

Performance of Pelton Turbine utilizing the Variations of Bucket Number, Nozzle Number, and Nozzle Diameter Using Computational Fluid Dynamics

Wahyudi¹, Retno Wulandari^{2*} dan Redyarsa Dharma Bintara²

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang

*Corresponding author: retno.wulandari.ft@um.ac.id

Abstract. Nowadays, electricity becomes primary needs of humans in order to make their life better. The electricity demand has grown up approximately 6 % every year, constantly until 2050. That value increases 7.4 times compared to 2016 consumption. On the other hand, Indonesia has overflow water resources which could be utilized as potential energy to rotate a turbine to produce electricity. One of the devices commonly used is Pelton turbine. The study aimed to make an efficient design of Pelton turbine. The design was analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) approach. CFD is specific knowledge which concerns on how to predict a flowing liquid, heat transfer, chemistry reaction, and other phenomena through mathematical perspective. The method used in this study is numerical simulation using ANSYS 17.0 software specific on CFX analysis. The variable in this study was the number of bucket of 17 and 18, the number of nozzle of 1 and 2, as well as the nozzle diameter of 5 and 8 mm. The results showed the most optimal efficiency value in the variation of the number of buckets 18 with the number of nozzles 2 and 5 mm nozzle diameter of 59.58%. Based on the Minitab analysis chart using the Taguchi method, the main effect plot for the mean shows a high variable effect on the number of buckets 18, number of nozzles 2 and nozzle diameter 5 mm.

Abstrak. Energi listrik menjadi kebutuhan utama manusia dalam memenuhi kehidupan sehari-hari. Kebutuhan listrik meningkat rata-rata sebesar 6,0% per tahun hingga tahun 2050 atau menjadi 7,4 kali lipat dari konsumsi tahun 2016. Indonesia memiliki sumber air yang sangat berlimpah sehingga dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik. Salah satu alat yang memanfaatkan potensi air untuk menghasilkan listrik adalah turbin air Pelton. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis unjuk kerja turbin Pelton dengan variasi jumlah *bucket*, jumlah *nozzle* dan diameter *nozzle*. Turbin Pelton yang dirancang kemudian dianalisis menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD mempelajari cara memprediksi aliran *fluida*, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya menyesuaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi numerik (kajian eksperimen semu) dengan menggunakan *software* ANSYS 17.0 jenis analisis CFX. Variabel pada penelitian ini adalah jumlah *bucket* yaitu 17 dan 18, jumlah *nozzle* yaitu 1 dan 2 serta diameter *nozzle* yaitu 5 mm dan 8 mm. Hasil penelitian menunjukkan nilai efisiensi paling optimal pada variasi jumlah *bucket* 18 dengan jumlah *nozzle* 2 dan diameter *nozzle* 5 mm sebesar 59,58%. Berdasarkan grafik analisis Minitab menggunakan metode Taguchi diperoleh *main effect plot for mean* menunjukkan pengaruh variabel yang tinggi pada jumlah *bucket* 18, jumlah *nozzle* 2 dan diameter *nozzle* 5 mm.

Kata kunci: Turbin Pelton, *Computational Fluid Dynamics*, Metode Taguchi.

© 2019. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Energi alam adalah sesuatu yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan dan kebutuhan hidup manusia. Berdasarkan sumbernya energi dibagi menjadi dua *renewable energy and non-renewable energy*. Sumber energi yang *renewable* atau dapat didaur ulang seperti energi kayu, biomasa dan biogas. Sedangkan energi *non-renewable* (energi fosil) seperti minyak bumi, batu bara dan gas alam adalah sumber energi yang tidak dapat diperbarui. Saat ini penggunaan energi fosil secara berlebihan menyebabkan cadangan minyak bumi Indonesia mengalami penurunan 0,74%, dan gas bumi sebesar 5,04% pada tahun 2016. Menurut data dari SKK Migas, cadangan minyak yang sudah diproduksi adalah 92,1 % terhadap total cadangan, sedangkan cadangan gas bumi yang telah diproduksi sebesar 34,5% terhadap total cadangan. Produksi minyak bumi saat ini sebesar 338 juta barel, diperkirakan cadangan minyak akan habis dalam kurun waktu 9 tahun dan gas bumi akan habis dalam kurun waktu 42 tahun [4].

