

Desain Pump Storage Power Plant (PSPP) dari Pembangkit Tenaga Surya dengan Studi Kasus Embung ITERA

Dean Corio¹, M. Rizki Ramadhan², Jodi Istopan Perdana³, Rheyuniaro S. Asthan⁴, Mia Maria Ulfah⁵

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan

⁵Program Studi Teknik Telekomunikasi, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan

Jl. Terusan Ryacudu, Desa Way Hui, Lampung Selatan

¹dean.corio@el.itera.ac.id

Intisari — Pump Storage Power Plant (PSPP) merupakan alternatif penyimpanan energi potensial yang dimanfaatkan kembali sesuai dengan kebutuhan. Aplikasinya dapat dilakukan pada waduk atau reservoir yang lebih tinggi dengan inputan air waduk yang lebih rendah ataupun sumber lain. Disain PSPP disesuaikan dengan kapasitas upper reservoir, daya desain dan waktu pembangkitan. Pompa untuk menaikkan air dari lower reservoir dapat dihidupkan menggunakan sumber energi terbarukan berupa Photo Voltaic (PV). Keluaran PV tetap disimpan di baterai untuk mendapatkan tegangan dan arus yang stabil sebagai input pompa. Rancangan PSPP pada Embung ITERA memiliki efisiensi pembangkitan 80%, sedangkan efisiensi PV sebesar 87 %.

Kata kunci — Pump storage power plant, photo voltaic, energi terbarukan.

Abstract — Pump Storage Power Plant (PSPP) is an alternative to potential energy storage which can be reused as needed. The application can be carried out on upper reservoirs with lower reservoir water input or other sources. The PSPP design is adjusted to the upper reservoir capacity, design power and generation time. pumping water from the lower reservoir can be turned on using renewable energy sources such as Photo Voltaic (PV). The PV output is still stored in the battery to get a stable voltage and current as an energy source to start the pump. The PSPP design in the ITERA reservoir has a generation efficiency of 80%, while the PV efficiency is 87%.

Keywords— Pump storage power plant, photo voltaic, renewable energy.

I. PENDAHULUAN

Pump Storage Power Plant (PSPP) dewasa ini telah banyak diteliti dan dikembangkan, baik pemodelannya maupun studi ekonomisnya. Studi ekonomis sistem tenaga dilakukan untuk mencari titik operasi optimum sehingga dapat mengurangi cost production tetapi tetap mempertahankan keandalan suplai energy [1]. Selain itu studi ekonomis dimaksudkan untuk pengambilan keputusan dalam operasi pembangkitan dengan pertimbangan minimalis energi terbangkitkan sehingga tidak terbuang karena tidak dipakai [2]. Dalam aplikasinya, beban yang dinamis menyebabkan tingginya regulasi antara beban normal dengan beban puncak, sehingga berbagai cara dilakukan untuk optimasi energi ini, salah satunya adalah pemanfaatan pump storage power plant (PSPP) [1],[3]. PSPP dapat didesain fleksibel, baik

kapasitasnya [4], scheduling-nya [5], dan optimasi pembangkitannya [6].

Banyak peneliti yang melakukan penelitian tentang keamanan dan kontrol optimasi PSPP, secara garis besar bahasanya dapat di kelompokkan dalam 3 kategori. (1) Pemodelan dan simulasi PSPP, model linear klasik [7] , bagus digunakan untuk real time [8], tetapi lemah saat disimulasikan pada kondisi diluar kemampuan pompa, system pipeline dan model karakteristik internal untuk pump turbine [9], model of characteristic (MOC) [10], yang secara luas di gunakan untuk mensimulasikan model transien, mempunyai akurasi komputasi yang baik. (2) Optimasi dan operasi, banyak keterbaruan dan pengembangan algoritma optimis yang di lakukan pada PSPP, mencari parameter dan cepat konvergen [11], berbagai kondisi saat turbin starting [12], kontrol frekuensi beban [13] (3) Pengambilan keputusan, menggunakan solusi pareto optimal

[14] ,memilih skema dengan memasukkan fungsi objektif [15].

Sistem PSPP ini dapat di bangun secara *on grid* ataupun *off grid*. Pengoperasian *off grid* dapat di *combine* dengan menggunakan *photo voltaic* (PV), wind turbine dan baterai. Jika sumber utama tidak menyuplay energi saat *scheduling pump storage* atau sistem berada dalam kondisi *emergency*, maka energi di suplay dengan energi yang dibangkitkan PV dan atau tersimpan dalam cadangan batrai. Kondisi *emergency* ini akan berlanjut sampai system kembali normal dan daya masukan kembali menyala [16]. Keandalan sistem PSPP, sumber pembangkit listrik tenaga air digunakan untuk menghidupkan pompa masukan air *pump storage*, nilai daya keluaran *pump storage* dapat fleksibel sesuai dengan kebutuhan injeksi energy saat beban puncak [17] yang dapat diatur dengan *scheduling*. Sumber lain yang dapat digunakan untuk keandalan sistem adalah dengan *scheduling* pembangkit listrik tenaga angin, photo voltaic dan *pump storage* sehingga seimbang antara produksi dan konsumsi energi pada sebuah system kelistrikan [18].

