



Desain PLTS *Off-Grid* Dengan Teknologi Penyimpanan Energi *Pumped Storage* Di Kabupaten Mahakam Ulu

Muhamad Cahyo Samudro¹, Widodo Pudji Muljanto², Irmalia Suryani Faradisa³, Sotyohadi⁴

^{1,2,3,4}Teknik Elektro, Teknik Industri, Institut Teknologi Nasional Malang

¹cahyosamudro76@gmail.com, ²widodo_pm@lecturer.itn.ac.id*, ³irmalia_suryani_faradisa@lecturer.itn.ac.id,

⁴sotyohadi@lecturer.itn.ac.id

Abstract

This research presents the design of an off-grid Solar Power Plant (PLTS) integrated with pumped storage energy technology in Mahakam Ulu Regency, East Kalimantan, as a sustainable energy solution for remote regions. The main objective of this study is to develop a reliable, efficient, and environmentally friendly power generation system by utilizing local renewable energy potential. The research methodology includes identifying 24-hour load demand, analyzing PLTS capacity based on solar radiation potential, calculating hydrological parameters such as water head and flow rate, and determining the capacity and dimensions of key components, including turbines, penstock pipes, pumps, inverters, and storage reservoirs. The technical data show a reservoir volume of 141.872 m³, a head height of 100 meters, a penstock diameter of 1.02 meters, a PLTS capacity of 9,6 MWp using 12.800 solar panels, and a 12 MW inverter. The analysis results indicate that the designed system can maintain continuous electricity supply during nighttime or low-solar conditions through stored potential energy utilization. This configuration significantly reduces dependency on diesel generators, decreases carbon emissions, and supports the national clean energy transition agenda. This study offers a novel approach to the development of off-grid solar power systems integrated with pumped storage technology for 3T (underdeveloped, frontier, and outermost) regions by utilizing local topographical characteristics and available water resources.

Keywords: solar power plant, pumped storage energy, renewable energy, clean Energy Transition, rural electrification

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid yang dikombinasikan dengan teknologi penyimpanan energi *pumped storage* di Kabupaten Mahakam Ulu, Kalimantan Timur, sebagai solusi penyediaan energi berkelanjutan di wilayah terpencil. Tujuan utama penelitian ini adalah menghasilkan rancangan sistem energi yang andal, efisien, dan ramah lingkungan dengan memanfaatkan potensi energi terbarukan lokal. Metode penelitian meliputi identifikasi kebutuhan energi beban selama 24 jam, analisis kapasitas PLTS berdasarkan potensi radiasi matahari, perhitungan parameter hidrologis seperti tinggi jatuh air (head), debit aliran, serta perancangan kapasitas dan dimensi komponen utama, yaitu turbin, pipa penstock, pompa, inverter, dan waduk penyimpanan. data teknis yang digunakan menunjukkan volume waduk sebesar 141.872 m³, tinggi head 100 meter, diameter pipa penstock 1,02 meter, kapasitas PLTS 9,6 MWp dengan 12.800 panel surya, serta inverter berkapasitas 12 MW. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu menjaga kontinuitas pasokan energi listrik pada malam hari atau saat radiasi matahari rendah melalui pemanfaatan energi potensial air. Sistem ini terbukti dapat mengurangi ketergantungan terhadap generator diesel, menurunkan emisi karbon, serta mendukung transisi energi bersih nasional. Penelitian ini menawarkan pendekatan baru dalam pengembangan sistem PLTS off-grid berbasis pumped storage untuk wilayah 3T dengan memanfaatkan potensi topografi dan sumber daya air lokal.

Kata kunci: pembangkit listrik tenaga surya, penyimpanan energi air, energi terbarukan, transisi Energi Bersih, elektrifikasi pedesaan.

Diterima Redaksi : 15-10-2025 | Selesai Revisi : 30-12-2025 | Diterbitkan Online : 31-12-2025

1. Pendahuluan

Akses terhadap energi listrik yang andal dan terjangkau merupakan salah satu indikator utama dalam pembangunan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup masyarakat. Namun, hingga saat ini, masih terdapat banyak wilayah di Indonesia yang belum sepenuhnya menikmati layanan listrik secara merata dan

berkelanjutan. Salah satu wilayah tersebut adalah Kabupaten Mahakam Ulu, Provinsi Kalimantan Timur, yang merupakan daerah perbatasan dan tergolong dalam kategori tertinggal, terdepan, dan terluar (3T). Keterisolasian wilayah ini, baik secara geografis maupun infrastruktur, menyebabkan sulitnya perluasan jaringan listrik dari sistem interkoneksi utama PLN, sehingga masyarakat setempat masih banyak

