

Implementasi Particle Swarm Optimization pada Perancangan MPPT Berbasis Buck-Boost Converter

Jamaludin Arif Rohman¹, Ibrahim Nawawi², Bagus Fatkhurrozi³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar Magelang

jamaludinarifr@gmail.com¹ ibrahim_nw@untidar.ac.id², bagusf@untidar.ac.id³

Abstrak

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi energi surya yang tinggi dan sangat merata oleh karena itu penggunaan pembangkit listrik energi surya diharapkan dapat membantu ketersediaan energi listrik di daerah yang masih sulit terjangkau sistem distribusi dan transmisi. Namun dalam pembangkitan energi listrik yang dihasilkan modul PV sangat bergantung pada irradiance dan temperature di sekitar PV. Untuk meningkatkan efisiensi pada proses pembangkitan pada modul PV diperlukan sebuah maximum power point tracking (MPPT). MPPT merupakan sebuah perangkat yang digunakan untuk mendapatkan nilai daya maksimum yang dihasilkan dari kombinasi nilai arus dan tegangan yang optimal didalam kurva karakteristik I-V pada panel surya. MPPT tersusun atas DC-DC converter dan algoritma. Pada penelitian yang dilakukan menggunakan ZETA converter yang merupakan salah satu topologi dari buck-boost converter pada DC-DC converter dan menggunakan algoritma particle swarm optimization. Dari hasil penelitian yang dilakukan, penggunaan topologi ZETA converter dan algoritma particle swarm optimization pada sistem MPPT menghasilkan step response critically damped response pada saat nilai irradiance bernilai 100 W/m² dan 200 W/m², overdamped response pada saat nilai irradiance bernilai 300 W/m² sampai 1000 W/m².

Kata kunci: renewable energi, energi surya, *maximum power point tracking*, ZETA converter, *particle swarm optimization*.

Abstract

Indonesia is a country that has high and very evenly distributed solar energy potential, whence the use of solar energy power plants will be expected to help the availability of electrical energy in areas that are still difficult to reach by distribution and transmission systems. However, the generation of electrical energy produced by PV modules is very dependent on the irradiance and temperature around the PV. To increase efficiency in the generation process on the PV module, maximum power point tracking (MPPT) is needed. MPPT is a device used to obtain the maximum power value resulting from the combination of the optimal current and voltage values in the I-V characteristic curve of the solar panel. MPPT is composed of a DC-DC converter and algorithm. The research was conducted using the ZETA converter which is one of the topologies of the buck-boost converter on the DC-DC converter and using the particle swarm optimization algorithm. From the results of research conducted, the use of the ZETA converter topology and particle swarm optimization algorithm on the MPPT system produces a step response critically damped response when the irradiance value is 100 W/m² and 200 W/m², overdamped response when the irradiance value is 300 W/m². up to 1000 W/m².

Keywords: renewable energy, solar energy, *maximum power point tracking*, ZETA converter, *particle swarm optimization*.

I. PENDAHULUAN

Di Indonesia, energi surya memiliki potensi menjadi sumber penyedia EBT terbesar yaitu sebesar 2017,8 GWp. Tingginya potensi energi surya di Indonesia sangat dipengaruhi oleh potensi energi surya yang hampir merata di setiap wilayah [1].

Pada solar cell, proses konversi sinar matahari menjadi energi listrik disebut sebagai efek *photovoltaic*. Pada penerapannya medan listrik yang dihasilkan pada sebuah solar cell relatif lemah, sehingga untuk mendapatkan nilai tegangan yang lebih tinggi solar cell akan dirangkai secara seri sehingga biasanya disebut sebagai “strings of solar cell”. String tersebut akan dipasang dalam sebuah plastik atau dihipit diantara sebuah kaca sehingga biasa disebut sebagai *solar module* atau *PV module* [2].

