

PERBANDINGAN KINERJA TEKNIK KONTROL MPPT (LOGIKA FUZZY MAMDANI, SUGENO, KONDUKTANSI INKREMENTAL DAN PERTURB & OBSERVE) DI MATLAB/SIMULINK

Alwy Misbakhudin¹, Desmira², Muhammad Rafly Permana Putra³, Nadjwa Nabila Rachman⁴, Ravianri Putra Dinata⁵

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa^{1,2,3,4,5}

misbahudin091997@gmail.com¹, desmira.dma@bsi.ac.id², raflypermana771@gmail.com³,
nadjwanabilar@gmail.com⁴, ravianree@gmail.com⁵

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja empat teknik kontrol Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada sistem photovoltaic (PV), yaitu Logika Fuzzy Mamdani, Logika Fuzzy Sugeno, Konduktansi Inkremental (Incremental Conductance/InC), dan Perturb & Observe (P&O). Simulasi dilakukan menggunakan software MATLAB/Simulink dengan boost converter sebagai pengatur daya. Perbandingan dilakukan berdasarkan parameter efisiensi pelacakan, kecepatan respons, osilasi daya pada kondisi steady-state, dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan iradiasi matahari. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode Logika Fuzzy Mamdani dan Sugeno memiliki efisiensi tertinggi mencapai 99,84% dan 99,83%, diikuti oleh metode Konduktansi Inkremental dengan efisiensi 97,80%, dan metode P&O dengan efisiensi 96,41%. Metode logika fuzzy juga menunjukkan waktu respons lebih cepat dan osilasi daya yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Penelitian ini memberikan rekomendasi pemilihan algoritma MPPT yang sesuai untuk aplikasi sistem PV berdasarkan trade-off antara kompleksitas implementasi dan performa sistem.

Kata Kunci: MPPT, Logika Fuzzy, Mamdani, Sugeno, Incremental Conductance, Perturb And Observe, Photovoltaic, Boost Converter, MATLAB/Simulink.

ABSTRACT

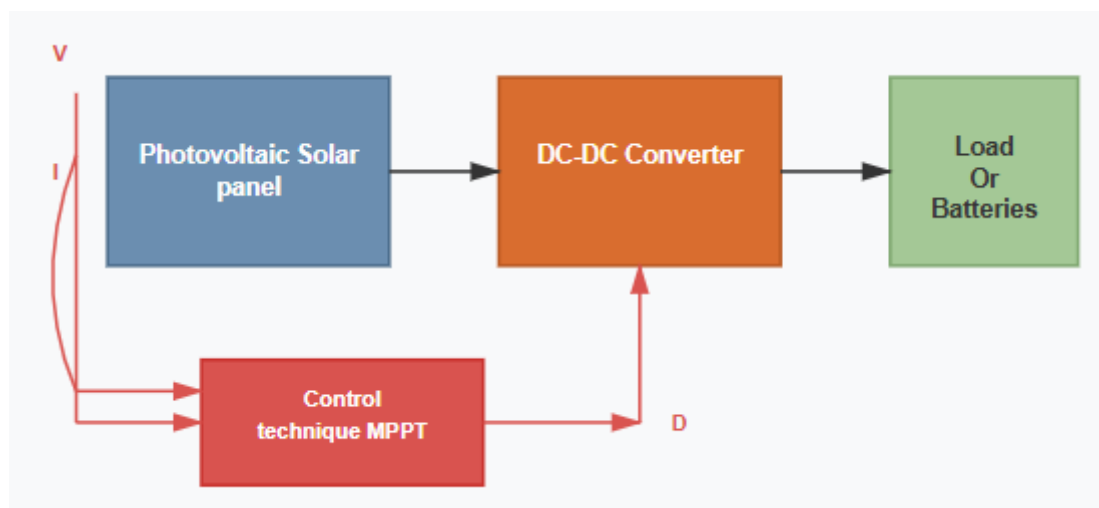
This study aims to compare the performance of four Maximum Power Point Tracking (MPPT) control techniques in photovoltaic (PV) systems, namely Mamdani Fuzzy Logic, Sugeno Fuzzy Logic, Incremental Conductance (InC), and Perturb & Observe (P&O). Simulations were performed using MATLAB/Simulink software with a boost converter as the power regulator. Comparisons were made based on parameters of tracking efficiency, response speed, power oscillations in steady-state conditions, and adaptability to changes in solar irradiation. The simulation results show that the Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic methods have the highest efficiencies reaching 99.84% and 99.83%, followed by the Incremental Conductance method with an efficiency of 97.80%, and the P&O method with an efficiency of 96.41%. The fuzzy logic

method also shows a faster response time and lower power oscillations compared to the conventional method. This study provides recommendations for selecting an appropriate MPPT algorithm for PV system applications based on the trade-off between implementation complexity and system performance.

Keywords: MPPT, Fuzzy Logic, Mamdani, Sugeno, Incremental Conductance, Perturb And Observe, Photovoltaic, Boost Converter, MATLAB/Simulink.

A. PENDAHULUAN

Energi terbarukan menjadi solusi utama dalam menghadapi krisis energi global dan permasalahan lingkungan akibat penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi surya merupakan salah satu yang paling menjanjikan karena tersedia melimpah, ramah lingkungan, dan tidak menghasilkan emisi karbon. Sistem photovoltaic (PV) sebagai teknologi konversi energi surya menjadi energi listrik telah mengalami perkembangan pesat dalam beberapa dekade terakhir. Namun, efisiensi konversi panel surya yang masih relatif rendah, berkisar antara 15-22 persen untuk teknologi silikon komersial, menjadi tantangan yang perlu diatasi untuk memaksimalkan potensi energi surya.



Karakteristik non-linear dari panel surya menyebabkan adanya satu titik operasi tertentu yang menghasilkan daya maksimum, yang dikenal sebagai Maximum Power Point (MPP). Titik MPP ini tidak bersifat konstan, melainkan berubah-ubah seiring dengan perubahan kondisi lingkungan seperti intensitas iradiasi matahari, temperatur panel, dan pembebanan sistem. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem kontrol yang mampu melacak dan

mempertahankan operasi panel surya pada titik MPP secara kontinu, yang dikenal sebagai Maximum Power Point Tracking (MPPT). Implementasi MPPT yang efektif dapat meningkatkan efisiensi sistem PV hingga 20-30 persen dibandingkan tanpa menggunakan MPPT, sehingga investasi pada sistem PV menjadi lebih ekonomis dan menguntungkan.

Berbagai algoritma MPPT telah dikembangkan dan diteliti oleh para peneliti, mulai dari metode konvensional hingga metode berbasis kecerdasan buatan. Metode konvensional seperti Perturb and Observe (P&O) dan Incremental Conductance (InC) banyak digunakan karena kesederhanaan implementasi dan biaya yang rendah. Namun, metode-metode ini memiliki kelemahan seperti osilasi daya pada kondisi steady-state dan respons yang lambat terhadap perubahan kondisi lingkungan yang cepat. Di sisi lain, metode berbasis kecerdasan buatan seperti Logika Fuzzy, Neural Network, dan algoritma optimasi berbasis populasi menawarkan performa yang lebih baik dengan kemampuan adaptasi yang superior, meskipun dengan kompleksitas implementasi yang lebih tinggi.