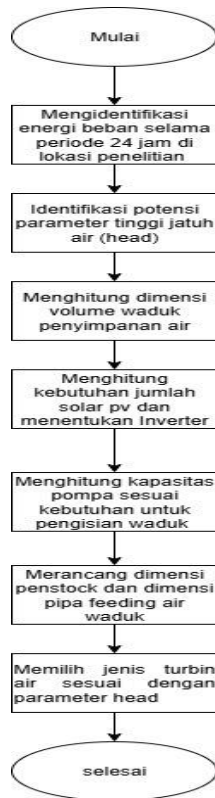
bergantung pada pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil, seperti generator diesel[1]. Penggunaan generator diesel, meskipun memberikan solusi jangka pendek terhadap kebutuhan listrik, memiliki sejumlah kelemahan yang signifikan. Biaya operasionalnya sangat tinggi karena ketergantungan pada pasokan bahan bakar yang harus didistribusikan melalui jalur transportasi darat dan sungai yang terbatas. Selain itu, sistem ini juga memberikan dampak lingkungan yang cukup besar akibat emisi karbon dan potensi pencemaran lingkungan dari limbah bahan bakar. Dalam jangka panjang, pendekatan ini tidak hanya tidak efisien dari sisi ekonomi, tetapi juga bertentangan dengan komitmen nasional terhadap transisi energi bersih dan mitigasi perubahan iklim. Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, pengembangan sistem pembangkitan energi terbarukan menjadi sangat penting, khususnya yang memanfaatkan potensi lokal. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid merupakan salah satu solusi strategis untuk menyediakan listrik di wilayah terpencil. Indonesia, termasuk Kalimantan Timur, memiliki potensi energi surya yang melimpah sepanjang tahun. PLTS menawarkan keunggulan dalam hal kemudahan instalasi, biaya operasional yang rendah, dan minim dampak lingkungan. Namun, PLTS juga memiliki keterbatasan utama, yaitu sifat intermiten dari sumber energi matahari yang menyebabkan ketidakstabilan pasokan energi, terutama saat malam hari atau cuaca mendung[2]. Selama ini, solusi umum untuk mengatasi intermittensi PLTS adalah penggunaan baterai kimia sebagai media penyimpanan energi. Meskipun secara teknis memungkinkan, baterai menghadapi tantangan serius dari sisi ekonomi dan keberlanjutan, seperti biaya investasi awal yang tinggi, umur pakai yang terbatas, serta persoalan terkait limbah dan daur ulang material berbahaya. Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif sistem penyimpanan energi yang lebih ekonomis, andal, dan ramah lingkungan untuk mendukung operasi PLTS secara berkelanjutan. Teknologi *Pumped Hydro Energy Storage* (PHES) atau penyimpanan energi air dengan sistem pompa menawarkan potensi sebagai solusi jangka panjang yang berkelanjutan[3]. Teknologi ini bekerja dengan prinsip memanfaatkan surplus energi dari PLTS untuk memompa air ke kolam penampungan di elevasi lebih tinggi, dan kemudian melepaskan air tersebut ke kolam bawah melalui turbin untuk menghasilkan listrik saat dibutuhkan. PHES tidak hanya memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi (70–85%), tetapi juga umur operasional yang panjang, biaya pemeliharaan rendah, serta lebih ramah lingkungan dibandingkan penyimpanan berbasis baterai kimia[4]. Konsep ini sangat cocok diterapkan di wilayah dengan kondisi topografi berbukit dan ketersediaan sumber air yang memadai. Kabupaten Mahakam Ulu memiliki potensi geografis dan hidrologis yang mendukung pengembangan sistem *pumped storage* berskala kecil hingga menengah. Bentuk wilayah yang berbukit, keberadaan sungai-sungai kecil, serta lahan yang belum

dimanfaatkan secara maksimal membuka peluang untuk penerapan sistem penyimpanan energi air yang terintegrasi dengan PLTS. Dengan memanfaatkan sumber daya alam lokal, sistem ini tidak hanya menghadirkan solusi teknis terhadap keterbatasan akses listrik, tetapi juga mendorong kemandirian energi masyarakat pedalaman[5].

Kebaruan penelitian ini terletak pada perancangan sistem PLTS off-grid skala besar yang terintegrasi dengan teknologi *pumped storage* sebagai media penyimpanan energi utama pada wilayah 3T, dengan pendekatan desain teknis menyeluruh berbasis kondisi geografis dan hidrologis lokal di Kabupaten Mahakam Ulu. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan baterai atau *pumped storage* skala terhubung jaringan, penelitian ini menekankan kemandirian energi off-grid berbasis sumber daya lokal.