PV module nantinya akan menghasilkan arus dan tegangan dengan nilai tertentu. Perkalian dari arus dan tegangan (I-V) akan mengarah pada daya keluaran tertinggi yang biasa disebut sebagai Maximum Power Point (MPP). Untuk mendapatkan MPP tersebut diperlukan sebuah perangkat yang dikenal sebagai Maximum Power Point Tracking (MPPT). Fungsi utama komponen MPPT adalah untuk mengatur tegangan keluaran yang dihasilkan PV module untuk mensuplai beban dengan energi maksimum [3].

MPPT atau *maximum power point tracking* merupakan sebuah DC-DC *converter* yang mengoptimisasi keluaran modul PV pada sisi beban. Jenis-jenis DC-DC *converter* yang dapat digunakan diantaranya. *Buck converter*, *boost converter*, *buck-boost converter*. Dari masing-masing jenis DC-DC *converter* memiliki topologinya masing-masing, dimana masing-masing topologi memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing[4].

Terdapat beberapa teknik MPPT yang dapat digunakan diantaranya adalah konvensional, *soft computing*, dan *hybrid*. Pada teknik konvensional terdapat beberapa algoritma yaitu: *perturb and observe*, *incremental conductance*, *hill-climbing*, *constant-voltage*. Pada teknik *soft computing* terdapat beberapa algoritma yang digunakan: *particle swarm optimization*, *genetic algorithm*, *artificial neural network*, *grey wolf algorithm*. Teknik hybrid merupakan teknik gabungan antara algoritma konvensional dengan algoritma *soft computing*, atau algoritma *soft computing* dengan algoritma *soft computing*[5].

Kombinasi antara DC-DC *converter* dan teknik algoritma MPPT yang digunakan akan sangat memengaruhi hasil dari pencarian *maximum power point* dalam kurva I-V dari panel surya. Berdasarkan pada permasalahan tersebut, maka

jenis DC-DC *converter* yang dipilih adalah *buck - boost converter* dengan topologi ZETA *converter*. Keuntungan dalam penggunaan *buck-boost converter* adalah memungkinkan untuk proses *step-up* atau *step-down* dari tegangan masukan. Dengan penggunaan topologi ZETA *converter*. Terdapat beberapa keuntungan yang didapatkan diantaranya menghasilkan efisiensi dan *voltage gain* yang lebih baik dibandingkan dengan topologi *buck-boost converter* lainnya, tegangan keluarannya bersifat *non-inverting*. Algoritma yang digunakan adalah *particle swarm optimization*. Penggunaan algoritma *particle swarm optimization* dikarenakan beberapa alasan diantaranya kompleksitas komputasi yang rendah, mudah dikombinasikan dengan algoritma MPPT konvensional, bersifat *global tracking* sehingga mampu mengatasi kondisi *partial shading*.

II. LANDASAN TEORI

A. Konversi Solar Energi dan Sistem Photovoltaic

Efek photovoltaic merupakan proses fisika yang terjadi pada sebuah photovoltaic cell dalam mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik. Ketika sebuah photovoltaic cell menerima sinar matahari, sejumlah berkas cahaya yang terserap menghasilkan energi listrik, sementara sisanya akan dipantulkan atau dibiarkan. Elektron pada atom photovoltaic cell akan terisi oleh energi yang diserap dari cahaya. Dengan energi tersebut, elektron tadi akan bergerak dari posisi semula pada material semikonduktor yang ada pada material photovoltaic cell. Perpindahan posisi elektron akan menghasilkan sebuah aliran listrik, yang arusnya akan diteruskan pada rangkaian eksternal yang terhubung dengan terminal *photovoltaic cell*. Dua lapisan semikonduktor yang berbeda ditempatkan saling terhubung satu sama lain untuk menginduksi medan listrik pada sebuah *photovoltaic cell* [3].

Lapisan pertama adalah tipe-n, dimana lapisan ini memiliki kelebihan elektron dan bermuatan negatif. Pada lapisan kedua adalah tipe-p, lapisan ini memiliki banyak lubang dan bermuatan positif. Ketika silikon tipe-n kelebihan elektron dan silikon tipe-p kelebihan lubang, maka ketika dua layer ini dihubungkan maka akan menghasilkan sebuah p/n junction pada permukaannya. Dengan demikian akan menciptakan sebuah medan listrik. Pada saat dua layer ini saling terhubung kelebihan muatan pada sisi tipe-n akan bergerak menuju sisi tipe-p. Hasilnya muatan positif akan terbentuk

pada sisi tipe-n dan sisi tipe-p akan bermuatan negative [3].

