Rancang Bangun Pembangkit Listrik Mikrohidro Berbasis Turbin Pelton dengan Variasi Diameter Nozzle Skala Laboratorium

Harjono Saputro, Riza Muhida, Muhammad Riza, Erry Yulian T Adesta, Indra Surya, Kunarto, Bambang Pratowo, Zein Muhamad, Mulyana, Nasmalwan Usmantri

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bandar Lampung, Bandar Lampung 35143, Indonesia

Email: harjono.saputro@ubl.ac.id

Email: nasmalwan123@gmail.com

Abstrak. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan teknologi konversi energi air yang sesuai untuk pembangkit skala kecil. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji prototipe PLTMH berbasis turbin Pelton skala laboratorium dengan variasi diameter nozzle 8, 10, dan 12 mm serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap debit air, putaran turbin, dan tegangan generator. Prototipe menggunakan sistem sirkulasi tertutup yang terdiri atas pompa, perpipaan, nozzle, runner Pelton, transmisi pulley–belt, generator DC, serta sistem akuisisi data berbasis Arduino Uno. Setiap variasi nozzle diuji tiga kali dan dianalisis menggunakan nilai rata-rata. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan diameter nozzle menaikkan debit air, tetapi menurunkan putaran turbin dan tegangan keluaran. Nozzle 8 mm menghasilkan debit rata-rata 11,03 L/menit, putaran 560,00 rpm, dan tegangan 5,67 V; nozzle 10 mm menghasilkan 13,70 L/menit, 446,67 rpm, dan 4,27 V; sedangkan nozzle 12 mm menghasilkan 17,13 L/menit, 359,33 rpm, dan 3,43 V. Dengan demikian, pada kondisi pengujian prototipe ini, nozzle 8 mm memberikan performa terbaik berdasarkan putaran turbin dan tegangan generator. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik jet dan kecepatan aliran perlu dipertimbangkan bersama debit dalam pemilihan nozzle turbin Pelton.

Kata kunci : PLTMH, turbin Pelton, diameter nozzle, debit air, putaran turbin, generator DC, Arduino Uno.

1 Pendahuluan

Permintaan energi listrik terus meningkat seiring perkembangan aktivitas industri, pendidikan, rumah tangga, dan layanan publik. Ketergantungan yang masih tinggi terhadap sumber energi fosil mendorong pengembangan energi terbarukan yang lebih berkelanjutan. Energi air menjadi salah satu pilihan penting karena dapat dikonversi menjadi energi mekanik dan listrik melalui sistem turbin-generator. Pada skala kecil, PLTMH dapat menjadi alternatif pembangkitan sekaligus media pengembangan teknologi energi yang dapat diuji pada kondisi laboratorium [1], [2].

Turbin Pelton merupakan turbin impuls yang sesuai untuk kondisi head relatif tinggi dan debit relatif rendah. Energi tekanan air diubah menjadi jet berkecepatan tinggi melalui nozzle, kemudian momentum jet ditransfer ke bucket runner sehingga

menghasilkan torsi pada poros. Karena karakteristik jet sangat menentukan interaksi dengan bucket, diameter nozzle menjadi salah satu parameter desain yang memengaruhi debit, kecepatan jet, putaran runner, dan keluaran generator [3], [4].

