti jarak optimal antara turbin utama dan booster pada basin kerucut. Mereka menemukan bahwa daya maksimum dapat dicapai jika posisi dasar turbin utama berada pada 16,72% dari jarak antara puncak basin kerucut dan posisi atas booster turbine. Wichian et al. [5] mengevaluasi efek penambahan *baffle plates* pada turbin dengan basin silinder. *Baffle plates* berupa pelat logam semi-lengkung yang dipasang di bagian atas dan bawah sudu vertikal, berfungsi mengarahkan atau menahan aliran. Hasil penelitian menunjukkan rasio *area baffle* terhadap total area sudu sebesar 50% memberikan efisiensi dan torsi maksimum masing-masing sebesar 4,12% dan 10,25%, sedangkan rasio yang lebih besar menurunkan performa secara signifikan.

Sharif et al. [6] meneliti turbin lima sudu lengkung di basin kerucut dengan simulasi numerik menggunakan ANSYS CFX. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan debit 2 L/s, daya turbin berkisar antara 3,89–6,17 W dan efisiensi antara 33,19–52,64%, menegaskan bahwa sudu lengkung dengan penempatan optimal dapat meningkatkan performa. Warjito et al. [7] menganalisis pengaruh bentuk sudu menggunakan Ansys Fluent 18.1 dengan dua model

turbulensi, $k-\epsilon$ dan SST $k-\omega$. Tiga tipe sudu enam bilah dievaluasi: vertikal datar, miring datar, dan lengkung. Hasil menunjukkan sudu miring datar memiliki efisiensi maksimum 36%, lebih tinggi dibandingkan dengan sudu vertikal datar (33%) dan lengkung (30%), karena distribusi tekanan lebih stabil dan pembentukan pusaran yang lebih baik. Kueh et al. [8] menguji dua turbin di basin silinder: satu dengan sudu datar vertikal dan satu lagi dengan kombinasi sudu datar dan lengkung di bagian bawah. Turbin dengan sudu datar menghasilkan daya 0–16,42 W dengan efisiensi 0–22,2%, sementara turbin dengan sudu kombinasi menghasilkan daya 0–14,17 W dan efisiensi 0–21,6%, menekankan pengaruh geometri sudu terhadap performa. Esa et al. [9] mengevaluasi enam turbin berbeda, termasuk kombinasi sudu datar dan lengkung dengan drum tambahan. Mereka menemukan bahwa sudu yang lebih besar menurunkan kecepatan rotasi turbin dan efisiensi, serta penambahan berat sudu vertikal mengurangi performa sistem. Posisi optimal turbin ditemukan dekat lubang keluaran di dasar basin.

Meskipun berbagai penelitian tersebut memberikan hasil yang menjanjikan, masih terdapat celah dalam penelitian terkait inovasi bentuk sudu. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya membandingkan sudu lurus dan lengkung, atau menambahkan komponen luar seperti *baffle plates*. Belum banyak penelitian yang mengeksplorasi desain sudu dengan sirip tambahan yang meniru bentuk alami, misalnya struktur rumah keong. Desain biomimetik ini berpotensi mengarahkan aliran lebih efektif sehingga meningkatkan putaran turbin dan efisiensi. Banyak peneliti terinspirasi dari hewan dalam meningkatkan efisiensi dari teknologi yang ada, E. E. H. Montoya et al terinspirasi dari sayap burung *Common Guillemot* (*Uria aalge*) untuk meningkatkan efisiensi turbin laut, Temuan ini menunjukkan bahwa desain bilah yang terinspirasi dari alam, seperti sayap burung, dapat meningkatkan kinerja turbin laut secara signifikan. Hasil penelitian ini juga memberikan dasar untuk pertimbangan lebih lanjut dalam penelitian di masa depan, seperti pengoptimalan desain untuk berbagai kondisi aliran. Begitu Y. Chen dalam penelitiannya dengan penerapan desain biomimetik pada tepi belakang bilah dan kombinasi dengan desain konfigurasi seperti *sweep* dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi turbin arus pasang surut (TCT). Temuan ini sangat penting untuk pengembangan turbin arus pasang surut yang lebih efisien dan ramah lingkungan. F. Alshammari et al mengulas pendekatan biomimetik untuk mendesain turbin dalam sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC). Pendekatan ini bertujuan meningkatkan efisiensi turbin dengan meniru geometri bulu burung pada bilah stator turbin radial. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan

bahwa mengimplementasikan bilah stator melengkung yang terinspirasi dari biomimetik pada turbin radial dapat secara signifikan meningkatkan kinerja turbin dan efisiensi siklus dalam sistem ORC untuk pemulihan panas limbah.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membuat dan menguji kinerja turbin vorteks dengan sudu lengkung dengan sirip tambahan berbentuk rumah keong serta membandingkannya dengan sudu datar dan lengkung. Fokus pengujian meliputi parameter debit, torsi, daya turbin, daya potensial, dan efisiensi. Kontribusi penelitian ini adalah memberikan alternatif desain sudu inovatif berbasis biomimetik yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja turbin vorteks skala kecil untuk daerah pedesaan dengan head rendah.

Agar penelitian ini terarah dan fokus, maka batasan masalah yang ditetapkan adalah sebagai berikut:

1. Turbin yang digunakan adalah turbin aliran vorteks skala laboratorium.
2. Variasi sudu yang diuji hanya terdiri dari tiga tipe, yaitu sudu datar, sudu lengkung, dan sudu lengkung dengan sirip tambahan.
3. Fluida kerja yang digunakan adalah air dengan debit tetap sekitar 0,003 m³/detik.
4. Penelitian hanya menitikberatkan pada aspek mekanis turbin (torsi, daya, dan efisiensi), tidak mencakup sistem kelistrikan atau generator.
5. Pengujian dilakukan dalam kondisi laboratorium dengan head rendah, sehingga hasil belum mempertimbangkan faktor lingkungan nyata di sungai.

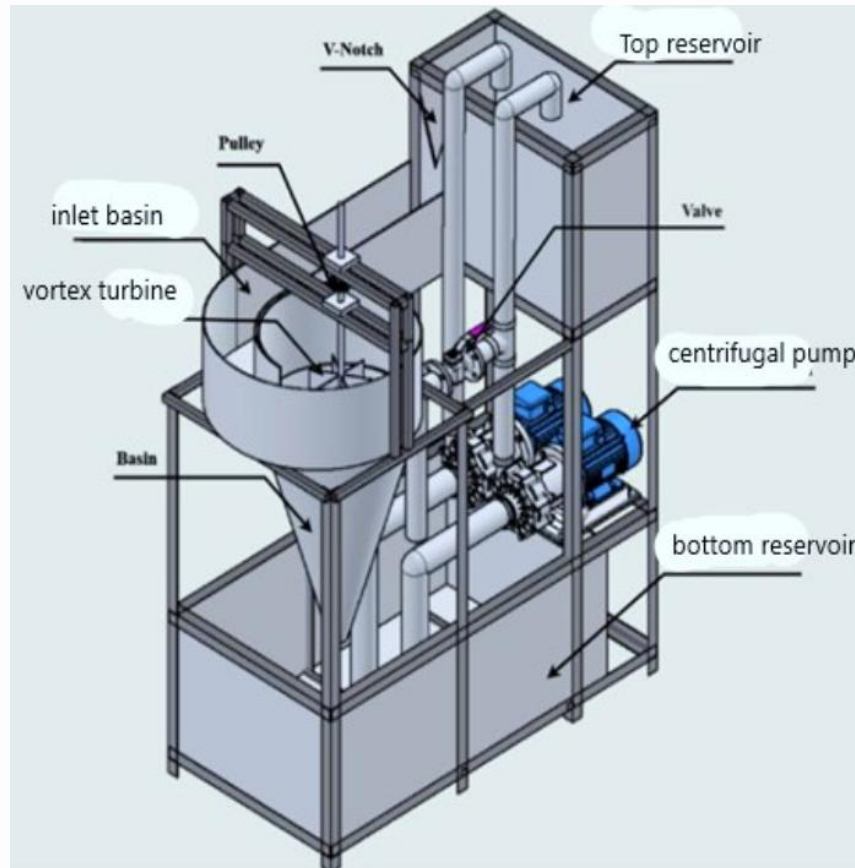
METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Teknik Mesin, Universitas Riau, menggunakan prototipe turbin vorteks skala laboratorium sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem uji terdiri dari top reservoir sebagai penampung awal, bottom reservoir sebagai penampung akhir, pompa sentrifugal untuk mensirkulasikan air, serta inlet basin dan vortex basin sebagai tempat terbentuknya pusaran air sebelum mengenai turbin.

