

Desain dan Implementasi Algoritma Korelasi Daya dan Tegangan di Kapasitor untuk *Maximum Power Point Tracking* pada *Photovoltaic* Menggunakan Arduino Uno

Leonardus Heru Pratomo¹ dan Slamet Riyadi²

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Soegijapranata
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Bendan Duwur, Semarang, 50234, Indonesia
leonardus@unika.ac.id¹, riyadi@unika.ac.id²

Abstract— *Photovoltaic is a main device in solar power generation systems. The performance of this component needs to be improved to get the maximum power point. Many methods for maximizing power in photovoltaic have been developed and implemented in various algorithms. In fact, the algorithm has a lot of complexity and it requires a signal processing system that has a high speed and expensive one in the implementation. To overcome this problem, an algorithm based on power and voltage correlation in the capacitors is developed to get maximum power. If the voltage across the capacitor is controlled according to the maximum power point voltage (V_{MPP}), the maximum power (P_{MPP}) value would be achieved. This concept is verified through computational simulations and a voltage control algorithm would be implemented using the Arduino Uno microcontroller for the final verification. The efficiency of the simulation is 99.88%–99.92% and an experimental is 92.84%–94.78%.*

Keywords— *photovoltaic, power, voltage, Arduino Uno*

Abstrak— *Photovoltaic merupakan komponen utama dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Komponen ini perlu ditingkatkan kinerjanya untuk memperoleh daya yang maksimal. Metode untuk memaksimalkan daya pada photovoltaic banyak dikembangkan dan diimplementasikan dengan berbagai algoritma. Kenyataannya algoritma yang dikembangkan memiliki kecenderungan yang rumit sehingga dalam implementasi membutuhkan sistem pengolah sinyal yang memiliki kecepatan tinggi dan mahal. Untuk mengatasi hal itu dikembangkan algoritma berbasis korelasi daya dan tegangan pada kapasitor untuk mendapatkan daya maksimal. Jika tegangan di kapasitor dikendalikan sesuai dengan tegangan *maximum power point* (V_{MPP}), maka akan didapatkan nilai daya *maximum power point* (P_{MPP}). Konsep ini diverifikasi melalui simulasi komputasi dan sebagai tahap akhir dilakukan eksperimen algoritma kendali tegangan yang diimplementasikan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Berdasarkan simulasi algoritma ini memiliki efisiensi sebesar 99,88%–99,92% dan eksperimental sebesar 92,84%–94,78%.*

Kata kunci— *photovoltaic, daya, tegangan, Arduino Uno*

I. PENDAHULUAN

Energi surya banyak didapatkan di Indonesia tetapi pemanfaatannya belum maksimal. *Photovoltaic* (PV) merupakan alat konversi energi dari sinar matahari ke energi listrik dan pada aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mutlak membutuhkan perangkat ini. PV pada kondisi sekarang ini dijual dengan harga yang mahal, sehingga pemanfaatannya harus maksimal. Untuk membuat maksimal PV harus diintegrasikan dengan suatu konverter daya yang beralgoritma kurva daya maksimal, dengan demikian untuk memanfaatkan PV diperlukan penanganan yang khusus.

Beberapa penelitian untuk mendapatkan nilai daya maksimal telah dilakukan dengan algoritma *fractional open voltage* dan *fractional short circuit*, tetapi sistem dengan kendali ini memiliki efisiensi yang rendah [1], [2].

Perturbation and Observation (P&O) memiliki efisiensi yang baik akan tetapi algoritma ini tergantung dari penambahan dan pengurangan suatu siklus kerja, sehingga jika siklus kerja semakin besar maka nilai daya maksimal akan segera didapatkan akan tetapi nilai puncak daya maksimal akan kurang tercapai dengan baik. Jika nilai siklus kerja kecil maka nilai daya maksimal akan sangat baik namun untuk mendapatkannya akan lama tercapai. Sistem ini juga sering kali terjadi osilasi di daerah nilai daya maksimum [3] – [11]. Algoritma *Ripple Correlation Control* (RCC) merupakan suatu pengendali dengan menggunakan konsep riak arus dan riak tegangan. Algoritma RCC digunakan untuk memastikan bahwa riak akan berada pada nilai daya maksimum. Algoritma RCC berkorelasi terhadap turunan daya dari PV dengan turunan arus dan tegangan yang memiliki *gradient* nol, teknik ini memiliki

algoritma yang relatif lebih sulit walaupun hasilnya sangat memuaskan [11] – [16].

Algoritma *Incremental Conductance* merupakan suatu algoritma untuk mendapatkan daya maksimal dengan cara mendeteksi tegangan dan arus. Suatu lereng tegangan dan lereng arus akan bertemu pada dan pada nilai inilah titik daya maksimal terjadi. Algoritma *Incremental Conductance* didasarkan dapat kurva karakteristik PV dengan pembacaan nilai tegangan, arus dan atau daya. Algoritma *Incremental Conductance* pada prinsipnya memiliki empat buah jenis yaitu dengan nama *Incremental Conductance Transconductance*, *Current Control*, *Voltage Control*, dan *Admittance Control*. Secara prinsip algoritma *Incremental Conductance* memiliki hasil yang sangat baik karena langsung menuju titik maksimal [17] – [23]. Secara implementasi algoritma *Incremental Conductance* akan lebih baik menggunakan sistem digital berbasis mikrokontroler yang memiliki fasilitas sistem pemrosesan sinyal yang cepat akan tetapi sistem dengan pemrosesan sinyal yang cepat akan memiliki harga yang mahal [20]. Teknik untuk penyelesaian algoritma daya maksimal dapat dilakukan dengan beberapa konsep kendali antara lain *Proportional Integral Controller* dan yang lebih modern menggunakan teknik *fuzzy logic* dan *neural network*. Sistem ini terbukti dapat berkerja dengan baik, akan tetapi sistem alogaritma secara keseluruhan akan menjadi sangat kompleks dan sulit serta harus diimplementasikan pada sistem pengolah sinyal yang memadai [14] – [16], [20], [24] – [27].

