



Analisis Variasi Diameter *Nozzle* (Ø 6, Ø 7, Ø 8 mm) pada Prototipe Turbin Pelton Mikrohidro dengan Penambahan Magnet Neodymium

Diyantoro ¹, Nur Rohmat ²

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : ¹ torodiyanto75@gmail.com

Masuk: 2 Juni 2026

Direvisi: 5 Juni 2026

Disetujui: 6 Juni 2026

Abstract: This research is motivated by the need for environmentally friendly and sustainable alternative electrical energy through the utilization of Microhydro Power Plants (MHP) using Pelton turbines. Turbine performance is influenced by variations in nozzle diameter and the use of Neodymium magnets in the generator. This study aims to determine the effect of nozzle variations of Ø 6 mm, Ø 7 mm, and Ø 8 mm on the rotational speed, electrical power, and efficiency of a microhydro Pelton turbine, as well as to determine the most optimal configuration. The research methodology used was an experimental method by conducting direct testing on a laboratory-scale Pelton turbine prototype. Testing was carried out using a constant water discharge of 0.000333 m³/s under conditions without magnets and with the addition of Neodymium magnets. The analyzed parameters included turbine rotation, generator rotation, voltage, electrical power, and turbine efficiency using measuring instruments such as a tachometer, voltmeter, and wattmeter. The results showed that the Ø 6 mm nozzle without magnets produced the best performance with a turbine rotation of 209 rpm, generator rotation of 969.8 rpm, voltage of 12.4 Volts, electrical power of 4.52 Watts, and efficiency of 7.53%. Under conditions using Neodymium magnets, the Ø 8 mm nozzle produced the most stable power output of 4.34 Watts with an efficiency of 7.05%. These findings demonstrate that nozzle diameter greatly affects the performance of the Pelton turbine, while the effect of magnets is conditional on the stability of rotational speed and electrical power output.

Keywords: Pelton Turbine, Nozzle Diameter, Neodymium Magnet, Efficiency, Microhydro.

Abstrak: Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan energi listrik alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan melalui pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) menggunakan turbin Pelton. Kinerja turbin dipengaruhi oleh variasi diameter *nozzle* dan penggunaan magnet Neodymium pada generator. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi *nozzle* Ø 6 mm, Ø 7 mm, dan Ø 8 mm terhadap putaran, daya listrik, dan efisiensi turbin Pelton mikrohidro, serta menentukan konfigurasi paling optimal. Metodologi penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan melakukan pengujian langsung pada prototipe turbin Pelton skala laboratorium. Pengujian dilakukan menggunakan debit air konstan sebesar 0,000333 m³/s pada kondisi tanpa magnet dan dengan penambahan magnet Neodymium. Parameter yang dianalisis meliputi putaran turbin, putaran generator, tegangan, daya listrik, dan efisiensi turbin menggunakan alat ukur takometer, voltmeter, dan wattmeter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *nozzle* Ø 6 mm tanpa magnet menghasilkan performa terbaik dengan putaran turbin 209 rpm, putaran generator 969,8 rpm, tegangan 12,4 Volt, daya listrik 4,52 Watt, dan efisiensi 7,53%. Pada kondisi menggunakan magnet Neodymium, *nozzle* Ø 8 mm menghasilkan daya paling stabil sebesar 4,34 Watt dengan efisiensi 7,05%. Hal ini menunjukkan bahwa diameter *nozzle* sangat memengaruhi performa turbin Pelton, sedangkan pengaruh magnet bersifat kondisional terhadap kestabilan putaran dan daya listrik.

Kata kunci: Turbin Pelton, Diameter *Nozzle*, Magnet Neodymium, Efisiensi, Mikrohidro.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan industrialisasi, namun pasokan listrik di wilayah pedesaan dan perbukitan masih kerap tidak stabil akibat gangguan jaringan distribusi. Kondisi ini berdampak langsung pada terganggunya aktivitas masyarakat dan menurunkan produktivitas lokal. Di sisi lain, wilayah-

wilayah tersebut umumnya menyimpan potensi sumber daya air yang memadai untuk dikonversi menjadi energi listrik. Pengembangan energi terbarukan berbasis potensi lokal pun menjadi salah satu solusi strategis dalam mengatasi permasalahan ketenagalistrikan nasional [1].

