PERBANDINGAN *BOOST, BUCK,* DAN *SEPIC CONVERTER* PADA SISTEM MPPT BERBASIS ALGORITMA *PERTURB AND OBSERVE*

Raditya Wahyu Pratomo[1], Muhammad Fadil Suyoto[1], Muhammad Hilmi Farras[1 *)], dan Tatyantoro Andrasto[1]

[1]Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

[*]*Penulis korespondensi, E-mail: hilmifrrs@students.unnes.ac.id*

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi global mendorong pengembangan teknologi energi terbarukan. Salah satu sumber energi yang menjanjikan adalah sistem fotovoltaik (PV). Namun, efisiensi sistem PV sangat dipengaruhi oleh perubahan intensitas iradiasi dan suhu lingkungan. Akibatnya, sistem sering kali tidak beroperasi pada titik daya maksimum. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan teknik *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Dalam penelitian ini, algoritma *Perturb and Observe* (P&O) dipilih karena strukturnya yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja tiga jenis konverter DC-DC, yaitu *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC* dalam sistem MPPT berbasis algoritma P&O. Metode yang digunakan adalah simulasi berbasis MATLAB/Simulink dengan skenario variasi iradiasi. Parameter evaluasi meliputi efisiensi MPPT, waktu pencapaian titik daya maksimum, dan kestabilan output konverter. Hasil menunjukkan bahwa ketiga konverter mampu melakukan pelacakan MPP dengan baik. Namun, konverter *SEPIC* menunjukkan performa paling optimal dengan efisiensi sebesar 99,93%, waktu respon sebesar 0,4 detik, dan output yang paling stabil. Penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis konverter sangat berpengaruh terhadap efektivitas sistem MPPT. Kombinasi algoritma P&O dengan konverter *SEPIC* terbukti memberikan kinerja terbaik dalam menghadapi kondisi iradiasi yang dinamis.

Kata kunci: MPPT, Perturb and Observe, Konverter Boost, Buck, SEPIC

Abstract

The increasing global energy demand has encouraged the development of renewable energy technologies. One of the most promising sources is photovoltaic (PV) systems. However, the efficiency of PV systems is highly influenced by irradiance intensity and ambient temperature changes. As a result, the system often fails to operate at the maximum power point. Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques are applied to overcome this issue. The Perturb and Observe (P&O) algorithm was selected for this study due to its simple structure and ease of implementation. This research evaluates the performance of three types of DC-DC converters, Boost, Buck, and SEPIC, in an MPPT system based on the P&O algorithm. The method used is a MATLAB/Simulink-based simulation under irradiance variation scenarios. Evaluation parameters include MPPT efficiency, time to reach the maximum power point, and converter output stability. The results show that all converters are capable of tracking the MPP effectively. However, the SEPIC converter demonstrates the most optimal performance, with an efficiency of 99.93%, a response time of 0.4 seconds, and the most stable output. This study indicates that the selection of converter type significantly affects the effectiveness of the MPPT system. The P&O algorithm and the SEPIC converter combination deliver the best performance under dynamic irradiance conditions.

Keywords: MPPT, Perturb and Observe, Boost, Buck, SEPIC converter

1. Pendahuluan

Permintaan energi global terus meningkat, mendorong percepatan transisi menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Ketergantungan yang berkelanjutan pada bahan bakar fosil telah berkontribusi signifikan terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim global. Menurut laporan dari *International Energy Agency*, konsumsi energi dunia diperkirakan akan meningkat sebesar 30% pada 2040, dengan kontribusi energi terbarukan, terutama energi surya, yang semakin dominan [1]. Kondisi ini mendorong berbagai negara untuk beralih ke energi terbarukan sebagai solusi jangka panjang [2]. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi surya menjadi salah satu pilihan yang paling menjanjikan karena sifatnya yang ramah lingkungan, ketersediaannya yang melimpah, serta fleksibilitas penerapannya di berbagai wilayah geografis [3-5].

Meskipun energi surya menawarkan banyak keunggulan, salah satu tantangan utamanya adalah efisiensi sistem konversi energi dari panel surya itu sendiri. Output daya dari panel sangat dipengaruhi oleh perubahan intensitas cahaya matahari, suhu lingkungan, dan karakteristik beban [6]. Kondisi ini menyebabkan titik kerja panel seringkali tidak berada pada titik daya maksimum [7]. Untuk mengatasi masalah ketidaksesuaian titik daya maksimum pada panel surya, berbagai teknik telah dikembangkan, salah satunya adalah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT berfungsi untuk memastikan panel surya beroperasi pada titik daya maksimum, yang secara langsung meningkatkan efisiensi konversi energi [8][9].

