

**ANALISIS PENGARUH VARIABILITAS CURAH HUJAN TERHADAP
FLUKTUASI PRODUKSI LISTRIK DI PLTA TONSEA LAMA**

Peter Spee Junior Mantow¹, Janne Deivy Ticoh², Djami Olii³

Universitas Negeri Manado¹²³

e-mail: peter.mantow@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variabilitas curah hujan terhadap fluktuasi produksi listrik di Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tonsealama. Data yang digunakan meliputi curah hujan dan produksi listrik selama periode lima tahun, dari tahun 2019 hingga 2023. Analisis menunjukkan adanya korelasi yang signifikan antara variabilitas curah hujan dengan produksi listrik di PLTA tersebut. Secara umum, peningkatan curah hujan diikuti oleh peningkatan produksi listrik, sedangkan penurunan curah hujan menyebabkan penurunan produksi listrik. Namun, fluktuasi curah hujan yang tinggi juga menyebabkan ketidakstabilan produksi listrik yang cukup signifikan. Selain itu, ditemukan beberapa anomali di mana produksi listrik tidak selalu mengikuti pola umum tersebut, seperti kondisi curah hujan meningkat tetapi produksi listrik justru menurun, atau sebaliknya. Hal ini menunjukkan bahwa selain curah hujan, terdapat faktor lain yang memengaruhi produksi listrik. Penelitian ini menyimpulkan bahwa variabilitas curah hujan merupakan faktor utama yang memengaruhi fluktuasi produksi listrik, namun faktor teknis dan lingkungan juga perlu diperhatikan untuk mengoptimalkan kinerja PLTA Tonsealama.

Kata Kunci: *Curah hujan, Produksi Listrik, K-means, PLTA*

ABSTRACT

This study aims to analyze the impact of rainfall variability on fluctuations in electricity production at the Tonsealama Hydropower Plant. The analysis utilized rainfall and electricity production data over a five-year period from 2019 to 2023. Results indicate a significant correlation between rainfall variability and electricity output at the plant. Generally, an increase in rainfall corresponds with an increase in electricity production, while a decrease in rainfall leads to a reduction in power generation. However, high fluctuations in rainfall also cause notable instability in electricity production. Additionally, several anomalies were observed where electricity output did not follow the typical pattern, such as instances of increased rainfall accompanied by decreased production, or conversely, decreased rainfall with increased production. These findings suggest that factors beyond rainfall also influence electricity generation. The study concludes that rainfall variability is the primary factor affecting electricity production fluctuations, though technical and environmental factors must also be considered to optimize the performance of the Tonsealama Hydropower Plant.

Keywords: *Rainfall, Electricity Production, K-means, Hydropower*

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tonsealama, yang berlokasi di Desa Tonsea Lama, Kecamatan Tondano Utara, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara, telah beroperasi sejak tahun 1923 dengan kapasitas sebesar 14,38 MW. Sebagai salah satu infrastruktur pembangkitan energi yang vital di wilayah Sulawesi Utara dan Gorontalo, PLTA ini berkontribusi sekitar 3% terhadap total kebutuhan kelistrikan di kedua provinsi tersebut. Keberadaan PLTA Tonsealama tidak hanya penting dari segi penyediaan energi, tetapi juga sebagai simbol pemanfaatan sumber daya alam secara berkelanjutan. Namun, sebagai sumber energi terbarukan, kinerja PLTA ini sangat bergantung pada ketersediaan air yang dipengaruhi oleh curah hujan di daerah

tangkapan air Danau Tondano. Variabilitas curah hujan menjadi faktor krusial yang menentukan produktivitas energi listrik PLTA, karena fluktuasi debit air Danau Tondano akan berdampak langsung pada kapasitas pembangkitan listrik.

Perubahan curah hujan yang signifikan dapat menyebabkan ketidakstabilan produksi listrik pada PLTA. Saat curah hujan tinggi, debit air meningkat, sehingga kapasitas pembangkitan juga dapat meningkat. Sebaliknya, curah hujan yang rendah mengakibatkan penurunan permukaan air, yang pada gilirannya mengurangi kapasitas pembangkitan listrik dan memengaruhi daya listrik yang tersedia. Kondisi ini menyoroti perlunya pemahaman mendalam mengenai pola hubungan antara curah hujan dan output produksi listrik PLTA untuk menjaga stabilitas pasokan energi. Studi oleh Chilkoti et al. (2017) menunjukkan bahwa peningkatan curah hujan akan meningkatkan produksi listrik, sedangkan periode tanpa curah hujan akan menyebabkan penurunan produksi listrik secara signifikan.