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, proses perancangan sistem PLTS *off-grid* dengan teknologi penyimpanan energi *pumped storage* di Mahakam Hulu dilakukan melalui beberapa tahapan yang terstruktur. Tahapan tersebut diawali dengan identifikasi kebutuhan energi beban selama periode 24 jam sebagai dasar perhitungan kapasitas sistem. Selanjutnya dilakukan analisis potensi parameter teknis, seperti tinggi jatuh air (*head*), volume waduk penyimpanan, serta kebutuhan jumlah modul. Perancangan juga mencakup penentuan kapasitas pompa, dimensi *penstock* dan pipa pengisi waduk, hingga pemilihan jenis turbin air yang sesuai dengan kondisi hidrologi lokasi penelitian. Untuk menggambarkan alur kegiatan secara lebih sistematis, metode penelitian ini disajikan dalam bentuk flowchart pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1. Mengidentifikasi energi beban

Langkah awal dalam merancang sistem pembangkit listrik terdistribusi adalah melakukan identifikasi terhadap kebutuhan energi beban secara menyeluruh. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui total konsumsi energi harian yang dibutuhkan oleh pengguna di lokasi studi, baik untuk beban rumah tangga, fasilitas umum, maupun kebutuhan operasional lainnya. Informasi ini menjadi dasar dalam menentukan kapasitas pembangkit dan sistem penyimpanan energi yang akan digunakan. Dalam tahap ini, dilakukan inventarisasi peralatan listrik yang digunakan, termasuk daya masing-masing peralatan (watt), durasi pemakaian harian (jam), serta jumlah unit. Data tersebut kemudian digunakan untuk menghitung total energi beban harian dalam satuan *Watt-hour* (Wh)[6]. Agar pasokan listrik tetap stabil dan berkelanjutan. Berdasar perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Faktor.Penggunaan} = \frac{\text{Energi yang digunakan (Kwh)}}{\text{Daya maksimum (kW)} \times \text{waktu (jam)}} \quad (1)$$

2.2. Potensi Daya Turbin Air

Potensi daya yang dapat dihasilkan oleh turbin air sangat dipengaruhi oleh parameter hidrolik yang meliputi tinggi jatuh air (*head*), debit aliran, serta efisiensi sistem turbin. Semakin besar nilai head dan debit aliran, maka semakin besar pula energi potensial yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik melalui turbin dihitung menggunakan rumus :

$$P = \eta \times \rho \times Q \times g \times H \quad (2)$$

Keterangan :

ρ air = Massa Jenis Air 1000
 g = Percepatan Gravitasi 9,8 m/s
 H =Tinggi Jatuh Air
 Q = Debit Air (m/s)
 η = Effisiensi

2.3. Volume dan Luas Waduk

Waduk memiliki peran penting dalam sistem *pumped storage* sebagai media penyimpanan dan pengaliran air. Kapasitas energi potensial yang dapat disimpan sangat ditentukan oleh besarnya volume serta luas waduk yang dimiliki[7]. Oleh karena itu untuk mengetahui kemampuan waduk dalam menampung air yang akan digunakan pada proses konversi energi. Nilai volume dan luas waduk dapat diperoleh berdasarkan hubungan antara kedalaman, luas permukaan, serta kondisi topografi area dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Volume Waduk} = Q \times T \quad (3)$$

Keterangan :

Q adalah debit air (m/s)
 T waktu Pengisian (detik)

$$\text{Luas Waduk} = \frac{\text{Volume waduk (m}^3\text{)}}{\text{kedalaman waduk (m)}} \quad (4)$$

2.4. Pipa Penstock

Pipa *penstock* merupakan komponen utama yang berfungsi menyalurkan air dari *upper reservoir* menuju turbin dengan tekanan tertentu. Desain dan dimensi pipa *penstock* sangat memengaruhi efisiensi aliran serta besarnya kehilangan energi akibat gesekan di sepanjang saluran[8]. Oleh karena itu, analisis terhadap karakteristik pipa *penstock* diperlukan untuk menentukan kapasitas aliran yang optimal serta meminimalkan rugi-rugi tekanan dengan rumus :

$$D = \frac{\sqrt{4 \times Q_{pompa}}}{\pi v} \quad (5)$$

Keterangan :

D adalah diameter dalam pipa (m)
 Q_{pompa} adalah debit air pompa (m³/s)
 V Kecepatan aliran (m/s)

2.5. Parameter Head Loss dan Efisiensi Ketinggian

Dalam sistem *pumped storage*, energi potensial air yang mengalir dari *upper reservoir* menuju turbin tidak sepenuhnya berubah menjadi energi mekanik. Sebagian dari energi tersebut hilang akibat adanya gesekan dan turbulensi aliran air di sepanjang jalur aliran, khususnya pada pipa *penstock* serta komponen hidrolik lainnya. Kehilangan energi ini disebut sebagai head

loss, yang perlu diperhitungkan untuk mengetahui besarnya head efisien yang benar-benar dapat dimanfaatkan oleh turbin[9]. Nilai head efisien ini berperan penting dalam menentukan kemampuan turbin menghasilkan daya. Hubungan antara head total, *head loss*, dan head efisien dapat dinyatakan melalui persamaan berikut :

$$h_f = 10,67 \times \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} \times D^{4,752}} \quad (6)$$

