

Perancangan dan Implementasi Sistem MPPT Berbasis Logika Fuzzy pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Prasetyo Lukman Sadewa¹, Ahmad Faridh²

^{1,2} Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Konversi Energi Listrik, Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa, Bekasi, Indonesia
e-mail: prasetyolukman12@gmail.com

Abstrak— Indonesia memiliki potensi besar untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sehingga dapat mulai beralih dari sumber energi konvensional menuju sumber energi surya yang lebih ramah lingkungan. Namun, permasalahan pada PLTS yakni kurang efisien dalam mengonversi energi karena panel surya memiliki karakteristik yang non-linier karena daya yang dihasilkan sangat tergantung pada iradiasi matahari dan suhu permukaan panel surya. Salah satu cara meningkatkan efisiensi panel surya yakni dengan metode Maximum Power Point Tracking (MPPT). Metode ini akan mengusahakan panel surya selalu dalam titik daya tertingginya sehingga akan meningkatkan konversi energi. Ada beberapa algoritma untuk mengontrol MPPT salah satunya yakni logika fuzzy. Penggunaan logika fuzzy dipilih karena dapat mengekstraksi daya maksimal dari panel surya dengan iradiasi dan suhu permukaan panel surya yang berubah dengan cepat. Logika fuzzy disimpan pada Arduino Uno dan menghasilkan duty cycle untuk memberi instruksi pada buck converter menggunakan Pulse Width Modulation (PWM). Penelitian ini menggunakan sistem MPPT berbasis logika fuzzy pada panel surya 20Wp. Hasil pengujian sistem MPPT dengan variasi iradiasi matahari menunjukkan duty cycle dapat beradaptasi terhadap tegangan input yang terdampak akibat iradiasi matahari. Saat panel surya ditutup permukaannya 70% sehingga iradiasi berkurang, MPPT berhasil menjaga daya di angka 11.41 Watt. Pengujian yang dilakukan menggunakan sistem tanpa MPPT menunjukkan sistem dengan MPPT menghasilkan daya maksimal 20.56 Watt, sedangkan sistem tanpa MPPT hanya menghasilkan daya 14.90 Watt.

Kata kunci— MPPT, Panel Surya, Logika Fuzzy, Buck Converter.

I. PENDAHULUAN

Energi dapat dianggap sebagai kekuatan yang menggerakkan kehidupan di Planet ini. Energi memungkinkan terciptanya teknologi baru, mendukung komunikasi, menggerakkan industri, transportasi, serta layanan masyarakat yang penting. Sumber daya energi seperti tenaga surya, angin, air, dan panas bumi merupakan contoh energi terbarukan. Berbeda dengan sumber energi konvensional yang akan habis dan menimbulkan polusi, jenis energi ini secara alami dapat diperbarui dan tidak akan habis meskipun digunakan secara terus-menerus. Sumber energi terbarukan mampu menyediakan pasokan energi yang besar untuk mengurangi atau menggantikan penggunaan sumber energi konvensional. Penggunaan teknologi energi terbarukan kini semakin meluas di berbagai negara [1].

Indonesia memiliki potensi besar untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sehingga dapat mulai beralih dari sumber energi konvensional menuju sumber energi surya yang lebih ramah lingkungan. Letak geografis Indonesia di wilayah khatulistiwa dan iklim tropis menjadikan negara ini mendapat penyinaran matahari yang melimpah sepanjang tahun. Kondisi ini sangat mendukung pemanfaatan energi surya sebagai sumber utama bagi PLTS [2].

Energi surya dapat langsung diubah menjadi energi listrik melalui pemanfaatan teknologi photovoltaics (PV). Panel surya memiliki keterbatasan dalam menghasilkan daya maksimum

karena intensitas cahaya dan suhu yang terus berubah dipengaruhi oleh faktor waktu, cuaca, polusi, dan musim [3]–[6]. Untuk mengatasinya diperlukan sistem kendali Maximum Power Point Tracking (MPPT) agar panel surya dapat bekerja pada titik daya tertingginya sehingga daya yang diperolehnya menjadi optimal. Energi yang dihasilkan panel surya kemudian dapat disimpan dalam baterai guna memaksimalkan proses konversi energi dan memungkinkan penggunaannya di malam hari.

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan menerapkan MPPT dalam sistem PLTS dengan algoritma Logika fuzzy menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Arduino Uno digunakan untuk menyimpan dan menjalankan algoritma Logika Fuzzy dan menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur Duty Cycle pada Buck Converter. Sistem ini diharapkan dapat mengoptimalkan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Dengan algoritma Logika Fuzzy, diharapkan respon MPPT menjadi lebih cepat terhadap perubahan intensitas matahari dan suhu permukaan panel surya.

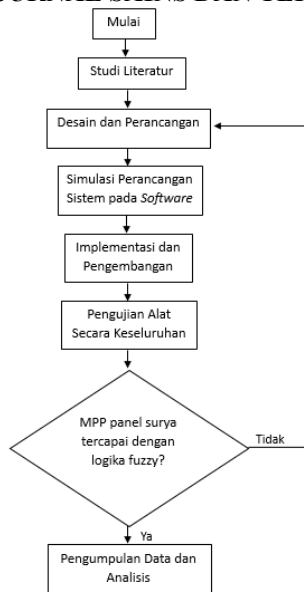
II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tahapan Penelitian

Metode berasal dari Bahasa Yunani "Methodos" yang berarti cara atau jalan yang ditempuh. Sehubungan dengan upaya ilmiah, maka metode menyangkut masalah cara kerja untuk dapat memahami objek yang menjadi sasaran ilmu yang bersangkutan. Metode (method), secara harfiah berarti cara. Selain itu metode atau metodik berasal dari bahasa Greek, Metha, (melalui atau melewati), dan hodos (jalan atau cara), jadi metode bisa berarti jalan atau cara yang harus di lalui untuk mencapai tujuan tertentu. Fungsi metode berarti sebagai alat untuk mencapai tujuan [14].

Metode penelitian pada dasarnya merupakan cara ilmiah untuk mendapatkan data dengan tujuan dan kegunaan tertentu. Berdasarkan hal tersebut terdapat empat kata kunci yang perlu diperhatikan yaitu cara ilmiah, data, tujuan dan kegunaan. Cara ilmiah berarti kegiatan penelitian itu didasarkan pada ciri-ciri keilmuan yang rasional, empiris, dan sistematis. Berdasarkan pemaparan tersebut dapat disimpulkan bahwa metode penelitian adalah suatu cara ilmiah yang digunakan untuk memperoleh data sesuai dengan telaah penelitian dengan tujuan dan kegunaan tertentu.

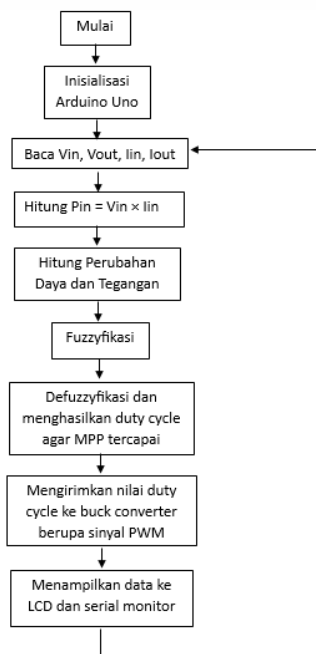
Metode penelitian yang dilakukan pada penelitian ini yaitu metode penelitian kuantitatif dengan metode eksperimen berupa pembuatan prototipe Maximum Power Point Tracking (MPPT) berbasis Logika Fuzzy. Data yang dihasilkan selama melakukan pengujian akan dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan dan menjawab permasalahan yang telah dipaparkan pada bagian pendahuluan.



Gambar. 1 Diagram blok metode penelitian

B. Konsep Dasar

Konsep dari alat yang akan dibuat dapat digambarkan dengan proses kerja sistem secara keseluruhan dengan menggunakan bantuan blok diagram seperti gambar berikut.