Pada paper ini penulis akan menjelaskan pemodelan PSPP dengan sumber pembangkitan dari solar cell untuk diaplikasikan di embung ITERA, dengan pendekatan berupa simulasi dan Analisa.

II. DASAR TEORI

PSPP pada dasarnya digunakan untuk menggantikan pengoperasian mesin diesel dalam keadaan *emergency* guna pemenuhan kebutuhan operasional beban. Penggunaan mesin diesel sebagai pembangkit memerlukan biaya operasioanal yang tinggi, kemungkinan pemutusan beban akibat kegagalan start up, biaya maintenance yang besar serta polusi lingkungan [20]. Selain itu penggunaan diesel meenyumbang kerusakan lingkungan lebih besar daripada pembangkit energy terbarukan [21]. Energi terbarukan untuk kebutuhan listrik yang semakin tinggi menjadi solusi dalam penanggulangan kekurangan pasokan energi . Apalagi sistem yang mempunyai baterai sebagai komponen penyimpanan sebelum di alirkan ke konsumen menjadi tidak ekonomis, terutama pada disain berskala besar

[22]. PSPP bisa digunakan sebagai pengganti baterai dalam hal ini, digunakan untuk skala besar. Keuntungan menggunakan PSPP sudah dihitung [18]. Harga dari energy yang disimpan di PSPP rendah karena memanfaatkan energy dari PV dan PLTB [21].

A. Pemodelan sistem PSPP

Konsep dasar dari PSPP adalah menaikkan air ke penampung yang lebih tinggi dan kemudian digunakan untuk pembangkitan energi. Formulasi yang digunakan untuk pembangkitan energy air dapat dilihat pada persamaan 1 sampai 4.

Dimana V_{up}^{Max} adalah kapasitas reservoir atas, $V_{up}^{Max}/V_{up}^{Min}$ merupakan perbandingan max/minimum air pada reservoir tersimpan, Flw^{In} merupakan volume dari pump storage pada bagian atas reservoir. $Flw^{Out Min}/Flw^{Out Max}$, merupakan min/max volume yang diserap oleh reservoir bagian bawah untuk pembangkitan.

$\rho_{charge}/\rho_{discharge}$ merupakan performansi dari pemompaan dan pembangkitan PSPP [22].

$$V_{up}^{Max} \leq V_{up}^{Max} \quad (1)$$

$$E^{Max} = V_{up}^{Max} \times \rho_{discharge} \quad (2)$$

$$V_{up}^{Max} = V_{up}^{Max} + Flw^{In} - Flw^{Out Min} \quad (3)$$

$$V_{up}^{Min} = V_{up}^{Min} + Flw^{In} - Flw^{Out Max} \quad (4)$$

Pemodelan PSPP mempertimbangkan potensi ketinggian antara upper reservoir dan lower reservoir. Potensi ini digunakan untuk mengitung kebutuhan PV untuk memompa air ke reservoir atas dan menentukan spesifikasi pompa yang akan digunakan pada reservoir bawah.

B. Pemodelan PV

Sebagai sumber pembangkitan PV disimulasikan untuk memenuhi kebutuhan beban, berupa pompa untuk menaikkan air dari lower reservoir ke upper reservoir. Sehingga dimodelkan untuk dapat disimulasikan. Persamaan karakteristik

tegangan-arus dari sel surya disediakan sebagai Modul foto-arus I_{ph}:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i (T - 298)] \times I_r / 100 \quad (5)$$

Berdasarkan Persamaan 5, I_{ph} merupakan *photo-current* (A); I_{sc} adalah arus hubung singkat (A); I_{sh} adalah Arus pada hambatan seri (A); K_i merupakan arus hubung singkat sel pada suhu 25 ° C dan 1000 W / m²; T merupakan suhu operasi (K); I_r: iradiasi matahari (W / m²).

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \right) \quad (6)$$

Untuk menghitung resistansi shunt diperlihatkan pada Persamaan 6, dimana R_s merupakan resistansi seri (Ω); R_{sh} merupakan resistansi *shunt* (Ω); V merupakan tegangan daya maksimum.

Persamaan untuk mencari nilai I_o diperlihatkan pada Persamaan 7.

$$I_o = I_{rs} \times \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \times \exp \left(\frac{q \times E_{g0} \times \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n \times K} \right) \quad (7)$$

Untuk menentukan nilai arus diodanya (I_o) (A) dirumuskan dengan persamaan 14, dimana T_n merupakan Nominal temperatur (K); E_{g0} merupakan energi gap pada bahan semikonduktor (eV); K merupakan Konstanta Boltzman; n merupakan faktor *ideal diode*; q merupakan Electron Charge (V); T merupakan Temperatur yang diterima PV.

