

# Studi Kelayakan Water Pumped Energy Storage Sebagai Penyimpanan Energi PLTS Mandiri Pada Daerah Terisolir

<sup>1</sup> Arif Priyohutomo, <sup>2</sup> Dedet Candra Riawan, <sup>3</sup> Soedibyo

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: priyohutomo.a@gmail.com; dedet.riawan@ee.its.ac.id; soedieb@ee.its.ac.id

---

## Article Info

### Article history:

Received November 24<sup>th</sup>, 2020

Revised December 23<sup>th</sup>, 2020

Accepted January 25<sup>th</sup>, 2021

---

### Keyword:

Photovoltaic,

Feasibility Study,

Water Pumped Energy Storage.

---

## ABSTRACT

Research and development on the implementation of renewable energy is growing rapidly, especially about photovoltaic (PV) and energy storage. Water pumped energy storage (WPES) is an alternative storage media in a standalone solar power system because of its longer technical life than chemical storage types, such as batteries. To assess the feasibility of WPES implementation as an energy storage in the standalone solar power plant system, the process of sizing the system components needs to be carried out by considering technical and economic aspects. This research will discuss the sizing process of standalone solar power system using WPES with closed loop reservoir systems and its economic analysis. The sizing process is carried out by the method of power balance, energy balance, and volume balance while economic viability is seen from the capital cost, O&M cost, and revenue from electrical energy absorbed by the load. In this study, the daily load profile with energy demand of 79 kWh and peak load of 4.36 kW. The analysis shows the need of 56 kWp PV system, 3800 m<sup>3</sup>reservoir capacity with 20m head. The calculation shows the technical efficiency of the system is 28.2%. From the economic analysis, the sistem's payback period is 24 years, assuming the reservoir technical age is 50 years with net present value of Rp 2,072,823,731.86 and return of investment 105%.

Copyright © 2021 Jurnal FORTECH.  
All rights reserved.

---

*Abstrak-* Penelitian dan pengembangan tentang implementasi renewable energy berkembang semakin pesat, khususnya tentang photovoltaic (PV) dan energy storage. Water pumped energy storage (WPES) adalah alternatif media penyimpanan pada sistem PLTS mandiri karena usia teknis yang lebih panjang daripada jenis penyimpan kimia, misal baterai. Untuk menilai kelayakan implementasi WPES pada sistem PLTS, proses sizing komponen sistem perlu dilakukan dengan mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis. Penelitian ini akan membahas proses sizing sistem PLTS mandiri menggunakan media penyimpan WPES dengan sistem closed loop reservoir dan analisis ekonominya. Sizing dilakukan dengan metode power balance, energy balance dan volume balance sedangkan kelayakan ekonomi dilihat dari capital

cost, O&M cost, dan revenue dari energi listrik terserap oleh beban. Pada penelitian ini digunakan profil beban harian dengan energi demand 79 kWh dengan beban puncak 4.36 kW. Analisis menunjukkan kebutuhan sistem PV sekitar 56-kWp dengan kapasitas reservoir 3800m<sup>3</sup> deangan head 20m. Perhitungan menunjukkan efisiensi teknis dari sistem yang diteliti sebesar 28.2%. Dari analisis ekonomi diperoleh payback period sebesar 24 tahun dengan asumsi umur teknis reservoir adalah 50 tahun. Net present value investasi sebesar Rp 2.072.823.731,86 dengan nilai return of investment sebesar 105%.

*Kata Kunci*—Photovoltaic, Studi Kelayakan, Water Pumped Energy Storage.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan suatu kebutuhan penting dan mendasar dalam kehidupan saat ini, bahkan daerah terisolir di Indonesia yang pada jaman dahulu menggunakan piranti non-elektronik, kini mulai beralih menggunakan piranti elektronik. Sebagian besar daerah terisolir di Indonesia umumnya menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) sebagai pembangkitan listrik[1]. Namun, dari kondisi ini muncul permasalahan dimana bahan bakar fosil akan habis sedangkan kebutuhan energi semakin meningkat.

Dengan adanya permasalahan ini, maka penelitian dan pengembangan energi terbarukan semakin berkembang. Salah satunya adalah photovoltaic (PV), dimana teknologi ini mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Penerapan teknologi PV ini semakin digencarkan seiring dengan peningkatan efisiensi sel surya serta teknologi pembuatan panel surya[2]. Dalam aplikasi daerah kecil terisolir, PV normalnya beroperasi secara mandiri atau *stand-alone*. Bagian yang perlu menjadi perhatian dalam sistem *stand-alone* PV adalah *energy storage*. Fungsi dari *energy storage* sendiri adalah sebagai tempat menyimpan energi serta suplai energi saat PV tidak menerima cahaya matahari[3].

*Energy storage* yang umum digunakan untuk sistem *stand-alone* PV salah satunya adalah dengan *Water Pumped Energy Storage* (WPES) [4]. WPES memiliki kelebihan diantara lain memiliki *lifetime* yang lebih lama dari baterai, yaitu kurang lebih 50 tahun[5]. Ditambah lagi penggunaan air sebagai *energy storage* dinilai lebih ideal ketika diterapkan pada daerah terisolir [4]. Selain itu, karakteristik *discharge* energi dari WPES lebih fleksibel daripada baterai dan kapasitas penyimpanan energinya yang besar memungkinkan untuk memperbaiki kestabilan pada grid dari *renewable energy* seperti PV[6]. Prinsip kerja dari WPES adalah, WPES menggunakan daya yang dihasilkan matahari pada pagi hari untuk memompa air dari LR(LR) menuju UR (UR), lalu air pada UR akan digunakan untuk memutar turbin generator di malam hari.

Sebelum mengaplikasikan PLTS mandiri menggunakan WPES, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang studi kelayakan mengenai *sizing* dan aspek ekonomi WPES agar pengoperasian WPES tidak mengalami gangguan karena kesalahan parameter komponen dan mengetahui kelayakan investasi pemasangan PLTS mandiri menggunakan WPES.

