

Rancang Bangun Maximum Power Point Tracking pada Panel Surya dengan Metode Incremental Conductance Menggunakan Zeta Konverter

Mahmudatul Ula¹, Arief Rahmadani²

Program Studi Teknik Elektro Industri,
Departemen Teknik Elektro,
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya
¹mahmudatulula15@gmail.com, ²rahmadaniarif354@gmail.com

Abstrak

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan suatu metode untuk mempertahankan daya output yang maksimum dari panel surya, dimana ketika daya dari panel surya berubah terhadap waktu karena pengaruh beban ataupun intensitas sinar matahari. Dalam penelitian ini, MPPT pada panel surya menggunakan *metode Incremental Conductance*. Pada metode *Incremental Conductance* bekerja dengan mengontrol *duty cycle* saat nilai perubahan tegangan dan arus $\Delta I/\Delta V > -I/V$. Sistem terdiri dari panel surya sebanyak satu dengan kapasitas daya sebesar 100 Wp, ZETA konverter sebagai DC-DC konverter untuk menurunkan tegangan dan beban yang digunakan adalah lampu DC 12V/5W. Dari pengujian yang telah dilakukan diperoleh waktu rata-rata *tracking* untuk MPPT *Incremental Conductance* selama 4,5 detik dengan daya maksimum sebesar 63,9015 Watt dengan iradiasi matahari sebesar 813 W/m². Untuk daya rata-rata tanpa menggunakan MPPT sebesar 51,215 Watt dan dengan menggunakan MPPT *Incremental Conductance* diperoleh daya rata-rata sebesar 57,274 Watt. Sehingga terdapat kenaikan untuk daya ketika menggunakan control MPPT *Incremental Conductance*.

Kata kunci: *Incremental Conductance*, Maximum Power Point Tracking, Panel Surya, ZETA Konverter

Abstract

Maximum Power Point Tracking (MPPT) is a method of maintaining the maximum output power of solar panels when the power of the solar panel changes over time due to the influence of the load or intensity of sunlight. This research proposed designing MPPT on photovoltaic using the Incremental Conductance method. The incremental Conductance method controls the duty cycle when the voltage and current change values $\Delta I/\Delta V > -I/V$. This system uses one solar panel with a power capacity of 100 Wp, a ZETA converter as a DC-DC converter to lower the voltage, and used a load 12V/5W DC lamp. From the tests that have been carried out, the tracking time for MPPT Incremental Conductance is 4,5 seconds with a maximum power of 63,9015 Watt with irradiation of sunlight 813 W/m². The average power without MPPT is 51,215 Watt, and by using MPPT Incremental Conductance, the average power is 57,274 Watt. So, there is an increase in power when using the MPPT Incremental Conductance control.

Received: 31 Agustus 2022 Revised: 20 November 2022 Accepted: 21 November 2022

Keywords: Incremental Conductance, Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic, ZETA Converter

1. Pendahuluan

Penggunaan energi alternatif sebagai pembangkit listrik saat ini sedang ramai diperbincangkan, hal ini terjadi karena peningkatan kebutuhan energi listrik. Salah satu solusi untuk mengurangi energi yang terbatas maka digunakan energi alternatif seperti energi surya [1]. Selain itu, energi surya tersedia dalam kondisi yang tidak terbatas. Dalam pemanfaatannya, dapat mengubah energi listrik dengan menggunakan bantuan panel surya energi surya atau solar cell [2].

Daya *output* dari panel surya terkadang tidak stabil, hal ini disebabkan oleh intensitas cahaya matahari yang selalu berubah-ubah [3]. Untuk memberikan daya output panel surya yang stabil dan optimal, maka diperlukan kontrol yang dapat mengontrol output dari panel surya pada saat kondisi maksimal saat intensitas cahaya dikurangi [4]. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan metode dalam mempertahankan daya output yang maksimum dari panel surya, dimana ketika daya dari panel surya berubah terhadap waktu karena pengaruh beban ataupun intensitas sinar matahari [5].

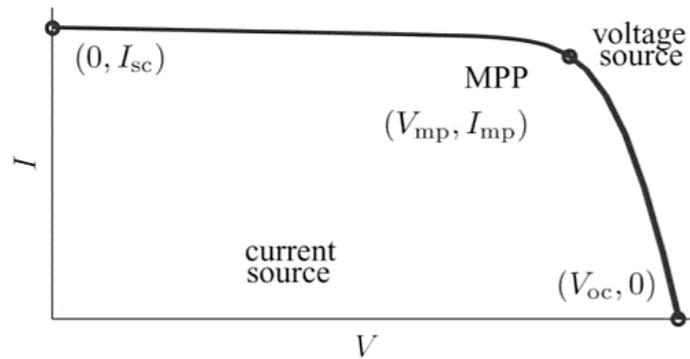
Pada MPPT yang menggunakan algoritma *Incremental Conductance* memiliki nilai osilasi yang lebih kecil [6]. Pada sistem ini menggunakan panel surya dengan daya 100 Wp sebanyak dua buah, ZETA konverter, dan baterai yang berkapasitas 33 Ah sebanyak satu buah. Penggunaan konverter jenis ZETA karena pada konverter ini memiliki kelebihan adalah polaritas output dari konverter tidak berlawanan dan mempunyai nilai ripple yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *buck-boost* konverter [7]. Pada penelitian ini diharapkan untuk MPPT dengan metode *Incremental Conductance* agar dapat mencari daya maksimum pada output dari panel surya.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Karakteristik Panel Surya

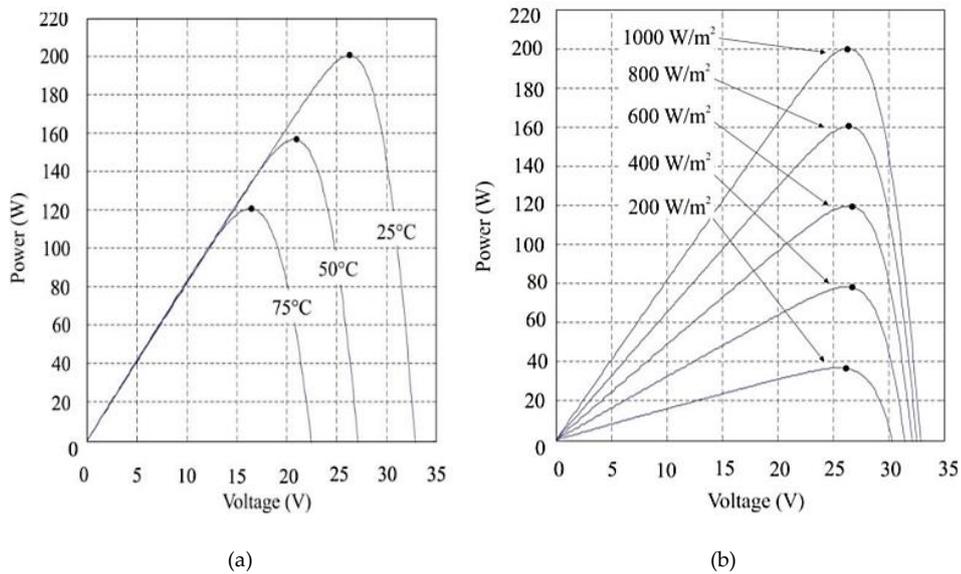
Prinsip kerja dari sel photovoltaic adalah dengan menghasilkan energi listrik ketika foton cahaya yang melewati energi ke elektron bermuatan negatif pada bahan semikonduktor yang mana muatan negatif akan ditarik ke satu permukaan dan muatan positif yang lainnya. Maka dari itu pada permukaan konduktif depan dan belakang sel surya akan mengumpulkan muatan positif dan negatif ini [8].