Gambar. 2 Prosedur kerja sistem

Dengan adanya bagan sistem kerja dari alat yang akan dibuat bertujuan untuk mempermudah mengetahui cara dan prinsip kerja dari alat secara garis besar. Prinsip kerja dari alat ini adalah sensor arus dan sensor tegangan membaca arus dan tegangan yang dihasilkan oleh panel surya dan mengirimkan data tersebut ke mikrokontroler yang akan menjadikannya sebagai inputan logika fuzzy, mikrokontroler menjalankan logika fuzzy agar panel surya tetap mempertahankan daya maksimal yang dihasilkannya. Mikrokontroler mengeluarkan sinyal PWM dari hasil logika fuzzy yang dikirimkan ke rangkaian buck converter agar tegangan yang masuk ke baterai sesuai dengan tegangan yang dianjurkan untuk mengisi baterai. Sensor arus dan sensor tegangan juga dipasang pada sisi keluaran buck converter untuk melakukan pengawasan pada kondisi arus dan tegangan yang masuk ke baterai. Selain mengeluarkan sinyal PWM,

mikrokontroler juga mengontrol tampilan LCD yang berisi status daya yang dihasilkan oleh panel surya serta jumlah duty cycle yang masuk ke buck converter. Dalam perancangan penelitian ini, dapat dikelompokkan berdasarkan sub-bab perancangan secara garis besar, yaitu:

- 1) Perancangan hardware alat yang berisi perancangan sensor tegangan, sensor arus, buck converter, tampilan layar LCD 16x2, dan pembuatan printed circuit board (PCB).
- 2) Perancangan software pada Arduino IDE untuk mengisi program pada mikrokontroler yang berisi logika fuzzy yang mengatur PWM ke buck converter.

C. Perancangan Perangkat Keras

1) Panel Surya

Panel surya berfungsi untuk menghasilkan tegangan DC sebagai sumber energi utama untuk sistem yang akan dirancang. Energi yang dihasilkan oleh panel surya kemudian akan diturunkan level tegangannya menggunakan buck converter agar dapat dengan stabil mengisi baterai. Panel surya yang dipilih adalah panel surya 20Wp dengan tipe Polycrystalline dengan spesifikasi seperti ditunjukkan pada Tabel I.

TABEL I
SPESIFIKASI PANEL SURYA

Parameter	Simbol	Nilai
Daya Maksimal	P_{max}	20 Wp
Tegangan Open Circuit	V_{oc}	21.6 Volt
Arus Short Circuit	I_{sc}	1.29 Ampere
Arus Pada Daya Maksimal	I_{mp}	1.14 Ampere
Tegangan Pada Daya Maksimal	V_{mp}	18 Volt

2) Buck Converter

Buck Converter digunakan untuk menurunkan tegangan panel surya agar dapat digunakan untuk mengisi baterai. Turunnya tegangan dikontrol oleh *duty cycle* yang berbentuk sinyal PWM yang dihasilkan oleh logika fuzzy. Semakin besar nilai *duty cycle*, maka tegangan keluaran *buck converter* semakin besar. Untuk dapat mengisi baterai 12V, maka diperlukan tegangan masukan 13,8V – 14,2V. maka diperlukan untuk menentukan *initial duty cycle*. [7], [8]

$$D_{cycle} = V_{out} / V_{in} \quad (1)$$

Di mana:

V_{out} = Tegangan ke baterai (target 13,8 V)

V_{in} = Tegangan masukan panel ($V_{mp} = 18$ V)

Tegangan keluaran yang diharapkan untuk mengisi baterai adalah kurang dari 14 V; karena itu, *initial duty cycle* dihitung dari perbandingan 14 V dan 18 V.

$$D_{cycle} = 14 \text{ V} / 18 \text{ V} = 0,777$$

Karena Arduino Uno menggunakan PWM 8-bit (0–255), maka $0,77 \times 255 = 198$.

Dalam buck converter, Induktor merupakan komponen yang krusial karena induktor dapat menyimpan energi dalam bentuk medan magnet ketika ada arus yang melewatinya dan melepaskan energi tersebut ketika MOSFET dalam keadaan terbuka sehingga arus tetap dapat mengalir ke baterai. Pemilihan nilai induktor yang tepat diperlukan untuk menjaga tegangan keluaran tetap stabil dan mereduksi ripple current. Perlu diperhatikan juga frekuensi switching MOSFET, semakin kecil nilai switching maka semakin besar nilai induktor yang dibutuhkan dan semakin besar nilai switching, suhu MOSFET

akan meningkat. Untuk menghitung induktor yang dibutuhkan menggunakan persamaan di bawah:

$$L = (V_{in} - V_{out})D / (\Delta I L f_{sw}) \quad (2)$$

Di mana:

L = Nilai induktor

V_{in} = Tegangan input (18V)

V_{out} = Tegangan output (14V)

D = Duty cycle (0.77)

f_{sw} = Frekuensi switching (40.000 Hz)

$\Delta I L$ = Arus ripple induktor yang diinginkan (0.236A atau sekitar 21% dari 1.11A)

Kapasitor pada buck converter berfungsi untuk menjaga kestabilan tegangan output yang digunakan untuk mengisi baterai. Kapasitor berperan menyaring fluktuasi tegangan (ripple) yang dihasilkan oleh switching MOSFET dan perubahan arus induktor. Perhitungan nilai kapasitor minimal yang dibutuhkan dapat menggunakan persamaan di bawah:

$$C = \Delta I L / (8 \Delta V_{out} f_{sw}) \quad (3)$$

Dimana:

C = Nilai Kapasitor

$\Delta I L$ = Ripple Arus Induktor (0.236A)

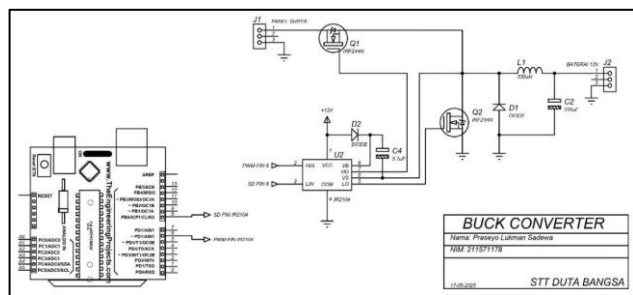
ΔV_{out} = Ripple tegangan keluaran (100mV = 0.1 V)

f_{sw} = Frekuensi switching (40.000 Hz)

TABEL II
KOMPONEN BUCK CONVERTER

Nama komponen	Jumlah (pcs)
MOSFET Driver IR2104	1
MOSFET IRFZ44N	2
Induktor 330μH	1
Kapasitor 220μF	1
Kapasitor 10μF	2
Kapasitor 0.1μF	1
Dioda	2

Untuk mendapatkan tegangan keluaran *buck converter* yang stabil, pemilihan komponen yang tepat merupakan keputusan yang krusial agar konversi daya oleh *buck converter* dapat dilakukan dengan efisiensi yang tinggi.



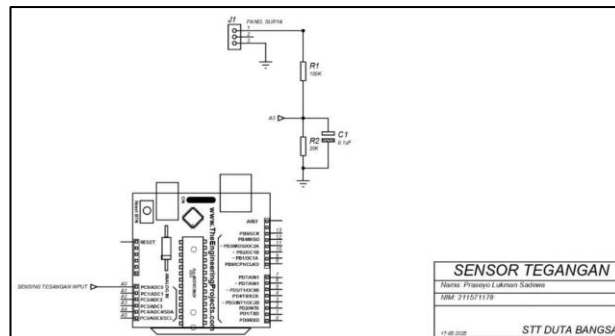
Gambar. 3 Rangkaian buck converter

3) Sensor Tegangan

Arduino Uno hanya menerima input dengan tegangan maksimal sebesar 5 Volt, jika tegangan yang masuk ke pin Arduino Uno lebih dari 5 Volt maka akan merusak mikrokontroler. Rangkaian Voltage Divider berfungsi untuk membagi tegangan keluaran dari panel surya agar dapat dibaca dengan aman oleh Arduino Uno. Rangkaian Voltage Divider menggunakan dua resistor yang dirangkai secara seri untuk menurunkan tegangan yang masuk ke pin Arduino Uno dengan persamaan sebagai berikut:

$$V_{out} = V_{in} [R_2 / (R_1 + R_2)] \quad (4)$$

Artinya resistor R_1 harus 5 kali lebih besar dari R_2 untuk mendapatkan tegangan 4V yang masuk ke pembacaan analog Arduino Uno. Pada penelitian ini menggunakan $R_1 = 100k\Omega$ dan $R_2 = 20K\Omega$ dan penambahan kapasitor 0.1μF untuk memperhalus tegangan yang masuk ke Arduino Uno.