Dalam menghadapi masalah fluktuasi produksi ini, metode K-means menawarkan solusi analisis yang efektif. K-means mampu mengelompokkan data curah hujan dan produksi listrik ke dalam kategori-kategori serupa, sehingga memfasilitasi identifikasi pola dan hubungan antara kedua variabel tersebut. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya untuk mengurai kompleksitas dan variasi data, menghasilkan analisis yang lebih akurat dan komprehensif mengenai dampak curah hujan terhadap produksi listrik. Penelitian oleh Ghosh et al. (2014) menunjukkan bahwa teknik K-means efektif dalam mengelompokkan data debit air yang memiliki variasi besar, yang penting dalam menilai ketersediaan energi hidroelektrik.

Permasalahan fluktuasi produksi listrik akibat variabilitas curah hujan ini telah terbukti secara empiris di PLTA Tonselama. PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Minahasa melaporkan bahwa musim kemarau ekstrem telah menyebabkan penurunan produksi listrik hingga hampir 70% dari produksi normalnya. Sebagai respons, PLN menerapkan Teknologi Modifikasi Cuaca (TMC) berbasis drone untuk meningkatkan curah hujan di area tangkapan air Danau Tondano, dengan tujuan mendukung peningkatan produksi energi listrik dari PLTA. Langkah ini menunjukkan pentingnya pemahaman dan pengelolaan variabilitas curah hujan dalam menjaga keandalan produksi listrik.

Berdasarkan permasalahan fluktuasi produksi listrik yang signifikan akibat variabilitas curah hujan di PLTA Tonselama, maka penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis pengaruh variabilitas curah hujan terhadap fluktuasi produksi listrik di PLTA Tonselama. Dengan menggunakan metode K-means clustering, diharapkan dapat diidentifikasi pola-pola hubungan antara curah hujan dan produksi listrik, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya air dan perencanaan produksi energi yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahapan utama: pengambilan data, transformasi data, analisis K-Means, dan analisis korelasi. Pada tahap pengambilan data, dikumpulkan data curah hujan bulanan dan data produksi listrik bulanan selama lima tahun, yaitu dari tahun 2019 hingga 2023. Data curah hujan diperoleh dari BMKG Stasiun Klimatologi Kelas II Manado, sementara data produksi listrik didapatkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tonselama. Selanjutnya adalah tahap transformasi data. Seluruh data yang terkumpul akan dinormalisasi menggunakan metode Min-Max. Normalisasi ini penting untuk menyamakan rentang nilai data, sehingga mempermudah proses analisis lebih lanjut. Rumus normalisasi yang digunakan adalah:

$$x' = \frac{(x_i - \min(x))}{\max(x) - \min(x)} \dots\dots\dots 1$$

Dimana :

x_i = nilai tenilai terrtentu yang akan dinormalisasi

x' = nilai hasil normalisasi

$\min(x)$ = minimal dari sebuah atribut

$\max(x)$ = nilai minimal dari sebuah atribut

Setelah data ditransformasi, dilakukan analisis K-Means untuk mengelompokkan data curah hujan dan produksi listrik. Proses ini diawali dengan inisialisasi dua centroid secara acak. Kemudian, setiap titik data dihitung jaraknya ke setiap centroid menggunakan rumus Euclidean Distance:

$$dist(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} ; i = 1, 2, 3 \dots n \quad \dots\dots\dots 2$$

Sumber: Purnaningsih et al., 2014

Berdasarkan jarak terdekat, setiap titik data akan ditetapkan ke dalam klaster yang sesuai, dengan tujuan menghasilkan tiga klaster. Setelah pengelompokan awal, centroid klaster diperbarui dengan menghitung rata-rata dari seluruh data yang termasuk dalam klaster tersebut, menggunakan rumus:

$$C_k = \frac{1}{nk} \sum di \quad \dots\dots\dots 3$$

Sumber: Purnaningsih et al., 2014

Dimana:

nk = Banyaknya data dalam cluster

di = Banyaknya nilai jarak yang masuk dalam masing-masing cluster

Proses penentuan klaster dan pembaruan centroid ini akan terus berulang hingga klaster yang terbentuk stabil. Terakhir, dilakukan analisis korelasi terhadap hasil pengelompokan. Analisis ini bertujuan untuk menemukan hubungan atau keterkaitan antara data produksi listrik dan curah hujan. Akan diidentifikasi apakah terdapat pola hubungan yang serupa atau justru berbeda antara data curah hujan dari BMKG Sulawesi Utara dengan data produksi energi listrik di PLTA Tonsealama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