Salah satu algoritma MPPT yang masih banyak digunakan hingga saat ini adalah *Perturb and Observe* (P&O) [10]. Hal ini disebabkan oleh struktur algoritmanya yang sederhana, kebutuhan komputasi yang rendah, serta kemampuannya untuk bekerja secara efektif pada kondisi lingkungan yang stabil [11]. Algoritma P&O beroperasi dengan cara memberikan gangguan kecil pada tegangan atau arus, kemudian mengamati perubahan daya yang terjadi; jika daya meningkat, gangguan dilanjutkan dalam arah yang sama, dan sebaliknya [12]. Algoritma ini masih banyak digunakan dalam sistem fotovoltaik karena efisiensi biaya dan kemudahan implementasinya [13]. Meski kurang responsif terhadap perubahan iradiasi yang cepat dan menimbulkan osilasi di sekitar titik maksimum daya, algoritma ini tetap relevan dalam aplikasi praktis [14]. Selain itu, P&O sering dijadikan dasar pengembangan metode hibrida seperti FLC-P&O untuk meningkatkan performa pada kondisi dinamis [15]. Efektivitas dan stabilitas operasionalnya menjadikan algoritma ini terus digunakan secara luas pada sistem fotovoltaik.

Dalam implementasi algoritma MPPT, komponen utama yang sangat berperan adalah konverter DC-DC. Konverter ini mengatur tegangan keluaran panel surya agar sesuai dengan kebutuhan beban atau sistem penyimpanan energi [16]. Tiga jenis konverter yang sering digunakan dalam aplikasi MPPT adalah *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC*. Konverter *Boost* meningkatkan tegangan input untuk memenuhi kebutuhan beban saat tegangan panel surya lebih rendah [17]. Sebaliknya, konverter *Buck* menurunkan tegangan input agar sesuai dengan sistem yang memerlukan tegangan lebih rendah [18]. Sedangkan konverter *SEPIC* mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran baik ketika tegangan input lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan target [19]. Karakteristik teknis yang berbeda, seperti efisiensi dan respons terhadap perubahan kondisi, membuat evaluasi kinerja konverter-konverter tersebut sangat penting dalam menilai efektivitas algoritma *Perturb and Observe* pada sistem MPPT.

Optimalisasi daya pada sistem energi surya merupakan aspek yang krusial. Pemilihan jenis konverter DC-DC juga berpengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan algoritma *Perturb and Observe* dalam sistem *Maximum Power Point Tracking*, serta melakukan analisis komparatif terhadap kinerja tiga jenis konverter DC-DC, yaitu *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC*. Analisis difokuskan pada kemampuan masing-masing konverter dalam menjaga operasi pada titik daya maksimum di bawah variasi kondisi iradiasi dan suhu, serta mengevaluasi efisiensi konversi daya yang diperoleh. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem konversi energi surya yang lebih efisien, adaptif, dan andal, khususnya dalam menghadapi dinamika lingkungan operasional yang kompleks.

2. Metode

2.1. Desain Umum Sistem

Penelitian ini dilakukan melalui simulasi berbasis MATLAB/Simulink untuk menganalisis kinerja sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) menggunakan algoritma *Perturb and Observe* (P&O) pada tiga jenis konverter DC-DC, yaitu *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC*. Sistem terdiri atas beberapa komponen utama: panel surya, konverter DC-DC, beban, dan pengontrol MPPT. Panel surya bertindak sebagai sumber energi yang menghasilkan daya listrik sesuai dengan kondisi iradiasi matahari. Daya yang dihasilkan kemudian dikondisikan oleh konverter DC-DC untuk menyesuaikan tegangan dan arus dengan karakteristik beban.

Algoritma P&O digunakan untuk mengatur *duty cycle* konverter secara otomatis guna mempertahankan operasi sistem pada titik daya maksimum (MPP). Algoritma ini bekerja dengan cara memberikan perubahan kecil secara periodik pada *duty cycle*, memantau perubahan daya, dan menentukan arah penyesuaian untuk mencapai MPP secara efisien.

Simulasi dilakukan pada tiga konfigurasi sistem, masing-masing dengan jenis konverter *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC*, untuk membandingkan kinerja ketiganya dalam aspek efisiensi pelacakan MPP, stabilitas sistem, dan respons terhadap variasi kondisi iradiasi dan suhu. Selain itu, analisis juga difokuskan pada pengaruh karakteristik masing-masing konverter terhadap efektivitas keseluruhan sistem MPPT.

2.2. Desain Algoritma *Perturb and Observe*

Algoritma *Perturb and Observe* (P&O) merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan dalam sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mengoptimalkan daya yang diambil dari panel surya. Algoritma ini bekerja dengan memantau tegangan dan arus keluaran panel surya, menghitung daya yang dihasilkan, serta menentukan perubahan daya antar iterasi untuk memutuskan arah penyesuaian *duty cycle* konverter. Langkah kerja algoritma P&O secara umum meliputi:

2.2.1. Sampling Tegangan dan Arus

Algoritma dimulai dengan mengambil sampel tegangan (V) dan arus (I) dari panel surya pada waktu tertentu. Berdasarkan data ini, daya listrik (P) dihitung menggunakan persamaan:

$$P = V \times I \qquad (1)$$

di mana P adalah daya yang dihasilkan oleh panel surya.