B. Panel Surya/PV module

PV module terdiri dari PV cells yang terhubung secara seri, yang pada dasarnya terbuat dari dua lapisan perangkat semikonduktor crystalline silicon (monocrystalline dan polycrystalline), atau perangkat thin-film, dengan tipe p-n. Prinsip pengoperasian yang mendasari teknologi ini adalah efek fotolistrik, dimana pada saat energi foton sama atau lebih besar dari bandgap material semikonduktor dapat membangkitkan dan membebaskan elektron. Ketika rangkaian PV dalam kondisi rangkaian tertutup (terhubung dengan beban ataupun dengan konverter), elektron bebas akan menghasilkan sebuah arus DC dari lapisan positif ke lapisan negatif untuk mengisi positive holes. Oleh karena itu, arus yang dihasilkan oleh PV module secara langsung bergantung pada jumlah foton yang diterima oleh PV module dan iradiasi matahari, semakin tinggi iradiasi matahari maka lebih banyak foton yang dihasilkan [6].

Karakteristik dari sebuah PV module atau PV cell, bersifat nonlinear dan sangat tergantung pada iradiasi matahari dan temperatur. PV cell dapat dimodelkan dengan rangkaian equivalent yang ditampilkan pada gambar 2.1, dengan photocurrent paralel dengan dioda, sebuah shunt resistor R_{sh} dan sebuah resistor seri R_s . Gambar 2.1 secara matematis dapat dihasilkan berdasarkan persamaan kirchoff [6].

$$I = I_{ph} - I_D \quad (1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{AK_B T}} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (2)$$

Dengan V merupakan tegangan keluaran PV, I merupakan arus keluaran PV, I_{ph} merupakan Photocurrent, I_D merupakan arus dioda, I_0 merupakan arus saturasi, A faktor ideal, q merupakan muatan elektron, k_B merupakan konstanta boltzmann, T merupakan temperature junction, R_s merupakan resistansi seri, R_{sh} merupakan resistansi shunt.

C. Karakteristik Kurva I-V Sistem Photovoltaic

Sistem PV memiliki karakteristik arus-tegangan yang spesial. Ketika arus yang dihasilkan pada sistem PV terlalu tinggi, maka tegangan yang dihasilkan sistem PV akan menurun. Kurva karakteristik I-V berbeda-beda tergantung pada kondisi radiasi dan temperatur. Karenanya kurva dapat diperoleh dengan mengubah resistansi beban dan mengukur tegangan keluaran untuk nilai arus yang berbeda-beda. Kurva I-V akan melewati dua titik yaitu zero voltage dan zero current[7].

Untuk mendapatkan daya maksimum dari sebuah sistem PV untuk kondisi lingkungan (radiasi dan temperatur) yang konstan hanya dapat dihasilkan dari satu pasang arus dan tegangan pada kurva I-V. Pada kurva I-V, maximum power point dihasilkan ketika hasil perkalian antara arus dan tegangan bernilai maksimum. Meskipun nilai arus bernilai maksimum, tidak akan ada daya yang dihasilkan karena nilai tegangannya sama dengan nol (kondisi I_{sc}). Dan juga meskipun nilai tegangan bernilai maksimum, daya yang dihasilkan tetap akan sama dengan nol karena nilai arusnya sama dengan nol (kondisi V_{oc}). Maximum power point dihasilkan diantara kedua titik tersebut (I_{sc} dan V_{oc}). Maximum power point merepresentasikan efisiensi maksimum dari sistem PV dalam mengkonversi sinar matahari menjadi energi listrik [3].

D. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Kondisi radiasi dan temperatur memengaruhi karakteristik arus dan tegangan (I-V) pada solar cell. Maka arus dan tegangan harus dikendalikan untuk mendapatkan nilai daya maksimum dari sistem PV. Teknik MPPT digunakan untuk mendapatkan daya maksimum yang tersedia dari solar cell dengan cara mengendalikan arus dan tegangan. Beberapa teknik MPPT konvensional yang paling umum dan efisien yaitu *perturb and observe*, *incremental conductance*, *hill climbing*, dan *constant voltage*. Selain teknik MPPT konvensional juga terdapat teknik soft computing diantaranya *fuzzy logic*, ANN, *Adaptive Neuro-Fuzzy*, *Differential Evolution* and *Genetic Algorithm* [5].

E. Particle Swarm Optimization

Particle swarm optimization atau biasa dikenal PSO adalah salah satu algoritma meta-heuristik yang mendapatkan perhatian cukup besar dalam aplikasi *engineering*. PSO pertama kali diperkenalkan pada tahun 1995 oleh Kennedy dan Eberhart. PSO merupakan sebuah metode yang

terinspirasi oleh perilaku alami dari sekawanan burung. Pada dasarnya teori akan menjelajah suatu area spesifik yang disebut sebagai ruang solusi, dimana setiap lokasi memiliki tingkat kemungkinan untuk penyelesaian masalah. PSO akan menggerakkan setiap partikel di seluruh ruang solusi untuk menentukan solusi optimal menurut pengalaman dari setiap individu dari partikel dan partikel lain yang saling berdekatan selama optimasi. Oleh karena itu, setiap partikel yang terlibat dalam proses optimasi menggunakan memori partikel untuk memodifikasi kesesuaian partikel dengan mengikuti perilaku partikel yang berhasil dalam suatu kawanan. Prosedure PSO dimulai dengan *random* partikel (inisialisasi), dilanjutkan dengan mencari solusi optimal dalam iterasi sebelumnya (gerakan), dan kemudian mengevaluasi kualitas partikel sesuai dengan *fitness function* [5].

Dasar algoritma PSO dalam mendefinisikan posisi selanjutnya dari kandidat solusi adalah sebagai berikut.

$$V_i^{k+1} = w \times V_i^k + r_1 \times c_1 \times (P_{bi} - X_i^k) + r_2 \times c_2 \times (G_b - X_i^k) \quad (3)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^k \quad (4)$$

Dimana i merepresentasikan variabel vektor dari optimisasi, k merupakan jumlah iterasi, V_i^k dan X_i^k masing - masing merepresentasikan kecepatan dan posisi dari variabel i di dalam iterasi k , w merupakan faktor pembobotan, c_1 merupakan koefisien kognitif dari setiap partikel individu, c_2 merupakan koefisien sosial pada semua partikel, r_1 dan r_2 variabel random yang dipilih pada rentang $[0,1]$. Parameter acak ini bertujuan untuk menjaga pergerakan stokastik dalam iterasi. Untuk mempertahankan ruang pencarian pada area tertentu, nilai kecepatan diatur pada kisaran $[0, V_{max}]$. Pada PSO parameter w , c_1 , c_2 sangat bisa diubah – ubah[5].

F. ZETA converter

Pada rangkaian dasar buck-boost converter memberikan keluaran yang bersifat inverting, untuk mengatasi permasalahan ini maka diperlukan topologi *buck-boost converter* yang menghasilkan keluaran *non-inverting*. *SEPIC*, *ZETA*, dan *two-switch buck-boost converter* merupakan tiga topologi *buck-boost converter* yang paling banyak dikenal [8].

Topologi *ZETA converter* merupakan sebuah topologi dimana membutuhkan dua buah induktor dan sebuah kapasitor seri, yang biasanya kapasitor ini disebut *flying capacitor*. *ZETA converter* menjadi salah satu opsi untuk mengatur tegangan input yang tidak terregulasi. Berikut persamaan yang digunakan dalam mendesain sebuah *ZETA converter* yang berada dalam kondisi *continous-conduction mode* (CCM) [9].

