

Pemodelan XGBoost untuk Prediksi Efisiensi Gravitational Water Vortex Turbine

¹ Putri Sahira, ² Nailul Fadhillah, ³ Ro. Chantika Darajat, ^{4*} Samsurizal

^{1,2,3,4} Teknik Elektro Institut Teknologi PLN

E-mail: ¹putri2311009@itpln.ac.id, ²nailul2311332@itpln.ac.id, ³ro2311328@itpln.ac.id,
⁴samsurizal@itpln.ac.id

Penulis Korespondens : Samsurizal

Abstrak— Urgensi transisi menuju sumber energi terbarukan menuntut inovasi dalam pemanfaatan sumber daya lokal yang efisien dan berkelanjutan. Salah satu potensi yang menjanjikan adalah *Gravitational Water Vortex Turbine* (GWVT), yaitu sistem pembangkit listrik skala kecil yang memanfaatkan aliran air tanpa bendungan besar, cocok untuk daerah terpencil dengan aliran sungai kecil. Namun, efisiensinya sangat bergantung pada berbagai parameter geometri dan hidrolis. Untuk mengoptimalkan efisiensi GWVT, penelitian ini mengusulkan pendekatan *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model mampu memprediksi efisiensi dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,89. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa debit air, jarak sudu outlet, dan diameter outlet merupakan parameter paling berpengaruh terhadap efisiensi. Hasil ini menunjukkan bahwa metode ini berpotensi menjadi alat prediksi yang efektif untuk mendukung optimasi desain *Gravitational Water Vortex Turbine*.

Kata Kunci— Energi Terbarukan , *Extreme Gradient Boosting*, *Gravitational Water Vortex Turbine*

Abstract— The urgency of the transition to renewable energy sources demands innovation in the efficient and sustainable use of local resources. One promising solution is the *Gravitational Water Vortex Turbine* (GWVT), a small-scale power generation system that utilizes water flow without the need for large dams, making it suitable for remote areas with small rivers. However, its efficiency is highly dependent on various geometric and hydraulic parameters. To optimize GWVT efficiency, this study proposes the *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) approach. The results show that the model is capable of predicting efficiency with a coefficient of determination of 0.89. Sensitivity analysis indicates that water flow rate, outlet blade distance, and outlet diameter are the parameters most influential on efficiency. These results suggest that this method has the potential to serve as an effective predictive tool to support the design optimization of the *Gravitational Water Vortex Turbine*.

Keywords— Renewable Energy, *Extreme Gradient Boosting*, *Gravitational Water Vortex Turbine*

This is an open access article under the CC BY-SA License.



I. PENDAHULUAN

Indonesia terus mendorong pemanfaatan energi baru dan terbarukan sebagai upaya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus mendukung target bauran energi nasional. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar adalah energi air karena ketersediaannya yang melimpah dan dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan [1]. Namun, pemanfaatan energi air skala kecil masih menghadapi berbagai kendala, seperti kebutuhan infrastruktur yang relatif mahal, keterbatasan kondisi geografis, serta ketergantungan teknologi konvensional terhadap head yang tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan banyak potensi energi

air di daerah pedesaan dan terpencil belum termanfaatkan secara optimal [2]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi pembangkit listrik tenaga air yang lebih sederhana, ekonomis, dan mampu beroperasi pada kondisi sumber daya air yang terbatas untuk mendukung penyediaan energi yang berkelanjutan.

