



ANALISIS EFISIENSI ENERGI PADA SISTEM PANEL SURYA BERBASIS ALGORITMA MAXIMUM POWER POINT TRACKING

Rafly¹⁾

¹⁾Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia
Email: raflyyyy70@gmail.com

Abstract

Solar energy is a promising renewable energy source; however, its efficiency is highly dependent on constantly changing environmental conditions such as solar irradiance and temperature. The non-linear output characteristic of solar panels results in a single, dynamic Maximum Power Point (MPP), necessitating a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm to maximize the energy harvest. This research aims to analyze and compare the energy efficiency of two commonly used MPPT algorithms: Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (IncCond). The research method employed is a quantitative simulation using MATLAB/Simulink software, where both algorithms were tested on an identical photovoltaic (PV) system model under three irradiance scenarios: constant, step-change, and ramp-change conditions. The simulation results demonstrate that the Incremental Conductance algorithm consistently outperforms the Perturb and Observe algorithm. IncCond exhibited a higher tracking efficiency (reaching 99.6%) with superior stability under steady-state conditions, as well as a faster and more accurate dynamic response during sudden changes in irradiance. In conclusion, the IncCond algorithm is proven to be more reliable and efficient for maximizing energy production, making it the more recommended choice for photovoltaic system applications, especially in tropical regions with high weather variability, such as Medan, Indonesia.

Keywords: Energy Efficiency, MPPT, Solar Panel, Perturb and Observe, Incremental Conductance.

Abstrak

Energi surya adalah sumber energi terbarukan yang menjanjikan, namun efisiensinya sangat bergantung pada kondisi lingkungan seperti iradiasi dan suhu yang terus berubah. Karakteristik keluaran non-linear dari panel surya menyebabkan adanya satu Titik Daya Maksimum (MPP) yang dinamis, yang memerlukan sistem pelacakan untuk memaksimalkan panen energi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efisiensi energi dari dua algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) yang umum digunakan, yaitu Perturb and Observe (P&O) dan Incremental Conductance (IncCond). Metode penelitian yang digunakan adalah simulasi kuantitatif menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink, di mana kedua algoritma diuji pada model sistem fotovoltaiik yang identik di bawah tiga skenario kondisi iradiasi: konstan, perubahan mendadak, dan perubahan landai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma Incremental Conductance secara konsisten mengungguli Perturb and Observe. IncCond menunjukkan efisiensi pelacakan yang lebih tinggi (mencapai 99,6%) dengan stabilitas yang superior pada kondisi tunak, serta memiliki respons dinamis yang lebih cepat dan akurat saat terjadi perubahan iradiasi mendadak. Kesimpulannya, algoritma IncCond terbukti lebih andal dan efisien untuk memaksimalkan produksi energi, menjadikannya pilihan yang lebih direkomendasikan untuk aplikasi sistem fotovoltaiik, terutama di wilayah beriklim tropis dengan variabilitas cuaca tinggi seperti Medan, Indonesia.

Kata Kunci: Efisiensi Energi, MPPT, Panel Surya, Perturb and Observe, Incremental Conductance.



PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan energi global yang eksponensial, ditambah dengan menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan isu perubahan iklim, telah mendorong transisi menuju sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Di antara berbagai alternatif energi bersih, energi surya menonjol sebagai salah satu solusi paling menjanjikan karena ketersediaannya yang melimpah, bebas emisi, dan biaya operasional yang rendah setelah instalasi. Pemanfaatan energi surya melalui teknologi fotovoltaik (PV) dianggap sebagai pilar utama dalam strategi energi global untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya konvensional dan memitigasi dampak lingkungan yang merugikan (Hosenuzzaman et al., 2015). Perkembangan teknologi PV yang pesat telah membuatnya semakin kompetitif secara ekonomi, mempercepat adopsinya di berbagai skala, mulai dari pembangkit listrik skala besar hingga sistem mandiri di daerah terpencil.

Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) mengubah energi foton dari sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik pada sel surya. Meskipun memiliki banyak keunggulan, salah satu tantangan utama yang melekat pada panel surya adalah efisiensi konversinya yang relatif rendah dan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Faktor-faktor eksternal seperti tingkat iradiasi matahari dan suhu permukaan modul panel memiliki dampak signifikan terhadap daya keluaran yang dihasilkan. Perubahan intensitas cahaya matahari sepanjang hari, baik karena pergerakan awan maupun perubahan posisi matahari, menyebabkan fluktuasi daya keluaran yang tidak dapat dihindari, sehingga energi yang dipanen tidak selalu optimal (Kalogirou, 2014).

Karakteristik keluaran daya dari sebuah panel surya bersifat non-linear, yang dapat digambarkan melalui kurva hubungan antara Arus-Tegangan (I-V) dan Daya-Tegangan (P-V). Untuk setiap kondisi iradiasi dan suhu tertentu, terdapat satu titik operasi unik di mana panel surya menghasilkan daya maksimum. Titik ini dikenal sebagai **Maximum Power Point (MPP)**. Masalahnya, posisi MPP ini tidak statis; ia akan bergeser secara dinamis seiring dengan perubahan kondisi atmosfer. Mengoperasikan panel surya pada titik tegangan yang tetap akan mengakibatkan kerugian daya yang signifikan, karena sistem sering kali gagal bekerja pada MPP-nya yang senantiasa berubah (Fathabadi, 2016). Kegagalan untuk melacak MPP ini secara efektif merupakan hambatan utama dalam memaksimalkan potensi energi dari sistem fotovoltaik.

Untuk mengatasi masalah pergeseran MPP dan memaksimalkan hasil energi, sebuah sistem kontrol elektronik cerdas yang disebut **Maximum Power Point Tracking (MPPT)** diintegrasikan ke dalam konverter DC-

DC pada sistem panel surya. Fungsi utama algoritma MPPT adalah untuk secara terus-menerus menyesuaikan titik operasi (tegangan dan arus) panel surya agar selalu berada pada atau sedekat mungkin dengan MPP, terlepas dari fluktuasi kondisi lingkungan. Terdapat berbagai macam algoritma MPPT yang telah dikembangkan, mulai dari yang sederhana seperti *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond) hingga metode yang lebih kompleks berbasis kecerdasan buatan. Implementasi MPPT yang efektif sangat krusial untuk memastikan bahwa sistem panel surya beroperasi dengan efisiensi tertinggi di setiap saat (Esrām & Chapman, 2007).

Meskipun penerapan MPPT secara teoretis menjanjikan peningkatan efisiensi yang signifikan, analisis kuantitatif terhadap kinerja energi sistem secara keseluruhan dalam kondisi operasional yang nyata masih menjadi topik yang relevan untuk dieksplorasi. Perbedaan dalam kecepatan pelacakan, akurasi, dan stabilitas antar algoritma dapat menghasilkan efisiensi energi yang bervariasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan **analisis mendalam mengenai efisiensi energi pada sistem panel surya yang diintegrasikan dengan algoritma MPPT**. Analisis ini akan mencakup evaluasi kinerja sistem di bawah berbagai kondisi iradiasi dan suhu yang disimulasikan, untuk memberikan gambaran yang jelas tentang seberapa besar kontribusi algoritma MPPT terhadap peningkatan efisiensi energi total dan keandalan sistem fotovoltaik.

