

# ANALISIS ALIRAN PADA *BUCKET* TURBIN PELTON 1 KW DENGAN VARIASI *SPEAR NOZZLE* MENGGUNAKAN METODE CFD

Steven Darmawan<sup>1,2)</sup>, Hadi Sutanto<sup>1)</sup>, Anthon De Fretes<sup>1)</sup>, Sandra Octaviani<sup>1)</sup>,  
Harto Tanujaya<sup>2)</sup>, Rosehan<sup>2)</sup> Ricco Marcellio<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

<sup>2)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tarumanagara

e-mail: <sup>1)</sup>steven.202304070179@student.atmajaya.ac.id, <sup>3)</sup>stevend@ft.untar.ac.id

hadi.sutanto@atmajaya.ac.id, anthon.defretes@atmajaya.ac.id sandra.oct@atmajaya.ac.id

<sup>2)</sup>hartotan@ft.untar.ac.id <sup>2)</sup>rosehan@ft.untar.ac.id <sup>2)</sup>ricco.515190034@stu.untar.ac.id

**Abstract:** Pelton turbine have been used for harvesting renewable energy by extracting kinetic energy of water into mechanical energy for more than 100 years. This characteristic makes this system remains potential to achieve Goals #12 SDGs. During the operation, the performance of Pelton Turbine is affected by several parameters: hydraulic power, water flow rate, bucket design, and nozzle. Among others, nozzle design is the most challenging since this part is responsible to drive the water direction strike the buckets, converting impulse. The performance of existing 1 kW Pelton Turbine equipped with 15mm Spear Nozzle is believed can be improved by varying the nozzle diameter by using low-cost CFD simulation procedure. Ansys Fluent from Ansys Student 2021 R1 is used in this research. Represented by two-buckets facing spear nozzle, three dimensional CFD simulation is conducted. The nozzle diameter is varied to 15 mm, 14 mm, and 13 mm from two configurations. The first and second configuration is done with water flow rate 3,3 kg/s and 1,3 kg/s respectively. The results show that 15 mm nozzle diameter can produce higher power as high as 594,08 Watt with the first configuration. Even though at the second configuration this 15mm nozzle diameter did not produce the highest power, other parameters such as splashing water and erosion effect still show that the 15mm nozzle diameter performed better than others. This simulation results also consistent with experimental results which performed by using first configuration and 15mm nozzle diameter. The results also show that the sistem performance is much higher at higher water flow rates. Therefore, the development of the system can be continued to by using spear nozzle with diameter higher than 15mm.

**Keywords:** Pelton Turbine, spear nozzle, CFD, SDGs Goals #12, renewable energy

## PENDAHULUAN

Menurut World Energy Outlook 2022, energi yang aman, berkelanjutan dan terjangkau semakin dibutuhkan oleh manusia [1]. Keberlanjutan dari energi ini juga merupakan *goal* ke-7 dari *Sustainable Development Goals* (SDGs) sehingga pemanfaatan harus semakin ditingkatkan [2]. Diantara sumber energi terbarukan, energi hidrolik (*hydropower*) merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang paling populer di dunia dengan penggunaan lebih dari 80% dari total penggunaan energi terbarukan [3]. Indonesia memiliki berbagai macam jenis-jenis sumber tenaga listrik dengan bantuan alam seperti air, angin, dan cahaya matahari. Sebagai sumber listrik yang menggunakan air, turbin air terbagi menjadi dua bagian, yaitu turbin reaksi dan impuls. Salah satu jenis turbin impuls yang digunakan merupakan turbin pelton yang sudah digunakan lebih dari 100 tahun. Sebagai perangkat turbin hidrolik yang memanfaatkan impuls, nozzle berperan penting dalam konversi energi hidrolik menjadi energi kinetik untuk selanjutnya dirubah menjadi energi mekanik oleh poros dan energi listrik oleh generator, antara lain pada turbin cross-flow [4]. Terdapat beberapa parameter yang dapat merepresentasikan unjuk kerja turbin Pelton, antara lain berupa jumlah sudu yang berbanding terbalik dengan efisiensi sistem [5]. Dalam perancangan turbin pelton terdapat parameter perhitungan, yaitu *head* (H), debit aliran air (Q), daya dan efisiensi yang dihasilkan dari turbin pelton, selain jumlah dan sudut *nozzle*, jumlah dan jenis *bucket* [6]. Sarjono dkk (2021) telah melakukan penelitian dengan menggunakan variasi diameter dan jarak nosel terhadap daya dan efisiensi turbin pelton. Dalam penelitian tersebut didapatkan bahwa variasi nosel memiliki pengaruh besar terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan. Semakin besar nosel yang digunakan maka semakin besar juga efisiensi yang

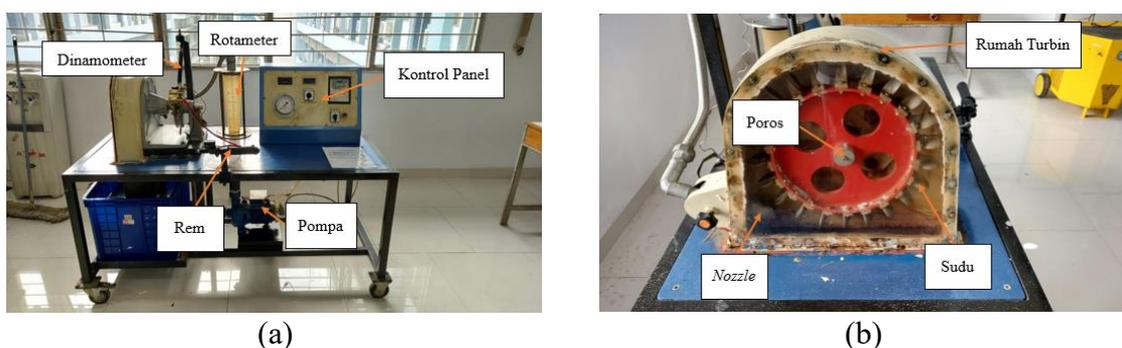
dihasilkan dengan putaran (rpm) yang kecil [7]. Kemudian Andi & Priyo, (2021) menyatakan bahwa hasil efisiensi terbesar dihasilkan pada variasi diameter 12 mm pada kapasitas 12 LPM sebesar 57,51%, kapasitas 16 LPM sebesar 46,30% dan kapasitas 20 LPM sebesar 43,83% dari diameter nosel lainnya (8 mm dan 10 mm). Namun hasil daya turbin yang dihasilkan pada nosel diameter 12 mm didapat hasil yang paling kecil, yang merupakan diameter sebesar 8 mm [8].

