

Desain Kontrol Aliran Daya PLTS Mandiri Menggunakan Mekanisme Penyimpanan Energi *Water Pump Energy Storage*

¹Aldo Pradipta Bismaka, ²Dedet Candra Riawan, dan ³Sjamsjul Anam.

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

¹aldopradipta10@gmail.com; ²dedet.riawan@ee.its.ac.id; ³anam.lc@gmail.com

Abstract - Photovoltaic as a source of power plant is the most used because of low maintenance cost. The characteristics of this power plant is the instability of power generated due to varying sunlight intensity. The solution to solve this problem is by adding an energy storage into this generating system to maintain the power that delivered to the load. The common application of energy storage is battery because it has an easy installation process. However, the battery contain an acid and chemical object that can damage the environment. To resolve the issue, we choose the energy storage that using water energy as an media. The working principle of this system is to store the excess power generated by PV in the form of water energy and transmit it into electrical power to the load. However, the electrical power that flow to the load does not have yet the voltage that fit to load voltage regulation. In this research, will be designed a power flow controller in a closed loop water pumped energy storage system so this system can provide electrical power that has voltage fit to load voltage regulation. Based on the simulation result, it can be concluded that with the power flow controller, this system can produce electrical power that has voltage that fit to load voltage regulation which the value is 220 Volts / 50 Hz continuously despite varying load power requirements. This power flow controller also can make the system reach power balance condition.

Keywords — Photovoltaic, Water Pumped Energy Storage, Load Voltage Regulation Power Flow Controller, Power Balance

Abstrak— *Photovoltaic* (PV) menjadi pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan yang paling banyak digunakan karena biaya perawatan yang murah. Karakteristik yang dimiliki oleh pembangkit listrik ini ialah fluktuasi daya yang dihasilkan karena bergantung pada intensitas cahaya matahari. Solusi untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan menambahkan penyimpan energi (*energy storage*) ke dalam sistem pembangkit ini agar kebutuhan daya yang dikirim ke beban dapat dijaga. *Energy storage* yang biasa digunakan adalah baterai karena mudah dalam pemasangannya. Namun, kandungan baterai seperti timah dan bahan kimia menjadi sebuah kekurangan bagi lingkungan. Untuk mengatasi masalah tersebut, maka dipilih penyimpanan energi dengan media energi air (*Water Storage*) karena sifatnya yang ramah lingkungan serta memiliki kapasitas lebih besar dari baterai. Prinsip kerja dari sistem ini adalah dengan menyimpan daya berlebih yang dihasilkan PV dalam bentuk energi air dan menyalurkan menjadi daya listrik ke beban. Namun, daya listrik yang mengalir ke beban tersebut belum memiliki tegangan dengan sesuai regulasi beban. Pada penelitian ini akan dirancang sebuah kontrol aliran daya pada sistem *water pumped storage* sehingga

sistem ini dapat memberikan daya yang memiliki tegangan sesuai regulasi beban. Berdasarkan hasil simulasi penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa dengan adanya *controller* aliran daya, daya yang memiliki tegangan sesuai dengan regulasi beban yaitu 220 Volt/ 50 Hz dapat disalurkan secara konstan meskipun kebutuhan daya beban bervariasi. Mekanisme kontrol ini juga dapat menciptakan keseimbangan daya pada sistem.

Kata Kunci— *Photovoltaic, Water Pumped Energy Storage, Regulasi Tegangan Beban, Controller Aliran Daya, Keseimbangan Daya*

I. PENDAHULUAN

Dewasa ini, penelitian dan pengembangan tentang implementasi *renewable energy* semakin berkembang. Hal ini digunakan untuk mengganti energi fosil seperti minyak dan batu bara yang tidak ramah lingkungan. Penggunaan *renewable energy* yang berkembang salah satunya adalah *photovoltaic* (PV) sebagai sumber dari PLTS. PV dapat dioperasikan secara mandiri maupun terhubung dengan jaringan. Namun masalah pada PV adalah terdapat fluktuasi daya yang dihasilkan karena sifat PV yang bergantung pada intensitas cahaya (iradiasi) matahari, sehingga daya listrik tersebut tidak dapat digunakan secara kontinyu. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah penyimpanan energi (*energy storage*) yang berfungsi untuk menyimpan energi berlebih yang dihasilkan saat kebutuhan beban lebih kecil daripada suplai energi[1]

Baterai merupakan salah satu contoh umum dari aplikasi *energy storage* yang sering digunakan [2]. Namun, kandungan dari baterai seperti timah dan bahan kimia menjadi sebuah kekurangan terutama bagi lingkungan. Untuk mengatasi masalah tersebut dipilih sebuah tempat penyimpanan energi menggunakan sistem penyimpanan energi air (*water energy storage*) yang lebih ramah lingkungan daripada baterai[3]. Karakteristik dari *water energy storage* yang lebih fleksibel dan mempunyai kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar daripada baterai membuat *water energy storage* memiliki *lifecycle* yang lebih lama[4]. Prinsip kerja dari sistem ini adalah dengan menggunakan daya berlebih yang dihasilkan oleh PV untuk memompa air menggunakan motor pompa dari *lower reservoir* ke *upper reservoir*, lalu air pada *upper reservoir* akan dialirkan ke generator sebagai sumber untuk memutar turbin sehingga generator akan menghasilkan daya[3]. Namun pengoperasian pembangkit mandiri diatas

memiliki kekurangan yaitu nilai efektif tegangan (V_{rms}) dan frekuensi tegangan luaran sistem akan berfluktuasi terhadap perubahan beban. [5] Dalam hal ini, perlu dilakukan pengaturan tegangan dan frekuensi *output* sistem.