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan teknologi yang relevan untuk menjawab tantangan tersebut. PLTMH memanfaatkan aliran air berdebit kecil hingga menengah dengan ketinggian jatuh (*head*) tertentu untuk menghasilkan energi listrik, serta memiliki keunggulan berupa operasional yang ramah lingkungan, biaya perawatan rendah, dan dapat difungsikan sebagai sumber energi cadangan ketika jaringan utama terganggu. Pihak yang dirujuk dalam [2] menegaskan bahwa PLTMH berkontribusi pada ketahanan energi nasional melalui optimasi potensi lokal, sementara [3] menekankan bahwa pemilihan lokasi, debit air, *head*, dan desain turbin merupakan faktor penentu efisiensi sistem. Meski demikian, implementasinya di lapangan masih menghadapi kendala efisiensi operasional akibat keterbatasan teknis dan masalah perawatan.

Komponen kritis yang menentukan performa PLTMH adalah turbin air. Turbin Pelton banyak digunakan pada sistem mikrohidro dengan *head* besar dan debit kecil karena prinsip impulsnya yang efisien. Kinerja turbin Pelton sangat dipengaruhi oleh diameter *nozzle*, yang menentukan kecepatan jet air dan gaya impuls pada sudu turbin sehingga berdampak langsung pada putaran, daya, dan efisiensi sistem secara keseluruhan [4]. Studi tersebut membuktikan bahwa variasi diameter *nozzle* berpengaruh signifikan terhadap performa turbin Pelton, sementara [2] mengidentifikasi adanya rasio diameter optimal yang menghasilkan daya dan efisiensi terbaik. Selanjutnya, [5] menambahkan bahwa diameter *nozzle* yang lebih besar cenderung meningkatkan daya dan torsi, meski tidak selalu berbanding lurus dengan efisiensi.

Pada sisi generator, penggunaan magnet Neodymium mulai mendapat perhatian sebagai inovasi untuk meningkatkan daya keluaran sistem. Magnet jenis ini memiliki densitas energi tinggi sehingga mampu menghasilkan medan magnet yang lebih kuat dibandingkan magnet konvensional pada ukuran yang sama. Penelitian dalam [6] mengembangkan prototipe pembangkit berbasis magnet permanen sebagai alternatif energi ramah lingkungan, dan [7] menunjukkan bahwa magnet Neodymium dapat diimplementasikan secara nyata dalam sistem pembangkitan listrik skala kecil dengan hasil yang terukur. Penambahan magnet Neodymium pada generator PLTMH berpotensi meningkatkan stabilitas putaran dan daya keluaran sistem secara keseluruhan.

Kajian yang mengintegrasikan variasi diameter *nozzle* dengan penambahan magnet Neodymium dalam satu sistem PLTMH masih sangat terbatas. Penelitian tentang turbin Pelton umumnya berfokus pada aspek mekanik, sementara studi tentang magnet Neodymium cenderung mengkaji generator secara terpisah. Kesenjangan inilah yang menjadi justifikasi utama penelitian ini. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi diameter *nozzle* ($\varnothing 6$ mm, $\varnothing 7$ mm, dan $\varnothing 8$ mm) terhadap putaran turbin, daya listrik, dan efisiensi prototipe turbin Pelton mikrohidro, baik tanpa magnet maupun dengan penambahan magnet Neodymium, serta menentukan konfigurasi paling optimal. Pertanyaan yang diajukan adalah: (1) Bagaimana pengaruh variasi diameter *nozzle* tersebut terhadap energi yang dihasilkan sistem dengan penambahan magnet Neodymium? dan (2) Diameter *nozzle* manakah yang menghasilkan kinerja dan efisiensi paling optimal? Hasil penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi empiris bagi optimasi desain PLTMH dan menjadi acuan teknis pengembangan energi terbarukan skala kecil di Indonesia.

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental (*experimental research*) yang bertujuan menganalisis pengaruh variasi diameter *nozzle* dan penambahan magnet Neodymium terhadap kinerja turbin Pelton mikrohidro. Metode eksperimen dipilih karena penelitian melibatkan manipulasi variabel bebas secara terstruktur dan terukur untuk memperoleh data aktual dari pengujian langsung pada prototipe. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pamulang, Tangerang Selatan. Variabel bebas yang dimanipulasi meliputi diameter *nozzle* ($\varnothing 6$ mm, $\varnothing 7$ mm, dan $\varnothing 8$ mm) serta kondisi perlakuan magnet, yaitu tanpa magnet dan dengan penambahan magnet Neodymium (NdFeB). Variabel terikat yang menjadi fokus pengamatan adalah putaran turbin (rpm), putaran generator (rpm), tegangan keluaran (V), daya listrik (Watt), dan efisiensi sistem (%). Seluruh skenario pengujian dilakukan pada kondisi debit air konstan sebesar $0,000333 \text{ m}^3/\text{s}$ yang dimonitor secara kontinu menggunakan *flowmeter* guna mengeliminasi pengaruh fluktuasi debit terhadap hasil pengukuran.