Unjuk kerja dari Turbin Pelton sebagai Turbin Impuls sangat dipengaruhi oleh kualitas dari jet nosel, selain oleh *bucket*, *casing* dan kondisi operasi. Rasio eksentrisitas memiliki batas tertentu pada Spear Needle turbin Pelton [9]. Pada turbin Pelton, *nozzle* digunakan untuk mengubah tekanan hidrolis air menjadi energi kinetik. *Wake* sebagai dampak dari lapisan batas pada *needle* dari *nozzle* akan menghasilkan aliran sekunder sehingga mengakibatkan rugi-rugi aliran, yang menurunkan unjuk kerja sistem [10]. Penelitian-penelitian terkait pengaruh *nozzle* terhadap unjuk kerja turbin Pelton seringkali melibatkan perangkat-perangkat eksperimental yang rumit seperti LDV, sementara analisis dengan menggunakan metode CFD masih menjadi tantangan karena gaya sentrifugal dan efek Coriolis [11].

Penelitian dilakukan pada sistem Turbin Pelton 1 kW dengan tujuan untuk menghasilkan rekomendasi pengembangan sistem turbin Pelton pada variasi diameter *nozzle* pada *spear nozzle*. Analisis aliran air pada *spear nozzle* dengan variasi diameter *nozzle* Turbin Pelton 13 mm, 14 mm, dan 15 mm dilakukan dengan menggunakan CFD yang lebih sederhana pada dua konfigurasi laju aliran air. Simulasi CFD dengan konsentrasi pancaran air keluar *nozzle* menumbuk *bucket* yang diasumsikan diam. Secara khusus metode eksperimen juga dilakukan pada posisi pancaran air keluar *nozzle* berdiameter 15mm yang menumbuk *bucket* sehingga daya dan efisiensi sistem pada swtiap variasi *nozzle* dapat diketahui. Perhitungan efisiensi sistem pada seluruh variasi diameter lain juga dilakukan sehingga dapat dijadikan acuan untuk penelitian *spear nozzle* pada tahap selanjutnya.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara numerikal dengan menggunakan simulasi CFD pada sistem Turbin Pelton skala Lab *existing* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1 dengan parameter simulasi dihasilkan melalui metode eksperimental yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 1. Fluida kerja merupakan air, satu fasa dan dalam keadaan statis (*steady state*). Dengan pompa sebesar 1 HP (746 Watt), debit air yang dialirkan melalui *nozzle* menuju *bucket* sebesar 1,3 kg/s dan 3,3 kg/s. Eksperimen dilakukan terhadap sistem seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1 dengan menggunakan *Spear nozzle* dengan diameter 15mm yang dimanufaktur dengan menggunakan material Aluminium 6061 sehingga unjuk kerja berupa daya dan efisiensi sistem dapat dihasilkan. Unjuk kerja pada variasi *nozzle* 13mm dan 14mm diestimasi dengan menggunakan metode CFD, termasuk untuk *nozzle* dengan diameter 15mm. Simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan Ansys Student 2023 R1.



Gambar 1. (a) Bagian depan dan (b) Bagian Samping Turbin Pelton 1 kW

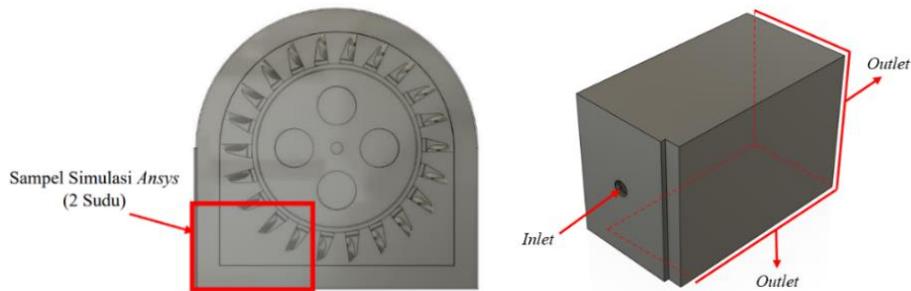
Tabel 1. Parameter Simulasi CFD

No	Diameter Nozzle	Jumlah Bucket	Material	Inlet Variabel 1	Inlet Variabel 2	Eksperimental
1	15 mm	2	Aluminium 6061	3,3 kg/s ( <i>Mass flow rate</i> )	1,3 kg/s	n = 297 rpm Q = 78 l/m (1,3 kg/s)
2	14 mm	2	Aluminium 6061	3,3 kg/s ( <i>Mass flow rate</i> )	1,3 kg/s	-
3	13 mm	2	Aluminium 6061	3,3 kg/s ( <i>Mass flow rate</i> )	1,3 kg/s	-

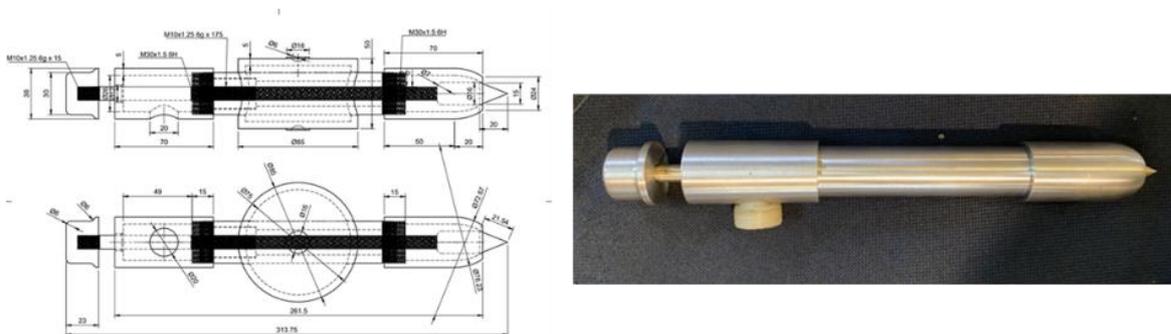
Berdasarkan Tabel 1, penggunaan variabel pertama menggunakan debit air sebesar 3,3 kg/s untuk mengetahui profil aliran setiap diameter *nozzle*. Pada variabel kedua menggunakan data percobaan yang telah dilakukan pada laboratorium perpindahan panas dan massa dengan nilai *mass flow rate* sebesar 1,3 kg/s (kecepatan aliran air sebesar 7,64 m/s). Hal ini dilakukan untuk melakukan perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil percobaan yang telah dilakukan. Kemudian eksperimental merupakan data yang diambil pada laboratorium. Data eksperimental ini kemudian dapat dilakukan perhitungan seperti mencari  $V_{jet}$  yang akan dibandingkan dengan hasil simulasi yang telah dilakukan. Data tersebut mencakup n atau putaran turbin sebesar 297 rpm dan debit aliran air sebesar 78 L/min pada nilai tertinggi. Maka dari itu parameter simulasi CFD memiliki 2 variabel secara berturut-turut untuk *inlet* nosel diameter 15 mm, 14 mm, dan 13 mm, yaitu *inlet* variabel 1(3,3 kg/s, 3,3 kg/s, 3,3 kg/s) dan *inlet* variabel 2(1,3 kg/s, 1,3 kg/s, 1,3 kg/s).