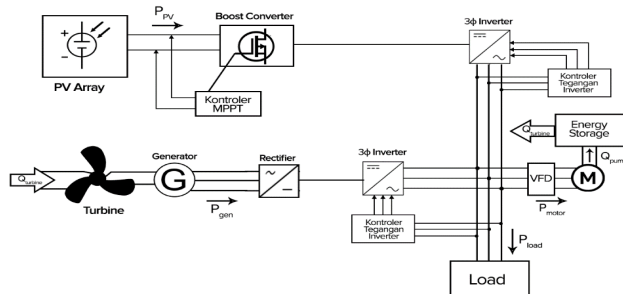
Metode yang dapat digunakan adalah dengan memasang *controller* aliran daya pada sistem. Tujuan dari pemasangan tersebut adalah untuk mengatur nilai efektif tegangan dan frekuensi tegangan luaran sistem agar memiliki nilai yang sesuai dengan regulasi tegangan beban dan dapat disalurkan ke beban secara kontinyu.

Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan sistem PLTS mandiri dengan mekanisme penyimpanan energi *water pumped energy storage* (WPES) yang dilengkapi dengan *controller* aliran daya. Kemudian akan dilakukan analisis mengenai pengaruh dan kinerja *controller* aliran daya tersebut bagi sistem secara keseluruhan.

II. METODE PENELITIAN

A. Topologi dan Pemodelan Sistem

Sistem PLTS Mandiri menggunakan mekanisme penyimpanan energi WPES ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem ini terdiri dari *Photovoltaic* (PV), generator, *motorized water pump*, *reservoir*, dan *beban*. 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 daya yang dibutuhkan beban, maka selisih daya tersebut akan digunakan untuk menggerakkan motor pompa untuk menaikkan air dari *lower reservoir* (LR) ke *upper reservoir* (UR). Dalam hal ini reservoir berfungsi sebagai media penyimpan energi dalam bentuk energi potensial air. Dengan topologi di atas maka suplai ke beban dapat tersedia secara kontinyu dan stabil meskipun daya dari PV berubah-ubah akibat perubahan iradiasi matahari. Seluruh sistem diisolasi dari utilitas *grid*, karenanya disebut sistem mandiri.



Gambar 1 Topologi sistem PLTS Mandiri - WPES

Sistem ini juga dilengkapi dengan *controller* aliran daya berupa rangkaian *Voltage Source Inverter* (VSI) 3 Fasa dengan mekanisme *voltage controlled* yang berfungsi untuk mengatur nilai tegangan dan frekuensi *output* sistem. Komponen yang digunakan pada penelitian ini adalah *centrifugal pump induction motor* sebagai motor pompa air, *Variable Frequency Drive* (VFD) sebagai kontrol kecepatan

motor pompa, *kaplan turbine synchronous generator* sebagai generator, dan *polycrystalline solar panel* untuk PV.

Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan tiap subsistem/komponen pada program MATLAB/Simulink R2017a. Pemodelan sistem tersebut akan disimulasikan untuk verifikasi kinerja *controller* aliran daya serta verifikasi keseimbangan daya pada sistem secara keseluruhan. Berikut adalah pemodelan tiap subsistem/komponen pada penelitian ini.

1. Photovoltaic

Photovoltaic (PV) atau panel surya merupakan alat yang dapat merubah energi pada foton cahaya menjadi energi listrik berupa tegangan dan arus DC[6]. Pemodelan PV pada penelitian ini menggunakan *generic block* pada program Simulink R2017A Blok panel surya yang digunakan adalah merk Solartech *Photovoltaic* modul kapasitas 220 Watts (1Soltech 1STH-220-P) dengan parameter pada tabel 1

Tabel 1 Parameter PV Array 1Soltech 1STH-220-P

Parameter	Nilai
Daya Maksimum (P_{max})	218,871 W
Tegangan Daya Maksimum (V_{mp})	29,3 V
Arus Daya Maksimum (I_{mp})	7,47 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	36,6 V
Short Circuit Current (I_{sc})	7,97 A
Arus saturasi dioda (I_0)	2,975e-10 A
Resistansi seri (R_s)	0,3817 Ω
Resistansi shunt (R_{sh})	350,24 Ω

2. Turbin Air

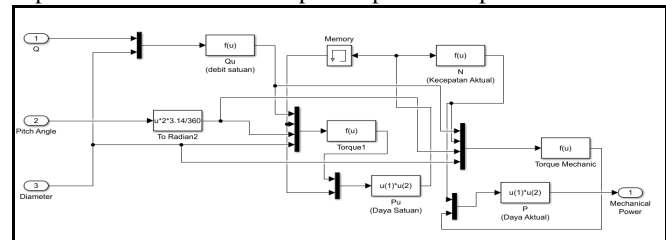
Turbin air merupakan bagian yang mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik berupa putaran. Turbin air digunakan sebagai *primemover* generator sinkron. Generator sinkron sendiri membutuhkan daya mekanik dari turbin untuk beroperasi. Daya mekanik dari turbin air ditunjukkan pada persamaan berikut[7]:

$$P_m = \eta \rho g h Q \tag{1}$$

Dimana:

- P_m = Daya mekanik (Watt)
- ρ = densitas air (kg/m^3)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- η = efisiensi turbin

Sistem pada penelitian ini menggunakan turbin air jenis kaplan. Pemodelan turbin kaplan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Pemodelan Turbin Air Kaplan

Pemodelan ini menggunakan blok *user defined function* yang terdapat pada program Simulink R2017a dengan:

Input:

- debit air (Q), dalam satuan m^3/s
- pitch angle (β), dalam satuan derajat
- diameter turbin (D), dalam satuan meter

Output:

- Daya mekanik turbin (P_m), dalam satuan Watt

3. Generator Sinkron

Generator sinkron adalah suatu alat konversi energi mekanik *primemover* menjadi energi listrik. Generator sinkron mempunyai kecepatan medan magnet putar sama dengan kecepatan rotor. [8] Generator sinkron pada penelitian ini menggunakan *generic block* yang terdapat pada program Simulink R2017a. *Block* generator sinkron tersebut membutuhkan input daya mekanik (P_m) yang akan dihubungkan dengan *output* pemodelan turbin air sesuai dengan Gambar 2. *Block* generator sinkron dimodelkan menggunakan pemodelan sumbu d-q [9]. Parameter pada *block* generator sinkron sendiri dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2 Parameter *generic block* generator sinkron