Objek penelitian adalah prototipe turbin Pelton mikrohidro yang terdiri dari *runner* bersudu cekung (*bucket*) berbahan sendok plastik yang diperkuat pelat besi, poros besi, *bearing*, dan sistem transmisi sabuk (*timing belt*) tipe printer dengan rasio *pulley* 5:1 yang menghubungkan poros turbin ke generator DC berkapasitas 30 Watt. Magnet Neodymium (NdFeB) dipasang pada ujung sudu turbin dengan konfigurasi polaritas tertentu untuk menghasilkan interaksi gaya tolak (*magnetic repulsion*) yang berpotensi memberikan dorongan tambahan

pada proses rotasi. Air dialirkan dari bak penampung menggunakan pompa jet, kemudian diteruskan melalui pipa PVC menuju *nozzle* yang mengonversi energi potensial air menjadi jet berkecepatan tinggi dan mengarahkannya secara langsung ke sudu *runner*. Energi mekanik yang dihasilkan turbin diteruskan ke generator melalui sistem transmisi *pulley*-sabuk, dan energi listrik yang dibangkitkan dikelola melalui *Solar Charge Controller* (SCC) sebelum disimpan ke baterai.

Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran instrumentasi secara langsung pada setiap skenario pengujian. Kecepatan putaran turbin dan generator diukur menggunakan takometer digital, tegangan diukur menggunakan voltmeter dan multitester, sedangkan daya listrik keluaran diukur menggunakan *watt indicator*. Setiap variasi *nozzle* diuji pada dua kondisi secara bergantian (tanpa magnet dan dengan magnet Neodymium) dengan lima kali pengulangan per skenario untuk meningkatkan keandalan dan konsistensi data. Seluruh data hasil pengukuran dicatat secara sistematis dalam tabel pengamatan sebagaimana disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2, sehingga diperoleh total 30 set data pengukuran sebagai basis analisis.

Tabel 1. Data Pengujian Performa Turbin Pelton tanpa Penambahan Magnet Neodymium

Variasi Nozzle (mm)	Pengujian	Debit (m ³ /s)	Putaran Turbin (rpm)	Putaran Generator (rpm)	Tegangan Generator (V)	Tegangan Beban (V)	Arus (A)	Daya (Watt)
$\varnothing 6$	1	0,000333	207	959	39,95	12,4	0,36	4,64
	2	0,000333	208	971	40,11	12,4	0,35	4,34
	3	0,000333	209	972	40,30	12,4	0,36	4,64
	4	0,000333	210	973	40,48	12,4	0,35	4,34
	5	0,000333	211	974	40,66	12,4	0,36	4,64
	Rata-rata	0,000333	209	969,8	40,30	12,4	0,35	4,52
$\varnothing 7$	1	0,000333	174	828	41,33	12,4	0,35	4,34
	2	0,000333	176	828	42,76	12,4	0,35	4,34
	3	0,000333	177	830	43,11	12,4	0,35	4,34
	4	0,000333	179	832	43,20	12,4	0,35	4,34
	5	0,000333	180	833	43,48	12,4	0,35	4,34
	Rata-rata	0,000333	177,2	830,2	42,77	12,4	0,35	4,34
$\varnothing 8$	1	0,000333	171	791	31,10	12,3	0,33	4,06
	2	0,000333	170	795	32,53	12,3	0,33	4,06
	3	0,000333	168	800	34,58	12,3	0,33	4,06
	4	0,000333	167	801	34,60	12,3	0,33	4,06
	5	0,000333	169	804	35,13	12,3	0,33	4,06
	Rata-rata	0,000333	169	798,2	33,58	12,3	0,33	4,06

Tabel 2. Data Pengujian Performa Turbin Pelton dengan Penambahan Magnet Neodymium

