

Optimalisasi *Stand-Alone Photovoltaic System* dengan Implementasi Algoritma P&O-Fuzzy MPPT

Dimas Juniyanto¹, Tatyantoro Andrasto², dan Suryono³

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang
Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang, 50229, Indonesia

dimas.juniyanto@students.unnes.ac.id¹, tatyantoro@mail.unnes.ac.id², suryote@yahoo.com³

Abstract— *The need for electrical energy continues to increase every time. Concerns about the depletion of fossil energy reserves encourage the acceleration of the development of renewable energy use. One of renewable energy is the solar energy. Due to the irreversible irradiation conditions, it takes controls to keep the solar panel's maximum power. The most widely in Maximum Power Point Tracking (MPPT) is Perturb Algorithm and Observe (P&O) but P&O Algorithm has deficiency of oscillations when steady state and MPP trace errors when irradiation changes rapidly. In this paper proposed P & O-Fuzzy algorithm is a modification of conventional P & O to improve the efficiency of solar panels. This research uses Matlab for simulation and hardware implementation using microcontroller Arduino Uno and buck converter topology. The result of simulation and hardware implementation, conventional P & O has an average efficiency of 85.03% while MPPT modification with P & O-Fuzzy algorithm can improve MPP tracking efficiency with 89.67%.*

Keywords— *MPPT, P&O, Fuzzy, Arduino, Matlab*

Abstrak— *Kebutuhan energi listrik terus meningkat setiap waktu. Kekhawatiran menipisnya cadangan energi fosil mendorong percepatan pengembangan penggunaan energi terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang banyak dikembangkan adalah energi matahari. Karena keadaan iradiasi yang berubah-ubah dan tidak konstan menyebabkan dibutuhkan kontrol untuk tetap menghasilkan daya maksimal panel surya. Maximum Power Point Tracking (MPPT) yang banyak digunakan adalah menggunakan algoritma Perturb and Observe (P&O), tetapi algoritma P&O memiliki kekurangan yaitu terjadi osilasi saat steady state dan kesalahan penelusuran MPP ketika iradiasi berubah secara cepat. Pada artikel ini algoritma P&O-Fuzzy yang diajukan merupakan modifikasi dari P&O konvensional untuk meningkatkan efisiensi panel surya. Penelitian ini menggunakan software Matlab untuk simulasi dan implementasi hardware menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dan topologi buck converter. Hasil simulasi dan implementasi hardware, P&O konvensional memiliki efisiensi rata-rata 85,03% sedangkan modifikasi MPPT dengan algoritma P&O-Fuzzy mampu meningkatkan efisiensi penelusuran MPP dengan rata-rata efisiensi 89,67 %.*

Kata Kunci— *MPPT, P&O, Fuzzy, Arduino, Matlab*

I. PENDAHULUAN

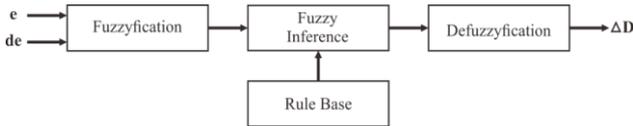
Kemajuan yang signifikan telah dibuat selama beberapa tahun terakhir berkaitan dengan penelitian dan pengembangan sistem energi terbarukan [1]. Diantara berbagai opsi energi terbarukan yang ada, energi matahari merupakan sumber energi yang tidak pernah habis dan energi potensial yang ramah lingkungan [2] sehingga menjadi isu menarik berkaitan perlindungan lingkungan [3]. Energi matahari menjadi salah satu energi terbarukan yang paling cepat berkembang [4] dan menjadi solusi yang sangat menjanjikan [5].

Panel surya memiliki karakteristik output yang nonlinier dipengaruhi oleh iradiasi, suhu, dan impedansi beban. Daya maksimal panel surya didapatkan ketika berada pada titik operasi tertentu yang disebut *Maximum Power Point* (MPP). Jadi, MPPT dibutuhkan untuk mencari MPP ketika suhu dan atau iradiasi berubah [5].

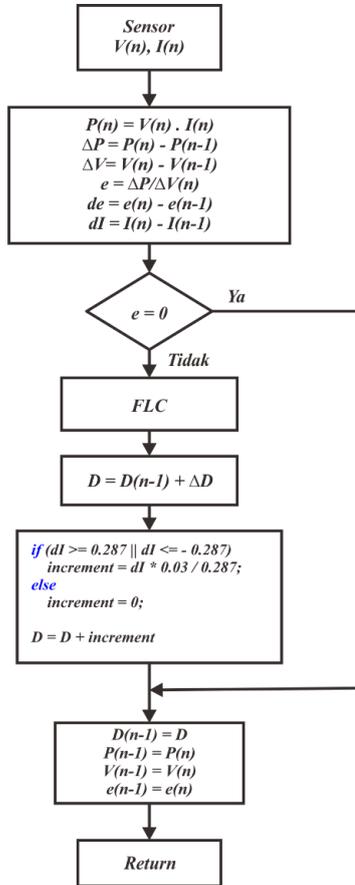
Banyak algoritma MPPT yang dapat diimplementasikan [6]. *Hill Climbing* (P&O), *Incremental Conductance*, *Fractional*

Short Circuit Current, *Fractional Open Circuit Voltage*, *Neural Network* [7], *Modified P&O* [6], [8] dan algoritma *Fuzzy Logic* [5], [9]-[12] yang bertujuan meningkatkan performa penelusuran MPP. Perbandingan algoritma pada [7], [13], [14] dilakukan untuk mengetahui performa algoritma. Setiap algoritma memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing.