2.2.2. Menghitung Daya

Tegangan dan arus yang telah diukur digunakan untuk menghitung daya. Nilai daya ini disimpan sebagai referensi untuk dibandingkan dengan daya pada iterasi sebelumnya.

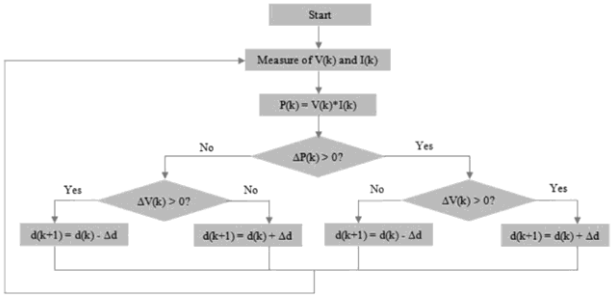
2.2.3 Membandingkan Perubahan Daya

Perubahan daya antar dua iterasi dibandingkan untuk menentukan arah perubahan *duty cycle*. Jika daya meningkat dibandingkan dengan iterasi sebelumnya, maka algoritma mengarahkan sistem untuk mempertahankan arah perubahan *duty cycle*. Sebaliknya, jika daya menurun, algoritma akan membalikkan arah perubahan *duty cycle*.

2.2.4 Mengatur *Duty cycle*

Berdasarkan hasil perbandingan perubahan daya, *duty cycle* konverter akan disesuaikan. Jika daya meningkat, *duty cycle* akan dipertahankan atau ditingkatkan untuk terus mendekati titik daya maksimum. Jika daya menurun, *duty cycle* akan dikurangi untuk mencari titik daya maksimum yang lebih tinggi. Proses ini diulang secara kontinu hingga sistem mencapai atau mendekati titik daya maksimum.

Diagram blok untuk algoritma *Perturb and Observe* dapat digambarkan sebagai berikut pada Gambar 1.

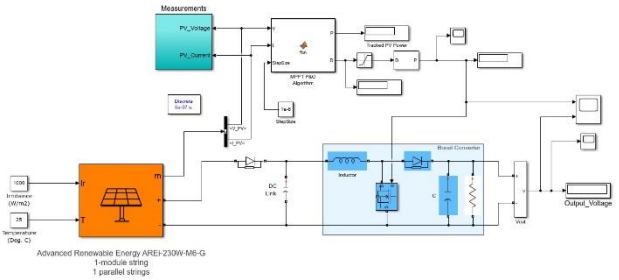


Gambar 1. Algoritma P&O

2.3. Desain dan Konfigurasi Konverter

Penelitian ini menggunakan tiga jenis konverter DC-DC, yaitu *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC* untuk mendukung sistem MPPT berbasis algoritma *Perturb and Observe*. Pemilihan ketiga konverter tersebut dilakukan untuk mengevaluasi kinerja masing-masing jenis konverter dalam mengoptimalkan daya yang dihasilkan dari panel surya, sekaligus menilai pengaruh arsitektur konverter terhadap efisiensi dan stabilitas sistem secara keseluruhan.

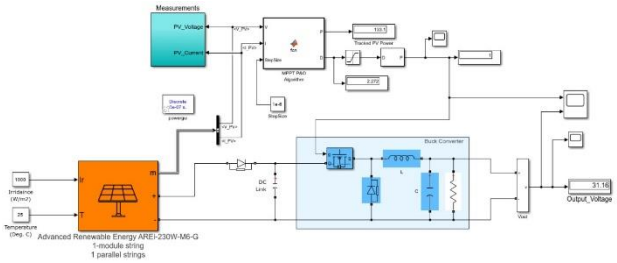
Konverter *Boost* bekerja dengan prinsip meningkatkan tegangan *input* menjadi lebih tinggi pada sisi *output*. Proses dilakukan dengan menyimpan energi pada induktor ketika saklar aktif, kemudian energi dilepaskan ke beban saat saklar nonaktif dengan bantuan dioda. Saat saklar tertutup, arus mengalir melalui induktor sehingga energi tersimpan dalam bentuk medan magnet. Ketika saklar terbuka, induktor berusaha mempertahankan arus yang menyebabkan tegangan output naik melampaui tegangan input. Dengan cara ini, konverter *Boost* sesuai digunakan ketika tegangan panel surya lebih rendah dibanding kebutuhan beban. Konfigurasi rangkaian *Buck* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian Konverter *Boost*