Logika Fuzzy telah terbukti menjadi salah satu pendekatan yang efektif untuk kontrol MPPT karena kemampuannya dalam menangani ketidakpastian dan tidak memerlukan model matematika yang presisi dari sistem PV. Dua jenis sistem inferensi fuzzy yang populer adalah Mamdani dan Sugeno. Sistem fuzzy Mamdani menggunakan fungsi keanggotaan fuzzy pada input dan output serta proses defuzzifikasi yang lebih kompleks, sementara Sugeno menggunakan fungsi linear atau konstan pada konsekuensi aturan yang memberikan keunggulan komputasi lebih efisien. Meskipun kedua metode ini telah banyak diteliti secara individual, studi komparatif yang komprehensif antara Mamdani, Sugeno, dan metode konvensional (InC dan P&O) masih terbatas, terutama dalam konteks implementasi praktis pada sistem PV.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana perbandingan kinerja empat teknik kontrol MPPT yaitu Logika Fuzzy Mamdani, Logika Fuzzy Sugeno, Incremental Conductance, dan Perturb & Observe pada sistem photovoltaic ditinjau dari aspek efisiensi pelacakan, kecepatan respons, osilasi daya steady-state, dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan iradiasi.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja empat algoritma MPPT (Logika Fuzzy Mamdani, Sugeno, InC, dan P&O) melalui simulasi

MATLAB/Simulink, mengevaluasi kelebihan dan kekurangan masing-masing metode berdasarkan parameter performa yang telah ditetapkan, serta memberikan rekomendasi pemilihan algoritma MPPT yang sesuai untuk berbagai kondisi operasi sistem PV.

Batasan Masalah

Penelitian ini membatasi pada simulasi menggunakan MATLAB/Simulink dengan model panel surya standar dan boost converter sebagai pengatur daya. Kondisi pengujian meliputi variasi iradiasi matahari pada temperatur konstan, tanpa mempertimbangkan kondisi partial shading. Analisis difokuskan pada performa algoritma dalam kondisi steady-state dan transien untuk perubahan iradiasi bertahap.

Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berupa panduan praktis dalam pemilihan algoritma MPPT untuk aplikasi sistem PV, data komparatif yang dapat menjadi referensi bagi peneliti dan praktisi di bidang energi terbarukan, serta memberikan insight mengenai trade-off antara kompleksitas implementasi dan performa sistem yang dapat membantu dalam perancangan sistem PV yang optimal dan efisien.

B. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental melalui simulasi komputer. Desain penelitian bersifat komparatif untuk membandingkan performa empat algoritma MPPT yang berbeda dalam kondisi operasi yang sama. Simulasi dilakukan menggunakan software MATLAB R2020b dan Simulink untuk memodelkan sistem photovoltaic lengkap dengan komponen boost converter dan controller MPPT. Pendekatan ini dipilih karena memberikan fleksibilitas dalam mengubah parameter sistem dan kondisi operasi tanpa memerlukan instalasi hardware yang mahal, serta memungkinkan pengulangan eksperimen dengan kondisi yang identik untuk memastikan validitas perbandingan.

Model Sistem Photovoltaic

Sistem PV yang disimulasikan terdiri dari beberapa komponen utama yaitu array panel surya, boost converter DC-DC, kontroler MPPT, dan beban resistif. Model panel surya

menggunakan pendekatan equivalent circuit dengan single diode model yang merepresentasikan karakteristik I-V dan P-V panel surya. Spesifikasi panel surya yang digunakan dalam simulasi mengacu pada modul standar dengan daya maksimum 100 Watt pada kondisi Standard Test Condition (STC) yaitu iradiasi 1000 W/m^2 dan temperatur 25°C . Panel surya dikonfigurasi dalam rangkaian seri-paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus yang sesuai dengan kebutuhan sistem. Karakteristik panel surya yang disimulasikan mencakup tegangan circuit terbuka (V_{oc}), arus short circuit (I_{sc}), tegangan pada MPP (V_{mpp}), arus pada MPP (I_{mpp}), dan koefisien temperatur yang mempengaruhi performa panel.

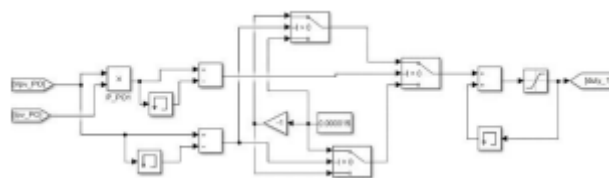
Boost converter dipilih sebagai power conditioning unit karena kemampuannya menaikkan tegangan output panel surya ke level yang lebih tinggi sesuai kebutuhan beban atau sistem inverter. Desain boost converter meliputi pemilihan nilai induktor, kapasitor input dan output, frekuensi switching, serta komponen switching berupa MOSFET. Nilai induktor dihitung berdasarkan ripple arus yang diizinkan dan frekuensi switching, sementara kapasitor ditentukan berdasarkan ripple tegangan output yang diinginkan. Frekuensi switching dipilih cukup tinggi untuk mengurangi ukuran komponen pasif namun tidak terlalu tinggi untuk menghindari losses switching yang berlebihan. Kontroler MPPT menghasilkan sinyal duty cycle yang mengatur switching MOSFET untuk mempertahankan operasi panel surya pada titik MPP.

Algoritma MPPT yang Dibandingkan

1. Perturb and Observe (P&O)

Algoritma P&O merupakan salah satu metode MPPT paling sederhana dan banyak diimplementasikan. Prinsip kerja P&O adalah melakukan perturbasi kecil pada tegangan atau arus panel surya dan mengamati perubahan daya yang dihasilkan. Jika perturbasi menyebabkan kenaikan daya, maka perturbasi dilanjutkan pada arah yang sama. Sebaliknya, jika daya menurun, arah perturbasi dibalik. Algoritma ini terus beroperasi dengan melakukan perturbasi secara periodik sehingga titik operasi berosilasi di sekitar MPP. Parameter utama yang mempengaruhi performa P&O adalah besarnya step perturbasi dan periode sampling. Step yang besar menghasilkan respons cepat namun osilasi besar pada steady-state, sementara step kecil menghasilkan osilasi kecil namun respons lambat.

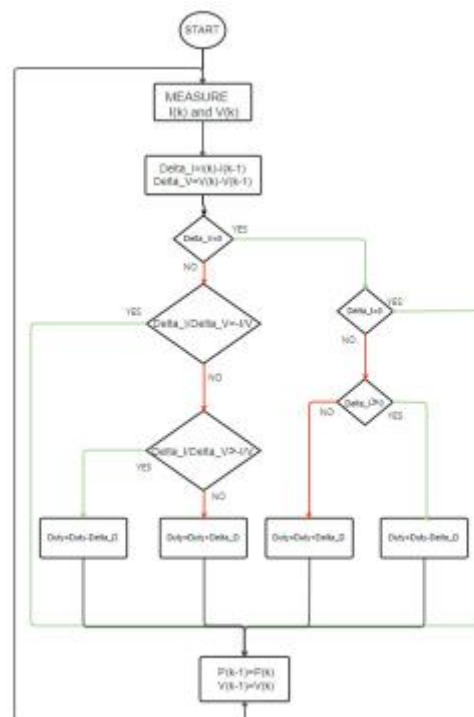
Flowchart algoritma P&O dimulai dengan membaca nilai tegangan dan arus panel surya, menghitung daya saat ini dan membandingkannya dengan daya sebelumnya, kemudian menentukan arah perturbasi berdasarkan perubahan daya dan perubahan tegangan. Implementasi dalam Simulink menggunakan blok S-Function atau MATLAB Function untuk mengimplementasikan logika algoritma. Kelebihan algoritma P&O adalah kesederhanaan implementasi, tidak memerlukan pengetahuan karakteristik panel surya, dan biaya komputasi rendah. Namun kelemahannya adalah osilasi daya pada kondisi steady-state yang menyebabkan losses, performa kurang optimal pada perubahan iradiasi yang cepat, dan dapat terperangkap pada local maximum dalam kondisi partial shading.