Proses Kerja Sistem Uji (sesuai Gambar 1):

1. Air dari bottom reservoir dipompa menuju top reservoir.
2. Dari top reservoir, air dialirkan menuju inlet basin melalui pipa pengarah.
3. Aliran air diatur dengan valve dan debitnya diukur menggunakan V-Notch yang ditempatkan sebelum masuk ke vortex basin.

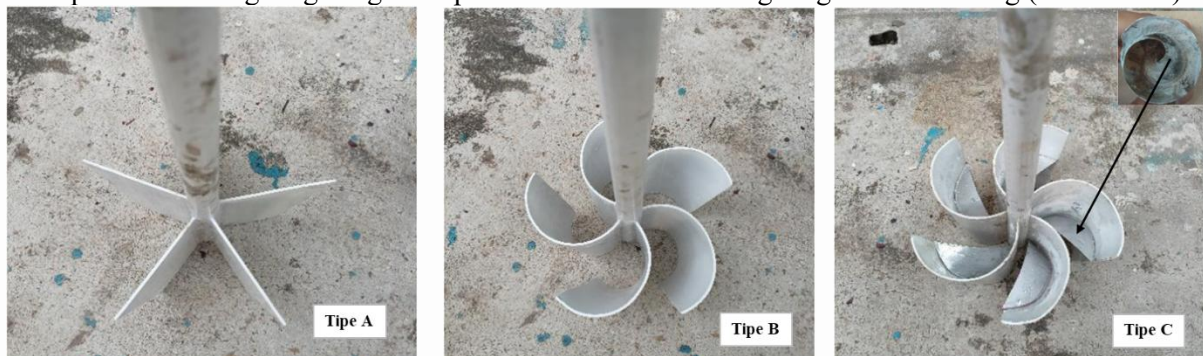
4. Air kemudian masuk ke vortex basin, membentuk pusaran akibat geometri inlet dan basin.
5. Pusaran air tersebut mengenai tiga variasi sudu turbin (Tipe A, B, C) yang dipasang pada poros vertikal.
6. Putaran poros diteruskan ke pulley, di mana torsi diukur menggunakan sistem beban gantung (pulley system) sebagaimana diadaptasi dari Saleem *et al.* [10].
7. Air keluar menuju bottom reservoir, kemudian dipompa kembali ke top reservoir, membentuk siklus tertutup (*closed-loop circulation system*).



Gambar 1. Skema sistem uji turbin vortex

Variasi Sudu Turbin (Gambar 2):

1. Tipe A: Sudu datar.
2. Tipe B: Sudu lengkung.
3. Tipe C: Sudu lengkung dengan sirip tambahan berbentuk lengkungan rumah keong (biomimetik).



Gambar 2. Tiga tipe turbin vortex yang diuji



Gambar 3. Proses pengujian dan pengambilan data

Penelitian ini menggunakan beberapa peralatan utama dan bahan penunjang. Peralatan yang digunakan meliputi pompa sentrifugal untuk mensirkulasikan air, V-Notch sebagai alat ukur debit, tachometer digital untuk mengukur putaran poros, serta sistem pulley dengan beban gantung untuk pengukuran torsi. Selain itu, digunakan reservoir atas (top reservoir) dan reservoir bawah (bottom reservoir) sebagai penampung air dalam sistem sirkulasi tertutup, serta pipa pengarah dan valve untuk mengatur laju aliran.