### Model Geometri

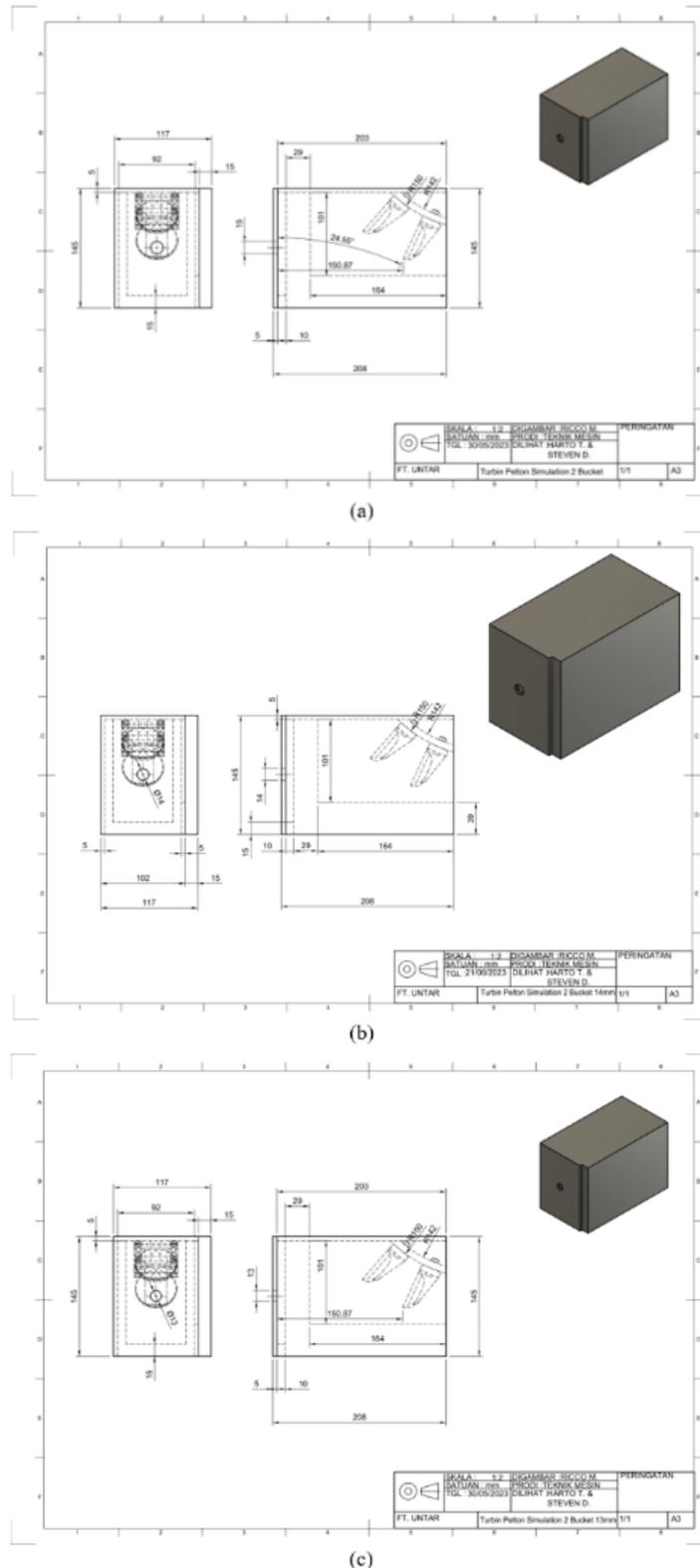
Gambar 2 merupakan model 3D dari turbin pelton dengan skala laboratorium beserta sampel simulasi ansys dan bagian *inlet* dan *outlet* yang akan disimulasi. Pada simulasi CFD, pancaran air keluar *nozzle* diasumsikan hanya menumbuk 2 sudu pada *bucket*. *Spear nozzle* dengan diameter *nozzle* 15mm dirancang dan dimanufaktur sesuai dengan yang ditunjukkan oleh Gambar 3. Model geometri sistem dengan menggunakan *nozzle* berdiameter 13mm, 14mm, dan 15mm ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 2. Hasil Model 3D: (a) Bagian Simulasi Turbin Pelton, dan (b) Pembagian Sisi *Inlet* dan *Outlet*



Gambar 3. *Spear Nozzle*

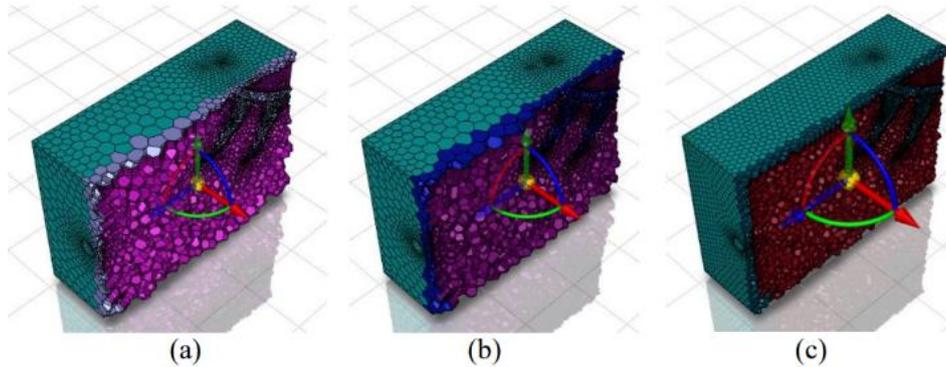


Gambar 4. *Drawing* Turbin Pelton 2 Sudu dengan *Inlet* Sebesar: (a) 15 mm, (b) 14 mm, dan (c) 13 mm

