

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Tinjauan Pustaka terhadap penelitian yang relevan dimaksudkan agar penulis dapat mengetahui posisi penelitian dengan rincian pada Tabel 2.1.

1. Al-Faraj & Scholz (2021): *Vulnerability and resilience of hydropower generation under climate change scenarios: Haditha dam reservoir case study*

Penelitian ini membahas ketahanan dan kerentanan sistem pembangkit listrik tenaga air (PLTA) terhadap perubahan iklim menggunakan studi kasus Bendungan Haditha yang berlokasi di Irak. Penelitian menggabungkan skenario iklim masa depan dengan model hidrologi dan simulasi operasi waduk dimana menilai dampak fluktuasi debit air terhadap kinerja pembangkit listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabilitas iklim terutama curah hujan dan peningkatan suhu berpotensi menurunkan kapasitas produksi pembangkit listrik secara signifikan. Meski demikian dengan manajemen reservoir yang adaptif maka ketahanan operasional pembangkit listrik masih dapat ditingkatkan sehingga sangat penting untuk melakukan pendekatan perencanaan yang fleksibel dan adaptif pembangkit listrik terhadap perubahan iklim.

2. de Queiroz & Fernandes (2022): *Seasonal pumped hydropower storage role in responding to climate change impacts on the Brazilian electrical sector*

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja *seasonal pumped hydropower storage* (SPHS) dalam menghadapi dampak perubahan iklim di Brazil. Dilakukan pemodelan sistem energi jangka panjang dengan menyimulasikan integrasi SPHS sebagai solusi menghadapi penurunan ketersediaan air akibat perubahan pola curah hujan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SPHS dapat meningkatkan keandalan pasokan listrik selama musim kering serta dapat mengurangi kebutuhan energi fosil pada masa krisis pasokan air. SPHS juga dapat menstabilkan

kelistrikan nasional dengan peningkatan fleksibilitas dan kapasitas cadangan dalam perubahan iklim yang semakin ekstrem.

3. Hu et al. (2023): *Research on control system for improving the grid-connected efficiency of small hydropower*

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) skala kecil khususnya pada kondisi aliran rendah dengan cara mengembangkan sistem kontrol berbasis Generator Sinkron Magnet Permanen Langsung (PMSG) pada PLTA. Sistem tersebut memiliki tingkat efisiensi lebih tinggi dengan biaya perawatan lebih rendah dibanding dengan menggunakan generator konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem PMSG dengan spesifikasi 400V/200 kW/428 RPM meningkatkan efisiensi pembangkit terutama ketika kondisi aliran air rendah, kestabilan tegangan dan frekuensi output lebih baik dengan sistem konvensional, dan mampu meningkatkan kemampuan sinkronisasi dengan jaringan listrik sehingga mengurangi gangguan dan meningkatkan kualitas daya.

4. Yuniarti et al. (2023): *Hydrologic and climatic constraints on hydropower operation during dry seasons in Southeast Asia*

Penelitian ini menganalisis keterbatasan hidrologis dan iklim yang mempengaruhi operasi PLTA di Asia Tenggara khususnya ketika musim kemarau. Studi ini menggunakan data curah hujan, debit sungai, suhu historis, dan proyeksi iklim untuk menilai dampak kemarau terhadap keandalan pembangkit listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variabilitas musiman dan kekeringan yang diperparah oleh perubahan iklim mengakibatkan penurunan kapasitas PLTA secara signifikan terutama pada wilayah yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap air di permukaan. Penelitian ini menekankan pengelolaan air lintas batas, integrasi antara data iklim dan perencanaan energi, dan adaptasi kebijakan agar sistem PLTA tetap berkelanjutan secara jangka panjang.

5. Muteba et al. (2023): *Micro-hydropower systems for smallholder farmers in rural communities of Taraba state, Nigeria: Feasibility study, system analysis, design and performance evaluation (Part II)*

Studi ini membahas studi kelayakan, analisis sistem, desain, dan evaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga air mikro untuk petani kecil di masyarakat pedesaan negara bagian Taraba di Nigeria. Data hidrologi yang digunakan untuk menentukan debit aliran yang tersedia diperoleh dari GEO *Global Water Sustainability* (GEOGloWS) *Service*. Prinsip *Darcy* dan *Weisbach* digunakan untuk memperkirakan secara analitis kehilangan *head* hidraulik akibat gesekan pada *penstock*, *trash rack* yang terpasang, dan katup yang dipasang. Alat *Hydro-Power Plant* (HPP) digunakan untuk mengukur berbagai konstituen pembangkit listrik tenaga air mikro yang diusulkan dan untuk mengevaluasi kinerjanya secara keseluruhan. Hasil simulasi dari alat desain HPP menunjukkan bahwa sistem mencapai efisiensi minimum 56% dengan rasio aliran 0,2, dan efisiensi maksimum 86,1% dengan rasio aliran berkisar antara 0,6 hingga 0,8. Perangkat Lunak Analisis Proyek Energi Terbarukan (RETScreen) *Expert* digunakan untuk melakukan analisis biaya, arus kas, sensitivitas keuangan, dan risiko dari pembangkit listrik tenaga air mikro yang diusulkan di Wurno-Gassol. *RETScreen Expert* memperkirakan tingkat risiko sebesar 10% dengan tingkat kepercayaan minimum dan maksimum pada risiko yang terkait dengan pengembalian modal masing-masing terjadi pada 4,6 tahun dan 13,2 tahun, dengan tingkat kepercayaan rata-rata pada tahun ke 7,2. Selanjutnya, tingkat risiko pada biaya produksi energi diperkirakan sebesar 10% dengan tingkat keyakinan minimum dan maksimum masing-masing sebesar 101 USD/MWh dan 140 USD/MWh, dengan tingkat keyakinan rata-rata sebesar 118 USD/MWh.