Kebutuhan energi listrik menjadi kebutuhan utama manusia dalam memenuhi kebutuhan hidup sehari-hari. Pemanfaatan energi listrik terus berkembang mengingat inovasi teknologi berbasis listrik tumbuh pesat dan digunakan hampir di beberapa sektor, terutama di sektor rumah tangga dan komersial. Kebutuhan listrik meningkat rata-rata sebesar 6,0% per tahun hingga tahun 2050 atau menjadi 7,4 kali lipat dari konsumsi tahun 2016 [4]. Indonesia memiliki sumber air yang sangat berlimpah sehingga dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik dan juga sebagai salah satu alternatif untuk membantu masyarakat dalam penyediaan energi listrik. Pembangkit listrik tenaga picohidro merupakan pembangkit listrik berskala kecil yang menghasilkan daya 100 sampai 5000 Watt [3].

Pembangkit Listrik Tenaga Picohidro (PLT MPH) adalah pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air sebagai tenaga penggeraknya. Dalam pengaplikasiannya PLTPH bisa menggunakan saluran irigasi, sungai atau air terjun dalam sistem penggeraknya dengan memanfaatkan tinggi jatuh air (*head*) dan jumlah debit air. Secara teknis, *picohidro* memiliki tiga komponen utama yaitu air sebagai sumber energi, turbin dan *generator*. Picohidro mendapatkan energi dari aliran air yang memiliki beda ketinggian. Salah satu alat yang memanfaatkan air untuk menghasilkan listrik adalah turbin air. Turbin air adalah mesin penggerak atau mesin konversi energi yang merubah energi potensial

dari jatuh air menjadi energi kinetik ketika *nozzle* menyemprotkan air yang mengenai *bucket* kemudian diteruskan pada sistem transmisi sehingga menjadi energi mekanik [5].

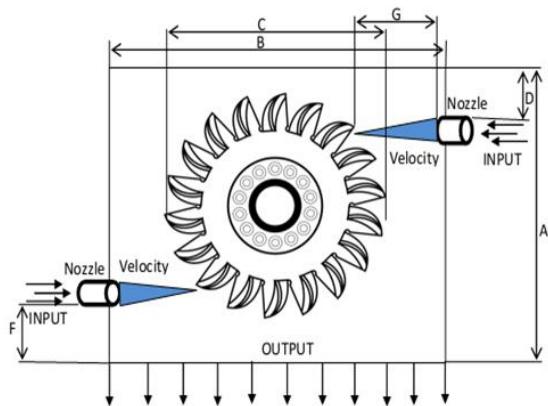
Penelitian pada turbin air tipe Pelton dengan mencari unjuk kerjanya (efisiensi tertinggi) baik secara eksperimental maupun komputasional telah banyak dilakukan dengan melakukan pengujian pada berbagai variasi seperti dimensi suku turbin, tinggi air jatuh, jumlah *nozzle* dan jumlah *bucket* [6, 8, 9 10]. Simulasi CFD untuk mengetahui unjuk kerja turbin air Pelton dengan dua pendekatan FLS/*Fluent* dan CFX menunjukkan bahwa efisiensi maksimum tidak tergantung pada bentuk *bucket* melainkan pada putaran spesifik turbin [1]. Jumlah *bucket* menjadi parameter penting dalam mencari nilai efisiensi kerja turbin Pelton, pada penelitian [1] diperoleh nilai efisiensi 0,8 % untuk jet tunggal dan 0,4 % jet ganda, selain itu penempatan jet dan jumlah *bucket* mempengaruhi tingkat efisiensi turbin Pelton. Penelitian tentang desain turbin Pelton dengan lengan tunggal dengan tujuan untuk meminimalkan berat dari *bucket* mendapatkan bahwa tekanan permukaan *bucket* sebesar 159 kPa, nilai *safety* faktor maksimum 15 dan minimum 2,43 [7]. Simulasi (CFD) pada turbin Pelton untuk mengetahui struktur *bucket* [2] menunjukkan jika aliran jet yang tinggi mengakibatkan *failure* atau keretakan pada *bucket* dan getaran yang ditimbulkan dari mekanisme mesin.