Keterangan :

10,67 adalah Konstanta Hazen–Williams

h_f adalah head loss (m)

C adalah Koefisien kekasaran Hazen–Williams

D adalah diameter dalam pipa (m)

2.6 Turbin Air

Turbin merupakan perangkat utama pada sistem pembangkit *pumped storage* yang berperan dalam mengubah energi potensial air dari waduk atas menjadi energi mekanik melalui perputaran poros[10]. Energi mekanik tersebut kemudian dikonversi menjadi energi listrik dengan bantuan generator. Pemilihan tipe turbin harus menyesuaikan dengan tinggi jatuh (*head*) dan debit air yang tersedia[11]. Analisis kondisi hidrologis dan topografi di Mahakam Hulu menjadi sangat penting dalam menentukan spesifikasi turbin

$$NS = \frac{Nt \times \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

Keterangan :

NS adalah Nilai spesifik kecepatan

N adalah kecepatan putaran turbin (*rpm*)

H adalah Head efektif turbin (m)

P adalah Daya Turbin (kW)

2.7 Penentuan Kapasitas Inverter dan PV

Dalam sistem PLTS *off-grid*, pemilihan kapasitas inverter dan panel surya harus disesuaikan dengan kebutuhan energi harian serta tingkat efisiensi konversi energi[12]. Kapasitas yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara suplai dan permintaan daya[13]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan perhitungan untuk menentukan kapasitas inverter dan PV yang ideal, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\text{Kapasitas Inverter} = \text{Peak Load} \times \text{Safety Factor} \quad (8)$$

$$\text{Daya PV (W):} \quad \frac{\text{Energi PV}}{\text{Peak Sun Hours}} \quad (9)$$

$$\text{Total Jumlah PV (W):} \quad \frac{\text{Daya PV (W)}}{\text{Daya per PV (Wp)}} \quad (10)$$

2.8 Data Spesifikasi Sistem

Dalam perancangan sistem PLTS *off-grid* yang terintegrasi dengan teknologi *pumped storage*, beberapa asumsi teknis digunakan untuk menyederhanakan perhitungan dan menyesuaikan dengan kondisi lapangan. Nilai efisiensi turbin dan generator masing-masing sebesar 87% ditentukan berdasarkan spesifikasi teknis peralatan komersial. Efisiensi inverter sebesar 98,7% mengacu pada data teknis inverter skala industri yang umum digunakan pada sistem PLTS kapasitas besar. Nilai radiasi matahari rata-rata harian ditentukan berdasarkan aplikasi solar globe atlas sebesar 4,65 jam. Head sistem sebesar 100 meter ditetapkan berdasarkan perbedaan elevasi alami kawasan Batu Dinding di Kabupaten Mahakam Ulu, sedangkan debit air dihitung berdasarkan kebutuhan daya turbin dan kapasitas penyimpanan energi *pumped storage*. Asumsi-asumsi ini digunakan untuk menghasilkan desain sistem yang realistis, aman, dan dapat diimplementasikan secara teknis. Rincian spesifikasi komponen disajikan pada Tabel berikut :

Tabel 1.Data Spesifikasi Sistem

Komponen	Jumlah	Efisiensi (%)
Turbin Air	2	87
Generator	2	87
Motor Pompa	14	85
Inverter	12	98,7
Solar PV	12.800	23,8

3. Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan hasil dari proses perancangan sistem PLTS *Off-Grid* yang dilengkapi dengan teknologi penyimpanan energi *pumped storage* di wilayah Mahakam Ulu. Desain yang dihasilkan mencakup konfigurasi sistem, kapasitas komponen utama, serta skema integrasi antara PLTS dan sistem penyimpanan energi. Gambar-gambar berikut menggambarkan visualisasi dari hasil desain tersebut.

3.1. Identifikasi Beban

Hasil Penelitian didapat berdasar dari faktor penggunaan dan faktor beban di Mahakam hulu terutama terdapat pada PLTD Long bagun

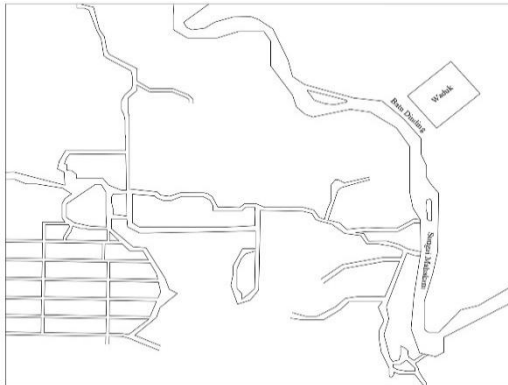
$$\text{Faktor.Penggunaan} = \frac{31872 \text{ (Kwh)}}{2200(\text{kW}) \times 24 \text{ (jam)}}$$

$$\text{Faktor.Penggunaan} = 1328 \text{ Kw}$$

Pemilihan Pltd Long bagun berdasar pada lokasi yang berdekatan dengan Plts Off grid *pumped storage* yang akan dilakukan lokasi penelitian hal ini menjadi pertimbangan berapa besar kapasitas generator yang akan dipasang dalam sistem yaitu sebesar 2 generator masing- masing berukuran 700 Kw.