Perubahan iradiasi sebanding dengan perubahan MPP panel surya. Diperlukan penelusuran MPP yang dapat menyesuaikan dengan kecepatan dan arah perubahan iradiasi. Osilasi *steady states* dan kesalahan penelusuran MPP akan berakibat pada penurunan efisiensi panel surya. Pada penelitian ini penulis mengajukan algoritma P&O-Fuzzy. Algoritma ini merupakan modifikasi dari algoritma P&O konvensional dengan logika fuzzy yang didesain untuk memperbaiki osilasi *steady states* dan kesalahan penelusuran MPP pada perubahan iradiasi yang cepat.



Gambar 4. Desain Logika Fuzzy pada MPPT



Gambar 5. Flowchart algoritma P&O-Fuzzy

Fuzzyfikasi dalam perancangan sistem kendali ini adalah dengan merubah nilai *error* dan *deltaerror* menjadi nilai masukan *fuzzy*.

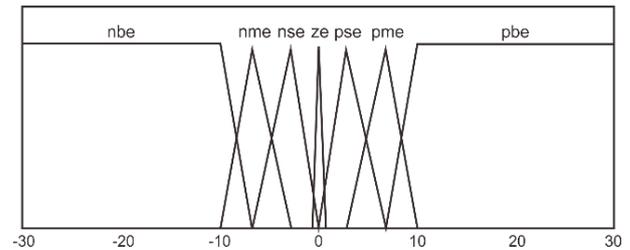
Membership function input error dan *deltaerror* dibagi menjadi tujuh bagian yaitu *Negative Big Error* (nbe), *Negative Medium Error* (nme), *Negative Small Error* (nse), *Zero Error* (ze), *Positive Small Error* (pse), *Positive Medium Error* (pme), dan *Positive Big Error* (pbe) dengan fungsi keanggotaan berbentuk kurva segitiga dan trapesium. Fungsi keanggotaan *error* dan *deltaerror* ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Variabel *input* dibentuk menjadi himpunan *fuzzy* dengan membagi anggota *input* yang akan menjadi masukan sistem logika *fuzzy*.

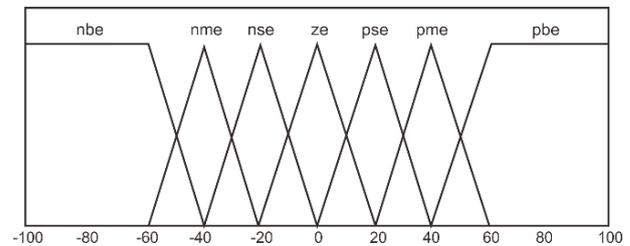
Output sistem logika *fuzzy* yang dibuat berupa nilai *increment duty cycle* (ΔD) PWM. *Membership function output increment duty cycle* dibagi menjadi tujuh bagian yaitu *Negative Big Increment* (NBI), *Negative Medium Increment* (NMI), *Negative Small Increment* (NSI), *Zero Increment* (ZI), *Positive Small Increment* (PSI), *Positive Medium Increment*

(PMI), dan *Positive Big Increment* (PBI) dengan fungsi keanggotaan berbentuk kurva segitiga. Pembentukan himpunan *fuzzy output increment duty cycle* ditunjukkan pada Gambar 8.

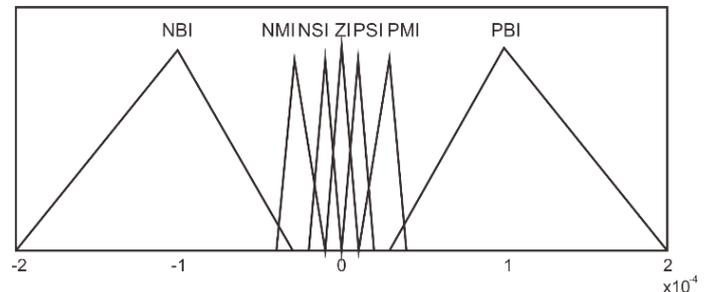
Aturan dasar atau *rule base* pada kontrol logika *fuzzy* merupakan suatu bentuk aturan relasi/implikasi “Jika-Maka” atau “If-Then”. Rancangan sistem logika *fuzzy* memiliki 49 *rule base* seperti ditunjukkan pada Tabel I. Berdasarkan proses *rule base* yang telah dilakukan didapatkan *rule viewer* sistem *fuzzy* seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 6. Membership function error



Gambar 7. Membership function deltaerror



Gambar 8. Membership function increment

TABEL I. RULE BASED

| e/de | pbe | pme | pse | ze | nse | nme | nbe |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| pbe | NBI | NBI | NBI | NBI | NMI | NSI | ZE |
| pme | NBI | NMI | NBI | NMI | NSI | ZI | PSI |
| pse | NBI | NMI | NMI | NSI | ZI | PZI | PSI |
| ze | NMI | NMI | NSI | ZI | PSI | PMI | PMI |
| nse | NSI | NSI | NSI | PSI | PSI | PMI | PBI |
| nme | NSI | ZI | ZI | PMI | PMI | PMI | PBI |
| nbe | ZI | PSI | PSI | PBI | PBI | PBI | PBI |

Detail Simulasi Algoritma P&O-Fuzzy ditunjukkan pada Gambar 10. Berdasarkan hasil pengujian simulasi didapatkan data *dutycycle* pada iradiasi 1000 W/m², *dutycycle* saat mencapai titik MPP sebesar 0,65 sedangkan saat iradiasi diturunkan menjadi 900 W/m², *dutycycle* saat mencapai titik MPP sebesar 0,62. Setiap perubahan 100 W/m² terjadi perubahan *dutycycle* sebesar 0,03. Karena perubahan *dutycycle* berbanding lurus dengan perubahan arus dan perubahan iradiasi sehingga besar nilai *increment* dapat diperoleh dengan persamaan 2.