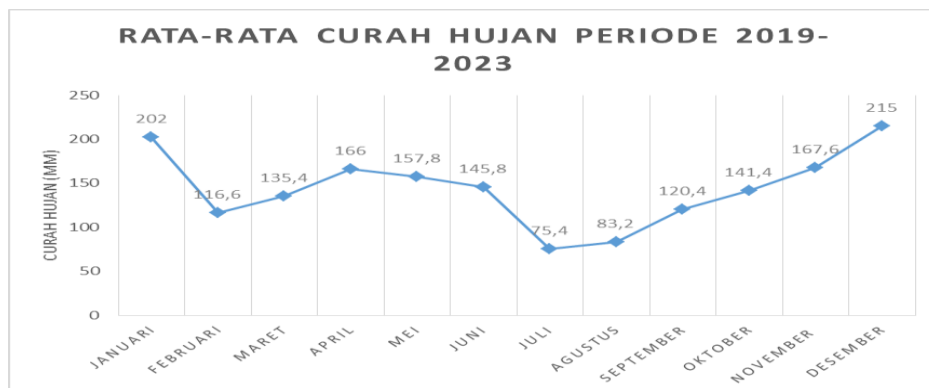
Data Curah Hujan

Data curah hujan bulanan periode 2019–2023 menunjukkan fluktuasi signifikan. Rata-rata curah hujan tertinggi tercatat pada bulan Desember (215 mm), sementara bulan Juli merupakan yang terendah (75,4 mm).

Tabel 1. Rata-rata Curah Hujan Bulanan (mm) Tahun 2019–2023

Bulan	Rata-rata Curah Hujan
Januari	202,0
Februari	116,6
Maret	135,4
April	166,0
Mei	157,8

Juni	145,8
Juli	75,4
Agustus	83,2
September	120,4
Oktober	141,4
November	167,6
Desember	215,0



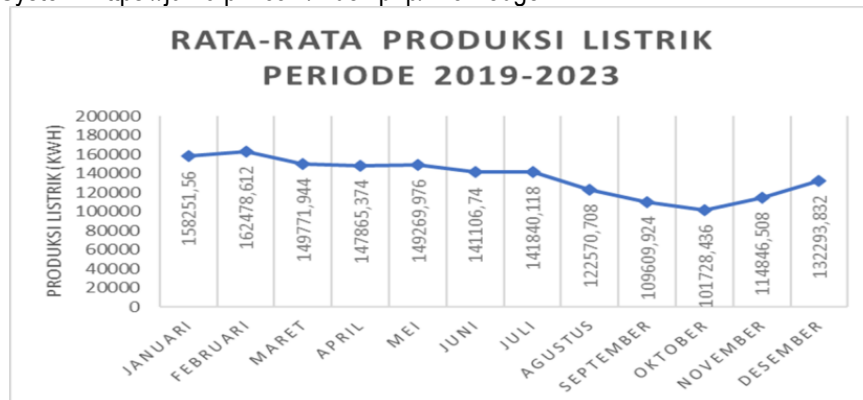
Gambar 1. Grafik Rata-rata Curah Hujan per Bulan (2019–2023)

Data Produksi Listrik

Data produksi listrik bulanan PLTA Tonsealama menunjukkan pola fluktuasi yang relatif mengikuti curah hujan, dengan produksi tertinggi pada bulan Februari dan terendah pada bulan Oktober.

Tabel 2. Rata-rata Produksi Listrik Bulanan (kWh) Tahun 2019–2023

Bulan	Rata-rata Produksi Listrik
Januari	158.252
Februari	162.479
Maret	149.772
April	147.865
Mei	149.270
Juni	141.107
Juli	141.840
Agustus	122.571
September	109.610
Oktober	101.728
November	114.847
Desember	132.294



Gambar 2. Grafik Rata-rata Produksi Listrik Bulanan (2019–2023)