Kurva karakteristik sel surya I – V terdapat beberapa parameter berupa arus hubung singkat (ISC), rangkaian tegangan yang terbuka (VOC) serta MPP (V_{mp} , I_{mp}) yang mempengaruhi karakteristik. Ketika sel surya dalam keadaan beroperasi parameter yang terukur adalah daya, dimana dengan mengalihkan *output* dari arus dan tegangan pada kurva I – V akan menghasilkan daya *output* [9][10]. Kurva karakteristik I – V ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva Karakteristik I – V

Pada kondisi riil, hal yang menyebabkan *output* dari panel surya yang tidak selalu maksimum yaitu suhu dan radiasi matahari.



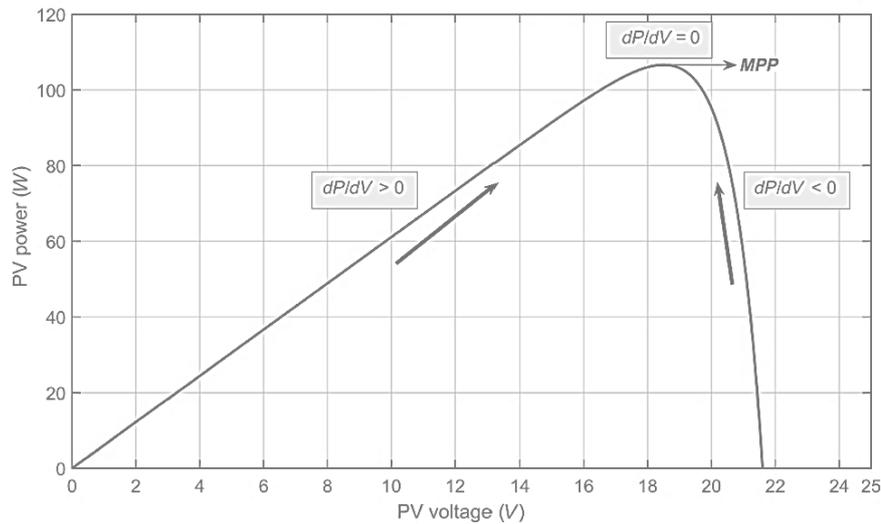
Gambar 2. Kurva Karakteristik P –V terhadap Perubahan Suhu (a), Kurva Karakteristik P – V terhadap Perubahan Iradiasi Matahari (b)

Panel surya dapat bekerja secara optimal pada suhu sel photovoltaic normal pada 25 °C . Jika suhu yang semakin lebih tinggi dari suhu ideal maka panel surya akan melemahkan tegangan atau daya yang dihasilkan akan semakin menurun pula. Dari Gambar 2 (a) dapat dilihat bahwa panel surya dapat bekerja maksimum pada suhu 25°C . Semakin besar suhu disekitar panel surya yang mempengaruhi pada pelemahan tegangan output VOC. Pelemahan tegangan ini mengakibatkan daya *output* pada panel surya juga akan menurun.

Iradiasi matahari juga akan mempengaruhi *output* panel surya. Saat panel surya bekerja secara optimal, iradiasi yang mengenai permukaan panel surya sekitar 1000 W/m2 akan menghasilkan daya yang maksimum [11]. Pada Gambar 2 (b) merupakan kurva karakteristik antara daya dan tegangan terhadap perubahan iradiasi matahari. Semakin rendah nilai iradiasi (dalam satuan W/m2) maka akan terjadi pelemahan tegangan output Voc. Pelemahan ini juga akan mempengaruhi daya output pada panel surya yang akan menurun juga.

2.2. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT merupakan metode yang berbasis sistem kontrol yang memungkinkan modul photovoltaic untuk menghasilkan daya maksimum [12] dan metode MPPT untuk mencari titik maksimum global (GMPP) [13] yang kemudian akan diimplementasikan pada DC-DC konverter. Pada DC-DC konverter ini akan mencari besar dari duty cycle sebagai switching pada konverter [14].

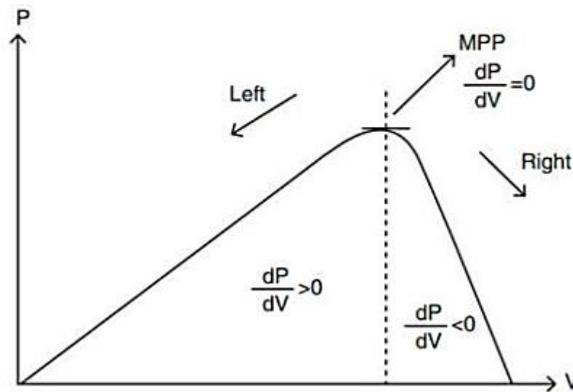


Gambar 3. Kurva Karakteristik P – V terhadap Perubahan Iradiasi Matahari

Pada Gambar 3, untuk mencari titik puncak daya maksimum MPPT akan bekerja dengan cara menaikkan ataupun menurunkan tegangan. Metode MPPT ini diharapkan untuk mengatasi apabila terjadi perubahan suhu ataupun perubahan iradiasi matahari. Panel surya memiliki beberapa karakteristik titik yang berada pada tiga posisi seperti pada Gambar 3, yaitu di sebelah kiri MPP $dP/dV > 0$, di puncak MPP $dP/dV = 0$, dan di sebelah kanan MPP $dP/dV < 0$.

2.3. Incremental Conductance

Algoritma *Incremental Conductance* ditemukan oleh I Muta, T Hoshino, K.H Hussain dan M Oskada. Ini merupakan salah satu teknik MPPT yang populer dimana membandingkan antara *instant conductance* I/V ke *incremental conductance* di/dV [15]. Algoritma MPPT atau pendekatan dilakukan untuk memperoleh daya yang maksimum. Untuk algoritma *Incremental Conductance* memiliki kelebihan dan kekurangan seperti kecepatan untuk mencari titik maksimum, efisiensi yang akan dicapai serta pengaruh terhadap perubahan lingkungan. Algoritma ini digunakan untuk mengatasi MPPT algoritma *Perturb and Observe* [6]. Prinsip dasarnya adalah kemiringan kurva pada *photovoltaic* ialah nol pada titik daya puncak. Ketika titik daya maksimum tercapai, maka algoritma *Incremental Conductance* berhenti untuk mencari titik operasi [13].



Gambar 4. Diagram Skematik Penjejak Metode Incremental Conductance

Pada algoritma *Incremental Conductance* yang ditunjukkan pada Gambar 4, untuk sisi sebelah kiri menggambarkan sisi *incremental conductance*. Dalam algoritma ini dibutuhkan sensor tegangan maupun sensor arus sehingga dapat menampilkan *ouput* dari panel surya [16]. Untuk titik kerja yang maksimum pada sel surya terdapat dalam nilai tegangan yang berubah-ubah pada setiap kondisi lingkungan yang berbeda, atau biasa disebut V_{MPP} . Kurva karakteristik P-V pada panel surya ialah fungsi daya terhadap tegangan, dimana saat menjangkau titik maksimum gradien kurva memiliki nilai nol [17].

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.1)$$

dP merupakan perubahan daya (dalam satuan Watt) dan dV merupakan perubahan tegangan (dalam satuan Volt), dikarenakan $P = V \times I$, sehingga

$$\frac{d(V \times I)}{dV} = \frac{(V \times dI) + (dV \times I)}{dV} \quad (2.2)$$

$$V \frac{dI}{dV} + I = 0 \quad (2.3)$$

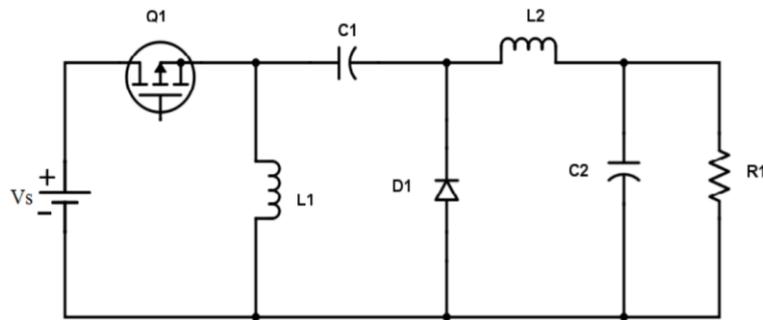
$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.4)$$

dI merupakan perubahan arus (dalam Ampere), I merupakan arus (dalam Ampere), dan V merupakan tegangan (dalam Volt).