3.2. Penentuan Lokasi

Penentuan lokasi penempatan sistem PLTS *Off-Grid* dan fasilitas penyimpanan energi *pumped storage* menjadi tahap krusial dalam perancangan sistem energi terbarukan ini. Pada penelitian ini, kawasan wisata Batu Dinding di Mahakam Ulu dipilih sebagai lokasi utama karena memiliki karakteristik geografis yang sangat mendukung, baik dari sisi ketersediaan lahan yang luas maupun perbedaan elevasi yang signifikan. Kawasan Batu Dinding menawarkan ketinggian alami sekitar 100 meter, yang sangat ideal untuk menciptakan head pada sistem *pumped storage* sehingga dapat memaksimalkan pemanfaatan energi potensial gravitasi dari sungai mahakam. Selain itu, lokasi ini masih berada dalam kawasan yang dapat diakses oleh masyarakat sekitar dan berdekatan dengan pusat kebutuhan energi, sehingga memudahkan distribusi energi listrik yang dihasilkan.

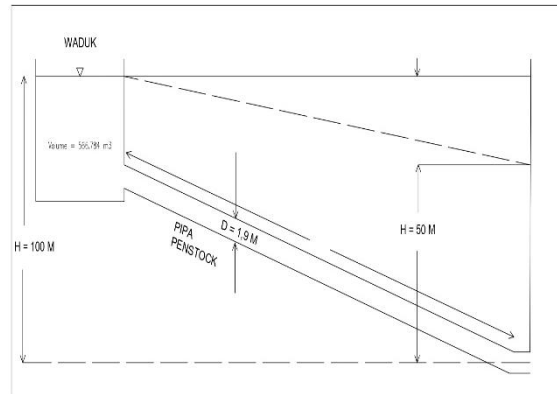


Gambar 2. Denah Lokasi

3.2. Luas, Volume Waduk dan Diameter Pipa Penstock

Perancangan sistem penyimpanan energi *pumped storage* sangat bergantung pada kapasitas waduk dan dimensi saluran penyalur air (pipa *penstock*). Oleh karena itu, dalam tahap ini dilakukan analisis dan estimasi terhadap luas permukaan waduk, volume air yang dapat disimpan, serta diameter pipa penstock yang digunakan untuk mengalirkan air dari waduk atas ke waduk bawah saat proses pelepasan energi. Penentuan luas dan volume waduk didasarkan pada kebutuhan energi harian masyarakat setempat, efisiensi turbin, ketinggian head (100 meter), serta jumlah siklus pengisian dan pengosongan air dalam sehari. Waduk atas dirancang agar mampu menampung volume air yang cukup untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti evaporasi, kehilangan air, dan fluktuasi debit. Berdasarkan perhitungan rumus (3) dan (4) didapat hasil untuk Volume waduk sebesar 141.872 m^3 dan untuk Luas waduk didapat hasil 2837 m^2 . Selain itu, diameter pipa *penstock* sangat memengaruhi debit aliran dan efisiensi sistem. Diameter dihitung agar aliran air mampu menghasilkan tekanan yang optimal tanpa kehilangan energi berlebih akibat gesekan. Pemilihan material pipa juga diperhitungkan untuk menghindari korosi dan menyesuaikan dengan tekanan

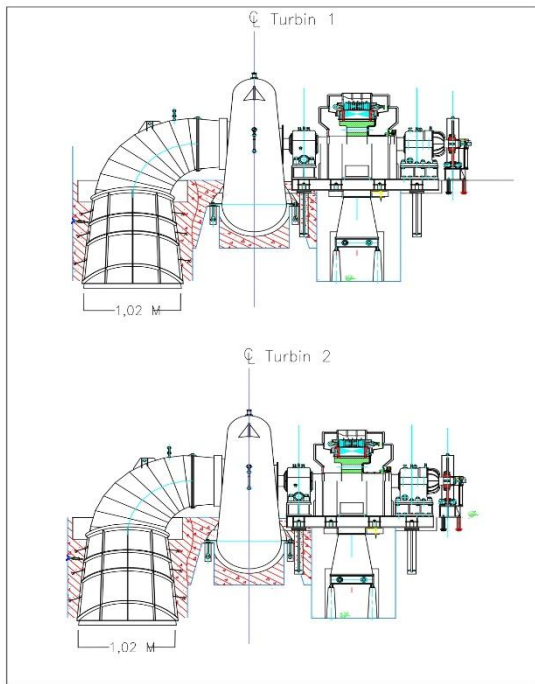
operasi. Dari hasil perhitungan teknis berdasar pada rumus (5), diameter pipa *penstock* yang dibutuhkan adalah 1,02 m.