Parameter	Nilai
Nominal Power (P_n)	6.400 VA
Type	Salient Pole
Tegangan Saluran (V_{t-n})	400 Volt
Frekuensi (F)	50 Hz
Resistansi Stator (R_s)	1.62 Ω
Resistansi medan (R_f)	1.208 Ω
Resistansi <i>damp</i> er sumbu d (R'_{fd})	3.142 Ω
Resistansi <i>damp</i> er sumbu q (R'_{fq})	4.772 Ω
Induktansi magnetisasi sumbu d (L_{md})	0.1086 H
Induktansi magnetisasi sumbu q (L_{mq})	0.05175 H
leakage induktansi medan L_{fd}	0.01132 H
leakage induktansi <i>damp</i> er sumbu d (L_{kd})	0.0073 H
leakage induktansi <i>damp</i> er sumbu q (L_{kq})	0.001 H

4. Motor Induksi

Motor induksi pada sistem ini digunakan sebagai sumber penggerak dari pompa sentrifugal. Pemodelan motor induksi sendiri menggunakan induksi menggunakan *generic block* pada simulink. Didalam *block* tersebut, motor dimodelkan menggunakan pemodelan sumbu d-q [9]. Parameter pada *block* generator sinkron sendiri dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3 Parameter *generic block* motor induksi

Parameter	Nilai
Daya Motor (P_{motor})	18.500 Watt
Torsi Beban (T_{load})	121 Nm
Tegangan Saluran (V_{t-n})	380 Volt
Kecepatan Putaran (N_p)	1460 rpm
Frekuensi (F)	50 Hz

Resistansi Stator (R_s)	0.2147 Ω
Resistansi Rotor (R_r)	0.2205 Ω
Induktansi Stator (L_s)	0.000991 H
Induktansi Rotor (L_r)	0.000991 H
Induktansi Magnetisasi (L_m)	0.06419 H
Momen Inersia	0.102 kgm^2

B. Kontrol Power Balance

Pada sistem PV - *closed loop water pump energy storage*, dibutuhkan sebuah metode untuk mencapai keseimbangan daya (*Power balance*) satu sistem. Keseimbangan daya yang harus dicapai pada sistem ini ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$P_{Supply} = P_{Demand} \quad (2)$$

$$P_{PV} + P_{Gen} = P_{load} + P_{motor} \quad (3)$$

Dimana:

P_{Supply} = Daya *supply*

P_{Demand} = Daya *demand*

P_{PV} = Daya PV

P_{Gen} = Daya generator

P_{load} = Daya beban

P_{motor} = Daya motor

Setelah menentukan 3 nilai yaitu P_{PV} , P_{Gen} , dan P_{load} pada pemodelan ini, kita selanjutnya akan mengontrol daya motor (P_{motor}). Daya *output* motor disini akan dikontrol agar memiliki nilai sesuai kelebihan daya yang mengalir pada sistem selama periode surplus antara suplai daya ($P_{PV} + P_{Gen}$) dikurangi kebutuhan daya beban (P_{load}). Ketika motor dapat beroperasi secara presisi sesuai kelebihan daya yang mengalir pada sistem, maka kondisi keseimbangan daya (*Power Balance*) dapat tercapai. Penentuan nilai daya motor sendiri dapat dilihat pada persamaan (4)

$$P_{motor} = T_{load} \cdot \omega_n \quad (4)$$

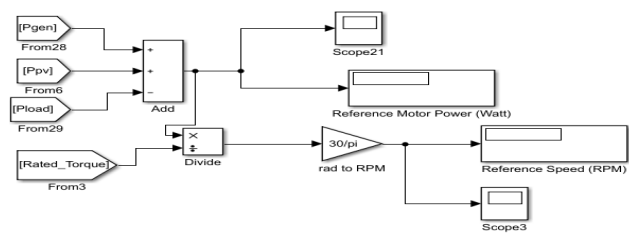
Dimana:

T_{load} = Torsi beban (Nm)

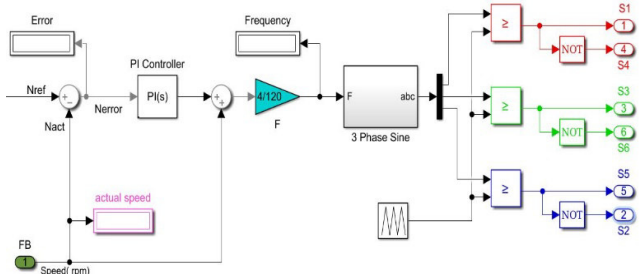
ω_n = Kecepatan motor (rad/s)

Pada penelitian ini, torsi beban diatur memiliki nilai konstan sebesar 121 Nm sesuai dengan rating torsi beban motor induksi yang tertera pada Tabel 3. Sehingga, untuk kontrol daya motor dapat dilakukan melalui kontrol kecepatan motor tersebut. Untuk metode kontrol kecepatan motor induksi sendiri pada penelitian ini akan menggunakan kontrol kecepatan V/F konstan[10].