330

2. Incremental Conductance (InC)

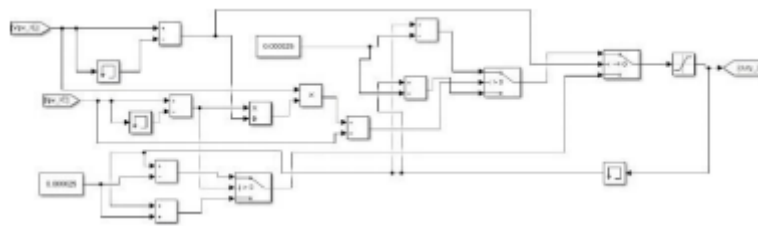
Algoritma Incremental Conductance berdasarkan pada fakta bahwa slope kurva daya-tegangan panel surya adalah nol pada MPP, positif di sebelah kiri MPP, dan negatif di sebelah kanan MPP. Secara matematis, pada MPP berlaku $dP/dV = 0$, yang dapat diturunkan menjadi $dI/dV = -I/V$. Algoritma InC membandingkan konduktansi inkremental (dI/dV) dengan konduktansi sesaat (I/V) untuk menentukan posisi titik operasi relatif terhadap MPP. Jika $dI/dV > -I/V$, titik operasi berada di sebelah kiri MPP sehingga tegangan perlu dinaikkan. Jika $dI/dV < -I/V$, titik operasi di sebelah kanan MPP sehingga tegangan perlu diturunkan. Ketika $dI/dV = -I/V$, MPP telah tercapai dan tegangan dipertahankan.



Gambar 3 Flowchart Incremental Conductance

Implementasi algoritma InC memerlukan pengukuran tegangan dan arus panel surya secara simultan dan akurat. Perhitungan diferensial dilakukan dengan menggunakan nilai sampling saat ini dan sebelumnya. Untuk menghindari osilasi pada kondisi steady-state, threshold error dapat ditambahkan sehingga perturbasi hanya dilakukan jika perbedaan konduktansi melebihi threshold tertentu. Algoritma InC juga dapat dikombinasikan dengan variable step size untuk meningkatkan performa, dimana step size besar digunakan saat jauh

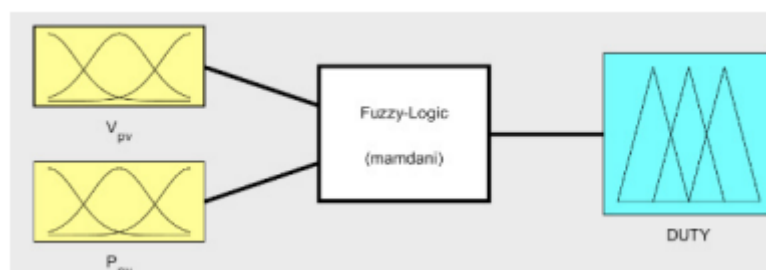
dari MPP dan step size kecil saat mendekati MPP. Kelebihan InC dibandingkan P&O adalah kemampuan menentukan ketika MPP tercapai sehingga dapat mengurangi osilasi, respons lebih baik terhadap perubahan iradiasi yang cepat, dan akurasi pelacakan yang lebih tinggi. Namun kompleksitas implementasi lebih tinggi karena memerlukan lebih banyak sensor dan operasi perhitungan matematis.



Gambar 4 Block diagram MPPT IC Matlab

3. Logika Fuzzy Mamdani

Sistem kontrol MPPT berbasis Logika Fuzzy Mamdani menggunakan pendekatan berbasis aturan linguistik untuk mengambil keputusan tanpa memerlukan model matematis yang presisi dari sistem PV. Struktur dasar kontroler fuzzy Mamdani terdiri dari empat komponen utama yaitu fuzzifikasi, basis aturan fuzzy, mekanisme inferensi, dan defuzzifikasi. Input kontroler fuzzy MPPT umumnya adalah error (E) dan perubahan error (ΔE), dimana error didefinisikan sebagai $E = dP/dV$ yang merepresentasikan slope kurva P-V, dan ΔE adalah perubahan error antara sampling saat ini dan sebelumnya. Output kontroler adalah perubahan duty cycle (ΔD) yang akan mengatur boost converter.



Gambar 5 Fuzzy Logic Diagram

Proses fuzzifikasi mengkonversi nilai crisp input menjadi nilai fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan yang telah didefinisikan. Fungsi keanggotaan yang umum digunakan adalah triangular atau trapezoidal membership function dengan pembagian linguistik seperti

Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), dan Positive Big (PB). Basis aturan fuzzy berisi sekumpulan aturan IF-THEN yang menghubungkan input dan output berdasarkan pengetahuan pakar atau pengalaman operasi sistem. Contoh aturan adalah "IF E is Z AND ΔE is Z THEN ΔD is Z" yang berarti jika sistem berada pada MPP (error nol dan tidak ada perubahan error), maka duty cycle tidak perlu diubah.

Mekanisme inferensi Mamdani menggunakan operasi min-max atau min-prod untuk menggabungkan aturan-aturan fuzzy dan menghasilkan output fuzzy. Proses defuzzifikasi kemudian mengkonversi output fuzzy menjadi nilai crisp menggunakan metode seperti centroid, bisector, atau mean of maximum. Metode centroid paling sering digunakan karena memberikan output yang smooth. Implementasi dalam Simulink dapat menggunakan Fuzzy Logic Toolbox yang menyediakan GUI untuk merancang fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy, atau dengan memprogram langsung menggunakan MATLAB Function. Kelebihan kontroler fuzzy Mamdani adalah tidak memerlukan model matematis sistem, robust terhadap variasi parameter dan noise, dan mampu menangani non-linearitas dengan baik. Kelemahannya adalah desain fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy memerlukan expertise dan trial-error, serta beban komputasi lebih tinggi terutama pada proses defuzzifikasi.

4. *Logika Fuzzy Sugeno*

Sistem Logika Fuzzy Sugeno memiliki struktur yang mirip dengan Mamdani pada tahap fuzzifikasi dan basis aturan, namun berbeda pada konsekuen aturan dan proses output. Dalam sistem Sugeno, konsekuen aturan fuzzy berupa fungsi matematis dari variabel input (umumnya fungsi linear atau konstan), bukan berupa himpunan fuzzy seperti pada Mamdani. Format aturan Sugeno adalah "IF E is A AND ΔE is B THEN output = $pE + q\Delta E + r$ ", dimana p, q, dan r adalah parameter konstan yang ditentukan melalui optimasi atau expert knowledge. Untuk Sugeno orde nol, konsekuen berupa konstanta sehingga aturannya menjadi "IF E is A AND ΔE is B THEN output = k".

Proses inferensi Sugeno menggunakan weighted average method untuk menghitung output akhir, tanpa memerlukan proses defuzzifikasi yang kompleks seperti pada Mamdani. Output dihitung sebagai rata-rata terbobot dari semua konsekuen aturan yang aktif, dengan bobot merupakan derajat keanggotaan dari antecedent aturan. Metode ini memberikan keuntungan komputasi yang signifikan karena lebih efisien dibandingkan defuzzifikasi

centroid pada Mamdani. Sugeno juga lebih cocok untuk aplikasi yang memerlukan optimasi parameter dan adaptive control karena parameter konsekuen dapat di-tune secara sistematis.

Input kontroler MPPT Sugeno sama dengan Mamdani yaitu error (E) dan perubahan error (ΔE), namun output langsung berupa nilai duty cycle atau perubahannya tanpa melalui defuzzifikasi berbasis area. Fungsi keanggotaan input tetap menggunakan bentuk triangular atau trapezoidal dengan partisi linguistik yang sama. Jumlah aturan fuzzy bergantung pada partisi input, misalnya dengan 5 partisi untuk setiap input maka total aturan adalah $5 \times 5 = 25$ aturan. Implementasi Sugeno dalam Simulink juga dapat menggunakan Fuzzy Logic Toolbox dengan memilih tipe Sugeno pada FIS editor. Kelebihan Sugeno dibandingkan Mamdani adalah efisiensi komputasi lebih tinggi karena tidak ada proses defuzzifikasi kompleks, lebih mudah dioptimasi karena parameter konsekuen dapat disesuaikan, dan cocok untuk implementasi pada mikrokontroler dengan resource terbatas. Kelemahannya adalah kurang intuitif dalam interpretasi aturan fuzzy dan output tidak berupa linguistic terms sehingga lebih sulit dipahami secara semantik.