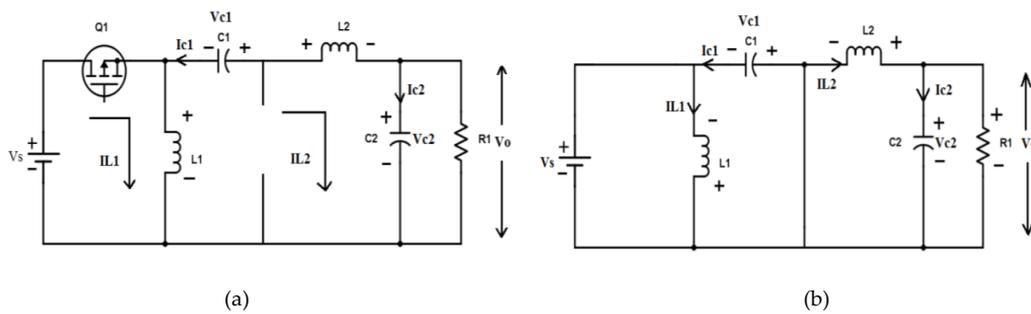
2.4. ZETA Konverter

ZETA konverter merupakan DC-DC konverter yang berfungsi sebagai penaik atau penurun tegangan pada sisi *output* dengan *ripple* tegangan yang rendah. Pada konverter ini dibutuhkan sebanyak dua induktor dan dua kapasitor yang sama halnya dengan *SEPIC* konverter. Untuk *ZETA* konverter bekerja dalam keadaan *continuous conduction mode* (CCM) [18].

Mirip seperti dengan topologi konverter *SEPIC*, topologi *ZETA* memberikan tegangan *output* positif dari tegangan *input* yang bervariasi di atas maupun di bawah tegangan *output*. Pada rangkaian *ZETA* konverter terdiri atas 2 kapasitor dan 2 induktor, 1 ultrafast dioda, dan 1 MOSFET P-channel yang disusun seperti pada Gambar 6 (a) Untuk memahami lebih lanjut mengenai prinsip kerja *ZETA* konverter dalam kondisi CCM, dilakukan analisa dalam kondisi state on dan state off [18].



Gambar 5. Rangkaian ZETA Konverter



Gambar 6. Kondisi State On pada ZETA Konverter (a), Kondisi State Off pada ZETA Konverter (b)

Pada saat kondisi state on yang mana Q1 aktif ditunjukkan pada Gambar 6 (b) membuat dioda D1 dalam kondisi reverse bias atau tidak terkonduksi. Induktor L1 diisi dari tegangan sumber sedangkan pada induktor L2 diisi dari kapasitor C1, sehingga pada kondisi ini arus pada kedua induktor naik secara linier.

Pada saat kondisi state off yang mana Q1 tidak aktif ditunjukkan pada Gambar 2.10 membuat dioda D1 dalam kondisi forward bias atau terkonduksi. Dalam kondisi demikian, induktor L1 dan L2 akan discharging melalui kapasitor C1 dan beban R. Oleh karena itu, arus dari kedua induktor akan menurun karena induktor dalam kondisi discharging.

Bentuk gelombang dari setiap komponen pada ZETA konverter ditunjukkan pada Gambar 7 Ketika Q1 dalam kondisi menyala, energi dari sumber akan disimpan pada C1, L1, dan L2 dan L2 akan menyalurkan energi pada beban. Tetapi ketika Q2 dalam kondisi mati, maka arus dari L1 akan terus mengalir dari arus kapasitor C1 dan L2 akan menyediakan arus ke beban [19].

Tegangan *input*, tegangan *output* dan *duty cycle* (D) dari ZETA konverter pada kondisi CCM dapat diketahui melalui persamaan sebagai berikut.

$$D = \frac{V_{out}}{V_{out} + V_{in}} \quad (2.12)$$

$$\frac{D}{(1-D)} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} \quad (2.13)$$

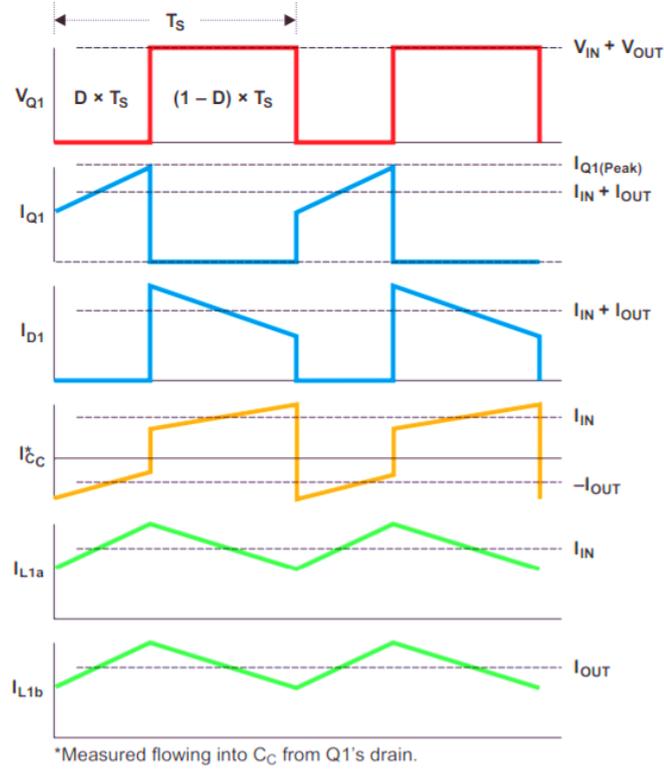
Keterangan:

D : Duty cycle

V_{out} : Tegangan output (Volt)

I_{out} : Arus output (Ampere)

I_{in} : Arus input (Ampere)



Gambar 7. Bentuk Gelombang dari Tiap Komponen pada ZETA Konverter

Dengan menerapkan KVL ke rangkaian ZETA konverter dalam kondisi state on dan state off maka diperoleh persamaan arus ripple induktor. Arus ripple pada induktor saat kondisi CCM seringkali berada pada 10% – 40% arus induktor. Apabila arus ripple terlalu besar maka akan memperbesar Electromagnetic Interference (EMI) atau noise dan jika terlalu akan berpengaruh pada operasi PWM yang tidak stabil. Arus ripple yang diinginkan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta I_L = r I_L \times I_{in} \quad (2.14)$$

$$\Delta I_L = r I_L \times I_{out} \times \frac{D}{(1-D)} \quad (2.15)$$

Keterangan:

ΔI_L : Arus *ripple* induktor (Ampere)

$r I_L$: *Ripple* induktor (%)

Sehingga induktansi pada L1 dan L2 dapat dihitung sebagai berikut.

$$L_1 = L_2 = \frac{D \times V_{in}}{\Delta I_L \times F} \quad (2.16)$$

Keterangan:

F : Frekuensi *switching* (Hz)

Sama seperti pada *buck* konverter, tegangan *output* dari ZETA konverter memiliki *ripple* tegangan yang rendah sehingga nilai kapasitor kopling C2 dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut.

$$C_2 = \frac{\Delta I_L}{8 \times \Delta V_{C2} \times F} \quad (2.17)$$

Nilai kapasitor C1 dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$C_1 = \frac{D \times I_{out}}{\Delta V_{C1} \times F} \quad (2.18)$$