Variasi Nozzle (mm)	Pengujian	Debit (m ³ /s)	Putaran Turbin (rpm)	Putaran Generator (rpm)	Tegangan Generator (V)	Tegangan Beban (V)	Arus (A)	Daya (Watt)
$\varnothing 6$	1	0,000333	198	929	35,60	12,3	0,33	4,06
	2	0,000333	199	930	35,34	12,3	0,33	4,06
	3	0,000333	200	933	36,06	12,3	0,33	4,06
	4	0,000333	201	934	35,64	12,3	0,33	4,06
	5	0,000333	202	935	35,89	12,3	0,33	4,06
	Rata-rata	0,000333	200	932,2	35,70	12,3	0,33	4,06
$\varnothing 7$	1	0,000333	178	834	40,55	12,3	0,33	4,06
	2	0,000333	179	835	40,85	12,3	0,33	4,06
	3	0,000333	179	835	41,17	12,3	0,33	4,06
	4	0,000333	180	835	41,68	12,3	0,33	4,06
	5	0,000333	205	835	41,77	12,3	0,33	4,06
	Rata-rata	0,000333	184,2	834,8	41,20	12,3	0,33	4,06
$\varnothing 8$	1	0,000333	160	779	34,19	12,4	0,35	4,34
	2	0,000333	162	778	33,80	12,4	0,35	4,34
	3	0,000333	164	777	33,20	12,4	0,35	4,34
	4	0,000333	165	777	33,20	12,4	0,35	4,34
	5	0,000333	167	777	33,69	12,4	0,35	4,34
	Rata-rata	0,000333	163,6	777,6	33,61	12,4	0,35	4,34

Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan tiga persamaan perhitungan utama. Daya air yang tersedia sebagai input sistem dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$P_{air} = \rho \times g \times Q \times H \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

P_{air} = Daya air (Watt)

ρ = Massa jenis air (kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

Q = Debit aliran (m^3/s)

H = Tinggi jatuh efektif / *head* (m)

Daya listrik keluaran generator dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$P = V \times I \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

P = Daya listrik keluaran (Watt)

V = Tegangan keluaran generator (Volt)

I = Kuat arus listrik (Ampere)

Efisiensi sistem secara keseluruhan dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$\eta = \left(\frac{P}{P_{air}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

η = Efisiensi sistem (%)

P = Daya listrik keluaran (Watt)

P_{air} = Daya air yang tersedia (Watt)

Seluruh data hasil perhitungan dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk mengidentifikasi pola hubungan antara diameter *nozzle*, kondisi magnet, dan kinerja sistem. Perbandingan dilakukan secara silang (*cross-comparison*) antara kondisi tanpa magnet dan dengan magnet Neodymium pada setiap variasi *nozzle* untuk mengevaluasi pengaruh kondisional magnet terhadap stabilitas putaran dan daya keluaran. Hasil eksperimen juga dikonfirmasi dengan kajian teoritis turbin impuls dan dibandingkan dengan temuan penelitian terdahulu untuk menilai tingkat kesesuaian data eksperimental terhadap landasan teori yang berlaku. Konfigurasi optimal ditentukan berdasarkan kombinasi nilai putaran turbin, daya listrik, dan efisiensi tertinggi yang diperoleh secara konsisten pada seluruh pengulangan pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada prototipe turbin Pelton mikrohidro skala laboratorium dengan tiga variasi diameter *nozzle* ($\varnothing 6$ mm, $\varnothing 7$ mm, dan $\varnothing 8$ mm) pada debit air konstan $0,000333 \text{ m}^3/\text{s}$, masing-masing diuji dalam dua kondisi: tanpa magnet Neodymium dan dengan penambahan magnet Neodymium (NdFeB). Parameter yang dianalisis meliputi putaran turbin, putaran generator, daya listrik keluaran, dan efisiensi sistem. Rekapitulasi keseluruhan hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

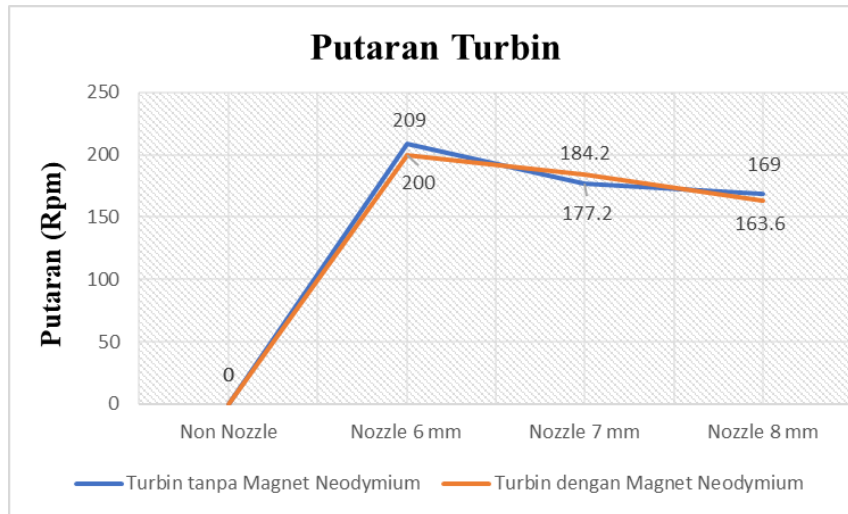
Tabel 3. Rekapitulasi Rata-rata Hasil Pengujian Performa Turbin Pelton

