

## Analysis Of The Effect Of Penstock Diameter Variation And Nozzle Flow Velocity On Pelton Turbine Performance Using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Revaldo Nur Hidayat<sup>1\*</sup>, Randi Purnama Putra<sup>2</sup>, Yolli Fernanda<sup>3</sup>, Fitriah Qalbina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

\*Corresponding author: [Hidayat061003@gmail.com](mailto:Hidayat061003@gmail.com)

Received April 27<sup>th</sup> 2026; Revised May 12<sup>th</sup> 2026; Accepted May 20<sup>th</sup> 2026

### Abstract

The performance of Pelton turbines in Pico-Hydropower Plants (PHPPs) operating under low-head conditions still faces efficiency challenges due to the influence of penstock design and fluid flow characteristics. The micro-hydropower system at the research location has a head of 11 meters, making it necessary to analyze penstock diameter variations to reduce energy losses (head loss) and improve fluid energy transfer to the turbine. This study aims to analyze the effect of penstock diameter variation and nozzle flow velocity on Pelton turbine performance using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The study was conducted using numerical simulations in ANSYS Fluent with penstock diameter variations of 4 inches, 5 inches, and 6 inches. The analyzed parameters included head loss, nozzle velocity, torque, theoretical power, effective power, and turbine efficiency. The boundary conditions used were a pressure inlet based on an 11-meter head and a pressure outlet at atmospheric pressure. The simulation results show that the head loss values for the 4-inch, 5-inch, and 6-inch penstocks were 0.00779 m, 0.00389 m, and 0.00176 m, respectively. The resulting nozzle velocities were 5.83 m/s, 8.72 m/s, and 8.38 m/s. The generated torque values were 2.13 Nm, 2.58 Nm, and 2.38 Nm, while the effective power outputs were 45.67 W, 82.41 W, and 72.99 W, with corresponding turbine efficiencies of 33.07%, 48.60%, and 41.50%, respectively. Based on the results, the 5-inch penstock diameter provided the most optimal performance because it achieved the best balance between flow rate, head loss, and fluid energy transfer, resulting in the highest turbine efficiency of 48.60%.

**Keywords:** Micro-Hydropower Plant, Penstock, CFD, Head Loss, Pelton Turbine,

## Analisis Pengaruh Variasi Diameter Penstock dan Kecepatan Aliran di Nozel Terhadap Kinerja Turbin Pelton Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD).

### Abstrak

Kinerja turbin Pelton pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH) dengan kondisi head rendah masih menghadapi permasalahan efisiensi akibat pengaruh desain penstock dan karakteristik aliran fluida. Sistem mikrohidro di lokasi penelitian memiliki head sebesar 11 meter sehingga diperlukan analisis terhadap variasi diameter penstock untuk mengurangi kehilangan energi (head loss) dan meningkatkan transfer energi fluida menuju turbin. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi diameter penstock dan kecepatan aliran nozzle terhadap kinerja turbin Pelton menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD). Penelitian dilakukan menggunakan simulasi numerik ANSYS Fluent dengan variasi diameter penstock 4 inci, 5 inci, dan 6 inci. Parameter yang dianalisis meliputi head loss, kecepatan nozzle, torsi, daya teoritis, daya efektif, dan efisiensi turbin. Boundary condition menggunakan pressure inlet berdasarkan head 11 meter. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai head loss pada diameter 4 inci, 5 inci, dan 6 inci berturut-turut sebesar 0,00779 m, 0,00389 m, dan 0,00176 m. Kecepatan nozzle yang dihasilkan masing-masing sebesar 5,83 m/s, 8,72 m/s, dan 8,38 m/s. Nilai torsi yang diperoleh sebesar 2,13 Nm, 2,58 Nm, dan 2,38 Nm, sedangkan daya efektif yang dihasilkan sebesar 45,67 W, 82,41 W, dan 72,99 W dengan efisiensi turbin masing-masing 33,07%, 48,60%, dan 41,50%. Berdasarkan hasil penelitian, diameter penstock 5 inci memberikan kinerja paling optimal karena menghasilkan keseimbangan terbaik antara debit aliran, head loss, dan transfer energi fluida sehingga menghasilkan efisiensi turbin tertinggi sebesar 48,60%.

**Kata Kunci:** PLTPH, Penstock, CFD, Head Loss, Turbin Pelton

### I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi global terus mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan perkembangan teknologi, sementara ketersediaan energi fosil semakin terbatas serta menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil tidak hanya berisiko terhadap krisis energi di masa depan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca yang memicu terjadinya perubahan iklim global. Dengan demikian, pemanfaatan energi terbarukan yang bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi solusi penting untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan (Jalil et al., 2024).

Permasalahan di Indonesia, energi tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan sumber energi, tetapi juga pemerataan distribusi listrik. Masih banyak beberapa wilayah terpencil dan pedesaan masih belum mendapatkan akses listrik secara optimal. Berdasarkan data dari (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2024) masih terdapat daerah yang belum terjangkau jaringan listrik, sehingga membutuhkan solusi energi alternatif yang mandiri dan berkelanjutan. Dalam hal ini, pemanfaatan energi terbarukan skala kecil menjadi salah satu upaya yang efektif dalam mendukung pemerataan akses listrik dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat (Fitriyah & Sudarti, 2024).

Energi air merupakan sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia. Dibeberapa wilayah Indonesia memiliki banyak sungai dengan debit dan karakteristik aliran yang beragam, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik, terutama melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPH). Sistem ini sangat cocok diterapkan di daerah pedesaan karena

memiliki konstruksi yang relatif sederhana, biaya pembangunan yang lebih rendah, serta dampak lingkungan yang minimal (Tria Melati et al., 2022).