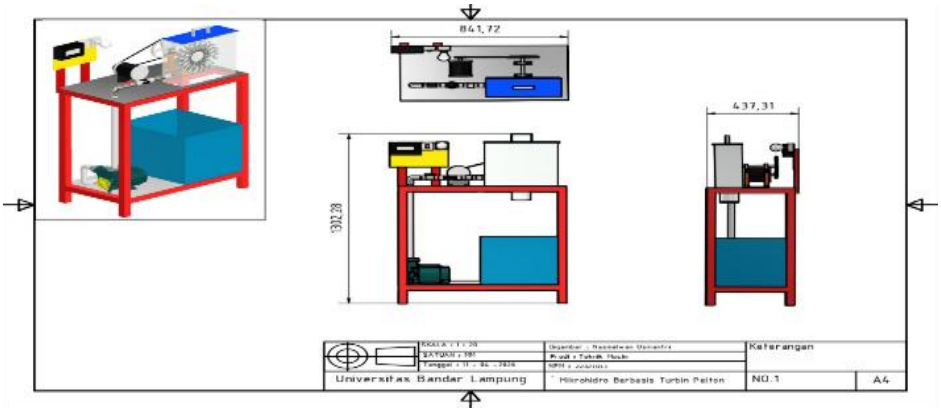
Sejumlah penelitian eksperimental menunjukkan bahwa diameter nozzle tidak selalu berkorelasi positif dengan daya turbin. Alomar et al. menunjukkan bahwa perubahan diameter jet memengaruhi kondisi hidraulik dan daya masukan sehingga konfigurasi nozzle yang lebih kecil dapat memberikan kinerja lebih baik pada kondisi tertentu [3]. Penelitian skala laboratorium lainnya juga menunjukkan bahwa variasi diameter nozzle menghasilkan perubahan pada putaran dan keluaran turbin [4], [5]. Selain diameter, ketepatan arah jet terhadap pitch circle bucket turut memengaruhi kestabilan dan efisiensi turbin [6].

Penelitian ini mengembangkan prototipe PLTMH berbasis turbin Pelton dengan sistem sirkulasi air tertutup dan tiga variasi diameter nozzle, yaitu 8, 10, dan 12 mm. Sistem dilengkapi sensor debit, sensor putaran, sensor tegangan, dan Arduino Uno untuk membantu akuisisi data. Fokus penelitian dibatasi pada hubungan diameter nozzle terhadap debit air, putaran turbin, dan tegangan generator pada kondisi operasi prototipe. Kontribusi penelitian terletak pada evaluasi eksperimental terintegrasi parameter hidraulik dan mekanik-elektrik pada prototipe yang dirancang sendiri.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1 Waktu, Tempat, dan Konsep Sistem

Perancangan, fabrikasi, perakitan, dan pengujian dilaksanakan pada Mei–Agustus 2026 di Bengkel Las Hutama Karya, Jl. Ryacudu Jalur II, Kecamatan Sukarame, Kota Bandar Lampung. Sistem menggunakan sirkulasi tertutup: air dari reservoir dipompa menuju saluran tekan, melewati valve, pressure gauge, flow sensor, dan nozzle, kemudian diarahkan ke bucket turbin Pelton. Putaran runner diteruskan melalui pulley dan belt menuju generator DC, sedangkan air dikembalikan ke reservoir.



Gambar 1. Desain prototipe PLTMH berbasis turbin Pelton.

2.2 Komponen Utama

Tabel 1. Komponen material

Komponen	Spesifikasi utama
Pompa	National EON GP-125; 125 W; head maksimum 32 m; debit maksimum 35 L/menit
Runner	Diameter disk 140 mm; 18 bucket; bucket PLA
Bucket	Lebar 60 mm; tinggi 20 mm; diameter luar 66 mm
Nozzle	Diameter 8, 10, dan 12 mm
Transmisi	Pulley–V-belt
Generator	DC magnet permanen tipe MY1016
Akuisisi	Arduino Uno; YF-S201; Hall-effect; sensor tegangan

2.3 Perancangan Geometri dan Analisis Aliran

Diameter nozzle merupakan variabel bebas, sedangkan debit air, putaran turbin, dan tegangan generator merupakan parameter respons. Luas penampang nozzle dihitung dengan persamaan:

$$A = \pi d^2/4 \quad (1)$$

Kecepatan jet teoritis ditentukan menggunakan persamaan kontinuitas:

$$Q = AV \rightarrow V = Q/A \quad (2)$$

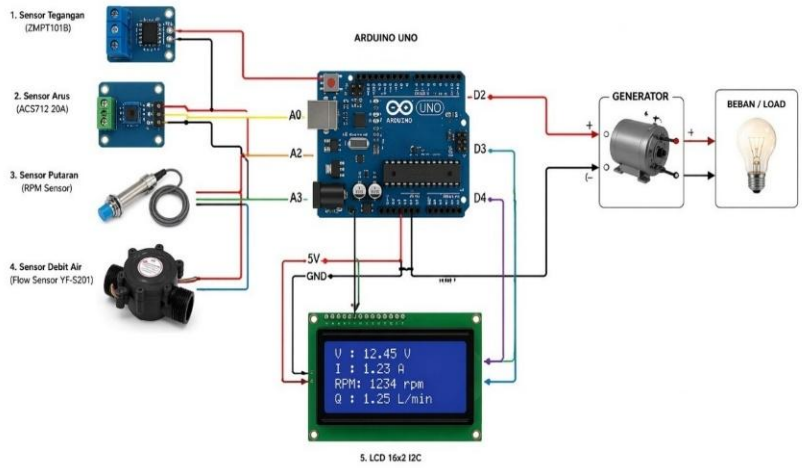
Untuk debit desain 30 L/menit atau 5×10^{-4} m³/s, kecepatan teoritis pada nozzle 8, 10, dan 12 mm berturut-turut sekitar 9,95, 6,37, dan 4,42 m/s. Perhitungan ini hanya digunakan sebagai pembanding karena debit aktual pada pengujian berbeda untuk setiap nozzle.

Tabel 2. Analisis Aliran

Diameter	Area (mm²)	V teoritis* (m/s)
8 mm	50,27	9,95
10 mm	78,54	6,37
12 mm	113,10	4,42

2.4 Sistem Transmisi

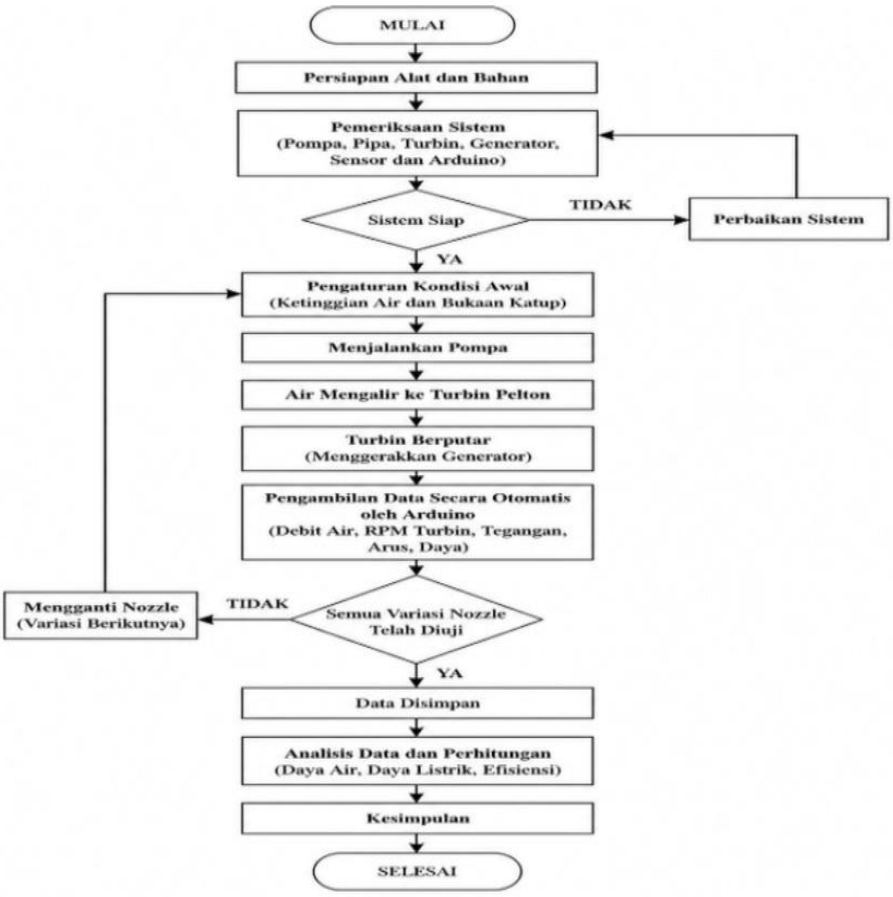
Transmisi pulley–belt digunakan untuk menaikkan putaran generator. Hubungan ideal dinyatakan $N_1/N_2 = D_2/D_1$. Naskah awal memuat ketidakkonsistenan antara diameter pulley 6 dan 1,5 inci dengan contoh perhitungan 6 dan 2 inci. Pada revisi ini spesifikasi 6 dan 1,5 inci dipertahankan sebagai desain, sedangkan estimasi putaran generator tidak dijadikan hasil eksperimen karena slip belt dan putaran aktual generator belum dilaporkan.