Variasi <i>Nozzle</i> (mm)	Kondisi	Putaran Turbin (rpm)	Putaran Generator (rpm)	Daya Listrik (Watt)	Efisiensi (%)
$\varnothing 6$	Tanpa Magnet	209,0	969,8	4,52	7,53
	Dengan Magnet	200,0	932,2	4,06	6,77
$\varnothing 7$	Tanpa Magnet	177,2	830,2	4,34	7,05
	Dengan Magnet	184,2	834,8	4,06	6,77
$\varnothing 8$	Tanpa Magnet	169,0	798,2	4,06	6,77
	Dengan Magnet	163,6	777,6	4,34	7,05

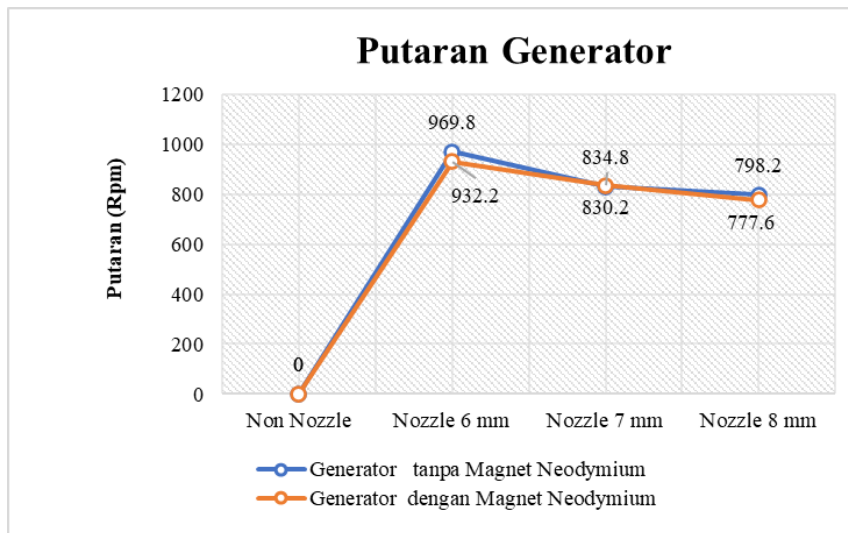
Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi diameter *nozzle* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap putaran turbin maupun putaran generator. Sebagaimana disajikan pada Tabel 3, *nozzle* $\varnothing 6$ mm tanpa magnet menghasilkan putaran turbin tertinggi sebesar 209 rpm dan putaran generator sebesar 969,8 rpm, sedangkan *nozzle* $\varnothing 8$ mm dengan magnet menghasilkan putaran terendah dengan turbin 163,6 rpm dan generator 777,6 rpm. Pola penurunan putaran yang konsisten seiring bertambahnya diameter *nozzle* ini mengonfirmasi hubungan invers antara luas penampang aliran dan kecepatan jet air pada kondisi debit konstan.

Tabel 4. Rekapitulasi Rata-rata Putaran Turbin dan Generator

Variasi Nozzle (mm)	Turbin Tanpa Magnet (rpm)	Turbin Dengan Magnet (rpm)	Generator Tanpa Magnet (rpm)	Generator Dengan Magnet (rpm)
$\varnothing 6$	209,0	200,0	969,8	932,2
$\varnothing 7$	177,2	184,2	830,2	834,8
$\varnothing 8$	169,0	163,6	798,2	777,6



Gambar 1. Grafik Rata-rata Putaran Turbin pada Setiap Variasi Nozzle



Gambar 2. Grafik Rata-rata Putaran Generator pada Setiap Variasi Nozzle

Secara fisis, fenomena ini dapat dijelaskan melalui persamaan kontinuitas (Persamaan 4).