Persamaan menghitung *Reverse Saturation Current*, Persamaan 8.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{q \times V_{oc}}{n \times N_s \times K \times T} \right) - 1} \quad (8)$$

Dari Persamaan 8, I_{rs} merupakan arus pada hambatan *parallel* (A); N_s merupakan banyaknya *array*; V_{oc} merupakan Tegangan *Open Circuit*. Dimana I merupakan arus keluaran (A) yang dihasilkan oleh PV dengan inputan parameter tertentu adalah sebagai berikut:

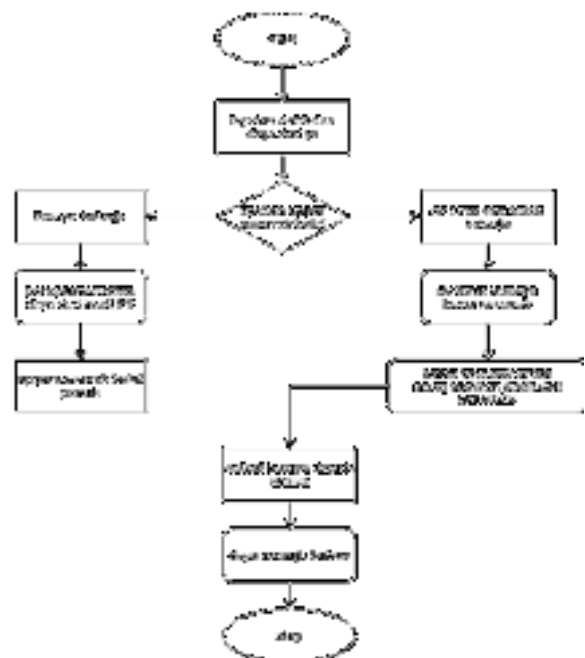
$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{q(V + I \times R_s)}{n \times K \times N_s \times T} \right) \right) - I_{sh} \quad (9)$$

Dari persamaan 5 hingga persamaan 9 merupakan perhitungan untuk membandingkan hasil simulasi dengan perhitungan.

III. METODOLOGI

PSPP di desain di embung Itera dengan PV sebagai sumber pembangkitan. Energi yang dihasilkan PV digunakan untuk mengoperasikan pompa yang menaikkan air dari lower reservoir ke upper reservoir. Desain model PV dan PSPP dilakukan untuk mengoptimalkan pembangkitan PV sesuai dengan potensi yang bisa di tamping pada Upper reservoir.

A. Disain model PSPP

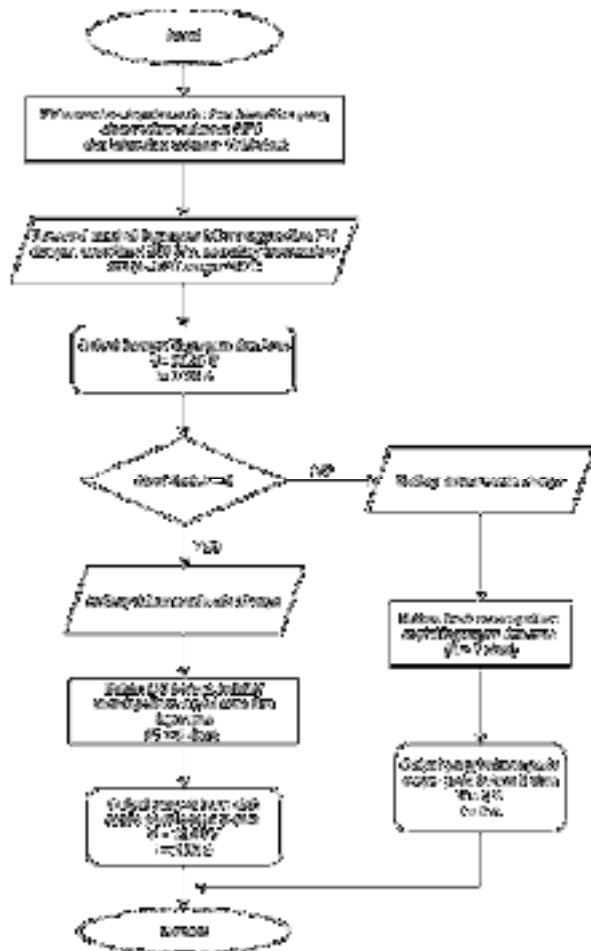


Gbr.1 Flow chart PSPP

PSPP dimodelkan dengan melakukan analisa global mapper pada embung Itera, sehingga didapatkan potensi dari upper dan lower reservoir, inputan daya PV di hitung berdasarkan kapasitas reservoir sehingga dapat dimanfaatkan sepenuhnya untuk pembangkitan, Flow chart pembangkitan PSPP diperlihatkan pada Gambar 1.

B. Disain pembangkitan PV

Secara garis besar design PV merupakan system pemanenan energi matahari untuk kebutuhan menghidupkan pompa pada PSPP. Terdapat 4 PV yang digunakan pada simulasi ini dengan asumsi setiap PV mendapatkan inputan yang berbeda. Desain pembangkitan PV diperlihatkan pada Gambar 2.