Tujuan dari penelitian ini adalah menawarkan konsep algoritma lain sebagai salah satu solusi alternatif untuk menyelesaikan masalah yaitu dengan menggunakan konsep korelasi daya dan tegangan pada kapasitor untuk mendapatkan nilai daya maksimal pada PV. Konsep ini sangat sederhana dan hanya membutuhkan satu buah sensor tegangan. Tegangan yang dikendalikan merupakan tegangan pada saat tegangan pada daya maksimal. Algoritma ini diintegrasikan ke dalam suatu kendali *hysteresis* untuk memastikan tegangan di kapasitor selalu sama dengan tegangan pada daya maksimal, secara detail diuraikan pada bagian II. Sebagai verifikasi dari konsep tersebut dilakukan simulasi komputasi dan sebagai tahap akhir dilakukan pengujian di laboratorium, secara detail diuraikan pada bagian III. Suatu konverter DC-DC tipe *buck-boost* dipilih dan diintegrasikan dengan mikrokontroler Arduino Uno sebagai purwarupa yang diimplementasikan sebagai bahan uji.

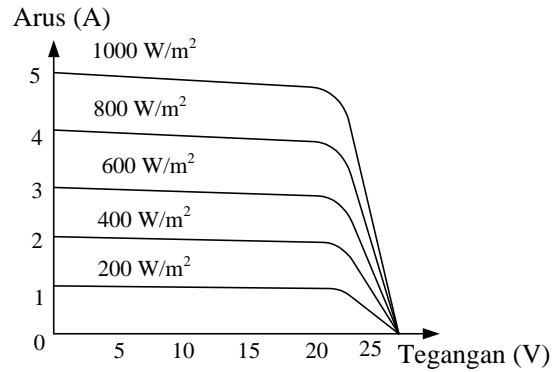
II. METODE

PV merupakan komponen utama dalam PLTS, energi sinar matahari dalam *irradiance* akan diterima oleh PV kemudian dikonversikan ke energi listrik. PV memiliki kurva karakteristik arus terhadap tegangan seperti pada Gambar 1. Jika besarnya tegangan dikalikan dengan besarnya arus akan didapatkan besaran daya, berdasarkan konsep ini didapatkan kurva karakteristik PV daya terhadap tegangan seperti pada Gambar 2.

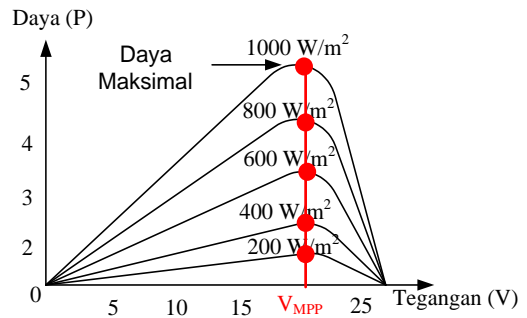
Kurva karakteristik pembebanan suatu PV terlihat seperti pada Gambar 3, hanya daya maksimal akan dapat terjadi jika nilai beban berada pada beban maksimal (R_{MPP}). Berdasarkan

kurva karakteristik ini, maka dibutuhkan sistem penyesuai beban yang diimplementasikan dengan konverter DC-DC.

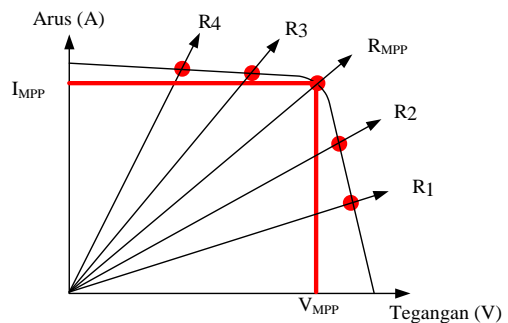
Konverter elektronika daya DC-DC terdiri dari tiga jenis yaitu konverter *buck (step down)*, konverter *boost (step up)*, dan konverter *buck-boost (step up-down)*. Untuk mendapatkan kinerja yang lebar maka digunakan sistem konverter DC-DC tipe *buck-boost* seperti pada Gambar 4.