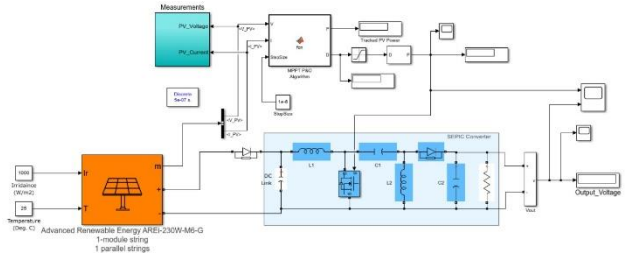
Konverter *Buck* berfungsi menurunkan tegangan *input* agar sesuai dengan tegangan *output* yang lebih rendah. Prinsip kerjanya mirip dengan pengaturan siklus kerja pada saklar. Ketika saklar aktif, arus mengalir ke induktor dan beban, lalu induktor menyimpan energi. Saat saklar nonaktif, energi yang tersimpan pada induktor dilepaskan ke beban melalui dioda sehingga tegangan tetap stabil. Tegangan *output* konverter *Buck* selalu lebih rendah daripada

tegangan *input* sehingga cocok digunakan ketika tegangan panel surya lebih tinggi dari kebutuhan beban. Konfigurasi rangkaian *Buck* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Konverter *Buck*

Konverter SEPIC *(Single-Ended Primary Inductor Converter)* memiliki keunggulan fleksibilitas karena mampu menghasilkan tegangan *output* yang bisa lebih tinggi, sama, ataupun lebih rendah dari tegangan *input*. Mekanisme tersebut melibatkan dua induktor, sebuah kapasitor kopling, saklar, serta dioda. Saat saklar aktif, energi tersimpan pada induktor-induktor, sementara kapasitor kopling mengalirkan energi ke induktor kedua. Ketika saklar nonaktif, energi yang tersimpan pada induktor dilepaskan ke beban melalui dioda. Dengan cara ini, konverter SEPIC dapat menyesuaikan tegangan *input* dari panel surya yang bervariasi agar sesuai dengan kebutuhan beban secara lebih fleksibel. Konfigurasi rangkaian SEPIC ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian Konverter *SEPIC*

Ketiga konverter tersebut diuji pada sistem MPPT yang sama untuk menjaga konsistensi dan memberikan perbandingan yang setara. Sistem pengujian mencakup panel surya sebagai sumber energi, konverter DC-DC yang dikendalikan oleh algoritma P&O, serta beban yang merepresentasikan aplikasi nyata dari sistem tenaga surya. Untuk memastikan validitas perbandingan, seluruh konverter diuji dengan parameter yang identik, termasuk input tegangan dari panel surya, kondisi beban, dan algoritma MPPT yang digunakan. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang objektif terhadap efisiensi penyerapan daya dan kestabilan output dari masing-masing konverter.

2.4. Indikator Evaluasi Kinerja

Evaluasi dan perbandingan kinerja sistem MPPT berbasis algoritma *Perturb and Observe* (P&O) menggunakan tiga jenis konverter (*Boost*, *Buck*, dan *SEPIC*) dilakukan menggunakan beberapa metrik utama. Metrik ini digunakan untuk mengukur efisiensi daya, waktu pencapaian titik daya maksimum (*response time*), dan stabilitas output dari masing-masing konverter.

2.4.1. Efisiensi Daya Sistem (%)

Efisiensi daya sistem dihitung dari hasil simulasi untuk menilai seberapa efektif sistem MPPT dalam mengonversi daya yang dihasilkan oleh panel surya menjadi daya keluaran pada beban. Efisiensi ini diperoleh dengan membandingkan daya output yang dihasilkan oleh konverter DC-DC dengan daya maksimum panel surya pada titik daya maksimum (P_{MPP}) di kondisi iradiasi dan suhu tertentu. Perhitungan efisiensi menggunakan rumus:

$$\eta MPPT = \frac{Poutput}{Pmax} \times 100\% \qquad (2)$$

dengan:

- P_{output} adalah daya output yang dihasilkan oleh sistem MPPT
- P_{max} adalah daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya pada kondisi pencahayaan dan suhu tertentu (Daya pada titik daya maksimum, P_{MPP}).

Semakin tinggi efisiensi, semakin baik sistem dalam mengekstraksi daya maksimum dari panel surya.

2.4.2. Waktu Pencapaian Titik Daya Maksimum (*Response Time*)

Waktu pencapaian titik daya maksimum (*response time*) diukur dari hasil simulasi transien saat terjadi perubahan iradiasi. Nilai ini diperoleh dengan mengamati grafik daya output pada sistem MPPT dan mencatat waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi stabil pada titik daya maksimum setelah gangguan diberikan. Indikator ini digunakan untuk menilai seberapa cepat sistem dengan masing-masing konverter dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan dalam simulasi.