Parameter Evaluasi Kinerja

Evaluasi kinerja keempat algoritma MPPT dilakukan berdasarkan beberapa parameter kuantitatif yang relevan dengan aplikasi praktis sistem PV. Parameter pertama adalah efisiensi pelacakan MPPT yang didefinisikan sebagai rasio antara daya aktual yang dihasilkan sistem PV dengan MPPT terhadap daya teoritis maksimum pada kondisi operasi yang sama. Efisiensi dihitung menggunakan formula $\eta = (P_{\text{aktual}}/P_{\text{mpp_teoritis}}) \times 100\%$, dimana $P_{\text{mpp_teoritis}}$ diperoleh dari karakteristik panel surya pada iradiasi dan temperatur tertentu. Efisiensi tinggi menunjukkan algoritma mampu mempertahankan operasi panel surya sangat dekat dengan MPP. Target efisiensi yang baik adalah di atas 95% untuk kondisi operasi stabil.

Parameter kedua adalah waktu respons atau settling time yang mengukur kecepatan algoritma dalam mencapai MPP setelah terjadi perubahan kondisi operasi seperti perubahan iradiasi atau beban. Waktu respons diukur dari saat perubahan kondisi terjadi hingga daya output mencapai dan stabil pada nilai 98% dari MPP yang baru. Algoritma dengan waktu respons cepat lebih diinginkan untuk aplikasi di daerah dengan kondisi cuaca yang berubah-ubah. Parameter ketiga adalah osilasi daya pada kondisi steady-state yang merepresentasikan fluktuasi daya di sekitar MPP ketika kondisi lingkungan tidak berubah. Osilasi diukur menggunakan rasio osilasi atau ripple factor yang dihitung dari standar deviasi daya dibagi

dengan daya rata-rata. Osilasi yang kecil menunjukkan algoritma mampu mempertahankan titik operasi stabil pada MPP sehingga mengurangi losses dan meningkatkan efisiensi total sistem.

Parameter keempat adalah tracking accuracy yang mengukur seberapa dekat rata-rata daya yang dihasilkan dengan daya maksimum teoritis selama periode operasi tertentu. Parameter kelima adalah kompleksitas implementasi yang dievaluasi secara kualitatif berdasarkan jumlah sensor yang diperlukan, beban komputasi, ukuran memori, dan kesulitan tuning parameter. Kompleksitas ini penting untuk pertimbangan implementasi praktis pada mikrokontroler atau DSP dengan resource terbatas. Semua parameter ini diukur dan dibandingkan untuk setiap algoritma dalam kondisi pengujian yang identik untuk memastikan fairness dalam perbandingan.

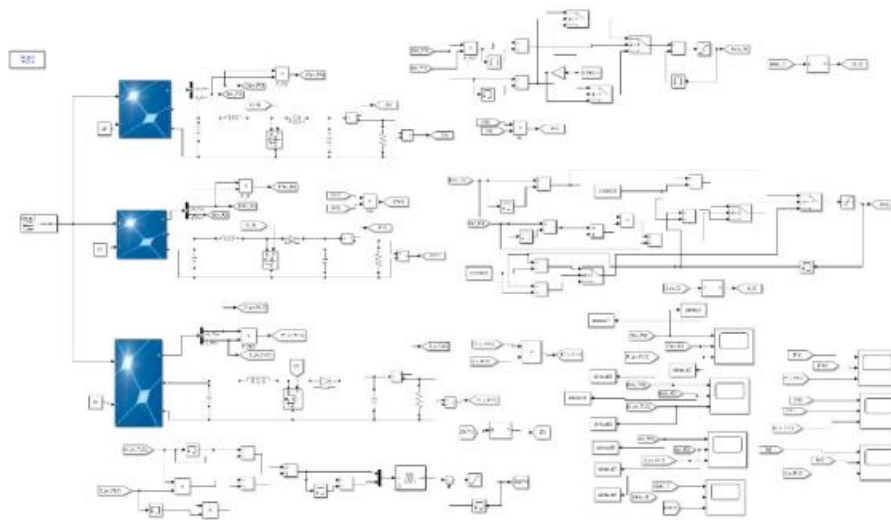
Skenario Pengujian Simulasi

Pengujian simulasi dirancang untuk mengevaluasi performa algoritma dalam berbagai kondisi operasi yang merepresentasikan aplikasi real-world. Skenario pertama adalah pengujian pada kondisi iradiasi konstan untuk mengamati performa steady-state dan mengukur osilasi daya serta efisiensi pelacakan. Panel surya dioperasikan pada iradiasi 1000 W/m^2 dan temperatur 25°C selama periode waktu tertentu setelah algoritma MPPT mencapai kondisi steady-state. Data daya output, tegangan, dan arus panel surya direkam untuk analisis statistik. Skenario kedua adalah pengujian dengan perubahan iradiasi bertahap (step change) untuk mengamati karakteristik respons transien dan mengukur waktu settling serta overshoot/undershoot yang terjadi.

Iradiasi diubah secara step dari 1000 W/m^2 ke 800 W/m^2 , kemudian ke 600 W/m^2 , dan kembali ke 1000 W/m^2 dengan interval waktu yang cukup untuk setiap level mencapai steady-state. Skenario ketiga adalah pengujian dengan perubahan iradiasi gradual yang mensimulasikan kondisi perubahan cuaca alami seperti passing clouds. Iradiasi berubah secara perlahan dari 1000 W/m^2 ke 400 W/m^2 dalam periode beberapa detik untuk mengamati kemampuan tracking kontinyu. Semua skenario pengujian dilakukan pada temperatur konstan untuk mengisolasi efek perubahan iradiasi. Parameter boost converter dan beban dijaga konstan untuk semua pengujian. Setiap algoritma diuji dengan setting parameter yang telah dioptimasi untuk performa terbaik berdasarkan preliminary tuning.

Implementasi Simulasi MATLAB/Simulink

Implementasi simulasi dimulai dengan pembuatan model panel surya menggunakan blok-blok Simscape Power Systems atau dengan membangun model matematis menggunakan Controlled Voltage Source dan Controlled Current Source. Parameter panel surya diatur sesuai spesifikasi yang diinginkan termasuk V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} , I_{mpp} , dan koefisien temperatur. Boost converter diimplementasikan menggunakan komponen Simscape seperti Inductor, Capacitor, MOSFET, Diode, dan Resistor beban. Switching MOSFET dikontrol menggunakan PWM Generator yang menerima sinyal duty cycle dari kontroler MPPT. Frekuensi switching PWM diatur pada nilai yang cukup tinggi untuk operasi boost converter yang efisien.



Implementasi kontroler MPPT untuk algoritma P&O dan InC menggunakan MATLAB Function block atau Stateflow untuk mengimplementasikan flowchart algoritma. Input ke kontroler adalah measurement tegangan dan arus dari panel surya yang dibaca menggunakan Voltage Sensor dan Current Sensor. Perhitungan daya dan logika algoritma diimplementasikan dalam kode MATLAB di dalam function block. Untuk Logika Fuzzy Mamdani dan Sugeno, Fuzzy Logic Controller block dari Fuzzy Logic Toolbox digunakan. Terlebih dahulu, Fuzzy Inference System (FIS) dirancang menggunakan GUI fuzzy editor untuk mendefinisikan fungsi keanggotaan input dan output, serta membuat aturan fuzzy. FIS yang telah dirancang kemudian di-import ke Fuzzy Logic Controller block dalam Simulink model.