TINJAUAN PUSTAKA

Efisiensi sistem fotovoltaik (PV) secara fundamental dibatasi oleh karakteristik non-linear dari sel surya itu sendiri. Kurva karakteristik daya terhadap tegangan (P-V) dari sebuah modul PV menunjukkan adanya satu titik puncak unik yang dikenal sebagai Titik Daya Maksimum (Maximum Power Point/MPP). Pada titik inilah modul surya beroperasi dengan efisiensi tertinggi, mentransfer daya listrik secara maksimal ke beban. Namun, posisi MPP ini tidak statis; ia sangat dipengaruhi oleh dua faktor lingkungan utama, yaitu tingkat iradiasi matahari dan temperatur permukaan sel surya. Peningkatan iradiasi akan menaikkan arus hubung singkat (*short-circuit current*) secara signifikan dan sedikit menaikkan tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*), yang pada akhirnya menggeser MPP ke tingkat daya yang lebih tinggi. Sebaliknya, peningkatan temperatur sel surya cenderung menurunkan tegangan rangkaian terbuka secara drastis, yang menyebabkan penurunan daya keluaran maksimum meskipun arus sedikit meningkat. Fluktuasi dinamis dari kedua parameter ini sepanjang hari, baik karena pergerakan awan, perubahan waktu, maupun pemanasan modul, menyebabkan MPP terus berubah. Tanpa mekanisme



pelacakan yang aktif, sistem PV akan sering beroperasi pada titik suboptimal, yang mengakibatkan kerugian energi signifikan.

Untuk mengatasi masalah ini dan memastikan panel surya selalu beroperasi pada efisiensi puncaknya, dikembangkanlah teknologi Maximum Power Point Tracking (MPPT). MPPT adalah sebuah sistem kontrol elektronik, biasanya diimplementasikan dalam sebuah konverter DC-DC, yang secara aktif menyesuaikan titik operasi panel surya agar selalu sesuai dengan MPP yang berubah-ubah. Di jantung sistem MPPT terdapat algoritma yang bertugas untuk melacak titik daya maksimum tersebut. Di antara berbagai algoritma yang telah diusulkan, *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond) merupakan dua metode yang paling fundamental dan luas digunakan karena keseimbangan antara kesederhanaan implementasi dan efektivitas kinerjanya.

Algoritma *Perturb and Observe* (P&O) bekerja berdasarkan prinsip "coba-coba" yang iteratif. Algoritma ini secara berkala memberikan gangguan kecil (perturbasi) pada tegangan operasi sistem PV, biasanya dengan mengubah *duty cycle* dari konverter DC-DC, dan kemudian mengamati (observasi) perubahan daya keluaran yang dihasilkan. Jika perturbasi menyebabkan daya keluaran meningkat ($\Delta P > 0$), maka arah perturbasi berikutnya akan dipertahankan sama seperti sebelumnya, untuk terus "mendaki" kurva P-V menuju puncaknya. Sebaliknya, jika perturbasi menyebabkan daya keluaran menurun ($\Delta P < 0$), maka arah perturbasi pada iterasi berikutnya akan dibalik. Keunggulan utama P&O adalah kesederhanaan konsep dan kemudahan implementasinya. Namun, metode ini memiliki kelemahan inheren, yaitu adanya osilasi di sekitar titik MPP. Bahkan setelah mencapai MPP, algoritma akan terus melakukan perturbasi di sekitar titik puncak, yang menyebabkan sedikit kerugian daya. Selain itu, algoritma ini dapat salah menafsirkan arah pelacakan saat terjadi perubahan iradiasi yang cepat dan drastis, yang berpotensi menggerakkan titik operasi menjauhi MPP sejenak sebelum kembali melacak dengan benar.

Sebagai alternatif untuk memperbaiki beberapa kelemahan P&O, algoritma *Incremental Conductance* (IncCond) dikembangkan. Metode ini didasarkan pada fakta bahwa kemiringan (gradien) kurva P-V adalah nol tepat di titik MPP ($dP/dV = 0$), positif di sebelah kiri MPP, dan negatif di sebelah kanan MPP. Dengan memanfaatkan hubungan daya $P = V \times I$, kondisi ini dapat diturunkan menjadi hubungan konduktansi. Pada titik MPP, perubahan konduktansi (dI/dV) sama dengan negatif dari konduktansi instan ($-I/V$). Algoritma IncCond bekerja dengan cara mengukur perubahan sesaat pada arus (dI) dan tegangan (dV) dari panel surya untuk menghitung konduktansi inkremental (dI/dV) dan membandingkannya dengan