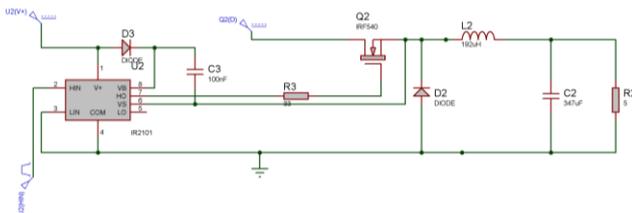
$$increment = \frac{di}{I_{MPP}} \times 0,03 \quad (2)$$

B. Algoritma P&O Konvensional

Algoritma P&O konvensional memiliki perbedaan dimana besar nilai *perturbation size* tetap. Algoritma ini memiliki keunggulan pada kondisi iradiasi yang cenderung konstan dan tidak berubah-ubah secara cepat. Simulasi algoritma P&O konvensional ditunjukkan pada Gambar 11.

C. Buck Converter

Buck converter adalah sebuah rangkaian elektronik yang berfungsi untuk menghasilkan keluaran tegangan yang nilainya lebih rendah dibandingkan dengan nilai tegangan masukan. Perancangan *buck converter* menggunakan simulasi ISIS Proteus untuk validasi performa rangkaian.



Gambar 12. Rangkaian *buck converter*

Berdasarkan Gambar 12 *buck converter* terdiri dari *input* panel surya, komponen utama yang terdiri dari kapasitor, induktor dan saklar. Saklar menggunakan komponen semikonduktor mosfet yang akan terbuka dan tertutup dengan memberikan sinyal PWM ke kaki *gate*. Karena rangkaian *buck converter* menggunakan mosfet tipe *N-channel* maka dibutuhkan komponen tambahan yaitu IC IR2101 yang digunakan sebagai *high-side driver* mosfet dengan menggunakan teknik *bootstrapping*. Parameter rancangan *buck converter* ditunjukkan pada Tabel II.

TABEL II. PARAMETER *BUCK CONVERTER*

| No | Parameter | Nilai |
|----|----------------------------|---------|
| 1 | V _{in} | 18 V |
| 2 | V _{out} | 12 V |
| 3 | Arus output | 4,167 A |
| 4 | Frekuensi <i>switching</i> | 25 Khz |

1) *Dutycycle*

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{12}{18} = 0,67$$

2) *Inductor*

$$\begin{aligned} \Delta IL &= 0,2 \times I_o \\ \Delta IL &= 0,2 \times 4,167 \\ \Delta IL &= 0,8334 \\ L &= \frac{V_o \times (V_{in} - V_o)}{\Delta IL \times f_s \times V_{in}} \\ L &= \frac{12 \times (18 - 12)}{0,8334 \times 25000 \times 18} \\ L &= \frac{72}{375030} \\ L &= 192 \mu H \end{aligned}$$

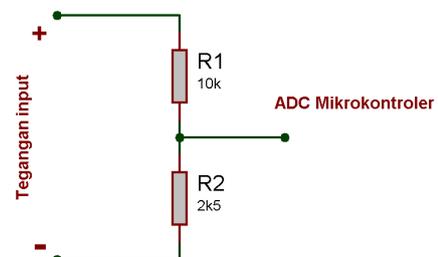
3) *Capacitor*

$$\begin{aligned} C &= \frac{\Delta IL}{8 \cdot f \cdot \Delta V_o} \\ C &= \frac{0,8334}{8 \times 25000 \times 0,1\% \times 12} \\ C &= \frac{0,8334}{2400} \\ C &= 347,25 \mu F \end{aligned}$$

D. Sensor Tegangan

Input tegangan yang masuk ke mikrokontroler maksimal 5 V 40 mA, sehingga diperlukan penurun tegangan untuk bisa mengukur tegangan yang lebih besar dengan memanfaatkan pin ADC mikrokontroler. Rangkaian sensor tegangan ditunjukkan pada Gambar 13.

$$R2 = \frac{V_o \max}{V_i \max} \times (R1 + R2) \quad (3)$$



Gambar 13. Rangkaian sensor tegangan

Berikut ini parameter yang harus ditentukan terlebih dahulu dalam membuat rangkaian pembagi tegangan:

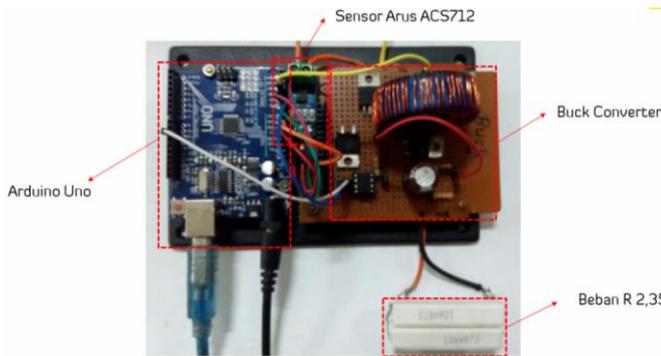
- V_{i max} : 25 V
- V_{o max} : 5 V
- R1 : 10.000 Ω

Dengan menggunakan persamaan 3 sehingga diperoleh nilai R2 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R2 &= \frac{5}{25} \times (10.000 + R2) \\ R2 &= 2500 \Omega \end{aligned}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan terbagi menjadi dua bagian yaitu hasil perancangan simulasi dengan menggunakan *software* Matlab dan hasil secara *hardware* dengan menggunakan Arduino. Implementasi algoritma MPPT secara *hardware* pada penelitian ini menggunakan topologi *buck converter*. *Hardware* ditunjukkan pada Gambar 14 dengan spesifikasi seperti ditunjukkan pada Tabel III.