Hasil Klasterisasi

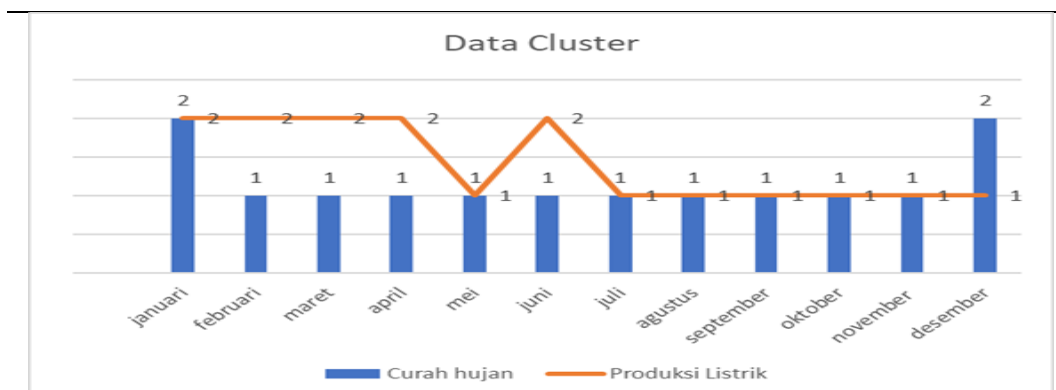
Hasil klasterisasi menggunakan metode K-Means membagi data menjadi dua kelompok:

- **Cluster 1 (C1):** curah hujan dan produksi listrik rendah
- **Cluster 2 (C2):** curah hujan dan produksi listrik tinggi

Untuk curah hujan, bulan Januari dan Desember tergolong C2. Sementara untuk produksi listrik, bulan Januari, Februari, Maret, April, dan Juni masuk dalam C2.

Tabel 3. Hasil Klasterisasi Curah Hujan dan Produksi Listrik

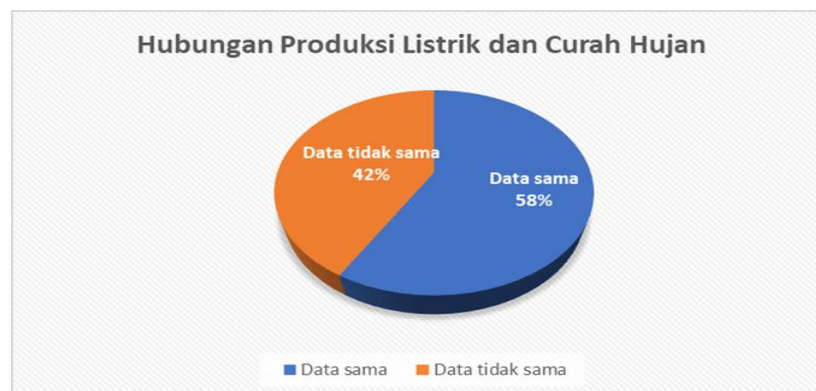
Bulan	Curah Hujan (Cluster)	Produksi Listrik (Cluster)
Januari	C2	C2
Februari	C1	C2
Maret	C1	C2
April	C1	C2
Mei	C1	C1
Juni	C1	C2
Juli	C1	C1
Agustus	C1	C1
September	C1	C1
Oktober	C1	C1
November	C1	C1
Desember	C2	C1



Gambar 3. Visualisasi Hasil Klaster Curah Hujan dan Produksi Listrik

Analisis Korelasi

Sebanyak 58% data menunjukkan korelasi positif antara curah hujan dan produksi listrik. Beberapa bulan seperti Januari dan Mei menunjukkan pola yang seragam, sementara Februari dan Desember menjadi pengecualian, di mana pola tersebut tidak konsisten.



Gambar 4. Persentase Kesamaan Pola antara Curah Hujan dan Produksi Listrik

Hasil ini mengindikasikan bahwa curah hujan merupakan faktor penting dalam menentukan output listrik PLTA, meskipun ada variabel lain yang juga berpengaruh seperti teknis pembangkit, pasokan air, dan kondisi lingkungan sekitar.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan adanya fluktuasi yang signifikan antara produksi listrik dan curah hujan di PLTA Tonsealama. Secara umum, peningkatan curah hujan diikuti oleh peningkatan produksi listrik, sedangkan penurunan curah hujan berbanding lurus dengan penurunan produksi listrik. Hal ini sesuai dengan prinsip kerja dasar pembangkit listrik tenaga air yang memanfaatkan energi potensial air untuk memutar turbin dan menggerakkan generator listrik (Hidayat, 2019). Dengan demikian, PLTA Tonsealama sangat bergantung pada kondisi cuaca, khususnya curah hujan sebagai sumber utama air.