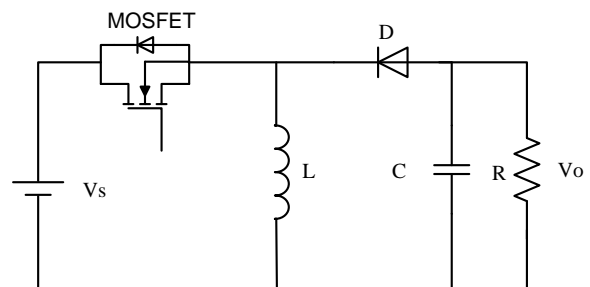
Gambar 1. Kurva karakteristik arus terhadap tegangan



Gambar 2. Kurva karakteristik daya terhadap tegangan



Gambar 3. Kurva pembebanan PV



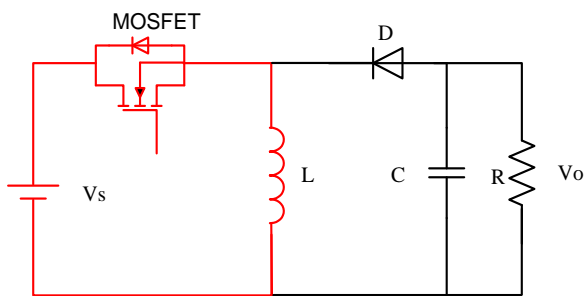
Gambar 4. Rangkaian daya konverter DC-DC tipe *buck-boost*

Pada saat saklar (*MOSFET*) konduksi, maka arus dari sumber tegangan (V_s) mengalir ke induktor (L) dan kembali ke sumber melalui saklar daya seperti pada Gambar 5. Pada kondisi ini energi akan diserap oleh induktor (L) sehingga besarnya tegangan di induktor (L) akan sama dengan tegangan sumber. Pada mode operasi ini akan berlaku persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_L &= V_s \\ L \frac{di}{dt} &= V_s \\ L di &= V_s dt \end{aligned}$$

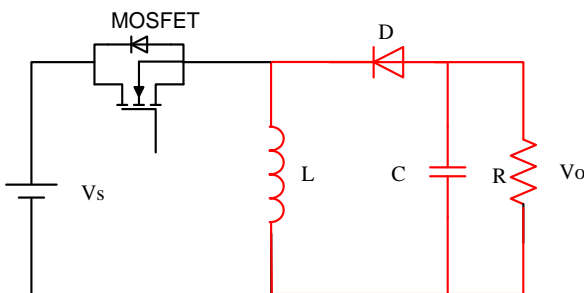
Sehingga didapatkan persamaan selama waktu konduksi sebagai berikut:

$$L di = V_s t_{on} \quad (1)$$



Gambar 5. Saat saklar daya konduksi

Saat saklar tidak konduksi: sumber tidak akan terhubung ke beban, arus mengalir dari induktor (L) ke beban (R) dan kapasitor (C) kemudian kembali melalui diode *freewheeling* (D). Pada kondisi ini energi yang tersimpan pada induktor L akan dilepas sehingga arus induktor (L) akan turun (berkurang) seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Saat saklar daya tidak konduksi

Persamaan pada saat saklar daya tidak konduksi didapatkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_L &= V_o \\ L \frac{di}{dt} &= V_o \\ L di &= V_o dt \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan persamaan selama waktu tidak konduksi sebagai berikut:

$$L di = V_o t_{off} \quad (2)$$

Jika persamaan (1) dan (2) dieliminasi, maka diperoleh:

$$\begin{aligned} (V_o) t_{off} &= V_s t_{on} \\ (V_s) t_{on} &= V_o (T - t_{on}) \\ \frac{V_o}{V_s} &= \frac{t_{on}}{T - t_{on}} \\ \frac{V_o}{V_s} &= \frac{d}{1-d} \end{aligned} \quad (3)$$

Dengan mengingat hukum kesamaan daya pada sisi keluaran dan masukan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$P_o = V_o I_o \quad (4)$$

$$P_s = V_s I_s \quad (5)$$

Jika arus keluaran rata-rata I_o , maka dengan beban sebesar R_{Out} akan didapatkan nilai:

$$\frac{V_o}{R_{Out}} = I_o \quad (6)$$

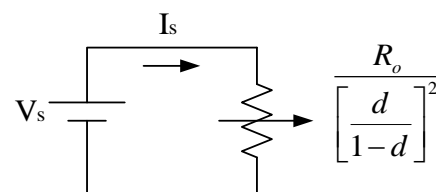
Jika arus masukan rata-rata I_s , maka dengan beban sebesar R_s akan didapatkan nilai:

$$\frac{V_s}{R_s} = I_s \quad (7)$$

Dengan memperhatikan hukum kesetaraan daya maka dapat diperoleh suatu persamaan:

$$\begin{aligned} V_s I_s &= V_o I_o \\ V_s \frac{V_s}{R_s} &= V_o \frac{V_o}{R_o} \\ \left[\frac{d}{1-d} \right]^2 &= R_s \end{aligned} \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan (8) rangkaian daya konverter DC-DC tipe *buck-boost* dapat digunakan sebagai penyesuai beban dengan cara mengatur nilai siklus kerjanya (d), berikut ini rangkaian ekuivalen konverter DC-DC tipe *buck-boost* seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian ekuivalen konverter DC-DC tipe *step up-down*