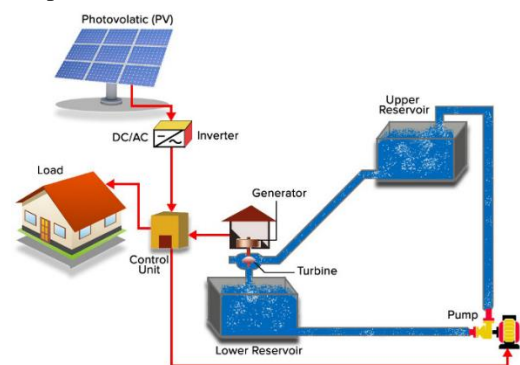
Penelitian ini bertujuan untuk membahas lebih lanjut terkait *sizing* sistem dan aspek ekonomi dari investasi pemasangan PLTS mandiri menggunakan WPES. *Sizing* dari

sistem dilaksanakan agar kita mampu menentukan rating dari masing-masing elemen PLTS mandiri menggunakan WPES dan analisis ekonomi dilakukan untuk mengetahui apakah investasi tersebut menguntungkan. Penelitian tentang *sizing* ini akan ditinjau dari biaya investasi pemasangan sistem, analisis *power balance*, *energy balance*, dan *volume balance* dengan profil beban dan harga jual listrik berdasarkan BPP PLTD daerah terisolir[1] serta menganalisis dari aspek ekonomi terhadap pemasangan sistem.

II. METODE PENELITIAN

A. Topologi dan Pemodelan Sistem

Sistem pembangkitan dan penyimpan energi pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem terdiri dari pembangkitan berbasis PV, generator, *water pump*, *reservoir*, dan *beban*. Sistem yang diteliti membentuk sistem pembangkitan *stand-alone* berbasis PV dengan media penyimpan WPES. Pada saat cahaya matahari tersedia, PV menghasilkan daya listrik dan generator yang diputar oleh turbin air diasumsikan beroperasi dengan mode daya konstan. Jika daya luaran total PV dan generator lebih besar dari beban, maka selisih daya akan digunakan oleh motor pompa untuk menaikkan air dari LR ke UR. Dalam hal ini *reservoir* berfungsi sebagai media penyimpan energi dalam bentuk energi potensial air. Dengan topologi sistem pembangkitan dan *energy storage* di atas maka suplai ke beban dapat tersedia secara kontinu dan stabil meskipun daya dari PV berubah-ubah akibat perubahan iradiasi matahari.



Gambar 1. Topologi PLTS menggunakan *close loop* WPES.

Pada penelitian ini analisis aliran daya antar komponen dibatasi pada kesetimbangan daya statis. Jenis dan tipe peralatan hanya akan mempengaruhi efisiensi konversi energi yang terjadi. Komponen yang digunakan pada penelitian ini adalah *centrifugal pump induction motor* sebagai pompa air, *tURgo tURbine permanent magnet generator* (PMG) sebagai generator, dan *polycrystalline solar panel* untuk PLTS.

Pemodelan sistem pada penelitian ini adalah perhitungan daya per subsistem, *pipe loss* darcy-weissbach, *power balance*, *volume balance*, dan *energy balance*. Berikut adalah pemodelan sistem pada penelitian ini.

1. *Kalkulasi daya per subsistem*

Sebagai sumber energi utama dari sistem, yang dimaksud luaran daya PLTS, selanjutnya disebut  $P_{PV}$ , adalah luaran daya bersih yang dihasilkan PLTS setelah melalui berbagai jenis konversi energi dari cahaya matahari menuju listrik DC hingga dikonversi menjadi listrik AC oleh inverter.

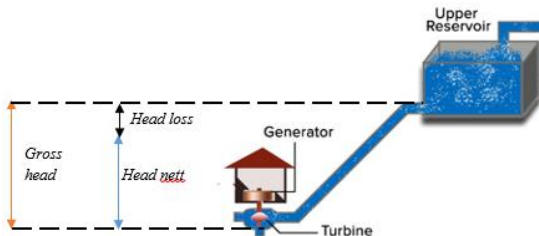
Lalu daya yang diserap oleh beban, selanjutnya disebut  $P_{load}$  adalah *power demand* beban daerah terisolir yang tidak mempertimbangkan rugi-rugi jaringan.

Daya bersih yang dibangkitkan oleh sub sistem generator, selanjutnya disebut  $P_{AFVR}$  adalah hasil bersih konversi daya mekanik dari UR dengan mempertimbangkan *pipe loss*, efisiensi  $\mu_{UR}$  dan  $\mu_{URbine}$  PMG, dan efisiensi *Automatic Voltage Frequency Regulator* (AFVR).  $P_{AFVR}$  dituliskan dalam persamaan sebagai berikut [7] :

$$P_{AFVR} = \frac{\mu_g \rho \cdot g \cdot h \cdot Q_G}{3.6 \times 10^6} \tag{1}$$

Dimana  $\mu_g$  efisiensi komponen dari sistem generator,  $\rho$  adalah massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>),  $h$  adalah *head nett* sistem (*gross head* – *head loss*) (m),  $Q_G$  adalah debit air menuju generator (m<sup>3</sup>/h), dan  $\mu_g$  sebagai efisiensi total dari generator, turbin, dan AFVR.

Perlu diperhatikan bahwa ketinggian bersih (*head nett*) dari sistem dipengaruhi oleh ketinggian UR ke turbin (*gross head*) dan *head loss*. Adanya *head loss* disebabkan oleh gesekan pada pipa sehingga mengurangi tekanan dari air. Dalam penelitian ini *head loss* dihitung menggunakan metode Darcy-Weissbach. Berikut adalah skema *head loss* pada sub sistem generator.



Gambar 2. Skema *head loss* pada sub sistem generator

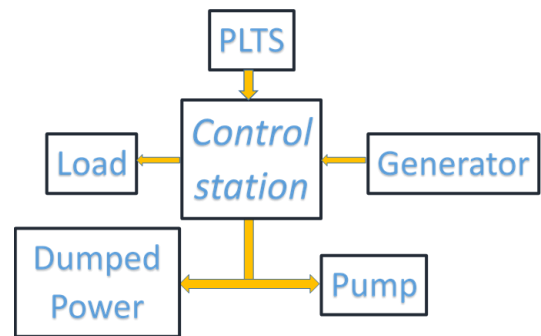
Daya yang akan disalurkan ke pompa, selanjutnya disebut  $P_{pump}$  adalah daya sisa dari generator dan PLTS yang tidak dipakai oleh beban, sedangkan  $P_{pump} = P_{PV} + P_{AFVR} - P_{load} - P_{dumped}$  adalah daya yang tidak dipakai  $P_{pump}$  sehingga menjaga kesetimbangan daya sistem tetap terjaga. Berikut adalah formula dari  $P_{pump}$  pada persamaan (2).

$$P_{Pump} = P_{PV} + P_{AFVR} - P_{load} - P_{dumped} \tag{2}$$

B. *Power Balance, Energy Balance, dan Volume Balance Sistem.*

Untuk mengetahui *sizing* yang tepat dari masing-masing komponen WPES dalam penelitian ini, akan dipelajari tentang *power balance*, *volume balance* serta *energy balance* dari PV-Beban-closed loop WPES.