Berdasarkan kondisi lapangan di Kota Pariaman, Sumatera Barat, sistem mikrohidro yang digunakan memiliki nilai head sebesar 11 meter. Nilai ini termasuk dalam kategori head rendah, sehingga mempengaruhi pemilihan dan desain komponen sistem pembangkit. Pada kondisi head rendah, efisiensi sistem sangat dipengaruhi oleh desain penstock dan karakteristik aliran fluida yang mengalir menuju turbin (Leon & Zhu, 2014). Oleh karena itu, analisis terhadap komponen sistem menjadi penting untuk memastikan kinerja pembangkit dapat berjalan secara optimal.

Turbin Pelton merupakan salah satu tipe turbin impuls yang bekerja dengan memanfaatkan energi kinetik dari pancaran air berkecepatan tinggi yang keluar dari nozzle untuk memutar sudu (bucket). Secara teoritis, turbin Pelton lebih optimal digunakan pada kondisi head tinggi (Auzan, 2021). Namun, dalam praktik di lapangan, turbin ini juga digunakan pada kondisi head rendah, seperti pada sistem yang terdapat di lokasi penelitian. Hal ini menimbulkan kebutuhan untuk menganalisis performa turbin Pelton pada kondisi tersebut serta faktor-faktor yang mempengaruhi kinerjanya (I Gusti Ngurah Saputra et al., 2020).

Penstock adalah salah satu komponen utama dalam sistem mikrohidro yang berfungsi sebagai saluran aliran air dari reservoir menuju nozzle. Diameter pada penstock memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik aliran fluida, seperti kecepatan aliran, distribusi tekanan, serta kehilangan energi. Pemilihan diameter penstock yang tidak tepat dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi energi disebabkan gesekan pada fluida dengan dinding pipa, sehingga mengurangi energi yang tersedia pada nozzle dan berdampak pada penurunan kinerja turbin (Dhiva Pratama et al., 2021).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi diameter penstock berpengaruh signifikan terhadap performa sistem mikrohidro. Diameter yang terlalu kecil cenderung meningkatkan head loss akibat gesekan, sedangkan diameter yang terlalu besar dapat menyebabkan distribusi aliran menjadi kurang optimal (Putraa et al., 2022). Penelitian oleh (Siti Nuraeni et al., 2025) menunjukkan bahwa variasi diameter penstock berpengaruh terhadap debit aliran, kecepatan turbin, serta efisiensi sistem secara keseluruhan. Dengan mempertimbangkan hal tersebut, diperlukan analisis lebih mendalam guna menentukan diameter penstock yang paling sesuai dengan kondisi sistem.

Kondisi aktual di lapangan, penstock yang digunakan memiliki konfigurasi diameter bertingkat yang berpotensi menimbulkan kehilangan energi tambahan akibat perubahan luas penampang dan kerugian minor. Untuk menyederhanakan analisis, penelitian ini menggunakan variasi diameter penstock tunggal, yaitu 4 inci, 5 inci, dan 6 inci. Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh diameter penstock secara lebih terkontrol terhadap head loss, distribusi tekanan, dan kecepatan aliran pada nozzle.

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk menganalisis aliran fluida pada sistem penstock dan nozzle secara numerik. Metode ini memungkinkan simulasi distribusi tekanan dan kecepatan aliran secara detail, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih akurat terkait pengaruh variasi diameter penstock terhadap kinerja turbin Pelton (Versteeg & Malalasekera, 2007). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam menentukan desain penstock yang optimal, serta meningkatkan efisiensi sistem mikrohidro pada kondisi head rendah.

## II. METODE PENELITIAN

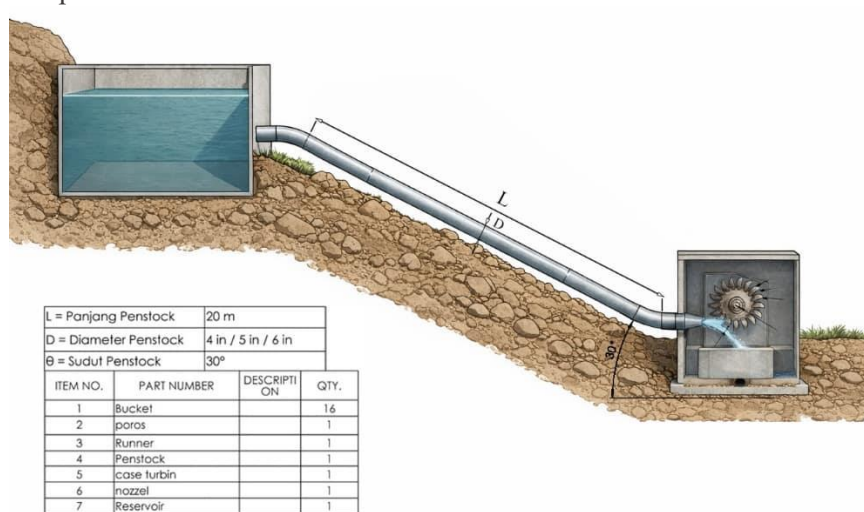
Penelitian ini merupakan penelitian numerik berbasis simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi diameter penstock terhadap karakteristik aliran

fluida dan kinerja turbin Pelton. Metode ini dipilih karena mampu menggambarkan distribusi tekanan, kecepatan aliran, serta kehilangan energi (*head loss*) secara detail tanpa perlu melakukan pengujian secara langsung di lapangan.