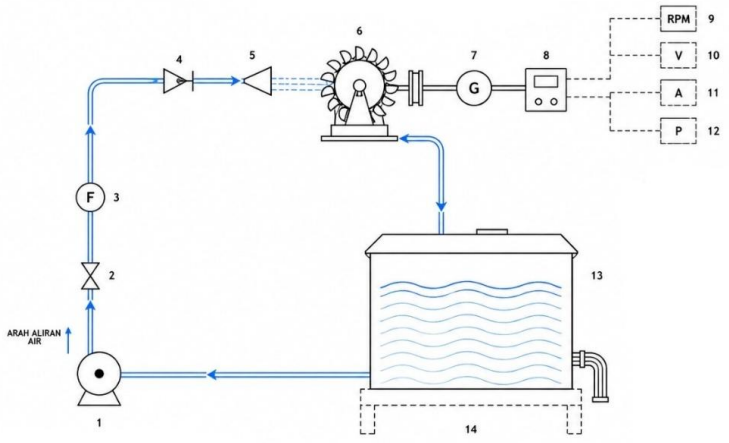
Gambar 2. Sistem kelistrikan dan akuisisi data.

2.5 Sistem Pengukuran dan Tahapan Pengujian

Pengujian dilakukan setelah seluruh sambungan mekanis, perpipaan, dan kelistrikan diperiksa. Pompa dijalankan pada kondisi operasi yang sama untuk setiap variasi nozzle hingga sistem relatif stabil. Debit direkam melalui sensor YF-S201, putaran melalui sensor Hall-effect, dan tegangan keluaran melalui sensor tegangan yang diproses Arduino Uno. Setiap diameter nozzle diuji tiga kali dan nilai rata-rata digunakan sebagai nilai representatif.



Gambar 3. Flowchart pengujian prototipe.



Gambar 4. Skema aliran sistem sirkulasi tertutup.

Analisis dilakukan dengan membandingkan kecenderungan perubahan tiga parameter utama. Karena data mentah setiap pengulangan tidak tersedia dalam naskah, simpangan baku dan uji signifikansi tidak dihitung secara artifisial. Perubahan relatif dihitung dari nilai rata-rata nozzle 8 mm sebagai kondisi pembanding.