Dalam perhitungan *power balance* di penelitian ini, daya yang diserap beban serta daya yang dihasilkan PV didapatkan dari data profil beban dan *PV output profile*, sedangkan daya generator dan *water pump* per jam nya akan mengikuti skema *power balance* dari sistem. Efisiensi sistem dihitung dengan mempertimbangkan efisiensi komponen dan *pipe loss*, dan *sizing* dari komponen WPES didapatkan setelah mengetahui hal-hal diatas. Berikut adalah skema *power balance* dari sistem kelistrikan yang ada di penelitian ini.



Gambar 3. Skema *power balance*

Dengan menganalisa masukan energi listrik dan luaran energi listrik yang ada pada kontrol sistem, dirumuskan *power balance* dari sistem kelistrikan adalah sebagai berikut :

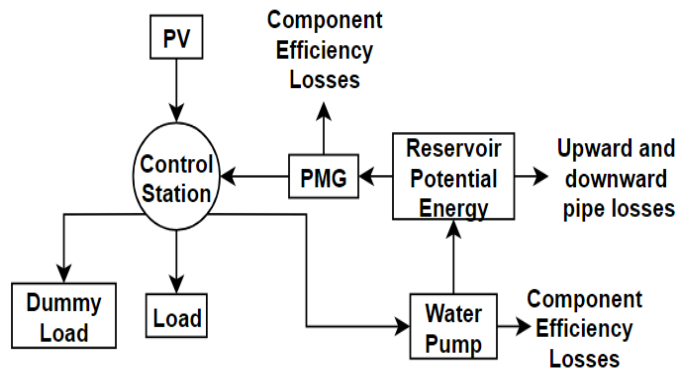
$$P_{PV} + P_{AFVR} = P_{pump} + P_{load} + P_{Dumped} \tag{3}$$

*Energy balance* pada penelitian ini dimaksudkan untuk menunjukkan skema aliran energi pada sistem. Oleh karena itu perlu ditunjukkan berapa energi listrik yang mampu dibangkitkan oleh PLTS, energi yang diserap oleh beban, energi yang disimpan pada WPES, *charge* dan *discharge* energi pada sistem, dan *losses* energi pada sistem dalam bentuk akumulasi 24 jam. Hal tersebut akan memudahkan operator dari WPES untuk memantau jalannya operasi WPES.

Energi yang dibangkitkan oleh PLTS, *energy losses*, energi yang dipompakan oleh *water pump* dan energi yang diserap beban akan disajikan dalam bentuk kWh perharinya dalam satu tahun. Lalu energi tersimpan pada WPES dihitung dengan menghitung kWh energi potensial UR. Persamaan (4) adalah rumus dari energi potensial yang tersimpan pada *reservoir*.

$$E_S = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V_{U.R.}}{3.6 \cdot 10^6} \tag{4}$$

Dimana  $E_s$  adalah energi potensial tersimpan,  $\rho$  adalah massa jenis air(kg/m<sup>3</sup>),  $g$  adalah percepatan gravitasi(m/s<sup>2</sup>),  $h$  adalah *head* dari sistem.(m),  $V_{U.R}$  adalah volume UR.(m<sup>3</sup>) dan  $\mu_g$  adalah Efisiensi total generator, turbin, dan AFVR. Berikut skema *energy balance* pada gambar 4



Gambar 4. skema *energy balance*

Berdasarkan skema tersebut maka dapat disimpulkan persamaan *energy balance* yang ditinjau dari *control station* pada persamaan (5) :

$$E_{PV} + E_{Gen} = E_{load} + E_{pump} + E_{dumped} \quad (5)$$

Dan berikut adalah jumlah harian energi yang disimpan oleh sistem :

$$\Delta E = E_{Charged} - E_{Discharged} \quad (6)$$

$$\Delta E = E_{PV} - E_{load} - E_{component loss} - E_{pipe loss} - E_{dumped} \quad (7)$$

*Volume balance* digunakan untuk menghitung segala aspek yang berhubungan dengan volume air, seperti debit air untuk memutar generator, debit air yang dipompa oleh *water pump*, volume pada UR, dan volume pada LR dalam skema waktu perjam selama durasi satu tahun. Berikut adalah perhitungan *volume balance* berdasarkan kedua *reservoir*.

Air pada UR digunakan untuk memutar turbin generator. Ada 2 jenis aliran air pada UR, yaitu aliran air yang disalurkan untuk memutar turbin, dan aliran air yang masuk ke UR oleh *water pump*. Debit dari kedua aliran tersebut dihitung dengan pertimbangan efisiensi total masing-masing alat dan *head loss* nya.

Berdasarkan (1) maka rumus debit air yang dialirkan untuk memutar generator adalah sebagai berikut dengan keterangan sama seperti (1) :

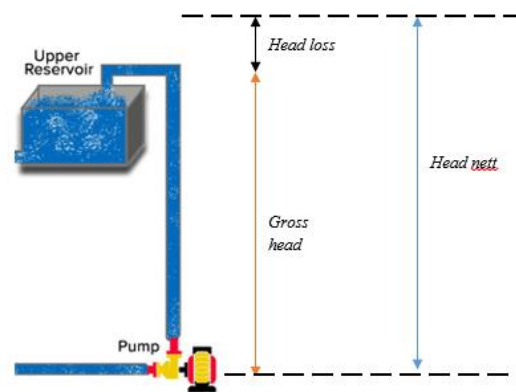
$$Q_G = \frac{P_g \cdot 3.6 \cdot 10^6}{\mu_g \cdot \rho \cdot g \cdot h} \quad (8)$$

Lalu, untuk menghitung debit air yang dipompakan menuju UR

$$Q_P = \frac{\mu_p \cdot P_{pump} \cdot 3.6 \cdot 10^6}{\rho \cdot g \cdot h} \quad (9)$$

Dimana  $P_{pump}$  adalah daya elektrik yang dipakai oleh *water pump* (kW),  $\rho$  adalah massa jenis air (Kg/m<sup>3</sup>),  $h$  adalah *head nett* dari sistem (*gross head* + *head loss*)(m),  $Q_P$  adalah debit *water pump* menuju UR(m<sup>3</sup>/h), dan  $\mu_p$  adalah efisiensi total *water pump* dan VFD.

Dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan skema *head loss* antara *water pump* dan generator. Dalam kasus *water pump*, *head loss* menambah *head nett* yang ada di sistem[8]. Berikut adalah skema *head loss* dari *water pump*.