Bahan utama yang digunakan adalah air sebagai fluida kerja, serta material untuk pembuatan sudu turbin. Sudu dibuat dari pipa PVC dengan diameter tertentu. PVC dipilih karena ringan, mudah diperoleh, murah, cukup kuat, serta tahan terhadap korosi. Poros turbin dibuat dari baja karbon rendah yang mampu menahan momen puntir, sedangkan pulley dibuat dari aluminium ringan untuk mengurangi inersia sistem.

Proses pembuatan sudu dilakukan dalam beberapa tahap. Pertama, pemotongan pipa PVC sesuai dengan ukuran sudu yang telah dirancang. Kedua, bagian pipa yang telah dipotong dipanaskan menggunakan heat

gun atau kompor listrik, sehingga PVC menjadi lunak dan mudah dibentuk. Ketiga, sudu dibentuk sesuai desain:

- Tipe A: PVC dipotong datar tanpa deformasi tambahan.
- Tipe B: PVC dipanaskan lalu dibengkokkan untuk mendapatkan bentuk lengkung.
- Tipe C: Setelah dibentuk melengkung, pada sudu ditambahkan sirip tambahan berbentuk spiral menyerupai rumah keong. Sirip spiral dibuat dari aluminium plat dan dibentuk sesuai jalur spiral, kemudian dipasang pada sisi sudu utama menggunakan perekat epoksi.

Setelah sudu selesai dibentuk, masing-masing variasi (A, B, dan C) dipasangkan pada hub turbin yang terhubung dengan poros vertikal. Poros dipasang pada bearing untuk memastikan rotasi halus dengan gesekan minimal. Seluruh rangkaian turbin kemudian dipasang pada frame uji dari baja ringan untuk menjaga kestabilan selama eksperimen.

Data yang diukur:

1. Debit aliran (Q)-menggunakan V-Notch, dengan persamaan empiris, persamaan 1:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

Dengan Q Adalah debit aliran (m^3/detik), C_d merupakan koefisien debit, θ merupakan sudut V-Notch adalah 36 derajat, sedangkan h adalah tinggi muka air diatas V-Notch (m).

2. Torsi

Dihitung dari massa beban yang divariasikan pada sistem pulley, persamaan 2:

$$T = m \cdot g \cdot r \quad (2)$$

Dengan Torsi (T) dalam Nm, m massa beban (kg), percepatan gravitasi (9.81 m/s^2) dan jari-jari pulley (m).

3. Putaran Poros

Putaran poros menggunakan tachometer digital dalam satuan rpm.

4. Daya Turbin

Daya turbin dihitung dari hasil perkalian torsi dengan kecepatan sudut, persamaan 3:

$$P_T = T \cdot \omega \rightarrow \omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

5. Efisiensi

Efisiensi dihitung dengan persamaan 4:

$$\eta = \frac{P_T}{P_{hidrolik}} \rightarrow P_{hidrolik} = \rho g Q H \quad (4)$$

H merupakan ketinggian muka basin dengan sisi keluar basin yaitu 0,786 m.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan terhadap tiga variasi sudu, yaitu sudu datar (Tipe A), sudu lengkung (Tipe B), dan sudu lengkung dengan sirip tambahan (Tipe C). Hasil pengukuran menunjukkan adanya perbedaan kinerja yang signifikan pada masing-masing variasi.

Hubungan Torsi terhadap Putaran Poros

Grafik pada **Gambar 3** menunjukkan hubungan antara torsi dan putaran poros untuk tiga variasi sudu turbin vorteks: Tipe A (datar), Tipe B (lengkung), dan Tipe C (lengkung dengan sirip tambahan berbentuk spiral). Secara umum, terlihat bahwa nilai torsi menurun seiring dengan meningkatnya putaran poros pada ketiga tipe turbin. Hal ini sesuai dengan karakteristik umum turbin air, di mana pada putaran rendah fluida mampu memberikan gaya dorong yang besar pada sudu, sedangkan pada putaran tinggi energi kinetik air lebih banyak hilang sebagai turbulensi sehingga menghasilkan torsi yang lebih kecil.