Gbr.2 Desain PV

Berdasarkan perhitungan potensi tampungan Upper reservoir, disimulasikan pembangkitan PV dengan spesifikasi pada Tabel 1.

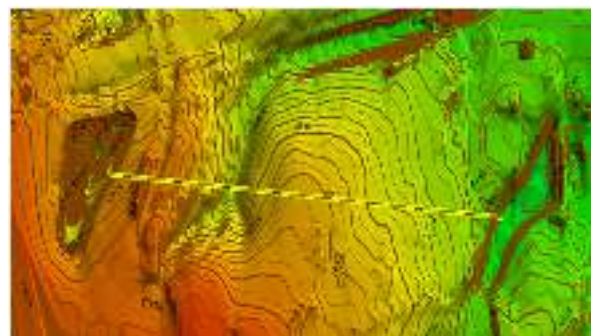
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Potensial pembangkitan PSPP

Berdasarkan data masterplant Itera yang diolah dengan aplikasi Global Mapper dari embung Itera digunakan sebagai upper dan lower reservoir rencana PSPP diperlihatkan pada Gambar 3.

Tabel 1. Parameter yang Digunakan pada Modelling Matematika dan Simulasi

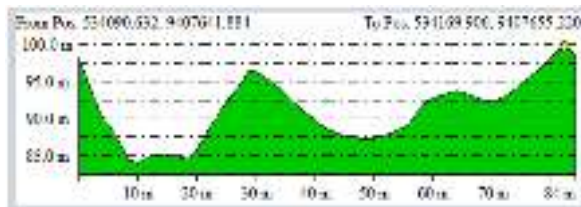
Parameter	Keterangan	Nilai
I _{ph}	Photo-current (A)	I _{ph}
I _{sc}	Short Circuit Current (A)	I _{sc}
K _i	Short Circuit Current of	0.0032
T	Operating Temperature (K)	T
T _n	Nominal Temperatur (K)	298
G	Intensitas	1000
q	Electron Charge (V)	1.6x10 ⁻¹⁹
V _{oc}	Open Circuit Voltage (V)	32.9
n	The ideality factor of the diode	1.3
K	Boltzman's Constant	1.38x10 ⁻²³
E _{g0}	Band gap energy of the semiconductor (eV)	1.1
R _s	Series Resistance	0.221
R _{sh}	Shunt Resistance	415.405



Gbr.3 Pemodelan upper dan lower reservoir pada Embung A dan Embung C ITERA

Tabel 1. Upper Reservoir

NO	Interval	Volume
1	85 m (countour major)	14.085,34 m ³
2	85,5 m (countour minor)	29.944.051 m ³
3	89 m (countour major)	17.474.765 m ³
4	89 m (countour intermediate)	6.735.4454 m ³
5	100 m (countour major)	12.102.205 m ³
Total		50.697.248 m ³

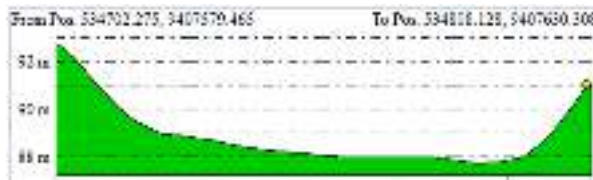


Gbr.4 Kedalaman upper reservoir

Kedalaman upper reservoir merupakan selisih antara h_{max} dan h_{min} , dimana nilai h_{max} adalah 100 m sedangkan nilai h_{min} adalah 84.75m, sehingga kedalaman embung terukur adalah 15,25 m dengan debit terukur adalah 50.697.248 m³ yang diperlihatkan pada Tabel 1 dan Gambar 4.

Tabel 2. Lower Reservoir

NO	Interval	Volume
1	87.5 m (countour major)	3.528,25 m ³
2	88 m (countour minor)	3.193 m ³
3	88.5 m (countour major)	2.897,5 m ³
4	89 m (countour intermediate)	2.759,5 m ³
5	89.5 m (countour major)	2.106 m ³
6	90 m (countour major)	1.565 m ³
7	90.5 m (countour major)	980,75 m ³
8	91 m (countour major)	380,75 m ³
Total		17.420,75 m ³



Gbr.5 Kedalaman lower reservoir

Dari hasil pengukuran dengan Global Mapper diperoleh nilai volume Lower reservoir sebesar 17.420,75 M3. Dari gambar 5 diperoleh titik tertinggi berada pada ketinggian 92.5 m dan titik terendah pada ketinggian 87.75 m sehingga diperoleh kedalaman UR adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{kedalaman} &= h_{max} - h_{min} \\ \text{kedalaman} &= 92.5m - 87.75m \\ \text{kedalaman} &= 4.75 m \end{aligned}$$

Sehingga dari persamaan diatas diperoleh kedalaman lower reservoir adalah 4.75 m. Sehingga diperoleh head air sebesar 16,35m. Ketinggian tersebut merupakan tinggi jatuh air yang akan menjadi sumber pemutar turbin.

