

Analisis Kerugian Turbin Unit 4 PLTA Tes Akibat Disposisi *Guide Vane*

Teddy Ardiansyah¹, Muhammad Ganta Wira Yudha²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Institut Sains dan Teknologi Nasional

Jl. Moch Kahfi II, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640, Indonesia

Email: teddy@istn.ac.id, gantawirayuda@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh disposisi *guide vane* pada Turbin Francis di PLTA Tes, Kabupaten Lebong, Bengkulu. Disposisi *guide vane* berpotensi menurunkan efisiensi turbin, meningkatkan getaran, serta memicu kerugian finansial akibat hilangnya produksi energi listrik. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, serta analisis data operasi dan pemeliharaan. Kehilangan energi dihitung dengan membandingkan performa turbin pada kondisi aktual dan saat terjadi disposisi. Hasil menunjukkan bahwa pada kondisi aktual, turbin Unit 4 menghasilkan daya rata-rata 3.820 kW dengan efisiensi sebesar 72%. Saat terjadi disposisi, unit harus dihentikan untuk perawatan. Sepanjang periode pengamatan, disposisi tercatat 12 kali dengan durasi penanganan rata-rata 30 menit per kejadian, sehingga menyebabkan kehilangan energi dan potensi pendapatan sebesar Rp 17,84 juta. Faktor pemicu utama meliputi masuknya material asing akibat kerusakan *trash rack*, gangguan pada mesin *racking*, serta terjadinya getaran. Penelitian ini menegaskan bahwa disposisi *guide vane* tidak hanya menurunkan keandalan turbin, tetapi juga meningkatkan risiko kerusakan komponen dan kerugian ekonomi. Upaya preventif terhadap sistem proteksi serta peningkatan keandalan mekanisme penggerak *guide vane* penting untuk meminimalkan gangguan operasi pembangkit.

Kata kunci: Disposisi, *Guide vane*, PLTA Tes, Kerugian, Turbin Francis.

Abstract

This study aims to evaluate the impact of guide vane disposition on the Francis turbine at the Tes Hydroelectric Power Plant, Lebong Regency, Bengkulu. Guide vane disposition has the potential to reduce turbine efficiency, increase vibration, and trigger financial losses due to the loss of electricity production. The methods used include field observation and analysis of operational and maintenance data. Energy loss is calculated by comparing turbine performance under actual conditions and when disposition occurs. The results show that under normal conditions, turbine Unit 4 produces an average power of 3,820 kW with efficiency of 72%. During disposition, the unit must be shut down for maintenance. Throughout the observation period, disposition occurred 12 times, with an average handling duration of 30 minutes per incident, leading to energy loss and a potential revenue loss of IDR 17.84 million. The main triggering factors include the entry of foreign materials due to trash rack damage, issues with the racking machine, and the occurrence of vibration. This study emphasizes that guide vane disposition not only reduces turbine reliability but also increases the risk of component damage and economic losses. Preventive efforts on the protection system and improvement of the guide vane drive mechanism reliability are crucial to minimize operational disruptions at the power plant.

Keywords: Disposition, Guide Vane, PLTA Tes, Losses, Francis Turbine.

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan yang signifikan. Pertumbuhan jumlah penduduk yang sangat pesat mendorong naiknya aktivitas ekonomi, industrialisasi, serta pemanfaatan teknologi di berbagai sektor kehidupan. Salah satu bentuk

pembangkit yang memiliki peran penting dalam bauran energi nasional adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). PLTA memanfaatkan energi potensial dari air, baik dari sungai maupun waduk, yang kemudian dialirkan untuk memutar turbin. Energi mekanik dari turbin dikonversi menjadi energi listrik melalui

generator. Komponen utama dalam sistem PLTA mencakup waduk, saluran air, turbin air, generator, serta transformator tenaga. Dibandingkan dengan pembangkit berbahan bakar fosil, PLTA menawarkan