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent, dengan model geometri yang merepresentasikan sistem penstock dan nozzle sesuai kondisi aktual. Variasi diameter penstock yang digunakan dalam penelitian ini adalah 4 inci, 5 inci, dan 6 inci. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi tekanan, kecepatan aliran pada nozzle, serta kehilangan energi sepanjang penstock.

### 1. Desain 3D Turbin Pelton dan Sistem Penstock pada Software Solidwork

Pada penelitian ini, desain 3D Turbin Pelton, khususnya bentuk bucket, runner, serta komponen penunjang aliran seperti penstock dan nozzle, dibuat menggunakan perangkat lunak Solidworks. Desain turbin dibuat berdasarkan data lapangan, termasuk dimensi aktual bucket, diameter runner, bentuk nozzle, dan ukuran penstock.



Gambar 1 Skema sistem pikohidro turbin Pelton

Tabel 1 Variasi Penstock

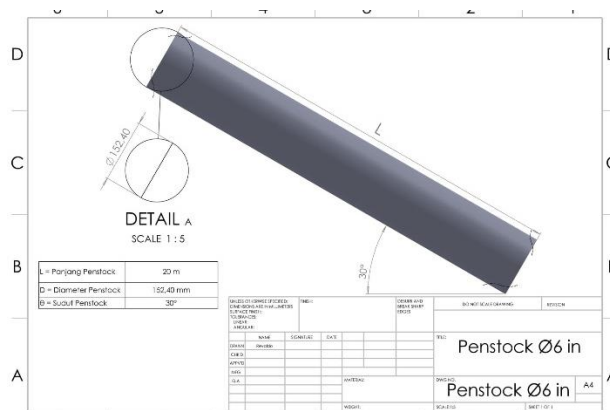
No	Variasi	Ukuran
1	Variasi 1	4 Inchi
2	Variasi 2	5 Inchi
3	Variasi 3	6 Inchi



Gambar 1 Geometri penstock variasi 1



Gambar 2 Geometri penstock variasi 2



Gambar 3 Geometri penstock variasi 3

Tabel 2 Ukuran Turbin Pelton

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Diameter luar runner	317,33	mm
2	Diameter lingkaran dalam	125,80	mm
3	Diameter poros	75,80	mm
4	Lebar total runner	260,00	mm
5	Lebar bucket	112,56	mm
6	Tinggi bucket	25,85	mm
7	Kedalaman bucket	22,85	mm
8	Lebar celah tengah	3,00	mm
9	Tinggi bagian atas bucket	7,37	mm
10	Diameter efektif runner	246	mm

Tabel 3 Ukuran Nozzle

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Panjang nozzle	200,22	mm
2	Diameter outlet (jet)	15	mm
3	Panjang ujung nozzle	20	mm



### III. HASIL PENELITIAN

Pada penelitian tugas akhir ini, peneliti melakukan analisis terhadap kinerja turbin Pelton dengan memvariasikan diameter penstock serta menganalisis pengaruh kehilangan energi (head loss) terhadap performa turbin. Parameter yang dikaji meliputi nilai torsi, daya efektif, dan efisiensi turbin akibat interaksi jet air dengan sudu (bucket) turbin.