Namun, terdapat fenomena anomali di mana produksi listrik dan curah hujan tidak selalu mengikuti pola umum tersebut. Misalnya, produksi listrik dapat menurun meskipun curah hujan meningkat, atau sebaliknya, produksi listrik meningkat walaupun curah hujan rendah. Fenomena ini menunjukkan adanya faktor lain yang mempengaruhi produksi listrik selain curah hujan.

Beberapa faktor penyebab produksi listrik menurun walaupun curah hujan meningkat antara lain adalah fluktuasi permukaan air Danau Tondano yang dipengaruhi oleh pendangkalan akibat penumpukan eceng gondok dan sampah yang masuk ke danau. Pendangkalan ini mengurangi kapasitas penyimpanan air sehingga suplai air untuk PLTA menurun (Alitu, Labdul, & Utirahman, 2024). Selain itu, sampah dan eceng gondok yang mengendap di dekat pipa intake menghambat aliran air masuk ke turbin, mengurangi pasokan air walaupun curah hujan cukup tinggi. Faktor lain adalah jadwal pemeliharaan berkala pada unit generator yang dapat menyebabkan penurunan produksi sementara, misalnya untuk membersihkan saluran air dari sedimentasi (Hanifah et al., 2020). Usia mesin generator yang sudah tua juga menyebabkan risiko kerusakan dan menurunkan efisiensi produksi listrik (Brama Anggara Hasibuan et al., 2022).

Sebaliknya, faktor-faktor yang menyebabkan produksi listrik meningkat saat curah hujan rendah meliputi penggunaan teknologi modifikasi cuaca yang diterapkan PLTA Tonselama bekerja sama dengan BMKG untuk mengoptimalkan curah hujan lokal (Institute for Essential Services Reform [IESR], 2019). Selain itu, efisiensi pipa intake yang ditingkatkan melalui perawatan rutin memungkinkan pengambilan air lebih optimal dari Danau Tondano yang memiliki kapasitas cukup memadai, sehingga dampak rendahnya curah hujan dapat diminimalisir (Annisa Salsabila et al., 2020). Pengaturan gate control juga membantu mengoptimalkan aliran air menuju turbin sehingga produksi listrik tetap dapat dipertahankan (Hasriani et al., 2017).

Temuan ini sejalan dengan penelitian Alitu, Labdul, dan Utiahman (2024) yang menyatakan bahwa energi listrik dari PLTA sangat bergantung pada jumlah air yang tersedia yang dipengaruhi oleh curah hujan dan kapasitas kolam penampungan. Apabila curah hujan tinggi dan kolam penuh, maka terjadi pelimpasan air yang tidak bisa dimanfaatkan optimal. Sebaliknya, curah hujan rendah menyebabkan kekurangan pasokan air dan produksi listrik menurun. Wei et al. (2020) juga mengemukakan bahwa tren peningkatan curah hujan di masa depan dapat meningkatkan limpasan dan potensi pembangkitan listrik tenaga air, tetapi perubahan iklim juga dapat menimbulkan ketidakpastian dalam pola curah hujan sehingga perlu dilakukan pengelolaan yang adaptif.

Penelitian lain juga memperkuat temuan ini. Misalnya, studi oleh *Kumar et al. (2018)* menunjukkan bahwa variabilitas curah hujan akibat perubahan iklim sangat berpengaruh pada produksi energi PLTA, sehingga diperlukan strategi manajemen air yang adaptif untuk mengurangi risiko penurunan produksi (Kumar, S., Singh, R., & Sharma, N., 2018). Selanjutnya, *Liu et al. (2019)* menyoroti pentingnya kualitas air dan sedimentasi di reservoir yang dapat menurunkan kapasitas penyimpanan air dan efisiensi produksi listrik, mirip dengan kondisi pendangkalan di Danau Tondano yang dialami PLTA Tonselama (Liu, Q., Zhang, Y., & Yang, X., 2019).

Selain itu, *Nguyen dan Le (2021)* meneliti pengaruh teknologi modifikasi cuaca dan pengelolaan sumber daya air yang terpadu dalam meningkatkan stabilitas produksi listrik PLTA di wilayah tropis, mendukung program modifikasi cuaca yang dilakukan PLTA Tonselama (Nguyen, H.T., & Le, Q.T., 2021). Terakhir, *Patel et al. (2022)* menekankan pentingnya pemeliharaan berkala dan modernisasi mesin turbin untuk menjaga efisiensi dan keberlanjutan produksi listrik pada PLTA berusia tua (Patel, R., Joshi, M., & Desai, D., 2022).

