Volume 10 Nomor 2 Oktober 2026
E-ISSN : 2598-6198

Optimasi Jarak Nozzle dan Debit Air terhadap Daya Poros dan Efisiensi Turbin Pelton Skala Laboratorium

Khoirul Anam[1]*, Ghoni Musyahar
[1] Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Pekajangan Pekalongan, Indonesia
*email: khoirulanam@umpp.ac.id
DOI : 10.48144/suryateknika.v10i2.2590

Received: 9 Oktober 2026 Revised: 30 Oktober 2026 Accepted: 31 Oktober 2026

Abstract
The Pelton turbine is an impulse-type hydro turbine widely applied in Micro Hydro Power Plants (MHPP) due to its simple construction and high flexibility across various heads. Two crucial parameters dictating the momentum transfer effectiveness from the water jet to the runner buckets are the nozzle-to-bucket distance and the volumetric water discharge. This experimental study aims to investigate the interactive effects of nozzle distance (20, 40, 60, 80, and 100 mm) and water discharge (1.5, 2.0, and 2.5 L/s) on the shaft power and mechanical efficiency of an 18-bucket Pelton turbine under a constant head of 5 meters. Shaft power was evaluated via rotational speed and braking torque measurements using a prony brake dynamometer, while efficiency was calculated as the ratio of shaft power to hydraulic power. The experimental results reveal that shaft power increases proportionally with water discharge. However, the nozzle distance variation exhibits a non-monotonic trend (diminishing returns), where a distance of 60 mm is identified as the optimum point across all discharge rates. The peak performance was achieved at a combined nozzle distance of 60 mm and a discharge of 2.5 L/s, generating a maximum shaft power of 77.3 W and a peak efficiency of 63.0%. These findings confirm the strong interactive effect between nozzle distance and water discharge, suggesting that the design and commissioning of Pelton turbine units for MHPP applications must optimize both parameters simultaneously to minimize jet energy dissipation.

Keywords: *Pelton turbine; nozzle distance; shaft power; mechanical efficiency; MHPP.*

Abstrak
Turbin Pelton merupakan salah satu jenis turbin air impuls yang banyak diaplikasikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) karena konstruksinya yang sederhana dan fleksibilitasnya terhadap variasi *head*. Dua parameter krusial yang menentukan efektivitas transfer momentum dari pancaran air ke sudu turbin adalah jarak antara ujung *nozzle* dengan sudu dan laju debit air. Penelitian eksperimental ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh interaksi antara jarak *nozzle* (20, 40, 60, 80, dan 100 mm) dan debit air (1,5; 2,0; dan 2,5 L/s) terhadap daya poros dan efisiensi mekanis turbin Pelton (18 sudu) pada *head* konstan 5 meter. Daya poros dievaluasi melalui pengukuran putaran dan torsi pengereman menggunakan dinamometer *prony brake*, sementara efisiensi dikalkulasi sebagai rasio daya poros terhadap daya hidrolis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya poros meningkat secara proporsional seiring dengan penambahan debit air. Namun, variasi jarak *nozzle* menunjukkan tren non-monotonik (*diminishing returns*), di mana jarak 60 mm teridentifikasi sebagai titik optimum untuk seluruh variasi debit. Performa puncak tercapai pada kombinasi jarak *nozzle* 60 mm dan debit 2,5 L/s, yang menghasilkan daya poros tertinggi sebesar 77,3 W dengan efisiensi maksimum 63,0%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa jarak *nozzle* dan debit air memiliki efek interaktif yang kuat, sehingga perancangan dan komisioning unit turbin Pelton untuk aplikasi PLTMH harus mengoptimalkan kedua parameter tersebut secara simultan untuk meminimalkan disipasi energi pancaran.
Kata kunci: *Turbin Pelton; jarak nozzle; daya poros; efisiensi termal; PLTMH*

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik global dan nasional terus mengalami eskalasi yang signifikan seiring dengan pertumbuhan demografi dan masifnya industrialisasi [1]. Ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil tidak hanya memicu penipisan cadangan energi konvensional, tetapi juga memperburuk emisi gas rumah kaca dan krisis iklim [2]. Menghadapi urgensi tersebut, transisi menuju sumber energi terbarukan menjadi keharusan absolut. Salah satu solusi yang paling menjanjikan untuk elektrifikasi daerah pedesaan dan terpencil adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) [3]. PLTMH memanfaatkan potensi aliran permukaan seperti sungai kecil atau saluran irigasi dengan keunggulan berupa biaya investasi yang relatif rendah, operasional yang ramah lingkungan, serta teknologi yang mudah diadaptasi oleh masyarakat lokal [4].