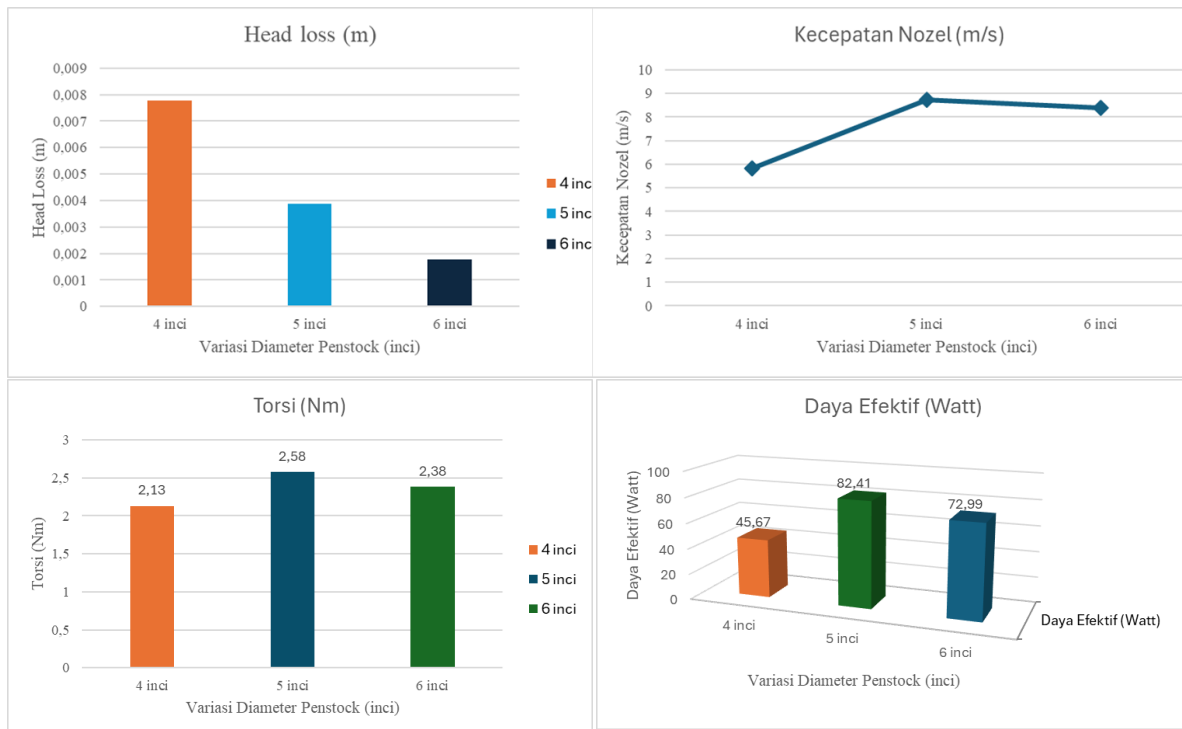
Tabel 5 Hasil Simulasi

No	Variasi Diameter Penstock	Debit m <sup>3</sup> /s	Head Loss Pipa (m)	Kecepatan Nozel (m/s)	Torsi (Nm)	Daya Teoritis (Watt)	Daya Efektif (Watt)	Efisiensi Hidrolik Turbin (%)
1	4 inci	0,00128	0,00779	5,83	2,13	138,11	45,67	33,07
2	5 inci	0,00155 7	0,00389	8,72	2,58	169,54	82,41	48,60
3	6 inci	0,00163 6	0,00176	8,38	2,38	175,87	72,99	41,50

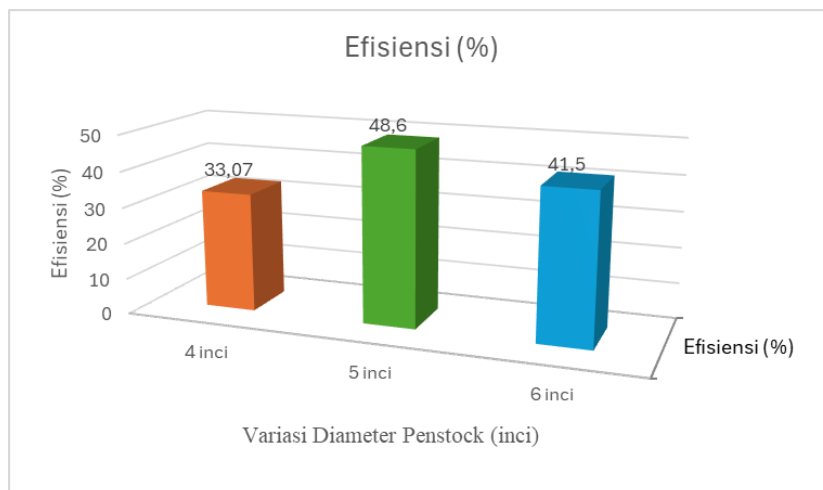
### IV. PEMBAHASAN

#### 1. Analisis Kinerja Sistem

Perbandingan kinerja sistem untuk variasi diameter penstock ditunjukkan pada Gambar 4–8 yang meliputi head loss, kecepatan aliran nozzle, torsi, daya efektif, dan efisiensi turbin. Head loss merupakan kehilangan energi yang terjadi sepanjang penstock akibat gesekan antara fluida dan dinding pipa (Çengel & Cimbala, 2014). Hasil menunjukkan bahwa semakin besar diameter penstock, nilai head loss cenderung menurun, yaitu dari 0,00389 m (4 inci) menjadi 0,00176 m (6 inci). Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya gesekan aliran di dalam pipa (Leon & Zhu, 2014). Kecepatan aliran pada nozzle merupakan hasil konversi energi potensial menjadi energi kinetik yang dipengaruhi oleh head efektif (Streeter & Wylie, 1998). Kecepatan aliran pada nozzle meningkat hingga diameter 5 inci (8,72 m/s), kemudian menurun pada diameter 6 inci. Hal ini menunjukkan adanya kondisi optimal pada diameter 5 inci akibat keseimbangan antara debit aliran dan kehilangan energi (Geeri et al., 2024). Nilai torsi meningkat dari diameter 4 inci ke 5 inci, kemudian menurun pada diameter 6 inci, dengan nilai tertinggi pada diameter 5 inci (2,58 Nm). Hal ini disebabkan oleh adanya keseimbangan antara debit aliran dan rugi-rugi energi, sehingga menghasilkan gaya impuls yang optimal pada sudu turbin (Syafiudin et al., 2025). Sementara itu, pada diameter 6 inci, meskipun debit aliran lebih besar, distribusi aliran menjadi kurang terfokus dan kecepatan aliran cenderung menurun, sehingga transfer energi ke turbin tidak berlangsung secara maksimal dan menyebabkan penurunan nilai torsi (Edeoja et al., 2016).



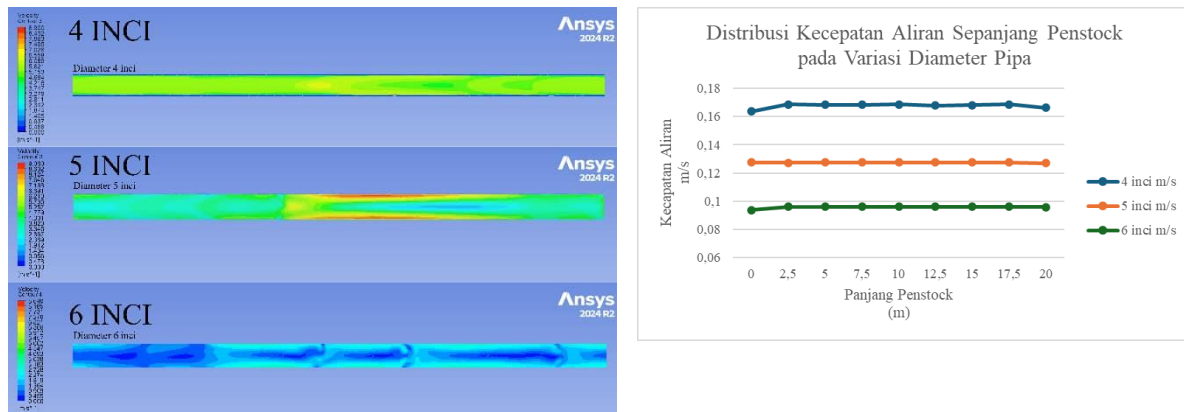
Gambar 5 Perbandingan parameter kinerja sistem terhadap variasi diameter penstock