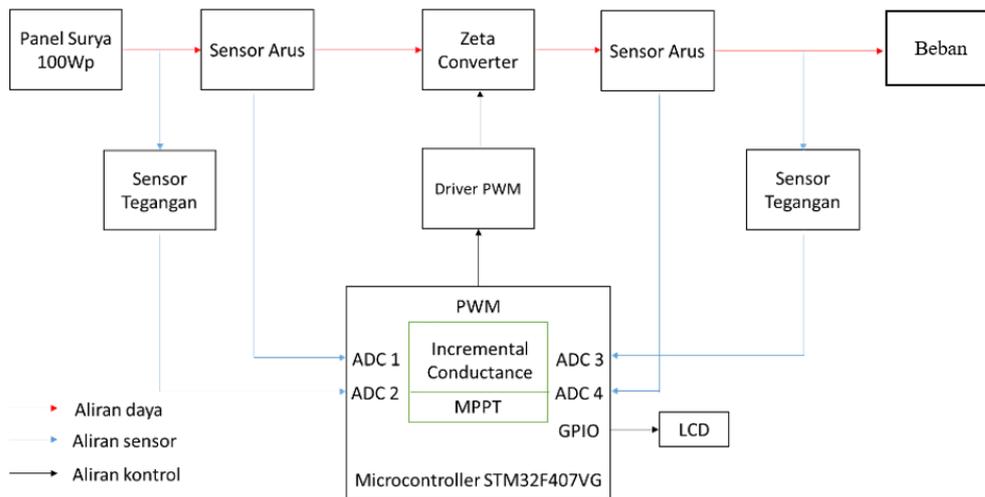
Untuk mengatasi *ripple* tegangan yang terjadi pada sumber, maka diperlukan kapasitor yang dipasangkan paralel dengan *input*. Nilai kapasitor *input* C_{in} dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$C_{in} = \frac{D \times I_{out}}{\Delta V_{Cin} \times F} \quad (2.19)$$

3. Metode Penelitian

3.1. Blok Diagram Sistem

Perencanaan sistem pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 8 yang mencakup rancangan *software* dan *hardware* secara menyeluruh. Perencanaan sistem berupa MPPT dengan menggunakan metode *Incremental Conductance*.



Gambar 8. Blok Diagram Sistem

Pada penelitian ini berfokus pada optimalisasi daya yang dihasilkan oleh panel surya karena adanya perubahan lingkungan seperti pengaruh suhu dan pengaruh iradiasi matahari. Prinsip kerja dari blok diagram sistem sebagai berikut.

1. Pada sistem ini digunakan beberapa komponen diantaranya mikrokontroler seri STM32F407VG, modul sensor arus ACS712 20 A, modul sensor tegangan yang terbuat dari rangkaian pembagi tegangan, rangkaian Zeta Konverter, Driver PWM yang tersusun dari mosfet FOD3182 dan LCD 20x4.
2. Suplai sumber daya menggunakan 1 buah panel surya dengan daya puncak 100 Wp
3. Sensor tegangan dan sensor arus yang terdapat di sisi *output* panel surya sebagai *sensing* tegangan dan arus dari panel surya. Sedangkan sensor tegangan dan arus pada sisi *output* konverter digunakan sebagai monitoring tegangan.

4. Mikrokontroler STM32F407VG sebagai acuan dalam proses MPPT dengan cara mengolah hasil *sensing* tegangan dan arus yang selanjutnya dilakukan komputasi dan menghasilkan nilai *duty cycle* untuk menemukan daya maksimal.
5. Beban lampu yang digunakan sebagai beban pada sistem adalah lampu LED 12V/5W sebanyak 3 buah yang akan menyala selama 12 jam.
6. Penentuan nilai dari algoritma Incremental Conductance, maka dilakukan simulasi rangkaian closed loop melalui aplikasi PSIM.
7. Untuk melihat data logger pada penelitian ini menggunakan aplikasi *Telemetry Viewer* dengan menggunakan serial komunikasi USB to TTL Serial Converter CP2102.

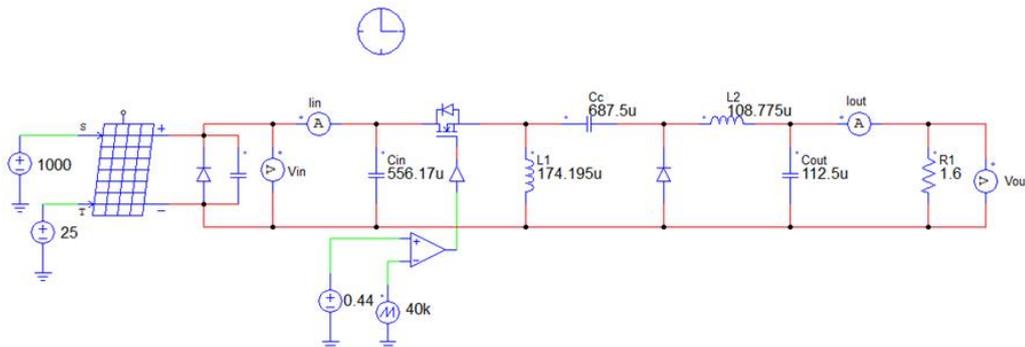
3.2. Perencanaan Sistem

Dengan mengasumsikan beban menyala selama 12 jam dan beban yang digunakan yaitu lampu 12V/5W sebanyak 3 buah. Sehingga total beban yang digunakan 15 Watt, dari lampu 5W berjumlah 3 buah. Pada penelitian ini didapatkan nilai Daya input sebesar 225 Wh dan kapasitas baterai 30 Ah. Besar daya yang dihasilkan dengan rata-rata penyinaran ideal di Indonesia antara 4-5 jam, maka dapat diasumsikan penyinaran 4.5 jam. Sehingga daya yang dibutuhkan dari panel surya minimal 50 Watt, maka panel surya yang digunakan adalah 100 Wp. Untuk spesifikasi dari modul photovoltaic yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Modul Panel Surya

Polycrystalline SP 100 W(P) Silicon Solar PV Module	
Spesifikasi	Keterangan
Max. Power (P_{max})	100 W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22.5 V
Short Circuit Current (I_{sc})	6.17 A
Max. Power Voltage (V_{mp})	18 V
Max. Power Current (I_{mp})	5.56 A
Max. System V	1000 V
Dimension	1000 x 670 x 30 mm
Test Condition	STC irradiance 1000 W/m ² , module temperature 25°C, AM = 1,5

Kemudian ZETA konverter sebagai penunjang kinerja dari MPPT dengan metode *Incremental Conductance* yang mana *duty cycle* akan diatur oleh MPPT yang digunakan. Untuk parameter dari ZETA Konverter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar rangkaian ZETA Konverter pada Gambar 9.



Gambar 9. Perencanaan Rangkaian ZETA Konverter

Tabel 2. Spesifikasi Modul Panel Surya

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan <i>input</i> (V_{in})	18	Volt
Tegangan <i>output</i> (V_{out})	14.4	Volt
Arus <i>input</i> (I_{in})	5.56	Ampere
Arus <i>output</i> (I_{out})	9	Ampere
Frekuensi <i>switching</i> (F)	40	kHz
Duty Cycle	44	%
Resistor (R)	1.6	ohm
Induktor 1 (L_1)	174.195	uH
Induktor 2 (L_2)	108.775	uH
Kapasitor kopling (C_2)	687.5 uF	uF
Kapasitor output (C_i)	112.5	uF
Kapasitor input (C_{in})	556.17	uF
Ripple induktor (rIL)	10	%
Ripple tegangan C1 (rVCin)	1	%
Ripple tegangan C2 (rVCc)	1	%