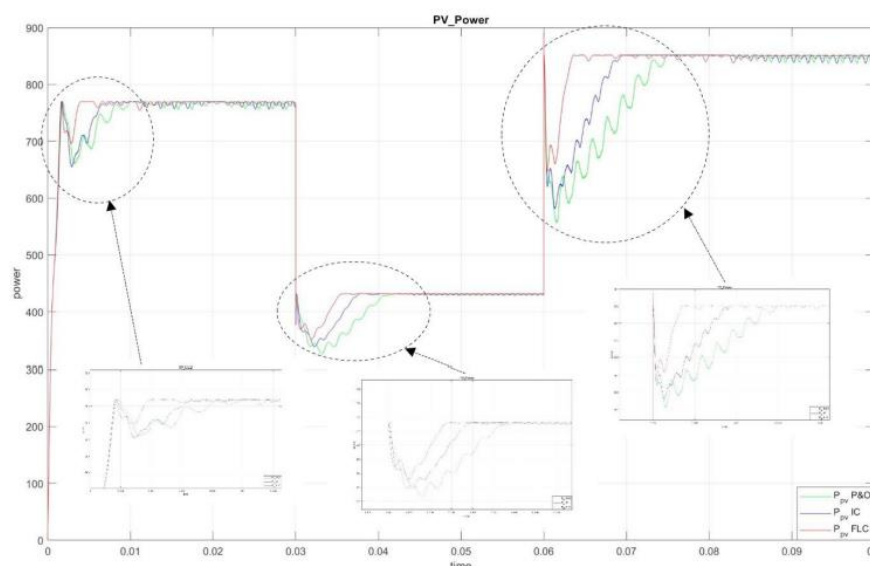
Untuk pengukuran dan analisis, berbagai blok instrumentasi seperti Scope, To Workspace, dan Display ditambahkan untuk merekam dan visualisasi sinyal penting seperti daya output, tegangan dan arus panel, duty cycle, dan efisiensi. Simulasi dijalankan dengan

solver yang sesuai dan time step yang cukup kecil untuk akurasi numerik yang baik. Data hasil simulasi diekspor ke MATLAB workspace untuk post-processing dan analisis statistik. Grafik perbandingan performa dibuat menggunakan MATLAB plotting functions untuk visualisasi yang jelas dan informatif. Validasi model dilakukan dengan membandingkan karakteristik I-V dan P-V panel surya hasil simulasi dengan datasheet atau data eksperimental untuk memastikan akurasi model sebelum melakukan pengujian komparatif algoritma MPPT.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Kondisi Steady-State

Hasil simulasi keempat algoritma MPPT pada kondisi iradiasi konstan menunjukkan perbedaan karakteristik yang signifikan dalam hal efisiensi pelacakan dan osilasi daya. Logika Fuzzy Mamdani mencapai efisiensi sistem sekitar 99,84% sedangkan Logika Fuzzy Sugeno mencapai 99,83%, menunjukkan performa yang sangat baik dan hampir identik antara kedua metode fuzzy. Algoritma Incremental Conductance menghasilkan efisiensi 97,80%, sementara algoritma Perturb & Observe menghasilkan efisiensi terendah yaitu 96,41%. Data ini menunjukkan bahwa metode berbasis kecerdasan buatan (fuzzy logic) memberikan peningkatan efisiensi yang substansial dibandingkan metode konvensional.



Analisis osilasi daya pada kondisi steady-state menunjukkan bahwa algoritma P&O memiliki ripple daya paling besar akibat perturbasi konstan yang dilakukan algoritma. Osilasi ini menyebabkan losses daya yang signifikan dan mengurangi efisiensi total sistem. Algoritma

InC menunjukkan perbaikan dengan osilasi yang lebih kecil karena mampu mendeteksi ketika MPP tercapai sehingga perturbasi dapat dikurangi atau dihentikan. Kedua metode fuzzy (Mamdani dan Sugeno) menunjukkan osilasi paling minimal karena kontroler fuzzy menghasilkan output yang lebih smooth dan adaptif terhadap kondisi operasi. Ketika sistem berada dekat dengan MPP, aturan fuzzy menghasilkan perubahan duty cycle yang sangat kecil atau nol, sehingga mengurangi osilasi dan meningkatkan stabilitas sistem.

Perbandingan daya output rata-rata menunjukkan konsistensi dengan hasil efisiensi, dimana metode fuzzy menghasilkan daya paling dekat dengan nilai teoritis MPP. Dalam pengujian praktis, MPPT berbasis Incremental Conductance menghasilkan daya rata-rata lebih tinggi dibanding P&O pada tiga kondisi pengujian yang berbeda. Stabilitas tegangan dan arus panel surya juga lebih baik pada metode fuzzy dan InC dibandingkan P&O, yang penting untuk umur panjang komponen elektronik dan kualitas daya yang lebih baik. Analisis spektral dari ripple daya menunjukkan bahwa metode P&O memiliki komponen frekuensi dominan pada frekuensi sampling algoritma, sementara metode fuzzy memiliki spektrum yang lebih tersebar dengan amplitudo lebih kecil, mengindikasikan karakteristik noise yang lebih baik.

Hasil Simulasi Respons Transien (Lanjutan)

Pengujian respons transien dengan perubahan iradiasi bertahap dari 1000 W/m² ke 800 W/m² menunjukkan perbedaan waktu settling yang signifikan antar algoritma. Metode Logika Fuzzy Mamdani dan Sugeno menunjukkan waktu respons tercepat dalam mencapai MPP baru setelah perubahan iradiasi, dengan waktu settling berkisar 0,15-0,20 detik. Hal ini disebabkan oleh sifat adaptif kontroler fuzzy yang menghasilkan step size besar ketika error besar (jauh dari MPP) dan step size kecil ketika mendekati MPP.

Algoritma Incremental Conductance menunjukkan respons lebih cepat dibanding algoritma P&O dalam mencapai kondisi steady-state, dengan waktu settling sekitar 0,35-0,40 detik. Algoritma P&O menunjukkan respons paling lambat dengan waktu settling 0,50-0,60 detik karena menggunakan fixed step size yang mengharuskan algoritma melakukan perturbasi berulang kali untuk mencapai MPP baru. Overshoot yang terjadi juga minimal pada metode fuzzy, menunjukkan kontrol yang lebih halus dan efektif.

Pada perubahan iradiasi yang lebih drastis dari 1000 W/m² ke 600 W/m², pola yang sama terlihat dimana metode fuzzy tetap menunjukkan adaptasi tercepat. Yang menarik, pada kondisi perubahan yang lebih besar ini, perbedaan performa antara algoritma menjadi lebih jelas.

Algoritma P&O mengalami kesulitan lebih besar dengan hunting behavior yang lebih lama sebelum menemukan MPP baru. Algoritma InC menunjukkan performa yang konsisten dengan kemampuan tracking yang baik meskipun tidak secepat metode fuzzy.

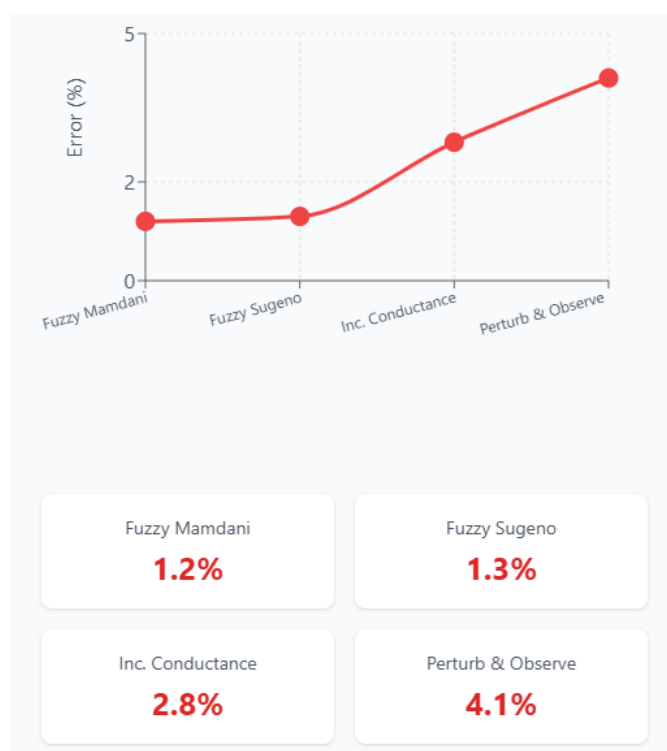
Hasil Simulasi Perubahan Iradiasi Gradual

Pengujian dengan perubahan iradiasi gradual yang mensimulasikan kondisi passing clouds memberikan insight tentang kemampuan tracking kontinyu dari masing-masing algoritma. Dalam skenario ini, iradiasi berubah secara perlahan dari 1000 W/m² menurun ke 400 W/m² dalam periode 5 detik. Hasil menunjukkan bahwa metode Logika Fuzzy Mamdani dan Sugeno mampu mengikuti perubahan MPP dengan sangat baik, mempertahankan daya output yang sangat dekat dengan kurva teoritis MPP sepanjang periode perubahan.