Gambar. 4 Rangkaian pembagi tegangan

4) Sensor Arus ACS712

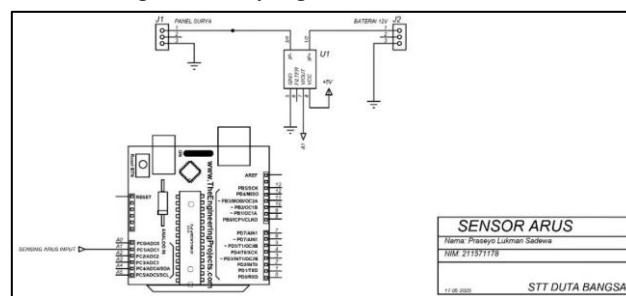
Sensor arus ACS712 merupakan komponen elektronik yang digunakan untuk mengukur arus listrik DC pada panel surya secara non-invasif. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip Hall Effect yang memungkinkan pengukuran arus tanpa perlu memutus rangkaian listrik. Sensor arus ACS712 dibagi menjadi tiga tipe menurut rentang arusnya, yakni 5 Ampere, 20 Ampere, dan 30 Ampere. Dikarenakan pada penelitian ini menggunakan panel surya kapasitas kecil yakni 20Wp, maka pemilihan sensor arus ACS 712 5 ampere sudah cukup. Selain itu sensor arus tipe ini juga lebih sensitif dalam pengukuran arus. Berikut adalah tabel spesifikasi dari sensor arus ACS712: [13]

TABEL III
SPESIFIKASI SENSOR ARUS

Parameter	Nilai
Rentang Arus	5 Ampere
Sensitivitas	185 mV/A
Tegangan Operasi	5 Volt
Output Tegangan	Analog (0.5 Volt – 4.5 Volt)
Frekuensi respons	~80 kHz
Akurasi	±1.5% (pada suhu ruang)

Pin in/out dan Fungsi Kaki ACS712:

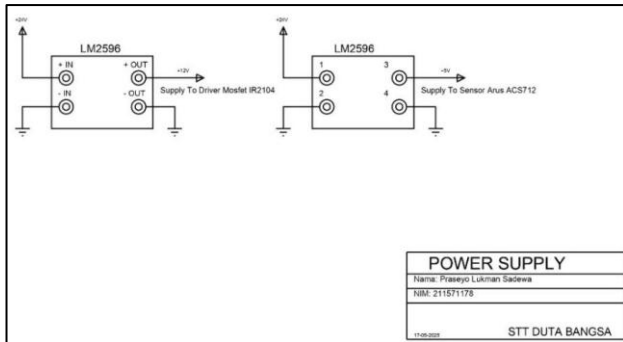
- VCC (Pin 1) Pin ini digunakan untuk memberikan suplai tegangan ke sensor, biasanya sebesar 5 Volt agar sensor dapat beroperasi dengan baik.
- GND (Pin 2) Pin ground yang harus dihubungkan ke ground sistem agar sensor memiliki referensi tegangan yang sama.
- OUT (Pin 3) Pin output ini mengeluarkan sinyal analog yang merepresentasikan besar arus listrik yang terdeteksi oleh sensor.
- IP- dan IP+ (Pin 4 dan 5) merupakan pin yang digunakan untuk mengukur arus yang melewati konduktor.



Gambar. 5 Rangkaian sensor arus

5) Regulator Tegangan

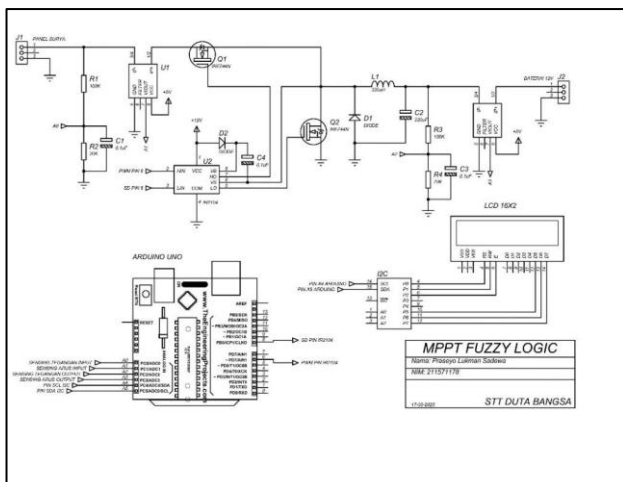
Pada penelitian ini menggunakan dua buah voltage regulator LM2596 untuk menyuplai tegangan yang masuk ke MOSFET Driver IR2104 dan dua buah sensor arus ACS712-5A. Dua buah voltage regulator mendapat tegangan energi yang dihasilkan oleh panel surya. Voltage regulator yang pertama menurunkan tegangan 24 Volt ke 12 Volt sebagai input MOSFET Driver IR2104 dan voltage regulator yang kedua menurunkan tegangan 24 Volt ke 5 Volt sebagai input dua buah sensor arus ACS712-5A dan Arduino Uno.



Gambar. 6 Rangkaian regulator tegangan

6) Rangkaian MPPT Keseluruhan

Tegangan keluaran panel surya yang terdiri dari dua buah kabel dihubungkan pada terminal blok J1 no.1 (positif) dan 3 (negatif). Suplai tegangan 5 Volt yang dibutuhkan oleh sensor arus untuk bekerja tidak diambil dari arduino agar tidak mengganggu program yang sedang dijalankan mikrokontroler melainkan disuplai oleh voltage regulator LM 2596. Selain itu, LM 2596 juga menyuplai tegangan 12 Volt ke port VCC MOSFET Driver IR2104 agar dapat berjalan dengan baik. Tegangan yang sudah diturunkan oleh buck converter yang sudah siap digunakan untuk mengisi baterai dikoneksikan ke terminal blok J2 no.1 (positif) dan 3 (negatif). Untuk menampilkan data yang diperoleh oleh Arduino Uno seperti berapa tegangan panel surya, arus yang dihasilkan panel surya dan duty cycle yang dikirimkan ke MOSFET Driver IR2104, pada penelitian ini menggunakan serial monitor dan LCD 16x2. Selain itu untuk menghemat penggunaan pin yang masuk ke Arduino Uno, ditambahkan juga modul I2C LCD yang dapat mengurangi penggunaan kabel yang semula 16 kabel menjadi 4 kabel saja. [9], [10]



Gambar. 7 Rangkaian MPPT secara keseluruhan

D. Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan pada software diperlukan untuk mengetahui apakah sistem yang dirancang dan diperhitungkan dapat berjalan

dengan baik atau tidak sebelum diterapkan pada hardware pada software Proteus 8. Selain itu, listing program yang akan menjalankan sistem MPPT dirancang pada software Arduino IDE. Agar dapat memastikan logika fuzzy berjalan sebagaimana mestinya, sebelum diimplementasikan pada code di Arduino IDE perlu memvisualisasikan logika fuzzy pada software MatLab.