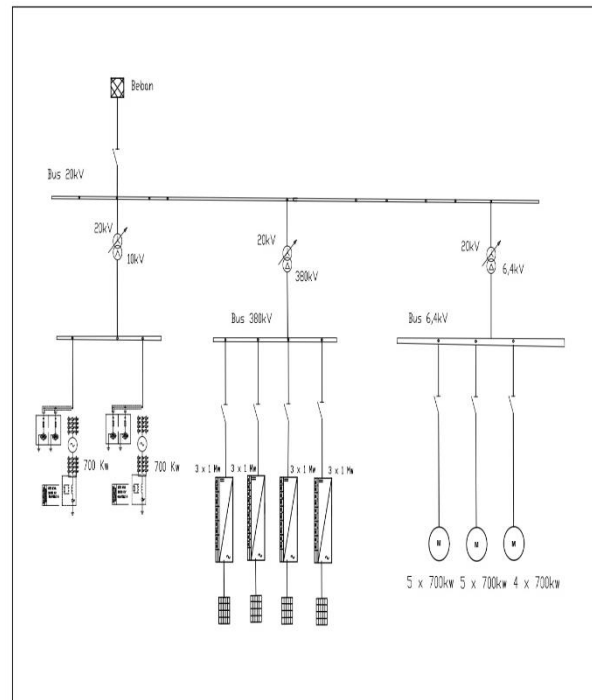
Gambar 3. Luas, Volume Waduk dan Pipa Penstock

3.3. Perhitungan dan Hasil Gambar Turbin

Untuk menjamin efisiensi dan keandalan sistem penyimpanan energi berbasis *pumped storage* yang diintegrasikan dengan PLTS *Off-Grid* di Mahakam Ulu, diperlukan kajian teknis yang mendalam terhadap komponen utama sistem, salah satunya adalah turbin. Turbin berperan sebagai pengubah energi potensial air yang disimpan di kolam atas menjadi energi mekanik, yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik saat terjadi kebutuhan beban. Dalam subbab ini, akan dipaparkan proses perancangan dan perhitungan parameter teknis turbin, termasuk debit air, ketinggian jatuh (*head*), efisiensi, daya keluaran, serta pemilihan jenis turbin yang paling sesuai dengan karakteristik topografi dan kebutuhan energi di lokasi studi. Dari perhitungan rumus (2) dan (5) didapat daya turbin sebesar 1400 kW dan debit air juga diperoleh perhitungan $1,64 \text{ m}^3/\text{s}$. Selain itu, disertakan pula representasi visual berupa gambar desain turbin yang digunakan, guna memberikan gambaran menyeluruh terhadap implementasi sistem. Dengan desain ini yang merupakan design turbin francis yang nilai kecepatan spesifiknya dihitung menggunakan rumus (7) didapat nilai sebesar 89 yang cocok penerapannya dengan turbin francis bertujuan untuk memastikan bahwa turbin yang dirancang tidak hanya memenuhi aspek teknis, tetapi juga mampu beroperasi secara optimal dalam kondisi lingkungan Mahakam Ulu yang memiliki tantangan geografis tersendiri. Dengan pendekatan ini, diharapkan sistem PLTS *Off-Grid* dengan dukungan teknologi *pumped storage* dapat berjalan secara berkelanjutan dan efisien dalam jangka panjang.