Duty cycle (D) untuk sebuah *ZETA converter* dalam kondisi berikut ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$D_0 = \frac{V_{out}}{V_{in}+V_{out}} \quad (5)$$

$$D_{max} = \frac{V_{out}}{V_{inmin}+V_{out}} \quad (6)$$

$$D_{min} = \frac{V_{out}}{V_{inmax}+V_{out}} \quad (7)$$

Dimana D merepresentasikan *duty cycle*, D_{max} merepresentasikan *duty cycle* maksimum, D_{min} merepresentasikan *duty cycle* minimum, V_{out} merepresentasikan tegangan keluaran V_{inmin} merepresentasikan tegangan input minimum V_{inmax} merepresentasikan tegangan input maksimum.

Persamaan untuk menentukan komponen pasif dilakukan dengan menghitung arus ripple pada induktor ($\Delta I_{L(PP)}$), kemudian besar induktor (L_1 dan L_2), kapasitor pada sisi output (C_{out}), *flying* kapasitor (C_c), kapasitor pada sisi input (C_{in}) ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\Delta I_{L(PP)} = \frac{V_{out}}{V_{inmin}+V_{out}} \quad (8)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{1}{2} \times \frac{V_{in} \times D_{max}}{I_{out} + F_{sw}} \quad (9)$$

$$C_{out} = \frac{\Delta I_{L(PP)}}{8 \times \Delta C_{out} \times F_{sw}} \quad (10)$$

$$C_{in} = \frac{D_{max} \times I_{out}}{\Delta V C_{in} \times F_{sw}} \quad (11)$$

$$C_c = \frac{D_{max} \times I_{out}}{\Delta V C_c \times F_{sw}} \quad (12)$$

$\Delta I_{L(PP)}$ merupakan *ripple* arus pada induktor, I_{out} merepresentasikan arus keluaran, C_{out} merepresentasikan kapasitor pada sisi output, C_{in} merepresentasikan pada sisi input, C_c merepresentasikan *flying* kapasitor, F_{sw} merepresentasikan frekuensi *switching*, $\Delta V C_{out}$ merepresentasikan ripple tegangan kapasitor

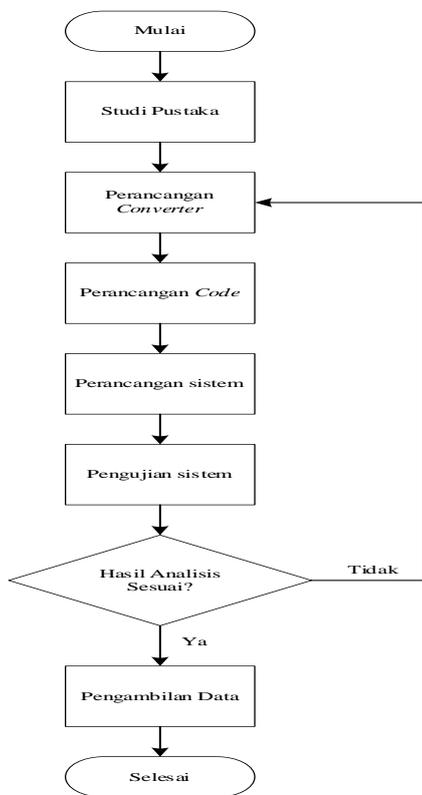
output, ΔV_{Cin} merepresentasikan ripple tegangan kapasitor input, ΔV_{Cc} merepresentasikan ripple tegangan *flying* kapasitor