Gambar 14. Implementasi *hardware* MPPT

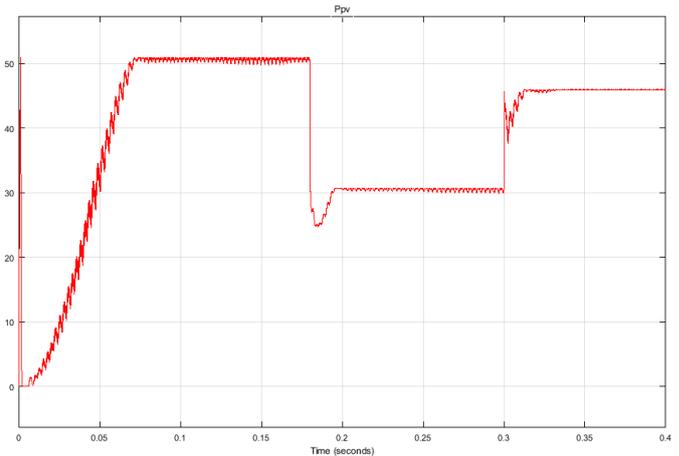
TABEL III. SPESIFIKASI *HARDWARE*

| No | Komponen | Spesifikasi |
|----|-----------------|---------------------------------------|
| 1 | Arduino | UNO R.3 |
| 2 | Sensor Arus | ACS 712 30A |
| 3 | Sensor Tegangan | R1 = 10k Ω , R2 = 2k2 Ω |
| 4 | L | 192 μ H |
| 5 | C | 470 μ F |
| 6 | R | 2.35 Ω |
| 7 | Dioda | MUR1560 |
| 8 | Mosfet | IRF540 |
| 9 | Driver Mosfet | IR2101 |

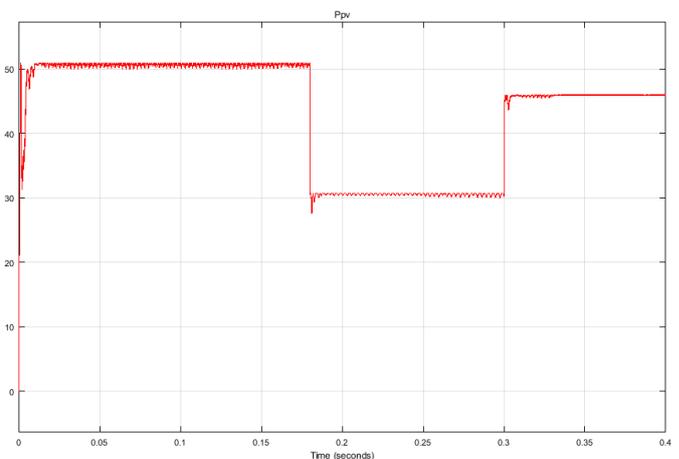
Rangkaian dibagi menjadi tiga blok utama terdiri dari blok algoritma MPPT, *buck converter* dan beban. Blok algoritma MPPT terdiri dari sensor arus, sensor tegangan, dan arduino. Data sensor arus dihubungkan dengan pin A0, data sensor tegangan dihubungkan dengan pin A1 arduino. Blok *buck converter* adalah rangkaian dc-dc *converter* yang menghasilkan tegangan keluaran lebih kecil dari tegangan masuknya. Blok beban berupa resistor 2,9 Ω .

A. Pengujian Simulasi

Pengujian performa implementasi algoritma P&O-Fuzzy dan P&O konvensional dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab 2015b sesuai dengan desain simulasi pada Gambar 2 dengan detail desain simulasi masing-masing algoritma ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Simulasi dilakukan dengan parameter seperti ditunjukkan pada Tabel IV.



Gambar 15. Hasil simulasi algoritma P&O konvensional



Gambar 16. Hasil simulasi algoritma P&O-Fuzzy

TABEL IV. PARAMETER SIMULASI

| No | Indikator | Keterangan |
|----|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 | <i>Time step</i> | 10 μ s |
| 2 | <i>Total time</i> | 0,4 s |
| 3 | <i>Load</i> | R = 2,9 Ω |
| 4 | Iradiasi | 1000 W/m ² , 600 W/m ² , 900 W/m ² |

Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan Gambar 15 dan Gambar 16 diperoleh dua hasil MPPT dengan algoritma yang berbeda. Gambar 15 menunjukkan hasil simulasi dengan menggunakan algoritma P&O konvensional sedangkan Gambar 16 menunjukkan hasil simulasi dengan menggunakan algoritma P&O-Fuzzy.

P&O konvensional memiliki kekurangan waktu *tracking* yang lambat dan terjadi kesalahan *tracking* ketika iradiasi berubah secara konstan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15. Dengan menggunakan algoritma P&O konvensional sebenarnya bisa mempersingkat waktu pencarian atau *tracking* MPP dengan cara memperbesar *perturbation size*, tetapi hal ini akan berpengaruh terhadap besar osilasi pada saat mencapai titik MPP, semakin besar *perturbation size* semakin besar pula osilasinya.