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa meskipun curah hujan adalah faktor utama yang mempengaruhi produksi listrik di PLTA Tonselama, faktor teknis seperti pemeliharaan, kualitas sumber air, dan penerapan teknologi modifikasi cuaca juga sangat menentukan keberlangsungan produksi listrik yang optimal. Pengelolaan yang terpadu antara aspek meteorologi, teknis, dan lingkungan menjadi kunci dalam menghadapi ketidakpastian iklim dan memastikan ketersediaan energi listrik yang stabil dari pembangkit tenaga air.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variabilitas curah hujan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap produksi energi listrik di Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tonselama. Semakin tinggi curah hujan, maka semakin besar pula produksi listrik yang dihasilkan. Sebaliknya, apabila curah hujan rendah, produksi listrik cenderung menurun. Untuk mengatasi fluktuasi ini, penggunaan teknologi modifikasi cuaca dapat menjadi solusi dalam mengoptimalkan produksi listrik. Selain itu, dampak dari variabilitas curah hujan juga dapat diminimalkan melalui pemeliharaan rutin pada unit generator serta pengelolaan air yang lebih efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Alitu, A., Labdul, B. Y., & Utiahman, D. F. (2024). Potensi sumber daya air untuk pembangkit listrik tenaga air di Bendungan Bulango Ulu - Bone Bolango. *International Conference on Humanity Education and Society (ICHES)*, 3(1). <https://proceedingsiches.com/index.php/ojs/article/view/114>
- Annisa Salsabila, dkk. (2020). *Pengantar Hidrologi*. Penerbit AURA CV. Anugrah Utama Raharja.
- Brama Anggara Hasibuan, dkk. (2022). Analisis unjuk kerja turbin air kapasitas 3×6 MW pada beban normal dan beban puncak di unit PLTA Pakkat PT. Energy Sakti Santosa.
- Hanifah, A., dkk. (2020). Penerapan K-Means untuk menganalisis pengaruh curah hujan terhadap produksi listrik (studi kasus: PT. Indonesia Power). *Jurnal Informatika Polinema*, 6(4), 63–68.
- Hasriani, dkk. (2017). Penerapan media pembangkit listrik tenaga air (PLTA).
- Hidayat, W. (2019). Prinsip kerja dan komponen-komponen pembangkit listrik tenaga air (PLTA).
- Inggih Permana. (2022). Pengaruh normalisasi data terhadap performa hasil klasifikasi algoritma backpropagation. *IJIRSE (Indonesian Journal of Informatic Research and Software Engineering)*, 2(1), 67–72.
- Institute for Essential Services Reform (IESR). (2019). *Laporan status energi bersih Indonesia: Potensi, kapasitas terpasang, dan rencana pembangunan pembangkit listrik energi terbarukan 2019*.
- Ion, F., Petrescu, T., & Petrescu, R. V. (n.d.).
- Purnaningsih, R., Suciati, N., & Raharja, S. J. (2014). Implementasi metode K-Means clustering untuk mengelompokkan data tanaman padi menggunakan bahasa pemrograman Java. *Jurnal Rekursif*, 2(1), 6–10.
- Wei, L., Jiheng, L., Junhong, G., Zhe, B., Lingbo, F., & Baodeng, H. (2020). The effect of precipitation on hydropower generation capacity: A perspective of climate change. *Frontiers in Earth Science*, 8, 268. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00268>
- Kumar, S., Singh, R., & Sharma, N. (2018). Impact of climate variability on hydropower generation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1129–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.014>
- Liu, Q., Zhang, Y., & Yang, X. (2019). Sedimentation impact on reservoir storage and hydropower production efficiency. *Journal of Hydrology*, 574, 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.020>
- Nguyen, H. T., & Le, Q. T. (2021). Integrated weather modification and water resource management for hydropower stability in tropical regions. *Water Resources Management*, 35(7), 2383–2397. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02815-2>
- Patel, R., Joshi, M., & Desai, D. (2022). Maintenance and modernization strategies for aging hydropower plants: Enhancing efficiency and lifespan. *Energy Reports*, 8, 1569–1578. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.053>