Perbandingan Performa Tipe A, B, dan C

- Tipe A (sudu datar) menghasilkan torsi paling rendah di semua rentang putaran. Pada putaran awal (0–50 rpm), torsi maksimum hanya sekitar 0,7 Nm, dan menurun drastis hingga mendekati nol pada putaran 200 rpm. Rendahnya performa ini disebabkan oleh bentuk sudu datar yang kurang mampu memanfaatkan energi pusaran air secara optimal, sehingga sebagian besar energi fluida terbuang sebagai pusaran sekunder.
- Tipe B (sudu lengkung) menunjukkan peningkatan performa dibandingkan tipe A. Pada putaran rendah, torsi awal yang dihasilkan sekitar 0,9 Nm, lebih tinggi dibandingkan tipe A. Bentuk lengkung sudu memungkinkan aliran pusaran air lebih terarah sehingga gaya tangensial pada poros meningkat. Meskipun demikian, pada putaran tinggi (>200 rpm), penurunan torsi tetap signifikan karena adanya peningkatan kehilangan energi akibat separasi aliran.
- Tipe C (sudu lengkung dengan sirip tambahan berbentuk spiral rumah keong) memberikan

performa terbaik di antara ketiga variasi. Torsi awal mencapai 1,0 Nm pada 0 rpm, lebih tinggi daripada tipe A dan B. Bahkan hingga putaran menengah (100–150 rpm), tipe C masih mampu mempertahankan torsi lebih besar dibandingkan tipe lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan sirip spiral meningkatkan kemampuan sudu dalam menangkap energi pusaran air dengan lebih efisien. Sirip spiral berfungsi memperkuat arah aliran pusaran sehingga distribusi energi fluida lebih merata sepanjang permukaan sudu, mengurangi separasi, dan meningkatkan transfer momentum dari fluida ke poros.

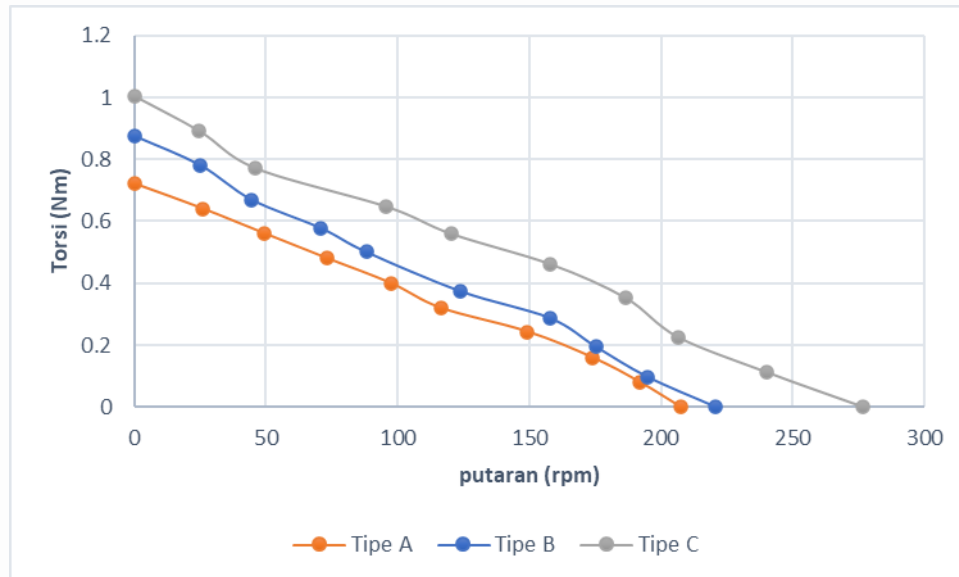
Hubungan Efisiensi terhadap Putaran Poros

Gambar 4 menunjukkan hubungan efisiensi turbin terhadap putaran poros. Pola yang terlihat adalah efisiensi yang meningkat pada awal putaran, mencapai nilai puncak pada putaran menengah, kemudian menurun kembali pada putaran tinggi. Fenomena ini umum terjadi pada turbin air, karena pada putaran rendah sebagian besar energi fluida berhasil dikonversi menjadi energi mekanik, namun pada putaran tinggi terjadi peningkatan kehilangan energi akibat turbulensi dan separasi aliran.