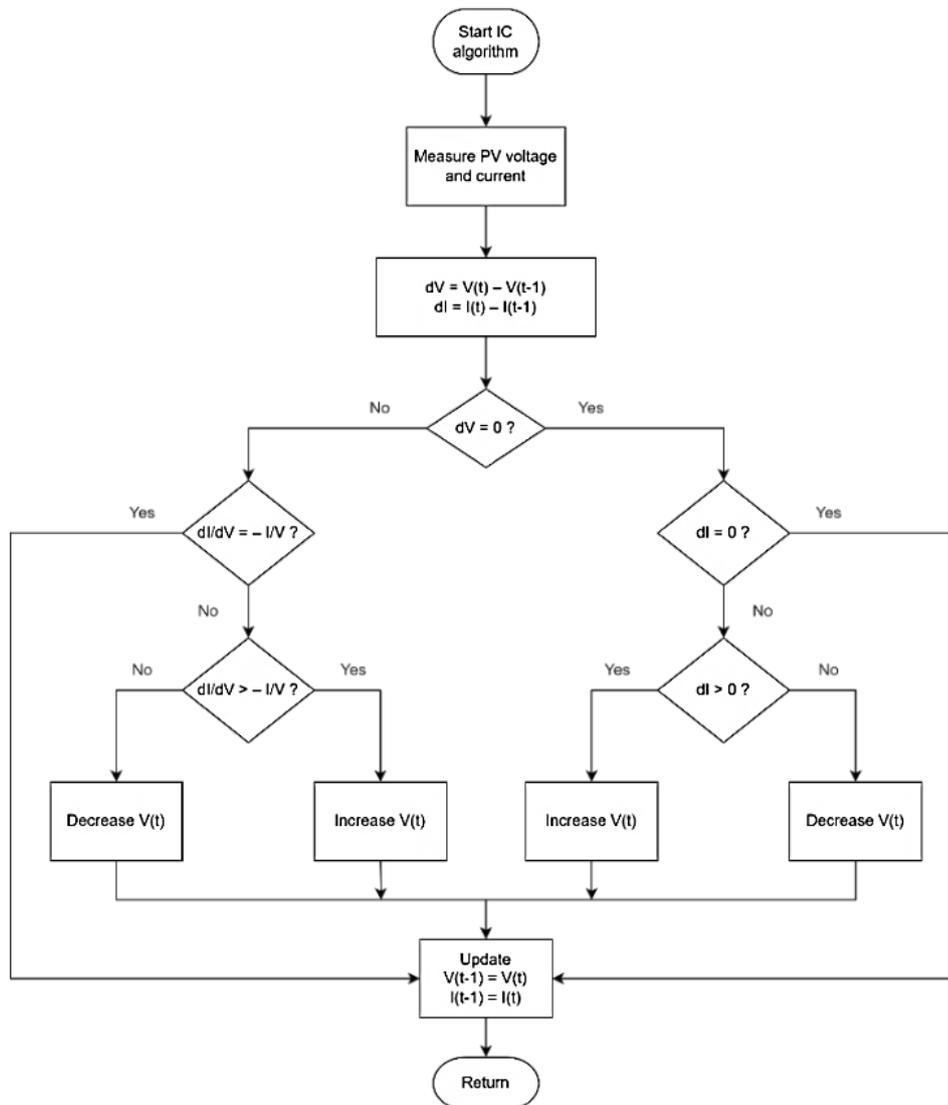
3.3. Algoritma Incremental Conductance

Pada penelitian ini desain *software* yang digunakan adalah pemrograman dengan Bahasa C++. *Software* dirancang atau digunakan agar sistem dapat terintegrasi dan bekerja dengan baik. Dalam penelitian ini perencanaan *software* yang dilakukan yaitu perencanaan *Incremental Conductance*.

Algoritma ini diperlukan nilai pengukuran dari sensor tegangan dan sensor arus pada sisi output panel surya. Data tegangan dan arus digunakan untuk masukan mikrokontroler yang kemudian menggunakan metode *Incremental Conductance*. Dalam iterasi pertama yang bernilai nol (0) diberikan sebagai initial value. Selanjutnya dilakukan pengkondisian: $dI/dV + I/V = 0$ dengan mengubah nilai duty cycle. Dan berlanjut dengan memakai nilai tegangan yang baru, membandingkan, dan memulai iterasi lagi.

Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa, Algoritma ini memulai dengan mengukur nilai tegangan dan arus dari panel surya untuk mendapatkan nilai dP dan dV . Nilai tegangan dan daya yang terbaca pada iterasi saat ini dikurangi tegangan dan daya pada iterasi sebelumnya. Nantinya akan membandingkan nilai dari dP/dV dengan $-I/V$, sehingga dalam keadaan nilai yang sama maka nilai *duty cycle* dipertahankan dalam iterasi selanjutnya. Dalam mendeteksi nilai kenaikan dan penurunan dari nilai iradiasi matahari dan suhu maka algoritma akan memeriksa nilai dI atau perubahan arus dengan mengubah nilai *duty cycle* berdasar pada nilai $dI > 0$ atau $dI < 0$.

Untuk memudahkan pembacaan pada sistem, maka dibuatlah dua kondisi yang berbeda. Saat kondisi pertama, terjadi saat perubahan tegangan sama dengan nol ($dV=0$) dengan perubahan arus yang meningkat ($dI > 0$), sehingga tegangan referensi (V_{ref}) akan ditambahkan tegangan (ΔV) menjadi sebesar 0.1 dan saat perubahan arus yang menurun maka tegangan referensi (V_{ref}) akan dikurangi tegangan (ΔV) menjadi sebesar 0.1. Saat kondisi kedua, perubahan tegangan yang tidak sama dengan nol ($dV \neq 0$) dengan nilai dari *incremental conductance* (dI/dV) lebih besar daripada dengan nilai negatif *instant conductance* (I/V) maka tegangan referensi (V_{ref}) akan ditambahkan tegangan (ΔV) menjadi sebesar 0.1. Apabila nilai *incremental conductance* (dI/dV) lebih kecil daripada dengan nilai negatif *instant conductance* (I/V) maka tegangan referensi (V_{ref}) akan dikurangi tegangan (ΔV) menjadi sebesar 0.1 [20].



Gambar 10. Flowchart MPPT Incremental Conductance

3.4. Persamaan Regresi Linier

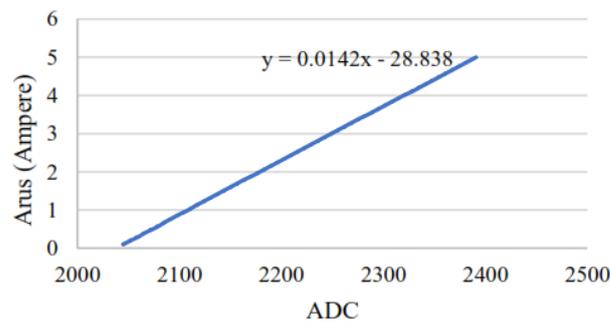
Sistem kerja sensor tegangan dan sensor arus yaitu dengan mengkonversi output nilai analog dari sensor menjadi nilai digital dengan menggunakan fitur channel ADC pada STM32F407VGTx. Nilai dari ADC yang terbaca dimulai dari range 0 bit hingga hingga 4095 bit yang mana dikalibrasi menggunakan alat ukur untuk membaca nilai pengukuran tegangan dan arus. Penentuan nilai pengukuran sensor tegangan dan arus menggunakan metode persamaan regresi linier dan proses kalibrasi dengan acuan alat ukur Avometer atau Multimeter Digital. Persamaan Regresi Linier merupakan pengukur hubungan dua variabel atau lebih yang dinyatakan dengan bentuk hubungan atau fungsi. Untuk menentukan bentuk hubungan (regresi) diperlukan pemisahan yang tegas antara variabel bebas yang sering diberi simbol X dan variabel tak bebas dengan simbol Y. Dengan demikian cara mendapatkan persamaan dalam mencari nilai tegangan atau nilai arus pada sisi input sensor (x), maka nilai output sensor bisa dijadikan sebagai acuan (y) dalam menghitung nilai sebenarnya, melalui persamaan sebagai berikut :

$$y = ax + b \quad (2.20)$$

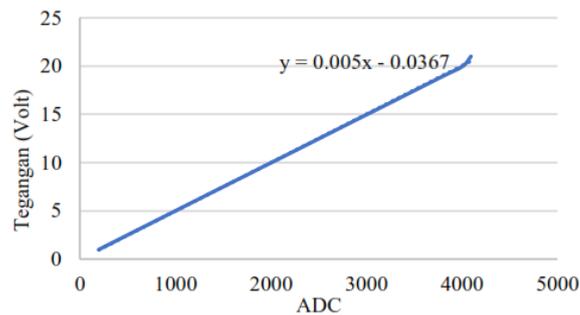
maka untuk mencari nilai x adalah :

$$x = \frac{y-b}{a} \quad (2.21)$$

Selanjutnya dilakukan pengambilan data kalibrasi dan hasil kalibrasi tersebut dijadikan acuan untuk mendapatkan rumus pendekatan menggunakan microsoft excel. Pada Gambar dan Gambar menunjukkan hasil dari pengambilan data kalibrasi sensor tegangan dan sensor arus dalam bentuk grafik regresi linier.