Pada proses pemompaan air dari Lower Reservoir ke Upper reservoir dilakukan selama 8 jam untuk mengoptimalkan cuaca panas dari ITERA, yaitu dari pukul 09.00 – 16.00. Dengan Penggunaan volume air yang dinaikan ke upper reservoir menggunakan persamaan 1 diperoleh sebesar :

$$V = Q . t$$

Dimana nilai parameter yang digunakan :

$$Q = 0.1 M^3/s$$

$$t = 8 \text{ jam} \times 3600 \text{ detik}$$

$$t = 28800 \text{ detik}$$

Sehingga penggunaan volume air yang dinaikan ke upper reservoir sebesar :

$$V = 0.1 m^3/s \times 28800 \text{ detik}$$

$$V = 2880 m^3$$

Untuk menaikan air sebanyak yang dibutuhkan dan selama 8 jam membutuh kan energi listrik yang dapat dicari dengan persamaan 5 sebagai berikut :

$$P_{tot} = P \times t \text{ (pers 5)}$$

$$P_{tot} = 500 W \times 8 \text{ jam}$$

$$P_{tot} = 4000 Wh / 4KWh$$

Hasil Keluaran dan Design Photovoltaic.

Tabel 3. Data Parameter Inputan yang Diberikan pada Masing-Masing Plant

Plant	Intensitas (W/m ²)	Temperatur (C)
Plant1	1000	30
Plant2	1000	25
Plant3	1000	20
Plant4	1000	15

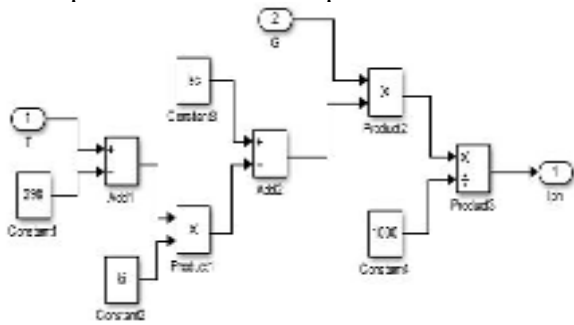
Tabel 4. Data Hasil Output Masing-masing PV.

Plant	Tegangan (V)	Arus (A)
Plant1	33.40	3.34
Plant2	32.35	3.24
Plant3	31.31	3.13
Plant4	30.2	3.01

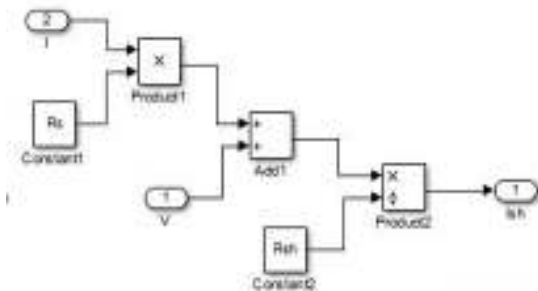
Berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4, diasumsikan temperatur yang di terima setiap *plant* berbeda antara satu dengan yang lainnya, besaran suhu yang diberikan memiliki *range* 15°C sampai dengan 30°C dengan interval 5°C setiap *plantnya* dengan intensitas cahaya yang konstan. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa ketika suhu yang diterima oleh PV semakin tinggi maka daya yang dapat dihasilkan akan semakin tinggi.

Berdasarkan Persamaan. 5 hingga Persamaan. 9 pada dasar teori, perhitungan sampel dilakukan dengan menggunakan

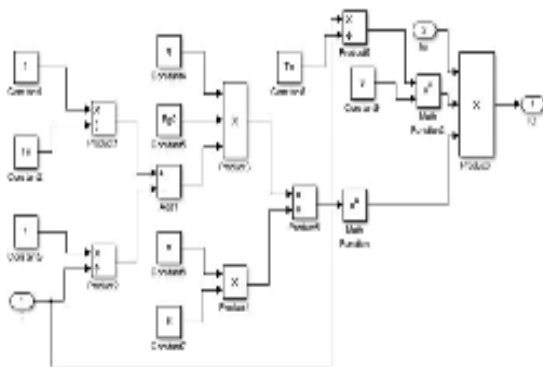
inputan *temperature* 25°C dan Irr 1000w/m².
 Pemodelan matematis di tulis dalam bentuk blok pada Gambar 6 sampai Gambar 10.