Melalui identifikasi masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis unjuk kerja turbin Pelton dengan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian ini untuk mencari nilai efisiensi tertinggi turbin Pelton. Simulasi numerik dilakukan untuk mengetahui parameter utama operasional yaitu torsi dan *linear velocity*.

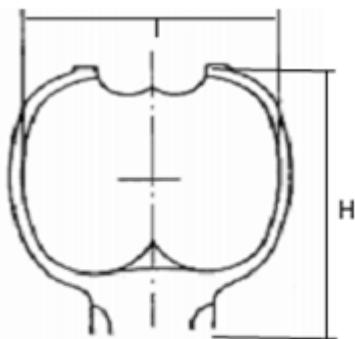
Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian eksperimental semu (*modelling experiment*) dengan menggunakan perangkat lunak komputer *Autodesk Inventor* untuk membuat geometri turbin Pelton dan ANSYS untuk mengetahui distribusi aliran fluida unjuk kerja turbin Pelton terhadap pengaruh dari variabel bebas yaitu variasi jumlah *bucket*, jumlah *nozzle* dan dimensi *nozzle*, serta variabel terikat pada penelitian ini adalah unjuk kerja (torsi dan *linear velocity*) turbin Pelton.

Desain turbin Pelton dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 1. Desain rancangan turbin Pelton



Gambar 2. Desain rancangan bucket turbin Pelton

Keterangan untuk Gambar 1 dan Gambar 2 dari rancangan desain turbin Pelton sebagai berikut.

Input : masuknya *fluida* air pada *nozzle*
Output : tempat keluarnya *fluida* pada bagian casing bawah.

Velocity: kecepatan aliran *fluida*

A : lebar *casing* = 280 mm
 B : Panjang *casing* = 280 mm
 C : diameter turbin Pelton = 2400
 D : jarak *casing* dengan *nozzle* 1 = 20 mm

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur yang berkaitan dengan dan analisis unjuk kerja turbin Pelton, tahap selanjutnya adalah:

- Perancangan desain komponen, yaitu mencari dimensi minimum yang diizinkan dalam mendesain sesuai dengan rumus-rumus yang ada sebagai dasar acuan dalam mendesain, kemudian membuat *geometri* turbin Pelton menggunakan *software Autodesk Inventor 2013*.
- Computational Fluid Dynamics (CFD)*, Tahap ini menganalisis desain dan perencanaan menggunakan metode *Computational Fluid*

Dynamics dengan ANSYS CFX. Tahap-tahap yang dilakukan dalam CFD sebagai berikut.

Pre-processing, meliputi *setup geometry* (mendesain nozzle, casing dan menentukan sifat *fluida*, *meshing* (memberi penamaan *boundary* dan menentukan besar kecilnya *grid*), *setup boundary* (menentukan jenis *fluida*, kecepatan *fluida* dan material).

Processing, dalam tahap ini dimulai dengan *setting* konvergensi (residual/tingkat kepercayaan) dan banyaknya literasi (pembacaan grafik stabilitas dalam pembacaan faktor kesalahan atau data *konvergensi* maupun *devergensi*).