P&O-Fuzzy adalah pengembangan dari algoritma P&O konvensional dengan mengimplementasikan logika fuzzy untuk menentukan besar perturbation size dengan variabel acuannya besar nilai *error* dan *deltaerror*. Berdasarkan Gambar 16 dapat dilihat algoritma P&O-Fuzzy mampu memepersingkat waktu *tracking* MPP dan memperbaiki *error tracking* saat terjadi perubahan iradiasi dengan cepat.

B. Pengujian Sinyal PWM

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan sebuah mekanisme untuk membangkitkan sinyal keluaran yang periodenya berulang antara *high* dan *low* dimana kita dapat mengontrol durasi sinyal *high* dan *low* sesuai dengan yang kita inginkan. *Duty cycle* merupakan persentase periode sinyal *high* dan periode sinyal *low*, persentase *duty cycle* akan dibanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan. Besar nilai *duty cycle* menunjukkan persentase waktu *high* (T_{on}) dalam satu detakan sinyal PWM yang dihasilkan.

Hasil pengujian sinyal PWM menggunakan *oscilloscope* untuk melihat bentuk sinyal *output* dari arduino pin 10 dengan variasi nilai *duty cycle* ditunjukkan pada Tabel V.

TABEL V. HASIL PENGUJIAN SINYAL PWM

| No | Duty cycle (%) | Frekuensi (KHz) | Bentuk sinyal |
|----|----------------|-----------------|---------------|
| 1 | 20 | 25 | |
| 2 | 40 | 25 | |
| 3 | 60 | 25 | |
| 4 | 80 | 25 | |

Penelitian ini membutuhkan PWM dengan frekuensi 25 kHz untuk *switching* Mosfet *buck converter*. Untuk menghasilkan PWM dengan frekuensi 25 kHz diperlukan modifikasi PWM arduino melalui program untuk mengubah frekuensi PWM bawaan. Pengubahan frekuensi PWM akan berpengaruh terhadap fungsi millis, delay, dan servo.

Berdasarkan data yang diperoleh pada Tabel V dan Tabel VI dapat disimpulkan Arduino mampu menghasilkan sinyal PWM mendekati sempurna dengan sinyal PWM yang didesain sebelumnya.

TABEL VI. PARAMETER SINYAL PWM

| No | Indikator | Teori | Praktik |
|----|-----------|--------|-----------|
| 1 | Vmax | 5 V | 5,20 V |
| 2 | Vmin | 0V | -200 mV |
| 3 | Frekuensi | 25 kHz | 24,88 kHz |
| 4 | Periode | 40 us | 40,2 us |

C. Pengujian Buck Converter

Hasil pengujian rangkaian *buck converter* dengan variabel *duty cycle* yang berbeda ditunjukkan pada Tabel VII. Pengujian rangkaian *buck converter* menggunakan beban resistor 5Ω. Sesuai Tabel II, *buck converter* di desain dengan Vin 18 V akan menghasilkan Vout 12 V dengan besar *duty cycle* sesuai perhitungan 67%.

Hasil pengukuran *buck converter* dibandingkan dengan hasil simulasi rangkaian menggunakan ISIS Proteus. Berdasarkan Tabel VII diperoleh data yang menunjukkan semakin kecil *dutycycle* maka tegangan keluaran semakin kecil dan berlaku sebaliknya, semakin besar nilai *dutycycle* tegangan yang dihasilkan semakin besar mendekati tegangan asli masukan.

TABEL VII. HASIL PENGUJIAN BUCK CONVERTER

| No | Duty cycle (%) | Vin (V) | Vout Simulasi (V) | Vout Praktik (V) | Error (V) |
|----|----------------|---------|-------------------|------------------|-----------|
| 1 | 20 | 18 | 3,28 | 2,5 | 0,78 |
| 2 | 40 | 18 | 6,85 | 5,85 | 1 |
| 3 | 60 | 18 | 10,3 | 9,34 | 0,96 |
| 4 | 80 | 18 | 13,7 | 12,85 | 0,85 |
| 5 | 90 | 18 | 15,4 | 14,78 | 0,66 |

D. Pengujian Sensor Arus

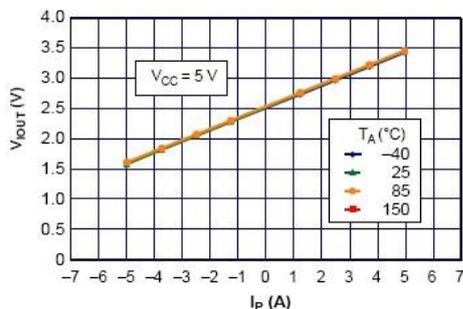
Sensor arus yang digunakan pada penelitian ini adalah ACS712 30A. Sensor ini memiliki kemampuan membaca arus dengan rentang nilai 0-30 A. Berdasarkan hasil pengujian yang penulis lakukan untuk mengetahui perbandingan tingkat kepresisian sensor, sensor arus ACS712 30A memiliki tingkat presisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan ACS712 versi 5A dan 20A.

Pengujian sensor arus dengan menggunakan sumber *power suplay* dan beban resistor 33,3 Ω. Hasil pengujian sensor arus terhadap masukan beban dengan arus yang bervariasi ditunjukkan pada Tabel VIII.

TABEL VIII. HASIL PENGUJIAN SENSOR ARUS

| No | Arus (A) | | Error (A) |
|----|--------------|--------|-----------|
| | Power Supply | Sensor | |
| 1 | 1 | 1,07 | 0,07 |
| 2 | 1,5 | 1,53 | 0,03 |
| 3 | 2 | 2,04 | 0,04 |
| 4 | 2,5 | 2,56 | 0,06 |
| 5 | 3 | 3,04 | 0,04 |

Fungsi transfer dapat didefinisikan sebagai persamaan matematika yang memberikan informasi korelasi antara keluaran dengan masukan dalam suatu sistem. Pada sensor ACS712 ini, fungsi transfer adalah korelasi antara nilai besaran fisis berupa tegangan yang terukur oleh sensor terhadap nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) yang terbaca.