$$Q = A \times v \dots\dots\dots (4)$$

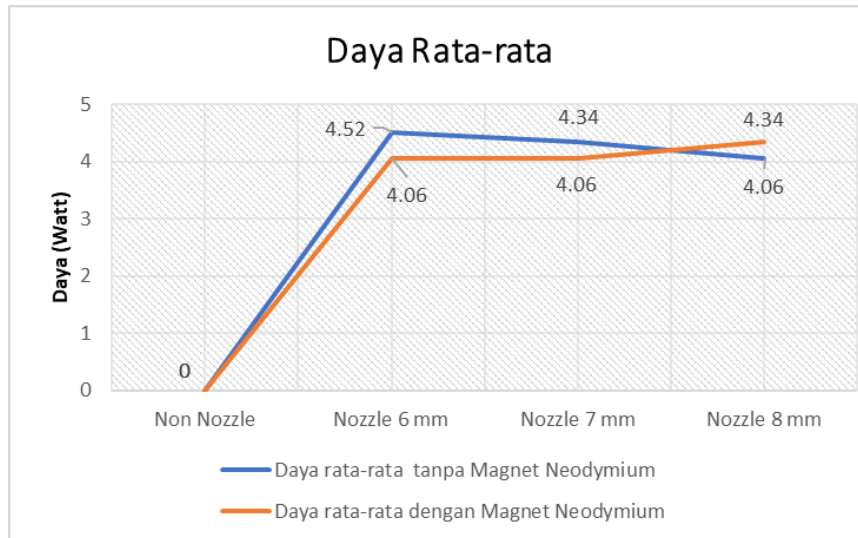
Pada debit konstan, pengurangan luas penampang *nozzle* (A) akan meningkatkan kecepatan jet (v) secara proporsional. Kecepatan jet yang lebih tinggi menghasilkan energi kinetik per satuan massa yang lebih besar, sehingga gaya impuls yang bekerja pada sudu turbin meningkat dan menghasilkan putaran yang lebih tinggi. Hasil ini selaras dengan temuan Iswidiyanto dkk. [5] yang membuktikan bahwa *nozzle* berdiameter lebih kecil secara konsisten menghasilkan putaran turbin yang lebih tinggi, serta rujukan pada [3] dan [4] yang menyatakan bahwa variasi diameter *nozzle* berpengaruh signifikan terhadap performa turbin Pelton.

Temuan penting yang perlu dicermati adalah perilaku anomali pada kondisi dengan magnet Neodymium untuk variasi *nozzle* $\varnothing 7$ mm, di mana putaran turbin justru sedikit lebih tinggi (184,2 rpm) dibandingkan kondisi tanpa magnet (177,2 rpm). Hal ini mengindikasikan bahwa pada rentang putaran menengah tertentu, interaksi medan magnet pada sudu turbin tidak hanya berfungsi sebagai beban, tetapi juga berpotensi memberikan kontribusi gaya dorong (*magnetic repulsion*) yang membantu rotasi. Fenomena ini membuka ruang investigasi lebih lanjut mengenai titik operasi optimal di mana kontribusi magnet bersifat aditif terhadap energi kinetik air.

Analisis daya listrik keluaran memperlihatkan pola yang secara umum konsisten dengan tren putaran, namun dengan dinamika yang lebih kompleks akibat interaksi magnet Neodymium. Tabel 5 menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa magnet, daya rata-rata tertinggi dihasilkan oleh *nozzle* $\varnothing 6$ mm sebesar 4,52 Watt dan menurun secara bertahap ke *nozzle* $\varnothing 7$ mm (4,34 Watt) dan $\varnothing 8$ mm (4,06 Watt). Pola ini mencerminkan bahwa pada kondisi tanpa gangguan eksternal, peningkatan kecepatan jet berbanding lurus dengan peningkatan daya keluaran.

Tabel 5. Daya Listrik Rata-rata pada Setiap Variasi *Nozzle*

Variasi <i>Nozzle</i> (mm)	Daya Tanpa Magnet (Watt)	Daya Dengan Magnet (Watt)
$\varnothing 6$	4,52	4,06
$\varnothing 7$	4,34	4,06
$\varnothing 8$	4,06	4,34

Gambar 3. Grafik Daya Rata-rata pada Setiap Variasi *Nozzle*

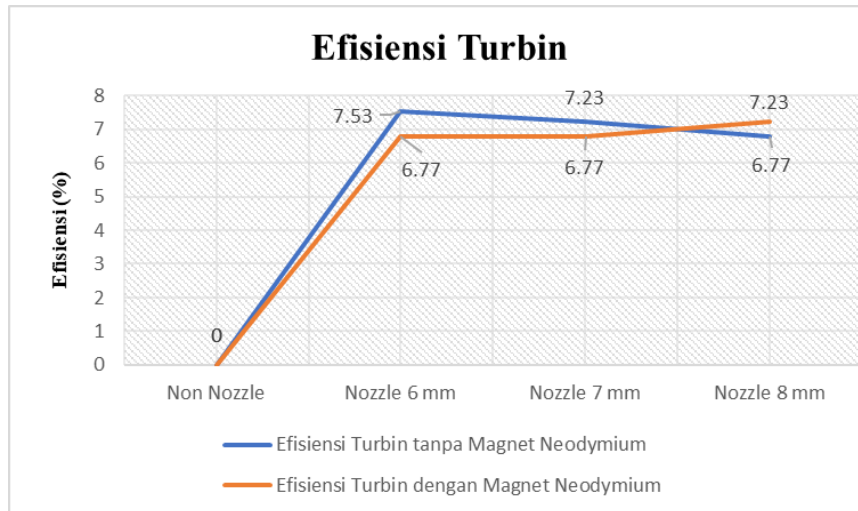
Temuan yang secara akademik paling signifikan dalam aspek daya adalah peningkatan daya pada kondisi dengan magnet Neodymium untuk *nozzle* $\varnothing 8$ mm, dari 4,06 Watt (tanpa magnet) menjadi 4,34 Watt (dengan magnet). Ini merupakan satu-satunya variasi di mana penambahan magnet secara nyata meningkatkan daya keluaran. Fenomena ini menunjukkan adanya interaksi yang bersifat kondisional antara kecepatan putaran dan efektivitas magnet: pada putaran rendah yang terjadi akibat diameter *nozzle* besar, gaya tolak medan magnet (*magnetic repulsion*) memberikan kontribusi gaya tambahan yang mampu mengimbangi rugi-rugi mekanis, sehingga konversi energi pada generator menjadi lebih efisien.