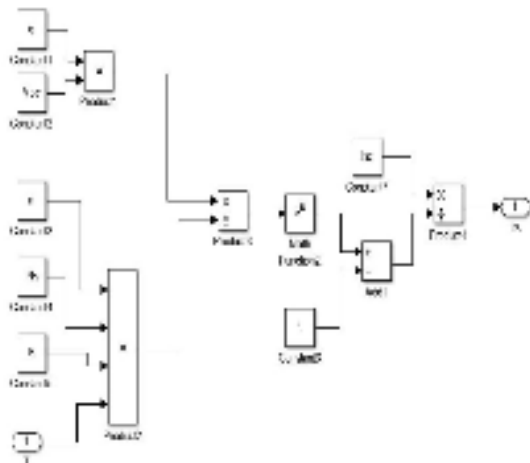
Gbr.6 Pemodelan matematika Iph



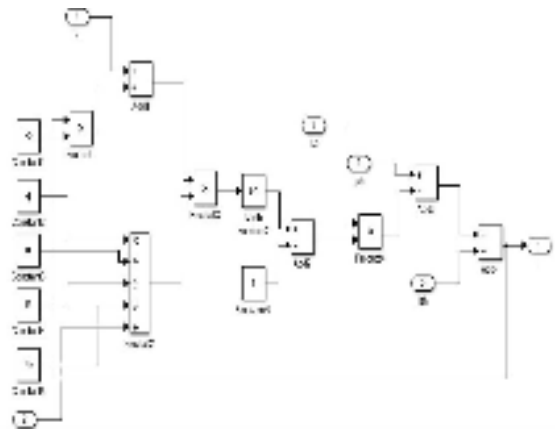
Gbr.7 Pemodelan Matematika Ish



Gbr.8 Pemodelan matematika Irs



Gbr.9 Pemodelan matematika Irs



Gbr.10 Pemodelan matematika I output.

Hasil yang diperoleh dari persamaan Iph:

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - 298)] \frac{G}{1000}$$

$$= [8.21 + 0.0032(298.15 - 298)] \frac{1000}{1000}$$

$$= 8.21A$$

Hasil perhitungan nilai Ish:

$$I_{sh} = \left(\frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \right)$$

$$= \left(\frac{26.4 + 7.58 \times 221}{415.405} \right)$$

$$= 4.09A$$

Hasil perhitungan nilai Irs:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \times V_{oc}}{n \times N_s \times K \times T}\right) - 1}$$

$$I_{rs} = \frac{8.21}{\exp\left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 32.9}{1.3 \times 54 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 298.15}\right) - 1}$$

$$I_{rs} = 9.98 \times 10^{-8} A$$

Hasil perhitungan nilai Io:

$$I_o = I_{rs} \times \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \times \exp\left(\frac{q \times E_{g0} \times \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \times K}\right)$$

$$I_o = 9.98 \times 10^{-8} \left(\frac{298.15}{298}\right)^3 \times \exp\left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1.1 \times \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{298.15}\right)}{1.3 \times 1.38 \times 10^{-23}}\right)$$

$$I_o = 1.016 \times 10^{-7} A$$

Hasil perhitungan nilai Arus dari PV:

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{q(V + I \times R_s)}{n \times K \times N_s \times T} \right) \right) - I_{sh}$$

$$I = 8.21 - 1.016 \times 10^{-7} \left(\exp \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} (26.4 + 7.58 \times 0.221)}{1.3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 54 \times 298.15} \right) \right) - 4.09$$

$$= 3.90 A$$

Dari perhitungan tersebut diperoleh efisiensi dari *design* PV yang di rancang memiliki efisiensi sebagai berikut:

$$\eta = \left(\frac{I_{simulasi}}{I_{perhitungan}} \right)$$

$$= \left(\frac{3.39}{3.90} \right) \times 100\%$$

$$= 87\%$$

Hasil yang didapat pada perhitungan dan simulasi untuk nilai temperatur 25°C dan intensitas 1000 W/m² telah memiliki hasil yang relatif sama. Sehingga didapatkan nilai efisiensi sebesar 87%.



Gbr.11 Hasil simulasi plant PV 1.

Hasil simulasi plant PV di tampilkan pada Gambar 11. Hasil simulasi sebagai inputan baterai merupakan 4 PV yang digunakan sekaligus untuk melakukan pengecasan baterai.

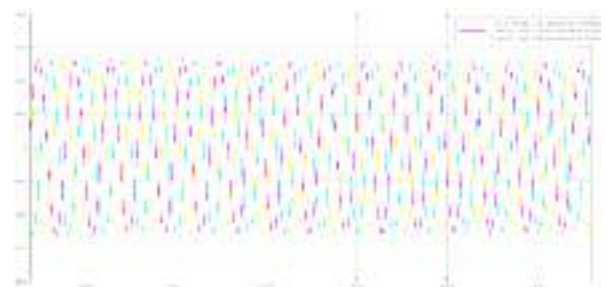
B. Desain Connector Bus DC

Baterai dihubungkan secara *parallel* sehingga tegangan yang dihasilkan akan tetap sebesar 12 V dan kapasitas arusnya mengalami peningkatan sebesar 250 Ah. Pengabungan baterai satu dengan yang lainnya bertujuan untuk meningkatkan kapasitas baterai agar penggunaan baterai memiliki