Pada Gambar 4, sumber tegangan DC digantikan dengan PV, maka pada implementasi ini harus dipasang kapasitor untuk menjaga tegangan yang konstan. Berdasarkan konsep ini dimungkinkan untuk mengendalikan tegangan keluaran PV lewat tegangan di kapasitor untuk mendapatkan daya maksimal PV. Kenyataannya tegangan di kapasitor memiliki hubungan dengan daya, artinya dengan mengendalikan tegangan di kapasitor, maka daya juga dikendalikan [28]. Penurunan tegangan di kapasitor pada sisi tegangan searah PV menunjukkan adanya pemberian daya nyata ke konverter DC-DC sedangkan jika tegangan kapasitor naik, maka terjadi penyerapan daya ke konverter DC-DC. Sehingga untuk

menjamin pemberian dan penyerapan daya, maka tegangan kapasitor harus dijaga konstan. Tegangan kapasitor akan berfluktuasi pada nilai tegangan tertentu (V) maka energi (W_{kap}) yang diberikan atau diserap oleh kapasitor sebesar pada keadaan stabil sebesar:

$$W_{Kap} = \frac{1}{2} C(V)^2 \tag{9}$$

Berdasarkan (9), dapat diperoleh hubungan antara W_{kap} yang tersimpan dalam kapasitor dengan besaran daya kapasitor (P) sebesar:

$$P = \frac{dW}{dt}$$

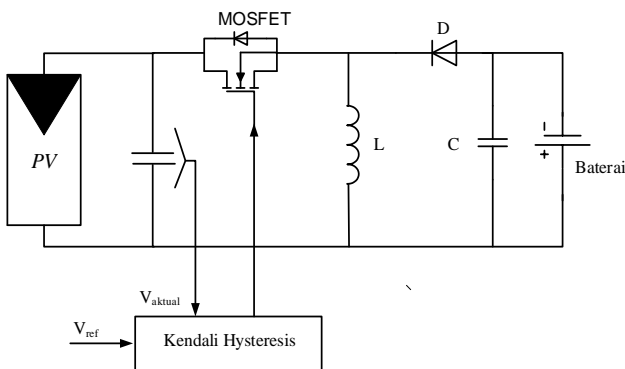
$$P = \frac{d \left(\frac{1}{2} CV^2 \right)}{dt}$$

$$P = CV \left(t \frac{d(V)}{dt} \right) \tag{10}$$

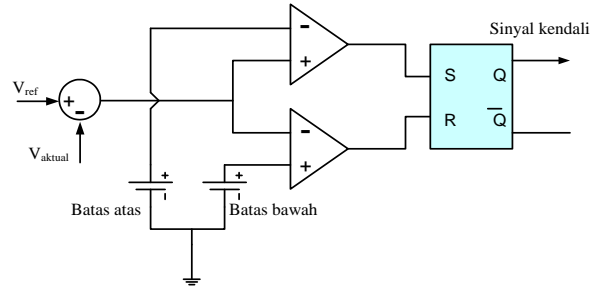
Berdasarkan (10), dengan menjaga nilai tegangan pada keadaan konstan, maka daya juga akan terjaga. Penentuan nilai referensi (V_{MPP}) didasarkan pada Gambar 4, dengan demikian akan didapatkan nilai daya maksimal.

Berdasarkan uraian diatas dapat dibuat skema rangkaian untuk mendapatkan konsep daya maksimal berdasarkan pengendalian tegangan di kapasitor dengan beban baterai, seperti pada Gambar 8. Sistem kendali *hysteresis* diterapkan untuk mengendalikan tegangan pada kapasitor, berikut ini adalah konsep kendali *hysteresis* yang dipakai, seperti pada Gambar 9.

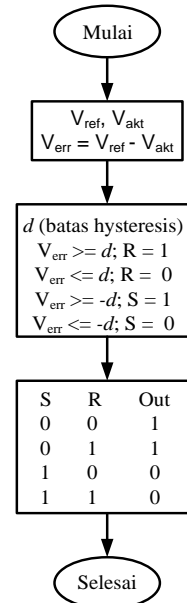
Secara lebih detail, kendali *hysteresis* dapat diuraikan berbagai berikut: tegangan referensi (V_{MPP}) dibandingkan dengan tegangan actual dikenal dengan nama deteksi sinyal kesalahan. Sinyal ini akan dikendalikan pada tegangan batas atas dan batas bawah yang dikenal dengan nama pita *hysteresis*. Sinyal keluaran ini akan menjadi masukan sebuah *flip-flop Set-Reset* yang akan mengendalikan saklar daya, seperti terlihat pada Gambar 9. Kendali *hysteresis* tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam suatu *flowchart* algoritma pemrograman, seperti pada Gambar 10.



Gambar 8. Rangkaian konverter DC-DC tipe *step up-down* dengan kendali *hysteresis* untuk mendapatkan daya maksimal



Gambar 9. Rangkaian kendali *hysteresis*



Gambar 10. *Flowchart* algoritma kendali *hysteresis*

Berdasarkan Gambar 10, dapat dilakukan suatu pemrograman perangkat lunak dengan menggunakan *arduino IDE*. Dimana V_{ref} adalah tegangan referensi, V_{akt} adalah tegangan actual, dan V_{err} adalah tegangan *error*. Tegangan referensi di *setting* sebesar tegangan V_{MPP} yang didapatkan pada name plate PV yang masuk pin 2, sedangkan tegangan actual adalah tegangan keluaran dari sensor tegangan yang masuk pin 1. Batas atas dan batas bawah pita *hysteresis* di *setting* sebesar 0,001. Program ini untuk mengimplementasi algoritma (10) dalam pemrograman perangkat lunak *arduino IDE*.

Secara umum nilai efisiensi didapatkan dengan cara sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \tag{11}$$

dimana efisiensi algoritma adalah daya keluaran PV dibandingkan dengan daya masukan PV sedangkan efisiensi konverter adalah daya keluaran konverter dibandingkan dengan daya keluaran PV.