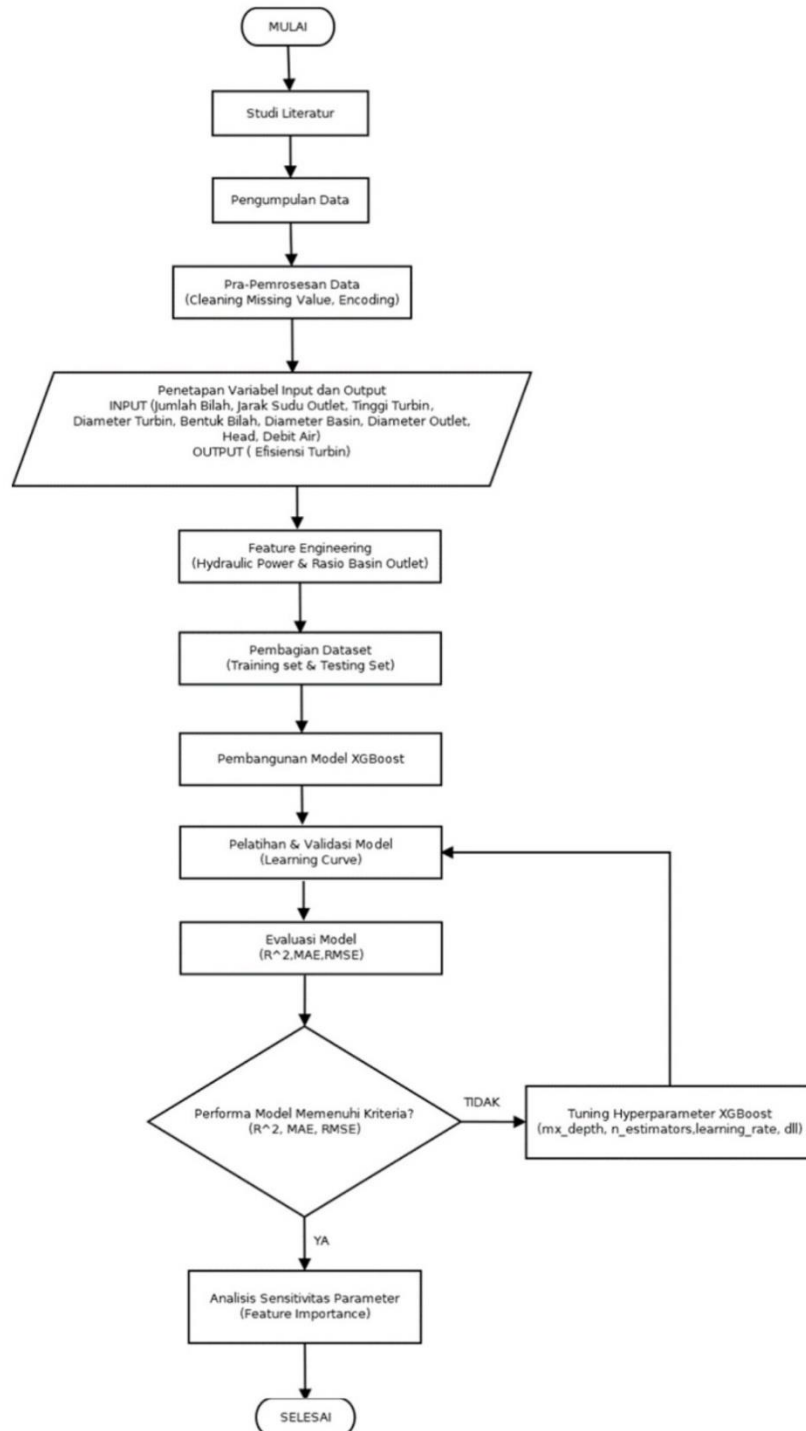
Salah satu teknologi yang berkembang untuk menjawab tantangan tersebut adalah Gravitational Vortex Water Turbine (GWVT) [3-5]. Teknologi ini memanfaatkan pusaran air (vortex) yang terbentuk pada suatu basin untuk mengonversi energi potensial dan kinetik air menjadi energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik [6]. Dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga air konvensional, GWVT memiliki beberapa keunggulan, seperti mampu beroperasi pada kondisi head rendah, tidak memerlukan bendungan besar, memiliki konstruksi yang relatif sederhana, biaya pembangunan yang lebih rendah, serta lebih ramah terhadap ekosistem perairan [7]. Menurut Maika dkk. [4], GWVT merupakan teknologi mikrohidro yang menjanjikan karena mampu menghasilkan energi pada kondisi head rendah dengan dampak lingkungan yang relatif kecil. Namun demikian, performa GWVT dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti debit aliran, geometri basin, diameter outlet, desain runner, jumlah sudu, serta karakteristik vortex yang terbentuk, sehingga proses perancangan dan optimasinya menjadi cukup kompleks.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan memahami karakteristik kerja GWVT. Velásquez dkk. [8] melakukan analisis numerik dan eksperimental terhadap profil vortex pada GWVT dan menunjukkan bahwa karakteristik aliran vortex sangat memengaruhi distribusi kecepatan serta performa turbin. Selain itu, Bajracharya dkk. [9] meneliti pengaruh parameter geometris pada GWVT dengan basin berbentuk kerucut dan menemukan bahwa diameter runner, tinggi runner, jumlah sudu, serta dimensi basin memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem. Hasil penelitian tersebut diperkuat oleh Septyaningrum dkk. [10] yang menunjukkan bahwa variasi sudut kerucut basin dan diameter outlet memengaruhi karakteristik vortex yang terbentuk sehingga berdampak langsung pada performa turbin. Lalu, Subekti dkk. [11] melakukan optimasi numerik dan pengujian performansi runner (sudu) pada desain turbin air vortex gravitasi, optimasi ini dilakukan dengan algoritma vortisitas permukaan menggunakan MATLAB, serta divalidasi desainnya menggunakan simulasi CFD, sedangkan prototipe diuji pada skala laboratorium untuk diukur efisiensi dan daya keluarannya. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa efisiensi GWVT dipengaruhi oleh banyak parameter yang saling berinteraksi dan membentuk hubungan yang kompleks serta nonlinier. Sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada pendekatan eksperimen laboratorium, simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD), dan analisis numerik yang memerlukan waktu komputasi tinggi serta biaya yang relatif besar untuk mengevaluasi berbagai kombinasi parameter desain.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu pendekatan yang mampu memodelkan hubungan kompleks antarparameter GWVT secara lebih efisien dan akurat. Salah satu metode yang berpotensi digunakan adalah Extreme Gradient Boosting (XGBoost), yaitu algoritma machine learning berbasis boosting yang memiliki kemampuan tinggi dalam menangani hubungan nonlinier, mengurangi risiko overfitting, serta menghasilkan akurasi prediksi yang baik. Keunggulan algoritma ini telah dibuktikan oleh Xu dkk. [12] dalam penelitian prediksi keluaran daya fotovoltaik jangka pendek, di mana metode XGBoost mampu meningkatkan akurasi prediksi melalui pemodelan hubungan yang kompleks antarvariabel masukan. Namun, penerapan XGBoost untuk memprediksi efisiensi Gravitational Vortex Water Turbine masih relatif terbatas dibandingkan penelitian yang berfokus pada eksperimen dan simulasi numerik. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pemodelan XGBoost untuk prediksi efisiensi Gravitational Vortex