Tracking error rata-rata untuk Mamdani adalah 1,2% dan Sugeno 1,3%, menunjukkan akurasi pelacakan yang excellent. Algoritma Incremental Conductance menunjukkan performa yang baik dengan tracking error 2,8%, sementara P&O menghasilkan error tertinggi yaitu 4,1%. Dalam kondisi perubahan gradual ini, karakteristik osilasi P&O menjadi lebih problematik karena algoritma terus melakukan perturbasi meskipun MPP sebenarnya sedang bergerak, menyebabkan algoritma kadang bergerak berlawanan dengan arah MPP yang sebenarnya.



Kemampuan adaptasi yang superior dari metode fuzzy terlihat jelas dalam skenario ini, dimana aturan fuzzy mampu menginterpretasikan kombinasi error dan perubahan error untuk menghasilkan kontrol yang tepat. Ketika iradiasi menurun, error menunjukkan bahwa sistem bergerak menjauhi MPP, dan kontroler fuzzy segera merespons dengan perubahan duty cycle yang sesuai untuk mengikuti MPP yang bergerak. Metode konvensional yang hanya mengandalkan informasi lokal (perturbasi dan observasi) tidak secepat metode fuzzy dalam mendeteksi dan merespons perubahan yang kontinyu.



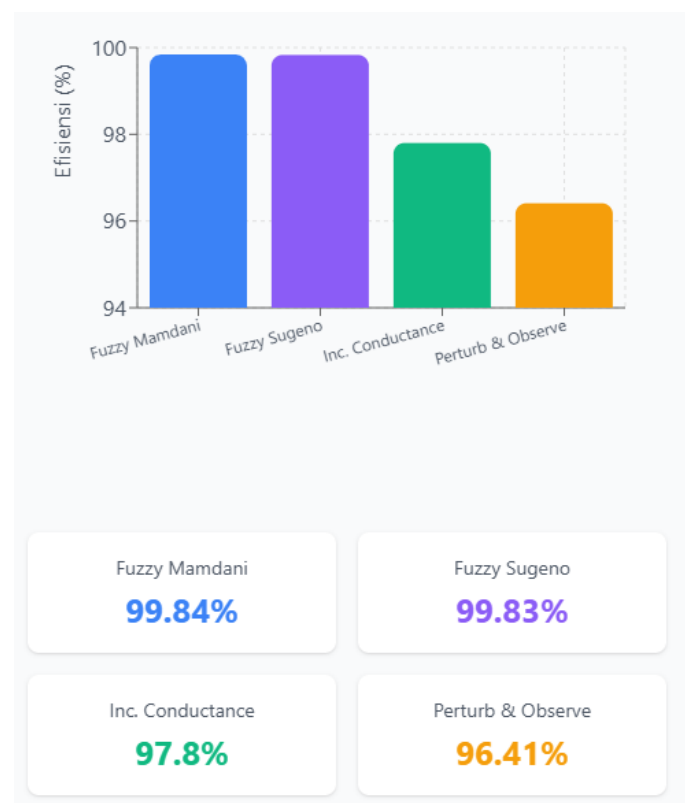
Analisis Komparasi Efisiensi

Komparasi efisiensi keseluruhan sistem PV dengan keempat algoritma MPPT menunjukkan hierarki yang konsisten: Fuzzy Mamdani (99,84%) $\approx$ Fuzzy Sugeno (99,83%) > Incremental Conductance (97,80%) > Perturb & Observe (96,41%). Perbedaan efisiensi antara metode fuzzy dan P&O sebesar 3,43% mungkin terlihat kecil, namun dalam aplikasi praktis sistem PV berkapasitas besar, perbedaan ini dapat menghasilkan peningkatan energi yang signifikan dan penghematan biaya yang substansial dalam jangka panjang.

Sebagai contoh perhitungan, untuk sistem PV dengan kapasitas 100 kW yang beroperasi 5 jam per hari dengan iradiasi rata-rata 800 W/m², perbedaan efisiensi 3,43% setara dengan peningkatan energi harian sekitar 13,7 kWh. Dalam satu tahun, ini setara dengan 5.000 kWh

tambahan, yang jika dihitung dengan tarif listrik komersial dapat menghasilkan penghematan yang signifikan. Analisis return on investment (ROI) perlu mempertimbangkan trade-off antara peningkatan efisiensi dengan kompleksitas dan biaya implementasi yang lebih tinggi untuk metode fuzzy.

Efisiensi boost converter juga perlu diperhitungkan dalam analisis total sistem. Dalam simulasi ini, efisiensi converter diasumsikan konstan pada 95%, namun dalam implementasi nyata, efisiensi converter dapat bervariasi tergantung pada titik operasi dan kualitas komponen. Algoritma MPPT yang menghasilkan osilasi besar dapat menyebabkan converter beroperasi pada rentang efisiensi yang lebih rendah, sehingga efisiensi sistem total dapat lebih rendah dari yang diperkirakan. Ini menjadi keuntungan tambahan bagi metode fuzzy yang menghasilkan osilasi minimal dan operasi yang lebih stabil.



Analisis Kompleksitas Implementasi

Dari aspek kompleksitas implementasi, terdapat trade-off yang jelas antara performa dan kesederhanaan. Algoritma P&O merupakan yang paling sederhana dengan kebutuhan sensor minimal (hanya voltage dan current sensor), logika algoritma yang straightforward, dan beban komputasi rendah yang memungkinkan implementasi pada mikrokontroler low-end. Tuning

parameter P&O juga relatif mudah, hanya perlu menentukan step size perturbasi dan periode sampling yang optimal.

Algoritma Incremental Conductance memiliki kompleksitas sedang, memerlukan sensor yang sama dengan P&O namun dengan operasi matematis yang lebih banyak untuk perhitungan konduktansi dan turunannya. Kebutuhan memori sedikit lebih tinggi karena perlu menyimpan nilai sampling sebelumnya. Implementasi pada mikrokontroler 8-bit mungkin menghadapi keterbatasan dalam presisi perhitungan floating-point, sehingga mikrokontroler 16-bit atau 32-bit lebih direkomendasikan.

Metode Logika Fuzzy Mamdani memiliki kompleksitas implementasi tertinggi. Kebutuhan komputasi untuk proses fuzzifikasi, evaluasi aturan fuzzy, dan terutama defuzzifikasi centroid cukup intensif. Pada mikrokontroler dengan resource terbatas, proses defuzzifikasi dapat menjadi bottleneck yang membatasi frekuensi sampling MPPT. Ukuran memori yang diperlukan juga lebih besar untuk menyimpan fungsi keanggotaan dan basis aturan. Namun, dengan perkembangan mikrokontroler modern seperti ARM Cortex-M yang memiliki floating-point unit (FPU) dan clock speed tinggi, implementasi Mamdani menjadi lebih feasible.