Sehingga *flowchart* algoritma kendali *hysteresis* dapat diterjemahkan ke dalam bahasa pemrograman sebagai berikut:

```
int Vref, Vact, Verr, a, d, R, S;
void setup()
{
  pinMode(1,INPUT); →(Tegangan  $V_{MPP}$ )
  pinMode(2,INPUT); →(Tegangan Kapasitor)
  pinMode(3,OUTPUT); →(Saklar daya)
}
void loop()
{
  a=analogRead(A0)/4;
  //a=128;
  OCR0B=a;
  Serial.println(a);

  while (1)
  {
    digitalWrite(1,Vref);
    digitalWrite(2,Vact);

    Verr=Vref-Vact;

    b=0.001; →pita hysteresis

    if(er>=b)
    {
      R=1;
    }
    if(er<=b)
    {
      R=0;
    }
    if(er<=-b)
    {
      S=0;
    }
    if(er>=-b)
    {
      S=1;
    }
  }
  if(R==1 & S==0)
  {
    digitalWrite(3,1);
  }
  if(R==0 & S==0)
  {
    digitalWrite(3,1);
  }
  if(R==0 & S==1)
  {
    digitalWrite(3,0);
  }
  if(R==1 & S==1)
  {
    digitalWrite(3,0);
  }
}
}
```

Pembentukan logika hysteresis

Logika SR Flip-flop

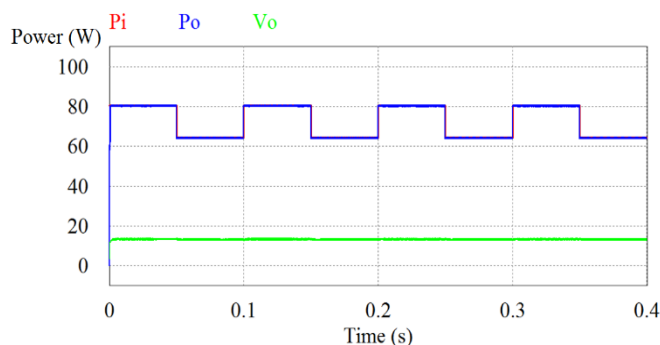
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis yang telah diuraikan, dibuatlah suatu simulasi komputasi dengan bantuan perangkat lunak Power Simulator dan implementasi purwarupa untuk memastikan bahwa konsep yang diteliti berjalan dengan baik dengan menggunakan parameter seperti pada Tabel I.

TABEL I. PARAMETER SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

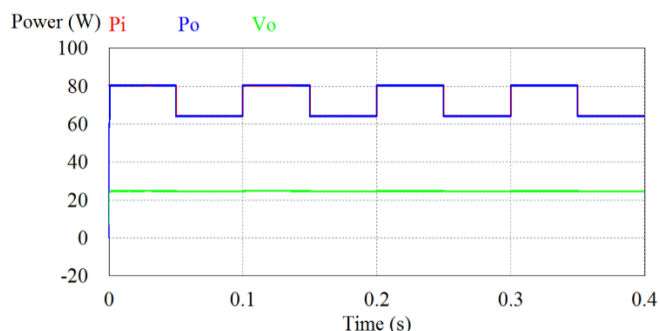
Parameter	Nilai
PV	80 WP
Induktor	1,5 mH
Kapasitor	100uF
Baterai	12 Volt dan 24 Volt
MOSFET	IRFP460

Tahap pertama simulasi dilakukan dengan beban baterai sebesar 12 Volt pada kondisi perubahan *irradiance* 1000W/m^2 menuju ke 800W/m^2 , terlihat seperti pada Gambar 11. Daya maksimal dapat terbukti dapat selalu tercapai dengan baik (P_o akan selalu mengikuti P_i) dan mampu mengisi baterai dengan baik sebesar 12 Volt (V_o). Nilai efisiensi algoritma ini sebesar 99,92%.



Gambar 11. Hasil simulasi dengan beban baterai 12 Volt

Pengujian yang kedua dilakukan dengan menggunakan beban baterai sebesar 24 Volt pada kondisi perubahan *irradiance* 1000W/m^2 menuju ke 800W/m^2 , terlihat seperti pada Gambar 12. Daya maksimal dapat terbukti dapat selalu tercapai dengan baik (P_o akan selalu mengikuti P_i) dan mampu mengisi baterai dengan baik sebesar 24 Volt (V_o). Nilai efisiensi algoritma ini sebesar 99,88%



Gambar 12. Hasil simulasi dengan beban baterai 24 Volt

Implementasi purwarupa dilakukan guna memastikan sistem yang dirancang dapat bekerja dengan baik. Arduino Uno digunakan sebagai pengendali *hysteresis* yang telah dirancang, sedangkan *solar power meter* model: SPM-1116SD digunakan sebagai alat ukur *irradiance* dan Multimeter *True RMS* Sanwa model RD 701 digunakan sebagai alat ukur arus dan tegangan. Karena fluktuasi perubahan *irradiance* terlalu lambat, maka dilakukan pengujian berdasarkan perubahan waktu terhadap *irradiance* untuk mendapatkan kinerja purwarupa yang telah

diimplementasi. Tahap pertama dilakukan pengujian dengan beban baterai sebesar 12 Volt dan tahap kedua dilakukan pengujian dengan baterai sebesar 24 Volt. Tabel II menunjukkan data *nameplate* PV Sharp 80 WP yang digunakan sebagai bahan ujicoba di laboratorium. Daya keluaran PV ($P_{IN\ PV}$) sebagai fungsi *irradiance* didapatkan dengan cara sebagai berikut:

$$\frac{Irr(\text{terukur})}{1000 \text{ W/m}^2} \times \text{Daya nameplate} \quad (12)$$