Gambar 4. Turbin



Gambar 5. Single Line Diagram

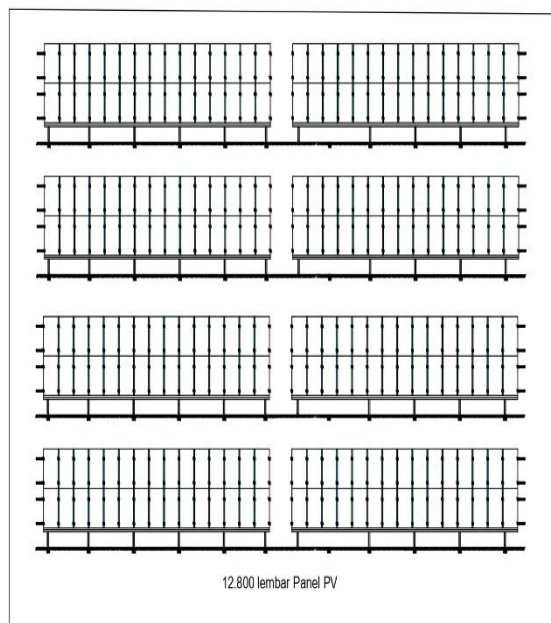
3.4 Kapasitas Inverter

Menentukan kapasitas inverter yang sesuai. Inverter merupakan komponen penting dalam sistem PLTS off-grid karena berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya dan disimpan dalam sistem penyimpanan menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh peralatan listrik konvensional. Pemilihan kapasitas inverter tidak hanya mempertimbangkan daya total beban, tetapi juga karakteristik beban (induktif atau resistif), faktor daya (power factor), serta kemungkinan adanya lonjakan beban awal (starting surge) terutama pada peralatan seperti pompa, kulkas, atau mesin cuci. Oleh karena itu, kapasitas inverter harus cukup untuk menangani beban puncak serta mempertahankan stabilitas tegangan dan frekuensi selama waktu operasi. Selain itu, efisiensi inverter juga memengaruhi performa keseluruhan sistem. Inverter dengan efisiensi tinggi akan meminimalkan kehilangan energi selama proses konversi. Dalam perhitungan ini, kapasitas inverter akan ditentukan berdasarkan total daya beban maksimum, faktor keamanan (safety faktor), dan efisiensi inverter yang dipertimbangkan. Bagian berikut menyajikan pendekatan perhitungan kapasitas inverter menggunakan rumus (8), dengan mempertimbangkan daya beban maksimum yang teridentifikasi serta faktor koreksi yang relevan. Hasil dari perhitungan didapat kapasitas inverter sebesar 11,52 MW dan mengikuti tersedianya inverter di pasaran atau industri nilainya menjadi 12 MW dengan berjumlah 12 inverter kapasitas 1 MW yang akan menjadi dasar dalam pemilihan spesifikasi inverter yang optimal untuk mendukung sistem PLTS *off-grid* di Mahakam Ulu.

3.5 Kapasitas PLTS

Setelah dilakukan analisis kebutuhan energi beban harian dan penentuan kapasitas inverter, langkah berikutnya dalam perancangan sistem adalah menentukan kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat secara berkelanjutan. Penentuan kapasitas PLTS merupakan komponen kunci dalam desain sistem, karena besarnya kapasitas ini akan langsung memengaruhi efisiensi sistem, kapasitas penyimpanan energi, serta biaya investasi awal. Perhitungan kapasitas PLTS harus mempertimbangkan beberapa parameter teknis utama, antara lain total energi beban harian yang telah teridentifikasi, intensitas radiasi matahari rata-rata harian di lokasi Mahakam Ulu, derating factor sistem, serta efisiensi panel surya. Selain itu, perlu juga diperhitungkan faktor cadangan (*reserve factor*) untuk mengantisipasi penurunan kinerja panel akibat kondisi lingkungan, akumulasi debu, suhu tinggi, dan degradasi modul seiring waktu. Dalam sistem PLTS off-grid yang terintegrasi dengan teknologi *pumped storage* seperti yang dirancang dalam penelitian ini, kapasitas PLTS tidak hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan beban langsung, tetapi juga untuk mengisi energi ke sistem penyimpanan saat produksi melebihi konsumsi. Oleh karena itu, sistem dirancang dengan pendekatan *oversizing* tertentu untuk memastikan ketersediaan energi sepanjang waktu, termasuk pada hari-hari dengan tingkat radiasi rendah. Berdasarkan perhitungan kapasitas PLTS menggunakan pendekatan berbasis energi harian pada rumus (9) dan (10) didapat total daya PLTS yang harus dihasilkan adalah sebesar 9,6 MWp dan banyaknya lembar PLTS yang dibutuhkan sebanyak 12.800 lembar Panel PV, dan pada gambar 6

akan memperlihatkan konfigurasi sistem PV yang mencakup jumlah modul, susunan *array*, dan orientasi instalasi. Hasil perhitungan ini menjadi acuan utama dalam menentukan dimensi dan tata letak sistem PLTS yang optimal, efisien, dan sesuai dengan karakteristik lokasi Mahakam Ulu.



Gambar 6. Konfigurasi PLTS

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) off-grid yang terintegrasi dengan teknologi penyimpanan energi *pumped storage* untuk wilayah Mahakam Ulu, Kalimantan Timur. Berdasarkan hasil perhitungan teknis, sistem yang dirancang memiliki kapasitas PLTS sebesar 9,6 MWp dan memanfaatkan 12.800 panel PLTS dihasilkan tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan beban masyarakat, tetapi juga dapat disimpan dalam sistem penyimpanan energi air melalui pemompaan ke waduk atas. Teknologi *pumped storage* menjadi solusi alternatif yang ramah lingkungan. Desain sistem PLTS *off-grid* yang dipadukan dengan teknologi penyimpanan energi *pumped storage* pada penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis potensi lokal dapat menjadi solusi yang efektif dalam menjawab tantangan elektrifikasi di wilayah terpencil seperti kabupaten Mahakam Ulu. Pemanfaatan energi surya yang melimpah, dikombinasikan dengan penyimpanan energi melalui media air, memberikan ketersediaan energi listrik yang lebih stabil dan berkelanjutan tanpa ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Sistem ini tidak hanya memberikan dampak teknis yang positif, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan peningkatan kemandirian energi masyarakat. Dengan keluaran daya generator sebesar 1400 kW dan volume waduk mencapai 144.782 m^3 , sistem ini mampu menyediakan energi listrik yang andal untuk