Post-processing, adalah tahap terakhir pembacaan CFD dalam hal ini adalah torsi dan *linear velocity*.

c. Optimasi desain,

Tahap ini merupakan proses untuk melakukan pengujian dan perbaikan terhadap kekurangan yang dapat terjadi pada desain turbin Pelton dan analisisnya menggunakan metode Taguchi.

d. Pengolahan dan analisis data,

Data dari hasil simulasi CFD diolah untuk dijadikan data dalam menghitung unjuk kerja turbin antara lain *angular velocity*, daya dan efisiensi.

Hasil dan Pembahasan

Data hasil penelitian ini berupa nilai torsi dan *linear velocity*, selanjutnya digunakan untuk perhitungan matematis agar diperoleh kecepatan putar, daya turbin dan efisiensi turbin. Pada penelitian ini menggunakan proses simulasi numerik dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penentuan variasi dalam pengambilan data diperoleh berdasarkan skala turbin yang digunakan yaitu skala laboratorium, yang mempunyai nilai ketinggian air sebesar 12 meter dan debit air sebesar $0,00014 \text{ m}^3/\text{s}$. Dua parameter tersebut yang menjadi patokan dalam pemilihan variabel bebas yang diteliti. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah jumlah *bucket* (17,18) jumlah *nozzle* (1,2) dan diameter *nozzle* (5, 8 mm).

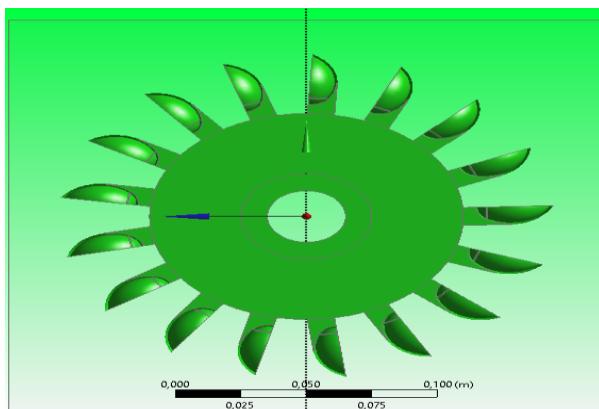
Proses pengambilan data pada simulasi CFD dilakukan setelah menentukan variasi penelitian. Rancangan desain yang sudah diperoleh dari perhitungan kemudian digambar menggunakan *software* Inventor. Desain dari inventor dengan format IGS kemudian di *import* pada *software* Ansys dengan tipe simulasi CFX. Pemodelan geometri *fluida* menyesuaikan dimensi *casing* turbin. Kemudian pada proses *meshing default* (*smoothing=medium*, *min size* 0,165460 mm, *max face size* 16,5460 mm) menghasilkan jumlah elemen 1.522.270 dan node sebanyak 273.909.

Pengaturan *boundary condition* meliputi penentuan jenis fluida air, aliran turbulen, kecepatan aliran 15 m/s, densitas 1000 kg/m^3 , iterasi 100 dan sudut residual 0,00001. Sehingga pada *post-processing* diperoleh data berupa torsi dan *linear velocity*. Nilai *linear velocity* dan torsi digunakan sebagai parameter awal untuk menghitung unjuk kerja turbin Pelton selanjutnya.