III. METODE PENELITIAN

A. Alat dan Bahan

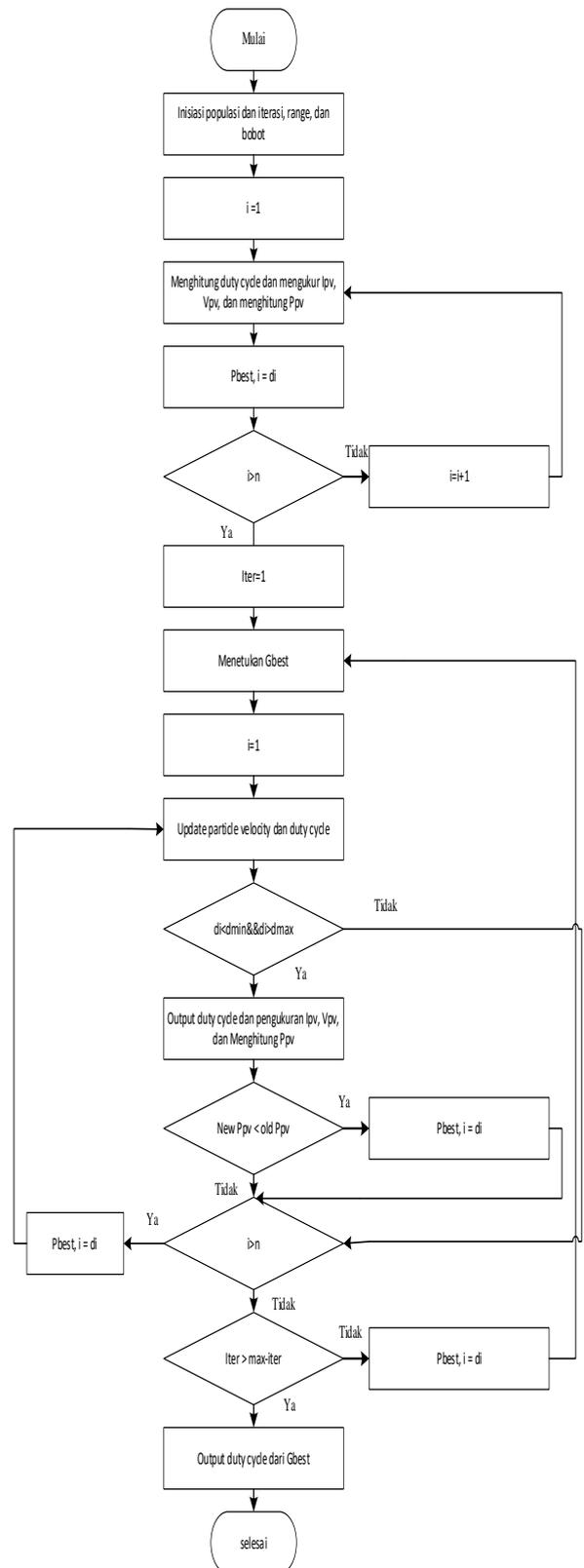
- 1) Laptop HP Series AMD A8-7410 APU with AMD Radeon R5 Graphics.
- 2) Software MATLAB R2019a.
- 3) Software MATLAB/Simulink.
- 4) Rangkaian ZETA converter.

B. Diagram Alir Prosedure Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir prosedure penelitian

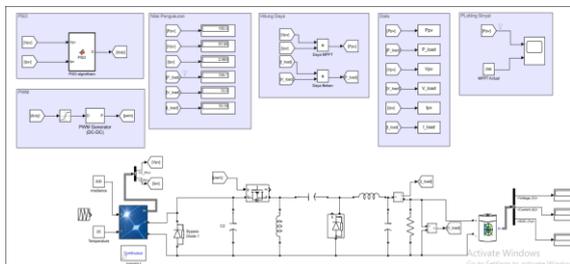
C. Diagram Alir Particle Swarm Optimization



Gambar 3.2 Diagram alir *particle swarm optimization*

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Simulasi pada Simulink



Gambar 4.1 Gambar rancangan simulasi

Pada perancangan yang dibuat pada simulink terdiri dari beberapa blok sistem yaitu blok function *particle swarm optimization*, blok PWM generator, blok nilai pengukuran, blok hitung daya, blok data, dan blok plotting sinyal.