2.4.3 Stabilitas Output (Fluktuasi, *Overshoot*)

Stabilitas output dianalisis berdasarkan hasil grafik tegangan dan arus output konverter dari simulasi waktu-domain. Fluktuasi dievaluasi dari fluktuasi periodik tegangan/arus dalam kondisi *steady-state*, sedangkan *overshoot* diukur dari lonjakan sinyal output saat sistem merespons perubahan mendadak pada kondisi input. Hasil ini memberikan gambaran tentang kualitas regulasi masing-masing konverter serta kestabilannya dalam mempertahankan output pada kondisi dinamis, sesuai dengan data simulasi yang diperoleh.

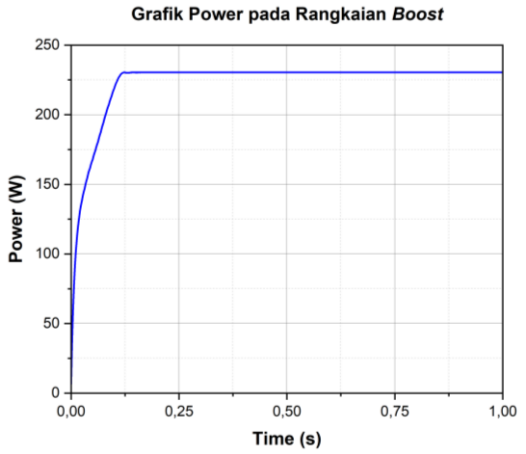
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Simulasi Sistem MPPT

Hasil simulasi yang dilakukan pada sistem MPPT berbasis algoritma *Perturb and Observe* (P&O) dengan menggunakan tiga jenis konverter DC-DC *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC* menunjukkan bahwa sistem berhasil melakukan *tracking* titik daya maksimum (MPP) pada ketiga konverter. Ketiga konverter mampu secara efektif menyesuaikan *duty cycle* untuk memperoleh daya maksimum dari panel surya meskipun terjadi variasi kondisi lingkungan, seperti perubahan iradiasi dan suhu.

3.2. Analisis Kinerja Konverter *Boost*

Pada skenario simulasi dengan konverter *Boost*, sistem MPPT berhasil mencapai titik daya maksimum terutama pada fase transien. Berdasarkan hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 5, sistem membutuhkan waktu sekitar 0,2 detik untuk mencapai kondisi *steady-state* dengan nilai daya maksimum yang stabil di kisaran 230 W.



Gambar 5. *Power Output* dari Konverter *Boost*

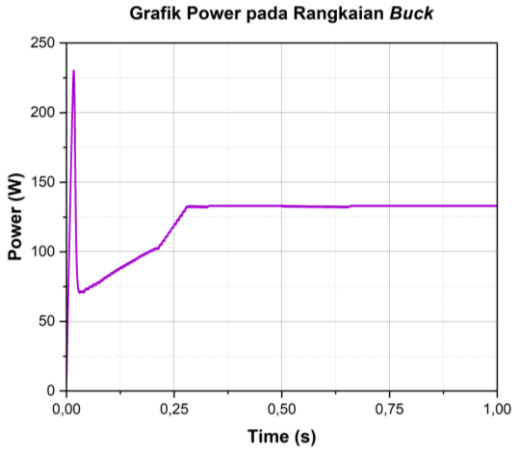
Konverter *Boost* mampu mencapai efisiensi MPPT sebesar 99,89%, yang menunjukkan bahwa meskipun terdapat ketidakstabilan selama fase transien, konverter ini tetap efisien dalam mengonversi daya dari panel surya ke beban. Efisiensi tinggi tersebut menjadi keunggulan utama dari topologi *Boost*, terutama dalam skenario di mana tegangan input dari panel surya lebih rendah dari tegangan yang dibutuhkan oleh beban.

Dari segi struktur, konverter *Boost* memiliki desain rangkaian yang sederhana dan mudah diimplementasikan, serta membutuhkan komponen dengan biaya relatif rendah. Hal ini menjadikannya pilihan yang ekonomis untuk aplikasi yang tidak memerlukan regulasi tegangan yang presisi.

Namun demikian, konverter *Boost* memiliki kekurangan dalam hal kestabilan output. Adanya fluktuasi tegangan yang signifikan serta *overshoot* pada saat transisi menunjukkan keterbatasan konverter ini dalam menjaga kualitas daya, terutama ketika terjadi perubahan kondisi iradiasi. Dibandingkan dengan konverter lain seperti *SEPIC*, performa regulasi *Boost* kurang ideal untuk aplikasi yang memprioritaskan kestabilan sinyal keluaran.

3.3. Analisis Kinerja Konverter *Buck*

Pada simulasi dengan konverter *Buck*, sistem MPPT mampu mencapai titik daya maksimum setelah melalui fase transien dengan *overshoot* awal sekitar 220 W. Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 6, sistem membutuhkan waktu sekitar 0,3 detik untuk mencapai kondisi *steady-state* dengan daya stabil di kisaran 135 W. Respon sistem menunjukkan adanya fluktuasi pada awal transien, namun setelah stabil, konverter *Buck* mampu menjaga kestabilan daya dengan cukup baik.