Gambar 17. Grafik keluaran tegangan terhadap arus yang terukur

Berdasarkan Gambar 17, sensor ACS712 pada keadaan tanpa beban atau arus 0 A, tegangan yang terbaca arduino adalah 0,5 Vcc dalam hal ini 5V. Jadi saat arus 0 A tegangan yang terbaca 2,5 V. Sensitivitas sensor ACS712 30A sebesar 66 mV/A. Setiap perubahan tegangan sebesar 66 mV artinya telah terjadi perubahan arus sebesar 1 A. Berdasarkan Tabel VIII diperoleh data yang menunjukkan kemampuan sensor arus ACS712 30A membaca nilai arus dengan tingkat kepresisian yang tinggi dengan *error* 0,03 – 0,07 A.

E. Pengujian Sensor Tegangan

Hasil pengujian sensor tegangan terhadap masukan beban dengan tegangan yang bervariasi ditunjukkan pada Tabel IX.

TABEL IX. HASIL PENGUJIAN SENSOR TEGANGAN

| No | Hasil Pengukuran | | |
|----|------------------|------------|-----------|
| | Power Supply (V) | Sensor (V) | Error (V) |
| 1 | 6 | 5,98 | 0,02 |
| 2 | 10 | 9,96 | 0,04 |
| 3 | 14 | 14,05 | 0,05 |
| 4 | 18 | 17,99 | 0,01 |
| 5 | 22 | 21,97 | 0,03 |

Sensor tegangan didesain menggunakan teori pembagi tegangan menggunakan 2 buah resistor, kemudian hasil pembagi tegangan dibaca oleh arduino dengan menggunakan pin ADC. Nilai resistor yang digunakan adalah $R1 = 10k \Omega$ dan $R2 = 2k2 \Omega$. Perubahan nilai $R2$ memperbesar nilai maksimum tegangan terbaca menjadi 27,72 V. Berdasarkan

Tabel IX diperoleh data yang menunjukkan kemampuan sensor tegangan yang dibuat membaca tegangan dengan tingkat kepresisian yang tinggi dengan *error* 0,01 – 0,05 V.

F. Pengujian Efisiensi MPPT Algoritma P&O-Fuzzy

Pengujian efisiensi alat dilakukan dengan membandingkan dua algoritma MPPT yang berbeda yaitu algoritma P&O konvensional dan P&O-Fuzzy dengan parameter ukur berupa intensitas cahaya dan iradiasi yang sama. Hasil pengujian efisiensi alat kontrol MPPT dengan algoritma P&O konvensional dan P&O-Fuzzy ditunjukkan pada Tabel X.

TABEL X. HASIL PENGUJIAN EFISIENSI MPPT

| No | Cahaya (klux) | Iradiasi (W/m ²) | Ppv (Watt) | | | Efisiensi (%) | |
|-----------|---------------|------------------------------|------------|-------|-----------|---------------|-----------|
| | | | Pmax | P&O | P&O-Fuzzy | P&O | P&O-Fuzzy |
| 1 | 25 | 330 | 16,5 | 13,39 | 14,80 | 81,17 | 89,69 |
| 2 | 20 | 280 | 14 | 11,89 | 12,55 | 84,97 | 89,64 |
| 3 | 15 | 230 | 11,5 | 10 | 10,31 | 87,01 | 89,68 |
| 4 | 10 | 185 | 9,25 | 8,05 | 8,29 | 86,98 | 89,68 |
| Rata-rata | | | | | | 85,03 | 89,67 |

Titik daya maksimal (P_{max}) adalah daya maksimal yang mampu dihasilkan panel surya yang besarnya tergantung pada kondisi iradiasi dan suhu. Nilai acuan penentuan besar P_{max} menyesuaikan *datasheet* panel surya SUOER 50 WP yang digunakan yaitu pada iradiasi 1000 W/m² dan suhu 25 °C panel surya mampu menghasilkan daya 50 Watt. Suhu panel surya pada pengambilan data penelitian ini diantara 32-35 °C.

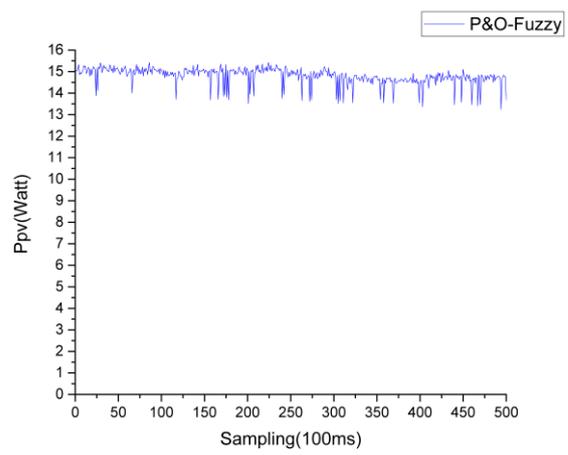
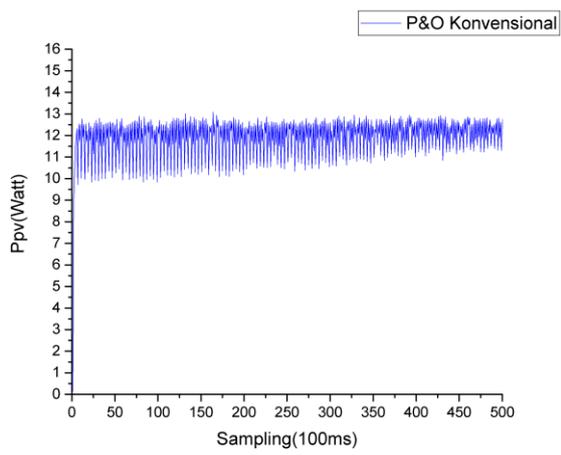
$$P_{max} = \frac{Iradiasi}{1000} \times 50 \text{ Watt} \quad (4)$$