- 1) Blok function *particle swarm optimization* merupakan blok yang digunakan untuk menyimpan dan menjalankan program *particle swarm optimization* yang telah dibuat. Pada blok ini memiliki dua masukan yaitu tegangan PV dan arus PV dan satu keluaran yaitu duty cycle.
- 2) Blok PWM generator merupakan blok yang digunakan untuk menghasilkan PWM yang digunakan untuk masukan pada MOSFET. Masukan dari blok ini merupakan nilai duty cycle yang dihasilkan dari blok function *particle swarm optimization*.
- 3) Blok nilai pengukuran merupakan blok yang digunakan untuk menampilkan nilai-nilai parameter seperti daya panel surya, daya beban, tegangan panel surya, tegangan beban, arus panel surya, dan arus beban.
- 4) Blok hitung daya merupakan blok yang digunakan untuk menghasilkan nilai daya. Blok ini terdiri dari dua input yaitu tegangan dan arus.
- 5) Blok data merupakan blok yang digunakan untuk menyimpan data kedalam workspace sehingga mempermudah dalam memproses data.
- 6) Blok plotting sinyal merupakan blok yang digunakan untuk mempermudah dalam proses menganalisis steps respons yang dihasilkan dari sistem.

B. Hasil Penelitian dengan Bobot = 0.1

Hasil penelitian dengan memberikan bobot sebesar 0.1 pada algoritma *particle swarm optimization* ditunjukkan pada tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Tabel hasil penelitian

Irradiance (W/m ²)	Voltage PV (V)	Voltage load (V)	Arus PV (A)	Arus Beban (A)
100	55,59	12,17	0,86	1,89
200	57,78	12,18	1,73	7,24
300	59,02	12,20	2,59	12,17
400	59,43	12,22	3,46	14,28
500	64,51	12,24	4,32	19,66
600	82,86	12,29	5,17	30,70
700	95,10	12,33	6,02	41,12
800	105,67	12,38	6,85	51,92
900	114,14	12,42	7,62	62,21
1000	121,45	12,46	8,23	71,18

Tabel 4.2 Tabel hasil penelitian

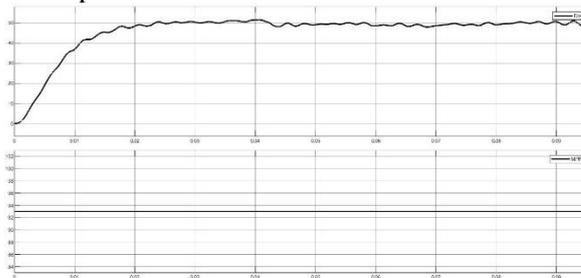
Irradiance (W/m ²)	Daya MPPT PV (W)	Daya Beban (W)	Daya MPPT Aktual (W)	Selisih Daya MPPT PV dengan Daya MPPT Aktual (%)
100	48,07	23,00	93	48
200	99,90	88,26	193	48
300	153,04	148,55	294	48
400	205,42	174,50	395	48
500	278,51	240,67	497	44
600	428,17	377,27	598	28
700	572,03	507,06	699	18
800	723,42	642,67	799	9
900	869,87	772,80	898	3
1000	999,38	887,10	1000	0

Berdasarkan data pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2 pada saat nilai *irradiance* bernilai 100 W/m², nilai tegangan MPPT yang dihasilkan PV sebesar 55,59 V, nilai tegangan yang dihasilkan pada sisi beban sebesar 12,17 V, nilai arus keluaran PV sebesar 0,86 A, nilai arus yang dihasilkan pada sisi beban sebesar 1,89 A, daya yang dihasilkan PV sebesar 48,07 W, dan daya yang dihasilkan pada sisi beban sebesar 23,00 W. Nilai daya MPPT secara aktual sebesar 93 W sehingga pada saat *irradiance* bernilai 300W/m² nilai selisih daya MPPT PV dengan daya MPPT aktual sebesar 48%.