Nilai daya yang masih relatif rendah (4,06–4,52 Watt) dibandingkan daya air input sebesar 60 Watt menunjukkan rugi-rugi energi (*losses*) yang signifikan pada sistem. Sumber rugi-rugi ini mencakup gesekan mekanis pada *bearing* dan sistem transmisi sabuk, ketidaksempurnaan desain sudu prototipe berbahan sendok plastik, serta beban induktif pada generator DC skala kecil. Kondisi ini sejalan dengan argumentasi dalam [2] bahwa efisiensi tinggi pada turbin Pelton hanya dapat dicapai ketika rasio kecepatan sudu terhadap kecepatan jet berada pada rentang optimum 0,46–0,48, suatu kondisi yang sulit dipenuhi secara presisi pada prototipe skala laboratorium.

Tabel 6. Efisiensi Turbin pada Setiap Variasi *Nozzle*

Variasi <i>Nozzle</i> (mm)	Efisiensi Tanpa Magnet (%)	Efisiensi Dengan Magnet (%)
$\varnothing 6$	7,53	6,77
$\varnothing 7$	7,05	6,77
$\varnothing 8$	6,77	7,05

Efisiensi sistem merupakan parameter integratif yang paling representatif dalam menilai kinerja keseluruhan PLTMH. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6, efisiensi tertinggi sebesar 7,53% diperoleh pada konfigurasi *nozzle* $\varnothing 6$ mm tanpa magnet, sementara efisiensi terendah sebesar 6,77% terjadi pada *nozzle* $\varnothing 8$ mm tanpa magnet serta pada *nozzle* $\varnothing 6$ mm dan $\varnothing 7$ mm dengan magnet. Rentang efisiensi yang sempit (6,77%–7,53%) mencerminkan bahwa rugi-rugi energi pada sistem prototipe ini bersifat dominan dan relatif konstan, sehingga variasi diameter *nozzle* tidak menghasilkan perbedaan efisiensi yang dramatis.



Gambar 4. Grafik Efisiensi Turbin pada Setiap Variasi Nozzle

Aspek paling menarik dari data efisiensi adalah pembalikan tren (*crossover*) yang terjadi saat magnet Neodymium ditambahkan pada nozzle $\varnothing 8$ mm. Efisiensi meningkat dari 6,77% (tanpa magnet) menjadi 7,05% (dengan magnet), sedangkan pola sebaliknya terjadi pada nozzle $\varnothing 6$ mm di mana efisiensi justru turun dari 7,53% menjadi 6,77% saat magnet dipasang. Pola *crossover* ini secara akademik mengindikasikan bahwa terdapat ambang batas kecepatan putaran tertentu di mana peran magnet berubah dari penghambat (*drag*) menjadi penguat (*booster*). Pada kecepatan tinggi (nozzle $\varnothing 6$ mm, 209 rpm), beban magnetik lebih dominan dibandingkan gaya dorong yang dihasilkan. Sebaliknya, pada putaran rendah (nozzle $\varnothing 8$ mm, 169 rpm), gaya tolak magnet mampu memberikan kontribusi positif yang melebihi beban yang ditimbulkannya.