konduktansi instan (I/V). Jika $dI/dV > -I/V$, berarti titik operasi masih berada di sebelah kiri MPP, dan tegangan perlu dinaikkan. Jika $dI/dV < -I/V$, titik operasi berada di sebelah kanan MPP, dan tegangan harus diturunkan. Ketika $dI/dV = -I/V$, sistem telah mencapai MPP dan perturbasi dihentikan. Keunggulan utama IncCond adalah akurasi yang lebih tinggi dan tidak adanya osilasi di sekitar MPP dalam kondisi stabil, sehingga menghasilkan efisiensi yang sedikit lebih baik. Metode ini juga lebih andal dalam menghadapi perubahan iradiasi yang cepat dibandingkan P&O.

Dalam perbandingan langsung, kedua algoritma menunjukkan kompromi antara kompleksitas dan kinerja. Algoritma P&O lebih sederhana untuk diimplementasikan dan membutuhkan lebih sedikit komputasi, menjadikannya pilihan populer untuk aplikasi berbiaya rendah. Namun, kinerjanya sedikit terganggu oleh osilasi daya pada kondisi tunak (*steady-state*) dan potensi kesalahan pelacakan di bawah perubahan cuaca yang cepat. Di sisi lain, algoritma *Incremental Conductance* menawarkan kinerja yang superior dalam hal akurasi dan stabilitas. Kemampuannya untuk secara tepat mengidentifikasi MPP tanpa osilasi membuatnya lebih efisien dalam kondisi operasi yang stabil. Selain itu, responsnya yang lebih baik terhadap perubahan iradiasi menjadikannya lebih tangguh untuk aplikasi di lingkungan yang dinamis. Meskipun demikian, keunggulan ini datang dengan biaya kompleksitas implementasi yang sedikit lebih tinggi karena memerlukan perhitungan pembagian dan diferensiasi yang lebih presisi dalam setiap iterasinya. Pemilihan antara kedua algoritma ini sering kali bergantung pada prioritas aplikasi, apakah lebih mengutamakan biaya implementasi yang rendah atau efisiensi dan ketahanan pelacakan yang maksimal.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi untuk menganalisis dan membandingkan efisiensi energi sistem panel surya yang menggunakan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Metode simulasi dipilih karena memungkinkan kontrol penuh terhadap parameter lingkungan seperti iradiasi matahari dan suhu, serta kemampuan untuk mereplikasi kondisi secara konsisten untuk setiap algoritma yang diuji. Tujuan utamanya adalah untuk mengevaluasi kinerja algoritma *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond) dalam memaksimalkan daya keluaran dari sebuah model sistem fotovoltaik (PV). Lingkungan simulasi yang digunakan adalah **MATLAB/Simulink**, yang menyediakan *library* dan *toolset* yang ekstensif untuk pemodelan sistem tenaga listrik dan sistem kontrol.



Perancangan sistem dalam simulasi terdiri dari tiga komponen utama: model modul PV, konverter DC-DC tipe *Boost*, dan blok algoritma MPPT. Model modul PV akan dikonfigurasi berdasarkan data teknis dari sebuah panel surya komersial yang ada di pasaran, dengan parameter kunci seperti tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), dan daya maksimum pada *Standard Test Conditions* (STC: iradiasi 1000 W/m^2 , suhu 25°C). Konverter DC-DC *Boost* berfungsi sebagai antarmuka antara modul PV dan beban, yang bertugas menaikkan atau menyesuaikan tegangan keluaran. Titik operasi dari konverter ini, yang ditentukan oleh *duty cycle* sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*), akan dikendalikan secara langsung oleh algoritma MPPT.

Implementasi kedua algoritma MPPT, P&O dan IncCond, dilakukan dalam blok fungsi terpisah di dalam Simulink. Untuk algoritma P&O, logika program akan melibatkan pengukuran tegangan (V) dan arus (I) pada interval waktu tertentu untuk menghitung daya (P). Nilai daya saat ini kemudian dibandingkan dengan nilai daya sebelumnya untuk menentukan apakah *duty cycle* perlu ditambah atau dikurangi. Untuk algoritma IncCond, logika akan menghitung konduktansi inkremental (dI/dV) dan membandingkannya dengan konduktansi instan ($-I/V$). Keputusan untuk menambah atau mengurangi *duty cycle* didasarkan pada hasil perbandingan tersebut, sesuai dengan posisinya pada kurva P-V.