TABEL II. DATA NAMEPLATE PV

Parameter	Nilai
P_{Max}	80 WP
V_{MPP}	17,3 V
I_{MPP}	4,63 A
V_{OC}	21,6V
I_{SC}	5,15 A

Berdasarkan pengujian beban baterai sebesar 12 Volt didapatkan data seperti terlihat pada Tabel III. Daya yang mampu dikeluarkan PV sebagai fungsi *irradiance* ($P_{IN\ PV}$) memiliki nilai rata-rata sebesar 72,32 Watt. Konsep ini dapat dikatakan berhasil terlihat pada besarnya tegangan dikapasitor ($V_{C\ PV}$) yang memiliki nilai rata-rata sebesar 17,296 Volt berada mendekati nilai V_{MPP} sebesar 17,3 Volt. Konsep algoritma pengendalian tegangan di kapasitor memiliki daya keluaran ($P_{O\ PV}$) sebesar tegangan di kapasitor ($V_{C\ PV}$) dikalikan dengan arus keluaran PV ($I_{O\ PV}$) [29], [30], pada ujicoba ini mendapatkan nilai rata-rata sebesar 68,55 Watt. Efisiensi algoritma pengendalian tegangan di kapasitor didapatkan dengan cara $\{(P_{O\ PV}) / (P_{IN\ PV})\} \times 100\%$, didapatkan nilai rata-rata sebesar 94,78 %.

Berdasarkan pengujian beban baterai sebesar 24 Volt didapatkan data seperti terlihat pada Tabel IV. Daya yang mampu dikeluarkan PV sebagai fungsi *irradiance* memiliki nilai rata-rata sebesar 71,84 Watt. Besarnya tegangan di kapasitor ($V_{C\ PV}$) yang memiliki nilai rata-rata sebesar 17,299 Volt berada mendekati nilai V_{MPP} sebesar 17,3 Volt. Konsep algoritma pengendalian tegangan di kapasitor memiliki daya keluaran rata-rata sebesar 66,70 Watt. Efisiensi algoritma pengendalian tegangan di kapasitor didapatkan nilai rata-rata sebesar 92,84 %.

TABEL III. PENGUJIAN ALGORITMA DENGAN BATERAI 12 VOLT

No	Irradiance (W/m2)	$P_{IN\ PV}$ (W)	$V_{C\ PV}$ (V)	I_{OPV} (A)	$P_{O\ PV}$ (W)
1.	925	74	17,48	4,04	70,62
2.	910	72,8	17,46	4,01	70,01
3.	920	73,6	17,22	4,01	69,05
4.	935	74,8	17,24	4,04	69,65
5.	920	73,6	17,36	4,04	70,13
6.	905	72,4	17,22	4,04	69,57
7.	915	73,2	17,28	4,02	69,47
8.	870	69,6	17,18	3,84	65,97
9.	850	68,0	17,14	3,71	63,59
10.	890	71,2	17,38	3,88	67,43
Rata-Rata		72,32	17,296	3,963	68,55

TABEL IV. PENGUJIAN ALGORITMA DENGAN BATERAI 24 VOLT

No	Irradiance (W/m2)	$P_{IN\ PV}$ (W)	$V_{C\ PV}$ (V)	I_{OPV} (A)	$P_{O\ PV}$ (W)
1.	910	72,8	17,51	4,01	70,22
2.	900	72,0	17,48	3,91	68,35
3.	920	73,6	17,32	3,86	66,86
4.	935	74,8	17,34	3,84	66,59
5.	920	73,6	17,36	3,84	66,66
6.	860	68,8	17,22	3,81	65,61
7.	865	69,2	17,28	3,92	67,74
8.	870	69,6	17,16	3,84	65,89
9.	910	72,8	17,14	3,71	63,59
10.	890	71,2	17,18	3,81	65,46
Rata-Rata		71,84	17,299	3,855	66,70

TABEL V. PENGUJIAN KONVERTER DC-DC DENGAN BATERAI 12 VOLT

No	$V_{C\ PV}$ (V)	I_{OPV} (A)	$P_{O\ PV}$ (W)	$V_{B\at}$ (V)	$I_{B\at}$ (A)	$P_{B\at}$ (W)
1.	17,48	4,04	70,62	13,41	4,52	60,61
2.	17,46	4,01	70,01	13,45	4,56	61,33
3.	17,22	4,01	69,05	13,55	4,48	60,70
4.	17,24	4,04	69,65	13,42	4,46	59,85
5.	17,36	4,04	70,13	13,51	4,45	60,12
6.	17,22	4,04	69,57	13,48	4,46	60,12
7.	17,28	4,02	69,47	13,45	4,32	58,10
8.	17,18	3,84	65,97	13,52	4,24	57,32
9.	17,14	3,71	63,59	13,52	4,38	59,22
10.	17,38	3,88	67,43	13,54	4,36	59,03
Rata-Rata			68,55			59,64