### Model CFD

Model CFD dibangun dalam 3 dimensi, dimana simulasi CFD dilakukan pada bagian casing, nozzle dan 2 (dua) buah *bucket*. Pemilihan terhadap 2 (dua) buah *bucket* didasari oleh tujuan analisis aliran hanya pada *nozzle* dan *bucket*. Secara umum, tahapan penelitian

dengan menggunakan metode CFD dikakukan dengan berdasarkan diagram alir pada Gambar 5. Mesh yang digunakan merupakan mesh dengan jenis *polyhedral* dengan ukuran *minimum size* digunakan sebesar 0,0002 m dan *maximum size* sebesar 0,05 m serta *share topology* sebesar 0,001 m. *Boundary type* pada *inlet* berupa *mass-flow-inlet* dan *outlet* berupa *outflow*, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6 dengan *boundary condition* berupa laju alir sebesar 3,3 kg/s.



Gambar 5. Mesh pada Inlet: (a) 15 mm, (b) 14 mm, dan (c) 13 mm



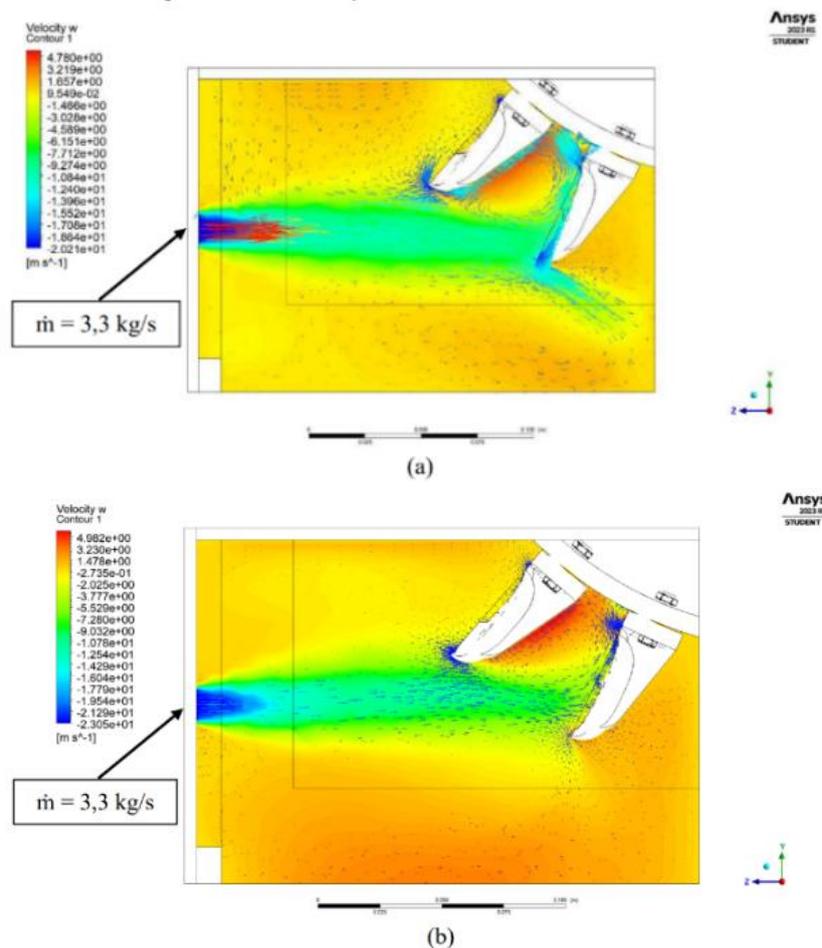
Gambar 5. Flowchart Simulasi CFD

## HASIL DAN PEMBAHASAN

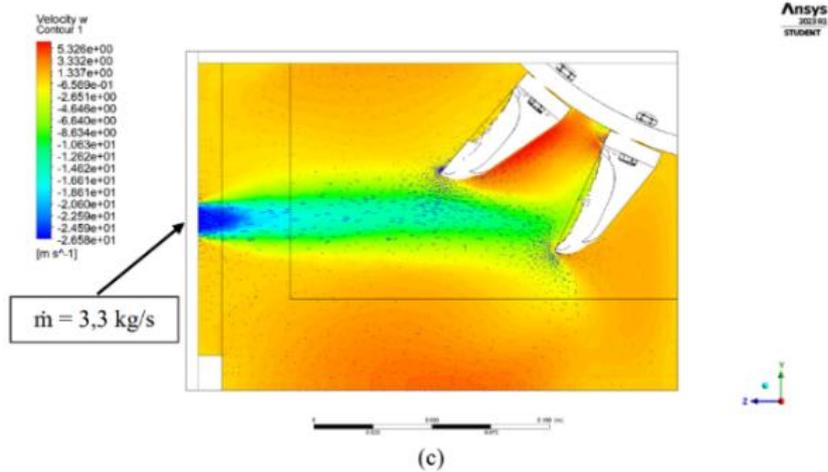
Simulasi CFD dilakukan pada sistem turbin Pelton. Pada konfigurasi 1 dan konfigurasi 2 yang masing-masing mewakili laju alir air maksimum sebesar 3,3 kg/s dan laju alir 1,3 kg/s yang diperoleh dari hasil eksperimen terhadap penggunaan *spear nozzle* dengan diameter 15mm, untuk selanjutnya juga dilakukan pada *nozzle* dengan diameter 13mm dan 14mm untuk memperoleh hasil yang konsisten. Hasil simulasi CFD setiap konfigurasi dipresentasikan oleh kontur kecepatan, 3D *volume rendering velocity*, dan grafik perbandingan efisiensi turbin serta  $V_{jet}$  yang dihasilkan dengan menggunakan 1 buah lokasi *plane* pada setiap diameter *inlet*.