Gambar 6 Data perbandingan nilai efisiensi

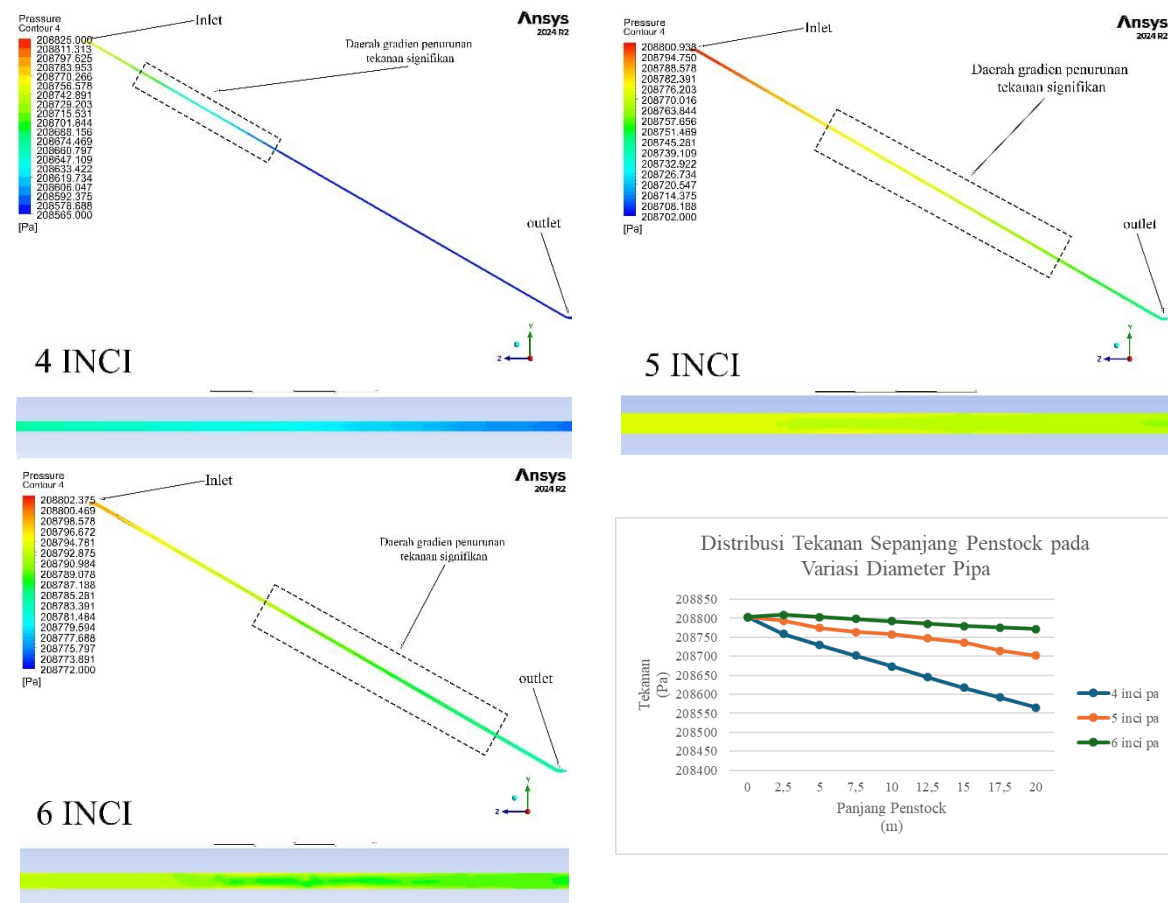
## 2. Analisis Aliran dalam Penstock

Diameter 4 inci menunjukkan kecepatan aliran relatif merata dan stabil, namun energi kinetik fluida belum maksimal. Pada diameter 5 inci, kecepatan aliran meningkat terutama di bagian tengah hingga outlet, menunjukkan distribusi aliran yang lebih optimal. Sementara itu, pada diameter 6 inci, kecepatan aliran lebih rendah meskipun kehilangan energi lebih kecil, sehingga energi fluida yang dihasilkan tidak optimal. Distribusi kecepatan dan tekanan dalam pipa dipengaruhi oleh diameter penstock serta gesekan fluida terhadap dinding pipa (Young et al., 2010).



Gambar 7 Distribusi kecepatan aliran dan contour kecepatan sepanjang penstock pada variasi diameter 4 inci, 5 inci, dan 6 inci

Distribusi tekanan sepanjang penstock pada Gambar 11 menunjukkan bahwa tekanan tertinggi terjadi di inlet dan menurun menuju outlet akibat *head loss*. Pada diameter 4 inci, penurunan tekanan paling besar yang menandakan rugi-rugi energi tinggi. Diameter 5 inci menunjukkan penurunan yang lebih landai, sedangkan diameter 6 inci memiliki gradien tekanan paling kecil sehingga kehilangan energi akibat gesekan semakin berkurang dan aliran menjadi lebih efisien. Penurunan tekanan sepanjang aliran terjadi akibat kehilangan energi yang dijelaskan melalui prinsip mekanika fluida (Pritchard & Leylegian, 2011).