3 Hasil dan Pembahasan

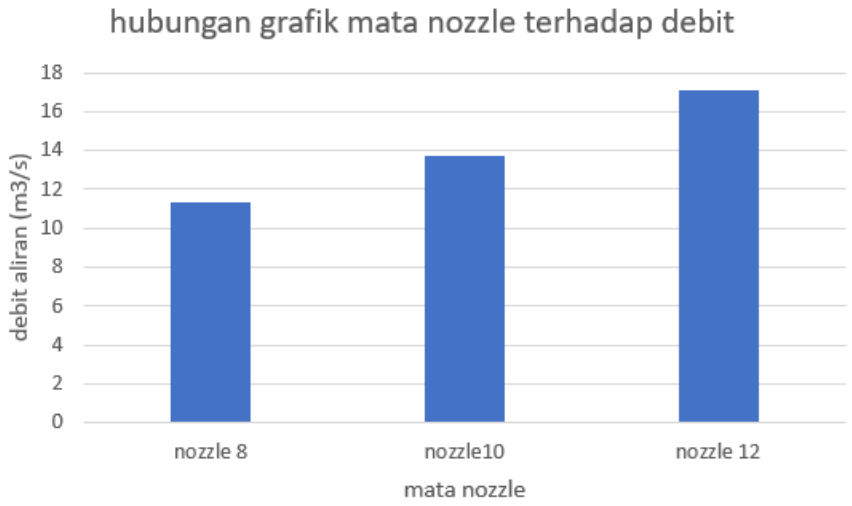
3.1 Hasil Pengujian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa diameter nozzle yang lebih besar meningkatkan debit terukur, tetapi pada konfigurasi prototipe yang sama diikuti penurunan putaran turbin dan tegangan generator.

Tabel 3. Pengujian

Diameter nozzle	Debit (L/menit)	Putaran (rpm)	Tegangan (V)
8 mm	11,03	560,00	5,67
10 mm	13,70	446,67	4,27
12 mm	17,13	359,33	3,43

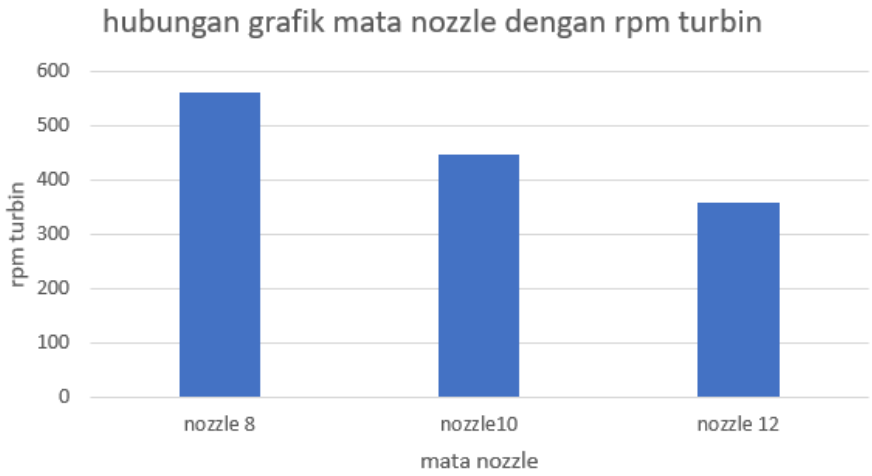
Dari nozzle 8 ke 12 mm, debit meningkat sekitar 55,3%, sedangkan putaran turun sekitar 35,8% dan tegangan turun sekitar 39,5%. Kenaikan debit tidak otomatis meningkatkan keluaran mekanik-elektrik karena transfer momentum pada turbin impuls juga ditentukan oleh karakteristik jet dan kecepatan alirannya [3]–[6].



Gambar 5. Hubungan diameter nozzle terhadap debit air.

3.2 Pengaruh Diameter Nozzle terhadap Putaran Turbin

Putaran rata-rata turun dari 560,00 rpm pada nozzle 8 mm menjadi 446,67 rpm pada nozzle 10 mm dan 359,33 rpm pada nozzle 12 mm. Pada kondisi head efektif yang tidak meningkat sebanding dengan pembesaran penampang, kecepatan jet dapat menurun ketika diameter nozzle diperbesar. Karena turbin Pelton memanfaatkan momentum jet, kondisi tersebut dapat menyebabkan transfer energi ke bucket dan putaran runner menurun [3], [6].



Gambar 6. Hubungan diameter nozzle terhadap putaran turbin.