### Konfigurasi I: Diameter *Nozzle* 15 mm, 14 mm, dan 13 mm

Simulasi dilakukan dengan laju alir fluida (*mass flow rate*) sebesar 3,3 kg/s yang diubah dari debit aliran air sebesar 275 L/min, dilakukan pada *nozzle* dan dua *bucket* dan asumsi sudu yaitu statis atau diam. Perbandingan hasil simulasi dari turbin pelton 2 sudu dengan *inlet* sebesar 15 mm, 14 mm, dan 13 mm ditunjukkan oleh Gambar 6 – Gambar 8. Penggunaan *nozzle* dengan diameter 15mm menghasilkan percikan (*splashing water*) yang lebih banyak dibandingkan dengan *nozzle* dengan diameter 13mm dan 14mm sehingga efisiensi yang dihasilkan oleh penggunaan *nozzle* yang menghasilkan *splash water* akan semakin rendah [10], [11]. Simulasi CFD dengan menggunakan *nozzle* berdiameter yang lebih kecil menghasilkan momentum yang semakin besar, dengan kecepatan tertinggi hingga 25,59 m/s. Hasil ini sejalan dengan perhitungan efisiensi yang disajikan pada Gambar 8.

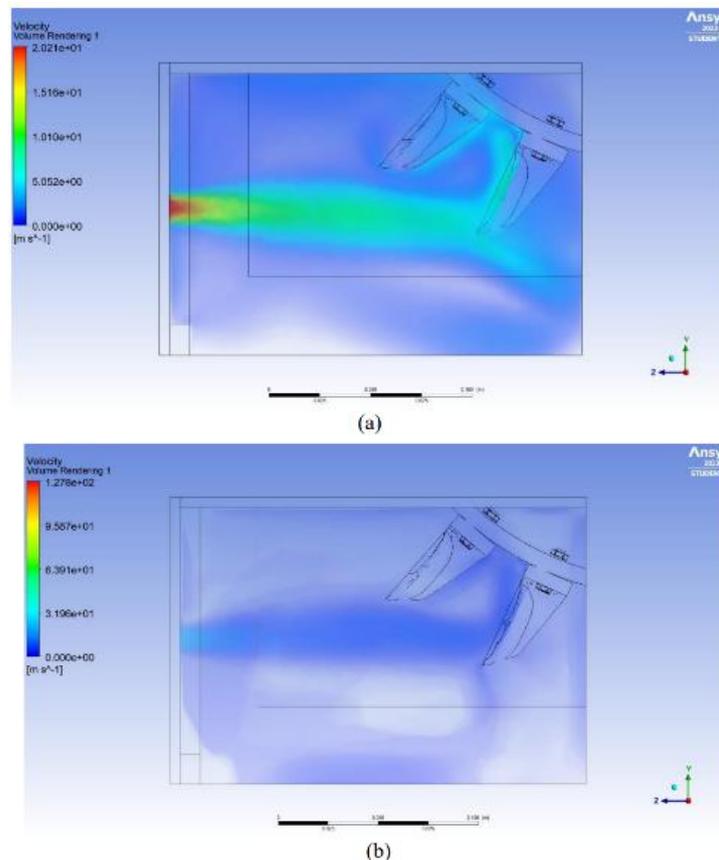


Gambar 6. *Contour Velocity* pada *Inlet*: (a) 15 mm, (b) 14 mm, dan (c) 13 mm

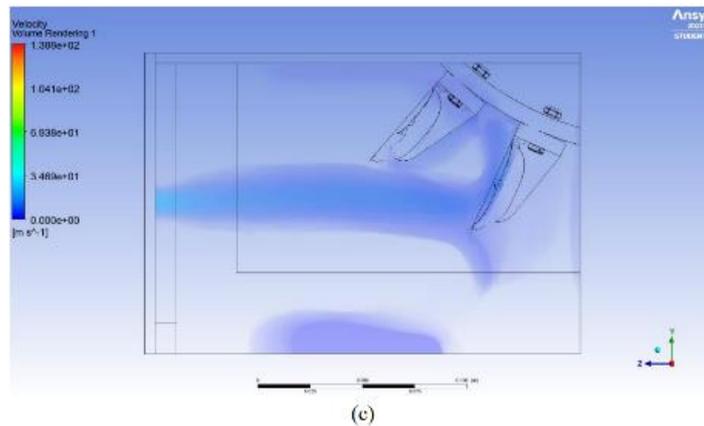


Lanjutan Gambar 6. *Contour Velocity* pada *Inlet*: (a) 15 mm, (b) 14 mm, dan (c) 13 mm

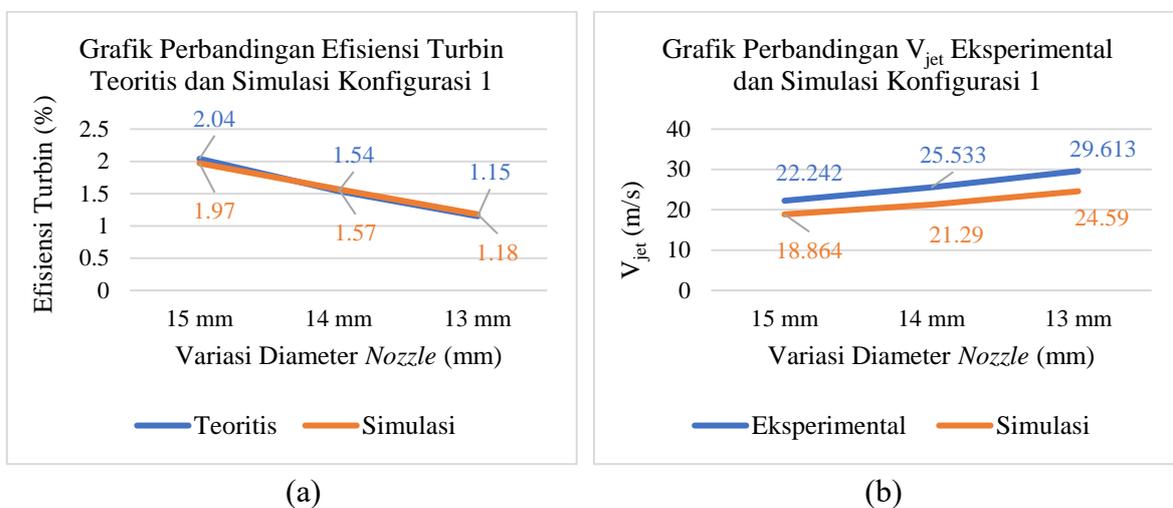
Berdasarkan profil aliran fluida yang diperoleh dari simulasi, dapat dinyatakan bahwa distribusi fluida pada masing-masing *inlet* memiliki perbedaan yang cukup sedikit pada *inlet* 14 mm dan 13 mm. Berbeda dengan *inlet* 15 mm yang profil aliran fluida yang terjadi pada *inlet* 15 mm terpotong oleh sudu. Berikutnya merupakan perbandingan dengan visual 3D *volume rendering velocity* pada setiap diameter *nozzle* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7. Kecepatan yang lebih tinggi sebesar 20,21 m/s dibandingkan dengan variasi *nozzle* lain menghasilkan *splashing water* dengan kecepatan yang lebih rendah, yang kemungkinan disebabkan oleh erosi pada *spear nozzle* [12]. Penggunaan *nozzle* dengan diameter 15mm menghasilkan profil aliran yang lebih konsisten dibandingkan dengan variasi *nozzle* lain dan menumbuk kedua *bucket* dengan momentum yang lebih besar.