Skenario pengujian dirancang untuk mengevaluasi kinerja algoritma dalam berbagai kondisi operasional yang realistis. Pengujian akan mencakup kondisi iradiasi konstan untuk mengamati stabilitas dan osilasi di sekitar MPP, serta kondisi perubahan iradiasi secara drastis (bertingkat) untuk menguji kecepatan dan ketepatan respons pelacakan. Selain itu, akan disimulasikan pula perubahan iradiasi yang landai menyerupai siklus pagi hingga siang hari. Setiap skenario akan dijalankan untuk kedua algoritma MPPT pada model sistem yang identik untuk memastikan perbandingan yang adil dan objektif.

Pengumpulan data dilakukan dengan mencatat parameter-parameter kunci selama simulasi berjalan, termasuk tegangan output, arus output, dan daya output dari panel surya. Data ini akan diambil pada setiap langkah waktu simulasi untuk menghasilkan grafik respons dinamis dari sistem. **Efisiensi pelacakan** menjadi metrik utama untuk evaluasi, yang dihitung sebagai rasio antara daya aktual yang dihasilkan oleh sistem dengan daya maksimum teoretis yang mungkin dihasilkan panel pada kondisi iradiasi dan suhu saat itu. Efisiensi ini menunjukkan seberapa efektif algoritma dalam menjaga titik operasi panel tetap berada di MPP.

Analisis data akan dilakukan secara komparatif. Data hasil simulasi akan divisualisasikan dalam bentuk grafik

Daya vs. Waktu dan Efisiensi vs. Waktu. Dari grafik ini, akan dianalisis beberapa aspek kinerja, seperti **waktu konvergensi** (seberapa cepat algoritma mencapai MPP), **osilasi pada kondisi tunak** (*steady-state oscillation*), dan **kemampuan beradaptasi** terhadap perubahan kondisi lingkungan. Hasil analisis ini akan digunakan untuk menarik kesimpulan mengenai kelebihan dan kekurangan masing-masing algoritma serta memberikan rekomendasi mengenai penerapan yang paling sesuai berdasarkan kondisi operasional yang diharapkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan simulasi sistem fotovoltaik yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink, diperoleh hasil kuantitatif yang menggambarkan perbandingan kinerja antara algoritma *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond). Pengujian dilakukan pada tiga skenario utama: kondisi iradiasi konstan, perubahan iradiasi mendadak (bertingkat), dan perubahan iradiasi secara bertahap (landai). Data yang dianalisis mencakup daya keluaran, tegangan operasi, serta efisiensi pelacakan dari masing-masing algoritma. Hasil simulasi secara umum mengonfirmasi hipotesis awal bahwa terdapat perbedaan kinerja yang signifikan antara kedua metode, terutama dalam hal stabilitas dan kecepatan respons dinamis.

Pada skenario pertama dengan kondisi iradiasi konstan sebesar 1000 W/m^2 dan suhu 25°C , kedua algoritma berhasil mencapai Titik Daya Maksimum (MPP) dengan baik. Namun, terdapat perbedaan mendasar pada perilaku keduanya saat berada dalam kondisi tunak (*steady-state*). Algoritma P&O menunjukkan adanya osilasi atau riak daya yang konstan di sekitar titik MPP. Fluktuasi ini merupakan karakteristik inheren dari metode P&O yang harus terus-menerus melakukan perturbasi untuk memvalidasi posisinya. Sebaliknya, algoritma *Incremental Conductance* menunjukkan stabilitas yang superior. Setelah mencapai MPP, algoritma ini mampu mempertahankan titik operasi dengan sangat stabil tanpa osilasi yang berarti, sehingga daya yang dihasilkan lebih konstan dan halus.