3.3 Pengaruh Diameter Nozzle terhadap Tegangan Generator

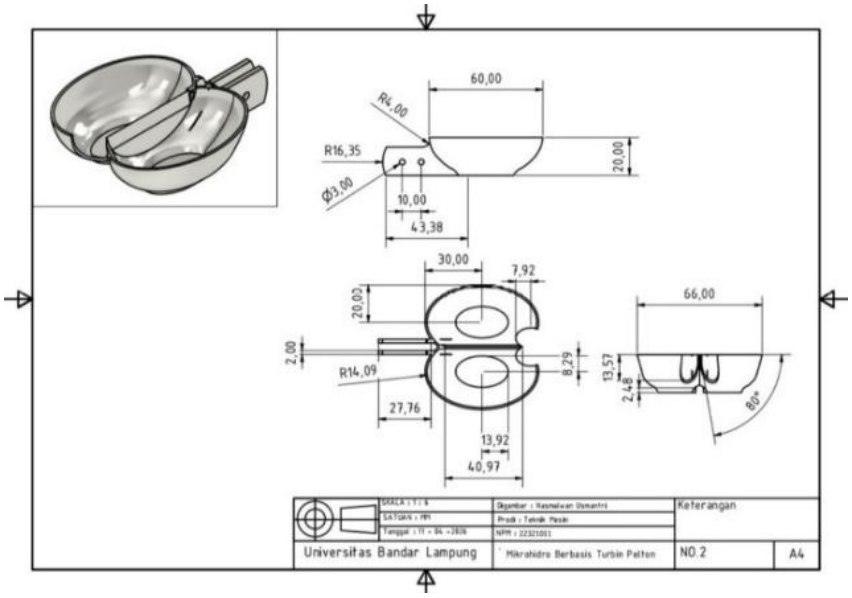
Tegangan generator mengikuti kecenderungan putaran turbin. Nilai rata-rata turun dari 5,67 V pada nozzle 8 mm menjadi 4,27 V dan 3,43 V pada nozzle 10 dan 12 mm. Tegangan generator DC dipengaruhi oleh kecepatan putar, karakteristik generator, beban, dan rugi-rugi transmisi. Oleh karena itu, nozzle 8 mm dapat disebut sebagai konfigurasi terbaik hanya untuk kondisi pengujian prototipe ini, bukan sebagai optimum universal.



Gambar 7. Hubungan diameter nozzle terhadap tegangan generator.

3.4 Evaluasi Rancangan Turbin dan Nozzle

Runner berdiameter 140 mm menggunakan 18 bucket PLA dengan lebar 60 mm dan tinggi 20 mm. Geometri tersebut dipertahankan sebagai konfigurasi eksperimen, tetapi evaluasi optimum perlu mempertimbangkan rasio diameter jet terhadap runner, jumlah bucket, sudut bucket, dan jarak nozzle terhadap runner. Studi terbaru menunjukkan bahwa ketepatan interaksi jet dengan pitch circle bucket juga berpengaruh terhadap kestabilan dan efisiensi turbin [6].



Gambar 8. Geometri bucket turbin Pelton.

Tabel 4. Evaluasi perancangan

Parameter	Spesifikasi prototipe	Evaluasi
Diameter runner	140 mm	Konfigurasi pengujian
Jumlah bucket	18 buah	Dapat dioptimalkan
Lebar bucket	60 mm	Perlu divalidasi terhadap rasio jet
Tinggi bucket	20 mm	Perlu validasi eksperi-mental
Material	PLA	Sesuai untuk prototipe

3.5 Evaluasi Perhitungan Daya

Naskah awal menghitung daya hidrolik sekitar 157 W dengan debit desain 30 L/menit dan head maksimum pompa 32 m, lalu mengestimasi daya listrik 83 W. Perhitungan tersebut tidak digunakan sebagai hasil kinerja karena head 32 m merupakan head maksimum spesifikasi, bukan head aktual saat pengujian, dan daya hidrolik teoritis tersebut bahkan melebihi daya motor pompa 125 W. Untuk menghitung efisiensi secara valid diperlukan pengukuran head efektif atau tekanan aktual, arus dan daya listrik berbeban, serta rugi-rugi transmisi.