Dalam aplikasi PLTMH dengan karakteristik *head* (tinggi jatuh air) menengah hingga tinggi, turbin Pelton merupakan pilihan utama karena efisiensinya yang sangat baik pada beban parsial dan konstruksinya yang andal [5], [6]. Sebagai turbin tipe impuls, prinsip kerja turbin Pelton bertumpu pada konversi energi potensial hidrolis menjadi energi kinetik berkecepatan tinggi melalui *nozzle* [7]. Pancaran air (*water jet*) ini kemudian menumbuk mangkuk ganda (*buckets*) pada *runner*, memfasilitasi transfer momentum yang menghasilkan daya poros [8]. Secara termodinamika dan mekanika fluida, performa turbin Pelton sangat sensitif terhadap berbagai parameter desain dan operasional, meliputi rasio diameter *runner* terhadap pancaran air, desain aerodinamika sudu, serta karakteristik aliran dari *nozzle* [9], [10].

Berbagai studi eksperimental dan numerik telah dilakukan untuk mengoptimasi performa turbin Pelton. Ubaidillah [11] mengkaji interaksi antara diameter *nozzle* dan debit air, menyimpulkan bahwa daya turbin berbanding lurus dengan peningkatan debit pada berbagai variasi *nozzle*. Dari sisi geometri komponen, modifikasi bentuk sudu dan rasio ketinggian mangkuk terbukti memengaruhi dinamika percikan air (*splashing*) yang berdampak pada efisiensi hidrolis [12]–[14]. Selain faktor geometri turbin, dinamika fluida dari pancaran air yang keluar dari *nozzle* juga memegang peranan krusial. Jarak antara ujung *nozzle* dengan sudu turbin menentukan tingkat koherensi pancaran air sebelum menumbuk titik potong (*splitter*) pada sudu [15]. Pada jarak yang terlalu dekat, pancaran air cenderung mengalami turbulensi tinggi, sedangkan pada jarak yang terlalu jauh, interaksi gesekan dengan udara menyebabkan terjadinya dispersi (pelebaran penampang pancaran) yang memicu disipasi energi kinetik [16].

Penelitian mengenai jarak *nozzle* telah diinisiasi secara parsial oleh beberapa peneliti. Ismail [17] dan Aditama dkk. [18] secara terpisah mengonfirmasi bahwa terdapat jarak semprot optimum yang menghasilkan daya maksimal, mengindikasikan adanya fenomena *diminishing returns* apabila posisi *nozzle* diletakkan pada jarak ekstrem (terlalu dekat atau terlalu jauh). Fathony [19] juga melaporkan pola serupa pada pengujian torsi dengan variasi jarak *nozzle* dan sudut poros. Namun, tinjauan literatur yang komprehensif menunjukkan adanya kesenjangan (*research gap*): kajian mengenai jarak *nozzle* umumnya hanya dievaluasi pada satu kondisi aliran atau satu tingkat debit yang statis. Padahal, fluktuasi debit air akan secara langsung memengaruhi profil kecepatan jet dan pola pelebaran pancaran (*jet expansion*), yang secara teoretis akan menggeser titik jarak *nozzle* optimum.

Mengacu pada kesenjangan literatur tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi secara eksperimental efek interaktif antara variasi jarak *nozzle* dan laju debit air terhadap luaran daya poros dan efisiensi mekanis turbin Pelton skala laboratorium. Hasil analisis ini diharapkan dapat melengkapi kekosongan literatur terkait dinamika jarak *nozzle* dinamis, sekaligus memberikan panduan praktis yang presisi bagi teknisi dan perancang dalam melakukan komisioning PLTMH guna meminimalkan kerugian momentum fluida.

2. Metode

Penelitian ini mengaplikasikan desain eksperimental kuantitatif menggunakan instalasi pengujian (*test rig*) turbin Pelton berskala laboratorium dengan konfigurasi poros horizontal. *Runner* turbin dirancang dengan diameter luar 200 mm dan diintegrasikan dengan 18 buah sudu (*buckets*) bertipe mangkuk ganda. Sistem pancaran fluida menggunakan sebuah *nozzle* tunggal berdiameter 10 mm yang diposisikan pada mekanisme dudukan geser (*sliding mounting*). Mekanisme ini memungkinkan penyesuaian jarak aksial secara presisi antara ujung *nozzle* dan titik potong (*splitter*) pada sudu. Fluida kerja disuplai dari reservoir penampung menggunakan pompa sentrifugal yang dijaga pada *head* statis konstan sebesar 5 meter.