Water Turbine berdasarkan parameter desain dan operasional yang memengaruhi kinerjanya. Model yang dihasilkan diharapkan mampu mempercepat proses evaluasi dan optimasi desain turbin, mengurangi kebutuhan pengujian berulang, serta mendukung pengembangan teknologi pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang lebih efektif dan berkelanjutan.

II. METODE



Gambar 1. Alur Penelitian

1) Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari berbagai jurnal, artikel ilmiah, prosiding, dan skripsi yang berkaitan dengan *Gravitational Water Vortex Turbine* (GWVT), parameter desain turbin, serta penerapan algoritma dalam prediksi performa turbin. Bertujuan memperoleh landasan teori, mengidentifikasi parameter yang berpengaruh terhadap efisiensi turbin, menentukan metode pemodelan untuk digunakan dalam penelitian.

2) Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai publikasi ilmiah yang memuat hasil eksperimen maupun simulasi GWVT. Teknik pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling* dengan memilih data yang memiliki parameter desain dan nilai efisiensi yang lengkap. Variabel yang digunakan meliputi jumlah bilah, jarak sudu outlet, tinggi turbin, diameter turbin, bentuk bilah, diameter basin, diameter outlet, head, dan debit air sebagai variabel input, serta efisiensi turbin sebagai variabel output. Data yang digunakan merupakan data sekunder sebanyak 128 dataset yang diperoleh dari 14 jurnal ilmiah dan penelitian terdahulu [3, 5 - 7, 13 - 22].

3) Pra-Pemrosesan Data

Tahap pra-pemrosesan data dilakukan untuk meningkatkan kualitas data sebelum digunakan dalam pembangunan model. Data yang tidak relevan seperti kolom kosong dan kolom tidak teridentifikasi dihapus dari dataset. Selanjutnya dilakukan pengecekan dan penghapusan data yang tidak memiliki nilai efisiensi. Variabel kategorikal berupa bentuk bilah diubah ke dalam bentuk numerik. Setelah dilakukan tahap pra-pemrosesan data, jumlah data yang digunakan pada tahap pemodelan menjadi 106 data.