6. Brazzini et al. (2024): *Is small-scale hydropower energy recovery a viable alternative for climate change mitigation and adaptation? The case of the traditional irrigation system in Valencia (Spain)*

Penelitian ini bertujuan untuk memperkirakan potensi pembangunan PLTA skala kecil pada sistem irigasi skala menengah di Valencia, Spanyol. Parameter penelitian diambil dari parameter yang relevan dari sekitar lingkungan penelitian seperti ketinggian, aliran air, sistem irigasi. Digunakan potensi data *in situ* aliran air historis selama 30 tahun dari 8 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) untuk cabang jaringan tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari PLTA dengan *head* tertinggi yaitu pada tahun 2010, didapatkan energi sebesar 750 MWh/tahun

dengan total energi dari semua PLTA pada tahun yang sama adalah 5 GWh/tahun. Hasil tersebut konsisten dengan studi kasus serupa. Penerapan energi disimulasikan dalam dua skenario. Pertama adalah konsumsi listrik secara langsung dan penjualan ke jaringan listrik dan yang kedua adalah produksi hidrogen untuk pemakaian industri lokal. Potensi mitigasi pada produksi hidrogen terbukti bergantung pada bauran listrik nasional.

7. Luo (2024): *Optimal operation model of ecological flow of hydropower station based on genetic algorithm and neural network*

Penelitian ini bertujuan untuk memaksimalkan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan mencapai perlindungan ekologi yang optimal dengan menetapkan model pengaturan aliran waduk. Simulasi menggunakan parameter keseimbangan air, kapasitas waduk, *output*, dan *overflow* yang dioptimalkan menggunakan pendekatan *Algorithm-Backpropagation Neural Network* (GA-BPNN). Simulasi pemodelan waduk dengan pendekatan GA-BPNN diterapkan dalam optimasi multi-objektif dengan tetap memperhatikan batasan aliran ekologis. Metode ini bertujuan untuk mengoptimalkan alokasi sumber daya air berdasarkan tujuan yang berbeda yaitu aliran ekologi, pembangkit listrik, dan pasokan air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemodelan dapat meningkatkan efisiensi pembangkit listrik sebesar 32.680 kWh dengan tingkat pertumbuhan sebesar 23,85%. Pemodelan tersebut mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya air secara komprehensif sekaligus mampu memenuhi persyaratan aliran ekologis.

8. Durvasulu et al. (2024): *Rationale for adding batteries to hydropower plants and tradeoffs in hybrid system operation: A review*

Penelitian ini meninjau mengenai kemungkinan penggunaan baterai pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) mengacu pada penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Angin/Bayu (PLTB) dengan sistem baterai. Studi ini bertujuan untuk merealisasikan potensi hibrida Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) secara langsung terkait dengan irigasi, pengendalian banjir, dan kesehatan ekosistem sungai. Studi hibrida PLTA dengan baterai mempertimbangkan ketiga aspek tersebut. Metode yang digunakan dalam studi ini adalah dengan melakukan

studi literatur terhadap proyek-proyek hibrida hidro dan memahami kesenjangan di dalamnya guna mengidentifikasi dan menggambarkan faktor-faktor yang mempengaruhi keputusan untuk menambahkan penyimpanan ke dalam PLTA dan melakukan operasi sistem PLTA-baterai. Hasil studi menunjukkan bahwa menambahkan penyimpanan energi dapat meningkatkan daya dukung beban pembangkit ROR dan dapat mengurangi biaya keausan.

9. Sangolt et al. (2025): *Hydrogen production from a run-of-river hydropower plant: Modeling the economic viability*

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pemanfaatan tenaga air sungai untuk produksi hidrogen melalui elektrolisis basa. Sistem energi yang diusulkan mengintegrasikan elektroliser mulai dari 1-10 MW dengan PLTA yang direncanakan di Bordalen, Norwegia. Dari data aliran masuk sungai selama 20 tahun, sebuah model berbasis MATLAB dikembangkan untuk memperkirakan hasil hidrogen dan menilai kelayakan ekonomi. Analisis ini mengevaluasi kinerja elektroliser di bawah kondisi PLTA yang bervariasi, dengan mempertimbangkan efisiensi, frekuensi *start-up/shutdown*, dan dampak aliran air yang berfluktuasi. Hasilnya menunjukkan variabilitas yang signifikan antara tahun-tahun kering dan basah yang menimbulkan tantangan optimasi untuk ukuran sistem. Perkiraan biaya produksi hidrogen berkisar antara 4,19 €/kg hingga 6,21 €/kg, dengan elektroliser 5 MW menawarkan biaya terendah. Studi ini juga menunjukkan bahwa menjalankan elektroliser dengan beban penuh akan lebih menguntungkan bahkan ketika harga listrik dari jaringan sedikit lebih tinggi daripada biaya produksi listrik dari pembangkit listrik tenaga air.

