

Pengaruh Variasi Debit Fluida terhadap Daya Mekanik Turbin Pelton dengan 16 Sudu

Syaukaty Yasinta¹, Dhimas Satria Wibowo²
^{1,2} Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

ARTICLE INFO

Article history:

DOI:

10.30595/pspfs.v9i1.2174

Submitted:

December 11, 2025

Accepted:

January 20, 2026

Published:

February 12, 2026

Keywords:

Flow Rate, Mechanical Power, Turbine Efficiency, Nozzle, Laboratory Scale, Pelton

ABSTRACT

Hydropower Plant (HPP) is one of the renewable energy sources that plays an important role in fulfilling electricity needs, especially in areas with sufficient water flow potential. One of the main components in a hydropower plant is the turbine, and the Pelton turbine is commonly used in high-head conditions with low flow rates. As an impulse turbine, this type converts the kinetic energy of water flow into mechanical energy through the impact between the water jet and the buckets on the turbine. Turbine performance is influenced by several operational parameters, such as inlet water flow rate and *nozzle* configuration. This study aims to analyze the effect of variations in water flow rate on mechanical power and turbine rotational speed (rpm) in a Pelton turbine with 16 blades. The results show that a flow rate of 40 liters per minute (lpm) provides the best performance, yielding maximum mechanical power of 0.6417 watts at *nozzle* 1 and 0.6050 watts at *nozzle* 2. The highest shaft rotational speed is also achieved at this flow rate, namely 107.82 rpm at *nozzle* 1 and 101.66 rpm at *nozzle* 2. *Nozzle* position 1 delivers more optimal performance, likely due to better incoming flow pressure. Based on these results, a flow rate of 40 lpm can be used as a reference for determining ideal operating conditions for the Pelton turbine, thus contributing to improved overall efficiency of the power generation system.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Corresponding Author:

Syaukaty Yasinta,

Program Studi Teknik Mesin,

Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

Jl. Raya Dukuhwaluh, Dukuhwaluh, Kembaran, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah

Email: syasinta@ump.ac.id

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan dasar yang fundamental dalam mendukung pembangunan nasional dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Di tengah ketergantungan global terhadap sumber energi fosil yang tidak terbarukan dan berdampak negatif terhadap lingkungan, transisi menuju energi terbarukan menjadi sebuah keharusan strategis [1]. Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan potensi sumber daya air yang melimpah, memiliki peluang besar untuk memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), khususnya dalam bentuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). PLTMH sangat relevan diterapkan di daerah-daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik nasional, karena sistem ini ramah lingkungan, dapat dioperasikan secara lokal, dan menawarkan solusi energi yang berkelanjutan dengan biaya operasional relatif rendah [2].

Salah satu komponen paling krusial dalam sistem PLTMH adalah turbin air, yang berfungsi mengubah energi hidraulik dari aliran air menjadi energi mekanik. Untuk kondisi head tinggi dan debit rendah yang umum ditemui di banyak lokasi pegunungan atau daerah hulu sungai di Indonesia, turbin Pelton merupakan pilihan utama [3]. Turbin ini bekerja berdasarkan prinsip impuls, di mana jet air bertekanan tinggi dari *nozzle* menghantam sudu-sudu (*bucket*) pada *runner*, menghasilkan gaya impuls yang menyebabkan poros turbin berputar. Putaran poros inilah yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang faktor-

faktor yang memengaruhi kinerja turbin Pelton sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi dan output energi sistem PLTMH [4]