Dalam mekanisme kontrol kecepatan motor V/F konstan diperlukan sebuah kecepatan referensi sebagai acuan. Kecepatan referensi motor induksi pada sistem ini disesuaikan dengan kelebihan daya yang mengalir pada sistem. Mekanisme untuk mendapatkan kecepatan referensi tersebut ditunjukkan pada Gambar 3



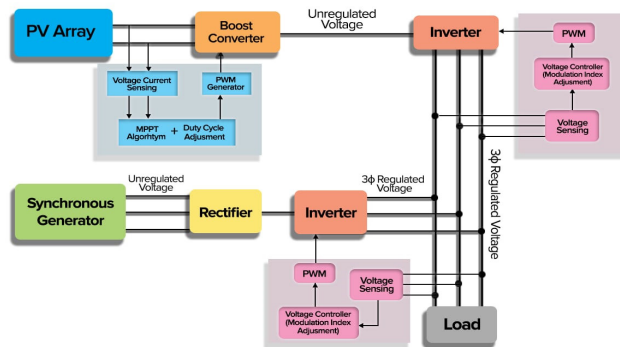
Gambar 3 Mekanisme perhitungan nilai kecepatan referensi motor
 Prinsip dasar dari kontrol kecepatan *V/F* konstan pada motor induksi adalah untuk menentukan variabel nilai tegangan (*v*) dan variabel nilai frekuensi (*f*). Sensor kecepatan digunakan untuk mendapatkan besar kecepatan aktual motor. Kecepatan aktual motor ini lalu dikomparasi dengan kecepatan referensi. Proses ini menghasilkan error kecepatan, selanjutnya error kecepatan menuju PI untuk diproses. Keluaran dari PI ini menghasilkan slip kecepatan yang selanjutnya ditambahkan dengan kecepatan aktual motor dan menghasilkan kecepatan sinkron. Kemudian dapat ditentukan besar nilai tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan *Voltage Source Inverter* (VSI) untuk mengoperasikan motor induksi. Gambar 4 menunjukkan pemodelan kontrol kecepatan *V/F* konstan pada Simulink.



Gambar 4 Pemodelan kontrol kecepatan *V/F* konstan

C. Kontrol Aliran Daya

Sistem PLTS mandiri dengan mekanisme penyimpanan energi WPES memerlukan mekanisme kontrol untuk dapat menghasilkan tegangan dan frekuensi luaran sistem yang sesuai dengan regulasi tegangan beban (*load voltage regulation*). *Load voltage regulation* untuk negara Indonesia adalah $220 V_{rms} / 50 \text{ Hz}$. Mekanisme kontrol aliran daya pada sistem ini dapat dilihat pada Gambar 5



Gambar 5 Mekanisme kontrol tegangan sistem

Untuk menghasilkan tegangan luaran sistem yang mempunyai nilai sesuai dengan *load voltage regulation*, kita menggunakan metode *Voltage Controlled SPWM VSI 3 Fasa*. Rumus penentuan tegangan *output* SPWM VSI dapat dilihat pada persamaan berikut[11]:

$$V_{rms} = \frac{A_{ref}}{A_{tri}} V_{DC} \tag{5}$$

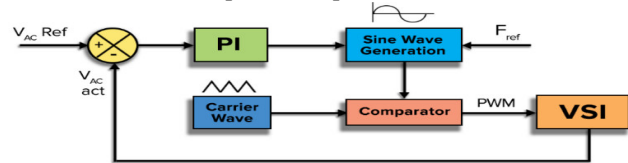
Dimana:

- V_{rms} = Tegangan rms *line to line output* inverter
- A_{ref} = Amplitudo tegangan referensi
- A_{tri} = Amplitudo tegangan segitiga
- V_{DC} = Tegangan DC input

Perbandingan dari amplitudo tegangan referensi dan amplitudo tegangan segitiga disebut sebagai indeks modulasi (*M*)

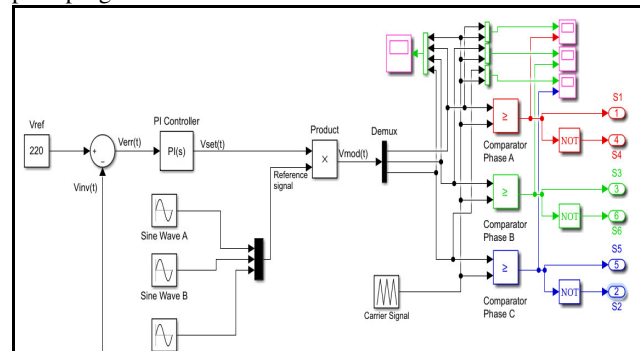
$$M = \frac{A_{ref}}{A_{tri}} \tag{6}$$

Sehingga, untuk skema dari metode *voltage controlled SPWM VSI 3 Fasa* dapat dilihat pada Gambar 6



Gambar 6 Skema kontrol tegangan *output* VSI

Konsep kerja dari *controller* ini adalah dengan membandingkan tegangan rms referensi (dengan tegangan rms aktual *output inverter* yang terukur. Perbandingan ini akan menghasilkan sinyal error yang nantinya akan diproses dengan PI dan dikalikan dengan sinyal referensi (sinyal sinusoidal). Hasil perkalian tersebut akan di *compare* dengan sinyal *carrier* (sinyal segitiga) dan akan menghasilkan Indeks Modulasi (*M*). Nilai dari indeks modulasi (*M*) sesuai dengan persamaan (6) akan mengontrol sinyal PWM yang digunakan untuk proses pensaklaran pada *inverter* 3 fasa. Penentuan frekuensi tegangan *output* inverter yang mengalir ke beban didapatkan dengan cara mengatur frekuensi sinyal referensi (sinyal sinusoidal). Frekuensi tegangan *output* inverter mempunyai nilai sama dengan frekuensi sinyal referensi. Gambar 7 menunjukkan pemodelan kontrol tegangan inverter pada program Simulink.



Gambar 7 kontrol tegangan inverter

$$V_{err}(t) = V_{ref} - V_{inv}(t) \quad (7)$$

$$V_{set}(t) = K_{p_{inv}} \cdot V_{err}(t) + K_{i_{inv}} \int_0^t V_{err}(t) dt \quad (8)$$

Dimana:

$V_{err}(t)$ = Sinyal tegangan eror

$V_{ref}(t)$ = Tegangan *line to netral* RMS referensi

$V_{inv}(t)$ = Tegangan *line to netral* RMS aktual inverter

$V_{set}(t)$ = Sinyal *output* PI

$V_{mod}(t)$ = Sinyal *output* perkalian $V_{set}(t)$ dengan fungsi sinusoidal yang akan dimodulasi dengan sinyal segitiga

$K_{p_{inv}}(t)$ = Konstanta proporsional PI V_{inv}

$K_{i_{inv}}(t)$ = Konstanta integral PI V_{inv}

t = Waktu sesaat (menyatakan persamaan kontinu)

III. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

A. Parameter Simulasi

Simulasi pada penelitian ini menggunakan MATLAB/Simulink R2017a. Berikut parameter – parameter tiap subsistem/kompenen yang digunakan pada tahap simulasi.