1) Arduino IDE

Bahasa pemrograman pada Arduino menggunakan bahasa pemrograman C++, yang penulisannya menggunakan software IDE Arduino. Tahapan dalam membuat program sampai upload program ke Arduino adalah sebagai berikut : [12]

a) Membuat Sketch

Jalankan program arduino dengan cara membuka aplikasi dari file master arduino yang kita simpan atau bisa juga dari ikon di komputer desktop. Selanjutnya akan muncul aplikasi program arduino IDE dengan tampilan sketch sesuai dengan tanggal dan bulan pada saat program dijalankan. Sebelum menulis sketch, kita harus *download* atau menambahkan terlebih dahulu *library* yang dibutuhkan untuk pemrograman di aplikasi Arduino IDE. Caranya adalah sebagai berikut :

- 1) Buka Arduino IDE, klik menu Sketch kemudian Include Library > Manage Library
- 2) Kemudian Library Manager akan muncul, kita akan melihat daftar library yang siap untuk di unduh. Cari library yang ingin di install menggunakan fitur pencarian, lalu klik install, kemudian proses download akan dimulai. Waktu download tergantung dari library dan kecepatan internet yang kita gunakan. Jika berhasil maka library tersebut akan berlabel Installed.
- 3) Untuk menggunakan library kita bisa membuka menu Sketch > Include Library.

b) Mengetik Kode Program pada Sketch

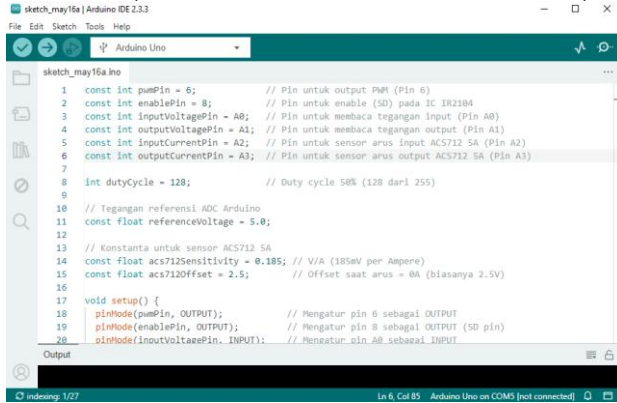
Tuliskan source code yang sudah dirancang pada editor Arduino IDE dengan benar, tulisan program dengan hati-hati sebab pemrograman di Arduino IDE mempunyai sifat case sensitive yang artinya, besar kecilnya huruf akan berpengaruh pada program dan selalu tambahkan komentar dengan simbol `/**` agar kode mudah untuk dipahami.

c) Menyimpan Sketch

Program yang baru saja ditulis pada editor tadi dapat disimpan ke dalam file yaitu dengan klik pada menu file pilih save atau save as, pilih folder yang akan digunakan menyimpan file, ketikkan nama file misalnya 'Fuzzy' kemudian klik save

d) Menjalankan Sketch (Verify/Compile)

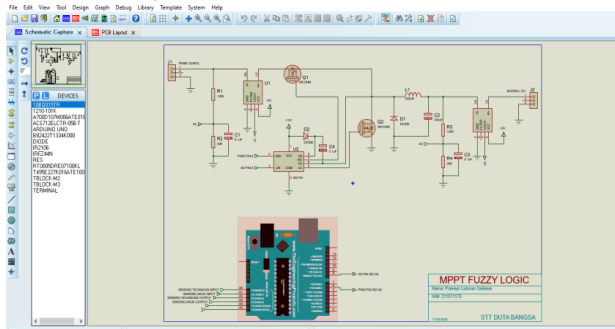
Setelah menyimpan sketch kita bisa langsung menjalankan program yaitu dengan cara mengklik simbol Verify atau dari menu sketch pilih Verify/Compile bisa juga dengan shortcut Ctrl + R. Apabila verify sukses akan terdapat tulisan Done Compiling.



Gambar. 8 Tampilan Arduino IDE

2) Proteus 8

Software Proteus 8 digunakan untuk menguji komponen sebelum diterapkan pada hardware sesungguhnya agar dapat meminimalkan terjadinya kerusakan alat. Selain itu, Proteus 8 juga digunakan untuk merancang PCB sebagai tempat komponen elektronik seperti MOSFET, induktor, kapasitor, IC, dioda, dan resistor diletakkan.



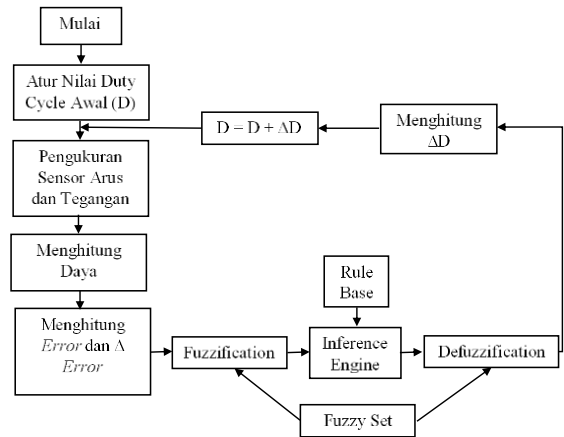
Gambar. 9 Tampilan Proteus 8

Selain dapat menggambar *schematic diagram* dan *layout* PCB, Proteus 8 juga dapat melakukan simulasi komponen MPPT.

3) Logika Fuzzy pada MATLAB R2021a

Software MATLAB R2021a digunakan untuk memvisualisasikan logika fuzzy yang telah dihitung dan akan

diterapkan pada sistem MPPT agar mudah dalam menganalisis hubungan antara masukan fuzzy dan keluaran fuzzy.



Gambar. 10 Diagram alir logika fuzzy

Pada flowchart logika fuzzy, ditentukan terlebih dahulu nilai initial duty cycle Kemudian sensor arus dan tegangan mengukur parameter pada panel surya dan memasukan pada variabel V_{now} dan I_{now} . Kemudian menghitung daya yang dihasilkan panel surya dengan perkalian V_{now} dan I_{now} dan memasukan pada variabel P_{now} . Nilai error didapat dari pembagian antara perbedaan daya dengan perbedaan tegangan $\Delta P/\Delta V$. Untuk ΔP merupakan selisih antara daya sekarang dengan daya sebelumnya, dan ΔV merupakan selisih antara tegangan sekarang dengan tegangan sebelumnya. Nilai $\Delta error$ didapatkan dari selisih antara nilai error saat ini dengan error sebelumnya. Untuk rumusnya dapat dilihat sebagai berikut:

$$E = \frac{P_{now} - P_{(now-1)}}{V_{now} - V_{(now-1)}}$$

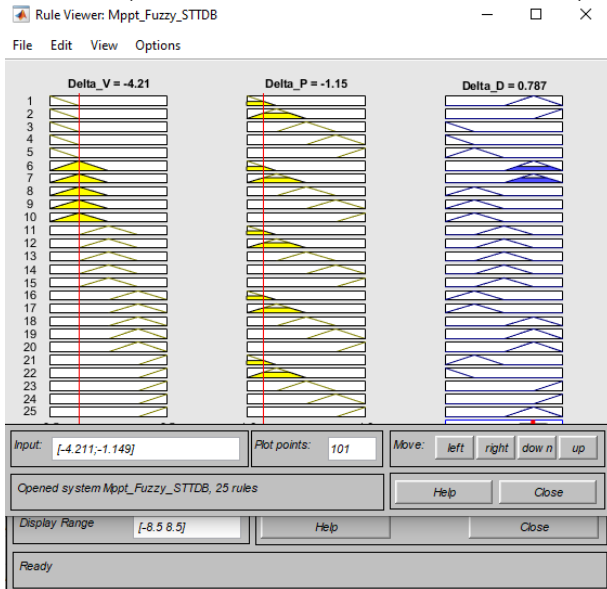
$$\Delta E = E - E_{(now-1)}$$

Error dan Δ error merupakan input dari logika fuzzy yang kemudian diubah menjadi variabel linguistik antara lain: negative big (NB), negative small (NS), zero (ZN), positif small (PS), dan positive big (PB). [11]

TABEL IV
BASIS ATURAN FUZZY

Δ Duty	ERROR					
Δ ERROR		NB	NS	ZE	PS	PB
	NB	PS	PB	NB	NB	NS
	NS	PS	PS	NS	NS	NS
	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PS	NS	NS	PS	PS	PS
	PB	NS	NB	PB	PB	PS

Rule base merupakan bentuk acuan yang menjelaskan hubungan antara variabel masukan dan keluaran. Variabel-variabel masukan dan keluaran tersebut tetap berbentuk fuzzy. Untuk menjelaskan hubungan antara variabel masukan dan keluaran menggunakan fungsi "IF-THEN".