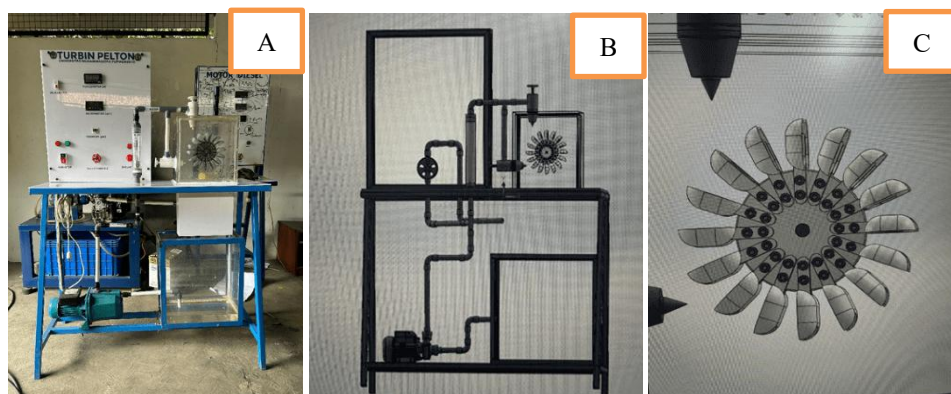
Penelitian eksperimental skala laboratorium merupakan langkah awal yang vital dalam pengembangan teknologi turbin sebelum diimplementasikan di lapangan. Pengujian laboratorium memungkinkan kontrol ketat atas parameter operasional seperti debit aliran, head, jumlah dan geometri sudu, serta konfigurasi *nozzle*, sehingga dapat dihasilkan data empiris yang akurat dan dapat direplikasi [5]. Dari berbagai parameter tersebut, debit fluida merupakan salah satu variabel kunci yang secara langsung memengaruhi momentum jet air, yang pada gilirannya menentukan besarnya torsi dan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Meskipun penting, masih terbatas studi yang secara sistematis menganalisis pengaruh variasi debit terhadap performa turbin Pelton 16 sudu dalam konteks prototipe laboratorium, terutama yang menggunakan fabrikasi modern seperti 3D printing [6].

Selain debit, konfigurasi *nozzle* juga memainkan peran penting dalam menentukan arah, distribusi, dan waktu kontak jet air dengan sudu, yang semuanya berkontribusi terhadap efisiensi transfer energi. Namun, dalam banyak penelitian, fokus sering kali hanya pada jumlah *nozzle* atau diameter, sementara orientasi posisi *nozzle* (misalnya 90° vs 180°) kurang mendapatkan perhatian. Padahal, perbedaan posisi ini dapat menciptakan dinamika aliran yang berbeda, memengaruhi head efektif, dan pada akhirnya mengubah karakteristik kinerja turbin. Penelitian ini dirancang untuk mengisi gap tersebut dengan tidak hanya menganalisis pengaruh debit, tetapi juga membandingkan kinerja turbin antara dua konfigurasi *nozzle* yang berbeda, memberikan wawasan lebih dalam tentang interaksi antara parameter aliran dan desain sistem [7]

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi debit fluida terhadap daya mekanik dan kecepatan putaran turbin Pelton dengan 16 sudu, serta membandingkan kinerjanya pada dua posisi *nozzle* berbeda. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang jelas untuk menentukan kondisi operasional optimal (titik debit maksimum) dan membantu dalam pengambilan keputusan desain *nozzle* untuk aplikasi turbin Pelton skala kecil. Temuan ini akan menjadi dasar bagi pengembangan sistem PLTMH yang lebih efisien, adaptif, dan sesuai dengan kondisi lokal, terutama di wilayah dengan ketersediaan air yang bervariasi.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk menganalisis pengaruh variasi debit fluida terhadap daya mekanik dan kecepatan putaran turbin Pelton dengan 16 sudu. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Manufaktur, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto, dengan sistem aliran tertutup (closed-loop) yang dikendalikan oleh pompa sentrifugal Wasser PW-120, yang mampu menyediakan debit maksimum 40 liter/menit. Alat uji utama seperti yang dapat di lihat pada Gambar 1 terdiri atas turbin Pelton skala kecil dengan runner berjumlah 16 sudu yang dibuat menggunakan teknologi 3D printing, dua konfigurasi *nozzle* (90° dan 180°) untuk membedakan orientasi jet, poros baja berdiameter 16 mm, pipa penyalur PVC berdiameter $\frac{1}{2}$ inci (1,27 cm), dan sistem pembebanan puli rem yang memungkinkan penerapan torsi konstan pada poros turbin. Debit aliran diatur secara manual melalui katup gate dan diukur dengan akurasi tinggi menggunakan flowmeter digital, sementara kecepatan putaran poros direkam secara non-kontak menggunakan tachometer digital (UT372) untuk meminimalkan gangguan dinamis pada sistem.