Variabel independen (bebas) yang dianalisis dalam studi ini mencakup jarak *nozzle* dan laju debit air. Jarak *nozzle* divariasikan pada lima interval terukur, yaitu 20, 40, 60, 80, dan 100 mm, yang dikalibrasi dari titik ujung *nozzle* menuju bidang sudu terdekat pada kondisi statis. Sementara itu, laju debit air disetel pada tiga tingkatan operasi, yakni 1,5; 2,0; dan 2,5 L/s. Pengendalian debit dilakukan secara presisi menggunakan katup kontrol (*gate valve*) dan divalidasi pembacaannya secara langsung (*real-time*) melalui instrumen *flow meter* digital. Guna meminimalisasi galat acak (*random error*) dan menjaga reliabilitas data, setiap skenario kombinasi pengujian diulang sebanyak tiga kali (triplo), di mana nilai rata-rata dari iterasi tersebut digunakan sebagai data acuan analitik.

Parameter dependen yang dievaluasi mencakup putaran poros aktual (rpm), torsi pengereman, daya poros keluaran, dan efisiensi mekanis sistem. Kecepatan putar poros diakuisisi menggunakan takometer digital berbasis optik (non-kontak), sedangkan torsi mekanis dievaluasi menggunakan dinamometer tipe *prony brake* yang dihubungkan secara mekanis ke neraca pegas. Pada tahap pengambilan data, pembebanan pengereman ditingkatkan secara bertahap (inkremental) seraya mencatat putaran dan gaya pengereman hingga sistem mencapai titik daya poros maksimum sesaat sebelum putaran turbin terhenti sepenuhnya.

Kinerja termomekanis dan hidrolis sistem dievaluasi melalui serangkaian kalkulasi matematis. Daya hidrolis (P_h), yang merepresentasikan total energi input dari aliran air, dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

daya hidrolis (W), ρ merupakan massa jenis fluida air (kg/m^3), g adalah konstanta percepatan gravitasi (m/s^2), Q melambangkan debit aliran volumetrik (m^3/s) dan H adalah *head* efektif sistem (m).

Daya poros (P_s) , yang merepresentasikan energi mekanis aktual yang berhasil dikonversi oleh *runner*, diformulasikan pada Persamaan (2):

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

dengan (P_s) sebagai daya poros mekanis (W), N menunjukkan putaran poros aktual (rpm), dan T merupakan torsi pengereman hasil pengukuran (N . m).

Efisiensi mekanis η keseluruhan sistem turbin, yang merupakan metrik utama dari efektivitas desain, dihitung sebagai rasio persentase antara daya poros keluaran terhadap daya hidrolis masukan melalui Persamaan (3):

$$\eta = \left(\frac{P_s}{P_h}\right) \times 100\% \quad (3)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian

Pengujian performa turbin Pelton dievaluasi berdasarkan dua indikator utama, yakni daya poros aktual dan efisiensi mekanis, pada berbagai kombinasi jarak *nozzle* dan laju debit air. Ringkasan data hasil pengukuran daya poros dan kalkulasi efisiensi disajikan berturut-turut pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1
Hasil Pengujian Daya Poros Turbin Pelton pada *Head* 5 Meter

Jarak Nozzle (mm)	Q = 1,5 L/s (W)	Q = 2,0 L/s (W)	Q = 2,5 L/s (W)
20	28,5	42,3	55,1
40	34,2	50,7	66,4
60	39,8	58,9	77,3
80	35,6	52,4	68,9
100	30,1	44,6	58,0

Tabel 2
Hasil Pengujian Efisiensi Mekanis Turbin Pelton pada *Head* 5 Meter

Jarak Nozzle (mm)	Q = 1,5 L/s (%)	Q = 2,0 L/s (%)	Q = 2,5 L/s (%)
20	38,7	43,1	44,9
40	46,5	51,7	54,2
60	54,1	60,0	63,0
80	48,4	53,4	56,2
100	40,9	45,5	47,3