Gambar 7. 3D *Volume Rendering Velocity* Pada *Inlet*: (a) 15 mm, (b) 14 mm, (c) 13 mm



Lanjutan Gambar 7. 3D *Volume Rendering Velocity* Pada *Inlet*: (a) 15 mm, (b) 14 mm, (c) 13 mm

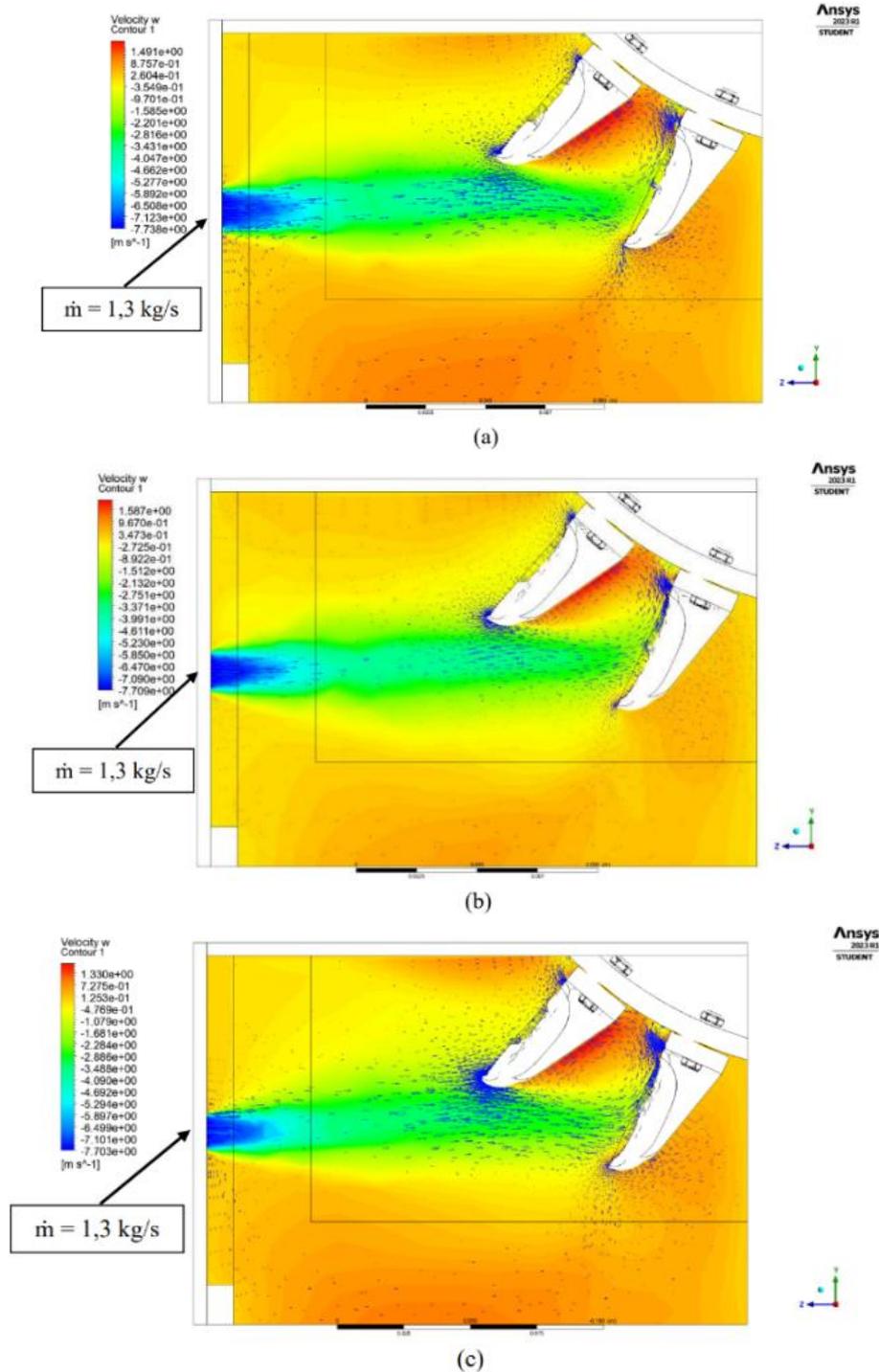


Gambar 8. (a) Grafik Perbandingan Efisiensi Turbin Teoritis dan Simulasi Konfigurasi 1, dan (b) Grafik Perbandingan  $V_{jet}$  Eksperimental dan Simulasi Konfigurasi 1

Berdasarkan kontur kecepatan serta kontur kecepatan pada Gambar 8, nilai efisiensi turbin secara teoritis memiliki nilai yang mendekati dengan perhitungan menggunakan hasil simulasi. Pada nosel 15 mm, nilai efisiensi memiliki selisih sebesar 0,07% dan pada nosel 14 mm dan 13 mm memiliki selisih sebesar 0,03%. Kemudian untuk grafik (b) yang diperoleh, dapat dikatakan bahwa hasil simulasi cukup mendekati hasil eksperimental yang telah dilakukan. Selisih yang didapat pada setiap diameter nosel secara berturut-turut yaitu: 3,378 m/s, 4,243 m/s, dan 5,023 m/s.