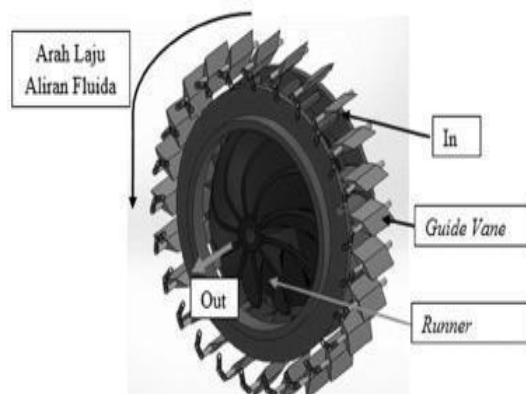
PLTA Tes, yang berlokasi di Kabupaten Lebong, Provinsi Bengkulu, adalah salah satu aset penting PT. PLN dalam menghasilkan listrik dari sumber daya air yang berasal dari danau Tes. Turbin Francis, yang digunakan di Unit 4 PLTA Tes merupakan jenis turbin reaksi yang umum digunakan pada PLTA dengan *head* menengah. Efisiensi dan kinerja turbin Francis sangat bergantung pada komponen-komponen utamanya, salah satunya adalah *guide vane*. *Guide vane* berfungsi untuk mengatur aliran air yang masuk ke *runner* turbin, sehingga memiliki peran krusial dalam optimalisasi efisiensi turbin. Namun, selama operasi jangka panjang, *guide vane* dapat mengalami disposisi atau penyimpangan posisi dari kondisi idealnya. Disposisi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti keausan, sedimentasi, atau masalah mekanis lainnya. Dampak dari disposisi *guide vane* terhadap kinerja turbin dapat signifikan dan dapat menyebabkan penurunan efisiensi (Ghozali et al., 2021), peningkatan getaran, dan potensi kerusakan komponen lainnya. Belum banyak dilakukan penelitian yang menganalisis secara kuantitatif kerugian finansial akibat posisi dari *guide vane* berdasarkan data operasional riil.

1.1 *Guide vane*

Guide vane adalah sebuah komponen yang mengubah energi tekanan dan energi kinetik dalam fluida menjadi energi mekanik pada sudu turbin, fluida yang akan memasuki *runner* dirancang dengan sudut tertentu untuk meminimalkan turbulensi aliran. Penempatan panduan sudu diatur sesuai dengan kebutuhan daya yang harus dihasilkan oleh pembangkit listrik, hal ini terlihat dalam prinsip kerja turbin Francis, di mana air diarahkan melalui rumah baja berbentuk spiral menuju panduan sudu yang tetap di dalam spiral tersebut, kemudian ke panduan sudu yang dapat disesuaikan dan selanjutnya ke *runner* Francis. Cara kerja

biaya operasional yang lebih rendah, ketersediaan energi yang relatif stabil, serta sifatnya yang ramah lingkungan karena menggunakan sumber energi terbarukan (Fathoni et al., 2025).

guide vane adalah dengan mengarahkan aliran air yang akan masuk ke dalam turbin. dengan demikian, setiap sudu turbin mendapatkan sudut serang air yang optimal, yang pada akhirnya memungkinkan komponen panduan sudu untuk meningkatkan efisiensi sistem aliran air. Skema kerjanya melibatkan pivot (poros) yang terhubung pada panduan sudu, sehingga pada area panduan sudu akan diberikan celah atau dibuka sesuai dengan bukaan yang diizinkan seperti pada Gambar 1.

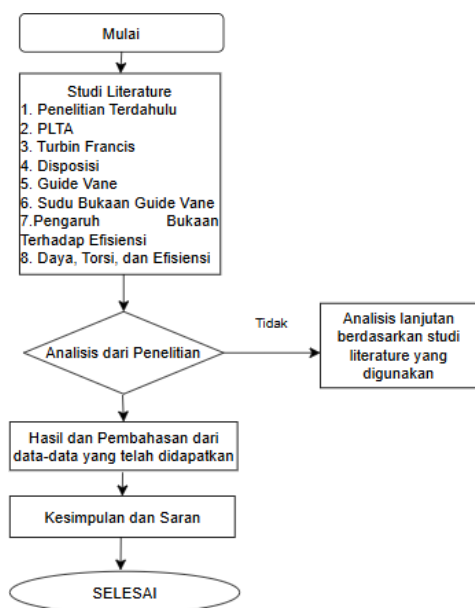


Gambar 1.
Komponen *guide vane* (Ghozali et al., 2021).