Gambar 5. Skema *head loss* pada sub sistem *water pump*

Dari data debit aliran air yang masuk dan keluar dari UR perjamnya, akan didapatkan *volume balance* dari sirkulasi air pada UR sesuai dengan persamaan (10) :

$$VU_N = VU_{N-1} + V_{Pumped} - V_{Gen} \quad (10)$$

Dimana  $VU_N$  adalah volume UR pada jam tertentu,  $VU_{N-1}$  adalah volume UR pada jam sebelumnya,  $V_{Pumped}$  adalah volume air dipompakan ke UR di jam tersebut, dan  $V_{Gen}$  adalah volume air digunakan untuk memutar turbin di jam tersebut

Debit air yang masuk menuju LR dihitung menggunakan (8) sedangkan debit air yang dipompa menuju UR dihitung menggunakan (9). Volume LR dapat dihitung dengan rumus *volume balance* LR pada persamaan (11) sebagai berikut :

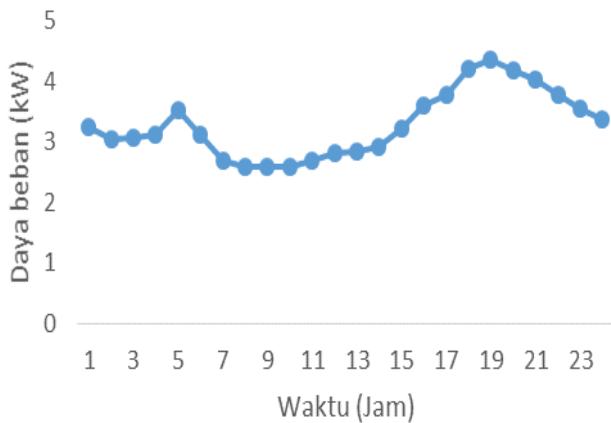
$$VL_N = VL_{N-1} + V_{Gen} - V_{Pumped} \quad (11)$$

Dimana  $VL_N$  adalah volume LR pada jam tertentu,  $VL_{N-1}$  adalah volume LR pada jam sebelumnya,  $V_{Pumped}$  adalah volume air dipompakan ke UR di jam tersebut, dan  $V_{Gen}$  adalah volume air digunakan untuk memutar turbin di jam tersebut.

### III. HASIL SIZING DAN ANALISIS EKONOMI PLTS MANDIRI MENGGUNAKAN WPES

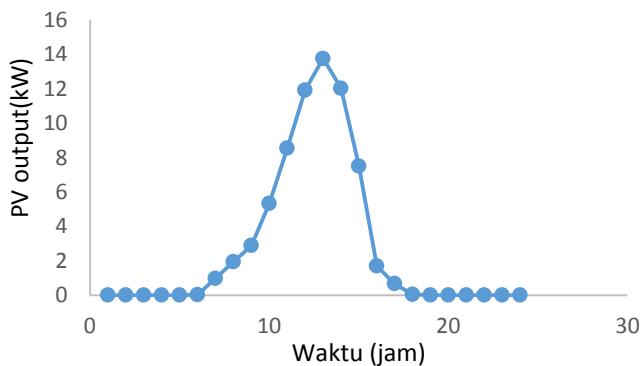
#### A. Profil beban dan luaran PV

Data profil beban diambil dari suatu daerah terisolir yang diasumsikan sama untuk setahun dengan rincian *load demand* sebagai berikut



Gambar 6. load demand profile

PV output profile didapatkan dari data kWh output bersih PLTS ukuran 16 KW perjam selama setahun. Nantinya ukuran PV tersebut akan di *upsized* atau *downsized* berdasarkan dari dinamika *sizing* yang ada. Berikut adalah grafik sampel profil output PV pada tanggal 1 April



Gambar 7 PV output profile

**B. Penetapan asumsi komponen elektrik, mekanik, dan lingkungan.**

Efisiensi komponen elektrik didapatkan dari katalog yang berkaitan dengan penelitian. Efisiensi *turgo turbine* PMG adalah 90%, efisiensi AFVR 95%, efisiensi *water pump induction motor* dan VFD masing-masing 0.727 dan 0.98 yang diasumsikan konstan untuk segala operasi pump. Dalam penelitian ini efisiensi jaringan dianggap 1.

Pipa yang digunakan diasumsikan PVC dengan *pipe roughness* 0.00000538 meter. Pengoperasian WPES diasumsikan memiliki ketinggian 20 meter sehingga dapat menghasilkan kecepatan aliran air menuju generator sebesar 2m/s dengan konstan. Sedangkan kemiringan dari tanah diasumsikan 45 derajat sehingga panjang lintasan total dari *penstock* adalah 28.284m.

**C. Perhitungan power balance**

*Power balance* dapat dihitung menggunakan (3). Sebelum mensimulasikan *power balance* pada sistem, perlu diperhatikan bahwa rating luaran daya generator harus dipilih terlebih dahulu, mengingat bahwa luaran daya PV dan daya yang diserap beban telah diketahui, dan daya yang disuplai ke *water pump* dianggap sebagai variabel terikat. Dalam penelitian ini, generator beroperasi daya konstan selama 24 jam. Persamaan (12) adalah rumus untuk menghitung luaran daya bersih setelah AFVR :

$$P_{AFVR} = P_{gen} \times Eff_{AFVR} \tag{12}$$

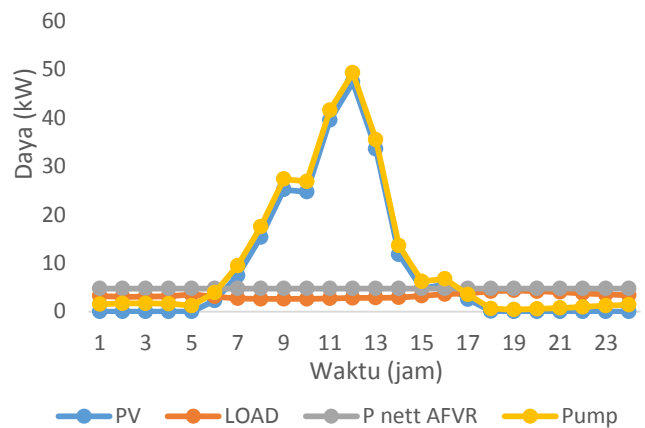
Dari persamaan (12) apabila  $P_{AFVR}$  ditetapkan sebagai daya yang dibutuhkan beban puncak. Beban puncak dari data profil beban adalah 4.36 KW dengan efisiensi AFVR 0.95 didapatkan rating luaran daya generator sebagai berikut :

$$P_{gen} = \frac{4.36 \text{ KW}}{0.95} = 4.59 \text{ KW}$$

Yang kemudian dibulatkan menuju 5 KW. Luaran bersih AFVR setelah ditentukan generatonya adalah sebagai berikut:

$$P_{AFVR} = 5.02 \times 0.95 = 4.75 \text{ KW.}$$

Dengan demikian maka *power balance* dapat disimulasikan, berikut adalah sampel *power balance* tanggal 3 November dengan PLTS 56,61 KWP



Gambar 8 Power balance 3 November

**D. Perhitungan debit air generator dan water pump.**

1) *Debit menuju generator*

Pada penelitian ini, telah ditetapkan efisiensi *turgo turbine* generator sebesar 90%. Artinya daya mekanik yang dibutuhkan untuk memutar turbin adalah :

$$P_{Mekanik \ turbin} = \frac{P_{gen}}{0.9} = \frac{5.02 \text{ KW}}{0.9} = 5.556 \text{ KW}$$

Debit air dihitung mempertimbangkan *head loss* yang ditentukan menggunakan metode Darcy-weissbach, dimana diameter dalam pipa dihitung dengan metode iterasi.