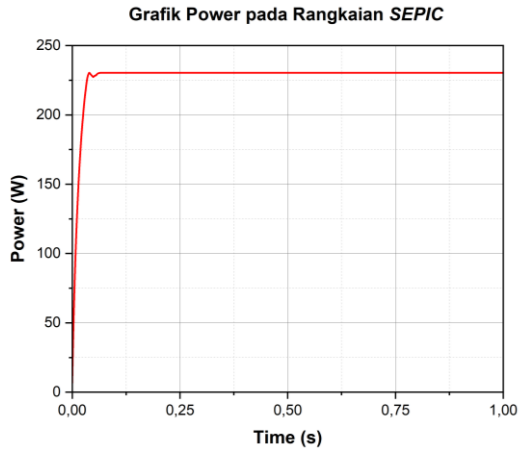
Gambar 6. *Power Output* dari Konverter *Buck*

Efisiensi MPPT yang dicapai oleh konverter *Buck* adalah sebesar 98,23%. Meskipun efisiensinya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan konverter *Boost* dan *SEPIC*, performa kestabilan outputnya menjadikannya layak untuk aplikasi yang membutuhkan regulasi tegangan yang halus. Konverter *Buck* dirancang untuk menurunkan tegangan input agar sesuai dengan tegangan output yang dibutuhkan. Kemampuan ini menjadikannya ideal untuk aplikasi di mana tegangan panel surya lebih tinggi daripada tegangan operasional beban. Struktur topologinya juga relatif sederhana dan efisien dalam menjaga kestabilan sinyal keluaran.

Namun demikian, konverter *Buck* memiliki keterbatasan dalam hal kecepatan adaptasi terhadap perubahan kondisi iradiasi yang cepat. Hal ini dapat menyebabkan keterlambatan dalam pencapaian MPP pada kondisi dinamis. Selain itu, ketika perbedaan antara tegangan input dan output sangat besar, performa konversi daya menjadi kurang optimal, yang dapat menurunkan efektivitas sistem dalam jangka panjang.

3.4. Analisis Kinerja Konverter *SEPIC*

Simulasi menggunakan konverter *SEPIC* menunjukkan performa paling stabil dibandingkan dengan konverter *Boost* dan *Buck*. *SEPIC* memiliki kemampuan *step-up* dan *step-down*, yang membuatnya fleksibel dalam menyesuaikan tegangan input terhadap kebutuhan sistem. Hasil simulasi pada Gambar 7 memperlihatkan bahwa daya output dari konverter *SEPIC* mencapai kondisi *steady-state* sekitar 0,05 detik dengan nilai daya stabil di kisaran 230 W. Respon transien sangat cepat tanpa menunjukkan overshoot atau fluktuasi yang signifikan, sehingga performanya tergolong paling halus di antara ketiga jenis konverter.



Gambar 7. *Power Output* dari Konverter *SEPIC*

Efisiensi MPPT yang dicapai konverter *SEPIC* adalah sebesar 99,93%, tertinggi di antara ketiga konverter yang diuji. Nilai ini menunjukkan bahwa *SEPIC* mampu mengoptimalkan daya dari panel surya secara efektif meskipun berada dalam kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Karakteristik ini menjadikan *SEPIC* unggul dalam menghadapi variasi iradiasi yang umum terjadi pada sistem energi surya.

Dari sisi fungsionalitas, konverter *SEPIC* mampu menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai kebutuhan sistem. Fleksibilitas ini memberikan keunggulan dalam menjaga kestabilan output dan memaksimalkan efisiensi konversi daya dalam berbagai kondisi operasional. Konverter ini sangat cocok digunakan pada sistem MPPT yang dioperasikan di lingkungan dengan perubahan iradiasi yang dinamis dan tidak terprediksi.

Namun demikian, topologi *SEPIC* memiliki kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan *Boost* dan *Buck*. Jumlah komponen yang lebih banyak berimplikasi pada biaya sistem yang relatif lebih tinggi. Meski begitu, peningkatan performa dalam hal efisiensi dan kestabilan output menjadikan *SEPIC* sebagai pilihan yang sangat menjanjikan untuk aplikasi sistem MPPT yang menuntut keandalan dan fleksibilitas tinggi.

3.5. Perbandingan Kinerja Ketiga Konverter

Perbandingan kinerja ketiga konverter dapat dilihat pada Tabel 1, dimana tabel ini menyajikan hasil simulasi selama 30 detik terhadap ketiga jenis konverter yang diuji menggunakan algoritma MPPT *Perturb and Observe* (P&O).

Tabel 1. Hasil simulasi selama 30 detik.