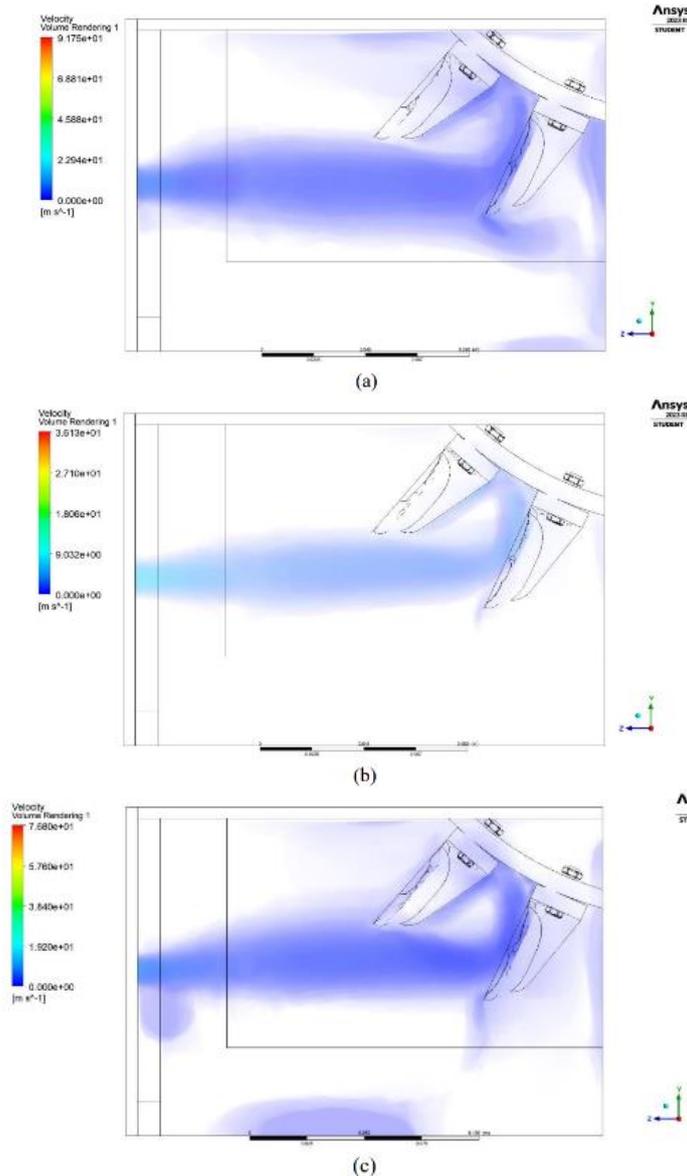
### Konfigurasi II: Diameter *Nozzle* 15 mm, 14 mm, dan 13 mm

Simulasi dilakukan dengan laju alir fluida (*mass flow rate*) sebesar 1,3 kg/s, dilakukan pada *nozzle* dan dua *bucket* dan asumsi sudu yaitu statis atau diam. Perbandingan hasil simulasi dari turbin pelton 2 sudu dengan *inlet* sebesar 15 mm, 14 mm, dan 13 mm ditunjukkan oleh Gambar 9 – Gambar 11. Penggunaan *nozzle* dengan diameter 15mm menghasilkan percikan (*splashing water*) yang lebih banyak dibandingkan dengan *nozzle* dengan diameter 13mm dan 14mm sehingga efisiensi yang dihasilkan oleh penggunaan *nozzle* yang menghasilkan *splash water* akan semakin rendah [10], [11]. Simulasi CFD dengan menggunakan *nozzle* berdiameter yang lebih kecil menghasilkan momentum yang semakin besar, dengan kecepatan tertinggi hingga 7,703 m/s. Hasil ini sejalan dengan perhitungan efisiensi yang disajikan pada Gambar 11.

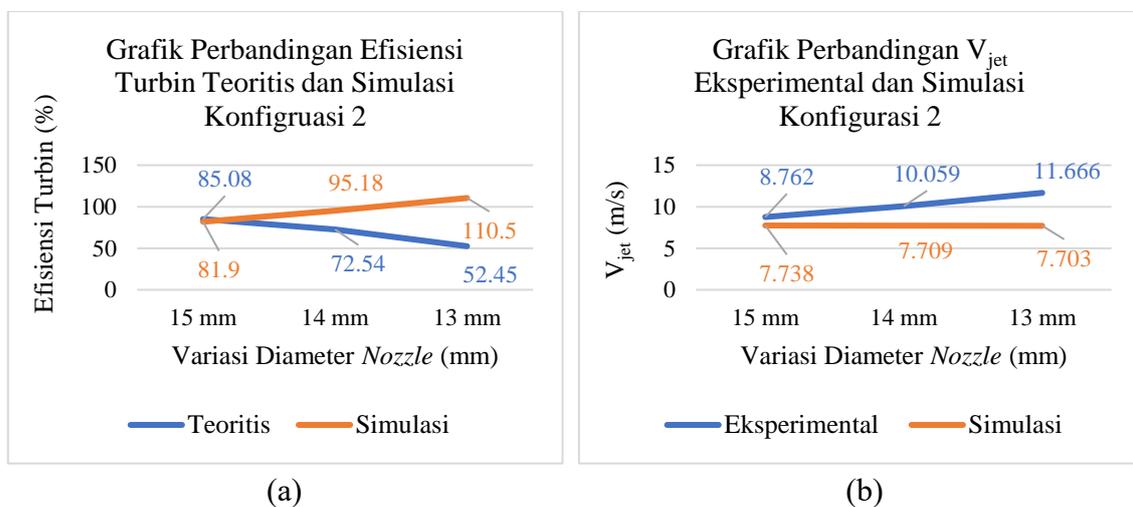


Gambar 9. Contour Velocity Konfigurasi 2 pada Inlet:  
 (a) 15 mm, (b) 14 mm, dan (c) 13 mm

Berdasarkan kontur 3D *volume rendering* untuk *velocity* pada Gambar 10, didapatkan bahwa profil aliran air yang didapat pada setiap *inlet* memiliki profil yang serupa pada gambar (a) yaitu *nozzle* dengan diameter 15 mm, (b) diameter 14 mm dan (c) diameter 13mm, kecepatan maksimal secara berturut-turut sebesar 7,738 m/s, 7,709 m/s, dan 7,703 m/s. Berdasarkan hasil 3D dengan *volume rendering velocity* yang dihasilkan berdasarkan hasil simulasi CFD, fenomena erosi juga terjadi pada *nozzle* dengan diameter 15mm, meskipun dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan dengan laju aliran 3,3 kg/s.