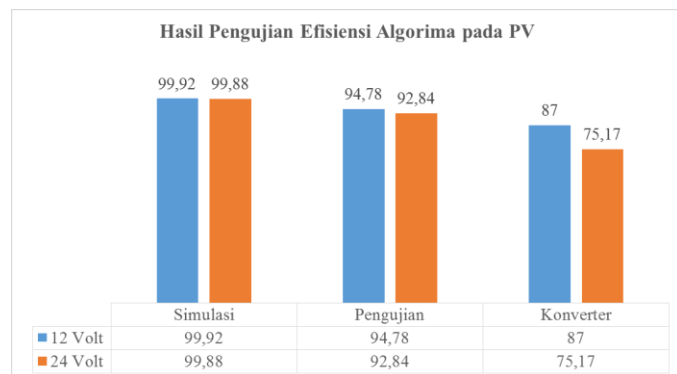
Pada pengujian efisiensi konverter DC-DC *buck-boost* tahap pertama dilakukan pada beban baterai sebesar 12 Volt didapatkan data seperti terlihat pada Tabel V. Daya keluaran yang mampu disimpan pada baterai (P_{Bat}) didapatkan dari hasil perkalian tegangan di baterai (V_{Bat}) dengan arus yang mengalir ke baterai (I_{Bat}) didapatkan nilai rata-rata sebesar 59,64 Watt. Nilai efisiensi konverter DC-DC pada kondisi *step down* didapatkan dengan cara $\{(P_{Bat}) / (P_{O\ PV})\} \times 100\%$ didapatkan nilai rata-rata sebesar 87%.

Pada pengujian efisiensi konverter DC-DC tahap kedua dilakukan pada beban baterai sebesar 24 Volt didapatkan data seperti terlihat pada Tabel VI. Nilai efisiensi konverter DC-DC pada kondisi *step up* didapatkan nilai rata-rata sebesar 75,17%.

TABEL VI. PENGUJIAN KONVERTER DC-DC DENGAN BATERAI 24 VOLT

No	$V_{C\ PV}$ (V)	I_{OPV} (A)	$P_{O\ PV}$ (W)	$V_{R\ PV}$ (V)	I_{OPV} (A)	$P_{O\ PV}$ (W)
1.	17,51	4,01	70,62	26,82	2,12	56,86
2.	17,48	3,91	70,01	26,46	2,08	55,04
3.	17,32	3,86	69,05	26,65	1,86	49,57
4.	17,34	3,84	69,65	26,66	1,88	50,12
5.	17,36	3,84	70,13	26,76	2,11	56,46
6.	17,22	3,81	69,57	26,68	1,86	49,62
7.	17,28	3,92	69,47	26,68	1,68	44,82
8.	17,16	3,84	65,97	26,72	1,66	44,36
9.	17,14	3,71	63,59	26,84	1,74	46,70
10.	17,18	3,81	67,43	26,85	1,78	47,79
Rata-Rata			71,84			50,13

Berdasarkan pengujian Tabel VI didapatkan hasil yang lebih baik dari pada hasil ujicoba yang dilakukan berdasarkan implementasi algoritma *Incremental Conductance Current Control* [29], RCC [30], dan P&O yang efisiensi akan turun jika *irradiance* turun [31]. Berdasarkan ujicoba simulasi dan implementasi algoritma korelasi daya dan tegangan di kapasitor dapat dikategorikan: respon cepat, daya maksimum dapat diraih dengan cepat, diperlukan pengaturan pada V_{MPP} , kompleksitas rendah, dapat diimplementasi secara digital dan berharga murah seperti pada [32] – [35]. Secara detail rekapitulasi hasil pengujian efisiensi dapat terlihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Hasil pengujian efisiensi algoritma pada PV

IV. PENUTUP

Algoritma pengendalian tegangan di kapasitor untuk mendapatkan daya maksimal pada PV terbukti dapat dilakukan. Berdasarkan simulasi dengan perangkat lunak Power Simulator, algoritma ini memiliki efisiensi sebesar 99,92%–99,88%. Pada pengujian purwarupa algoritma ini memiliki nilai efisiensi sebesar 92,84%–94,78%, sedangkan nilai efisiensi konverter sebesar 87% saat dioperasikan sebagai penurun tegangan dan 75,17% saat dioperasikan sebagai penaik tegangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional dalam skema Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi tahun anggaran 2020 dengan Nomor SK: 010/L6/SP2H.1/PENELITIAN/2019.

REFERENSI

[1] A. Anurag, S. Bal, S. Sourav, and M. Nanda, "A review of maximum power-point tracking techniques for photovoltaic systems," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 478-501, May. 2014.

[2] Y. Cheddadi, F. Errahimi, and N. Es-sbai, "Design and verification of photovoltaic MPPT algorithm as an automotive-based embedded software," *Solar Energy*, vol. 171, pp. 414-425, Sep. 2018.

[3] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Trans Power Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 46-54, Jan. 2001.

[4] S. Qin, M. Wang, T. Chen, and X. Yao, "Comparative analysis of incremental conductance and perturb-and-observation to implement MPPT in photovoltaic system," in *Proc. Int. Conf. Electr. Control Eng. IEEE*, 2011, pp. 5792-5795.

[5] W. Yu-xin, Z. Feng-ge, and L. I. Lin-lin, "Research on Single-Variable Current Perturbation Tracking Method for Maximal Power Tracking Control Method of the Solar Power Generation System," *TELKOMNIKA*, vol. 12, no. 2, pp. 899-904, Feb. 2014.

[6] S. Riyadi, "dsPIC33 Based Control for PV-Grid System with a Buck-Boost MPPT," *TELKOMNIKA*, vol. 12, no. 7, pp. 5137-5143, Jul. 2014.

[7] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of Perturb-and-Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications," *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 21-33, Jan. 2012.