1.2 Studi Literatur

Penelitian yang menyangkut dampak dari *guide vane* terhadap efisiensi dari turbin sudah pernah dilaksanakan oleh beberapa peneliti. Pengaruh bukaan sudut dari *guide vane* dapat mempengaruhi terjadinya kavitasi pada turbin yang mengakibatkan terjadinya penurunan efisiensi (Alfarizi et al., 2024; Chen et al., 2024; Mafrudin & Marsuki, 2017; Sitompul et al., 2021; Vijay Kumar et al., 2022). Pengaruh kavitasi ini juga menyebabkan erosi pada turbin dan ketidakstabilan pada aliran (Chen et al., 2024; Ghozali et al., 2021; Kumar et al., 2024; Sitompul et al., 2021). Beberapa peneliti mencoba menganalisis efek dari bukaan sudut *guide vane* dengan menggunakan CFD maupun dengan mengontrol variasi bukaan sudut *guide vane* agar turbin bisa beroperasi secara optimal (Firdausi et al., 2016; Husen, 2021; Jakfar et al., 2022; Purnama

et al., 2025; Sudiatmika et al., 2021; Suryana et al., 2021). Efek sedimentasi yang menyebabkan erosi pada turbin dan menyebabkan penurunan efisiensi juga diteliti oleh peneliti lain baik secara eksperimental maupun secara numerik (Koirala et al., 2017; Shrestha et al., 2024; Thapa et al., 2015; Wang et al., 2024). Bukaan *guide vane* diketahui juga mempengaruhi efisiensi dari turbin (Sauri et al., 2022). (K. Kumar & Saini, 2022) di dalam penelitiannya menyatakan bahwa total biaya dari pembangkit listrik tenaga air sangat dipengaruhi oleh biaya operasi dan pemeliharaan yang akurat. Dengan latar belakang tersebut, penting untuk melakukan analisis lebih mendalam mengenai dampak dari *disposisi guide vane* pada turbin Francis terhadap kerugian turbin unit 4 PLTA Tes. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih baik mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi kerugian turbin dan memberikan rekomendasi untuk perbaikan maupun perawatan yang dapat meningkatkan kinerja PLTA secara keseluruhan. Penelitian ini mengintegrasikan analisis teknik performa turbin dengan pendekatan ekonomi yang berbasis biaya pokok produksi dan harga transfer energi aktual selama rentang waktu 1 minggu.



Gambar 2.
Diagram alur penelitian pada PLTA Tes Unit 4.

2. Metode Penelitian

Gambar 2 memperlihatkan diagram alir dari penelitian yang dilakukan. Dimana penelitian ini diawali dengan studi literatur sebagai landasan untuk memahami tentang *guide vane*, pengambilan data aktual di *control room* dan lapangan yang berupa data operasional turbin serta data pengaturan *guide vane* pada PLTA Tes. Lokasi penelitian ini dilaksanakan pada unit 4, PLTA Tes, yang berlokasi di Kabupaten Lebong, Provinsi Bengkulu selama 7 hari. PLTA Tes ini dimiliki oleh PT. PLN sebagai induk perusahaan melalui anak perusahaannya PT. PLN Indonesia Power.

2.1 Spesifikasi Turbin Unit 4 PLTA Tes

Unit 4 PLTA Tes dipilih sebagai objek penelitian karena memiliki peran signifikan dalam sistem pembangkitan serta mewakili karakteristik turbin Francis yang umum digunakan pada pembangkit listrik tenaga air skala besar. Dengan memahami spesifikasi detail unit ini, analisis dapat dilakukan secara lebih terarah, baik melalui perhitungan teoritis maupun perbandingan dengan data operasional aktual. Spesifikasi turbin unit 4, yang meliputi data teknis utama seperti head turbin, discharge aliran air masuk turbin, daya turbin, nominal putaran dinyatakan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi turbin unit 4

Head (H)	56 m
Discharge (Q)	9,65 m³/detik
Daya Turbin (P)	3.820 Kw
Putaran (N)	4,715 rpm
Tipe	Francis

2.2 Data Penelitian

Data yang diambil untuk penelitian ini adalah disposisi *guide vane* pada turbin Francis unit 4 PLTA Tes. Disposisi *guide vane* yang dimaksud merujuk pada sudut bukaan *guide vane* yang bergeser dari posisi normal. Perubahan sudut bukaan ini akan memengaruhi arah dan distribusi aliran air menuju *runner* turbin. Disposisi *guide vane* ini akan menimbulkan kerugian energi dan berdampak pada perubahan efisiensi turbin.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari perhitungan antara daya teoretis,

daya aktual, dan ketika terjadi disposisi dari turbin dapat dilihat pada gambar 3. Daya teoretis dari turbin dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$P_{teoretis} = p \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (1)$$

dengan

$$P = 3.820 \text{ kW}$$

$$g = 9,81 \text{ m/detik}$$

$$H = 56 \text{ m}$$

$$Q = 9,65 \text{ m}^3/\text{detik}$$

Sehingga nilai dari $P_{teoretis}$ adalah 5.301 kW. Sedangkan efisiensi dari turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{P_{aktual}}{P_{teoretis}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta = \frac{3.820}{5.301} \times 100\% = 72\%$$

Sehingga hasil perhitungan efisiensi turbin dengan menggunakan persamaan (2) adalah 72%. Efisiensi ini lebih rendah daripada turbin sejenis yang berada di kisaran 80% (Saputra, 2024).