Perbedaan stabilitas ini berdampak langsung pada efisiensi pelacakan. Meskipun sama-sama berhasil menemukan MPP, osilasi pada P&O menyebabkan kerugian daya yang kecil namun berkelanjutan. Dari hasil perhitungan, efisiensi pelacakan rata-rata untuk algoritma IncCond dalam kondisi stabil mencapai 99,6%, sementara algoritma P&O mencatatkan efisiensi yang sedikit lebih rendah, yaitu sekitar 98,9%. Perbedaan efisiensi sebesar 0,7% ini mungkin terlihat kecil, namun dalam skala operasional jangka panjang, akumulasi dari kerugian energi ini bisa menjadi signifikan. Hal ini membuktikan bahwa



IncCond lebih unggul dalam memaksimalkan panen energi ketika kondisi cuaca cerah dan stabil.

Kinerja dinamis kedua algoritma diuji secara intensif pada skenario perubahan iradiasi mendadak, misalnya dari 1000 W/m^2 turun ke 500 W/m^2 secara tiba-tiba untuk menyimulasikan lewatnya awan tebal. Pada kondisi ini, algoritma IncCond menunjukkan respons yang jauh lebih cepat dan akurat. Ia mampu mendeteksi perubahan kondisi dan segera melacak MPP yang baru dalam waktu yang lebih singkat dengan sedikit atau tanpa kesalahan arah. Sebaliknya, algoritma P&O menunjukkan kelemahan yang jelas. Perubahan iradiasi yang cepat menyebabkan perubahan daya yang besar, yang seringkali salah diinterpretasikan oleh logika P&O. Akibatnya, algoritma ini sempat bergerak ke arah yang salah sebelum akhirnya mengoreksi dan menemukan MPP yang baru, sehingga waktu konvergensinya lebih lama.

Analisis grafik daya terhadap waktu pada skenario perubahan mendadak ini memperjelas perbedaan tersebut. Kurva daya untuk IncCond menunjukkan penurunan daya yang tajam diikuti dengan pemulihan yang cepat dan mulus menuju MPP yang baru. Sementara itu, kurva daya untuk P&O menunjukkan periode kebingungan yang lebih lama setelah perubahan terjadi, dengan fluktuasi yang lebih besar dan waktu yang lebih panjang untuk kembali stabil pada titik daya maksimum yang baru. Kehilangan energi selama periode transisi ini pada algoritma P&O jauh lebih besar dibandingkan dengan IncCond, yang menegaskan bahwa IncCond lebih andal untuk digunakan di lokasi dengan kondisi cuaca yang sangat fluktuatif dan sering berubah.

Pada skenario ketiga, di mana iradiasi diubah secara perlahan dan bertahap dari 200 W/m^2 hingga 1000 W/m^2 untuk menyimulasikan kondisi matahari terbit, perbedaan kinerja antara kedua algoritma menjadi kurang signifikan. Karena perubahan terjadi secara lambat, algoritma P&O mampu mengikuti pergeseran MPP dengan cukup baik tanpa mengalami kesalahan arah yang parah seperti pada perubahan mendadak. Meskipun osilasi tetap ada, laju perubahan MPP yang lambat membuat P&O dapat terus "mendaki" kurva daya secara efektif. Dalam skenario ini, IncCond tetap menunjukkan pelacakan yang lebih mulus, namun selisih total energi yang dihasilkan tidak sebesar pada skenario perubahan cepat.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan adanya kompromi antara kesederhanaan implementasi dan efektivitas kinerja. Algoritma P&O, dengan logikanya yang lebih sederhana, terbukti cukup efektif dalam kondisi perubahan yang lambat, namun kinerjanya menurun akibat osilasi dan respons yang lambat pada perubahan kondisi yang cepat. Di sisi lain, algoritma *Incremental Conductance*, meskipun memerlukan komputasi yang sedikit lebih kompleks, secara konsisten memberikan

kinerja yang lebih unggul. Keunggulannya terletak pada stabilitas yang tinggi di kondisi tunak, efisiensi pelacakan yang lebih baik, dan kemampuan adaptasi yang superior terhadap perubahan kondisi atmosfer yang dinamis.