10. Hunt et al.(2025): *Optimizing hydropower generation with reservoir level management in humid regions*

Studi ini menunjukkan bahwa bendungan di daerah lembab seperti Brasil dapat membantu meningkatkan aliran sungai. Fenomena ini terjadi karena kelembaban yang tinggi dan kondisi angin yang rendah di wilayah tersebut yang menyebabkan penguapan yang rendah di waduk. Pada saat yang sama, waduk yang penuh membantu menjaga kelembaban tinggi di sekitar waduk sehingga meningkatkan curah hujan di daerah tangkapan air. Untuk menguji hipotesis ini maka digunakan

data penyimpanan air dan pembangkit listrik tenaga air dari daerah tangkapan air Brasil di wilayah Tenggara. Data waduk dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga air di masa depan untuk menyelidiki korelasi antara kedua variabel tersebut. Hasil penelitian menemukan bahwa pengoperasian waduk memiliki dampak yang signifikan terhadap aliran sungai di Brasil. Rata-rata potensi PLTA tahunan dari daerah tangkapan air dengan waduk yang penuh adalah 111% lebih tinggi dibandingkan dengan waduk yang kosong. Untuk meningkatkan aliran sungai, studi ini mengusulkan solusi untuk mengisi waduk setelah krisis energi dan menjaga waduk pada kapasitas penuh.

Tabel 2.1 Penelitian Sebelumnya yang Relevan

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian
1	Al-Faraj & Scholz (2021)	Vulnerability and resilience of hydropower generation under climate change scenarios: Haditha dam reservoir case study	Menilai ketahanan dan kerentanan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) Haditha di Irak terhadap berbagai skenario perubahan iklim. Studi ini mensimulasikan dampak perubahan curah hujan dan suhu terhadap debit air dan produksi energi.	Simulasi dan verifikasi eksperimental
2	de Queiroz & Fernandes (2022)	Seasonal pumped hydropower storage role in responding to climate change impacts on the Brazilian electrical sector	Mengevaluasi peran <i>Seasonal Pumped Hydropower Storage</i> (SPHS) dalam meningkatkan ketahanan sistem kelistrikan Brazil terhadap dampak perubahan iklim, khususnya saat musim kering. Studi ini menganalisis bagaimana integrasi SPHS dapat menjaga keandalan pasokan listrik, mengurangi ketergantungan pada pembangkit fosil, serta menurunkan emisi karbon dalam kondisi fluktuasi debit air akibat perubahan iklim.	Simulasi dan verifikasi eksperimental
3	Hu et al. (2023)	Research on control system for improving the grid-connected efficiency of small hydropower	Meningkatkan efisiensi PLTA skala kecil khususnya pada kondisi aliran rendah dengan sistem kontrol berbasis Generator Sinkron Magnet Permanen Langsung (PMSG)	Simulasi dan verifikasi eksperimental menggunakan <i>software</i> MATLAB/Simulink
4	Yuniarti et al. (2023)	Hydrologic and climatic constraints on hydropower operation during dry seasons in Southeast Asia	Menganalisis keterbatasan hidrologis dan iklim yang mempengaruhi operasi PLTA di Asia Tenggara khususnya ketika musim kemarau. Studi ini menggunakan data curah hujan, debit sungai, suhu historis, dan proyeksi iklim untuk menilai dampak kemarau terhadap keandalan pembangkit listrik.	Analisis studi literatur kritikal

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian
5	Muteba et al. (2023)	Micro-hydropower systems for smallholder farmers in rural communities of Taraba state, Nigeria: Feasibility study, system analysis, design and performance evaluation (Part II)	Studi kelayakan, analisis sistem, desain, dan evaluasi kinerja sistem pembangkit listrik tenaga air mikro untuk petani kecil di masyarakat pedesaan negara bagian Taraba di Nigeria	Simulasi dan verifikasi eksperimental dengan <i>HPP Design Tool</i>
6	Brazzini et al. (2024)	Is small-scale hydropower energy recovery a viable alternative for climate change mitigation and adaptation? The case of the traditional irrigation system in Valencia (Spain)	Memperkirakan potensi pembangunan PLTA skala kecil pada sistem irigasi skala menengah di Valencia, Spanyol	Analisis studi literatur kritikal
7	Luo (2024)	Optimal operation model of ecological flow of hydropower station based on genetic algorithm and neural network	Memaksimalkan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dan mencapai perlindungan ekologi yang optimal dengan menetapkan model pengaturan aliran waduk	Simulasi yang dioptimalkan menggunakan pendekatan Algorithm-Backpropagation Neural Network (GA-BPNN) untuk menggabungkan analisis korelasi multi-objektif dan optimasi multi-objektif
8	Durvasulu et al. (2024)	Rationale for adding batteries to hydropower plants and tradeoffs in hybrid system operation: A review	Merealisasikan potensi hibrida Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) secara langsung terkait dengan irigasi, pengendalian banjir, dan kesehatan ekosistem sungai	Analisis studi literatur kritikal
9	Sangolt et al. (2025)	Hydrogen production from a run-of-river hydropower plant: Modeling the	Mengkaji pemanfaatan tenaga air sungai untuk produksi hidrogen melalui elektrolisis basa	Simulasi dengan MATLAB dan verifikasi eksperimental