Guide vane ketika tidak dalam kondisi normal (ketika terjadi disposisi) dengan ketika dalam kondisi normal dapat diketahui secara langsung melalui indikatornya dan pada layar *control room*. Ketika *guide vane* mengalami disposisi maka indikator akan menunjukkan pergeseran dari posisi normal seperti pada gambar 3. Hal ini juga dapat dilihat pada layar *control room* yang menunjukkan posisi circuit breaker *OFF* seperti pada gambar 4.

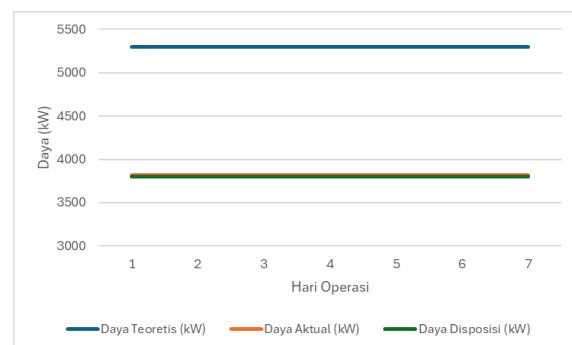


Gambar 3. Indikator *guide vane* menunjukkan pergeseran dari posisi normal.



Gambar 4. Indikator circuit breaker (CB) menunjukkan posisi OFF ketika posisi *guide vane* tidak dalam posisi normal.

Gambar 5 menunjukkan perbandingan antara daya teoretis, aktual, dan ketika terjadi disposisi *guide vane*. Daya rata-rata turbin unit 4 pada kondisi normal adalah 3.820 kW. Sedangkan pada kondisi ketika terjadi disposisi *guide vane* daya turbin unit 4 turun menjadi 3.800 kW. Penurunan daya sebesar 20 kW (sekitar 0,52%) ini menunjukkan adanya kehilangan energi akibat aliran fluida yang tidak sepenuhnya optimum. Hal tersebut biasanya terjadi ketika posisi *guide vane* tidak berada pada sudut bukaan ideal, sehingga distribusi aliran air menuju *runner* menjadi kurang merata dan sebagian potensi energi air tidak dapat dikonversi menjadi energi mekanik.



Gambar 5. Perbandingan daya teoretis, aktual, dan ketika terjadi disposisi *guide vane*.

Disposisi dari *guide vane* juga menimbulkan dampak finansial dari turbin unit 4. Akibat terjadinya disposisi maka turbin unit 4 harus dihentikan operasinya untuk dilakukan perawatan. Sehingga ketika perawatan dilaksanakan maka turbin tidak beroperasi dan daya turbin otomatis akan menjadi nol yang menyebabkan potensi kehilangan pendapatan. Kehilangan potensi pendapatan dari turbin unit 4 ketika terjadi disposisi *guide vane* dapat dihitung dengan menggunakan

persamaan sebagai berikut (Ghozali et al., 2021):

Biaya Pokok Produksi (BPP) = Rp. 244,81/kWh

Harga transfer energi (HTE) = Rp. 1023/kWh

- a) Perhitungan potensi keuntungan perusahaan ketika tidak terjadi disposisi *guide vane*:

Daya aktual x (HTE – BPP)
 = 3820 kW x (1023 – 244,81)
 = Rp. 2.972.685,8

- b) Perhitungan potensi kerugian perusahaan ketika terjadi disposisi *guide vane*:

Dari hasil observasi lapangan pada turbin unit 4, telah terjadi 12 kali kondisi disposisi dari *guide vane* ketika turbin beroperasi. Dengan tiap 1 kali disposisi *guide vane* membutuhkan waktu kurang lebih 30 menit untuk proses perbaikan. Sehingga potensi kerugian adalah:

Potensi keuntungan x durasi perbaikan
 = Rp. 2.972.685,8 x (0,5 jam x 12 disposisi *guide vane*)
 = Rp. 17.836.114,8

Kehilangan potensi pendapatan sebesar Rp. 17.836.114,8 cukup signifikan bagi PLTA Tes dibandingkan dengan penurunan efisiensi dari turbin unit 4 akibat terjadi disposisi *guide vane*.