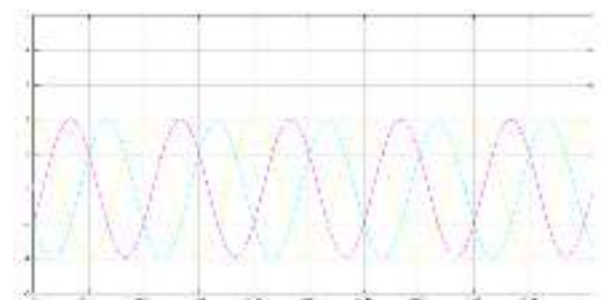
durasi yang relatif lebih lama jika dibandingkan dengan baterai yang tidak interkoneksi satu sama lain. *Bus connector* yang di design memiliki inputan berupa 5 buah baterai yang disusun secara *parallel*. Sehingga *output* pada *bus connector* adalah tegangan DC dari 5 buah baterai yang saling interkoneksi yang nantinya akan dikonversi menjadi tegangan AC dengan dihubungkan pada inverter agar dapat digunakan untuk mensuplai pompa AC.

C. Hasil Keluaran PSPP

Durasi penggunaan turbin pada PSPP adalah ketika volume air naik sama dengan volume air turun, dengan menggunakan satu pipa dan nilai debit air yang sama maka, turbin hydro pump storage dapat digunakan dengan waktu yang sama dengan waktu menghidupkan pompa. Berdasarkan penggunaan pompa penulis menggunakan pompa selama 8 jam, sehingga turbin dapat beroperasi selama 8 jam. Hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 12, 13 dan 14.



Gbr.12 Tegangan keluaran PSPP



Gbr.13 Arus PSPP



Gbr.14 Daya keluaran PSPP

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh daya keluaran sebesar 400 W . dan menghasilkan energi listrik total selama 8 jam yang dapat dihitung.

$$P_{tot} = P \times t$$

$$W = 400 \text{ W} \times 8 \text{ jam}$$

$$W = 3200 \text{ Wh} / 3.2 \text{ KWh}$$

Dengan total energi listrik yang dibutuhkan sebesar 4 KWh dan total energi listrik yang dihasilkan sebesar 3.2 KWh, maka dapat disimpulkan hydro pump storage system dapat menyimpan energi listrik, dengan efisiensi 80 %.

$$Eff = P_{out} / P_{in} \times 100\%$$

$$Eff = 3.2 \text{ KWh} / 4 \text{ KWh} \times 100\%$$

$$Eff = 80 \%$$

V. KESIMPULAN

Pada perancangan PSPP digunakan parameter untuk mendapatkan nilai daya keluaran yaitu head air, debit air, nilai gravitasi, dan masa jenis air. Diperoleh volume kedua reservoir sebesar 17420,75 M³ dan 50697.248 M³ untuk lower reservoir dan upper reservoir. Diperoleh pula nilai head air sebesar 16,327 M. Sistem PSPP menggunakan pompa sebagai turbin. Yaitu pompa yang dapat bekerja secara reversible memanfaatkan aliran air axial. Pompa sebagai turbin digerakan menggunakan katup kontrol yang dapat ditentukan oleh pengguna untuk merubah fungsi dari PST. Pada sistem pompa daya inputan hasil dari PV sebesar 500W. Pompa bekerja pada waktu optimal panas di pukul 09.00 – 16.00 dengan penggunaan volume air sebesar 28800 M³.

Sistem pompa membutuhkan total energi listrik sebesar 4 KWh untuk menaikan air selama 8 jam. Pada sistem turbin dihasilkan tegangan AC 3 phasa sebesar 220v dan arus AC 3 phasa sebesar 2A, dan menghasilkan daya sebesar 400 W. Turbin dapat bekerja dengan waktu sama dengan waktu pompa beroperasi, dikarenakan debit air yang sama pada satu pipa penstock. Efisiensi energi pada PSPP sebesar 80 % sehingga dapat membantu pembangkit listrik konvensional saat waktu beban puncak yang membutuhkan daya lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan oleh Institut Teknologi Sumatera melalui program Hibah Penelitian ITERA Smart dengan No.SK: B/323/IT9.C1/PT.01.03/2019.