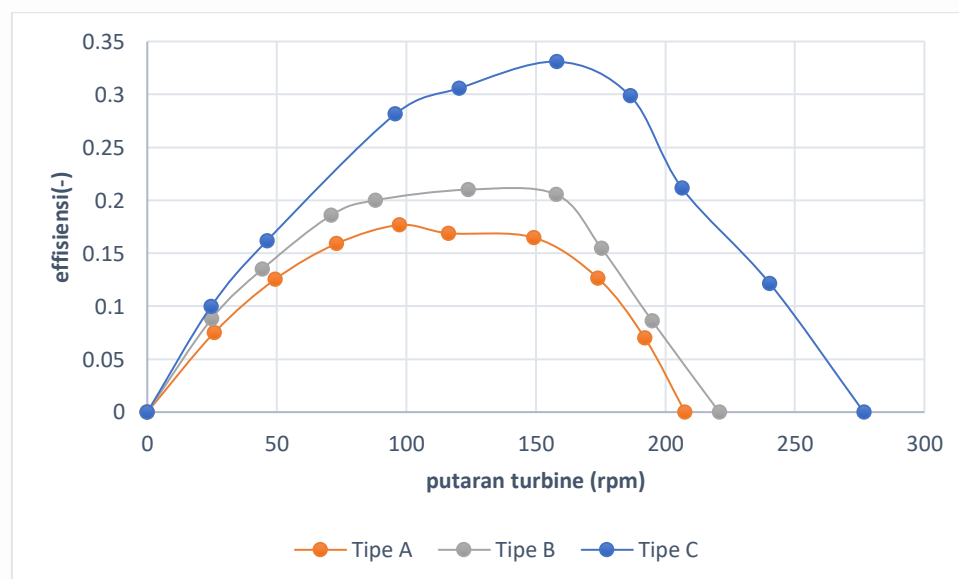
- Tipe A (sudu datar) menghasilkan efisiensi terendah, dengan puncak sekitar 0,18 (18%) pada kisaran 80–120 rpm. Rendahnya efisiensi ini disebabkan oleh geometri sudu datar yang kurang mampu mengarahkan aliran pusaran air secara efektif, sehingga sebagian energi fluida hilang.
- Tipe B (sudu lengkung) menunjukkan peningkatan efisiensi dibandingkan dengan Tipe A. Puncak efisiensi mencapai sekitar 0,21 (21%) pada 100–140 rpm. Lengkungan sudu membantu mengarahkan pusaran air lebih baik, sehingga gaya tangensial lebih optimal.
- Tipe C (sudu lengkung dengan sirip spiral) memberikan performa terbaik. Efisiensi maksimum mencapai sekitar 0,3301 (33,01%) pada 120–160 rpm, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan tipe lain. Efisiensi 33,01% ini masih lebih

rendah dari hasil Sharif et al. [6] sebesar 52%, tetapi lebih tinggi dibandingkan dengan Kueh et al. [8] sebesar 22%. Sirip spiral berfungsi sebagai pengarah tambahan yang menyerupai kontur rumah keong, sehingga pusaran lebih stabil dan

energi fluida dapat ditangkap lebih merata sepanjang permukaan sudu. Hal ini menurunkan separasi aliran dan meningkatkan transfer momentum fluida ke poros turbin.



Gambar 3. Hubungan torsi dengan putaran poros turbin



Gambar 4. Hubungan efisiensi dengan putaran poros turbin

Analisis Ilmiah Peningkatan Efisiensi

Peningkatan signifikan pada sudu lengkung dengan sirip tambahan dapat dijelaskan melalui pendekatan biomimetik. Bentuk spiral rumah keong menyerupai pola spiral Fibonacci yang secara alami efektif mengarahkan aliran fluida secara gradual, sehingga aliran tetap stabil dan terhindar dari separasi dini [13].