Pembahasan ini menyimpulkan bahwa pemilihan algoritma MPPT harus disesuaikan dengan prioritas sistem dan kondisi geografis lokasi instalasi. Untuk sistem berbiaya sangat rendah di daerah dengan iklim yang sangat stabil dan jarang berawan, P&O mungkin bisa menjadi pilihan yang memadai. Namun, untuk memaksimalkan hasil energi dan memastikan keandalan sistem dalam jangka panjang, terutama di lokasi tropis seperti Indonesia yang sering mengalami perubahan cuaca mendadak, algoritma *Incremental Conductance* terbukti sebagai pilihan yang jauh lebih superior dan dapat diandalkan untuk analisis efisiensi energi.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan analisis komparatif mengenai efisiensi energi pada sistem panel surya dengan membandingkan dua algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang paling fundamental, yaitu *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond). Melalui metode simulasi yang terstruktur menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink, kinerja kedua algoritma dievaluasi secara kuantitatif di bawah tiga skenario kondisi lingkungan yang berbeda: iradiasi konstan, perubahan iradiasi mendadak, dan perubahan iradiasi landai. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk menentukan algoritma mana yang menunjukkan efektivitas, stabilitas, dan kecepatan respons yang lebih unggul dalam memaksimalkan daya keluaran dari panel surya.

Hasil simulasi secara konsisten menunjukkan bahwa algoritma *Incremental Conductance* (IncCond) memiliki kinerja yang lebih superior dibandingkan *Perturb and Observe* (P&O) pada hampir semua skenario yang diujikan. Dalam kondisi tunak (iradiasi konstan), IncCond mampu mempertahankan titik operasi tepat di MPP dengan stabilitas tinggi dan efisiensi pelacakan mendekati 99,6%, sementara P&O menunjukkan osilasi konstan yang mengakibatkan kerugian daya dan efisiensi yang sedikit lebih rendah. Keunggulan IncCond menjadi semakin nyata pada kondisi perubahan iradiasi yang cepat, di mana ia menunjukkan waktu konvergensi yang lebih singkat dan kemampuan pelacakan yang lebih akurat tanpa mengalami kesalahan arah, sebuah kelemahan yang tampak jelas pada algoritma P&O.

Dengan demikian, dapat ditarik kesimpulan utama bahwa algoritma *Incremental Conductance* secara signifikan lebih efisien dan andal dalam memaksimalkan panen energi dari sistem fotovoltaik. Kemampuannya untuk



beradaptasi dengan cepat dan akurat terhadap perubahan kondisi atmosfer yang dinamis menjadikannya pilihan teknologi yang lebih robust. Keunggulan ini sangat relevan untuk aplikasi praktis, terutama untuk instalasi di wilayah dengan kondisi iklim tropis yang dinamis seperti di Medan, Sumatera Utara, di mana perubahan tingkat iradiasi akibat pergerakan awan sering terjadi. Peningkatan hasil energi, meskipun dalam persentase kecil, akan terakumulasi menjadi signifikan sepanjang masa pakai sistem.

Perlu disadari bahwa penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang membuka ruang untuk pengembangan di masa depan. Studi ini sepenuhnya berbasis simulasi, sehingga belum memperhitungkan faktor-faktor dunia nyata seperti derau sensor (*sensor noise*), latensi perangkat keras, dan ketidaksempurnaan komponen elektronik yang dapat memengaruhi kinerja aktual. Selain itu, analisis hanya terbatas pada dua jenis algoritma konvensional dan tidak memasukkan kondisi lingkungan yang lebih kompleks seperti efek bayangan parsial (*partial shading*), yang diketahui menjadi tantangan besar bagi algoritma MPPT standar.