Variabel bebas dalam penelitian ini adalah debit fluida, yang divariasikan pada lima level: 20, 25, 30, 35, dan 40 liter/menit. Variabel terikat meliputi daya mekanik turbin dan kecepatan putaran (rpm), sedangkan variabel kontrol mencakup jumlah sudu (16), sudut defleksi sudu ($\beta_2 = 30^\circ$), material runner, diameter poros, dan jenis *nozzle* semuanya tetap konstan selama setiap rangkaian pengujian. Setiap kondisi debit diuji sebanyak lima kali pengulangan untuk

memastikan konsistensi dan keandalan data, dengan nilai rata-rata dari kelima pengulangan digunakan sebagai data representatif.

Prosedur pengujian dimulai dengan menstabilkan aliran air pada debit tertentu, kemudian membiarkan sistem beroperasi dalam kondisi beban tetap hingga mencapai keadaan stasioner. Pada kondisi ini, kecepatan putaran poros dicatat, dan gaya beban yang diterapkan melalui puli rem ($L = 2,1378$ N) bersama jarak lengan momen ($d = 0,0266$ m) digunakan untuk menghitung torsi poros menggunakan persamaan:

$$T = L \cdot d \quad (1)$$

Daya mekanik turbin dihitung dengan rumus:

$$P_{\text{mekanik}} = T \times \frac{2\pi}{60} \times n \quad (2)$$

dengan T = torsi (Nm), dan n = kecepatan putaran (rpm).

Efisiensi turbin η_t didefinisikan sebagai rasio antara daya mekanik output dan daya air input (*water horsepower*):

$$\eta_t = \frac{P_{\text{mekanik}}}{P_{\text{hidrolik}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{Dimana } P_{\text{hidrolik}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (4)$$

ρ = massa jenis air (1000 kg/m^3), g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$), Q = debit aliran (m^3/s), H = *head efektif* (m).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Debit terhadap Daya Mekanik Turbin Pelton

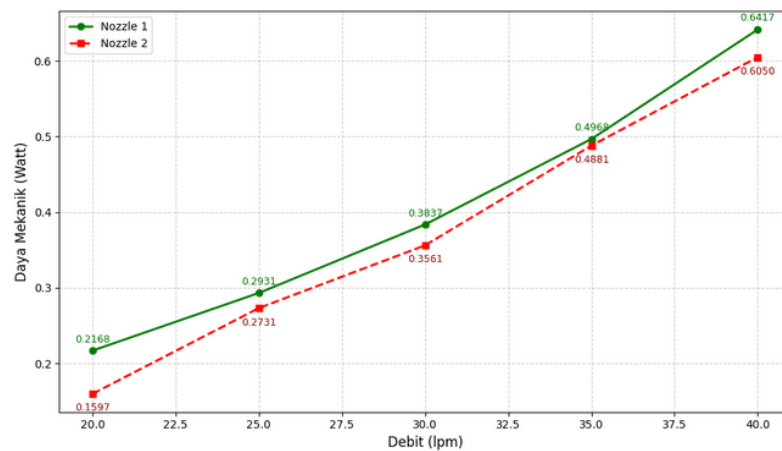
Hasil pengujian eksperimental menunjukkan bahwa daya mekanik turbin Pelton meningkat secara konsisten seiring kenaikan debit fluida, baik pada posisi *nozzle* 1 maupun *nozzle* 2. Peningkatan debit dari 20 hingga 40 L/min menyebabkan peningkatan energi kinetik jet air yang mengenai sudu (*bucket*), sehingga gaya impuls yang dihasilkan juga semakin besar. Gaya impuls ini menghasilkan torsi pada poros turbin, yang kemudian dikonversi menjadi daya mekanik [8]

Daya maksimum tercapai pada debit 40 L/min, yaitu 0,6417 watt untuk *nozzle* 1 dan 0,6050 watt untuk *nozzle* 2. Fenomena ini selaras dengan prinsip dasar konversi energi pada turbin impuls, di mana daya output berbanding lurus dengan momentum aliran fluida [9]. Debit yang lebih tinggi meningkatkan volume air per satuan waktu, sehingga momentum yang ditransfer ke *runner* turbin juga bertambah, menghasilkan torsi dan daya mekanik yang lebih besar [10]