3.1 Penyebab Disposisi Guide Vane

Berdasarkan hasil inspeksi lapangan, faktor utama disposisi pada turbin unit 4 meliputi hal berikut:

- a) Masuknya material asing seperti kayu, sampah, dan rumput akibat kerusakan *trash rack* di inlet, dapat menyebabkan kemacetan pada mekanisme pengaturan *guide vane*. Masuknya material tersebut ke dalam turbin PLTA dapat mengganggu kinerja dan menyebabkan kerusakan. Material ini lolos dari saringan (*trash rack*) di intake dan masuk ke saluran air menuju turbin.
- b) Kerusakan mesin *racking* dapat

mempengaruhi kinerja *trash rack* dalam mengangkat sampah. Sampah yang terlalu banyak dan menumpuk dapat mengganggu aliran air ke turbin menjadi kurang optimal sehingga dapat menurunkan efisiensi dari turbin dalam memproduksi energi listrik.

- c) Vibrasi berlebihan yang berawal dari kenaikan beban secara tidak teratur. Ketidakstabilan pada mesin dapat menyebabkan vibrasi berlebihan. Vibrasi ini dapat mempengaruhi komponen-komponen turbin, termasuk mekanisme penggerak *guide vane*. Akibatnya *guide vane* bergeser dari posisi ideal dan menimbulkan risiko overspeed pada generator serta kegagalan *starting* pada turbin.



Gambar 6.

Banyaknya sampah pada *trash rack*.



Gambar 7.

Mesin racking untuk mengangkat sampah.

4. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa disposisi *guide vane* mempengaruhi kinerja dari turbin unit 4 PLTA Tes dan menyebabkan hilangnya potensi keuntungan akibat turbin harus dihentikan operasinya untuk proses perbaikan. Dari hasil penelitian berdasarkan data operasional riil didapatkan bahwa kehilangan potensi pendapatan adalah sekitar Rp. 17,8 juta. Hasil ini diperoleh dengan menghitung potensi kehilangan pendapatan dengan menggunakan metode biaya pokok produksi (BPP) dan harga transfer energi (HTE).

Saran dari penelitian ini untuk perbaikan operasional kedepannya adalah sebagai berikut:

- a) Melakukan pemeliharaan terjadwal serta pengukuran presisi pada sudut bukaan *guide vane* untuk memastikan

posisinya sesuai setpoint operasi. Hal ini penting agar penyimpangan (disposisi) dapat segera terdeteksi dan diperbaiki sebelum menimbulkan kerugian daya yang signifikan.

- b) Memperkuat fungsi *trash rack* dan mesin *racking* untuk mencegah masuknya material asing seperti sampah, kayu, dan rumput yang dapat menyebabkan kemacetan pada mekanisme *guide vane*.
- c) Pembersihan *intake* secara berkala juga perlu dilakukan untuk menjaga kelancaran aliran air ke turbin dan menjaga efisiensi turbin.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada PT. PLN Indonesia Power, UBP Bengkulu yang sudah mengizinkan pengambilan data untuk penelitian.

Air Turbin Pelton, *Presisi*, 23(2), 32–42.