Persamaan (13) menyajikan rumus dari diameter dalam pipa pada saat awal iterasi :

$$D_1 = \sqrt{\frac{P_{Turbine} \cdot 4}{\rho \cdot g \cdot h \cdot v_g}} \quad (13)$$

Dimana  $P_{turbine}$  adalah daya mekanik yang diperlukan turbin(kW),  $\rho$  adalah massa jenis air(kg/m<sup>3</sup>),  $h$  adalah *gross head*(m), dan  $v_G$  adalah kecepatan aliran air menuju generator(m/s).

Berdasarkan rumus (13), nilai diameter awal  $D_1$  adalah 0.134m. Lalu dengan kecepatan aliran air 2m/s, didapatkan nilai *head loss* berdasarkan metode Darcy-Weissbach yaitu 5.594m. Dengan kecepatan aliran air dalam pipa 2m/s dan diameter dalam pipa 0.134m, maka debit air bisa didapatkan dengan rumus sebagai berikut

$$Q = 3600 \cdot 2 \cdot \frac{\pi(0.134)^2}{4} = 101.933m^3/h$$

Maka, dengan parameter *head loss* dan debit air sudah diketahui, didapatkan nilai daya mekanik turbin sebesar 4.0016 kW. Mengingat daya mekanik turbin yang terbangkit < 5.556KW, maka diameter dalam pipa ditambah lagi hingga mencapai nilai daya mekanik turbin yang diinginkan. Setelah beberapa iterasi, ditemukan diameter turbin 0.1519m mampu membangkitkan daya mekanik sebesar 5.5571 kW dengan rincian *head loss* 4.371m dan debit air 130.4782m<sup>3</sup>/h yang dihitung dengan menggunakan rumus (4.4)

$$Q = 3600 \cdot 2 \cdot \frac{\pi(0.1519)^2}{4} = 130.4782m^3/h$$

2) *Debit dipompakan pump.*

Aspek yang membedakan *water pump* dengan generator adalah kecepatan aliran air dijadikan variabel bebas sementara diameter dalam pipa dijadikan variabel terikat yaitu 0.4m. Hal ini dikarenakan daya angkat air pump yang berbeda akan menyebabkan air naik menuju UR dengan kecepatan yang berbeda namun dengan diameter yang sama. Daya listrik yang konversikan oleh *water pump* menjadi daya mekanik untuk memompa air dapat dirumuskan pada persamaan (14) sebagai berikut

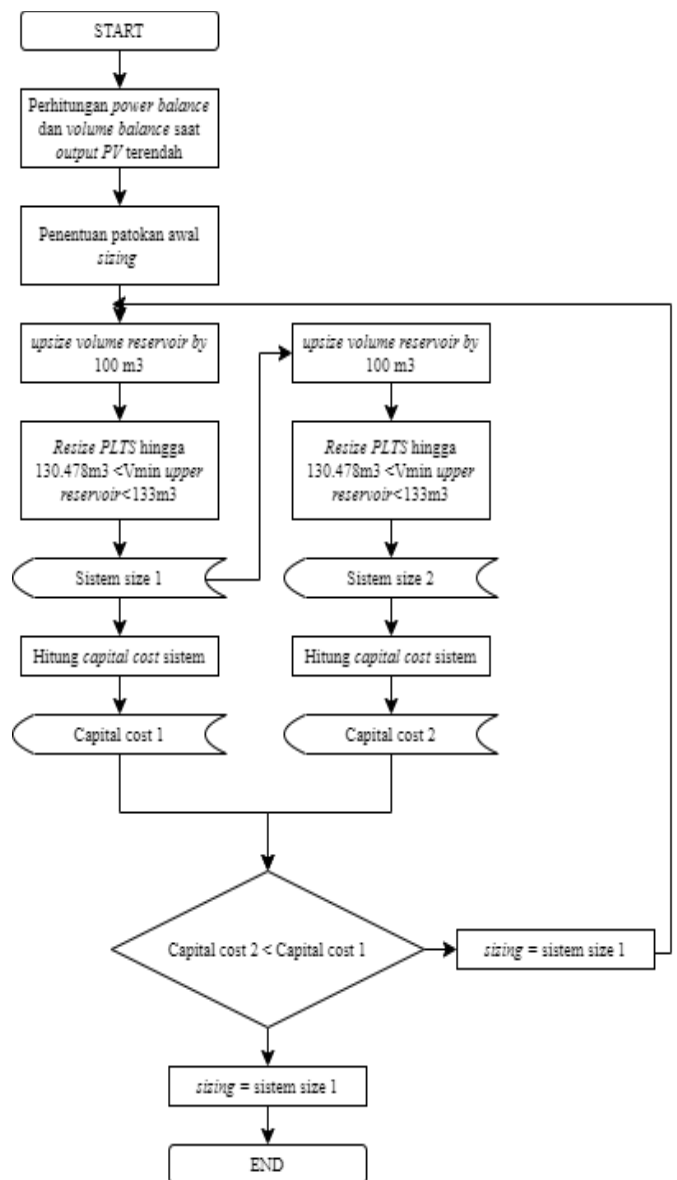
$$P_{conv\ pump} = P_{in\ VFD} \cdot Eff_{VFD} \cdot Eff_{Pump} \quad (14)$$

Ada kasus tertentu ketika volume UR telah penuh, maka *water pump* tidak mengonversi seluruh daya sisa yang tidak dipakai beban. Pada kondisi tersebut *water pump* hanya akan memompa air dengan debit yang sama dengan debit air keluar dari UR untuk menjaga volume UR tetap penuh.