Perbedaan performa antara kedua posisi *nozzle* dapat dijelaskan melalui perbedaan *head efektif*. *Nozzle* 1 memiliki *head* sebesar 1,106 m, sedangkan *nozzle* 2 hanya 0,844 m. *Head* yang lebih tinggi pada *nozzle* 1 menghasilkan kecepatan jet air yang lebih besar sesuai dengan persamaan Torricelli sehingga energi kinetik yang diterima oleh *bucket* juga lebih tinggi [11]. Hal ini menjelaskan mengapa *nozzle* 1 secara konsisten menghasilkan daya mekanik yang lebih besar dibandingkan *nozzle* 2 pada setiap level debit yang diuji.

Tren peningkatan daya terhadap debit tetap konsisten dalam seluruh rentang eksperimen. Dalam konteks skala laboratorium, kontrol presisi terhadap debit aliran memungkinkan identifikasi titik operasi optimal turbin, sebagaimana teramati dalam penelitian ini pada debit 40 L/min.

Hubungan antara debit fluida (L/min) dengan daya mekanik turbin Pelton pada dua posisi *nozzle* berbeda ditampilkan pada Gambar 2. Grafik tersebut menggambarkan tren peningkatan daya mekanik secara linier seiring kenaikan debit, dari 20 hingga 40 L/min. Data menunjukkan bahwa *Nozzle* 1 (*head* 1,106 m) konsisten menghasilkan daya lebih tinggi dibandingkan *Nozzle* 2 (*head* 0,844 m) pada setiap level debit, dengan nilai maksimum dicapai pada debit 40 L/min.



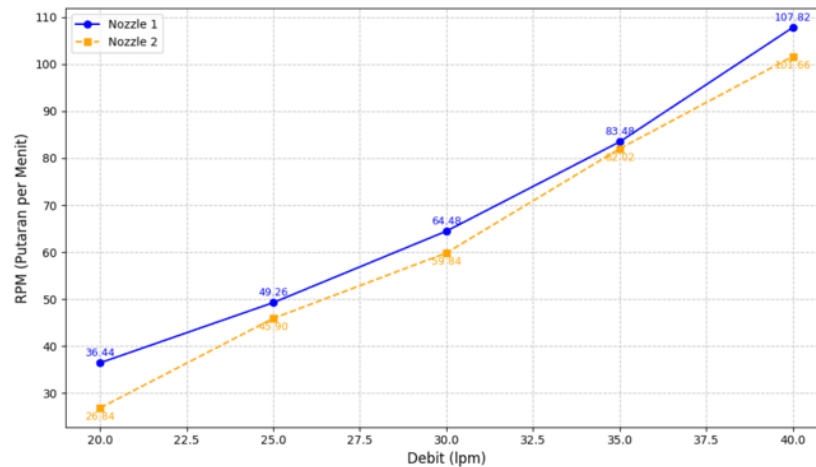
3.2. Kecepatan Putaran Turbin (RPM)

Kecepatan putaran turbin Pelton menunjukkan tren peningkatan yang konsisten dan hampir linier seiring dengan kenaikan debit fluida, baik untuk *nozzle 1* maupun *nozzle 2*. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem turbin merespons secara proporsional terhadap peningkatan energi input dari aliran air. Peningkatan debit mengakibatkan peningkatan momentum jet air, yang secara langsung memperbesar gaya impuls yang bekerja pada sudu (*bucket*) dan mendorong poros turbin berputar lebih cepat [12]

Kecepatan putaran maksimum tercapai pada debit 40 L/min (atau 40 LPM), yaitu 107,82 rpm untuk *nozzle 1* dan 101,66 rpm untuk *nozzle 2*. Perbedaan nilai rpm antara kedua *nozzle* sejalan dengan perbedaan head efektifnya. *Nozzle 1*, dengan head sebesar 1,106 m, menghasilkan kecepatan jet air yang lebih tinggi dibandingkan *nozzle 2* (head = 0,844 m), sesuai dengan persamaan Torricelli. Akibatnya, transfer momentum dari jet ke runner lebih besar pada *nozzle 1*, sehingga menghasilkan kecepatan putaran yang lebih tinggi [13]