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode Penelitian
		economic viability		
10	Hunt et al.(2025)	Optimizing hydropower generation with reservoir level management in humid regions	Menguji hipotesis bahwa bendungan di daerah lembab seperti Brasil dapat membantu meningkatkan aliran sungai karena kelembaban yang tinggi dan kondisi angin yang rendah di wilayah tersebut yang menyebabkan penguapan yang rendah di waduk	Analisis studi literatur kritikal

2.2 Landasan Teori

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) atau *pumped storage hydropower* merupakan teknologi penyimpanan energi skala besar dengan memanfaatkan dua reservoir pada tingkat elevasi yang berbeda. Ketika kebutuhan energi listrik rendah maka energi listrik dapat digunakan untuk memompa air dari reservoir bawah menuju reservoir atas dan sebaliknya. Teknologi ini penting dalam meningkatkan fleksibilitas sistem tenaga listrik sesuai kebutuhan sistem (Rehman et al., 2015).

Di Indonesia, pengembangan *pumped storage* merupakan bagian pengembangan sistem penyimpanan energi skala besar dimana salah satu proyeknya adalah *Upper Cisokan Pumped Storage* (UCPS) yang berlokasi di Jawa Barat. Proyek UCPS dirancang sebagai pembangkit *pumped storage* yang memanfaatkan reservoir atas dan reservoir bawah untuk menyimpan dan menghasilkan kembali energi listrik. Proyek UCPS menunjukkan bahwa *pumped storage* mulai dipertimbangkan dalam pengembangan infrastruktur ketenagalistrikan Indonesia khususnya dalam upaya untuk meningkatkan fleksibilitas sistem dan mendukung pengelolaan beban listrik (World Bank, 2011).

Karakteristik *pumped storage* menunjukkan bahwa ketersediaan dan pengelolaan air merupakan aspek penting dalam pengoperasian pembangkit. Meskipun volume air dapat digunakan antara reservoir atas dan reservoir bawah, *inflow* DAS tetaplah diperlukan untuk menggantikan air yang hilang akibat evaporasi, infiltrasi, maupun perubahan volume tampungan. Maka dari itu informasi mengenai *inflow* penting untuk menentukan

kemampuan reservoir mempertahankan kondisi operasi pembangkit terutama pada periode kemarau atau ketika ketersediaan air rendah (Hunt et al., 2018).

2.2.1 Gambaran Umum PLTA Grindulu

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) mengonversikan potensi tenaga air menjadi tenaga mekanik dalam turbin air yang kemudian memutar generator yang membangkitkan tenaga listrik. Potensi tenaga air memungkinkan didapatkan dari sungai yang mengalir di daerah pegunungan. PLTA dengan kolam tandon besar selain sebagai pembangkit tenaga listrik juga dapat menyediakan air irigasi, berkontribusi dalam pengendalian banjir, perikanan, penyedia air bagi lalu lintas pelayaran sungai, juga sebagai wisata (Marsudi, 2005).



Gambar 2.1 Proses Konversi Energi dalam PLTA (Marsudi, 2005)

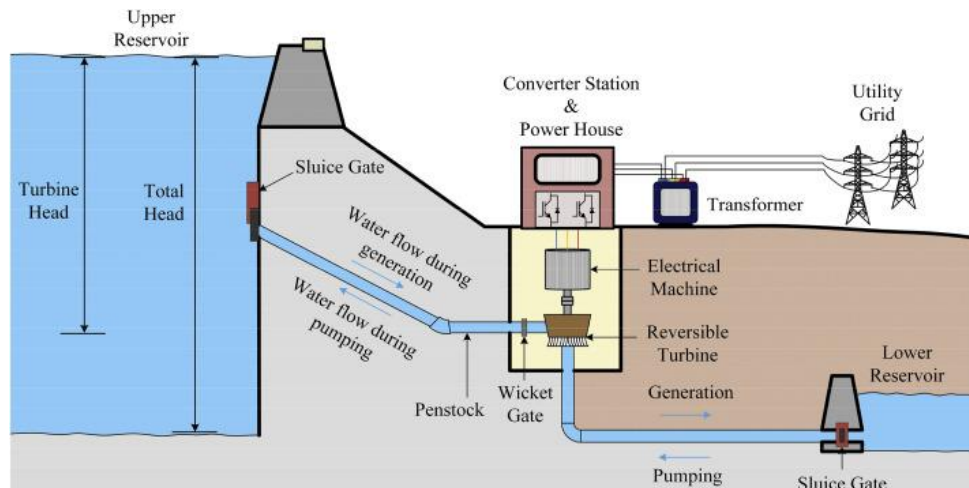
Mengacu pada RUPTL 2025-2034, di Jawa Timur direncanakan pembangunan PLTA *Pumped Storage* (PS) yaitu PLTA Grindulu PS yang terletak di wilayah Kecamatan Tegalombo, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur (PT. PLN (Persero), 2025). Sistem *Pumped Storage Hydropower* (PSH) menawarkan biaya yang ekonomis namun juga dapat menstabilkan sistem kelistrikan sehingga cocok untuk pemanfaatan energi terbarukan skala besar. PSH memiliki fleksibilitas dalam penyimpanan. Ketika permintaan listrik rendah maka kelebihan kapasitas dari pembangkit akan digunakan untuk memompa air ke *reservoir* yang lebih tinggi dan sebaliknya jika permintaan listrik tinggi maka air dilepaskan kembali ke *reservoir* yang lebih rendah (Petrescu, 2015).