Konverter	Waktu mencapai MPP	Efisiensi MPPT	Fluktuasi Output	Stabilitas Saat Iradiasi Berubah
Boost	1,1 detik	99,89%	Tinggi	Kurang Stabil
Buck	1 detik	98,23%	Sedang	Stabil, tetapi kurang responsif terhadap perubahan cepat
SEPIC	0,4 detik	99,93%	Rendah	Sangat stabil, responsif terhadap perubahan iradiasi

Perbedaan kinerja antara ketiga konverter ini dipengaruhi oleh karakteristik topologi masing-masing. Konverter *SEPIC* yang mampu beroperasi dalam mode *step-up* maupun *step-down*, menawarkan fleksibilitas tinggi dalam menyesuaikan tegangan input terhadap kebutuhan beban. Fleksibilitas ini memungkinkan sistem untuk merespons perubahan iradiasi dengan lebih cepat dan tetap menjaga kestabilan tegangan output. Efisiensi tinggi serta rendahnya fluktuasi dan *overshoot* menjadikan *SEPIC* unggul dalam menjaga kualitas daya, terutama pada kondisi lingkungan yang dinamis.
Konverter *Boost*, meskipun memiliki efisiensi yang tinggi, menunjukkan kestabilan output yang kurang baik. Hal ini disebabkan oleh keterbatasannya dalam hanya melakukan peningkatan tegangan (*step-up*), yang membuatnya kurang fleksibel terhadap perubahan mendadak pada tegangan input. Fluktuasi yang besar dan adanya *overshoot* pada fase transien menunjukkan bahwa regulasi output dari konverter ini belum optimal untuk aplikasi yang menuntut kestabilan tinggi.

Konverter *Buck* memberikan kestabilan tegangan yang lebih baik dibandingkan *Boost*, terutama dalam kondisi *steady-state*. Namun, efisiensi MPPT-nya lebih rendah, dan respons terhadap perubahan iradiasi tidak secepat *SEPIC*. Hal ini menunjukkan bahwa konverter *Buck* lebih cocok untuk aplikasi yang stabil dan tidak terlalu sering mengalami fluktuasi iradiasi, seperti sistem dengan shading minim atau konfigurasi tetap.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa konverter *SEPIC* memberikan performa terbaik dalam sistem MPPT berbasis algoritma P&O, baik dari segi efisiensi, waktu respon, maupun kestabilan output. Penggunaan algoritma P&O terbukti efektif dalam

menyesuaikan *duty cycle* terhadap kondisi iradiasi, meskipun masih terdapat tantangan dalam menjaga kecepatan dan akurasi saat terjadi perubahan yang sangat cepat. Oleh karena itu, pemilihan jenis konverter menjadi aspek krusial dalam meningkatkan performa sistem MPPT secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan algoritma *Perturb and Observe* dalam sistem *Maximum Power Point Tracking* yang dikombinasikan dengan tiga jenis konverter DC-DC, yaitu *Boost*, *Buck*, dan *SEPIC* untuk meningkatkan efektivitas konversi daya pada sistem tenaga surya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketiga konverter mampu melakukan pelacakan titik daya maksimum (MPP) dengan baik meskipun menghadapi variasi kondisi iradiasi dan suhu lingkungan. Namun, terdapat perbedaan kinerja yang signifikan di antara ketiganya. Konverter *SEPIC* menunjukkan performa unggul dengan stabilitas output terbaik, fluktuasi (fluktuasi) yang paling rendah, serta efisiensi MPPT tertinggi sebesar 99,93%. Fleksibilitas *SEPIC* dalam mengatur tegangan baik naik maupun turun memungkinkan adaptasi yang lebih responsif terhadap perubahan lingkungan secara dinamis. Sementara itu, konverter *Boost* meskipun sederhana dan ekonomis, memiliki fluktuasi dan *overshoot* yang lebih besar yang dapat menurunkan kualitas daya output, walaupun efisiensinya masih cukup tinggi pada 99,89%. Konverter *Buck* menawarkan kestabilan output yang lebih baik daripada *Boost*, namun efisiensinya sedikit lebih rendah (98,23%) dan kurang responsif terhadap perubahan cepat pada iradiasi. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan jenis konverter DC-DC sangat krusial dalam optimasi sistem MPPT berbasis algoritma P&O untuk aplikasi energi terbarukan, khususnya tenaga surya. Dengan demikian, *SEPIC* menjadi pilihan optimal bagi aplikasi yang menuntut kestabilan tinggi dan efisiensi maksimal di tengah kondisi lingkungan yang variatif. Temuan ini memperkuat urgensi pemilihan topologi konverter yang sesuai dalam pengembangan sistem MPPT berbasis algoritma konvensional, serta membuka peluang eksplorasi kombinasi metode hibrida dan kontrol adaptif untuk peningkatan efisiensi lebih lanjut. Pengembangan selanjutnya dapat fokus pada penyempurnaan algoritma P&O agar lebih cepat dan akurat dalam menghadapi fluktuasi kondisi operasional yang ekstrem serta meninjau aspek biaya dan kompleksitas implementasi konverter *SEPIC* agar lebih ekonomis dan praktis digunakan di lapangan.