Gambar 11. Grafik Persamaan Linier Sensor Arus



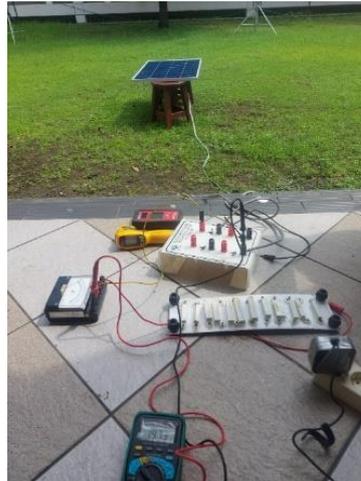
Gambar 12. Grafik Persamaan Linier Sensor Arus

4. Hasil dan Pembahasan

Pengujian sistem dilakukan di Laboratorium Elektronika Daya Politeknik Elektronika Negeri Surabaya. Tujuan dari pengujian sistem adalah untuk mengetahui apakah setiap komponen sistem telah bekerja dengan baik serta menunjang antara satu dengan yang lainnya. Pengujian sistem terbagi menjadi dua, yaitu dengan menggunakan software simulasi dan hardware.

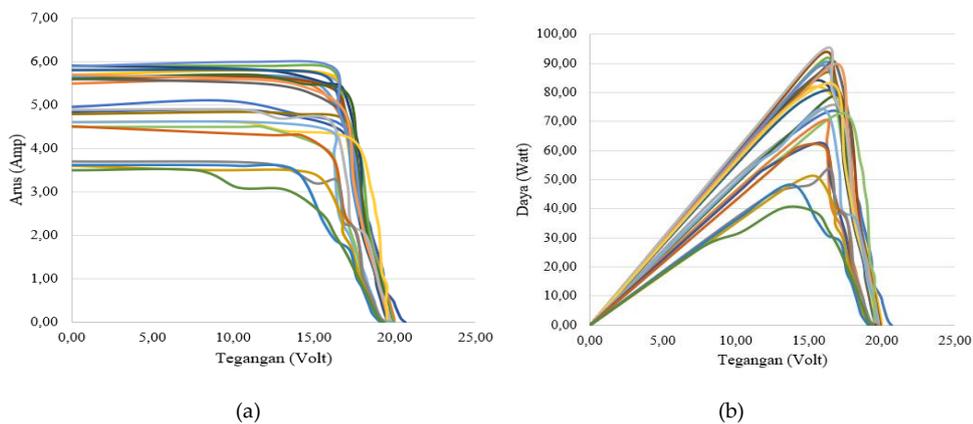
4.1. Pengujian Karakteristik Panel Surya

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik panel surya yang digunakan. Dengan menggunakan modul variabel resistor yang merubah besaran tahanan dari nilai $1,8 \Omega$ - 220Ω . Pengujian dilakukan pada pukul 08.00 WIB – 15.00 WIB. Pada Gambar 11 ini merupakan rangkaian dari pengujian panel surya.



Gambar 11. Pengujian Karakteristik Panel Surya

Dari pengujian karakteristik panel surya yang telah dilakukan, maka diperoleh grafik kurva nilai pada saat nilai tertinggi iradiasi matahari.



Gambar 12. Grafik Kurva Karakteristik Photovoltaic Arus terhadap Tegangan (a), Grafik Kurva Karakteristik Photovoltaic Daya terhadap Tegangan (b)

Pada Gambar 12 (a) merupakan grafik kurva karakteristik panel surya arus terhadap tegangan dan Gambar 12 (b) merupakan kurva karakteristik panel surya daya terhadap tegangan. Berdasarkan kurva karakteristik dari panel surya dapat dilihat bahwa saat nilai iradiasi matahari 1000 W/m^2 daya yang dihasilkan sebesar $66,96 \text{ Watt}$ dengan tegangan sebesar $13,95 \text{ Volt}$ dan arus sebesar $4,8 \text{ Ampere}$.

4.2. Pengujian ZETA Konverter

Pengujian ZETA konverter dilakukan dengan menggunakan beban variabel resistor geser $5\Omega/100\text{W}$. Pada Tabel 4.35 dilakukan pengambilan data pengujian dengan variasi empat duty cycle dimulai dari $0,2$; $0,4$; $0,44$; $0,6$. Kemudian variasi empat tegangan dimulai dari 10 Volt ; 15 Volt ; $17,8 \text{ Volt}$; 20 Volt . Selanjutnya dapat diperoleh besar error antara tegangan output pada saat pengujian dan tegangan output secara teori.

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa prosentase error dari ZETA konverter sebesar $4,988\%$ dan efisiensi rata-rata dari konverter sebesar $89,52\%$. Dari data di atas dapat dikatakan bahwa ZETA konverter yang dirancang telah bekerja dengan baik.

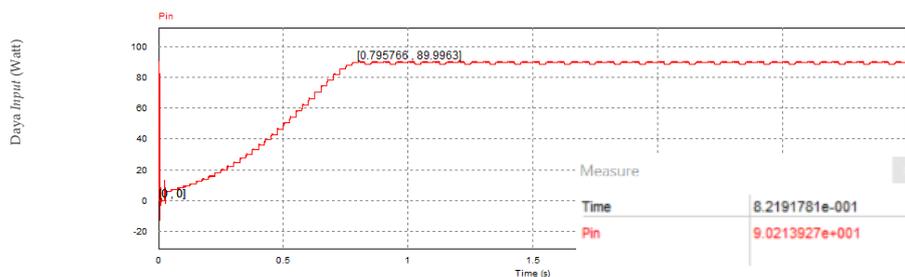
Tabel 3. Data Hasil Pengujian ZETA Konverter

Duty Cycle	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Vo Teori (V)	Pin (W)	Pout (W)	Error Vout (%)	Eff (%)
0.2	10	0.03	2.82	0.101	2.5	0.3	0.285	12.8	94.94
	15	0.051	3.85	0.16	3.75	0.765	0.709	2.667	92.67
	17.8	0.065	5.316	0.192	4.45	1.157	1.021	19.461	88.22
	20	0.07	5.2	0.218	5	1.4	1.312	4	93.74
0.4	10	0.153	7	0.222	6.667	1.53	1.361	5	88.95
	15	0.243	9.57	0.347	10	3.645	3.321	4.3	91.11
	17.8	0.293	11.51	0.417	11.867	5.215	4.800	3.006	92.03
	20	0.334	13.03	0.473	13.333	6.68	6.163	2.275	92.26
0.44	10	0.218	7.29	0.264	7.857	2.18	1.925	7.218	88.28
	15	0.558	14.57	0.527	11.786	8.37	7.678	23.624	91.74
	17.8	0.411	13.61	0.494	13.986	7.316	6.723	2.686	91.90
	20	0.466	15.43	0.56	15.714	9.32	8.641	1.809	92.71
0.5	10	0.357	9.4	0.341	10	3.57	3.205	6	89.79
	15	0.558	14.53	0.527	15	8.37	7.657	3.133	91.49
	17.8	0.671	17.42	0.411	17.8	11.944	7.160	2.135	59.94
	20	0.762	19.7	0.716	20	15.24	14.105	1.5	92.55

4.3. Pengujian Simulasi MPPT Incremental Conductance

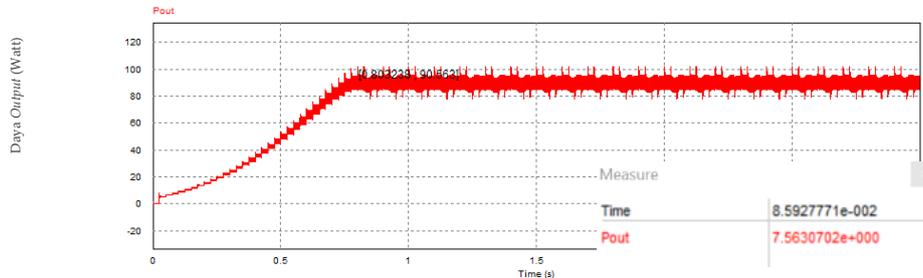
Pengujian simulasi ini juga diperlukan untuk mengetahui performa dari MPPT yang digunakan. Pengujian dilakukan menggunakan *software* PSIM, dimana algoritma dari MPPT akan diprogram menggunakan fitur *C-Block* yang berfungsi untuk mengkomputasi algoritma hingga dapat menghasilkan referensi *duty cycle* yang akan mengoperasikan konverter. Pada pengujian ini akan mengambil data performa dari MPPT *Incremental Conductance*. Saat dilakukan pengujian nilai *input* iradiasi akan divariasikan mulai dari 1000 W/m², 900 W/m², 800 W/m², 700 W/m², 600 W/m², dan 500 W/m². Sedangkan nilai input suhu bernilai konstan pada 25°C. Selanjutnya akan diamati nilai daya *input* dari modul panel surya (Watt), daya *output* dari konverter (Watt).