Selain itu, penambahan sirip pada sudu berfungsi mirip dengan vortex generators, yaitu menghasilkan pusaran kecil yang menjaga aliran tetap menempel pada permukaan sudu, memperlama kontak, dan meningkatkan *momentum transfer* [2]. Hal ini mengurangi fenomena *wake losses* yang umumnya terjadi pada sudu datar maupun lengkung.

Temuan ini juga selaras dengan studi biomimetik lain pada turbin hidrokinetik, yang menunjukkan bahwa adaptasi bentuk alami seperti sayap burung atau struktur spiral mampu meningkatkan efisiensi turbin

laut [10]. Dengan demikian, efisiensi 33,01% pada sudu rumah keong dengan sirip tambahan bukan hanya akibat peningkatan luas permukaan, melainkan karena adanya mekanisme hidrodinamik biomimetik yang mengoptimalkan interaksi aliran pusaran dengan sudu.

Dengan performa efisiensi maksimum mencapai 33,01%, Tipe C menunjukkan potensi besar untuk diaplikasikan pada sistem energi terbarukan skala kecil (mikrohidro). Efisiensi yang lebih tinggi pada putaran rendah–menengah menjadikan desain ini cocok untuk lokasi dengan debit air terbatas, seperti aliran sungai kecil di daerah pedesaan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi bentuk sudu turbin vorteks berpengaruh signifikan terhadap performa yang dihasilkan. Tipe sudu datar (Tipe A) menghasilkan torsi dan efisiensi terendah, sedangkan sudu lengkung (Tipe B) menunjukkan peningkatan performa.
2. Sudu lengkung dengan sirip tambahan berbentuk spiral menyerupai rumah keong (Tipe C) memberikan kinerja terbaik, dengan torsi maksimum mencapai 1,0 Nm pada putaran rendah serta efisiensi maksimum sekitar 33,01% pada putaran menengah (120–160 rpm).
3. Penambahan sirip spiral pada sudu terbukti mampu meningkatkan efisiensi hingga +75% dibandingkan dengan Tipe A dan +50% dibandingkan dengan Tipe B. Sirip ini berfungsi sebagai *swirl stabilizer* yang menstabilkan pusaran, mengurangi separasi aliran, serta meningkatkan transfer energi dari fluida ke poros.

Dengan performa yang lebih baik pada putaran rendah hingga menengah, desain sudu Tipe C

berpotensi diaplikasikan pada sistem mikrohidro di daerah dengan aliran air berkecepatan rendah, sehingga dapat menjadi solusi energi terbarukan alternatif untuk daerah terpencil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Riau atas dukungan pendanaan yang diberikan untuk perancangan dan pembuatan peralatan eksperimen, sebagaimana tercantum dalam Pengumuman Nomor: 878/UN19.5.1.3/AL.04/2024, dengan nomor kontrak 948/UN19.5.1.3/AL.04/2024.

KONTRIBUSI PENULIS

Alfito Dinova Prayoga: Menyusun draf naskah awal (original paper), melakukan studi literatur, merancang dan membuat variasi sudu turbin, melakukan setup peralatan pengujian di laboratorium, melaksanakan pengambilan data eksperimen, melakukan pengukuran torsi, daya, serta efisiensi, mengolah data hasil eksperimen, membuat tabel dan grafik, serta melakukan analisis awal terhadap hasil penelitian.
Iwan Kurniawan: memberikan arahan dalam penyusunan metodologi penelitian, supervisi keseluruhan proses penelitian, memberikan masukan dalam analisis data dan pembahasan hasil, mereview dan mengoreksi naskah, serta berkontribusi dalam penyempurnaan konsep, interpretasi hasil, dan penulisan akhir artikel.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini telah didanai Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Riau dengan nomor kontrak 948/UN19.5.1.3/AL.04/2024