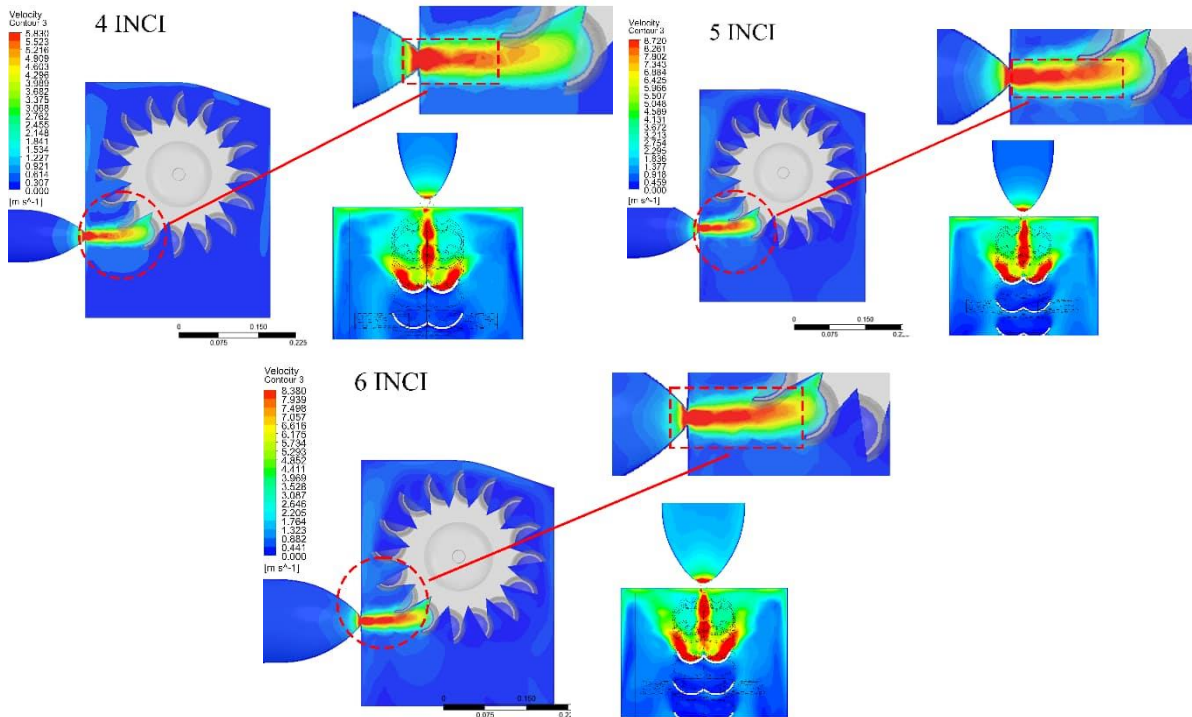


Gambar 8 Distribusi tekanan dan contour tekanan sepanjang penstock pada variasi diameter 4 inci, 5 inci, dan 6 inci

### 3. Analisis Aliran dari Nozzle ke Turbin

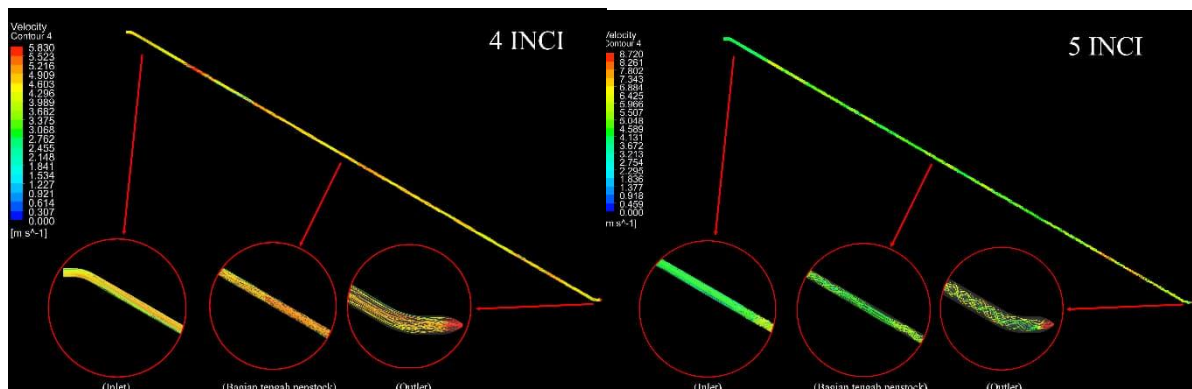
Distribusi kecepatan jet pada Gambar 12 menunjukkan aliran terfokus pada *splitter* lalu menyebar ke kedua sisi bucket. Pada diameter 4 inci, zona kecepatan tinggi lebih pendek dan cepat menyebar