PLTA Grindulu PS berlokasi ± 25 km timur laut Kota Pacitan yang merupakan Daerah Aliran Sungai (DAS) terbesar di Kabupaten Pacitan, Jawa Timur. DAS adalah suatu kawasan dengan batas-batas topografi dengan kemampuan menampung hingga mengalirkan air hujan yang jatuh ke sungai hingga ke danau atau laut. DAS juga dapat dikatakan sebagai sistem hidrologi alami dengan sungai menjadi komponen utama di dalamnya. Aliran sungai tersebut dipengaruhi oleh curah hujan dan kondisi biofisik yaitu geometri, morfometri, dan pedologi (Mizwar, 2022). DAS PLTA Grindulu merupakan bagian dari Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (BPDAS) Solo dengan luas DAS 737,757 km². Wilayah yang didominasi oleh perbukitan dengan sebagian kawasan memiliki kemiringan curam, DAS Grindulu yang sering mengalami banjir bandang (Ermansyah, 2022).

Pembangunan PLTA pada kawasan DAS Grindulu dengan pembuatan bendungan sebagai *reservoir* dapat digunakan untuk mengatur debit aliran sungai sehingga dapat mengurangi risiko banjir bandang pada kawasan hilir DAS Grindulu. PLTA Grindulu PS dirancang memiliki sumber pengisian *upper reservoir* menggunakan konstruksi bangunan di badan aliran sungai yang kontinu dengan bagian *lower reservoir*. Pada penelitian ini PLTA Grindulu PS diasumsikan menggunakan empat unit *pumped-turbine runner*. Setiap turbin Francis *reversible pumped-turbine* disediakan dengan *rated power* 250 MW, *head* rata-rata adalah 500 m dengan kecepatan 500 RPM dan diameter *runner* sekitar 3,6-4,5 m. Turbin terbuat dari material *hot pressed steel plate/steel cast component* dari *stainless steel* 4% nikel dan 13% kromium (PT. PLN (Persero), 2024).

2.2.2 Hidrologi dalam PLTA

Potensi tenaga air pada suatu wilayah bervariasi tergantung dari kondisi iklim, curah hujan, dan topografi pada lokasi PLTA yang akan dibangun. Energi potensial air pada waduk dapat dimanfaatkan menggunakan teknologi *hydropower* yang mengonversi energi potensial air untuk memutar turbin air sehingga memberikan produk akhir berupa energi listrik (Soeparman, 2015).



Gambar 2.2 Skema Operasional PLTA (Kougias et al., 2026)

Hidrologi dan hidraulika merupakan dua aspek penting yang saling terkait dan harus dipertimbangkan dalam perencanaan dan pengoperasian PLTA. Hidrologi dalam PLTA berfokus pada pemodelan aliran sungai, analisis, serta sumber daya air yang tersedia. Aspek hidrologi pada PLTA terdiri dari peramalan debit termasuk data curah hujan dan kondisi hidrologi lainnya, pemodelan hidrologi yaitu penggunaan model matematika untuk pola aliran air termasuk adanya perubahan pola air musiman dan tahunan, serta evaluasi dampak lingkungan PLTA terhadap ekosistem sungai dan lingkungan sekitar (Widiasmadi, 2023).

Curah hujan adalah data utama dalam sistem hidrologi DAS dimana sebagian curah hujan akan menjadi limpasan permukaan yang berpengaruh dalam debit sungai. Besarnya limpasan permukaan dipengaruhi oleh karakteristik curah hujan dan kondisi fisik DAS seperti jenis tanah, penggunaan lahan, topografi, dan kondisi kelembapan tanah (Beven, 2012). Data curah hujan dapat diperoleh dari stasiun observasi BMKG. Curah hujan dinyatakan sebagai tinggi air dalam tabung dalam ukuran mm yang dapat diukur dengan *rain gauge* atau alat ukur hujan. Untuk mengecek kelengkapan data curah hujan dan untuk mengetahui presentase data yang hilang sebelum analisis maka dilakukan QC missing data dari stasiun operasi dihitung dengan rumus:

$$P_m = \frac{n_m}{N} \times 100\% \quad (1)$$

dengan:

Pm = persentase data hilang (%)

nm = jumlah data hilang

N = total data pengamatan

Data dengan persentase kehilangan yang masih dalam batas toleransi dapat dilakukan dengan pengisian (*data filling*) menggunakan metode rata-rata stasiun terdekat (WMO, 2008).