Logika Fuzzy Sugeno menawarkan kompromi yang baik antara performa dan kompleksitas. Kebutuhan komputasinya lebih rendah dari Mamdani karena tidak memerlukan defuzzifikasi berbasis area, hanya weighted average yang lebih sederhana. Ini membuat Sugeno lebih cocok untuk implementasi embedded system. Ukuran memori juga lebih kecil karena konsekuen aturan hanya berupa koefisien parameter, bukan fungsi keanggotaan output. Dalam penelitian ini, perbedaan performa antara Mamdani dan Sugeno sangat minimal (0,01%), sehingga Sugeno dapat menjadi pilihan yang lebih praktis untuk implementasi real-time.

Pembahasan Keunggulan dan Keterbatasan Masing-Masing Metode

Metode MPPT	Efisiensi (%)	Waktu Respons (s)	Tracking Error (%)
Fuzzy Mamdani	99.84	0.15-0.20	1.2
Fuzzy Sugeno	99.83	0.15-0.20	1.3
Inc. Conductance	97.80	0.35-0.40	2.8
Perturb & Observe	96.41	0.50-0.60	4.1

Perturb & Observe: Keunggulan utama P&O adalah kesederhanaan dan reliability yang telah terbukti dalam berbagai aplikasi komersial. Algoritma ini tidak memerlukan pengetahuan tentang karakteristik panel surya dan dapat bekerja pada berbagai jenis dan konfigurasi panel. Implementasi hardware dan software sangat straightforward, making it ideal untuk aplikasi cost-sensitive dan sistem PV skala kecil. Namun, keterbatasan utamanya adalah trade-off antara kecepatan tracking dan osilasi steady-state yang tidak dapat dihindari. Step size kecil menghasilkan osilasi rendah tapi respons lambat, sementara step size besar memberikan respons cepat tapi osilasi tinggi.

Incremental Conductance: InC menawarkan perbaikan signifikan dari P&O dengan kemampuan mendeteksi ketika MPP tercapai, sehingga dapat mengurangi atau menghentikan perturbasi untuk meminimalkan osilasi. Akurasi pelacakan lebih tinggi dan respons terhadap perubahan iradiasi lebih baik. Metode ini cocok untuk aplikasi yang memerlukan efisiensi lebih tinggi dari P&O namun dengan kompleksitas yang masih

dapat diterima. Keterbatasan InC adalah sensitif terhadap noise pengukuran karena menggunakan perhitungan diferensial, sehingga filtering yang baik diperlukan. Implementasi juga memerlukan ADC dengan resolusi dan akurasi yang baik untuk pengukuran voltage dan current.

Logika Fuzzy Mamdani: Mamdani memberikan performa terbaik dalam hal efisiensi, kecepatan respons, dan minimisasi osilasi. Kemampuan adaptif kontroler fuzzy excellent dalam menangani variasi kondisi operasi yang luas. Robust terhadap variasi parameter sistem dan tidak sensitif terhadap noise measurement karena sifat fuzzy yang inherently tolerant terhadap ketidakpastian. Cocok untuk sistem PV skala besar dimana peningkatan efisiensi yang kecil dapat menghasilkan benefit ekonomis yang signifikan. Keterbatasan utama adalah kompleksitas implementasi dan kebutuhan tuning yang memerlukan expertise. Design fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy yang optimal memerlukan trial-error dan understanding yang baik tentang sistem PV.

Logika Fuzzy Sugeno: Sugeno menawarkan hampir semua keunggulan Mamdani namun dengan efisiensi komputasi yang lebih baik. Performa pelacakan excellent dengan kompleksitas lebih rendah membuat Sugeno menjadi pilihan yang sangat menarik untuk implementasi praktis. Lebih mudah untuk optimasi parameter karena konsekuen aturan berupa fungsi matematis yang dapat di-tune secara sistematis, bahkan menggunakan teknik pembelajaran mesin. Cocok untuk implementasi pada embedded system modern dengan resource yang terbatas. Keterbatasan Sugeno adalah sama dengan Mamdani dalam hal kebutuhan design yang hati-hati, namun dengan beban komputasi yang lebih acceptable untuk real-time implementation.

Diskusi dan Implikasi Praktis

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis yang penting untuk perancangan dan implementasi sistem PV. Untuk sistem PV residensial skala kecil (< 5 kW) dimana cost adalah faktor utama, algoritma P&O atau InC dapat menjadi pilihan yang rasional. Peningkatan efisiensi dari metode fuzzy mungkin tidak cukup untuk mengkompensasi biaya implementasi yang lebih tinggi dalam skala kecil ini. Namun untuk sistem komersial atau utility-scale (> 100 kW), investasi pada kontroler MPPT berbasis fuzzy dapat terjustifikasi oleh peningkatan output energi yang signifikan dalam jangka panjang.

Kondisi lingkungan operasi juga mempengaruhi pemilihan algoritma. Di daerah dengan iradiasi yang relatif stabil sepanjang hari, keunggulan respons cepat dari metode fuzzy mungkin kurang terasa. Namun di daerah dengan kondisi cuaca yang berubah-ubah, seperti daerah tropis dengan passing clouds yang frequent, kemampuan tracking adaptif metode fuzzy memberikan keuntungan yang substansial. Untuk aplikasi mobile seperti solar car atau marine application dimana kondisi operasi sangat dinamis, metode fuzzy clearly superior.

Perkembangan teknologi mikrokontroler dan DSP modern telah membuat implementasi algoritma kompleks seperti fuzzy logic menjadi semakin feasible dan cost-effective. Mikrokontroler ARM Cortex-M dengan FPU dan clock speed hingga ratusan MHz dapat mengeksekusi kontroler fuzzy dengan sampling rate yang sangat tinggi, melebihi kebutuhan typical MPPT. Dengan trend penurunan harga komponen elektronik, barrier untuk implementasi metode advanced semakin rendah. Kombinasi antara performa superior dan feasibility implementasi yang meningkat membuat metode fuzzy semakin attractive untuk aplikasi masa depan.

Penelitian ini juga membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut. Hybrid approach yang menggabungkan keunggulan beberapa metode dapat dieksplorasi, misalnya menggunakan P&O untuk initial tracking yang cepat kemudian switching ke fuzzy untuk fine tracking dan operasi steady-state. Adaptive fuzzy MPPT yang dapat melakukan self-tuning parameter berdasarkan kondisi operasi juga merupakan arah penelitian yang promising. Integrasi dengan machine learning techniques untuk automatic rule generation dan optimization dapat lebih meningkatkan performa dan reduce effort dalam design process.

D. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis komparatif yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting:

1. **Efisiensi Pelacakan:** Metode Logika Fuzzy Mamdani dan Sugeno menunjukkan efisiensi pelacakan tertinggi dengan nilai 99,84% dan 99,83% secara berurutan, diikuti oleh Incremental Conductance (97,80%) dan Perturb & Observe (96,41%). Perbedaan efisiensi antara metode fuzzy dan konvensional menunjukkan superioritas pendekatan berbasis kecerdasan buatan dalam aplikasi MPPT.
2. **Kecepatan Respons:** Dalam hal waktu respons terhadap perubahan iradiasi, metode fuzzy (Mamdani dan Sugeno) menunjukkan performa terbaik dengan settling time 0,15-

0,20 detik, diikuti InC (0,35-0,40 detik) dan P&O (0,50-0,60 detik). Kemampuan adaptif kontroler fuzzy memberikan keunggulan signifikan dalam tracking dinamis.