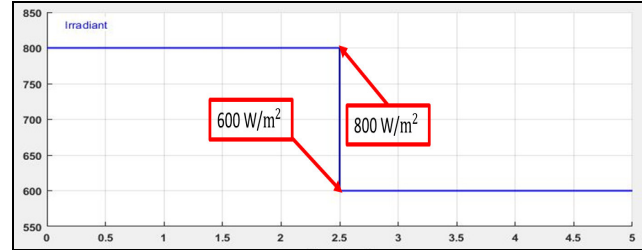
Tabel 4 Parameter Simulasi

Komponen	Parameter	Nilai
PV (disusun 14 seri 5 Pararel)	Daya Maksimal	15,32 kWp
	Tegangan Maksimal	410,2 Vmp
Turbin Air (Primemover)	Daya Mekanik	5310 W
Generator Sinkron	Daya Elektrik	5085 W
Motor Induksi	Daya	18,500 W
	Tegangan/ Frekuensi	380 V/50 Hz
	Rated Speed	1460 RPM
Voltage Controlled Inverter SPWM	V_{ref}	220 V
	$K_{p_{inv}}$	0,41
	$K_{i_{inv}}$	2,88
	f_{cut}	50 Hz
	f_{cawter}	5000 Hz
Filter LC	L_i	10,12 mH
	C_D	328,9 μF

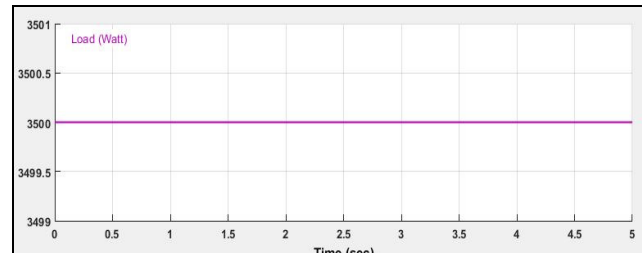
B. Simulasi kondisi iradiasi matahari berubah, dan kebutuhan daya beban konstan

Pengujian kinerja *controller* pada sistem ini dilakukan dengan simulasi beberapa skenario. Skenario pertama adalah skenario ketika kondisi iradiasi matahari berubah dan kebutuhan daya beban konstan. Pemodelan iradiasi matahari pada skenario dapat dilihat pada Gambar 8. Variasi iradiasi matahari dimodelkan dengan perubahan dari 800 W/m² dan 600 W/m². Sedangkan untuk kebutuhan daya beban dimodelkan konstan pada nilai 3500 Watt yang ditunjukkan pada Gambar 9 Sistem kontrol disini harus mampu

mempertahankan kondisi keseimbangan daya antara *supply* daya dan *demand* daya dalam sistem sesuai dengan persamaan (2) dan (3) Selain mencapai keseimbangan daya, hal yang harus dilakukan dalam simulasi kasus ini adalah untuk menghasilkan *supply* tegangan yang sesuai dengan *load voltage regulation*.

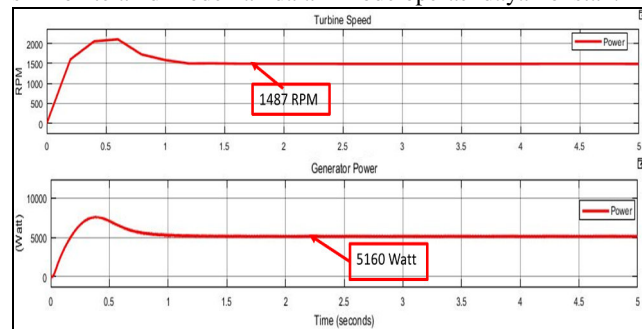


Gambar 8 Iradiasi Matahari Skenario Pertama



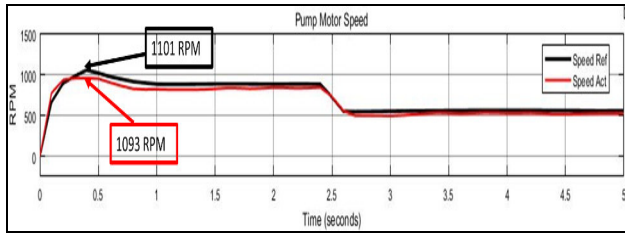
Gambar 9 Kebutuhan Daya Beban Skenario Pertama

Hasil simulasi generator sinkron dan kecepatan putar turbin air kaplan dapat dilihat pada Gambar 10. Dapat dilihat bahwa generator menghasilkan daya dengan nilai 5160 Watt secara konstan. Hal ini membuktikan bahwa generator sinkron telah dimodelkan dalam mode operasi daya konstan.

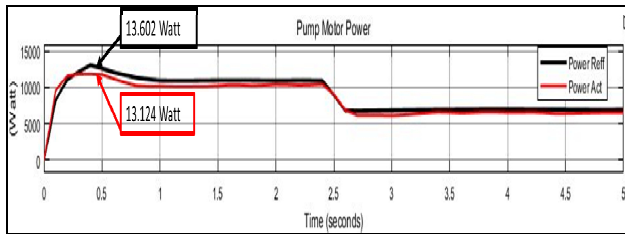


Gambar 10 Hasil Simulasi Kecepatan Putar Turbin dan Daya Generator Skenario Pertama

Dari hasil simulasi kecepatan motor induksi pada Gambar 11 dapat diamati bahwa kecepatan aktual motor akan mengikuti kecepatan referensi dari motor tersebut. Kecepatan referensi motor induksi didapatkan dengan mekanisme sesuai dengan Gambar 3. Kontrol kecepatan motor tersebut akan memengaruhi daya motor induksi yang ditunjukkan pada Gambar 12. Gambar 12 menunjukkan bahwa daya motor akan mengikuti daya referensi motor tersebut. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kontrol kecepatan *V/F* konstan dapat bekerja dengan baik pada skenario ini.