4 Kesimpulan

Prototipe PLTMH berbasis turbin Pelton dengan sistem sirkulasi tertutup dan akuisisi data berbasis Arduino Uno berhasil dirancang dan diuji menggunakan nozzle berdiameter 8, 10, dan 12 mm. Sistem mampu menghasilkan data debit, putaran turbin, dan tegangan generator pada kondisi pengujian yang ditetapkan.

Nozzle 8 mm memberikan kombinasi terbaik untuk parameter putaran dan tegangan, yaitu debit rata-rata 11,03 L/menit, putaran 560,00 rpm, dan tegangan 5,67 V. Nozzle 12 mm menghasilkan debit tertinggi sebesar 17,13 L/menit, tetapi menghasilkan putaran 359,33 rpm dan tegangan 3,43 V.

Dengan demikian, peningkatan debit akibat pembesaran nozzle tidak otomatis meningkatkan keluaran generator. Pada konfigurasi prototipe ini, karakteristik jet dan kecepatan aliran lebih menentukan transfer energi ke runner dibandingkan debit semata.

Penelitian lanjutan perlu mengukur head efektif dan tekanan pada setiap nozzle, arus serta daya listrik berbeban, putaran poros generator, dan rugi-rugi transmisi. Data tersebut akan memungkinkan perhitungan efisiensi hidraulik, mekanik, dan elektrik secara kuantitatif serta penentuan titik operasi optimum yang lebih kuat.

5 Referensi

[1] International Energy Agency, “Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028,” IEA, Paris, France, 2023.

[2] I. D. G. N. E. Bayu, I. W. Sukerayasa, and C. G. I. Partha, “Potensi PLTMH di Bendungan Sidan, Desa Belok Sidan, Kabupaten Badung,” Jurnal SPEKTRUM, vol. 11, no. 1, pp. 138–144, 2024, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2024.v11.i01.p15.

[3] 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 Engineering Journal, vol. 13, no. 4, p. 101684, 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.101684.

[4] S. Mahardika, I. I. Widyastuti, P. N. Rahayu, and M. Ardiana, “Studi experimental skala laboratorium perbandingan desain diameter ujung nozzle laminar terhadap kinerja turbin Pelton,” MEKANIKA: Jurnal Teknik Mesin, vol. 10, no. 2, 2024, doi: 10.30996/jm.v10i2.12898.

[5] B. J. Hukom, C. L. Rantererung, and A. Kasa, “Analisa pengaruh diameter nosel terhadap kinerja turbin Pelton,” Paulus Mechanical Engineering Journal, 2024.

[6] H. Deng et al., “Nozzle jet deviation from bucket pitch circle’s effect on the stability and efficiency of Pelton turbine,” Processes, vol. 11, no. 5, p. 1342, 2023, doi: 10.3390/pr11051342.

[7] R. Rosehan et al., “Analisis aliran pada bucket turbin Pelton 1 kW dengan variasi spear nozzle menggunakan metode CFD,” Jurnal Ilmiah Teknik Mesin POROS, vol. 19, no. 1, 2023.

[8] A. Fahruddin, V. Iswidiyanto, and Iswanto, “Variations in nozzle diameter and valve opening on Pelton turbine torque and power,” R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal, vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.21070/r.e.m.v9i1.1692.

[9] A. N. Syaief et al., “The effect of nozzle pipe diameter on laboratory scale Pelton water turbine performance,” ELEMEN: Jurnal Teknik Mesin, vol. 11, no. 1, 2024, doi: 10.34128/je.v11i1.276.

[10] V. A. Kurniawan, P. Y. Pradheksa, and R. F. Saleh, “The failure of micro-hydro technology: A case study of the Banyubiru project in Central Java, Indonesia,” Renewable and Sustainable Energy Transition, vol. 5, p. 100081, 2024, doi: 10.1016/j.rset.2024.100081.