Gambar 10. 3D *Volume Rendering Velocity* Konfigurasi 2 Pada *Inlet*: (a) 15 mm, (b) 14 mm, dan (c) 13 mm



Gambar 11. (a) Grafik Perbandingan Efisiensi Turbin Teoritis dan Simulasi Variabel 2, dan (b) Grafik Perbandingan  $V_{jet}$  Eksperimental dan Simulasi Variabel 2

Berdasarkan pada grafik yang diperoleh, perhitungan secara teoritis berbanding terbalik dengan perhitungan dengan menggunakan hasil simulasi. Dapat dilihat bahwa pada hasil simulasi, semakin kecil nosel maka semakin besar efisiensi turbin yang dihasilkan. Hal ini bertentangan dengan pernyataan dimana semakin besar nosel maka semakin besar efisiensi turbin yang dihasilkan. Hal ini kemungkinan disebabkan karena fenomena erosi yang terjadi pada bagian *spear* dari *nozzle*. Pada nosel 15 mm, selisih yang didapat sebesar 3,18%, nosel 14 mm didapat selisih sebesar 22,64% dan pada nosel 13 mm didapat selisih sebesar 58,05%. Selain itu pada grafik (b) konfigurasi 2, dapat diketahui bahwa semakin kecil diameter nosel maka  $V_{jet}$  yang dihasilkan semakin besar. Pada hasil simulasi yang diperoleh, semakin kecil diameter nosel maka semakin kecil juga  $V_{jet}$  yang dihasilkan. Efektivitas hasil simulasi CFD pada kecepatan yang lebih rendah menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan pada simulasi pada kecepatan fluida yang lebih rendah.

## SIMPULAN

Simulasi CFD pada Sistem Turbin Pelton kapasitas 1 kW dengan variasi diameter *spear nozzle* 13 mm, 14 mm dan 15 mm dan variasi laju aliran dengan konfigurasi 1 (3,3 kg/s) dan konfigurasi 2 (1,3 kg/s) telah dilakukan. Penggunaan *nozzle* dengan diameter 15 mm menghasilkan profil kecepatan yang lebih konsisten dibandingkan dengan variasi diameter *nozzle* lain yang ditunjukkan melalui intensitas *splashing water* yang lebih sedikit saat menumbuk *bucket* meskipun terjadi fenomena erosi yang lebih besar pada *spear*. Berdasarkan pengolahan data secara teoritis, dapat diketahui bahwa pada konfigurasi 1, nosel 15 mm memiliki efisiensi paling besar yaitu 1,97% namun memiliki daya terendah yaitu 594,08 watt. Namun dalam konfigurasi 2, nosel 13 mm memiliki nilai efisiensi paling besar yaitu 110,5% dan memiliki daya turbin terendah sebesar 30,39 watt.

Apabila dibandingkan dengan hasil eksperimen yang sudah dilakukan dengan menggunakan *nozzle* dengan diameter 15 mm, hasil simulasi CFD menunjukkan hasil yang konsisten untuk kedua konfigurasi. Efektivitas hasil simulasi CFD pada kecepatan yang lebih tinggi menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan pada simulasi pada kecepatan fluida yang lebih rendah. Dengan demikian, peningkatan unjuk kerja sistem pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan variasi diameter *nozzle* lebih besar dari 15 mm.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] "World Energy Outlook 2022." [Online]. Available: [www.iea.org/t&c/](http://www.iea.org/t&c/)
- [2] UN, "Sustainable Development Goals," vol. 16301, no. October, pp. 1–35, 2015.
- [3] L. L. Ladokun, B. F. Sule, K. R. Ajao, and A. G. Adeogun, "Resource assessment and feasibility study for the generation of hydrokinetic power in the tailwaters of selected hydropower stations in Nigeria," *Water Science*, vol. 32, no. 2, pp. 338–354, 2018, doi: 10.1016/j.wsj.2018.05.003.
- [4] F. J. Sangari, P. T. D. Rompas, T. Leonard, and S. Spence, "Optimize Performance of Cross Flow Turbine with Multi Nozzle Optimize Performance of Cross Flow Turbine with Multi Nozzle," 2018.
- [5] Y. Xiao *et al.*, "The interaction between bucket number and performance of a Pelton turbine," *Energy*, p. 129646, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129646>.
- [6] M. Putra Rizky and F. Kurniawan, "ANALISA KINERJA TURBIN PELTON 2 NOZLE DENGAN VARIASI JUMLAH BUCKET," Online, 2022.
- [7] S. Sarjono, "Pengaruh Variasi Diameter dan Jarak Nosel Terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Pelton," *J Teknol*, vol. 14, no. 2, pp. 180–185, Dec. 2021, doi: 10.34151/jurtek.v14i2.3716.
- [8] Andi Dwi Fernanda and Priyo Heru Adiwibowo, "PENGARUH VARIASI DIAMETER UJUNG NOSSEL TERHADAP DAYA DAN EFISIENSI TURBIN PELTON | Jurnal Rekayasa Mesin." Accessed: Apr. 05, 2023. [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-rekayasa-mesin/article/view/42542>

- [9] I. H. Jung, Y. S. Kim, D. H. Shin, J. T. Chung, and Y. Shin, "Influence of spear needle eccentricity on jet quality in micro Pelton turbine for power generation," *Energy*, vol. 175, pp. 58–65, May 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.077.
- [10] T. Staubli *et al.*, "Efficiency increase by jet quality improvement and reduction of splashing water in the casing of Pelton turbine' EFFICIENCY INCREASE BY JET QUALITY IMPROVEMENT AND REDUCTION OF SPLASHING WATER IN THE CASING OF PELTON TURBINES," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228496314>
- [11] B. Suyesh, V. Parag, D. Keshav, A. M. Ahmed, and O. Abdul-Ghani, "Novel trends in modelling techniques of Pelton Turbine bucket for increased renewable energy production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 87–101, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.045.
- [12] L. Han, G. F. Zhang, Y. Wang, and X. Z. Wei, "Investigation of erosion influence in distribution system and nozzle structure of pelton turbine," *Renew Energy*, vol. 178, pp. 1119–1128, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.06.056.