Berdasarkan data kuantitatif di atas, teridentifikasi dua pola kecenderungan utama. Pertama, pada jarak *nozzle* yang konstan, luaran daya poros mengalami eskalasi yang sebanding dengan penambahan laju debit air. Kedua, baik daya poros maupun efisiensi mekanis menunjukkan tren non-monotonik (berbentuk kurva parabolik) terhadap variasi jarak *nozzle*. Performa tidak terus meningkat atau menurun secara linear, melainkan mencapai titik akumulasi maksimum secara konsisten pada jarak *nozzle* 60 mm untuk setiap variasi debit. Kinerja absolut tertinggi tercatat pada kombinasi jarak *nozzle* 60 mm dengan suplai debit maksimum (2,5 L/s), yang mampu membangkitkan daya poros sebesar 77,3 W dengan efisiensi konversi mencapai 63,0%.

3.2. Pembahasan

Peningkatan linier daya poros terhadap penambahan debit air sejalan dengan prinsip dasar mekanika fluida dan mengonfirmasi temuan studi terdahulu oleh Ubaidillah [11]. Peningkatan debit volumetrik pada *head* statis yang konstan secara langsung memperbesar pasokan daya hidrolis (Ph). Selama sistem pembebanan (torsi) pada poros disesuaikan sedemikian rupa untuk menjaga rasio kecepatan tangensial sudu terhadap kecepatan pancaran air tetap berada pada rentang optimal, energi hidrolis ekstra tersebut akan berhasil dikonversi menjadi energi kinetik rotasional (*shaft power*).

Sementara itu, fenomena non-monotonik pada variasi jarak *nozzle* membuktikan hipotesis bahwa letak injeksi fluida sangat memengaruhi koherensi pancaran air (*water jet*). Hasil ini memperkuat postulat Ismail [17] dan Aditama dkk. [18], yang juga mendeteksi keberadaan jarak semprot optimum pada titik menengah, bukan pada titik ekstrem terdekat maupun terjauh. Secara fisis, anomali penurunan efisiensi pada jarak yang terlalu dekat (20–40 mm) diakibatkan oleh pancaran fluida yang belum sepenuhnya terbentuk menjadi silinder pancaran (*jet core*) yang koheren saat menumbuk *splitter* sudu. Kondisi ini memicu turbulensi lokal dan percikan balik (*splashing*) yang mendisipasi energi.

Sebaliknya, pada jarak yang terlalu jauh (80–100 mm), pancaran fluida mengalami friksi aerodinamis yang intensif dengan udara sekitar, menyebabkan penampang pancaran melebar (terdispersi) sebelum mencapai sudu. Pelebaran ini mengakibatkan sebagian massa air luput atau tidak menumbuk mangkuk sudu pada sudut yang presisi, sehingga efektivitas transfer momentum menurun drastis. Jarak 60 mm terbukti menjadi titik kesetimbangan ideal (*sweet spot*) untuk konfigurasi turbin uji ini, di mana pancaran air telah terkonsolidasi dengan baik namun belum mengalami kerugian disipasi yang signifikan akibat gesekan udara.

Perbedaan nilai mutlak jarak optimum antara penelitian ini (60 mm) dengan literatur sebelumnya (yang bervariasi) [17]–[19] adalah hal yang logis, mengingat parameter tersebut sangat bergantung pada spesifikasi geometris sistem, seperti diameter *nozzle*, desain mangkuk sudu, dan profil tekanan operasi. Implikasi praktis dari temuan ini sangat krusial bagi perancangan sistem PLTMH: optimalisasi sistem turbin Pelton tidak dapat dilakukan secara parsial. Peningkatan debit air tanpa dibarengi dengan rekalibrasi jarak aksial *nozzle* berisiko tinggi menyebabkan inefisiensi akibat *jet dispersion*. Oleh karena itu, kedua variabel ini wajib dioptimasi secara simultan pada tahap komisioning untuk menjamin pencapaian efisiensi operasi tertinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian pengujian eksperimental dan analisis performa yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa parameter operasional jarak *nozzle* dan laju debit air memiliki efek interaktif yang sangat determinan terhadap kinerja mekanis turbin Pelton. Peningkatan suplai debit air terbukti mampu meningkatkan luaran daya poros secara proporsional. Namun, efektivitas konversi energi tersebut dibatasi oleh posisi jarak aksial *nozzle*, yang menunjukkan karakteristik non-monotonik (*diminishing returns*) dengan titik optimum pada jarak 60 mm untuk seluruh tingkat debit yang diuji. Pada jarak kritis ini, koherensi pancaran air berada pada kondisi paling ideal untuk mentransfer momentum fluida ke arah 18 sudu turbin tanpa mengalami kerugian berarti akibat turbulensi jarak dekat maupun dispersi aerodinamis jarak jauh.