4) Feature Engineering

Tahap ini dilakukan pembentukan fitur tambahan yang berpotensi meningkatkan kemampuan prediksi model. Fitur pertama adalah *hydraulic power*, dihitung menggunakan debit air dan head. Fitur kedua adalah rasio diameter basin terhadap diameter outlet. Kedua fitur ditambahkan ke dalam dataset dan digunakan bersama variabel asli sebagai input model.

5) Pembangunan Model XGBoost

Dataset yang telah diproses dibagi menjadi data pelatihan dan data pengujian dengan rasio 80:20 menggunakan metode train-test split. Model prediksi efisiensi turbin dibangun menggunakan algoritma Extreme Gradient Boosting (XGBoost) dengan parameter *n_estimators* sebesar 400, *max_depth* sebesar 2, *learning_rate* sebesar 0,03, *subsample* sebesar 0,8, *colsample_bytree* sebesar 0,8, *reg_alpha* sebesar 5, *reg_lambda* sebesar 6, dan *min_child_weight* sebesar 8.

6) Pelatihan dan Validasi Model

Model dilatih menggunakan data pelatihan dan kemudian diuji menggunakan data pengujian untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model. Selain itu dilakukan analisis *learning curve* untuk mengamati pengaruh jumlah data pelatihan terhadap performa model dan mendeteksi kemungkinan terjadinya *overfitting* atau *underfitting*.

7) Evaluasi Model

Kinerja model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2), Mean Absolute Error (MAE), dan Root Mean Square Error (RMSE). Nilai R^2 digunakan untuk mengukur kemampuan model dalam menjelaskan variasi data aktual, sedangkan MAE dan RMSE digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan prediksi model.

8) Analisis Sensitivitas Parameter

Analisis ini bertujuan mengetahui tingkat kontribusi masing-masing parameter desain terhadap efisiensi turbin. Hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik sensitivitas parameter sehingga dapat diketahui variabel yang paling dominan memengaruhi performa GWVT.

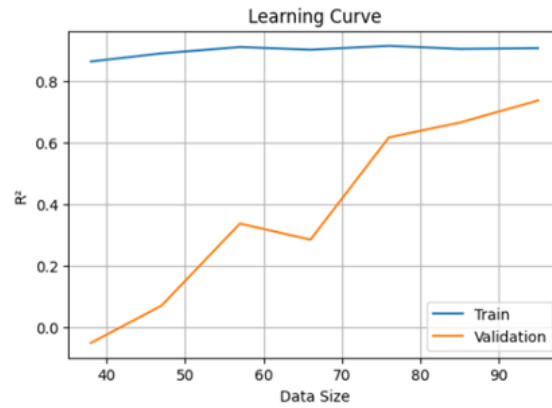
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini digunakan metode *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) untuk memodelkan hubungan antara parameter geometri dan hidrolis terhadap efisiensi *Gravitational Water Vortex Turbine* (GWVT). XGBoost dipilih karena mampu mempelajari hubungan nonlinier antarparameter secara lebih efisien melalui mekanisme boosting berbasis pohon keputusan. Model dibangun menggunakan beberapa parameter masukan yang meliputi jumlah bilah, jarak sudu terhadap outlet, tinggi turbin, diameter turbin, bentuk bilah, diameter basin, diameter outlet, head, dan debit air. Statistik deskriptif variabel ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Dataset

Parameter	N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
Jumlah Bilah	106	6.292	1.789	4	12
Jarak Sudu Outlet	106	0.103	0.056	0.02	0.28
Tinggi Turbin	106	0.171	0.174	0.015	0.9
Diameter Turbin	106	0.234	0.182	0.021	0.717
Diameter Basin	106	0.506	0.227	0.1	1
Diameter Outlet	106	0.16	0.209	0.015	0.8
Head	106	0.323	0.247	0.008	0.7
Debit Air	106	0.013	0.023	0	0.087
Bentuk Bilah	106	-	-	0 (Curved)	1 (Straight)
Hydraulic Power	106	30.218	40.703	0.215	154.507
Rasio Basin/Outlet	106	6.162	4.951	0.886	31.646

Berdasarkan Tabel 1, dataset yang digunakan memiliki variasi parameter geometri dan hidrolis yang beragam, menunjukkan bahwa data yang digunakan mampu merepresentasikan berbagai kondisi operasi dan konfigurasi GWVT. Keragaman parameter tersebut menunjukkan bahwa dataset mampu merepresentasikan berbagai variasi desain dan kondisi operasi GWVT. Perbedaan karakteristik pada setiap parameter, termasuk bentuk bilah *Curved* dan *Straight*, memberikan dasar yang memadai untuk menelaah pengaruh parameter geometri dan hidrolis terhadap efisiensi turbin. Untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model, dilakukan analisis menggunakan *learning curve* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.