Dalam penelitian ini, nilai *head loss* dan daya listrik yang konversikan oleh *water pump* menjadi daya mekanik untuk memompa air akan disediakan dalam bentuk tabel yang menyediakan berbagai variasi input daya listrik dari 0KW sampai dengan daya maksimal pompa yang akan dihitung nanti pada *volume balance*.

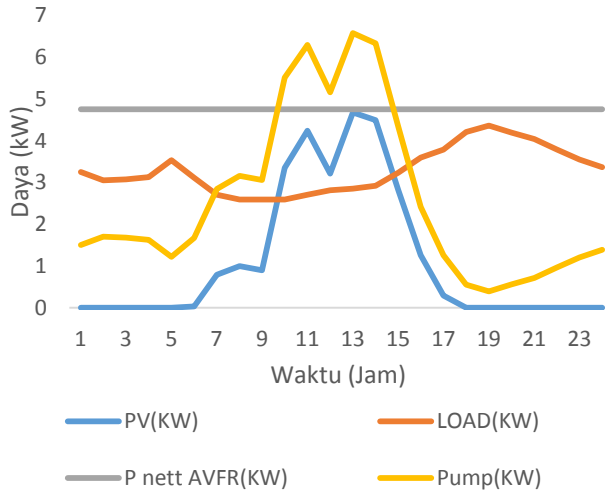
E. *Volume Balance WPES, Sizing sistem, dan Energy balance WPES.*

*Sizing* dari sub sistem PLTS, *reservoir*, dan *water pump* sangat dipengaruhi oleh *volume balance*. PLTS harus menyediakan energi yang cukup untuk menyuplai beban dan memberikan simpanan energi pada *reservoir* dengan mempertimbangkan efisiensi sistem (*round trip efficiency*). Sedangkan volume dari UR harus cukup untuk memutar generator disaat tidak ada daya masuk dari PLTS. Lalu *sizing* dari *water pump* sendiri harus mampu memompa air sebanyak debit maksimal yang dibutuhkan oleh sistem. Berikut adalah diagram alur *sizing* penelitian ini

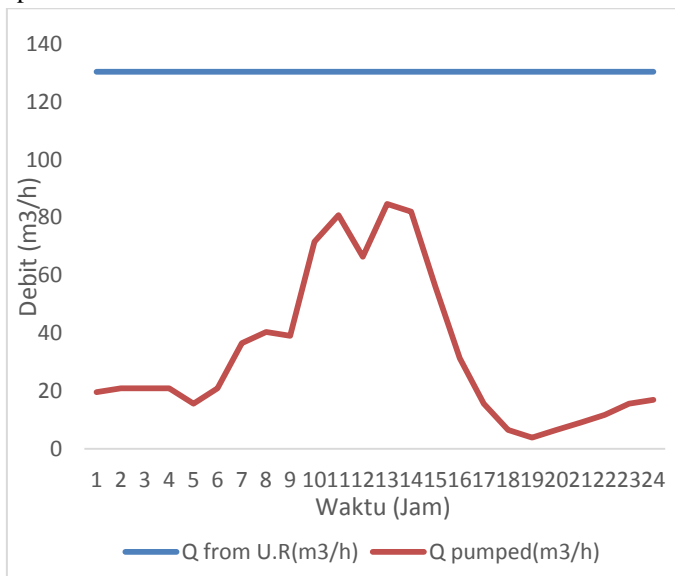


Gambar 8 Diagram alur *sizing* PLTS, *water pump*, dan *reservoir*.

Menurut data profil luaran PV, tanggal 24 Maret adalah tanggal dimana *output* PV paling rendah. Berikut adalah *power balance* dan *volume balance* ketika tanggal 24 Maret dengan PLTS 16 kWp.



**Gambar 9.** Simulasi *power balance* PLTS 16 KWP pada spreadsheet.



**Gambar 10** Simulasi *volume balance* PLTS 16 KWP debit dari UR dan debit dipompakan.

Selisih volume total air yang dikeluarkan oleh UR dan volume total air yang dipompakan menuju UR adalah 2336.823 m<sup>3</sup> dengan keterangan defisit volume UR. Hal ini tidak diperbolehkan mengingat defisit volume artinya generator tidak akan bisa beroperasi dan sistem akan mati. Oleh karena itu KWP PLTS dinaikkan hingga volume total air yang dikeluarkan oleh UR dan volume total air yang

dipompakan menuju UR memiliki nilai yang sama, yaitu sebesar 123.527 KWP. Volume awal UR pada pukul 00.00 juga dinaikkan hingga 2000 m<sup>3</sup> agar tidak terjadi defisit volume air pada UR. Kondisi tersebut kemudian diaplikasikan dengan data profil beban dan PV selama setahun dengan ringkasan sebagai berikut

**Tabel 2** Ringkasan *volume balance sistem* dengan PLTS 123.527 KWP dan volume maksimum *reservoir* 2000 m<sup>3</sup>

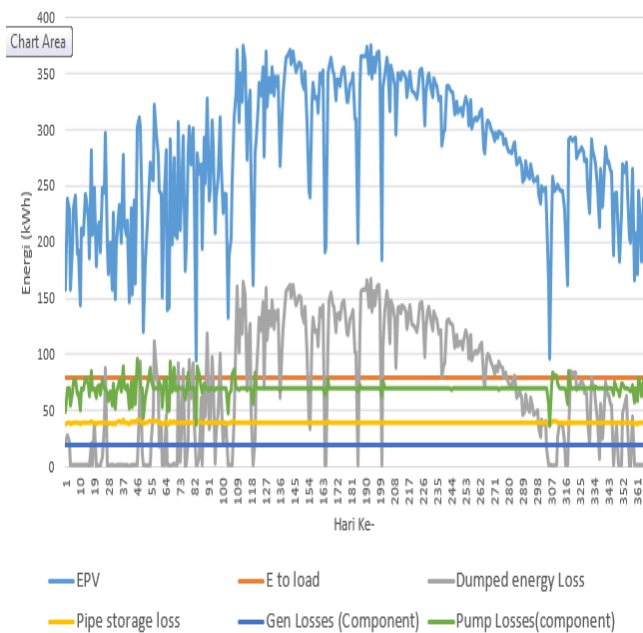
Volume minimum UR	182.7555 m <sup>3</sup>
Volume maksimum UR	2000 m <sup>3</sup>
Q pumped Max	1124.181 m <sup>3</sup> /h
Volume minimum LR	182.7555 m <sup>3</sup>
Volume maksimum LR	2000 m <sup>3</sup>