Gambar. 11 Visualisasi logika fuzzy

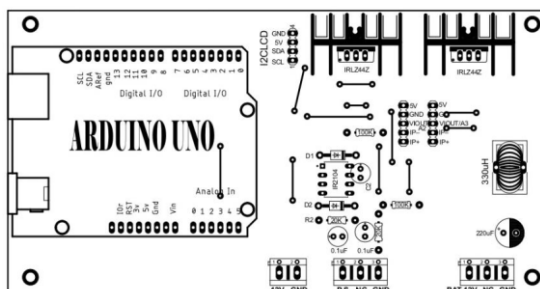
E. Pembuatan Alat

Setelah proses simulasi alat selesai dilakukan dan hasilnya baik, maka langkah selanjutnya yakni membuat alat MPPT logika fuzzy berbasis Arduino Uno.

1) Papan Sirkuit Cetak (PCB)

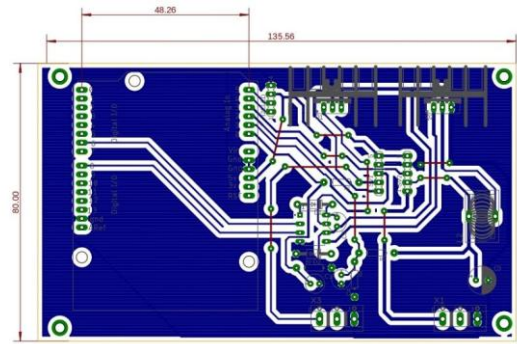
Untuk meningkatkan reliabilitas sistem MPPT, pembuatan PCB untuk penelitian ini merupakan solusi yang efisien dan presisi. Dengan PCB memungkinkan pemasangan komponen yang rapi, koneksi yang rigid (tidak mudah lepas dan bergeser), serta meminimalkan terjadinya kesalahan sambungan. Pembuatan PCB pada penelitian ini menggunakan perangkat lunak Proteus 8 dengan langkah sebagai berikut:

- 1) Setelah menggambar schematic selesai, klik Tools > Netlist To ARES untuk mengirim schematic ke editor PCB
- 2) Perangkat lunak Proteus 8 akan membuka ARES dengan semua footprint komponen yang akan digunakan
- 3) Di ARES, pilih 2D Graphics Box Mode dan buat batas papan (Board Edge) lalu tempatkan semua komponen yang akan digunakan di dalam area PCB sesuai dengan layout yang diinginkan
- 4) Gunakan Track Mode untuk menggambar jalur koneksi antar komponen dan atur lebar jalur sesuai dengan arus yang melewatinya atau bisa menggunakan fitur Auto Router untuk routing otomatis
- 5) Periksa DRC (Design rule check) untuk memeriksa apakah ada kesalahan koneksi atau tidak lalu klik Output > Print Layout
- 6) Setelah PCB dicetak, lubangi PCB sesuai dengan titik yang sudah ditentukan menggunakan bor khusus PCB
- 7) Pasang komponen di atas PCB dan lakukan penyolderan pada kaki komponen.



Gambar. 12 Silkscreen PCB

Silkscreen PCB digunakan untuk memberi label pada komponen yang digunakan sehingga memberikan informasi visual di permukaan PCB.



Gambar. 13 Copper line PCB

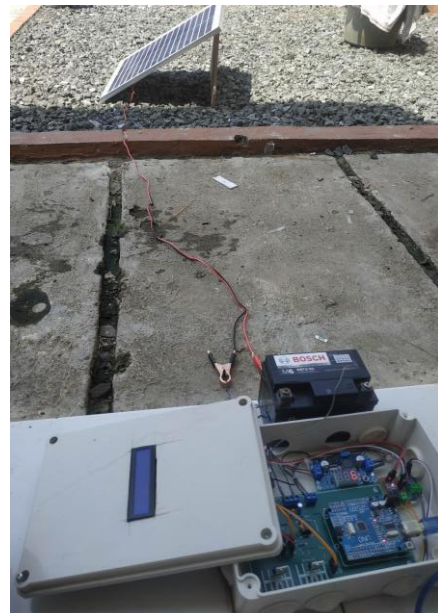
Copper layer PCB berfungsi sebagai jalur penghantar listrik atau konduktif antar komponen elektronik. Ini merupakan inti dari PCB karena semua sinyal dan daya listrik akan mengalir di jalur ini.



Gambar. 14 PCB MPPT

2) Perakitan Keseluruhan Alat MPPT

Setelah PCB selesai dirancang, dicetak, dan disolder komponennya, selanjutnya yakni menyiapkan box sebagai tempat dimana PCB dan perangkat lainnya diletakkan. Box yang digunakan berukuran 220 mm × 150 mm × 75 mm sudah terisolasi sehingga mencegah air dan debu masuk.



Gambar. 15 Keseluruhan alat MPPT

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian dan Analisis Sistem

Dalam penelitian ini, dilakukan perancangan dan pembuatan alat pelacakan daya maksimal panel surya dengan berbasis logika fuzzy. Sensor arus dan sensor tegangan akan membaca parameter

tegangan dan arus pada panel surya dan akan mengirimkan data tersebut ke mikrokontroler. Melalui data tersebut, logika *fuzzy* bekerja dan akan menghasilkan sinyal PWM ke *buck converter* untuk menurunkan tegangan panel surya agar dapat digunakan untuk mengisi daya baterai.

Untuk mengetahui kinerja dan kemampuan pada sistem perancangan alat yang sudah dibuat, maka perlu dilakukan beberapa pengujian alat secara terpisah dan alat secara keseluruhan.

B. Pengujian Komponen secara Terpisah

1) Panel Surya

Pada Tabel I dijelaskan spesifikasi lengkap dari panel surya yang digunakan pada penelitian ini. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah spesifikasi yang tertera di panel surya sama dengan aktual lalu dapat disimpulkan apakah panel surya layak digunakan atau tidak. Pengujian ini dilaksanakan pada tanggal 12 Juni 2025 di Perumahan Grand Cikarang City dari pukul 08:00 – 15:00 dengan interval satu jam sekali pada saat kondisi cuaca terik (tidak mendung).



Gambar. 16 Pengukuran arus hubung-singkat (Isc)

Pengukuran arus dilakukan dengan membuat panel surya dihubungkan-singkat sehingga akan didapatkan arus maksimal dan tegangan yang mendekati nol Volt. Sebelum melakukan pengukuran arus, pindahkan dulu probe positif multimeter ke lubang untuk melakukan pengukuran arus yang sudah disediakan oleh pabrikan multimeter. Setelah itu hubungkan probe positif multimeter ke kabel positif panel surya dan probe negatif multimeter ke kabel negatif panel surya lalu putar knob multimeter ke pembacaan arus DC. Amati nilai yang muncul pada layar multimeter.



Gambar. 17 Pengukuran tegangan rangkaian terbuka (Voc)

Pengukuran tegangan dilakukan tanpa beban sehingga pembacaan konversi cahaya matahari ke energi listrik oleh panel surya dapat terbaca dengan baik dan pembacaan arus mendekati nol. Pengukuran tegangan dilakukan dengan memutar knob multimeter digital ke pembacaan V (Volt) DC. Selanjutnya menghubungkan kabel positif panel surya ke probe positif multimeter dan kabel negatif panel surya ke probe negatif multimeter sehingga akan muncul pembacaan tegangan di display multimeter.