Temuan ini memiliki korelasi teoritis dengan penelitian dalam [7] dan [8] yang menggarisbawahi bahwa efektivitas magnet permanen dalam sistem pembangkit listrik sangat dipengaruhi oleh konfigurasi, posisi, dan kecepatan operasional. Kontribusi akademik penelitian ini terletak pada identifikasi fenomena *speed-dependent magnetic contribution* pada turbin Pelton skala mikro, suatu temuan yang belum secara eksplisit diulas dalam literatur yang ada. Secara praktis, temuan ini menyarankan bahwa optimasi magnet Neodymium pada PLTMH seharusnya disesuaikan dengan karakteristik operasi debit dan *head* spesifik lokasi, bukan diterapkan secara generik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh variasi diameter *nozzle* dan penggunaan magnet Neodymium terhadap kinerja turbin Pelton mikrohidro, dapat disimpulkan bahwa variasi diameter *nozzle* ($\varnothing 6$ mm, $\varnothing 7$ mm, dan $\varnothing 8$ mm) berpengaruh signifikan terhadap energi yang dihasilkan sistem. Pada debit air konstan $0,000333 \text{ m}^3/\text{s}$, konfigurasi *nozzle* $\varnothing 6$ mm tanpa magnet merupakan kondisi yang paling optimal karena menghasilkan kombinasi performa tertinggi dengan putaran turbin sebesar 209 rpm, putaran generator sebesar 969,8 rpm, daya listrik sebesar 4,52 Watt, dan efisiensi sebesar 7,53%. Peningkatan kecepatan jet air akibat penggunaan diameter *nozzle* yang lebih kecil ini memberikan pengaruh yang jauh lebih dominan terhadap performa turbin dibandingkan kontribusi gaya magnetik. Sementara itu, penggunaan magnet Neodymium memberikan pengaruh yang bersifat kondisional (*speed-dependent*) terhadap karakteristik aliran dan putaran sistem. Pada putaran rendah dengan konfigurasi *nozzle* $\varnothing 8$ mm, penambahan magnet secara nyata mampu meningkatkan daya listrik dari 4,06 Watt menjadi 4,34 Watt serta menaikkan efisiensi dari 6,77% menjadi 7,05% karena gaya tolaknya (*magnetic repulsion*) memberikan kontribusi positif yang mengurangi rugi-rugi mekanis. Sebaliknya, pada putaran tinggi (nozzle $\varnothing 6$ mm), penggunaan magnet justru bertindak sebagai penghambat (*drag*) yang menurunkan nilai efisiensi dari 7,53% menjadi 6,77% karena beban magnetik yang ditimbulkan lebih dominan daripada gaya dorongnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Afif, B. H. Syahputra, and S. Alfarissi, "Analyzing The Role of Micro Hydro in Overcoming the Electricity Supply Crisis," *Indones. J. Electr. Eng. Renew. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 29–38, Jun. 2025.
- [2] M. F. H. Ramadhani and P. H. Adiwibowo, "Studi Eksperimental Optimasi Variasi Rasio Diameter Nozzle terhadap Daya dan Efisiensi pada Turbin Pelton," *JTM J. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 01, pp. 25–32, 2024.

- [3] M. Hadi, Afrianto, and I. Syaukani, "Perencanaan dan Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia : Tinjauan Literatur," *Impr. J. Teknol. dan Inf.*, vol. 4, no. 2, pp. 258–270, 2025.
- [4] A. A. M. Purnama, S. Borahima, M. Syahrir, and S. Yunus, "Analisis Pengaruh Perubahan Diameter Nosel Terhadap Prestasi Turbin Pelton," *J. Innov. Res. Knowl.*, vol. 4, no. 11, pp. 8737–8752, 2025.
- [5] V. Iswidiyanto, A. Fahrudin, and Iswanto, "Variations in Nozzle Diameter and Valve Opening on Pelton Turbine Torque and Power," *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) J.*, vol. 9, no. 1, pp. 29–34, 2024.
- [6] F. S. Hidayat, Fauzan, and Sabina, "Pembuatan Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Magnetik Berbahan Dasar Sederhana sebagai Upaya Terobosan Energi Ramah Lingkungan dalam Menggantikan PLTU di Indonesia," Surabaya, 2022. doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23870.66888>.
- [7] Deviany *et al.*, "Sistem Lahan Basah Buatan Terintegrasi Tenaga Mikrohidro untuk Pengolahan Air Limbah Kampung Batik Pasundan," *J. Integr. Proses*, vol. 14, no. 1, pp. 57–65, 2025, doi: <https://dx.doi.org/10.62870/jip.v14i1.29324>.
- [8] Y. Ambabunga, H. Masiku, and H. Jumar, "Studi Rancang Bangun Pembangkit Listrik Energi Alternatif Tenaga Magnet Menggunakan Roda Gila (Flywheel)," *Syntax Lit. J. Ilm. Indones.*, vol. 7, no. 11, pp. 15540–15548, 2022.