$$Efisiensi \ MPPT (\eta) = \frac{Ppv}{P_{max}} \times 100 \% \quad (5)$$

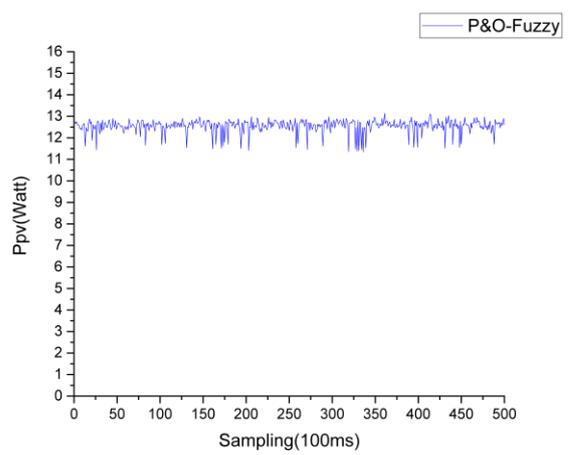
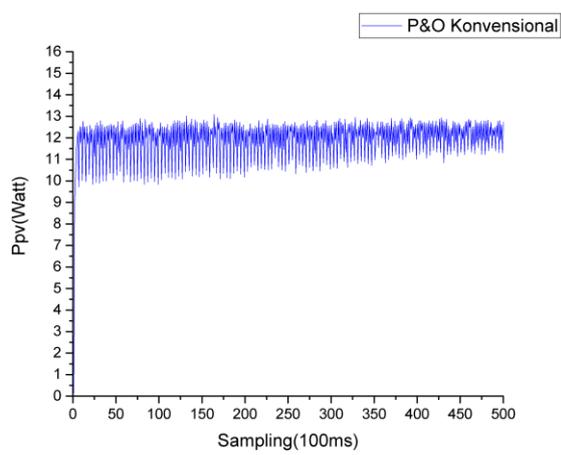
$$Rata - rata \ efisiensi \ MPPT (\eta) = \frac{\sum_{i=0}^n \eta}{n} \quad (6)$$

P_{max} merupakan hasil perhitungan persamaan 4, efisiensi dengan menggunakan persamaan 5, dan rata-rata efisiensi panel surya menggunakan persamaan 6. Data yang disajikan pada Tabel X merupakan rata-rata nilai Ppv dari 500 data yang diambil secara berkelanjutan dengan *time sampling* sebesar 100ms.

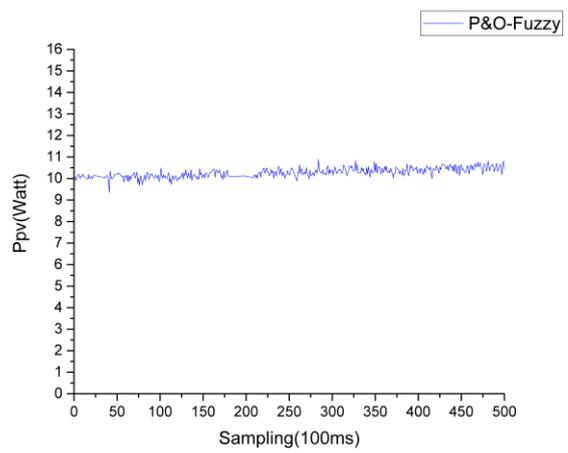
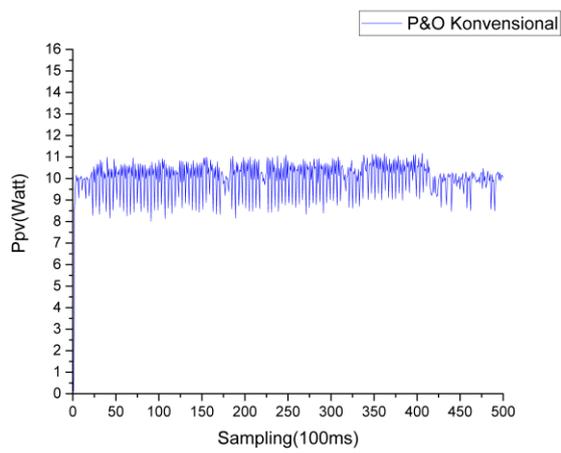
Berdasarkan Tabel X dan Gambar 18 diperoleh data yang menunjukkan MPPT dengan algoritma *Perturb and Observe-Fuzzy* mampu meningkatkan efisiensi panel surya dibandingkan dengan algoritma *Perturb and Observe* konvensional. Efisiensi rata-rata yang dihasilkan algoritma P&O konvensional 85,03 % sedangkan algoritma P&O-Fuzzy meningkat menjadi 89,67 %.