Pada pengujian ini akan dilihat dari respon MPPT *Incremental Conductance* pada saat kondisi modul panel surya normal atau dapat dikatakan tidak terjadi perubahan nilai iradiasi matahari.



Gambar 13. Daya Input MPPT Incremental Conductance

Pada Gambar 13 menunjukkan respon dari MPPT *Incremental Conductance* yaitu daya *output* dari modul panel surya yang digunakan sebagai sumber *input* untuk ZETA konverter. Dapat juga dilihat bahwa MPPT *Incremental Conductance* mencapai titik daya maksimum sebesar 89.9963 Watt dengan waktu pelacakan 0.795 detik.



Gambar 14. Daya Output MPPT Incremental Conductance

Pada Gambar 14 menunjukkan nilai daya *output* dari ZETA konverter yaitu sebesar 90.563 Watt yang diperoleh dari pembacaan sensor arus dan sensor tegangan pada sisi *output*. Selanjutnya dengan mengganti parameter nilai iradiasi pada simulasi, maka akan didapatkan data sebagai berikut.

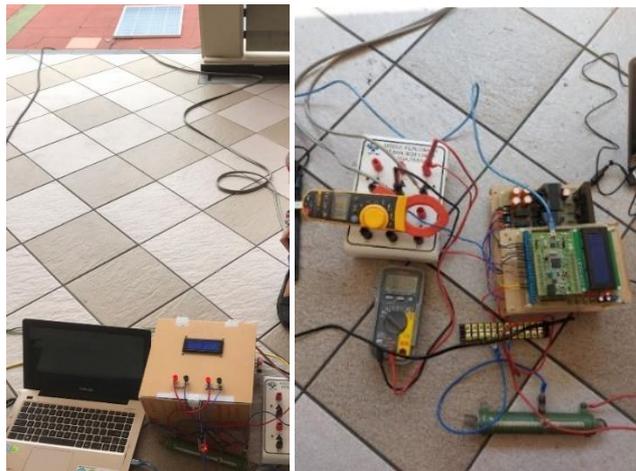
Tabel 4. Data Hasil Pengujian ZETA Konverter

Iradiasi Matahari (W/m ²)	Daya Input (Watt)	Daya Output (Watt)	Waktu Tracking (s)
1000	89.9963	90.563	0.795
900	82.0412	83.9078	0.762
800	73.1595	74.1867	0.724
700	63.8141	65.7534	0.657
600	55.9614	56.8924	0.638
500	46.8845	47.306	0.5902

Pada Tabel 4. merupakan data simulasi dari *close loop* MPPT *Incremental Conductance* dengan iradiasi 1000 W/m² hingga 500 W/m² dengan step 100.

4.1. Pengujian Integrasi *Hardware*

Pada pengujian integrasi sistem hardware dirancang sesuai dengan blok diagram dengan sumber yang digunakan adalah sumber *photovoltaic* dengan menggunakan metode kontrol secara *closed loop*. Untuk data yang diambil meliputi perubahan tegangan *input* dengan nilai *duty cycle* yang konstan sesuai dengan perencanaan. Beban yang digunakan adalah beban variabel resistor geser. Pengujian dimulai pada pukul 09.15 WIB – 12.15 WIB dengan panel surya seperti ditunjukkan pada Gambar 15 dibawah.

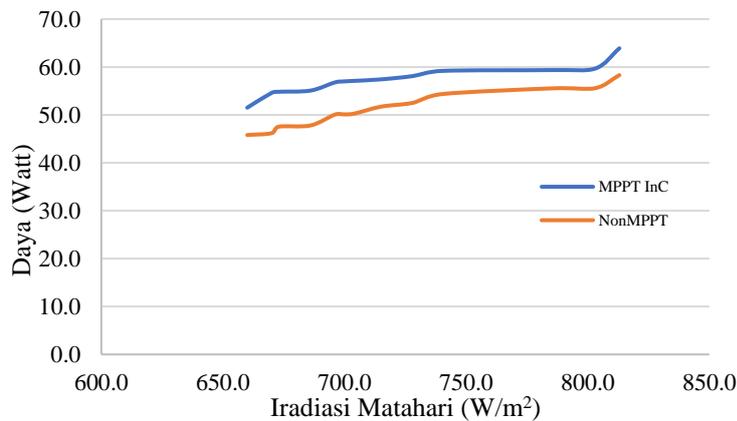


Gambar 15. Pengujian Integrasi Sistem dengan Sumber Photovoltaic

Setelah dilakukan pengujian integrasi sistem keseluruhan, maka diperoleh hasil data yang dapat dilihat pada pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Pengujian Integrasi Sistem

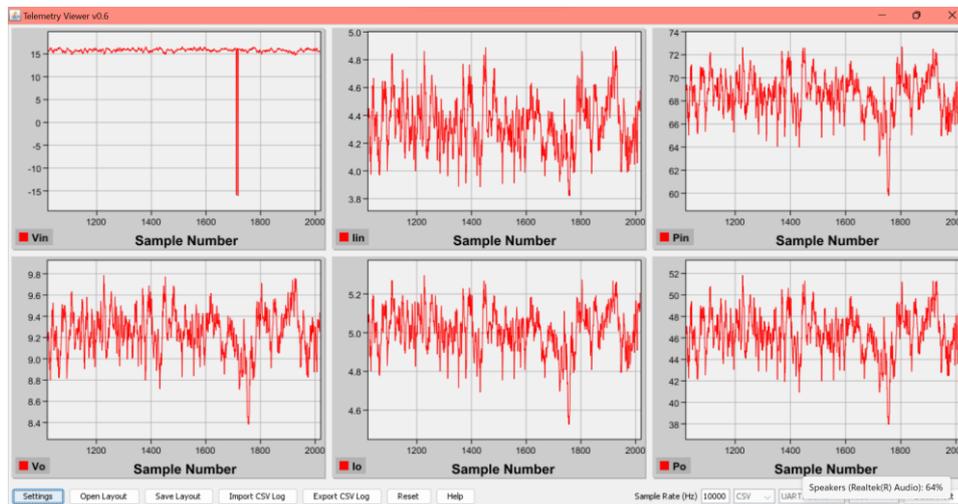
Jam	Iradiasi (W/m ²)	Waktu Tracking (s)	Daya (Watt)		Prosentase Kenaikan Daya MPPT InC (%)	Duty Cycle
			MPPT InC	Non MPPT		
9.15	660	4.25	57.4236	47.7972	16.764	37.4
9.30	670	4.50	51.5151	47.5452	7.706	37.8
9.45	673	4.50	54.8352	50.0634	8.702	36.6
10.00	686	4.75	58.1038	52.510	9.627	36.2
10.15	696	4.00	56.7820	50.1072	11.755	37.4
10.30	700	4.50	54.594	46.1895	15.395	37.4
10.45	704	5.00	55.08	45.8017	16.845	38.2
11.00	715	5.00	57.0024	50.2713	11.808	39
11.15	728	4.50	57.1102	51.7260	9.428	37
11.30	740	4.50	59.1864	55.5554	6.135	39.4
11.45	786	4.75	59.368	54.3456	8.460	37.8
12.00	803	4.50	59.6658	55.5786	6.850	37.4
12.15	813	4.25	63.9015	58.3100	8.750	39.2



Gambar 16. Grafik Data Hasil Integrasi Sistem

Dari Gambar 16 diperoleh daya rata-rata tanpa menggunakan MPPT sebesar 51,215 Watt dan dengan menggunakan MPPT *Incremental Conductance* diperoleh daya rata-rata

sebesar 57,274 Watt. Daya total yang diperoleh tanpa menggunakan MPPT diperoleh daya total sebesar 665,8011 Watt dan dengan menggunakan MPPT *Incremental Conductance* dengan daya total sebesar 744,568 Watt dengan pengambilan sampel data yang digunakan adalah 250 ms. Dari data pengujian yang telah diambil, maka terdapat kenaikan untuk daya ketika menggunakan control MPPT *Incremental Conductance*.