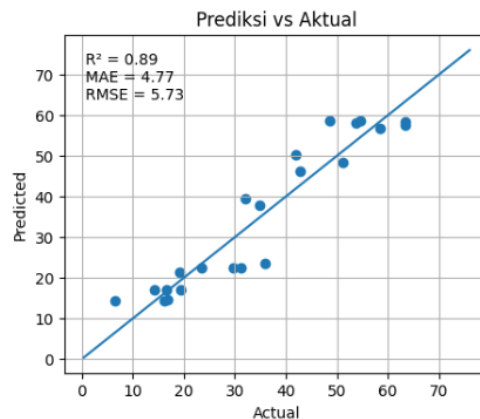


Gambar 2. Learning Curve Model XGBoost terhadap Efisiensi Gravitational Water Vortex Turbine

Tabel 2. Hasil Evaluasi Learning Curve Model XGBoost

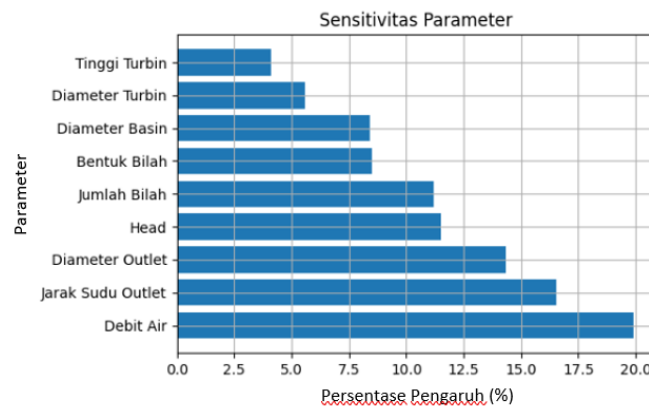
Data Size	Train R ²	Validation R ²
38	0.86	-0.05
47	0.89	0.07
57	0.91	0.34
66	0.90	0.28
76	0.91	0.62
85	0.90	0.66
95	0.91	0.74

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model XGBoost memiliki performa yang baik dalam memprediksi efisiensi Gravitational Water Vortex Turbine. Nilai koefisien determinasi (R^2) pada data pelatihan berada pada rentang 0,86 hingga 0,91, yang menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan lebih dari 86% variasi efisiensi berdasarkan kombinasi parameter yang digunakan. Sementara itu, hasil *learning curve* memperlihatkan bahwa pada ukuran data kecil kemampuan generalisasi model masih rendah, ditunjukkan oleh nilai R^2 validasi sebesar -0,05 pada data size 38. Seiring bertambahnya jumlah data pelatihan hingga 95 sampel, nilai R^2 validasi meningkat secara bertahap hingga mencapai 0,74, yang menunjukkan peningkatan kemampuan model dalam menangkap hubungan antarparameter secara lebih representatif.



Gambar 3. Perbandingan Predikdiksi vs Efisiensi Model

Gambar 3. menunjukkan perbandingan antara nilai efisiensi aktual dan nilai efisiensi prediksi menggunakan model XGBoost. Secara umum, titik-titik data berada di sekitaran garis diagonal (garis ideal). Hal ini menunjukkan bahwa hasil prediksi model memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Semakin dekat posisi titik data terhadap garis diagonal, semakin kecil selisih (*error*) antara nilai prediksi dan nilai aktual yang dihasilkan model. Hasil evaluasi menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.89 yang menandakan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 89% variasi efisiensi turbin. Selain itu, nilai MAE sebesar 4.77 dan RMSE sebesar 5.73 menunjukkan bahwa tingkat kesalahan prediksi relatif rendah. Meskipun terdapat titik-titik data yang menyimpang dari garis ideal, hal tersebut tidak terlalu berpengaruh signifikan terhadap performa model.