TABEL V
HASIL PENGUJIAN PANEL SURYA

Waktu	Tegangan tanpa beban, Voc (V)	Arus hubung-singkat, Isc (A)	Daya (W)
08:00	16.79	0.67	11.24
09:00	16.90	0.76	12.84
10:00	17.01	0.81	13.77
11:00	17.20	0.80	13.76
12:00	17.19	0.78	13.40
13:00	18.01	0.82	14.76
14:00	18.53	0.88	16.30
15:00	17.20	0.86	14.79

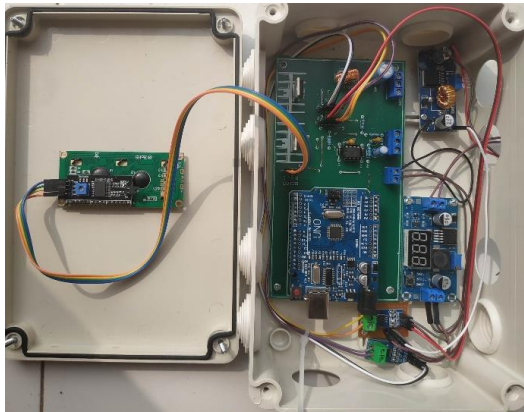
Berdasarkan Tabel V dapat dilihat bahwa daya maksimal yang didapat saat Voc (Voltage at Open Circuit) dan Isc (Current at Short Circuit) adalah 16.30 Watt dimana pada Tabel I panel surya dapat mengeluarkan daya maksimal sebesar 20 Watt. Fenomena ini terjadi karena power rating 20Wp dapat dicapai jika kondisi ideal yakni iradiasi 1000 W/m² dan temperatur permukaan panel surya 25 °C. Jadi, efisiensi panel surya sebesar 81,1 % dari power rating ini bisa digunakan untuk penelitian ini.

2) LCD 16×2 dan Modul I2C

LCD 16x2 dan I2C Module merupakan dua komponen terpisah yang sering digunakan secara bersama untuk menampilkan teks secara efisien pada mikrokontroler. LCD 16x2 memiliki kemampuan untuk menampilkan maksimal 16 karakter per baris dan terdiri dari 2 baris tampilan. Modul ini memiliki 16 pin yang secara default harus disambungkan ke mikrokontroler, namun hal tersebut memakan banyak pin dan menyulitkan integrasi.

Untuk mengatasi hal ini, digunakanlah I2C Module, sebuah adaptor yang memungkinkan komunikasi dengan LCD

menggunakan protokol I2C, sehingga jumlah pin yang dibutuhkan berkurang dari 16 menjadi hanya 4 (VCC, GND, SDA, SCL). Langkah awal untuk menggunakan keduanya bersama adalah menyolder modul I2C ke bagian belakang LCD 16x2, modul ini akan terhubung langsung ke pin LCD dan memungkinkan pengendalian melalui jalur I2C.



Gambar. 18 Pengujian LCD 16x2 dan modul I2C

Pada Gambar 18 Pengujian LCD 16x2 dan I2C Module dapat dilihat I2C Module sudah disolder dengan pin LCD 16x2 sehingga dapat langsung menghubungkannya dengan pin arduino Uno agar dapat berkomunikasi dengan baik.



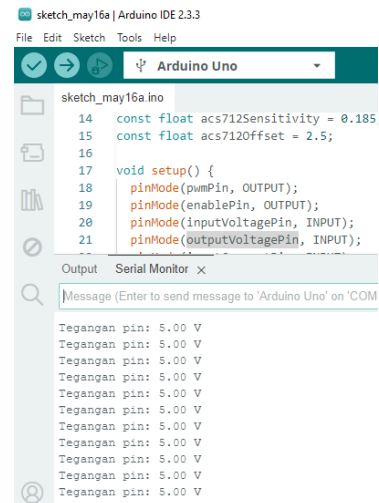
Gambar. 19 Pengujian LCD 16x2

Pada Gambar 19 Pengujian LCD 16x2, dapat dilihat bahwa LCD berhasil berkomunikasi dengan Arduino Uno dan menampilkan Vin, Vout, P (daya), dan duty cycle sehingga mudah memantau sistem MPPT dengan hanya melihat LCD. Selain itu layar LCD akan menampilkan pesan “cut-off” jika tegangan untuk mengisi baterai lebih dari 14 Volt.

3) Mikrokontroler Arduino Uno

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi dari pin mikrokontroler Arduino Uno yang akan digunakan oleh sistem alat ini. Pengujian dengan membuat program pada software Arduino IDE yang diunggah ke board Arduino Uno agar output dari pin yang kita uji berlogika HIGH (1) yang akan menghasilkan tegangan 5 Volt.

Setelah program dibuat pada *software* Arduino IDE, lakukan *compile* program untuk mengetahui apakah ada kesalahan pada penulisan program. Jika tidak ada kesalahan pada program, lanjutkan *upload* program ke *Board* Arduino Uno. Setelah selesai *upload* program, lakukan pengukuran tegangan keluaran pada pin sesuai pin yang ditulis di program.



Gambar. 20 Pengukuran pin melalui serial monitor

Serial monitor pada Arduino dapat memungkinkan komunikasi dua arah antara board Arduino dan laptop melalui koneksi kabel USB dengan menuliskan perintah Serial.begin(9600) pada Arduino IDE.



Gambar. 21 Pengukuran pin dengan multimeter

Pengukuran pin yang akan diuji pada Arduino yang dilakukan menggunakan Multitester dengan cara menghubungkan probe positif multitester ke pin uji dan probe negatif ke pin ground Arduino. Selanjutnya putar knob multitester ke pembacaan tegangan DC lalu amati nilai yang muncul pada layar multitester.

TABEL VI
HASIL PENGUJIAN TEGANGAN KELUARAN PIN ARDUINO UNO

Pin Arduino	Serial monitor (V)	Multimeter (V)	Galat (%)
6	5.0	5.0	0.0
7	5.0	5.0	0.0
8	5.0	5.0	0.0
9	5.0	5.0	0.0

Pin Arduino	Serial monitor (V)	Multimeter (V)	Galat (%)
10	5.0	5.0	0.0
12	5.0	4.9	0.2
13	5.0	5.0	0.0
		Rata-rata	0.0

Dari Tabel VI yang berisi data hasil pengujian keluaran pin mikrokontroler Arduino Uno, menunjukkan jika tegangan output pada pin Arduino Uno yang akan digunakan memiliki tegangan yang sama, yaitu bernilai 5.0 Volt ketika Arduino diberi logika High dan fitur komunikasi serial dapat bekerja dengan baik. Persentase galat rata-rata yang didapatkan adalah 0.2 %.

4) Sensor Tegangan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan kerja dari voltage divider sebelum sensor digunakan sebagai alat ukur tegangan pada rangkaian MPPT berbasis logika fuzzy. Pengujian sensor tegangan menggunakan panel surya dengan mengukur variasi tegangan saat open circuit. Sensor tegangan dipasang secara paralel dengan multimeter sebagai alat ukur pembanding. Kemudian membandingkan selisih hasil pengukuran yang dihasilkan oleh multimeter dan pembacaan serial monitor.



Gambar. 22 Pembacaan tegangan panel surya dengan multimeter

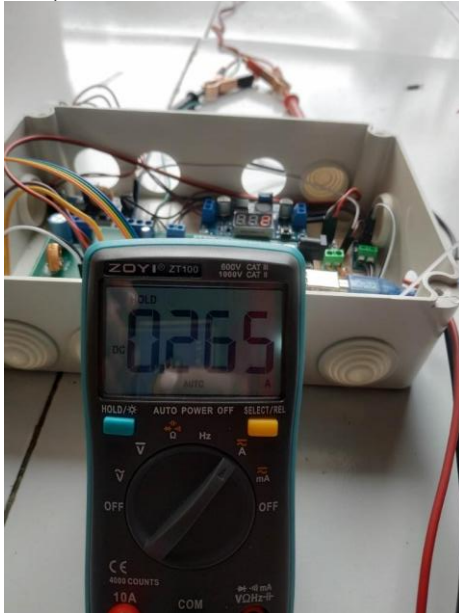
TABEL VII
HASIL PENGUJIAN PEMBAGI TEGANGAN

Percobaan ke-	Serial monitor (V)	Multimeter (V)	Galat (%)
1	17.4	17.6	1.14
2	17.6	17.5	0.57
3	17.6	17.6	0.00
4	17.5	17.6	0.57
5	17.6	17.6	0.00
6	17.5	17.5	0.00
7	17.4	17.4	0.00
		Rata-rata	0.33

Dari Tabel VII didapatkan rata-rata error pada pengukuran voltage divider yang didapatkan dari perbandingan pembacaan Arduino Uno dan Multimeter sebesar 0.33 %.