Selanjutnya untuk mengecek apakah karakteristik data curah hujan relatif konsisten dari tahun ke tahun serta untuk mendeteksi kejanggalan data maka dihitung QC konsistensi antar tahun, melalui rumus:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (2)$$

dengan:

CV = koefisien variasi

σ = standar deviasi data curah hujan

X = nilai rata-rata curah hujan

Interpretasi nilai CV mengacu pada Soewarno (1995) dengan nilai sebagai berikut:

Tabel 2.2 Interpretasi nilai CV

Nilai CV	Interpretasi
<0,30	Konsisten/Baik
0,30-0,50	Cukup
>0,50	Tidak Konsisten

Konsistensi data hujan antar stasiun juga perlu diperiksa dengan membandingkan suatu stasiun terhadap stasiun hujan pembandin yaitu dengan melakukan QC konsistensi antar pos hujan menggunakan *Double Mass Curve* (DMC) yang dinyakan sebagai:

$$\sum P_x \text{ vs } \sum P_r \quad (3)$$

dengan:

$\sum P_x$ = akumulasi curah hujan stasiun

$\sum P_r$ = akumulasi rata-rata curah hujan stasiun pembanding

Dari data hujan yang sudah lolos QC maka selanjutnya adalah mengubah data hujan dari beberapa stasiun menjadi satu nilai hujan yang mewakili seluruh DAS berdasarkan bobot wilayah. Perhitungan DAS curah hujan harian dengan rumus berikut:

$$P_{DAS} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \quad (4)$$

dengan:

P_{DAS} = curah hujan rata-rata DAS (mm)

w_i = bobot luas stasiun hujan ke-i

P_i = curah hujan harian stasiun ke-i (mm)

n = jumlah stasiun hujan

Pada kejadian hujan terdapat Periode Ulang Hujan (PUH) yang menentukan besarnya hujan rencana untuk periode ulang tertentu, khususnya untuk menggambarkan kejadian hujan ekstrem. Dalam penelitian ini perhitungan PUH diawali dengan perhitungan hujan maksimum tahunan yang akan digunakan untuk analisis periode ulang hujan. Selanjutnya dilakukan analisis PUH untuk menentukan hujan rencana untuk periode ulang tertentu menggunakan metode Gumbel yaitu dengan rumus:

$$X_T = \bar{X} + K \cdot S \quad (5)$$

dimana:

X_T = hujan rencana

$\bar{X}$ = rata-rata R24

K = faktor frekuensi Gumbel

S = standar deviasi

Sementara itu untuk intensitas curah hujan dihitung melalui persamaan berikut rumus Mononobe sebagai berikut:

$$I = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{2/3} \quad (6)$$

dimana:

I = intensitas (mm/jam)

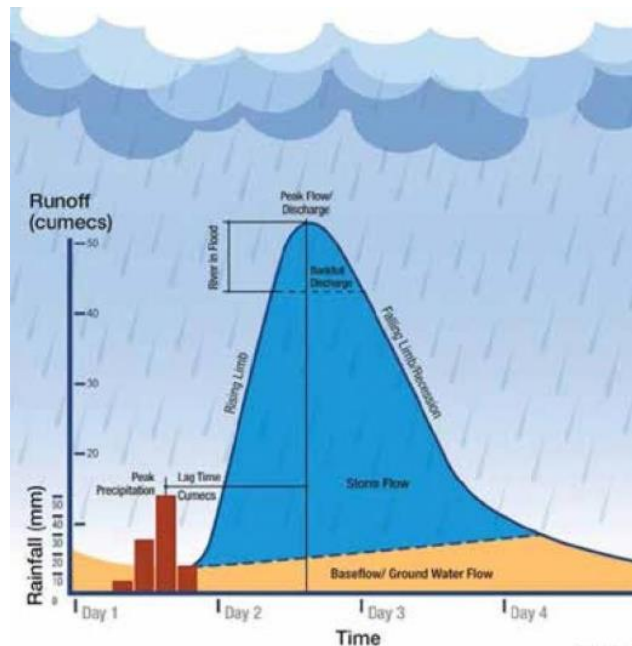
R_{24} = hujan harian maksimum

t = durasi hujan (jam)

Curah hujan berkorelasi langsung dengan debit sungai yang menunjukkan respons hidrologis DAS. Curah hujan berpengaruh pada peningkatan debit sungai setelah melalui proses penyimpanan, infiltrasi, dan *runoff*. Respons hidrologis antar DAS dapat berbeda bergantung pada karakteristik fisik dan kondisi hidrologis DAS (Beven & Feer, 2001). Debit sungai sendiri merupakan hasil beberapa komponen aliran seperti limpasan permukaan dan aliran dasar (*baseflow*) (Nathan & McMahon, 1990). Dalam sistem pembangkit listrik tenaga air, debit sungai menentukan besarnya ketersediaan aliran masuk ke *reservoir*. Sehingga perubahan curah hujan pada suatu kawasan DAS akan mempengaruhi besarnya debit aliran yang akan berdampak pada ketersediaan *inflow* untuk operasi PLTA.

Debit sungai dapat diukur dengan mengalikan luas luar bagian penampang sungai dengan kecepatan rata-rata aliran dari bagian penampang sungai. Cara lain adalah dengan melakukan pengamatan tinggi muka air menggunakan lengkung debit tinggi air di gardu pengukur (Rahayu et al., 2022). Dalam penelitian ini, data debit sungai didapatkan dari gardu-gardu pengamat di sekitar lokasi PLTA Grindulu PS.