Hubungan antara debit dan kecepatan putaran secara visual disajikan pada Gambar 3, yang menampilkan grafik hampir linier antara debit fluida (L/min) dan kecepatan putaran (rpm). Grafik tersebut menunjukkan bahwa kurva untuk *nozzle 1* selalu berada di atas kurva *nozzle 2* pada seluruh rentang debit, mengonfirmasi bahwa *nozzle 1* memberikan respons dinamis yang lebih unggul terhadap peningkatan debit [14]

Meskipun kecepatan putaran meningkat seiring kenaikan debit, penting untuk dicatat bahwa peningkatan rpm tidak serta-merta berarti peningkatan efisiensi. Sebagaimana akan dibahas pada bagian berikutnya, efisiensi turbin mencapai nilai puncak pada debit 40 L/min, namun hal ini bukan disebabkan oleh rpm tertinggi, melainkan oleh tercapainya rasio optimal antara daya mekanik keluaran (*output power*) dan daya hidrolis masukan (*input power*) [15]. Fenomena ini menegaskan bahwa parameter seperti rpm dan efisiensi harus dievaluasi secara terpisah untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai performa turbin.



Gambar 3. Debit vs rpm

3.3. Efisiensi Turbin Pelton

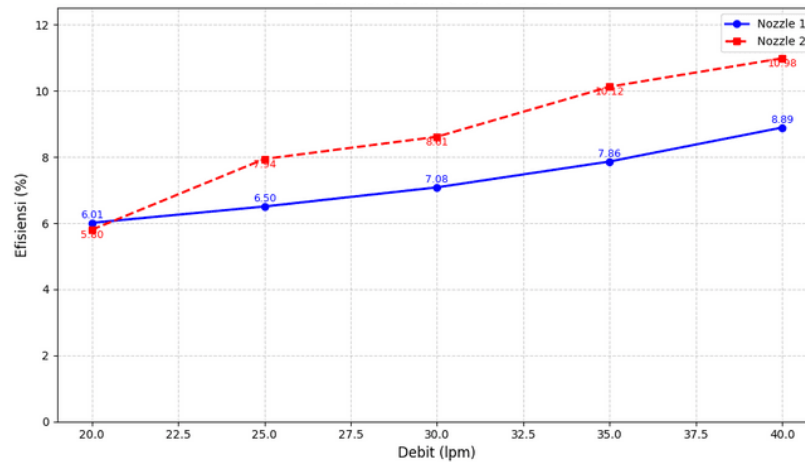
Meskipun *nozzle 1* menghasilkan daya mekanik yang lebih tinggi (0,6417 W) dan kecepatan putaran lebih cepat (107,82 rpm) dibandingkan *nozzle 2*, hasil pengujian menunjukkan bahwa *nozzle 2* justru mencapai efisiensi maksimum yang lebih tinggi, yaitu 10,98% pada debit 40 L/min, sedangkan *nozzle 1* hanya mencapai 8,89% pada kondisi yang sama. Fenomena ini menegaskan bahwa efisiensi turbin tidak selalu berkorelasi langsung dengan besarnya daya keluaran atau kecepatan putaran, melainkan ditentukan oleh seberapa efektif sistem mengonversi energi hidrolik masukan (*input power*) menjadi kerja mekanik berguna (*output power*). Dalam konteks eksperimen ini, *nozzle 1* memiliki head yang lebih tinggi (1,106 m) dibandingkan *nozzle 2* (0,844 m), sehingga menerima daya hidrolik masukan yang lebih besar. Namun, tidak seluruh energi tersebut berhasil dikonversi menjadi daya poros akibat adanya rugi-rugi energi, seperti gesekan internal, turbulensi aliran, *splashing* pada sudu, serta ketidaksempurnaan sudut impingement antara jet dan bucket [16]

Sebaliknya, *nozzle 2*—meskipun beroperasi pada *head* dan daya input yang lebih rendah mampu mengoptimalkan proses konversi energi. Diduga bahwa konfigurasi geometris dan posisi *nozzle 2* menghasilkan distribusi jet air yang lebih stabil dan terfokus, serta memberikan waktu kontak yang lebih optimal antara jet dan permukaan bucket. Hal ini memungkinkan transfer momentum berlangsung lebih efisien, sehingga rasio antara daya keluaran dan daya masukan menjadi lebih tinggi [17]. Selain itu, pada *head* yang lebih rendah, kecepatan jet relatif lebih moderat, yang dapat mengurangi kerugian akibat *splashing* dan *windage loss*, terutama dalam skala laboratorium dengan komponen turbin berukuran kecil [18].