5) Sensor Arus ACS712

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan sumber 5 Volt pada sensor ACS712-5A di pin VCC menggunakan voltage regulator LM2596. Pin Out dihubungkan pada pin A0 Arduino Uno untuk membaca arus yang melewati sensor, sedangkan pin GND dihubungkan pada ground yang sama dengan ground Arduino Uno. Selain itu, pin + dan - sensor arus dihubungkan pada kabel keluaran panel surya. Pengujian dilakukan untuk mengukur arus DC panel surya yang dihubung-singkat (I_{sc}). Pengujian akan membandingkan hasil ukur yang diperoleh oleh Arduino Uno dan Multimeter.



Gambar. 23 Pembacaan arus dengan multimeter

TABEL VIII
HASIL PENGUJIAN SENSOR ARUS ACS712-5A

Percobaan ke-	Serial monitor (A)	Multimeter (A)	Galat (%)
1	0.245	0.242	1.24
2	0.250	0.239	4.60
3	0.239	0.239	0.00
4	0.250	0.250	0.00
5	0.252	0.250	0.80
6	0.242	0.242	0.00
7	0.239	0.239	0.00
		Rata-rata	0.95

6) Buck Converter

Pengujian buck converter menggunakan tegangan suplai dari panel surya. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon buck converter terhadap duty cycle yang diterapkan oleh Arduino Uno. Jika duty cycle bernilai besar, maka tegangan keluaran buck converter akan semakin besar pula. Pembacaan tegangan oleh Arduino Uno melalui pin analog akan dibandingkan hasilnya dengan Multitester untuk mengetahui persentase galat.

```

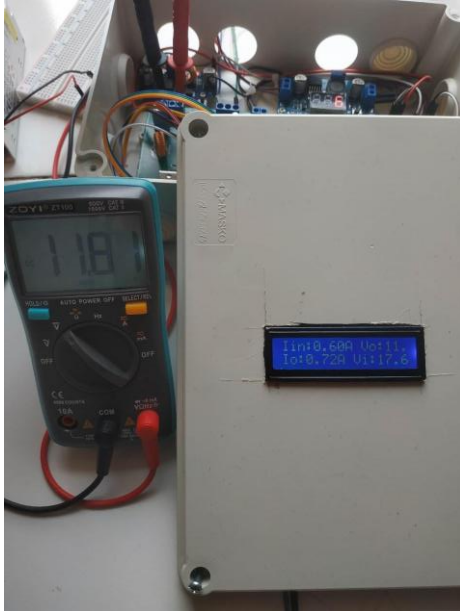
stuck_12Vino
99   Serial.print("Daya keluar   :
100   //Serial.print("Efisiensi
101   Serial.println("=====
102
103   // Tampilkan di LCD
104   lcd.clear();
105   lcd.setCursor(0, 0);

Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'C

Tegangan masuk   : 17.60 V
Tegangan keluar  : 11.93 V
Arus masuk       : 0.61 A
Arus keluar      : 0.74 A
Daya masuk       : 10.81 W
Daya keluar      : 8.79 W
=====
Duty cycle       : 67 %
Tegangan masuk   : 17.60 V
Tegangan keluar  : 11.93 V
Arus masuk       : 0.61 A
Arus keluar      : 0.74 A
Daya masuk       : 10.70 W
Daya keluar      : 8.78 W
=====

```

Gambar. 24 Pembacaan tegangan keluaran buck converter melalui serial monitor



Gambar. 25 Pembacaan tegangan keluaran buck converter dengan multimeter

TABEL IX
HASIL PENGUJIAN BUCK CONVERTER

Duty cycle (%)	Tegangan masuk (V)	Tegangan keluar (V)	Arus masuk (A)	Arus keluar (A)	Daya masuk (W)	Daya keluar (W)	Efisiensi (%)
10	17.1	1.71	0.70	6.39	12	10.9	90
20	17.2	3.44	0.81	3.70	14	12.7	91
30	18.0	5.40	0.88	2.70	16	14.5	90
40	18.2	7.28	0.89	2.00	16	14.5	90
50	18.2	9.10	0.82	1.50	15	13.6	92
60	18.1	10.87	0.88	1.34	16	14.6	90
70	18.3	12.84	0.87	1.13	16	14.6	89

Dari hasil simulasi yang dilakukan sebanyak tujuh kali percobaan dengan duty cycle yang bervariasi didapatkan hasil rata-rata efisiensi sebesar 90%. Dimana hasil tersebut sudah sesuai dengan perancangan awal. Ketika duty cycle berada di bawah nilai 20%, tegangan keluaran akan menjadi 1.71 Volt sehingga arus akan menjadi sebesar 6.39 A maka duty cycle di bawah 20% tidak diizinkan karena dapat merusak sistem yang hanya menahan arus maksimal 5 A. kestabilan daya keluaran yang dihasilkan dikarenakan oleh pemilihan komponen yang tepat.

C. Pengujian Sistem secara Keseluruhan

Pengujian dan analisis data sistem secara keseluruhan bertujuan untuk mengetahui kinerja sistem setelah semua komponen disatukan menjadi sistem yang utuh.

1) Respons MPPT terhadap Perubahan Intensitas Cahaya

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merespons perubahan intensitas cahaya matahari melalui penyesuaian *duty cycle*. *Duty cycle* merupakan persentase waktu aktif dari sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang digunakan untuk mengatur kerja *buck converter*.

Intensitas cahaya berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Semakin tinggi intensitas cahaya, maka tegangan dan arus dari panel akan meningkat. Arduino dengan MPPT logika *fuzzy* secara otomatis menyesuaikan *duty cycle* untuk mendapatkan titik daya maksimum.

Panel surya diuji dengan berbagai tingkat intensitas cahaya. Penerimaan intensitas cahaya dimanipulasi dengan cara menutup secara bertahap permukaan panel surya dari 10%–70%. Sistem MPPT akan mendeteksi perubahan penerimaan intensitas cahaya dengan membaca perubahan tegangan dan arus pada input MPPT. Arduino Uno dengan logika *fuzzy* akan mengubah *duty cycle* PWM yang akan mengontrol MOSFET Driver IR2104 agar mempertahankan efisiensi maksimum.



Gambar. 26 Permukaan panel surya ditutup 20%

Penutupan permukaan panel surya seperti yang dilihat dari Gambar 26 bertujuan untuk mengetahui respon logika *fuzzy*

terhadap terhalangnya permukaan panel surya dari penerimaan iradiasi sinar matahari.

TABEL X
RESPONS MPPT LOGIKA FUZZY TERHADAP PENURUNAN IRADIASI

Penutupan panel (%)	Tegangan masuk (V)	Tegangan keluar (V)	Arus masuk (A)	Arus keluar (A)	Daya (W)	Duty cycle
10	18.70	13.95	0.96	1.26	17.59	210
20	18.40	13.80	0.89	1.22	16.87	208
30	18.12	13.71	0.80	1.18	16.19	204
40	18.06	13.52	0.70	1.12	15.14	200
50	17.80	13.40	0.62	1.06	14.21	190
60	17.40	13.27	0.52	0.97	12.86	180
70	17.21	13.11	0.45	0.87	11.41	170

Berdasarkan Tabel X, dimana permukaan panel surya ditutup sebagian agar iradiasi matahari tidak optimal diserap panel surya. Dapat disimpulkan bahwa:

- Daya keluaran *buck converter* mengikuti tren daya keluaran panel surya, artinya logika *fuzzy* mampu mempertahankan efisiensi konversi daya meskipun terjadi penurunan intensitas cahaya akibat penutupan sebagian panel.
- *Duty cycle* mengalami penyesuaian terhadap kondisi penurunan iradiasi cahaya. Pada kondisi panel 10% penutupan, *duty cycle* berada di angka 210. Seiring bertambahnya penutupan hingga 70%, *duty cycle* secara bertahap menurun hingga 170. Ini menunjukkan bahwa algoritma logika *fuzzy* bekerja dengan menyesuaikan sinyal PWM untuk mempertahankan daya keluaran mendekati titik daya maksimum (MPP).
- Tegangan keluaran berhasil dijaga di bawah 14 Volt, sesuai dengan batas aman pengisian baterai 12 Volt. Hal ini

menunjukkan bahwa sistem proteksi *overvoltage* bekerja dengan baik.