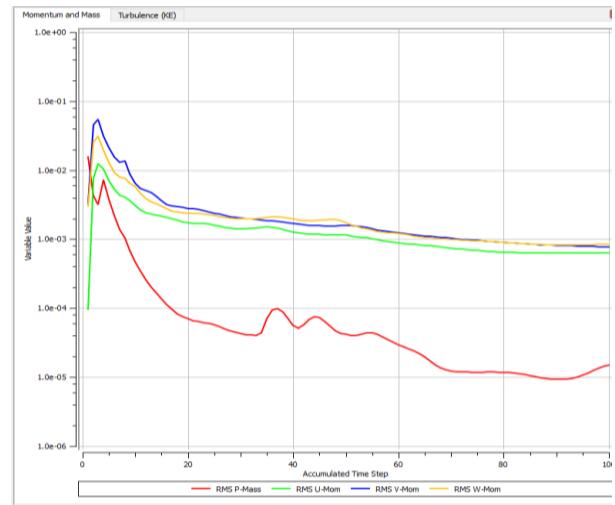
Tabel 1 Kondisi Batas Pengujian CFD

Lokasi	Boundary	CFX Detail
B1518 Fluid (water)	Fluid temperature 25 °C	Turbulence (k -Epsilon)
Nozzle Inlet	Inlet	Mass and momentum: normal speed 15 m/s
Cassing	Wall	Mass and momentum: No slip wall Wall roughness: Smooth
Under Casing (Outlet)	Opening	Mass and momentum: Relative pressure: 1 atm

Tahap *Pre-processing* meliputi *setup geometri* (mendesain nozzle, casing dan menentukan sifat fluida), *meshing* (memberi penamaan *boundary* dan menentukan besar kecilnya *grid*), *setup boundary* (menentukan jenis fluida, kecepatan fluida dan material) dan titik koordinat sumbu global harus berada pada sumbu axis dari turbin Pelton. Peletakan titik koordinat rancangan turbin air pada ditunjukkan Gambar 3.

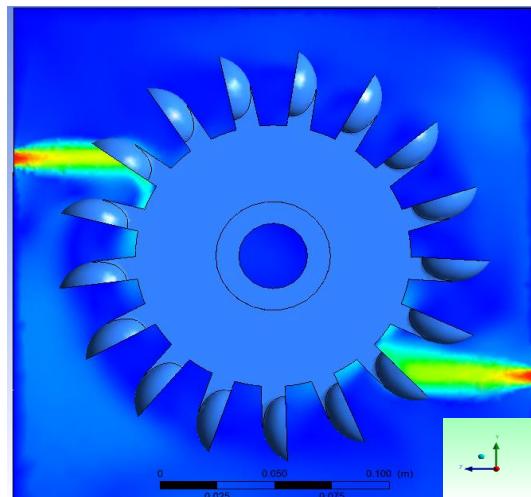


Gambar 3. Titik Koordinat Sumbu Global Turbin Air Pelton

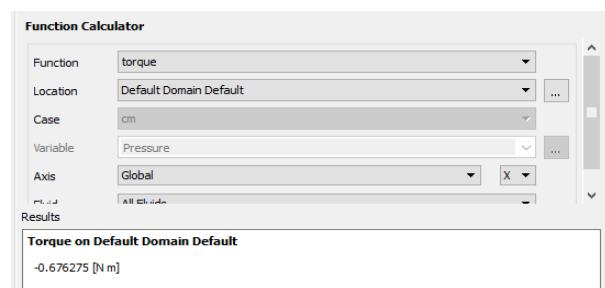


Gambar 4. Iterasi Simulasi Turbin Air Pelton

Tahap *processing* ditunjukkan pada Gambar 4, dimulai dengan *setting* konvergensi (residual/tingkat kepercayaan) dan banyaknya literasi (pembacaan grafik stabilitas dalam pembacaan faktor kesalahan atau data konvergensi maupun devergensi). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Data Processing Turbin Pelton pada Jumlah Bucket 17, 2 Nozzle, Diameter Nozzle 5 mm



Gambar 6. Post processing Turbin Pelton pada Jumlah Bucket 17, 2 Nozzle, Diameter Nozzle 5 mm

Tabel 2 Hasil Analisis Pengujian pada Software Ansys

Variasi No	Jumlah <i>Bucket</i>	Jumlah <i>Nozzle</i>	Diameter <i>Nozzle</i> (mm)	Torsi	Linear Velocity	Efisiensi
1	17	1	5	0,6991	8,142	44,79
2	17	2	5	1,5488	7,470	45,51
3	17	1	8	0,2766	5,723	12,45
4	17	2	8	0,6763	5,801	15,43
5	18	1	5	0,9373	8,008	59,06
6	18	2	5	1,9246	7,869	59,58
7	18	1	8	0,2583	7,646	15,54
8	18	2	8	0,5838	5,645	19,11