Temuan ini memiliki implikasi penting dalam desain sistem turbin mikrohidro. Untuk aplikasi di daerah pedesaan atau lokasi terpencil dengan ketersediaan air terbatas, efisiensi energi jauh lebih krusial daripada kapasitas daya maksimum. Sistem seperti *nozzle 2*, yang mampu memaksimalkan konversi energi dengan input sumber daya yang minimal, lebih sesuai untuk penerapan berkelanjutan dan ekonomis .

Hubungan antara debit fluida (L/min) dan efisiensi turbin Pelton (%) untuk kedua posisi *nozzle* disajikan pada Gambar 4. Grafik tersebut menunjukkan tren peningkatan efisiensi yang hampir linier seiring kenaikan debit dari 20 hingga 40 L/min. Peningkatan ini mencerminkan bahwa pada debit rendah, sistem belum mencapai kondisi operasi optimal karena rugi-rugi relatif lebih dominan, sedangkan pada debit yang lebih tinggi, transfer energi menjadi lebih efektif hingga mencapai titik jenuh mendekati 40 L/min.

Data eksperimen menunjukkan bahwa pada debit 40 L/min, *nozzle 2* mencapai efisiensi maksimum sebesar 10,98%, sedangkan *nozzle 1* hanya mencapai 8,89%. Perbedaan ini mencerminkan pengaruh signifikan dari konfigurasi *nozzle* terhadap efektivitas konversi energi. Meskipun *nozzle 1* menghasilkan daya mekanik lebih tinggi berkat head yang lebih besar, efisiensinya lebih rendah karena konversi energi tidak berlangsung secara optimal—kemungkinan besar akibat interaksi jet–bucket yang kurang ideal atau peningkatan rugi-rugi aliran. Sebaliknya, *nozzle 2*, dengan head lebih rendah, justru mampu memanfaatkan energi input secara lebih efisien, menunjukkan bahwa performa terbaik turbin tidak selalu ditentukan oleh output daya maksimum, melainkan oleh kesesuaian antara desain *nozzle* , pola aliran, dan kondisi operasional spesifik [19].



3.4. Analisis Performa dan Kinerja Sistem

Hasil pengujian menunjukkan bahwa posisi *nozzle* memengaruhi kinerja turbin Pelton secara signifikan. *Nozzle* 1 dengan head 1,106 m menghasilkan daya mekanik tertinggi (0,6417 W) pada debit 40 L/min, didorong oleh kecepatan jet yang lebih besar. Kondisi ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan output daya maksimal. Sementara itu, *nozzle* 2 (head 0,844 m) mencatat efisiensi konversi energi lebih tinggi (10,98% vs. 8,89%), meskipun dayanya sedikit lebih rendah, karena rasio antara daya keluaran dan daya hidrolik input lebih optimal [20].

Peningkatan efisiensi yang konsisten hingga debit 40 L/min pada kedua *nozzle* mengindikasikan bahwa sistem belum mengalami kerugian berat akibat splashing atau gangguan aliran yang umum terjadi pada debit tinggi [21]. Hal ini mungkin disebabkan oleh skala eksperimen yang kecil, sehingga kecepatan aliran dan gaya dinamis masih berada di bawah ambang kritis. Namun, efisiensi absolut tetap rendah. Rugi mekanis akibat poros baja yang tidak dilindungi dan bantalan dengan toleransi tinggi mengurangi torsi efektif. Permukaan bucket yang dihasilkan dari pencetakan 3D juga relatif kasar, memicu turbulensi lokal yang mengganggu lapisan batas aliran dan meningkatkan disipasi energi [22]. Selain itu, sudut defleksi bucket sebesar 30 jauh dari sudut ideal 165°–170° yang diperlukan agar perubahan momentum jet maksimal mengakibatkan sebagian energi jet tidak dimanfaatkan secara penuh, sehingga terjadi splash dan aliran sekunder yang membuang momentum [23].