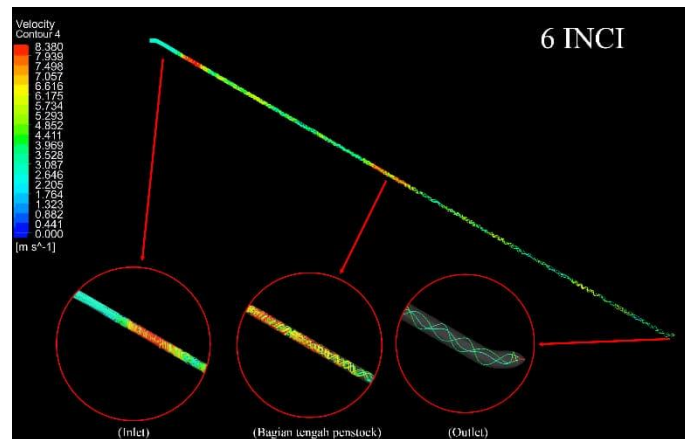
sehingga transfer energi belum optimal. Diameter 5 inci menghasilkan aliran paling terfokus dan merata, menunjukkan transfer energi yang lebih efektif. Sementara itu, pada diameter 6 inci, aliran lebih menyebar sebelum impact sehingga energi fluida tidak dimanfaatkan secara optimal. Perubahan kecepatan jet merupakan hasil konversi energi potensial menjadi energi kinetik sesuai prinsip Bernoulli (Nedelcu et al., 2021).



Gambar 9 Distribusi kecepatan jet dan contour aliran pada nozzle dan bucket turbin Pelton untuk variasi diameter penstock 4 inci, 5 inci, dan 6 inci

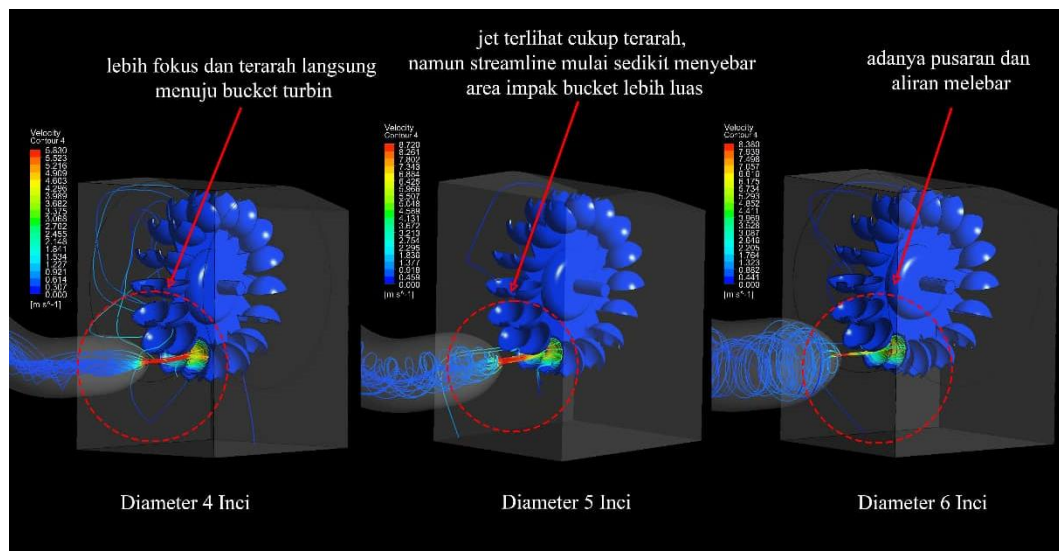
Visualisasi streamline pada Gambar 16 menunjukkan aliran bergerak dari inlet ke outlet mengikuti geometri pipa. Pada diameter 4 inci, aliran cukup stabil namun mulai mengalami fluktuasi akibat gesekan. Diameter 5 inci menunjukkan pola aliran paling stabil dan teratur dengan gangguan minimal. Sementara itu, pada diameter 6 inci, aliran cenderung melebar dan kurang terfokus terutama di bagian outlet, sehingga distribusi aliran menjadi kurang optimal.





Gambar 10 Visualisasi streamline aliran fluida sepanjang penstock pada variasi diameter 4 inci, 5 inci, dan 6 inci

Visualisasi streamline pada Gambar 8 menunjukkan pola aliran jet dari nozzle menuju bucket turbin. Pada diameter 4 inci, aliran lebih terfokus dan langsung mengenai bucket sehingga transfer energi cukup baik. Pada diameter 5 inci, aliran tetap terarah namun lebih merata, menunjukkan distribusi energi yang stabil dan efektif. Sementara itu, pada diameter 6 inci, aliran cenderung menyebar dan membentuk pusaran (*swirl*) sebelum mengenai bucket, sehingga transfer energi menjadi kurang optimal.



Gambar 11 Streamline aliran fluida interaksi jet dengan sudu turbin

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) pada variasi diameter penstock 4 inci, 5 inci, dan 6 inci dengan kondisi head 11 meter, diperoleh bahwa variasi diameter penstock berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida dan kinerja turbin Pelton. Nilai head loss yang dihasilkan pada diameter 4 inci, 5 inci, dan 6 inci berturut-turut sebesar 0,00779 m, 0,00389 m, dan 0,00176 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar diameter penstock maka kehilangan energi akibat gesekan fluida pada dinding pipa semakin kecil.

Kecepatan nozzle yang dihasilkan pada variasi diameter 4 inci, 5 inci, dan 6 inci masing-masing sebesar 5,83 m/s, 8,72 m/s, dan 8,38 m/s. Diameter penstock 5 inci menghasilkan kecepatan nozzle tertinggi sehingga aliran fluida menjadi lebih terfokus dan stabil saat menuju bucket turbin. Sementara itu, diameter 6 inci menghasilkan aliran yang cenderung lebih menyebar sehingga transfer energi fluida tidak berlangsung secara optimal.