Pada saat nilai *irradiance* 1000 W/m² nilai tegangan MPPT yang dihasilkan PV sebesar 121,45 V, nilai tegangan pada sisi beban sebesar 12,46 V, nilai arus yang dihasilkan PV sebesar 8,23 A, nilai arus yang dihasilkan pada sisi beban sebesar 71,18 A, sehingga daya MPPT yang dihasilkan PV sebesar 999,38 W, dan daya yang

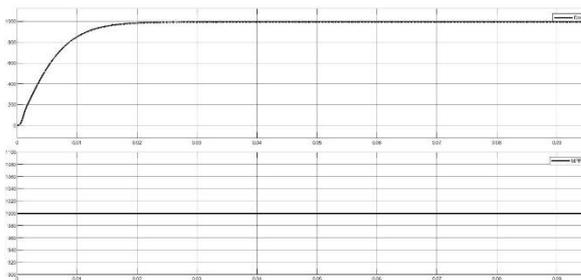
dihasilkan pada sisi beban sebesar 887,10 W. Nilai selisih daya MPPT yang dihasilkan PV dengan nilai daya MPPT aktual sebesar 0%.

Berdasarkan hasil tersebut semakin tinggi nilai irradianse yang diberikan maka nilai efisiensi dari sistem MPPT yang dirancang akan semakin meningkat. Selain itu nilai tegangan pada sisi beban tetap bernilai konstan dimana nilai tegangan berkisar pada 12 V.



Gambar 4.2 Hasil plotting irradianse 100 W/m²

Pada saat sistem diberikan irradianse sebesar 100 W/m² *step response* yang dihasilkan sistem adalah *critically damped response*. *Critically damped response* merupakan sebuah kondisi yang terjadi ketika nilai output tidak melewati nilai input tetapi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai targetnya akhirnya akan menjadi lebih lama. Kondisi *critically damped response* mengakibatkan sistem terus mengalami osilasi sehingga sistem tidak dapat menemukan kestabilannya. *Rise time* yang dibutuhkan selama 9,465 ms, *peak time* yang dibutuhkan selama 31,214 ms.



Gambar 4.3 Hasil plotting irradianse 1000 W/m²

Pada saat sistem diberikan irradianse sebesar 1000 W/m² *step response* yang dihasilkan sistem adalah *overdamped response*. *Overdamped response* merupakan sebuah kondisi yang terjadi ketika respon yang dihasilkan mencapai nilai input dengan cepat dan tidak melewati batas input

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan penggunaan topologi ZETA converter dan penggunaan algoritma *particle swarm optimization* pada MPPT berbasis *buck-boost converter* memiliki karakteristik memberikan nilai *critically damped response* pada saat irradianse bernilai 100 W/m² *overdamped response* pada saat irradianse bernilai 1000 W/m².

Pada MPPT berbasis *buck-boost converter* dengan menggunakan topologi ZETA converter dan algoritma *particle swarm optimization* nilai efisiensi yang dihasilkan akan semakin meningkat pada saat nilai irradianse semakin tinggi. Dengan catatan suhu berada pada kondisi konstan (25°C). Tegangan keluaran yang dihasilkan pada sisi beban juga stabil pada 12 V.

REFERENSI

- [1] Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, "Indonesia Energy Outlook 2019," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2019.
- [2] M. Kamimoto and I. Kudo, *Space solar electric power generation*, vol. 55, no. 2. 1991.
- [3] M. H. Rashid, *Power Electronics and Applications Series*. 2018.
- [4] V. Jaya and Sujono, "Perancangan Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Turbin Angin PMSG Kapasitas 300 Watt Dengan Algoritma Fuzzy," *J. Maest.*, vol. 1, no. 2, pp. 323–329, 2018.
- [5] A. M. Eltamaly and A. Y. Abdelaziz, *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*. 2012.
- [6] H. Abu-Rub, M. Malinowski, and K. Al-Haddad, *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, vol. 9781118634. Wiley-IEEE Press, 2014.
- [7] 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.
- [8] H. Fan, "Design tips for an efficient non-inverting buck-boost converter," *Analog Appl. J.*, vol. 3, pp. 20–25, 2015, [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/slyt584/slyt584.pdf?ts=1607342904526&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [9] J. Falin, "Designing DC/DC converters based on ZETA topology," *Analog Appl. J. Texas Instruments Inc.*, vol. 2Q, pp. 16–21, 2010.