Gambar 17. Tampilan Data Logger pada Software Telemetry Viewer

Pada Gambar 17 menunjukkan tampilan *data logger* untuk mengetahui bahwa MPPT *Incremental Conductance* telah *tracking* atau tidak. Untuk setiap pengambilan data selama 250 ms.

5. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya sebagai berikut :

1. Simulasi pada software PSIM untuk MPPT *Incremental Conductance* pada kondisi normal untuk mencapai MPP membutuhkan waktu 0,795 detik.
2. Pengujian *hardware* ZETA konverter dihasilkan nilai persentase error sebesar 4,998% dan efisiensi konverter rata-rata sebesar 89,52%.
3. Pengujian integrasi sistem *close loop* MPPT *Incremental Conductance* dapat dikatakan berhasil dengan adanya nilai rata-rata kenaikan daya dari 51,215 Watt tanpa menggunakan MPPT menjadi 57,274 Watt, dengan pengambilan data selama 250 ms.
4. Daya total yang diperoleh tanpa menggunakan MPPT diperoleh sebesar 665,8011 Watt dan dengan menggunakan MPPT *Incremental Conductance* dengan daya total sebesar 744,568 Watt.
5. Presentasi kenaikan daya terbesar didapatkan pada iradiasi matahari 704 W/m² sebesar 16,845 %
6. Perolehan daya terbesar pada saat iradiasi matahari 813 W/m² sebesar 63,9015 Watt
7. Pengujian *hardware* MPPT *Incremental Conductance* menggunakan beban variabel R geser memiliki rata-rata untuk mencapai keadaan MPP membutuhkan waktu 4,5 detik.

Daftar Pustaka

- [1] R. Hasrul *et al.*, "Analisis Efisiensi Panel Surya Sebagai Energi Alternatif," vol. 5, no. 9, pp. 79–87, 2021.
- [2] I. Riyanto, Suparmoko, A. Octaviano, and B. Santoso, "A portable photovoltaic powerplant for emergency electrical power supply in disaster affected areas," *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 9.1-9.5, 2018, doi: 10.5013/IJSSST.a.19.01.09.
- [3] H. Widyantoro, S. Sulaiman, R. S. Wahjudi, and R. H. Subrata, "Perancangan Stabilisasi Daya Pada Solar Cell Menggunakan Metode Maximum Power Point Tracking (MPPT)," *Semin. Nas. Cendekiawan*, vol. 1, no. 5, pp. 1–6, 2019.
- [4] A. Fauzi, A. Hiendro, and Yaifurrahman, "Rancang Bangun Battery Control Unit Panel Surya Terhadap Efek Bayangan," no. 1, p. 7, 2019.
- [5] P. Widyantoro, "MPPT System Using Incremental Conductance for Solar Cell in Normal and Partial Shading Conditions," pp. 352–357, 2019.
- [6] H. T. Nurhayati, "Optimasi MPPT (Maximum Power Point Tracker) Pada Sistem Photovoltaic menggunakan Algoritma Incremental Conductance."
- [7] A. Rizqi and E. Wahjono, "Implementasi Maximum Power Point Tracking Berbasis Fuzzy Logic Controller Dengan Zeta Converter," no. April, pp. 36–44, 2021.
- [8] S. Pranoto, N. N. Rusli, I. A. T. Distribusi, and I. Pendahuluan, "Penyeimbangan Beban pada Trafo Distribusi Penyulang Akkarena di Unit Layanan Pelanggan Mattoanging PT PLN (Persero)," *Pros. Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 2, no. 1, pp. 37–46, 2020.
- [9] A. Kumar, M. Lal Azad, and R. Kumar Chandi, "Modelling of PV Arrays-An effective approach," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 14, no. 12, pp. 2850–2854, 2019, [Online]. Available: <http://www.ripublication.com>.
- [10] H. Rusiana Iskandar, Y. Bakti Zainal, and A. Purwadi, "Studi Karakteristik Kurva I-V dan P-V pada Sistem PLTS Terhubung Jaringan PLN Satu Fasa 220 VAC 50 HZ menggunakan Tracking DC Logger dan Low Cost Monitoring System," pp. 174–183, 2017, doi: 10.21063/pimimd4.2017.174-183.
- [11] A. . Rois, N. Gunawan, and B. Chayun, "Analisa Performansi dan Monitoring Solar Photovoltaic System (SPS) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Di Tuban Jawa Timur," *Tek. Pomits*, pp. 1–8, 2016.
- [12] Z. M. S. Elbarbary and M. A. Alranini, "Review of maximum power point tracking algorithms of PV system," *Front. Eng. Built Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 68–80, 2021, doi: 10.1108/febe-03-2021-0019.
- [13] Prachi Makhija, "Performance Analysis of Solar MPPT techniques Under Partial Shading Condition," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V9, no. 08, pp. 408–413, 2020, doi: 10.17577/ijertv9is080180.
- [14] M. A. Islam, A. Merabet, R. Beguenane, H. Ibrahim, and H. Ahmed, "Simulation based study of maximum power point tracking and frequency regulation for stand-alone solar photovoltaic systems," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 12, pp. 483–487, 2014, doi: 10.24084/repqj12.378.
- [15] M. S. Nkambule, A. N. Hasan, and A. Ali, "MPPT under partial shading conditions based on Perturb & Observe and Incremental Conductance MPPT under partial shading conditions based on Perturb & Observe and Incremental Conductance," no. November, 2019, doi: 10.23919/ELECO47770.2019.8990426.

- [16]S. UTAMI, S. SAODAH, and A. PUDIN, "Penggunaan Algoritma Incremental Conductance pada MPPT dengan Buck Converter untuk Pengujian Indoor dan Outdoor," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 6, no. 1, p. 97, 2018, doi: 10.26760/elkomika.v6i1.97.
- [17]D. N. Prakoso, A. Affandi, M. Arrijal, R. Abdurrahman, and N. A. Windarko, "Perbandingan Metode MPPT Incremental Conductance Incremental Resistance dan Hill Climbing dengan PSIM," *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 17, no. 2, p. 175, 2020, doi: 10.25105/jetri.v17i2.6076.
- [18]Kambli Omkar Vijay and P. Sriramalakshmi, "Comparison between Zeta Converter and Boost Converter using Sliding Mode Controller," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V5, no. 07, pp. 368–373, 2016, doi: 10.17577/ijertv5is070322.
- [19]J. Falin, "Designing DC/DC converters based on ZETA topology," *Analog Appl. J. Texas Instruments Inc.*, vol. 2Q, pp. 16–21, 2010.
- [20]Y. M. Kolewora, E. Firmansyah, and S. Suharyanto, "Mppt Berdasarkan Algoritma P&O Dan Ic Pada Interleaved-Flyback 250W," *Telematika*, vol. 11, no. 1, p. 18, 2018, doi: 10.35671/telematika.v11i1.603.

This Page Intentionally Left Blank