Nilai torsi yang dihasilkan pada diameter 4 inci, 5 inci, dan 6 inci masing-masing sebesar 2,13 Nm, 2,58 Nm, dan 2,38 Nm. Daya teoritis yang diperoleh sebesar 138,11 W, 169,54 W, dan 175,87 W, sedangkan daya efektif yang dihasilkan sebesar 45,67 W, 82,41 W, dan 77,79 W. Efisiensi turbin yang diperoleh pada masing-masing variasi diameter penstock sebesar 33,07%, 48,60%, dan 41,50%.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan diameter penstock sangat mempengaruhi performa sistem PLTPH pada kondisi head rendah. Variasi diameter penstock memberikan perbedaan pada distribusi aliran, kecepatan nozzle, kehilangan energi, daya efektif, dan efisiensi turbin Pelton. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan menambahkan validasi eksperimen serta mengkaji parameter lain seperti bentuk nozzle, jumlah nozzle, variasi debit, dan desain bucket terhadap kinerja turbin Pelton..

## VI. REFERENSI

- Adanta, D., Rizwanul Fattah, I. M., & Muhammad, N. M. (2020). COMPARISON OF STANDARD K-E AND SST K- $\Omega$ turbulence MODEL FOR BREASTSHOT WATERWHEEL SIMULATION. *Journal of Mechanical Science and Engineering*, 7(2), 2020.
- Auzan, L. (2021). Analisis Tinggi Jatuh Air (Head) Terhadap Unjuk Kerja Turbin Pelton Skala Mikro. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik [JIMT]*, 1.
- Çengel, & Cimbala. (2014). *FluidMechanicsFundamentalsandApplications*.
- Dhiva Pratama, A., Hidayah, E., & Utami Agung Wiyono, R. (2021). Penentuan Desain Optimum Penstock untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Sungai Poreng, Jember. *Jurnal Teknik Pengairan*, 12(1), 71–80. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2021.012.01.07>
- Edeoja, A., Ibrahim, J., & Kucha, E. (2016). Investigation of the Effect of Penstock Configuration on the Performance of a Simplified Pico-hydro System. *British Journal of Applied Science & Technology*, 14(5), 1–11. <https://doi.org/10.9734/bjast/2016/23996>
- Fitriyah, & Sudarti. (2024). *Pemanfaatan Energi Mikrohidro Dalam Mendukung*.
- Geeri, S., Kolakoti, A., Samuel, O. D., Abbas, M., Aigba, P. A., Ajimotokan, H. A., Enweremadu, C. C., Elboughdiri, N., & Mujtaba, M. A. (2024). Investigation of flow behaviour in the nozzle of a Pelton wheel: Effects and analysis of influencing parameters. *Heliyon*, 10(8), e28986. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28986>
- I Gusti Ngurah Saputra, Lie Jasa, & Wayan Arta Wijaya, I. (2020). *Pengaruh Jumlah Sudu Pada Prototype Pltmh Dengan Menggunakan Turbin Pelton Terhadap Efisiensi Yang Dihasilkan* (Vol. 7, Number 4). <https://doi.org/https://doi.org/10.24843/Spektrum.2020.V07.I04.P21>
- Jalil, A., Yahya, A. R., Rahmadhanisa, N. A., & Azzayni, A. M. (2024). *Potensi Penggunaan Energi Terbarukan dalam Alat dan Mesin Pertanian (Pemanfaatan Pompa Air Tenaga Surya Untuk Sistem Irigasi Pertanian)*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Laporan Kinerja Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Tahun 2024*.
- Leon, A. S., & Zhu, L. (2014). A dimensional analysis for determining optimal discharge and 1 penstock diameter in impulse and reaction water turbines. In *Renewable Energy* (Vol. 00). [www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia)
- Nedelcu, D., Cojocar, V., & Avasiloaie, R. C. (2021). Numerical investigation of Nozzle jet flow in a pelton microturbine. *Machines*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/machines9080158>
- Pritchard, P. J., & Leylegian, J. (2011). *Introduction to Fluid Mechanics*.

- Putraa, Y. S., Noviani, E., & Muhandi. (2022). Numerical Study of the Effect of Penstock Dimensions on a Micro-hydro System using a Computational Fluid Dynamics Approach. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(2), 491–499. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.42343>
- Siti Nuraeni, Agus Adi Nursalim, & Fikri Ulul Albab. (2025). Pengaruh Diameter Penstock Terhadap Debit Pada Prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. 6(2), 2746–220. <https://doi.org/10.70476/jft.v6i2.6>
- Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1998). *Fluid Mechanics*.
- Syafiudin, M., Dwi Jayanti Kartika Sari, R., & Arifuddin, R. (2025). Analysis of penstock design and losses using the Darcy-Weisbach equation in a micro hydro power plant at Wisata Telaga River, Malang. *Journal Renewable Energy & Mechanics (REM)*, 08(02). [https://doi.org/10.25299/rem.2025.vol8\(02\).23453](https://doi.org/10.25299/rem.2025.vol8(02).23453)
- Tria Melati, L., Supriyadi, I., & Ali, Y. (2022). Strategi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Mini/Mikro Hidro di Indonesia. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 6(2), 91–99. <https://doi.org/10.33379/gtech.v6i2.1319>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition*. [www.pearsoned.co.uk/versteeg](http://www.pearsoned.co.uk/versteeg)
- Young, munson, okiishi, & huebsch. (2010). *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*.