Referensi

[1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2023*. 2023. [Online]. Available: www.iea.org/terms

[2] H. Xie and W. K. T. Bui, "Impact of globalization and energy consumption on CO2 emissions in China: Implications for energy transition," *Financ Res Lett*, vol. 67, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.frl.2024.105939.

[3] M. Mustafa, M. O. F. Malik, and A. Maqsoom, "Barriers to Solar PV Adoption in Developing Countries: Multiple Regression and Analytical Hierarchy Process Approach," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 3, Feb. 2024, doi: 10.3390/su16031032.

[4] A. C. Lazaroiu, M. G. Osman, C. V. Strejoiu, and G. Lazaroiu, "A Comprehensive Overview of Photovoltaic Technologies and Their Efficiency for Climate Neutrality," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 23, Dec. 2023, doi: 10.3390/su152316297.

[5] S. Miyake, S. Teske, J. Rispler, and M. Feenstra, "Solar and wind energy potential under land-resource constrained conditions in the Group of Twenty (G20)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 202, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114622.

[6] Z. Torki, M. Benhamida, Z. Haddad, A. Nahoui, A. Chouder, and I. Brahimi, "Effects of Temperature and Solar Radiation on Photovoltaic Modules Performances Installed in Oued Keberit Power Plant, Algeria," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 112, no. 1, pp. 204–216, Dec. 2023, doi: 10.37934/arfmts.112.1.204216.

[7] O. Bamisile, C. Acen, D. Cai, Q. Huang, and I. Staffell, "The environmental factors affecting solar photovoltaic output," Feb. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2024.115073.

[8] E. Kim, M. Warner, and I. Bhattacharya, "Adaptive Step Size Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT)."

[9] B. Yang, R. Xie, and Z. Guo, "Maximum Power Point Tracking Technology for PV Systems: Current Status and Perspectives," 2024, *Tech Science Press*. doi: 10.32604/ee.2024.049423.

[10] R. B. Bollipo, S. Mikkili, and P. K. Bonthagorla, "Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review," Jan. 01, 2021, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720.

[11] Z. Ali, S. Z. Abbas, A. Mahmood, S. W. Ali, S. B. Javed, and C. L. Su, "A Study of a Generalized Photovoltaic System with MPPT Using *Perturb and Observe*r Algorithms under Varying Conditions," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 9, May 2023, doi: 10.3390/en16093638.

[12] V. A. Martinez Lopez, U. Žindžiūtė, H. Ziar, M. Zeman, and O. Isabella, "Study on the Effect of Irradiance Variability on the Efficiency of the Perturb-and-Observe Maximum Power Point Tracking Algorithm," *Energies*

(Basel), vol. 15, no. 20, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15207562.

[13] S. A. Krim, F. Krim, H. Afghoul, and F. Abdelmalek, "An Enhanced *Perturb and Observe* MPPT for Photovoltaic Systems Based on Fuzzy Step," *Journal Europeen des Systemes Automatises*, vol. 57, no. 2, pp. 363–372, Apr. 2024, doi: 10.18280/jesa.570206.

[14] J. Singh, S. P. Singh, K. S. Verma, and B. Kumar, "Comparative Analysis of MPPT Control Techniques to Enhance Solar Energy Utilization and Convergence Time Under Varying Meteorological Conditions and Loads," *Front Energy Res*, vol. 10, Jul. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.856702.

[15] O. Mrhar, K. Kandoussi, and M. Eljouad, "A new hybrid MPPT algorithm combining P&O and fuzzy logic techniques," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 497–508, Mar. 2025, doi: 10.11591/ijpeds.v16.i1.pp497-508.

[16] A. Tuluhong, Z. Xu, Q. Chang, and T. Song, "Recent Developments in Bidirectional DC-DC Converter Topologies, Control Strategies, and Applications in Photovoltaic Power Generation Systems: A Comparative Review and Analysis," Jan. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/electronics14020389.

[17] A. Hayat, D. Sibtain, A. F. Murtaza, S. Shahzad, M. S. Jajja, and H. Kilic, "Design and Analysis of Input Capacitor in DC–DC *Boost* Converter for Photovoltaic-Based Systems," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/su15076321.

[18] P. Livinti, G. Culea, I. V. Banu, and S. G. Vernica, "Comparative Study of a *Buck* DC-DC Converter Controlled by the MPPT (P&O) Algorithm without or with Fuzzy Logic Controller," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.3390/app14177628.

[19] A. Ramos-Sebastian, C. Yu, and S. H. Kim, "Selective-collective scalable locomotion control of helical magnetic swimmers within confined channels using global magnetic fields," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 93, pp. 114–127, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.03.012.