Pada gambar 6 pembacaan nilai torsi untuk jumlah *bucket* 17 dengan *nozzle* 2 dan diameter *nozzle* 5 mm sebesar 0,676 Nm. Nilai-nilai tersebut digunakan untuk menghitung daya dan efisiensi turbin Pelton. Data torsi dan *linear velocity* untuk keseluruhan variasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 memperlihatkan efisiensi turbin Pelton terendah pada jumlah *bucket* 17, jumlah *nozzle* 1 dan diameter *nozzle* 8 mm, yaitu sebesar 12 %. Efisiensi turbin tertinggi pada jumlah *bucket* 18, jumlah *nozzle* 2 dan diameter *nozzle* 5 mm, yaitu sebesar 59,58 %. Tingginya nilai efisiensi dipengaruhi oleh variabel diameter *nozzle* dan jumlah *bucket*. Pada *nozzle* dengan debit yang sama, maka semakin kecil diameter *nozzle* akan semakin besar kecepatan semprotan air yang menyebabkan nilai torsi juga semakin besar. Torsi yang semakin besar berbanding lurus dengan daya turbin yang dihasilkan. Efisiensi diperoleh dari perbandingan daya *input* air dengan daya yang dihasilkan turbin, sehingga daya turbin yang besar menghasilkan nilai efisiensi yang besar juga. Jumlah *bucket* berpengaruh terhadap nilai torsi yang dihasilkan, pengaruh ini berbanding terbalik, makin besar jumlah *bucket* nilai torsi makin kecil. Hal ini terjadi karena pada gaya semprot *nozzle* yang tetap, sementara jumlah *bucket* bertambah yang mengakibatkan massa turbin bertambah, sehingga kecepatan sudut menjadi berkurang dan nilai torsi menjadi lebih kecil.

Berdasarkan analisis Minitab dengan menggunakan metode Taguchi didapat hasil pada grafik *main effect plot for mean* OA L4 dan OA L8, kedua hasil ini menunjukkan diameter *nozzle* sangat berpengaruh terhadap unjuk kerja turbin air Pelton, karena memiliki perbedaan (delta) yang

besar antara titik garis bawah dengan titik garis atas.

Sesuai dengan pembacaan grafik *main effect plot for mean* jika memiliki nilai delta yang besar maka variabel tersebut sangat berpengaruh terhadap variabel terikat. Hasil metode Taguchi kemudian divalidasi menggunakan metode Anova untuk mencari persentase kontribusi variabel terhadap efisiensi turbin air Pelton. Berdasarkan metode Anova didapatkan bahwa pada OA L4, kontribusi variabel jumlah *bucket* sebesar 3,81%, jumlah *nozzle* sebesar 3,70% dan diameter *nozzle* sebesar 92,49%. Sedangkan untuk OA L8, kontribusi variabel jumlah *bucket* sebesar 3,69%, jumlah *nozzle* sebesar 0,95% dan diameter *nozzle* sebesar 94,79%. Hasil dari metode Anova ini didapatkan bahwa kontribusi variabel diameter *nozzle* paling signifikan terhadap unjuk kerja turbin air Pelton, selanjutnya adalah variabel jumlah *bucket* dan terakhir adalah variabel jumlah *nozzle*.

Kesimpulan

Dari penelitian ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

Unjuk kerja turbin air Pelton paling optimal pada variasi jumlah *bucket* 18, *nozzle* 2 dan diameter *nozzle* 5 mm dengan nilai tertinggi dari *linear velocity* sebesar 8,1 m/s, torsi sebesar 1,9246 Nm, daya turbin sebesar 189 Watt dan efisiensi sebesar 59,58 %.