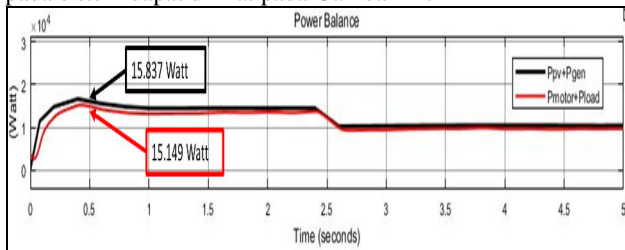


Gambar 11 Hasil Simulasi Kecepatan Referensi dan Kecepatan Aktual Motor Skenario Pertama

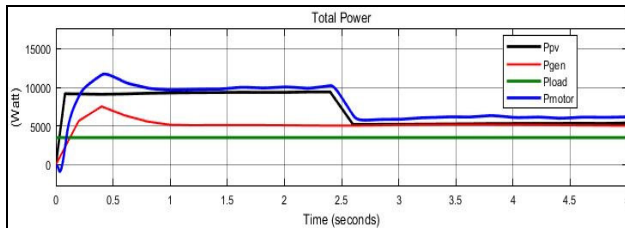


Gambar 12 Hasil Simulasi Daya Referensi dan Aktual Motor Skenario Pertama

Hasil simulasi kontrol *power balance* pada skenario ini dapat dilihat pada Gambar 13. Hal ini membuktikan bahwa ketika motor dapat beroperasi secara presisi sesuai kelebihan daya yang mengalir pada sistem, maka kondisi *power balance* dapat tercapai. Untuk mengamati total daya yang mengalir pada sistem dapat dilihat pada Gambar 14.

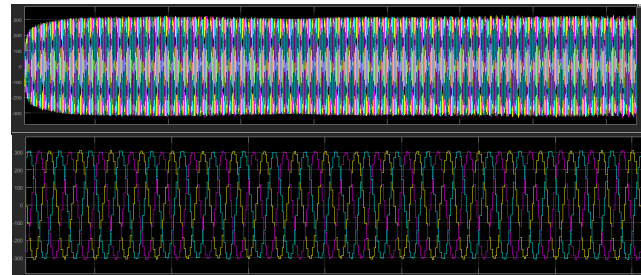


Gambar 13 Hasil Simulasi Kontrol *Power Balance* Skenario Pertama

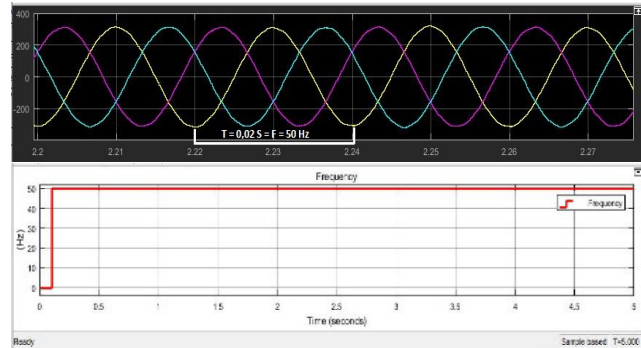


Gambar 14 Hasil Simulasi Total Aliran daya Skenario Pertama

Untuk mengamati kinerja *controller* aliran daya dapat dilihat pada hasil simulasi tegangan *output* sistem pada Gambar 15 dan Gambar 16. Dari hasil simulasi tersebut dapat diamati bahwa sistem dapat menghasilkan daya dengan tegangan sesuai *load voltage regulation* yaitu 220 V_{rms} dengan frekuensi 50 Hz secara konstan. Hal ini membuktikan bahwa *controller* aliran daya dengan menggunakan metode *Voltage Controlled SPWM VSI 3 Fasa* dapat bekerja secara optimal.

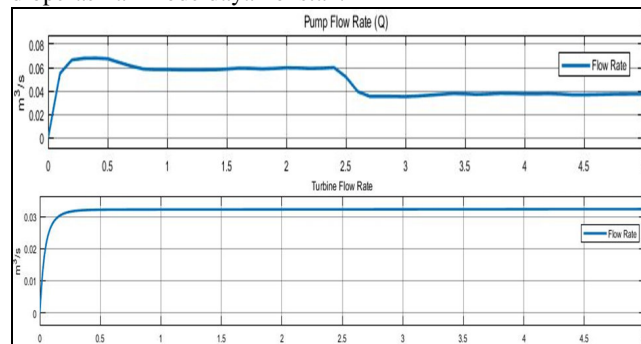


Gambar 15 Hasil Simulasi Tegangan *Output* Sistem (V_{load}) Skenario Pertama



Gambar 16 Frekuensi Tegangan Output Sistem Skenario Pertama

Hasil simulasi pada sisi *water storage* dapat dilihat pada Gambar 17. Dapat diamati bahwa kecepatan motor pompa berbanding lurus dengan nilai debit air yang terpompa dari LR ke UR (*Pump flow rate*). Sedangkan debit air dari UR yang menuju turbin (*Turbine flow rate*) dimodelkan konstan dengan nilai 0,039 m³/s sesuai dengan generator yang dioperasikan mode daya konstan.