3.5. Keterbatasan dan Implikasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan sistem mekanis, sehingga daya dihitung dari torsi dan rpm poros, bukan daya listrik aktual. Akibatnya, rugi-rugi pada generator (seperti rugi tembaga dan inti) tidak terukur, dan efisiensi yang diperoleh hanya mencerminkan kinerja mekanis turbin, bukan sistem PLTMH secara utuh.

Meski demikian, hasilnya memberikan acuan teknis tentang pengaruh debit dan posisi *nozzle* terhadap daya serta efisiensi turbin Pelton 16-sudu—terutama untuk aplikasi mikrohidro di daerah terpencil. Beberapa aspek perlu dikembangkan: (1) penggunaan material anti-karat (misalnya aluminium) untuk poros dan *nozzle*; (2) integrasi generator mini guna mengukur daya listrik langsung; (3) simulasi CFD untuk optimasi aliran; dan (4) pengujian variasi sudut defleksi bucket (β_2), karena sudut 30° yang digunakan jauh dari ideal (~165°–170°), sehingga menyebabkan kehilangan momentum akibat splash.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pada hasil analisis data dan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- Debit fluida berpengaruh signifikan terhadap kinerja turbin Pelton 16 sudu. Peningkatan debit dari 20 hingga 40 liter/menit meningkatkan daya mekanik dan kecepatan putaran secara linier. Debit 40 liter/menit merupakan kondisi operasional optimal.
- Nozzle* 1 (head 1,106 m) menghasilkan daya mekanik tertinggi (0,6417 W) dan kecepatan putaran maksimum (107,82 rpm), menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi yang memprioritaskan output daya.

- c. *Nozzle 2* (head 0,844 m) mencapai efisiensi maksimum sebesar 10,98%, meskipun daya outputnya lebih rendah, karena rasio konversi energi input-output-nya lebih optimal.
- d. Efisiensi sistem masih rendah akibat rugi-rugi mekanis dan hidraulis, seperti gesekan poros, permukaan sudu kasar dari proses 3D printing, dan sudut defleksi $\beta_2 = 30^\circ$ yang menyebabkan splash.
- e. Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan konfigurasi *nozzle* harus didasarkan pada tujuan aplikasi daya maksimum (*nozzle 1*) atau efisiensi tinggi (*nozzle 2*).

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Purwokerto atas dukungan pendanaan melalui Hibah Internal Penelitian Tahun 2025. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Laboratorium *Sustainable Energy and Thermal Research Innovation Society (SENTRIS)*, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto, atas dukungan fasilitas dan kolaborasi dalam pelaksanaan penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