Gambar 4. Sensitivitas Parameter

Berdasarkan Gambar 4, model XGBoost mengidentifikasi bahwa parameter hidrolik memiliki pengaruh yang lebih dominan dibandingkan parameter geometri terhadap efisiensi GWVT. Debit air menjadi parameter yang paling berpengaruh terhadap efisiensi turbin dengan kontribusi 19,89%, menunjukkan bahwa aliran masuk berperan besar dalam pembentukan pusaran dan transfer energi. Sementara, parameter geometri seperti bentuk bilah, diameter basin, diameter turbin, dan tinggi turbin memiliki kontribusi lebih rendah. Hal ini juga memberikan implikasi bahwa optimasi parameter hidrolik khususnya debit air dan head menjadi prioritas dalam proses desain GWVT dibandingkan parameter lainnya.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) dapat digunakan untuk memodelkan hubungan antara parameter geometri dan hidrolik terhadap efisiensi *Gravitational Water Vortex Turbine* secara efektif. Pendekatan yang dikembangkan mampu mengidentifikasi pengaruh setiap parameter terhadap efisiensi. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk membangun model prediksi efisiensi dan menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi performa turbin telah tercapai. Penerapan metode *machine learning* pada penelitian ini memberikan alternatif yang lebih cepat dan efisien dibandingkan dengan eksperimen langsung atau simulasi numerik yang membutuhkan waktu lama dan memiliki keterbatasan dalam analisis hubungan kompleks antarparameter. Kontribusi penelitian ini diharapkan dapat mendukung proses perancangan dan optimasi GWVT serta memperluas pemanfaatan teknik kecerdasan buatan dalam mendukung transisi energi terbarukan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Institut Teknologi PLN (ITPLN) atas dukungan pendanaan melalui program *Student Research Challenge* (SRC) Tahun 2025. Apresiasi juga disampaikan kepada Yayasan Pendidikan dan Kesejahteraan PLN (YPK PLN), Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) ITPLN, serta Badan Koordinasi Kegiatan Mahasiswa dan Konseling (BKMK) ITPLN atas dukungan yang telah diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada tim peneliti yang telah berusaha sekuat tenaga menyelesaikan proses penelitian hingga penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IRENA, *Indonesia Energy transition Outlook*. 2022. Diakses melalui : [irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Oct/IRENA_Indonesia_energy_transition_outlook_2022.pdf](https://media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Oct/IRENA_Indonesia_energy_transition_outlook_2022.pdf)
- [2] Perusahaan Listrik Negara, *Statistics PLN 2024*, no. 01001–300625. 2025. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2025/07/Statistik-PLN-2024-Audited-Indo-Eng-Final-Compressed-update-sheet.pdf>
- [3] A. Susatyo, M. A. Putra, R. A. Subekti, H. Sudibyo, and M. F. Ritonga, “Eksperimen Turbin Air Very Low Head dengan Variasi Jumlah Sudu dan Variasi Debit,” *Jurnal Sains dan Teknologi Maritim (JSTM)*, vol. 25, no. 1, pp. 141–151, 2024, <https://doi.org/10.33556/jstm>
- [4] N. Maika, W. Lin, and M. Khatamifar, “A Review of Gravitational Water Vortex Hydro Turbine Systems for Hydropower Generation,” Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. <https://doi.org/10.3390/en16145394>
- [5] H. Ambarita, B. Hafid, I. Telaumbanua, I. Kamil, and F. H. Napitupulu, “Numerical and Experimental Study of Gravitational Water Vortex Turbine at Different Number of Blade,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Engineering Development and Technological Innovation*, 2023. <https://doi.org/10.4108/eai.11-10-2022.2326419>
- [6] I. Sinuraya, T. B. Sitorus, I. Kamil, and B. Ilmi, “Performance of a Vortex Turbine With Modifications to Flow Angle, Blade Inclination, and Flow Velocity for a Cylindrical Basin,” *Ecological Engineering and Environmental Technology*, vol. 25, no. 12, pp. 132–146, 2024, <https://doi.org/10.12912/27197050/193866>
- [7] D. Efriyasika, I. Qiram, and G. Rubiono, “Tingkat Kekasaran Permukaan Sudu dan Sudut Input Air terhadap Unjuk Kerja Turbin Vortex,” *JUSTE (Journal of Science and Technology)*, vol. 1, no. 2, pp. 182–194, 2021, <https://doi.org/10.51135/justevol1issue2page182-194>
- [8] L. Velásquez, A. Rubio-Clemente, and E. Chica, “Numerical and Experimental Analysis of Vortex Profiles in Gravitational Water Vortex Hydraulic Turbines,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 14, Jul. 2024, <https://doi.org/10.3390/en17143543>
- [9] T. R. Bajracharya *et al.*, “Effects of Geometrical Parameters in Gravitational Water Vortex Turbines with Conical Basin,” *Journal of Renewable Energy*, vol. 2020, pp. 1–16, Dec. 2020, <https://doi.org/10.1155/2020/5373784>
- [10] E. Septyaningrum, R. Hantoro, N. K. Mouti, W. R. Rahayu, and Sutardi, “Gravitational Vortex Water Turbine (GVWT) Conical Basin Design: the Effects of Cone Angle and