Debit aliran sungai menjadi data yang sangat penting dalam pengelolaan sumber daya air. Debit puncak (banjir) dimanfaatkan dalam perancangan bangunan pengendali banjir sedangkan data debit aliran kecil digunakan dalam perencanaan pemanfaatan air untuk berbagai keperluan termasuk penanganan musim kemarau panjang. Untuk mengetahui potensi sumber daya air sebagai bentuk pemanfaatan DAS maka digunakan data debit aliran rata-rata tahunan. Debit aliran merupakan laju aliran air dalam bentuk volume air (m³) yang melalui penampang melintang sungai per satuan waktu. Besarnya debit dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik (m³/s). Umumnya debit aliran pada laporan teknis dipaparkan dalam bentuk hidrograf (Asdak, 2023).



Gambar 2.3 Hidrograf (Widiasmadi, 2023)

Hidrograf merupakan grafik perubahan debit aliran sungai karena perubahan curah hujan atau sumber air lain selama periode waktu tertentu. Hidrograf dapat memberikan informasi puncak debit, waktu puncak, durasi banjir, kehilangan air, sifat sungai, dan analisis banjir. Data hidrograf dapat diperoleh dari stasiun pengukuran aliran sungai. Hidrograf bagi perencanaan, pengoperasian, dan pengelolaan PLTA berfungsi menyediakan informasi pola aliran sungai atau bendungan untuk perhitungan kapasitas PLTA.

Untuk mengestimasi debit puncak akibat kejadian hujan rencana, dilakukan analisis debit banjir menggunakan metode rasional yaitu:

$$Q = 0.278CIA \quad (7)$$

dimana:

Q = debit banjir (m^3/s)

C = koefisien limpasan

I = intensitas hujan (mm/jam)

A = luas DAS (km^2)

Air hujan tidak semua terhitung ke dalam debit sungai. Sebagian air akan mengalami evaporasi, infiltrasi, atau menjadi aliran permukaan. Untuk mengetahui bagian

curah hujan yang menjadi limpasan berdasarkan karakteristik DAS maka dilakukan perhitungan Limpasan Permukaan (*Runoff*) Metode SCS *Curve Number* (CN) untuk menghitung limpasan permukaan, nilai CN dihitung menggunakan standar USDA-SCS (1986) dengan persamaan CN adalah:

$$CN_{komposit} = \frac{\sum (A_i \times CN_i)}{\sum A_i} \quad (8)$$

dengan:

$CN_{komposit}$ = nilai CN gabungan

A_i = luas penggunaan lahan ke-i

CN_i = nilai CN penggunaan lahan ke-i

Selanjutnya untuk mengubah curah hujan menjadi limpasan dengan mempertuimbangkan kehilangan air melalui infiltrasi, dapat dilakukan perhitungan *Rainfall-runoff transformation* untuk menghasilkan debit harian menggunakan rumus:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (9)$$

dimana:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (10)$$

dengan:

Q = *runoff* (mm)

P = curah hujan harian (mm)

S = potensi retensi maksimum DAS (mm)

CN = *Curve Number*

Perhitungan *runoff* dilanjutkan dengan mengonversi kedalaman limpasan (mm) menjadi debit dalam satuan m³/s berdasarkan luas DAS. Perhitungan debit untuk *runoff* harian menggunakan konversi volume limpasan:

$$Q_{runoff} = \frac{R \times A}{86.4} \quad (11)$$

dengan:

Q_{runoff} = debit *runoff* harian (m³/s)

R = *runoff* harian (mm)

A = luas DAS (km²)

86.4 = faktor konversi satuan

Berikutnya adalah dengan menggabungkan limpasan permukaan dan *baseflow* untuk memperoleh estimasi debit sungai dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{total} = Q_{runoff} + Q_{baseflow} \quad (12)$$

dengan:

Q_{total} = debit total sungai (m³/s)

Q_{runoff} = debit limpasan permukaan

$Q_{baseflow}$ = debit dasar

Untuk mendeskripsikan karakteristik debit hasil perhitungan maka dilakukan analisis debit statistik yang terdiri dari debit rata-rata, maksimum, dan minimum menggunakan rumus:

debit rata-rata:

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{n} \quad (13)$$

debit maksimum:

$$Q_{max} = \max(Q_i) \quad (14)$$

debit minimum:

$$Q_{min} = \min(Q_i) \quad (15)$$

dengan:

Q_i = debit harian

n = jumlah data

Perhitungan debit andalan menggunakan analisis probabilitas atau *Flow Duration Curve* (FDC) dimana:

Q10 = debit yang terlampaui 10% waktu

Q50 = debit median

Q90 = debit yang terlampaui 90% waktu
dengan rumus:

$$P = \frac{m}{n + 1} \times 100\% \quad (16)$$

dimana:

P = probabilitas keterlampaian (%)

m = ranking data debit

n = jumlah data

Hasil proses ini berupa *proxy inflow*, yang selanjutnya digunakan sebagai data set pelatihan model prediksi.

Untuk mengatasi keterbatasan jaringan saraf rekuren konvensional agar tetap dapat mempertahankan informasi jangka panjang, diperkenalkan *Long Short-Term Memory* (LSTM) yang menggunakan mekanisme memory cell dan beberapa gate untuk mengatur informasi untuk disimpan, dilupakan, atau diteruskan (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). Pada perkembangan selanjutnya, konsep *Bidirectional Recurrent Neural Network* (Bi-LSTM) dikembangkan agar jaringan dapat memanfaatkan informasi dari dua arah urutan data yaitu urutan maju dan mundur (Graves & Schmidhuber, 2005). Untuk membantu mengubah urutan data (*sequence*) input menjadi urutan yang lain, arsitektur Seq2Seq yang menggunakan komponen *encoder* dan *decoder* mampu meningkatkan kemampuan model dalam menangani hubungan temporal yang kompleks (Bahdanau et al., 2015).