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. B. Timilsina, S. Mulligan, and T. R. Bajracharya, "Water vortex hydropower technology: A state-of-the-art review of developmental trends," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 20, pp. 1737–1760, 2018. DOI:[10.1007/s10098-018-1589-0](https://doi.org/10.1007/s10098-018-1589-0)
- [2] S. Dhakal, S. Nakarmi, P. Pun, A. B. Thapa, and T. R. Bajracharya, "Development and testing of runner and conical basin for gravitational water vortex power plant," *J. Inst. Eng.*, vol. 10, pp. 140–148, 2014. DOI:[10.3126/jie.v10i1.10895](https://doi.org/10.3126/jie.v10i1.10895)
- [3] N. Dahal, R. K. Shrestha, S. Sherchan, S. Milapati, S. R. Shakya, and A. K. Jha, "Performance analysis of booster based gravitational water vortex power plant," *J. Inst. Eng.*, vol. 15, pp. 90–96, 2019. DOI:[10.3126/jie.v15i3.32026](https://doi.org/10.3126/jie.v15i3.32026)
- [4] B. K. Yadav, A. C. Jyoti, P. K. Rajak, R. K. Mahato, D. K. Chaudhary, M. Jahangiri, and R. D. Yadav, "CFD analysis of the most favorable gap between the main runner and booster runner of gravitational water vortex turbine," *J. Renew. Energy Environ.*, vol. 9, pp. 75–81, 2022. <https://doi.org/10.30501/jree.2022.298216.1237>.
- [5] P. Wichian and R. Suntivarakorn, "The effects of turbine baffle plates on the efficiency of water free vortex turbines," *Energy Procedia*, vol. 100, pp. 198–202, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.165>.

- [6] A. Sharif, M. U. R. Siddiqi, and R. Muhammad, "Novel runner configuration of a gravitational water vortex power plant for micro hydropower generation," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 39, pp. 87–93, 2020. DOI:[10.17582/journal.jeas/39.1.87.93](https://doi.org/10.17582/journal.jeas/39.1.87.93).
- [7] Warjito, A. A. Ramadhan, Budiarto, R. Irwansyah, and M. A. F. Kurnianto, "Performance comparison of straight, curved, and tilted blades of pico scaled vortex turbine," *CFD Lett.*, vol. 15, pp. 114–125, 2021. <https://doi.org/10.37934/cfdl.15.2.114125>.
- [8] T. C. Kueh, S. L. Beh, Y. S. Ooi, and D. G. Rilling, "Experimental study to the influences of rotational speed and blade shape on water vortex turbine performance," *IOP Conf. Ser. J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 822, pp. 012066, 2017. DOI 10.1088/1742-6596/822/1/012066.
- [9] Z. Esa, J. H. Zaini, M. Mehdi, A. Iqbal, and M. M. Nauman, "Design, fabrication and analysis of a gravitational water vortex based energy harvester," *Int. J. Green Energy*, vol. 20, pp. 77–88, 2023. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.2023880>.
- [10] E. E. H. Montoya, E. Mendoza, E. J. Stamhuis, "Biomimetic Design of Turbine Blades for Ocean Current Power Generation," *Biomimetics*, vol. 8(1), 118, pp. 1-15. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8010118>.
- [11] Y. Chen, W. Yang, K. Wei, B. Qin, "Enhancing tidal current turbine efficiency through multi-biomimetic blade design features," *Energy*, vol. 293, pp. 1-13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130646>.
- [12] F. Alshammari, I. Alatawi, M. Alhadri, "Biomimetic Stator Vane Design for Radial Turbines in Waste Heat Recovery Applications," *Biomimetics*, vol. 10(7), 465, pp. 1-15. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10070463>
- [13] A. S. Saleem, T. A. Cheema, R. Ullah, S. M. Ahmad, J. A. Chattha, B. Akbar, and C. W. Park, "Parametric study of single-stage gravitational water vortex turbine with cylindrical basin," *Energy*, vol. 200, pp. 117 464, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117464>.