- Outlet Diameter on Vortex Characteristics,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 177–219, 2024, <https://doi.org/10.24191/jmeche.v21i1.25366>
- [11] R. A. Subekti *et al.*, “Runner profile optimisation of gravitational vortex water turbine,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 4777–4788, Oct. 2023, <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i5.pp4777-4788>
- [12] W. Xu, Z. Wang, W. Wang, J. Zhao, M. Wang, and Q. Wang, “Short-Term Photovoltaic Output Prediction Based on Decomposition and Reconstruction and XGBoost under Two Base Learners,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 4, Feb. 2024, <https://doi.org/10.3390/en17040906>
- [13] Mahadi and R. Novri, “Rancang Bangun Turbin Vortex Dengan Casing Berpenampang Lingkaran Yang Menggunakan Sudu Diameter 46 Cm Pada 3 Variasi Jarak Antara Sudu Dan Saluran Keluar,” *Jurnal Dinamis*, vol. 5, no. 2, pp. 36–46, 2017.
- [14] Moh. K. M. H. B. A. Herlina, “Pengaruh Bentuk Blade Turbin L Dan S Pada Gravitation Water Vortex Power Plant (GWVPP) Berbasis Basir Silinder,” *Cyclotron*, vol. 3, no. 2, pp. 31–36, 2020, <https://doi.org/10.30651/cl.v3i2.4583>
- [15] L. Fitriana, H. Saputro, A. Purwanto, D. S. Huda, and R. Muslim, “Mathematics Modelling and Experimental Study the Effect of Vortex Water Turbine Blade Design of Turbine Efficiency,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 1, pp. 401–414, 2025, <https://doi.org/10.21776/jrm.v16i1.1899>
- [16] Y. Lisado and P. H. Adiwibowo, “Eksperimental Pengembangan Sudut Sudu Berpenampang Lengkung Dengan Variasi Kelengkungan Terhadap Kinerja Turbin Reaksi Aliran Vortex,” *JTM Unesa*, vol. 9, no. 1, pp. 99–108, 2021. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jtm-unesa/article/view/38108>
- [17] A. Faraji, “Computational and Experimental Performance Analysis of a Runner for Gravitational Water Vortex Power Plant,” Nelson Mandela African Institution of Science and Technology, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.nm-aist.ac.tz/items/084e85e9-9c23-4377-8714-365797ee165c>
- [18] Muh. H. B. Hakki and Sukaddin, “Rancang Bangun dan Uji Untuk Kerja Turbin Vortex Menggunakan Dua Tipe Penampang Sudu,” Politeknik Negeri Ujung Pandang MUH., 2022.
- [19] H. M. Zainal and O. K. Ahmed, “Effect of the Design Variables on the Vortex Water Turbine Performance,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 314–330, 2025, <https://doi.org/10.14744/thermal.0000897>
- [20] P. Sritram and R. Suntivarakorn, “Comparative Study of Small Hydropower Turbine Efficiency at Low Head Water,” in *International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies*, Elsevier B.V., 2017, pp. 646–650. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.181>
- [21] “Hydraulic Design Method for Gravitational Vortex Type Water Turbines,” *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 58–75, 2025, <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2025.18.1.058>
- [22] T. Rachmanto, M. Sahlan, and Nurpatricia, “Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Vortex,” *Jurnal Keilmuan dan Terapan teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, p. 1, 2019. <https://doi.org/10.20961/nozel.v5i2.72139>