REFERENSI

- [1] S. M. Metev and V. P. Veiko, *Laser Assisted Microtechnology*, 2nd ed., R. M. Osgood, Jr., Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998.
- [2] Z. Kan et al., "Research on Grid-Connected/Islanded Control Strategy of PV and Battery Storage Systems as Emergency Power Supply of Pumping Storage Power Station," 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, China, 2020, pp. 457-462, doi: 10.1109/ICET49382.2020.9119658.
- [3] Corio, D., Kananda, K., & Salsabila S, K. (2019). Analisa Potensi Embung Itera Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Pico Hydro (PLTPH). JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO, 8(3), 97 –. <https://doi.org/10.25077/jnte.v8n3.691.2019>
- [4] M. Xu, L. Wu, H. Liu and X. Wang, "Multi-objective optimal scheduling strategy for wind power, PV and pumped storage plant in VSC-HVDC grid," in The Journal of Engineering, vol. 2019, no. 16, pp. 3017-3021, 3 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8435.
- [5] Z. Zhao, J. Yang, W. Yang, H. Luo and Y. Peng, "Coordinated Multi-Objective Optimization for Multiple Trade-Offs in Pumped Outage Condition of Pumped Storage System," in IEEE Access, vol. 7, pp. 161394-161411, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2951628.
- [6] Z.Yisong et al., "Life Cycle Optimization of Renewable Energy Systems Configuration with Hybrid Battery/Hydrogen Storage: A Comparative Study" 2020 Elsevier Journal of energy storage (30), <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101470>
- [7] X. Lai, C. Li, J. Zhou, and N. Zhang, "Multi-objective optimization of the closure law of guide vanes for pumped storage units," Renew. Energy, vol. 139, pp. 302_312, Aug. 2019.
- [8] W. Zeng, J. Yang, J. Hu, and J. Yang, "Guide-vane closing schemes for pump-turbines based on transient characteristics in S-shaped region," J. Fluids Eng., vol. 138, May 2016, Art. no. 051302.

- [9] Z. Zhao, J. Yang, W. Yang, J. Hu, and M. Chen, "A coordinated optimization framework for flexible operation of pumped storage hydropower system: Nonlinear modeling, strategy optimization and decision making," *Energy Convers. Manage.*, vol. 194, pp. 75_93, Aug. 2019.
- [10] W. Guo, J. Yang, M. Wang, and X. Lai, "Nonlinear modeling and stability analysis of hydro-turbine governing system with sloping ceiling tailrace tunnel under load disturbance," *Energy Convers. Manage.*, vol. 106, pp. 127_138, Dec. 2015.
- [11] W. Yang and J. Yang, "Advantage of variable-speed pumped storage plants for mitigating wind power variations: Integrated modelling and performance assessment," *Appl. Energy*, vol. 237, pp. 720_732, Mar. 2019.
- [12] W. Yang, P. Norrlund, C. Y. Chung, J. Yang, and U. Lundin, "Eigenanalysis of hydraulic-mechanical-electrical coupling mechanism for small signal stability of hydropower plant," *Renew. Energy*, vol. 115, pp. 1014_1025, Jan. 2018.
- [13] B. Xu, D. Chen, M. Venkateshkumar, Y. Xiao, Y. Yue, Y. Xing, and P. Li, "Modeling a pumped storage hydropower integrated to a hybrid power system with solar-wind power and its stability analysis," *Appl. Energy*, vol. 248, pp. 446_462, Aug. 2019.
- [14] J. Li. The Design and Analysis on the Emergency Power Supply Configuration of Pumped Storage Power Plant [J]. *Hydropower and pumped storage*, 2016, 2(01):97-102.
- [15] M. Liu, L. Guo, C. Wang, et al. A Coordinated Operating Control Strategy for Hybrid Isolated Microgrid Including Wind Power, Photovoltaic System, Diesel Generator, and Battery Storage [J]. *Power system automation*, 2012, 36(15): 19-24
- [16] W.T. Elsayed and E.F. El-Shaadany, "A Fully Decentralized Approach for Solving the Economic Dispatch Problem," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol.30, no.4, pp.2179-2189, 2015.
- [17] Q. Zhang, D. Zhou, N. Duan, and X. Shen, "An Adaptive Differential Evolutionary Algorithm Incorporating Multiple Mutation Strategies for Economic Load Dispatch Problems," *Applied Soft Computing Journal*, vol.78, pp.641-669, 2019.
- [18] B.R. Adarsh, T. Ragunathan, T. Jayabarathi, and X.S. Yang, "Economic Dispatch Using Chaotic Bat Algorithm," *Energy*, vol.96, pp.666-675, 2016.
- [19] J. Zhao, S. Liu, M. Zhou, X. Guo, and L. Qi, "Modified Cuckoo Search Algorithm to Solve Economic Power Dispatch Optimization Problems," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol.5, no.4, pp.794-806, 2018.
- [20] D.C. Secui, "A New Modified Artificial Bee Colony Algorithm for The Economic Dispatch Problem," *Energy Conversion and Management*, vol.89, pp.43-62, 2015.
- [21] B. Ghosh, B. Dey, and A. Bhattacharya, "Solving Economic Load Dispatch Problem Using Hybrid Krill Herd Algorithm," *Proceeding of International Conference on Energy, Power and Environment Towards Sustainable Growth (ICEPE)*, pp.1-6, 2015.
- [22] Boming, Z., Wenchuan, W., Taiyi, Z., et al.: "Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration", *Autom. Electr. Power Syst.*, 2011, 35, (1), pp. 1–6
- [23] R.Iman, A.F.Asghar, "Pumped-storage units to address spinning reserve concerns in the grid with high wind penetration", *Elsavier: Journal of Energy Storage*, 2020