kebutuhan masyarakat sekaligus menyimpan energi surplus secara efisien. Penelitian ini dapat menjadi referensi awal untuk implementasi proyek serupa di wilayah terpencil lainnya yang memiliki karakteristik geografis serupa, sekaligus mendorong pengembangan energi terbarukan sebagai bagian dari agenda dekarbonisasi nasional.

Daftar Rujukan

- [1] A. Priyohutomo, D. Candra Riawan, and S. Soedibyo, "Studi Kelayakan Water Pumped Energy Storage Sebagai Penyimpanan Energi PLTS Mandiri Pada Daerah Terisolir," *J. FORTECH*, vol. 2, no. 1, pp. 9–18, 2021, doi: 10.32492/fortech.v2i1.234.
- [2] E. A. Yulanda, J. T. Susilo, A. Tama, S. Sunardi, D. A. Prakoso, and A. Yanuar, "Perancangan Pembangkit Listrik Hybrid dengan Tenaga Surya dan Tenaga Mikrohidro," *Epic J. Electr. Power Instrum. Control*, vol. 7, no. 1, pp. 89–97, 2024, doi: 10.32493/epic.v7i1.39647.
- [3] B. Hammad, S. Al-Dahidi, Y. Aldahouk, D. Majrouh, and S. Al-Remawi, "Technical, Economic, and Environmental Investigation of Pumped Hydroelectric Energy Storage Integrated with Photovoltaic Systems in Jordan," *Sustain.*, vol. 16, no. 4, 2024, doi: 10.3390/su16041357.
- [4] B. Chegari, M. Tabaa, and E. Simeu, "Optimal Energy Management of a Hybrid System Composed of PV, Wind Turbine, Pumped Hydropower Storage, and Battery Storage to Achieve a Complete Energy Self-Sufficiency in Residential Buildings," *IEEE Access*, vol. 12, no. July, pp. 126624–126639, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3454149.
- [5] D. F. Silalahi, A. Blakers, B. Lu, and C. Cheng, "Indonesia's Vast Off-River Pumped Hydro Energy Storage Potential," *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15093457.
- [6] R. Ansorena Ruiz *et al.*, "Low-head pumped hydro storage: A review on civil structure designs, legal and environmental aspects to make its realization feasible in seawater," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 160, no. September 2021, p. 112281, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112281.
- [7] C. S. Samosir, W. Soetopo, and E. Yuliani, "Optimasi Pola Operasi Waduk untuk Memenuhi Kebutuhan Energi Pembangkit Listrik Tenaga Air (Studi Kasus Waduk Wonogiri)," *J. Tek. Pengair.*, vol. 6, no. 1, pp. 108–115, 2015.
- [8] S. Sari, Y. S. Putra, and H. Hasanuddin, "Studi Aliran Air dalam Pipa Penstock pada Sistem Mikrohidro dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamics," *Prism. Fis.*, vol. 10, no. 3, p. 304, 2023, doi: 10.26418/pf.v10i3.58113.
- [9] N. A. N. Lou, Y. Zhang, and Z. Guo, "Two-Stage Congestion Management Considering Virtual Power Plant With Cascade Hydro-Photovoltaic-Pumped Storage Hybrid Generation," pp. 186335–186347, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030637.
- [10] K. A. Syahrul and M. A. Sahbana, "Pengaruh Jenis Sudu terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Air Kinetik Poros Horizontal," *Proton*, vol. 10, no. 2, pp. 20–24, 2018.
- [11] Z. Giljen, M. Nedeljković, and Y. Cheng, "The Influence of Pump-Turbine Specific Speed on Hydraulic Transient Processes," *Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng.*, vol. 70, no. 5–6, pp. 231–246, 2024, doi: 10.5545/sv-jme.2023.776.
- [12] R. Y. Nikijuluw, Y. Tanoto, and M. Santoso, "Perencanaan Sizing dan Analisa Biaya Energi Sistem PLTS di Komunitas Desa Muara Langon, Kabupaten Paser, Kalimantan Timur," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 56–61, 2016, doi: 10.9744/jte.9.2.56-61.
- [13] H. R. Josia, "Off-Grid Solar PV System Design in Isolated Island for Sustainable Energy Access: A Case Study in Sukun Island, Indonesia," *J. Sol. Energy Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 1609–1621, 2023, doi: 10.22059/jser.2023.360373.1318.