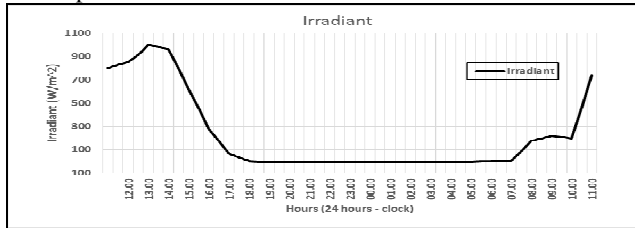


Gambar 17 Hasil simulasi *pump flow rate* dan *turbine flow rate*

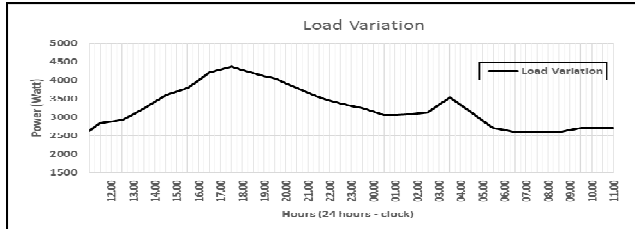
C. Simulasi kondisi iradiasi matahari berubah, dan kebutuhan daya beban berubah

Skenario kedua pengujian *controller* aliran daya pada penelitian ini adalah skenario ketika kondisi iradiasi matahari dan kebutuhan daya beban berubah Pada skenario ini, akan simulasikan seperti kondisi nyata dalam waktu sehari (24 jam) dengan waktu simulasi 5 detik, maka konversi dari waktu simulasi adalah $t = 0,2s/jam$ aktual. Pemodelan iradiasi matahari dan kebutuhan daya beban dapat dilihat pada Gambar

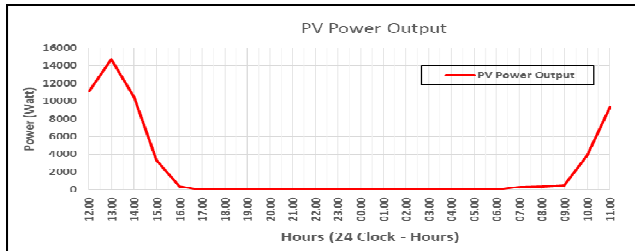
18 dan Gambar 19. Daya *output* PV pada skenario 2 dapat dilihat pada Gambar 20



Gambar 18 Iradiasi Matahari Skenario Kedua

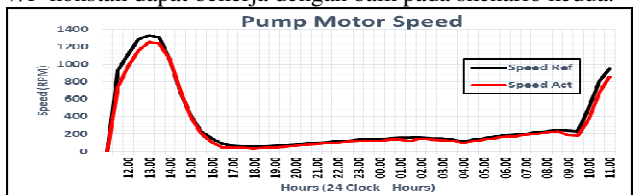


Gambar 19 Kebutuhan Daya Beban Skenario Kedua

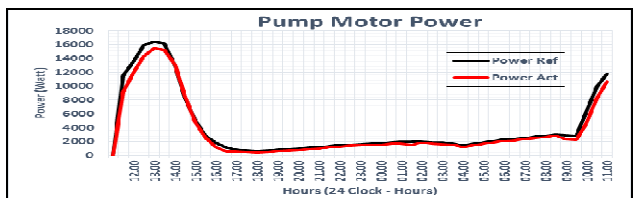


Gambar 20 Hasil Simulasi Daya Output PV

Hasil simulasi kecepatan motor induksi dapat dilihat pada Gambar 21. Kecepatan aktual motor akan mengikuti kecepatan referensi dari motor tersebut. Gambar 22 menunjukkan bahwa daya motor akan mengikuti daya referensi motor tersebut. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kontrol kecepatan *V/F* konstan dapat bekerja dengan baik pada skenario kedua.

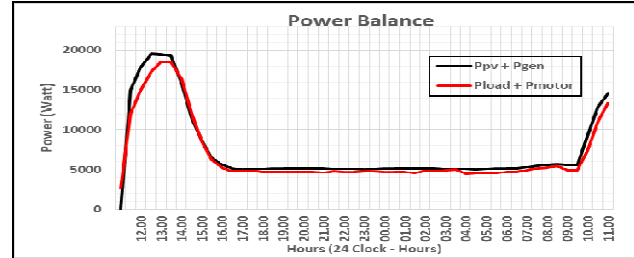


Gambar 21 Hasil simulasi kecepatan referensi dan kecepatan aktual motor skenario kedua

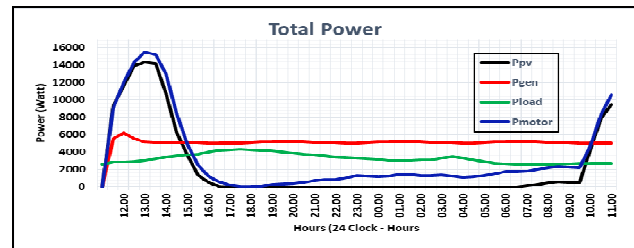


Gambar 22 Hasil simulasi daya referensi dan daya aktual motor skenario kedua

Dari hasil simulasi kontrol *power balance* pada Gambar 23 dapat diamati bahwa kondisi keseimbangan daya (*power balance*) pada skenario kedua dapat tercapai. Total aliran daya yang mengalir pada sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 24

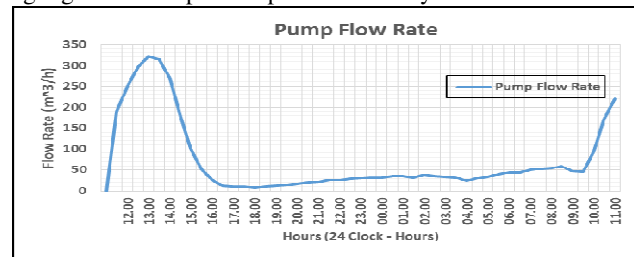


Gambar 23 Hasil Simulasi Kontrol *Power Balance* skenario kedua

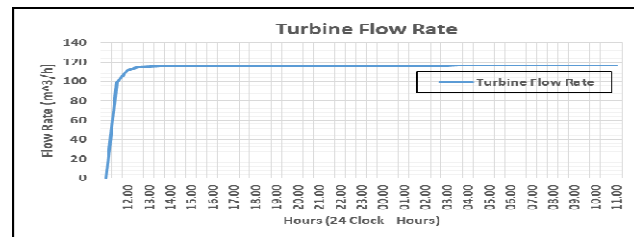


Gambar 24 Hasil Simulasi Total Aliran Daya skenario kedua

Hasil simulasi *pump flow rate* dan *turbine flow rate* dapat dilihat pada Gambar 25 dan Gambar 26. Skenario ini menggunakan simulasi waktu aktual 24 jam. Sehingga debit air hasil simulasi menggunakan satuan m^3/s agar mempermudah perhitungan. Dapat diamati pada Gambar nilai *pump flow rate* akan berbanding lurus dengan kecepatan motor pompa. Untuk nilai *turbine flow rate* dapat diamati bahwa memiliki nilai konstan $119,35 m^3/s$. Hal ini digunakan agar generator dapat beroperasi mode daya konstan