Daftar Pustaka

- Alfarizi, A., K., A., Purwantono, P., & Lapis, R. (2024), Kajian Numerik Pengaruh Sudut Bukaan Guide Vane terhadap Daya Output dan Efisiensi Turbin Crossflow pada PLTMH Lubuk Kilangan Kota Padang, *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(1), 8333–8341.
- Chen, M., Luo, X., Feng, J., & Lv, S. (2024), The influence of guide vane opening on internal cavitation of Francis turbine. *Journal of Physics: Conference Series*, 2752(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2752/1/012031>.
- Fathoni, A. N., Rusimanto, P. W., Achmad, F., Ramadhani, E. P., Febrian, M. Y., Henrisaputra, R. R., & Utavian, F. S. (2025), *Pembangkit Tenaga Listrik*. Penerbit KBM Indonesia.
- Firdausi, M., Trisno, M. D., & Dahlan, D. (2016), Kinerja Turbin Mikrohidro Tipe Cross-Flow Kapasitas 2.700 Watt, *Sainstech*, 26(2), 20–24.
- Ghozali, S., Alqap, A. S. F., & Helmizar, H. (2021), Kerugian Disposisi Guide Vane Pada Turbin Francis Unit 6 di PLTA, *Rekayasa Mekanika*, 5(2), 1–8.
- Husen, A. (2021), Uji Eksperimental Bentuk Sudu-Sudu Pada Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga
- Jakfar, A., Fatah, M., & R., A. L. A. (2022), Modifikasi Turbin Kaplan Dengan Variasi Sudut Sudu Pengarah (Guide Vanes) Untuk Menghasilkan Daya Listrik, *Motivection*, 4(3), 269–282.
- Koirala, R., Thapa, B., Neopane, H. P., & Zhu, B. (2017), A review on flow and sediment erosion in guide vanes of Francis turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1054–1065, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.085>.
- Kumar, K., & Saini, R. P. (2022), Economic analysis of operation and maintenance costs of hydropower plants, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102704, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102704>.
- Kumar, P., Singal, S. K., & Gohil, P. P. (2024), A technical review on combined effect of cavitation and silt erosion on Francis turbine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 114096, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114096>.
- Mafrudin, M., & Marsuki, M. (2017), Pengaruh Bukaan Guide Vane

- Terhadap Kinerja Turbin Pikohidro Tipe Cross-Flow, *Turbo*, 6(1), 31–37.
- Purnama, A. A. M., Borahima, S., Syahrir, M., & Yunus, S. (2025)**, Analisis Pengaruh Perubahan Diameter Nosel Terhadap Prestasi Turbin Pelton, *Journal of Innovation Research and Knowledge*, 4(11), 8737–8752.
- Saputra, A. (2024)**, *Analisis Perbandingan Kinerja Turbin Francis Unit 1 dan 2 Pada Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro di PT. Tiga Oregon Putra*, Institut Teknologi Sumatera.
- Sauri, S., Syahputra, R., Yulianto, A., Muhammad Yusuf, L. O., Yanuar Rizky, W., & Hisyam Ramadhan, M. (2022)**, Analisis Perhitungan Efisiensi Mesin Turbin Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di PT. Indonesia Power Unit Pembangkit PLTA Waduk Cirata, *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(9), 12603–12610.
- Shrestha, R., Gurung, P., Chitrakar, S., Thapa, B., Neopane, H. P., Guo, Z., & Qian, Z. (2024)**, Review on experimental investigation of sediment erosion in hydraulic turbines, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 10, 1–31, <https://doi.org/10.3389/fmech.2024.1526120>
- Sitompul, Y. S., Rahmawaty, & Ibrahim, H. (2021)**, Analisis Pengaruh Buka-an Sudu Terhadap Tingkat Kavitas di Sisi Masuk Suction Pipe Turbin Francis Horizontal Unit 3 di PLTA Pakkat PT Energy Sakti Sentosa, *Prosiding Konferensi Nasional Social & Engineering Polmed*, 216–221.
- Sudiatmika, I. N., Wijaya, I. W. A., & Suartika, I. M. (2021)**, Jurnal ilmiah Spektrum. *Jurnal Spektrum*, 8(2), 110–118.
- Suryana, A., Barnadi, Y., K.S., A. M., & Zulpratita, U. S. (2021)**, Guide Vane (GV) Governor Valve PLTA Cikalong Unit 3, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(11), 1397–1402.
- Thapa, B. S., Dahlhaug, O. G., & Thapa, B. (2015)**, Sediment erosion in hydro turbines and its effect on the flow around guide vanes of Francis turbine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1100–1113.
- <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.178>
- Vijay Kumar, M., Subba Reddy, T., Sarala, P., Varma, P. S., Chandra Sekhar, O., Babqi, A., Alharbi, Y., Alamri, B., & Reddy, Ch. R. (2022)**, Experimental Investigation and Performance Characteristics of Francis Turbine with Different Guide Vane Openings in Hydro Distributed Generation Power Plants. *Energies*, 15(18), 6798. <https://doi.org/10.3390/en15186798>
- Wang, H., Pang, J., Liu, X., Zhou, Z., Gang, Y., Lai, Z., Wang, J., & Qin, B. (2024)**, Analysis on cause of erosion of guide vane of high-head Francis turbine in sandy river. *Energy Science & Engineering*, 12(9), 3704–3717, <https://doi.org/10.1002/ese3.1838>