Nilai *linear velocity* mempengaruhi unjuk kerja turbin air Pelton karena semakin besar nilai *linear velocity* semakin besar pula kecepatan tangensial turbin. Kecepatan tangensial turbin berbanding lurus dengan putaran turbin. Putaran turbin mempengaruhi nilai daya dan efisiensi turbin.

Jumlah dan diameter *nozzle* menjadi faktor utama penentu besarnya nilai torsi yang mempengaruhi unjuk kerja dari turbin air Pelton. Nilai torsi pada jumlah *nozzle* 2 lebih besar dari jumlah *nozzle* 1 dan pada debit yang sama nilai torsi pada *nozzle* dengan diameter 5 mm lebih besar dari torsi pada *nozzle* dengan diameter 8 mm. Nilai torsi berbanding lurus dengan nilai daya turbin.

Hasil metode Anova pada OA L4, menunjukkan bahwa nilai kontribusi variabel jumlah *bucket* sebesar 3,81%, jumlah *nozzle* sebesar 3,70% dan diameter *nozzle* sebesar 92,49%. Sedangkan untuk OA L8, kontribusi variabel jumlah *bucket* sebesar 3,69%, jumlah *nozzle* sebesar 0,95% dan diameter *nozzle* sebesar 94,79%. Hasil ini menunjukkan bahwa variabel diameter *nozzle* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap unjuk kerja turbin air Pelton.

Penghargaan

Terimakasih disampaikan kepada jurusan teknik mesin Universitas Negeri Malang khususnya Laboratorium Simulasi dan Desain yang telah membantu terlaksananya penelitian ini dan memfasilitasi perangkat keras dan lunak (*software Ansys*) sebagai sarana penelitian.

References

- [1] Audrius, Ž., & Aggidis, G. A. 2015. State of the art in numerical modelling of Pelton turbines. *Energy*, 45, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.037>.
- [2] Egusquiza, M., Egusquiza, E., Valentin, D., Valero, C., & Presas, A. 2017. Failure investigation of a Pelton turbine runner. *Engineering Failure Analysis*, 81(06), 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.06.048>.
- [3] Jung, I. H., Kim, Y. S., Shin, D. H., Chung, J. T., & Shin, Y. 2019. Influence of spear needle eccentricity on jet quality in micro Pelton turbine for power generation. *Energy*, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.077>
- [4] Outlook Energi Indonesia. 2018. *Energi Berkelanjutan untuk Transportasi Darat*. Jakarta: BPPT Outlook Energi Indonesia.
- [5] Wulandari, R., Maharani, D., Permanasari, A.A., 2017. Design and analysis of goose-leg waterwheel next-G using computational fluid dynamics (CFD). *AIP Conference Proceedings* 1887, 020050.
- [6] Sani, A. E. 2019. Design and Synchronizing of Pelton turbine with centrifugal pump in RO package. *Energy*, 172, 787–793. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.144>
- [7] Sentanuhady, J. 2016. Analysis and Numerical Simulation for Low Head Pelton Turbine Operated in Grojogan Sewu Waterfall. *Thermofluid*.10 (11), 67–74.
- [8] Susatyo, A., & Hakim, L. 2003. Perancangan Turbin Pelton. *Pusat Penelitian Informatika LIPI*, 1–13.
- [9] Zeng, C., Xiao, Y., Luo, Y., Zhang, J., Wang, Z., Fan, H., & Ahn, S. H. 2018. Hydraulic Performance Prediction Of A Prototype Four-Nozzle Pelton Turbine By Entire Flow Path Simulation. *Renewable Energy*, 125, 270–282. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.075>
- [10] Židonis, A., & Aggidis, G. 2016. Pelton turbine: Identifying the optimum number of buckets using CFD. *Journal of Hydrodynamics* Vol.28 (1). (75-83). <http://www.sciencedirect.com/science/journal/10016058>.