2) Kinerja Panel Surya dengan dan tanpa MPPT

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja MPPT logika fuzzy dibandingkan dengan sistem konvensional yang tanpa sistem MPPT (*duty cycle* tetap). Pengujian ini membandingkan kinerja dua sistem yang berbeda untuk mengisi baterai 12 Volt. Melalui pengujian ini, akan didapatkan hasil seberapa besar daya yang didapatkan panel surya yang kemudian disimpan energinya di dalam baterai dengan variasi iradiasi matahari.

Pengujian dilakukan dengan dua kondisi berbeda, yakni kondisi MPPT aktif yang akan menyesuaikan *duty cycle* secara otomatis terhadap iradiasi matahari menggunakan logika fuzzy dan kondisi MPPT tidak aktif yang memiliki *duty cycle* yang tetap yakni 140. Setiap data hasil pengukuran diamati dan dilakukan analisis perbandingan antara dua kondisi tersebut.

TABEL XI
HASIL PENGUJIAN DENGAN MPPT

Waktu (WIB)	Tegangan masuk (V)	Tegangan keluar (V)	Arus (A)	Duty cycle	Daya panel (W)
07:00	18.27	14.11	1.13	190	20.56
09:00	18.27	13.75	0.94	200	17.18
11:00	18.21	12.91	0.84	180	15.36
12:00	18.24	13.75	0.91	190	16.65
12:30	18.24	14.00	1.12	190	20.43
13:00	18.21	14.00	1.08	190	19.69
14:00	18.27	14.11	1.13	190	20.56

TABEL XII
HASIL PENGUJIAN TANPA MPPT

Waktu (WIB)	Tegangan masuk (V)	Tegangan keluar (V)	Arus (A)	Duty cycle	Daya panel (W)
07:30	16.20	12.76	0.84	140	13.61
09:30	16.45	12.76	0.87	140	14.31
11:30	16.70	12.76	0.89	140	14.86
12:30	17.00	12.76	0.92	140	14.64
13:00	17.30	13.00	0.94	140	14.28
13:30	17.60	13.10	0.96	140	14.90

Berdasarkan Tabel XI dan XII, terlihat bahwa sistem MPPT secara signifikan mampu meningkatkan daya yang dihasilkan oleh panel surya kemudian dikirimkan ke baterai 12 Volt. Sistem dengan MPPT menghasilkan daya yang lebih tinggi, terutama

saat kondisi pencahayaan optimal (terang). Daya panel mencapai 20.56 Watt, dibandingkan sistem tanpa MPPT yang hanya mencapai 14.90 Watt pada kondisi pencahayaan serupa. Peningkatan efisiensi ini merupakan hasil dari kemampuan

logika fuzzy pada sistem MPPT dalam melakukan penyesuaian duty cycle, sehingga panel surya dapat mencari titik maksimal daya dan mempertahankan bekerja pada titik maksimal itu walau terjadi variasi iradiasi matahari.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis sistem MPPT Maximum Power Point Tracking (MPPT) logika fuzzy berbasis Arduino, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Sistem MPPT berhasil direalisasikan menggunakan Arduino Uno, rangkaian buck converter, voltage divider (sensor tegangan), sensor arus ACS712, dan MOSFET Driver IR2104. Sistem mampu melakukan tracking daya maksimum dari panel surya untuk mengisi baterai 12 Volt dengan iradiasi yang bervariasi. Pada iradiasi rendah (permukaan panel surya ditutup 70%), sistem mampu menghasilkan daya sebesar 11.41 Watt.
- 2) Sistem MPPT dengan logika fuzzy sehingga mampu membuat duty cycle adaptif terhadap iradiasi matahari dan suhu permukaan panel surya yang membuatnya dapat menghasilkan daya maksimal 20.56 Watt jika dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT yang hanya menghasilkan daya maksimal 14.90 Watt.

B. Saran

Dalam mengerjakan dan menyelesaikan penelitian skripsi ini tentunya tidak terlepas dari berbagai macam kelemahan dan kekurangan, baik pada pembuatan sistem ataupun dalam penulisan makalah. Untuk memperbaiki kekurangan tersebut, maka penulis menyarankan agar dilakukan beberapa perbaikan sebagai berikut:

- 1) Monitoring berbasis IoT untuk meningkatkan pemantauan sistem, dapat ditambahkan fitur monitoring berbasis internet menggunakan modul seperti ESP8266/ESP32, sehingga data tegangan, arus, daya, dan status proteksi dapat dipantau secara real-time melalui handphone dan laptop.
- 2) Melakukan pengujian sistem terhadap beban yang dinamis atau berubah-ubah untuk melihat respons sistem MPPT dalam kondisi nyata seperti pemakaian pada peralatan rumah tangga berbasis DC.
- 3) Menambahkan fitur proteksi terhadap reverse polarity, overtemperature, serta sistem pendingin aktif seperti kipas yang dikendalikan otomatis.
- 4) Untuk keperluan skala besar atau outdoor, disarankan menggunakan komponen yang lebih tahan terhadap cuaca dan fluktuasi suhu, seperti MOSFET rating tinggi dan sensor IP65/IP67 agar sistem lebih andal di lapangan.

REFERENSI

- [1] As'ad, Samer. (2024). Why Renewable Energy Gained Attention and Demand Globally?. *Nature Environment and Pollution Technology*. 23. 467-473. 10.46488/NEPT.2024.v23i01.042.
- [2] Kharisma, Amrul, Satria Pinandita, and Ari Endang Jayanti. "Literature Review: Kajian Potensi Energi Surya Alternatif Energi Listrik." *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan* 5.2 (2024): 145-154.
- [3] Sherinadhifa, Faradilla, Donny Radiano, and Herwandi Herwandi. "Photovoltaic Maksimum Power Point Tracking (MPPT) Berbasis Fuzzy Logic Kontroler Pada Konverter Buck." *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri* 10.1 (2023): 35-43.
- [4] Boxwell, Michael. *The Solar Electricity Handbook-2017 Edition: A simple, practical guide to solar energy—designing and installing solar photovoltaic systems*. Greenstream Publishing, 2017.
- [5] Hamdi, Dr, and M. Si. "Energi Terbarukan." Jakarta. Kencana (2016).
- [6] Desraino, A. N. G. G. I. "Desain Maksimum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller Menggunakan Buck Converter Dengan Metode Logika Fuzzy di Buoy Weather Station." Institut Teknologi Sepuluh

- Nopember, Teknik Fisika. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember 71 (2016): 72-74.
- [7] Istardi, Didi. *Pengenalan Elektronika Daya-Penyearah AC-DC*. Penerbit Andi, 2018.
- [8] A. I. Yustikasari, E. Sunarno, and P. A. Mahadi Putra, "Desain dan Simulasi Buck Konverter Dengan Kontrol Logika Fuzzy untuk Pengisian Baterai," *J. Ecotipe (Electronic, Control. Telecommun. Information, Power Eng., vol. 8, no. 2, pp. 59–64, 2021, doi: 10.33019/jumalecotipe.v8i2.2389*.
- [9] Barkhordarian, Vrej. "Power MOSFET basics." *Powerconversion and Intelligent Motion-English Edition* 22.6 (1996): 2-8.
- [10] Locher, Ralph. "Introduction to power MOSFETs and their applications." *Fairchild Semiconductor (TM), Application Note 558* (1998).63
- [11] Zadeh, Lotfi Asker. "Fuzzy logic." *Computer* 21.4 (1988): 83-93.
- [12] Djuandi, Feri. "Pengenalan arduino." E-book. [www.tobuku24](http://www.tobuku24.com) (2011).
- [13] Melipurbowo, Bambang Ghiri. "Pengukuran daya listrik real time dengan menggunakan sensor arus acs. 712." *Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa dan Sosial* 12.1 (2016).
- [14] Marlina, Yuni. "METODE DAN METODOLOGI PENELITIAN." DIKTAT, 2021