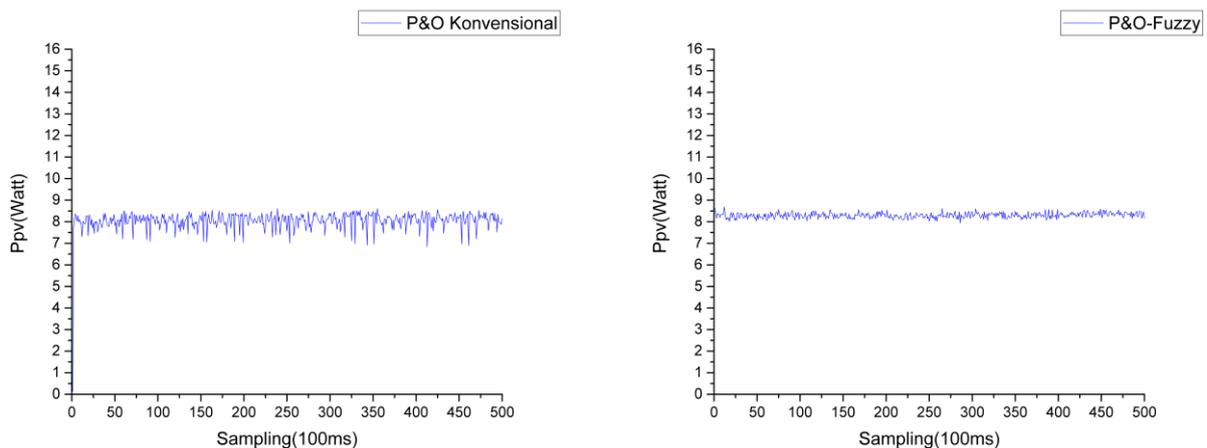
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 18. Hasil pengujian alat pada (a) Iradiasi 330 W/m², (b) Iradiasi 280 W/m², (c) Iradiasi 230 W/m², (d) Iradiasi 185 W/m²

IV. PENUTUP

Implementasi MPPT dengan algoritma *Perturb and Observe-Fuzzy* (P&O-Fuzzy) dapat disimulasikan dengan menggunakan *software* Matlab 2015b atau versi yang lebih baru. Implementasi alat secara nyata menggunakan Arduino Uno sebagai kontrol utama, sensor tegangan dan sensor arus ACS712 sebagai *feedback* kontrol MPPT. Rata-rata efisiensi alat dengan algoritma P&O-Fuzzy sebesar 89,67% sedangkan algoritma *Perturb and Observe* konvensional sebesar 85,03%. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah penggunaan PV Simulator agar dapat mengatur parameter pengujian dengan mudah dan memvalidasi kesesuaian algoritma.

REFERENSI

- [1] D. Choudhary dan A. R. Saxena, DC-DC Buck-Converter for MPPT of PV System, *IJETAE* 4(7): 813-821, 2014.
- [2] S. C. Hipparagi dan D. K. Prasanna, Maximum Power Point Tracker for PV Solar Panels Using SEPIC Converter, *IJSR* 4(5): 403-407, 2015.
- [3] S.M. Cinar dan E. Akarslan, On the Design an Intelligent Battery Charge Controller for PV Panels, *JESTR* 5(4): 30-34, .2012.
- [4] Z. El Khadmiri, et al, A Novel Solar tracker Based on Omnidirectional Computer Vision, *Journal of Solar Energy* 2015(149852): 1-6, 2015.
- [5] M.S. Ait Cheik, C. Larbes, G.F. Tchoketch Kebir, dan A. Zerguerras, Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control Scheme, *Revue des Energies Renouvelables* 10(3): 387-395, 2007.
- [6] D. K. Sharma dan G. Purohit, Advanced Perturbation and Observation (P&O) based Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Solar Photovoltaic System, *Conference Paper IEEE*.1-5, 2012.
- [7] T. Esmar dan P. L. Chapman, Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEE Transaction on Energy Conversion* 22(2): 439-449, 2007.
- [8] A.K Abdelsalam, M.M. Ahmed, S. Ahmed, dan N.E.Prasad, High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technoque for photovoltaic-Based Microgrid, *IEEE Transactions on Power Electronics* 26(4), 1010-1021, 2011.
- [9] B. Bendip, F. Krim, H. Belmili, M. F. Almi, dan S. Boulouma, Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system, *International Conference on Technologies and Materias for Renewable Energy, Environment and Sustainability*, Energy Procedia 50(2014): 383-392 2014.
- [10] R. Arulmurugan dan N. S. Vanitha, Intellegent Fuzzy MPPT Controller using Analysis of DC to DC Novel Buck Converter for Photovoltaic Energy System Applications, *Proceedings of the 2013 International Conference on Pattern Recognition, Informatics and Mobile Engineering*, IEEE, 21-22, 2013.
- [11] S. Selvan, K. J. M. Feros, V. Umayal, dan M. Indumathi, Simulation of Fuzzy Logic Control Based MPPT Technique for Photovoltaic System, *International Conference on Inovations in Engineering and Technology*, 10-14, 2014.
- [12] A. Subiyanto, Mohamed dan M. A. Hannan, Iintelligent photovoltaic Maximum Power Point Tracking Controller for Energy Enhancement in Renewable Energy System, *Journal of Renewable Energy* 2013(901962): 1-9.
- [13] Saidi, Ahmed dan C. Benachaiba, Comparison of IC and P&O algorithms oin MPPT for Grid Conected PV Module, *International Conference on Modeling, Identification and Control (ICMIC)*, IEEE, 213-218, 2016.
- [14] F. L. Tofoli, P. D. D. Castro, dan W. J. D. Paula, Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Technique for Photovoltaic System, *International Journal of Photoenergy* 2015(812582): 1-10, 2015.