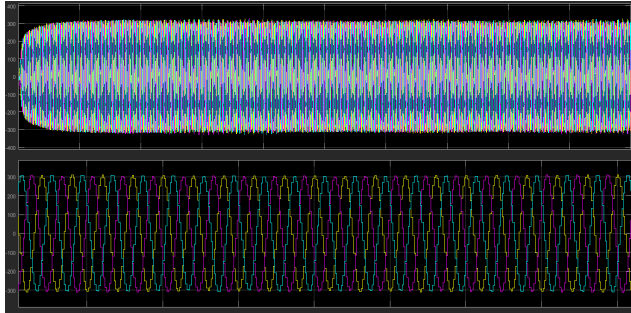


Gambar 25 Hasil Simulasi *Pump Flow Rate* skenario kedua

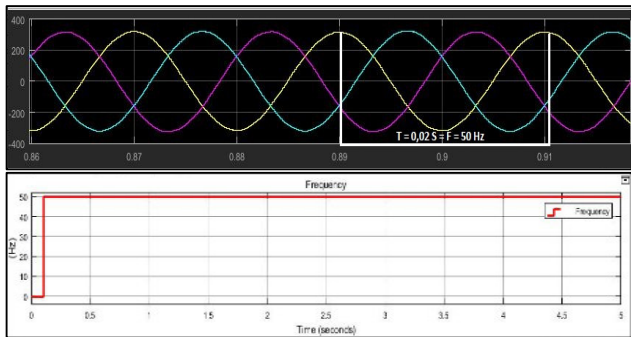


Gambar 26 Hasil Simulasi *Turbine Flow Rate* skenario kedua

Dari hasil simulasi tegangan pada Gambar 27 dan Gambar 28 dapat diamati bahwa sistem dapat menghasilkan daya dengan tegangan sesuai *load voltage regulation* yaitu 220 V_{rms} dengan frekuensi 50 Hz secara konstan. Hal ini membuktikan bahwa *controller* aliran daya dengan menggunakan metode *Voltage Controlled SPWM VSI 3 Fasa* dapat bekerja secara optimal



Gambar 27 Hasil Simulasi Tegangan Output Sistem (V_{load}) Skenario Kedua



Gambar 28 Frekuensi Tegangan Output Sistem Skenario Kedua

IV. KESIMPULAN.

Hasil simulasi sistem PLTS mandiri dengan mekanisme penyimpanan energi *water pumped energy storage* (WPES) dapat menghasilkan tegangan mengalir ke beban dengan nilai nilai 220 Volt / 50 Hz secara kontinu. Hal ini dicapai dengan menggunakan alat elektronika daya seperti *rectifier* dan *inverter* yang dilengkapi dengan mekanisme kontrol *closed loop*. Kapasitor senilai **110,9 μF** dan induktor sebesar **17,12 mH** yang didapatkan dari perhitungan dapat digunakan untuk meredam harmonisa tegangan *output inverter* menjadi < 5% THD (*Total Harmonic Distortion*). Kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa dengan teknik *V/F* konstan pada sistem ini dapat bekerja dengan baik mengikuti kecepatan referensi yang berubah – ubah sesuai dengan perhitungan sehingga daya motor induksi fasa tidak akan melebihi ketersediaan daya yang mengalir dalam sistem ini dan membuat kondisi keseimbangan daya tercapai. Sistem PLTS mandiri dengan mekanisme penyimpanan energi *water pumped energy storage* (WPES) dapat diterapkan sebagai pembangkit listrik energi terbarukan yang efektif. Saran untuk penelitian selanjutnya

adalah diharapkan untuk menentukan *sizing* dari masing – masing komponen yang ada di sistem ini. Hal ini bertujuan untuk membuat sistem ini dapat menjalankan perannya sebagai pembangkit listrik energi terbarukan yang bersifat *continuous*.

V. DAFTAR PUSTAKA.

- [1] A. A. Jamali, N. M. Nor, and T. Ibrahim, “Energy storage systems and their sizing techniques in power system — A review,” in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, Johor Bahru, Oct. 2015, pp. 215–220, doi: 10.1109/CENCON.2015.7409542.
- [2] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, “Feasibility study and economic analysis of pumped hydro storage and battery storage for a renewable energy powered island,” *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 387–397, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.047.
- [3] 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.
- [4] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, 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.
- [5] J. Margeta and Z. Glasnovic, “Theoretical settings of photovoltaic-hydro energy system for sustainable energy production,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 3, pp. 972–982, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.solener.2012.01.007.
- [6] “G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC., 2004.”
- [7] Luknanto, D. (2013). *Bangunan Tenaga Air*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta. .
- [8] Chapman, Stephen J. *Electric Machinery Fundamentals*. New York :McGraw-Hill, 2012. .
- [9] Krause, P.C., O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE® Press, 2002. .
- [10] “Csaba SZABÓ, Maria IMECS, Ioan Iov INCZE, ‘VOLT-HERTZ CONTROL OF THE SYNCHRONOUS MOTOR WITH RAMP EXCITING VOLTAGE’, annual of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 30, 2006.” .
- [11] M. Ashari, *Sistem Konverter AC*. Surabaya: ITS PRESS, 2015. .