Model prediksi yang digunakan dalam penelitian ini memiliki arsitektur model *encoder-decoder* berbasis *Bi-Directional Long Short-Term Memory Sequence-to-Sequence* (Bi-LSTM Seq2Seq) dengan pendekatan *Quantile Regression* (QR) untuk menghasilkan perkiraan *inflow* pada berbagai tingkat ketidakpastian (q10, q50, dan q90). Bagian *encoder* menggunakan Bi-LSTM untuk memproses data histori selama 30 hari dengan variabel masukan berupa curah hujan wilayah DAS dan debit total. Data hasil *encoding* diteruskan ke *decoder* berbasis LSTM dengan 128 *hidden units* dan dropout sebesar 0,2. *Decoder* menghasilkan prediksi untuk 7 hari ke depan dengan tiga *output quantile* pada setiap periode prediksi yaitu q10, q50, dan q90.

Dalam penelitian ini proses pelatihan model menggunakan *optimizer* AdamW dengan *learning rate* awal sebesar 0,001 dengan *batch size* sebesar 32 dan

maksimum 100 epoch. Dalam penelitian ini juga digunakan *ReduceLROnPlateau* untuk mengendalikan proses pelatihan yaitu dengan cara menurunkan *learning rate* ketika kinerja validasi tidak mengalami perbaikan dan *early stopping* dengan tingkat *patience* sebesar 15 epoch untuk mengurangi risiko *overfitting*.

Model menghasilkan tiga quantile yaitu Q0.10, Q0.50, Q0.90. Q10 merupakan batas bawah, Q50 merupakan nilai tengah/median, dan Q90 merupakan batas atas prediksi. Untuk quantile τ , fungsi pinball loss dapat dituliskan:

$$L_{\tau}(y, \hat{y}_{\tau}) = \begin{cases} \tau(y - \hat{y}_{\tau}), & y \geq \hat{y}_{\tau} \\ (1 - \tau)(\hat{y}_{\tau} - y), & y < \hat{y}_{\tau} \end{cases} \quad (16)$$

dengan:

y = nilai inflow aktual;

$\hat{y}_{\tau}$ = prediksi inflow pada quantile ;

τ = tingkat quantile;

L_{τ} = nilai *pinball loss*

Sehingga $\tau \in \{0.10, 0.50, 0.90\}$ fungsi loss dihitung untuk ketiga keluaran model. Hasil prediksi ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran awal mengenai ketersediaan air dan variasi debit harian/musiman pada DAS Grindulu.

2.2.3 Hidraulika (*Head* Efektif, Kapasitas Pompa dan Turbin)

Hidraulika merupakan ilmu mengenai aliran fluida. Dalam PLTA hidraulika mengacu pada desain dan operasi turbin dan saluran air, serta mekanisme lain yang berhubungan dengan perubahan energi hidraulik ke energi mekanis dan perubahan ke energi listrik. Aspek hidraulika dalam PLTA meliputi desain turbin sesuai kondisi aliran air, perilaku saluran air untuk menghindari kebocoran energi yang tidak diinginkan, dan efisiensi energi untuk mengoptimalkan efisiensi konversi energi air ke energi listrik. Terdapat beberapa analisis hidraulika untuk memahami karakteristik bendungan atau aliran sungai untuk PLTA yaitu analisis kekuatan dan keamanan struktur termasuk tekanan air dan stabilitas lereng, analisis debit aliran termasuk curah hujan, desain turbin dan komponen hidrolis, optimasi operasi PLTA, analisis dampak lingkungan, pengendalian banjir, dan manajemen sumber daya air (Widiasmadi, 2023).

Dalam hidraulika, saluran masuk dan keluar adalah komponen penting dalam perencanaan pompa. Fluida yang masuk ke dalam pompa mengalami perubahan kondisi aliran seperti *streamline* atau turbulensi yang harus dihindari. Maka dari itu desain saluran masuk pompa harus dibuat untuk menghindari terjadinya separasi. Sementara itu fluida yang mengalir keluar pompa akan keluar melalui rumah bantalan atau *upper bearing*. Untuk itu desain rumah bantalan harus dibuat agar dapat dilewati fluida (Mahardika et al., 2021).

2.2.4 Hubungan Hidrologi dan Sistem Operasi

Potensi energi PLTA ditentukan berdasarkan potensi kapasitas aliran air yang dapat dimanfaatkan (Q) dan perbedaan elevasi muka air waduk dengan posisi turbin (h). Maka potensi tenaga air dirumuskan:

$$E = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \quad (17)$$

Dengan: E = potensi energi *hydropower* (kW)

ρ = densitas air (kg/liter)

g = gaya gravitasi (m/detik²)

Q = kapasitas aliran (m³/detik)

H = ketinggian *head* (m)

Besar output tenaga listrik PLTA dirumuskan:

$$P = \eta_T \cdot \eta_P \cdot E \quad (18)$$

Dengan: P = output PLTA (kW)

η_T = efisiensi turbin air

η_P = efisiensi generator

(Soeparman, 2015)