[8] M. A. S. Masoum, H. Dehbonei, and E. F. Fuchs, "Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current based maximum power point tracking," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 17, no. 4, pp. 514-522, Dec. 2002.

[9] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4473-4482, Nov. 2009.

[10] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Mater. Solar Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555-1578, Jul. 2006.

[11] F. Liu, Y. Kang, Y. Zhang, and S. Duan, "Comparison of P & O and hill climbing MPPT methods for grid-connected PV generator," in *Proc. 3rd IEEE Conf. Industrial Electron. Application*, 2008, pp. 804-807.

[12] A. S. Deshpande and S. L. Patil, "Performance verification of ripple correlation control for solar PV application," in *Proc. International Conference on Power Electronics*, 2016, pp. 1-5.

[13] T. Esumi, J. W. Kimball, P. T. Krein, P. L. Chapman, and P. Midya, "Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 5, pp. 1282-1291, Sept. 2006.

[14] A. Ziouh, A. Abbou, and S. Marhraoui, "Efficiency of Ripple Correlation Control Compared to Fuzzy Logic MPPT Algorithm in Space Climate Conditions for Nimbus 2 Satellite," in *Proc. International Renewable and Sustainable Energy Conference*, 2017, pp. 1-5.

[15] A. Ziouh, and A. Abbou, "Comparison of two MPPT methods fuzzy logic and ripple correlation control for the application of LED lighting supplied by photovoltaic panels grid," in *Proc. International Renewable and Sustainable Energy Conference, IEEE*, 2016, pp. 1-7.

[16] J. W. Kimball and P. T. Krein, "Discrete-time ripple correlation control for maximum power point tracking," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2353-2362, Sept. 2008.

[17] A. Garrigós, J. M. Blanes, J. A. Carrasco, and J. B. Ejea, "Real time estimation of photovoltaic modules characteristics and its application to maximum power point operation," *Renew Energy*, vol. 32, no. 6, pp. 1059-1076, May. 2007.

[18] M. Calavia, J. M. Perie, J. F. Sanz, and J. Sallán, "Comparison of MPPT strategies for solar modules," in *Proc. Int. Conf. Renewable Energies Power Quality*, 2010, pp. 22-25.

[19] C. Urayai and G. A. J. Amaratunga, "Single-Sensor Maximum Power Point Tracking Algorithms," *IET Renew. Power Generation*, vol. 7, no. 1, pp. 82-88, Feb. 2013.

[20] D. Radianto, G. M. Dousouky, and M. Shoyama, "MPPT Based on Incremental Conductance Fuzzy Logic Algorithm for Photovoltaic System under Variable Climate Conditions," in *Proc. International Telecommunications Energy Conference, IEEE*, 2015, pp. 1-5.

[21] N. E. Zakzouk, M. A. Elsharty, A. K. Abdelsalam, A. A. Helal, and B. W. Williams, "Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 561-574, May 2016.

[22] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu, and Y. Kang, "A variable step size INC MPPT method for PV systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 7, pp. 2622-2628, Jul. 2008.

[23] S. D. Al-Majidi, M. F. Abbod, and H. S. Al-Raweshidy, "A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 31, pp. 14158-14171, Aug. 2018.

[24] U. Yilmaz, A. Kircay, and S. Borekci, "PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 994-1001, Jan. 2018.

- [25] A. Mathew, and A. I. Selvakumar, "New MPPT for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive network," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 21, no. 3, pp. 793–803, Sept. 2006.
- [26] E. Karatepe, and T. Hiyama, "Artificial neural network- polar coordinated fuzzy controller based maximum power point tracking control under partially shaded conditions," *IET, Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 1, pp. 239–253, Jun. 2009.
- [27] P. Kumar, G. Jain, and D. K. Palwalia, "Genetic Algorithm Based Maximum Power Tracking in Solar Power Generation," in *Proc. IEEE International Conference on Power and Advanced Control Engineering, IEEE*, 2015, pp. 1-6.
- [28] L. H. Pratomo, F. D. Wijaya, and E. Firmansyah, "Capacitor Bank Voltage Equilibrium for MPPT in Single-Phase Single-Stage Five-Level Inverter for PV-Grid Application," *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 62-71, Apr. 2015.
- [29] A. Musa, L. H. Pratomo, and F. Y. Setiono, "Design and Implementation of Solar Power as Battery Charger Using Incremental Conductance Current Control Method Based on dsPIC30F4012," in *Proc. International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering, IEEE*, 2014, pp. 324-327.
- [30] F. Y. Setiono and L. H. Pratomo, "Maximum Power Point Tracker as Regulated Voltage Supply using Ripple Correlation Control," in *Proc. International Conference on Electrical Engineering and Informatics, IEEE*, 2011, pp. 1-6.
- [31] D. K. Chy, M. Khaliluzzaman, and R. Karim, "Analysing Efficiency of DC-DC Converters Joined to PV System Run by Intelligent Controller," in *Proc. International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering, IEEE*, 2017, pp. 457-462.
- [32] T. ESRAM and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum powerpoint tracking techniques," *IEEE Trans Energy Convers*, vol. 22, no. 2, pp 439-449, May 2007.
- [33] N. A. Kamarzaman and C. W. Tan, "A comprehensive review of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp 585-598, Sept. 2014.
- [34] N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, "General review and classification of different MPPT Techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 1-18, Feb. 2017.
- [35] J. P. Ram, T. S. Babu, and N. Rajasekar, "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 826-847, Jan. 2017.