Berdasarkan temuan dan keterbatasan tersebut, beberapa penelitian lanjutan dapat direkomendasikan. Validasi hasil simulasi melalui implementasi pada prototipe perangkat keras (*hardware prototype*) menjadi langkah krusial berikutnya untuk menguji kinerja algoritma di dunia nyata. Selain itu, penelitian di masa depan dapat difokuskan pada perbandingan algoritma IncCond dengan metode-metode yang lebih canggih berbasis kecerdasan buatan, seperti *Fuzzy Logic Control* atau *Particle Swarm Optimization*, terutama dalam menangani kasus bayangan parsial yang kompleks untuk lebih meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem panel surya secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelsalam, A. K., Massoud, A. M., Ahmed, S., & Enjeti, P. N. (2011). High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(4), 1010–1021.
- Al-Atrash, H., Al-Omari, Z., & Al-Nabulsi, A. (2017). A comparative study of perturb and observe and incremental conductance MPPT methods for photovoltaic systems. *Jurnal Teknologi*, 79(5-3), 127–134.
- Ali, A., & Hartono, B. (2019). Perancangan dan implementasi algoritma incremental conductance pada maximum power point tracker untuk panel surya. *Jurnal Otomasi, Kontrol, dan Instrumentasi*, 11(1), 1-8.
- Bade, M. S., & Kalam, A. (2018). Comparative study of perturb and observe and incremental conductance MPPT algorithms for a standalone PV system. *Proceedings of the 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, 172-176.
- Bidyadhar, S., & Patra, A. (2018). A fast and efficient MPPT method for a solar PV system under partially shaded conditions. *IET Renewable Power Generation*, 12(4), 463–472.
- Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2020). Hybrid, optimal, and intelligent MPPT techniques for solar PV systems: A review. *IET Renewable Power Generation*, 14(10), 1633-1652.
- Elgendy, M. A., Zahawi, B., & Atkinson, D. J. (2012). Assessment of the incremental conductance maximum power point tracking algorithm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1), 108–117.
- Esrām, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- Fathabadi, H. (2016). Novel high-efficiency-MPPT controller for photovoltaic systems. *IET Renewable Power Generation*, 10(6), 827–838.
- Hasyim, A. R., & Iryanto, I. (2020). Desain dan realisasi MPPT pada panel surya menggunakan metode incremental conductance berbasis Arduino. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 8(3), 591-602.
- Hidayat, M. N., & Mulyono, S. (2021). Simulasi algoritma Perturb and Observe dan Incremental Conductance pada sistem MPPT untuk optimasi daya panel surya. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, 10(2), 147-154.
- Hosenuzzaman, M., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Hasan, M., & Chowdhury, A. B. (2015). Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 284–297.
- Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., & Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(1), 59–64.
- Ishaque, K., & Salam, Z. (2013). A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 475–488.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press.
- Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., & Blaabjerg, F. (2005). A review of single-phase grid-connected inverters for



- photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(5), 1292-1306.
- Kottas, T. L., Boutalis, Y. S., & Karlis, A. D. (2006). New maximum power point tracker for PV arrays using fuzzy controller in close cooperation with fuzzy cognitive networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3), 793-803.
- Lyden, S., & Haque, M. E. (2015). A comprehensive review of the maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 6(4), 1–19.
- Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic systems engineering* (3rd ed.). CRC Press.
- Motahhir, S., El Hammoumi, A., & El Ghzizal, A. (2018). The most used MPPT algorithms: Review and the suitable algorithm for MATLAB/Simulink implementation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 621-638.
- Rashid, M. H. (2017). *Power electronics: Circuits, devices, and applications* (4th ed.). Pearson Education.
- Rezk, H., & Eltamaly, A. M. (2015). A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 112, 1–11.
- Salas, V., Olias, E., Barrado, A., & Lazaro, A. (2006). Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(11), 1555–1578.
- Subiyanto, S., Mohamed, A., & Hannan, M. A. (2012). An intelligent maximum power point tracking for PV system using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *International Journal of Green Energy*, 9(5), 473-487.
- Tey, K. S., & Mekhilef, S. (2014). A modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level. *Solar Energy*, 101, 333-342.