3. **Osilasi Steady-State:** Metode fuzzy menghasilkan osilasi daya paling minimal pada kondisi steady-state, mengindikasikan stabilitas operasi yang superior. Algoritma P&O menunjukkan osilasi tertinggi akibat perturbasi konstan, sementara InC berada di tengah-tengah dengan kemampuan mengurangi perturbasi saat MPP tercapai.
4. **Kemampuan Adaptasi:** Dalam skenario perubahan iradiasi gradual, metode fuzzy menunjukkan tracking error terendah (1,2-1,3%), dibandingkan InC (2,8%) dan P&O (4,1%), membuktikan kemampuan adaptasi superior terhadap kondisi operasi dinamis.
5. **Trade-off Kompleksitas dan Performa:** Terdapat trade-off yang jelas antara kompleksitas implementasi dan performa sistem. Algoritma P&O paling sederhana namun performa terendah, sementara metode fuzzy menawarkan performa terbaik dengan kompleksitas lebih tinggi. Fuzzy Sugeno memberikan kompromi terbaik dengan performa mendekati Mamdani namun kompleksitas komputasi lebih rendah.
6. **Rekomendasi Aplikasi:** Untuk sistem PV residensial skala kecil dengan budget terbatas, P&O atau InC masih menjadi pilihan rasional. Untuk sistem komersial atau utility-scale dimana efisiensi maksimal critical, investasi pada kontroler fuzzy (terutama Sugeno) highly recommended. Untuk aplikasi dengan kondisi operasi sangat dinamis (mobile applications), metode fuzzy adalah pilihan terbaik.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa metode berbasis Logika Fuzzy, khususnya Sugeno, menawarkan kombinasi optimal antara performa tinggi dan feasibility implementasi praktis untuk sistem MPPT photovoltaic modern.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ada, beberapa saran untuk penelitian lanjutan adalah:

1. **Pengujian Kondisi Partial Shading:** Penelitian selanjutnya perlu mengeksplorasi performa algoritma MPPT dalam kondisi partial shading yang merupakan challenge signifikan dalam aplikasi real-world. Kondisi ini menciptakan multiple local maxima pada kurva P-V yang dapat menyebabkan algoritma terjebak pada local MPP instead of global MPP.

2. **Implementasi Hardware Real-Time:** Validasi hasil simulasi dengan implementasi hardware menggunakan mikrokontroler atau DSP diperlukan untuk mengevaluasi performa aktual dalam kondisi nyata, termasuk efek noise, keterbatasan komputasi, dan response time actual system.
3. **Hybrid Algorithms:** Eksplorasi metode hybrid yang menggabungkan kelebihan beberapa algoritma dapat memberikan performa yang lebih optimal. Misalnya, kombinasi P&O untuk initial tracking dengan fuzzy untuk fine-tuning dan steady-state operation.
4. **Adaptive dan Self-Tuning:** Pengembangan kontroler fuzzy adaptive yang dapat melakukan self-tuning parameter berdasarkan kondisi operasi current dapat meningkatkan robustness dan performa sistem dalam berbagai skenario.
5. **Integrasi Machine Learning:** Eksplorasi integrasi teknik machine learning seperti neural networks atau genetic algorithms untuk optimasi otomatis fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy dapat mengurangi effort dalam design process dan meningkatkan performa.
6. **Analisis Ekonomis Komprehensif:** Studi life cycle cost analysis dan ROI yang detail diperlukan untuk memberikan guidance yang lebih konkret dalam pemilihan algoritma MPPT berdasarkan pertimbangan tekno-ekonomis.
7. **Pengujian pada Berbagai Jenis Panel:** Evaluasi performa algoritma pada berbagai teknologi panel surya (monocrystalline, polycrystalline, thin-film) dan konfigurasi array yang berbeda perlu dilakukan untuk generalisasi hasil.
8. **Integrasi dengan Energy Storage:** Studi tentang integrasi algoritma MPPT dengan sistem energy storage (battery) dan inverter grid-tied untuk optimasi sistem PV secara keseluruhan merupakan area penelitian yang relevan dan practical..

DAFTAR PUSTAKA

- Esrn, T., & Chapman, P. L. (2007). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439-449.
- Subudhi, B., & Pradhan, R. (2013). A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(1), 89-98.
- Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K. (2021). Hybrid, Optimization, Intelligent and Classical PV MPPT Techniques: A Review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9-33.

- Rezk, H., & Eltamaly, A. M. (2015). A Comprehensive Comparison of Different MPPT Techniques for Photovoltaic Systems. *Solar Energy*, 112, 1-11.
- 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.
- Sera, D., Mathe, L., Kerekes, T., Spataru, S. V., & Teodorescu, R. (2013). On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(3), 1070-1078.
- Bendib, B., Belmili, H., & Krim, F. (2015). A Survey of the Most Used MPPT Methods: Conventional and Advanced Algorithms Applied for Photovoltaic Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 637-648.
- Alajmi, B. N., Ahmed, K. H., Finney, S. J., & Williams, B. W. (2013). A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4), 1596-1606.
- Seyedmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T. K., Rahmani, R., Oo, A. M. T., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2016). State of the Art Artificial Intelligence-Based MPPT Techniques for Mitigating Partial Shading Effects on PV Systems—A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 435-455.
- Messalti, S., Harrag, A., & Loukriz, A. (2017). A New Variable Step Size Neural Networks MPPT Controller: Review, Simulation and Hardware Implementation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 221-233.
- Eltamaly, A. M., Farh, H. M., & Al-Saud, M. S. (2019). Grade Point Average Assessment for Metaheuristic MPPT Techniques of Photovoltaic Systems. *IET Renewable Power Generation*, 13(7), 1215-1231.
- Mao, M., Cui, L., Zhang, Q., Guo, K., Zhou, L., & Huang, H. (2020). Classification and Summarization of Solar Photovoltaic MPPT Techniques: A Review Based on Traditional and Intelligent Control Strategies. *Energy Reports*, 6, 1312-1327.
- Podder, A. K., Roy, N. K., & Pota, H. R. (2019). MPPT Methods for Solar PV Systems: A Critical Review Based on Tracking Nature. *IET Renewable Power Generation*, 13(10), 1615-1632.

- Ali, A. I. M., Sayed, M. A., & Mohamed, E. E. M. (2018). Modified Efficient Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Technique for Grid-Tied PV System. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 192-202.
- Hadji, S., Gaubert, J. P., & Krim, F. (2018). Real-Time Genetic Algorithms-Based MPPT: Study and Comparison (Theoretical and Experimental) with Conventional Methods. *Energies*, 11(2), 459.
- Rizzo, S. A., & Scelba, G. (2015). ANN Based MPPT Method for Rapidly Variable Shading Conditions. *Applied Energy*, 145, 124-132.
- Zakzouk, N. E., Elsharty, M. A., Abdelsalam, A. K., Helal, A. A., & Williams, B. W. (2016). Improved Performance Low-Cost Incremental Conductance PV MPPT Technique. *IET Renewable Power Generation*, 10(4), 561-574.
- Bhatnagar, P., & Nema, R. K. (2013). Maximum Power Point Tracking Control Techniques: State-of-the-Art in Photovoltaic Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 224-241.
- Ram, J. P., Babu, T. S., & Rajasekar, N. (2017). A Comprehensive Review on Solar PV Maximum Power Point Tracking Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 826-847.
- Danandeh, M. A., & Mousavi, S. M. (2018). Comparative and Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking Methods for PV Cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2743-2767.
- Koad, R. B. A., Zobaa, A. F., & El-Shahat, A. (2017). A Novel MPPT Algorithm Based on Particle Swarm Optimization for Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 468-476.
- Motahhir, S., El Hammoui, A., & El Ghzizal, A. (2020). The Most Used MPPT Algorithms: Review and the Suitable Low-Cost Embedded Board for Each Algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 246, 118983.
- Liu, Y. H., Chen, J. H., & Huang, J. W. (2015). A Review of Maximum Power Point Tracking Techniques for Use in Partially Shaded Conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 436-453.
- Karami, N., Moubayed, N., & Outbib, R. (2017). General Review and Classification of Different MPPT Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1-18.

Ahmad, J. (2010). A Fractional Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays. *2nd International Conference on Software Technology and Engineering*, 1, V1-247-V1-250.