Kinerja puncak sistem tervalidasi pada kombinasi jarak *nozzle* 60 mm terintegrasi dengan suplai debit 2,5 L/s, yang sukses mengekstraksi daya poros maksimum sebesar 77,3 W dengan efisiensi mekanis tertinggi 63,0%. Temuan ini memberikan implikasi praktis yang kuat bahwa dalam tahap perancangan dan komisioning unit Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), kalibrasi jarak *nozzle* mutlak harus dioptimasi secara simultan—bukan parsial—bersamaan dengan penyesuaian laju debit aliran. Untuk pengembangan riset ke depan, sangat disarankan untuk memperluas matriks pengujian dengan mengintegrasikan variasi geometri aerodinamis sudu dan dimensi penampang *nozzle* guna merekonstruksi peta karakteristik operasional turbin Pelton yang lebih komprehensif.

Referensi

[1] M. R. M. Ubaidillah, "Pengaruh Variasi Diameter Nozel dan Debit Air Terhadap Kinerja Turbin Air Pelton," *Jurnal Teknik Mesin Pendidikan (JTMP)*, vol. 9, no. 1, pp. 131–136, 2026.

[2] I. Ismail, "Pengaruh Jarak dan Posisi Nozzle Terhadap Daya Turbin Pelton," *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem (JTEP)*, vol. 5, no. 3, pp. 275–282, 2017.

[3] H. D. Aditama dan P. H. Adiwibowo, "Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Jarak Nozzle Terhadap Daya dan Efisiensi Pada Turbin Pelton," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 15-22, 2023.

[4] M. N. Fathony, "Studi Eksperimental Pengaruh Jarak Nosel dengan Sudu pada Turbin Pelton terhadap Torsi, Daya dan Efisiensi," Skripsi (S1), Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, 2023.

[5] R. F. Fagi dan P. H. Adiwibowo, "Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Rasio Ketinggian Sudu dengan Diameter Luar Turbin pada Sudu Tipe U Siku Posisi Melintang terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Pelton," *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, vol. 15, no. 2, pp. 109–114, 2025.

[6] N. Rochmat, A. Wahab, dan Margianto, "Pengaruh Variasi Jarak Nozzle Pada Model Sudu Turbin Pelton Berbahan Acrylic Terhadap Daya Turbin," *Jurnal Reka Buana*, vol. 6, no. 1, pp. 45-52, 2021.

[7] M. Židonis dan G. A. Aggidis, "Pelton turbine: Identifying the optimum number of buckets using CFD," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 28, no. 1, pp. 75-83, 2016.

[8] V. Gupta, V. Prasad, dan R. Khare, "Numerical simulation of six jet Pelton turbine model," *Energy*, vol. 104, pp. 24-32, 2016.

[9] O. Paish, "Small hydro power: technology and current status," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 6, pp. 537-556, 2002.

[10] Z. Zhang, *Pelton Turbines*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[11] A. Perrig, M. Farhat, J. L. Avellan, F. Mauri, dan T. Keck, "Numerical flow analysis in a Pelton turbine bucket," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 42-49, 2008.

[12] B. K. Kaunda, C. Z. Kimambo, dan T. K. Nielsen, "Potential of small-scale hydro power for rural electrification in Malawi," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3867-3880, 2012.

[13] C. Santolin, G. Cavazzini, G. Pavesi, G. Ardizzon, dan A. Rossetti, "Parametric investigation of a Pelton turbine runner exploring different design solutions," *Renewable Energy*, vol. 179, pp. 227-243, 2021.

[14] B. K. Singh, "Micro hydro power in India: Current status and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 2062-2070, 2009.

[15] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA Publications, 2023.

[16] B. R. Cobb dan K. V. Sharp, "Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 959-964, 2013.

[17] M. Anagnostopoulos dan D. Papantonis, "Flow modeling and runner design optimization in a pico-hydro Pelton turbine," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 182-191, 2012.

[18] C. Aricò, A. Carravetta, O. Fecarotta, dan V. Sammartano, "Micro-hydropower in water distribution networks: A review," *Water*, vol. 11, no. 12, p. 2501, 2019.

[19] J. Mack dan M. Moser, "Hydraulic optimization of a Pelton turbine," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 22, no. 1, art. 012015, 2014.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License