Berdasarkan tabel 2, maka dapat diasumsikan *sizing* sistem dengan PLTS 123.527 KWP membutuhkan volume *reservoir* sebesar 2000 m<sup>3</sup> dan *water pump* dengan rating debit minimal 1124.181 m<sup>3</sup>/h, dimana dibulatkan menjadi 1200 m<sup>3</sup>/h. Adapun *capital cost* sistem secara keseluruhan adalah IDR 3,761,577,547.13 dengan rincian subsistem generator IDR 120,092,478.77, subsistem *water pump* dengan total sebesar IDR 200,082,638.23, subsistem *reservoir* sebesar IDR 112,283,968.1 dan subsistem PLTS IDR 3,348,667,185.72. Sebenarnya, *capital cost* dari *sizing* awal masih terlalu tinggi. Untuk menjaga volume minimum *reservoir*, bisa dilakukan dengan memperbesar kapasitas volume maksimum dari *reservoir* sehingga energi yang dipanen PLTS tidak banyak terbuang dikarenakan UR sudah dalam kondisi penuh. Oleh karena itu untuk mencari *sizing* dengan *capital cost* termurah dilakukan proses *sizing* ulang sesuai dengan diagram alir pada gambar 8. *Sizing* sistem dengan *capital cost* paling murah adalah PLTS 56.610 KWP dengan volume *reservoir* 3800 m<sup>3</sup>. Berikut adalah ringkasan dari volume balance PLTS 56.610 KWP dengan Volume *reservoir* 3800 m<sup>3</sup> dengan *capital cost* yang akan dibahas di bagian 4.

**Tabel 3** Ringkasan *volume balance sistem* dengan PLTS 56.610 KWP dan volume maksimum *reservoir* 3800 m<sup>3</sup>

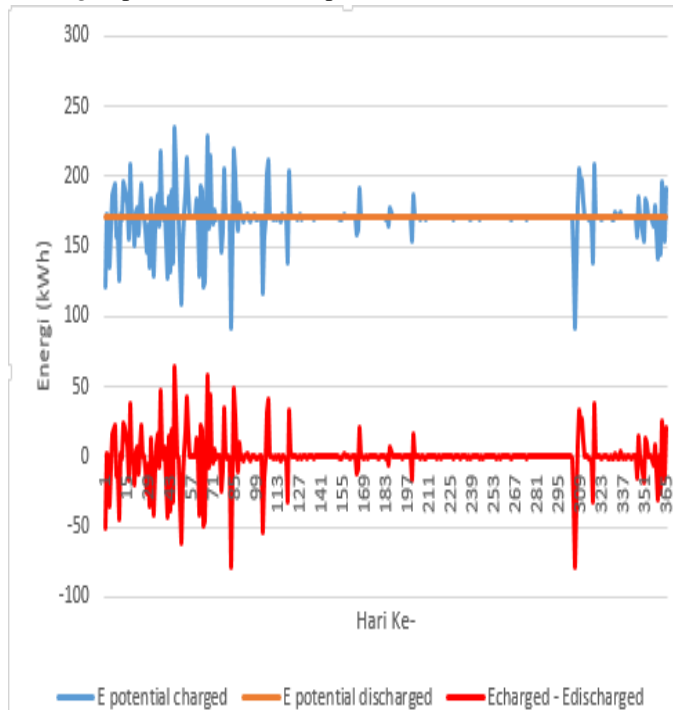
Volume minimum UR	132.7647599 m <sup>3</sup>
Volume maksimum UR	3800 m <sup>3</sup>
Q pumped Max	853.63 m <sup>3</sup> /h
Volume minimum LR	132.7647599 m <sup>3</sup>
Volume maksimum LR	3800 m <sup>3</sup>

Setelah didapatkan hasil *sizing* dari sistem, skema *energi balance* dihitung berdasarkan persamaan (7). Berikut adalah grafik yang menunjukkan *energy balance* dari sistem



**Gambar 11** *Energy balance* dari sistem PLTS mandiri menggunakan WPES

Dan berikut adalah grafik *energy charged – energy discharged* pada sistem sesuai persamaan (6).



**Gambar 12** Energi tersimpan pada sistem

**F. Estimasi Biaya Kapital dan O&M Keseluruhan Sistem**

1) **PLTS**

Biaya pemasangan dan o&m sistem PLTS *ground-mounted* akan ditinjau dari biaya pemasangan negara-negara di Eropa, yang dihimpun oleh SgurrEnergy dan dipublikasikan oleh IFC[9], dan akan dijadikan acuan biaya pemasangan sistem *ground mounted* PLTS pada penelitian ini. Namun biaya PV module akan disesuaikan berdasarkan harga PV pasaran yang ada di Asia.

2) **WPES**

WPES terdiri dari subsistem generator, *water pump*, dan *reservoir*. Harga dari komponen subsistem generator dan *water pump* diambil dari berbagai katalog yang ada dari berbagai perusahaan internasional dan nasional. Sedangkan *capital cost* dari *reservoir* merujuk pada laporan akhir *water for agricultURe : collaborative approaches and on-farm storage* dari Cranfield University[10]. Berdasarkan laporan akhir tersebut, persamaan *capital cost* dari suatu *reservoir* dapat dinyatakan dalam persamaan (15) sebagai berikut :

$$y = 50.086 + 1.5588X \tag{15}$$

Biaya O&M WPES meliputi seluruh biaya O&M komponen *energy storage* yaitu generator, *water pump*, dan *reservoir*. O&M ini didapatkan dari *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report* oleh Hydrowire[11]. *Annual fixed* O&M dari WPES adalah 15.9\$/KW-Year, dengan *variable* O&M 0.00025cents/KWH.

**G. Penentuan Harga Jual Listrik**

Acuan harga jual energi listrik per-KWH ditentukan dengan berpatokan pada harga biaya pokok penyediaan pembangkitan (BPP pembangkitan) PLTD pada pulau Jawa yaitu sebesar IDR 3,041.00 per-KWH nya. Hal ini dikarenakan PLTS mandiri menggunakan WPES digunakan untuk daerah terisolir yang pada umumnya disuplai menggunakan PLTD. Sehingga dapat diketahui apakah PLTS mandiri menggunakan WPES layak untuk menggantikan PLTD pada daerah terisolir tersebut.

Selanjutnya, untuk menghitung analisis kelayakan investasi dari PLTS mandiri menggunakan WPES, diperlukan analisis terhadap prediksi kenaikan tarif dasar listrik untuk beberapa tahun kedepan. Menurut Dharmawan[12], kenaikan tarif dasar listrik dapat diasumsikan sebesar 2,5% per tahunnya. Angka tersebut didapatkan dari proses regresi linier dari tarif dasar listrik 2012 hingga 2017.