- r. Khalid, a. Basit, m. Sohail, t. Ahmad, and n. Muhammad, “community energy and socio-technical infrastructure resilience: analysis of mini/micro hydro power projects in khyber pakhtunkhwa, pakistan,” *environ. Res. Infrastruct. Sustain.*, vol. 4, no. 3, p. 35015, 2024.
- n. A. Pambudi *et al.*, “the future of wind power plants in indonesia: potential, challenges, and policies,” *sustainability*, vol. 17, no. 3, p. 1312, 2025.
- l. Wang and j. Qi, “hydroelectric power,” in *overview of china’s non-fossil fuel power generation*, springer, 2025, pp. 45–126.
- u. Auyeskan *et al.*, “design study for performance improvement of a hybrid pico pelton turbine and its additive manufacturing using a laser powder bed fusion method,” *int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 18, no. 1, pp. 107–117, 2024.
- o. R. Alomar, h. M. Abd, m. M. M. Salih, and f. A. Ali, “performance analysis of pelton turbine under different operating conditions: an experimental study,” *ain shams eng. J.*, vol. 13, no. 4, p. 101684, 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.101684.
- y. Xiao *et al.*, “the interaction between bucket number and performance of a pelton turbine,” *energy*, vol. 287, p. 129646, 2024.
- s. Geeri *et al.*, “investigation of flow behaviour in the *nozzle* of a pelton wheel: effects and analysis of influencing parameters,” *heliyon*, vol. 10, no. 8, 2024.
- b. Zoppe, c. Pellone, t. Maître, and p. Leroy, “flow analysis inside a pelton turbine bucket,” 2006.
- z. Zhang and m. Casey, “experimental studies of the jet of a pelton turbine,” *proc. Inst. Mech. Eng. Part a j. Power energy*, vol. 221, no. 8, pp. 1181–1192, 2007.
- f. A. Ishola, o. O. Kilanko, a. O. Inegbenebor, t. F. Sanni, a. A. Adalakun, and d. D. Adegoke, “design and performance analysis of a model pico size pelton wheel turbine,” *int. J. Civ. Eng. Technol.(ijciet)*, vol. 10, no. 5, pp. 727–739, 2019.
- a. D. Young, “fluid mechanics. By victor l. Streeter . Mcgraw-hill, 1962. 555pp. 69s. 6d. Mechanics of fluids. By irving h. Shames. Mcgraw-hill, 1962. 555 pp. 69s. 6d. Essentials of engineering fluid mechanics. By reuben m. Olson. International textbook co., 1961. 404 pp. \$10.50.,” *j. Fluid mech.*, vol. 15, no. 4, pp. 632–634, 1963.
- l. B. Leopold, m. G. Wolman, j. P. Miller, m. C. Flemings, and m.-h. Education, “fluid dynamics in engineering,” *princ. Fluid dyn.*, p. 27, 2025.
- a. H. Chaudhari, g. C. Chaudhari, and o. S. Bharti, “performance of pelton turbine using ansys mechanical apdl: modal analysis,” *proc. Inst. Mech. Eng. Part e j. Process mech. Eng.*, p. 09544089251334186, 2025.
- z. Zhu, q. Ke, and x. Su, “comparative analysis of pelton turbine internal flow fields using the smoothed particle hydrodynamics method and the volume of fluid method with experimental validation,” *renew. Energy*, p. 123828, 2025.
- y.-j. Chen, m.-c. Hsieh, and g.-y. Huang, “design and field testing of pelton turbine blades for small-scale hydropower generation in high and low head flow environments,” in *international conference on renewable and clean energy*, springer, 2025, pp. 29–36.
- r. S. Amano and w. W. Peng, *fundamentals of turbomachinery: theory and applications*. John wiley & sons, 2025.
- f. Khan, a. Kumar, and t. Staubli, “numerical investigation of turbulent flow in pelton turbine injector and jet quality,” *proc. Inst. Mech. Eng. Part a j. Power energy*, p. 09576509251372753, 2025.
- d. Adanta, d. P. Sari, i. Syofii, m. R. Ramadhan, a. Arifin, and a. Fudholi, “optimization of pico-scale turgo turbines for rural electrification: design, performance, and applications in decentralized energy systems,” *e-prime-*

- advances electr. Eng. Electron. Energy*, p. 101127, 2025.
- t. Guo, h.-y. Wang, and z.-m. Luo, “analysis of internal flow characteristics and loss mechanism of pelton turbine’s water supply component,” *renew. Energy*, vol. 248, p. 123135, 2025.
- h. N. Lakdawala, v. K. Patel, g. P. Bakhru, and d. N. Modi, “performance optimization of low-head vertical axis impulse turbine runners for *nozzle* angle, *nozzle* diameter, and *nozzle* standoff distance using response surface methodology,” *j. Therm. Eng.*, vol. 11, no. 5, pp. 1392–1419, 2025.
- k. Shahverdi and r. Berndtsson, “hydrostatic pressure wheel in water distribution systems,” *sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 37032, 2025.
- h. Lakdawala, v. Patel, d. Modi, and g. Bakhru, “experimental and response surface methodology-based optimization of 3d-printed impulse turbine buckets for small hydro applications,” *larhyss j. P-issn 1112-3680/e-issn 2521-9782*, no. 61, pp. 189–215, 2025.
- y. X. Liu *et al.*, “investigation of the effects of the jet impingement angle on torque generation at the suction surface of a pelton turbine bucket,” *j. Appl. Fluid mech.*, vol. 18, no. 10, pp. 2535–2549, 2025.