H. Biaya Kapital dan O&M Keseluruhan Sistem

Berikut adalah biaya kapital dari keseluruhan sistem.

**Tabel 4**Capital cost PLTS mandiri dengan WPES.

System capital cost	
Generator system	
lifetime	25 tahun
Total capital cost 50 year	IDR 120,092,478.77
Water pump system	
lifetime	25
Total capital cost 50 year	IDR 200,082,638.23
Reservoir	
lifetime	50
Total capital cost 50 year	IDR 213,339,494.41
PLTS	
lifetime	25
Total capital cost 50 year	IDR 1,531,776,483.38
<b>TOTAL CAPITAL COST</b>	<b>IDR 2,028,148,519.6</b>

Dan berikut adalah O&M cost dari keseluruhan sistem.

**Tabel 5**O&M cost PLTS mandiri dengan WPES

PLTS			
Justifikasi	Kuantitas	Harga (IDR)	Total harga(IDR)
Asumsi total O&M Cost/MW/year	IDR 62,465,970.00	0.05661	IDR 3,536,198.56
WPES			
Justifikasi	Kuantitas	Harga (IDR)	Total harga(IDR)
Asumsi fixed O&M Cost/KW/year	IDR 223,092.75	5	IDR 1,115,463.75
Asumsi variable O&M Cost/KWH/year	IDR 0.04	28835	IDR 1,072.15
<b>Total O&amp;M</b>	IDR 4,292,706.82		

I. Analisis simple payback period, NPV, dan ROI

1) Simple payback period

Dengan capital cost IDR 2,028,148,519.67, pendapatan per tahun IDR 87,747,294.75, dan O&M IDR 4,292,706.82, berikut adalah simple payback period dari sistem :

$$Payback\ period = \frac{IDR\ 2,028,148,519.67}{IDR\ 87,747,294.75 - IDR\ 4,292,706.82} = 24.302\ Tahun$$

2) Net present value

Pada penghitungan NPV ditentukan discount rate sebesar 2,57% dan kenaikan tarif dasar listrik per tahun sebesar 2,5%. Sehingga menurut rumus 2.19, penghitungan NPV disajikan sebagai berikut:

$$NPV = -IDR\ 2,028,148,519.67 + \sum_{t=1}^{50} \frac{Revenue_t - O\&M_t}{(1+2.57)^t} = IDR\ 2,072,823,731.86$$

3) Return of Investment

Nilai return of investment pemasangan PLTS mandiri menggunakan WPES sebagai berikut

$$= \frac{50 * IDR\ 83,454,587.93 - IDR\ 2,028,148,519.67}{IDR\ 2,028,148,519.67} = 105.7\%$$

IV. KESIMPULAN.

Pada penelitian ini, penulis memberikan beberapa kesimpulan terkait penelitian. Pertama, Sistem PLTS mandiri menggunakan WPES harus menyuplai kebutuhan energi listrik beban sebesar 79 kWh perhari, dimana membutuhkan sizing dari keseluruhan sistem yaitu ukuran KWP PLTS 56,610 KWP, volume reservoir 3800m3, water pump 90KW dengan max debit 1200m3/h, serta turgo turbine generator dengan rating luaran daya 5kW. Dari sizing tersebut Jumlah biaya investasi yang diperlukan dalam pemasangan PLTS mandiri menggunakan WPES adalah IDR 2,028,148,519.67 dengan O&M cost IDR 4,292,706.82 di tahun pertama. Berdasarkan capital cost dan O&M cost tersebut, pemasangan sistem PLTS mandiri menggunakan WPES pada daerah terisolir memiliki simple payback period sebesar 24,302 tahun dengan nilai net present value sebesar IDR 2,072,823,731.86 dan return of investment sebesar 105.7%. sehingga investasi Pemasangan sistem PLTS mandiri menggunakan WPES pada daerah terisolir layak untuk dijalankan. Untuk kedepannya, dibutuhkan penelitian tentang kontrol sistem dari sistem PLTS menggunakan WPES yang dapat mengatur skema operasi seperti pada penelitian ini. Dianjurkan juga untuk menggunakan optimum sizing yang mampu menghitung sizing yang paling murah dari segi capital cost dan O&M secara otomatis untuk mempercanggih alat perhitungan sizing dan membuat database komponen sehingga dapat dibuat suatu software perhitungan sizing PLTS mandiri menggunakan WPES.

V. DAFTAR PUSTAKA.

[1] I. Jonan, "Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor: 55 K/20/MEM/2019," 2019.  
 [2] J. T. Bialasiewicz, "Renewable Energy Systems With Photovoltaic Power Generators: Operation and

- Modeling,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2752–2758, Jul. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.920583.
- [3] T. Ma, H. Yang, L. Lu, and J. Peng, “Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization,” *Applied Energy*, vol. 137, pp. 649–659, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.06.005.
- [4] D. Manolakos, G. Papadakis, D. Papantonis, and S. Kyritsis, “A stand-alone photovoltaic power system for remote villages using pumped water energy storage,” *Energy*, vol. 29, no. 1, pp. 57–69, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.energy.2003.08.008.
- [5] A. Immendoerfer, I. Tietze, H. Hottenroth, and T. Viere, “Life-cycle impacts of pumped hydropower storage and battery storage,” *Int J Energy Environ Eng*, vol. 8, no. 3, pp. 231–245, Sep. 2017, doi: 10.1007/s40095-017-0237-5.
- [6] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrani, and Md. M. Alam, “Pumped hydro energy storage system: A technological review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 586–598, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.12.040.
- [7] T. Ma, H. Yang, L. Lu, and J. Peng, “Technical feasibility study on a standalone hybrid solar-wind system with pumped hydro storage for a remote island in Hong Kong,” *Renewable Energy*, vol. 69, pp. 7–15, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2014.03.028.
- [8] G. M. Masters, “Renewable and Efficient Electric Power Systems,” p. 676.
- [9] International Finance Corporation, *A Project Developer’s Guide to Utility-scale Solar Photovoltaic Power Plants*. Washington, D.C: IFC, 2015.
- [10] K. Weatherhead, J. Knox, A. Daccache, and J. Morris, *Water for agriculture: collaborative approaches and on-farm storage*. Cranfield: Cranfield University, 2014.
- [11] K. Mongird *et al.*, “Energy Storage Technology and Cost Characterization Report,” PNNL-28866, 1573487, Jul. 2019. doi: 10.2172/1573487.
- [12] K. P. I. Dharmawan, “Studi Kelayakan Pemasangan Photovoltaic pada Gedung di Institut Teknologi Sepuluh Nopember berdasarkan data Clear Sky Irradiance,” Surabaya, 2019.