BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi surya adalah salah satu komponen penting dalam upaya negara Indonesia beralih ke energi yang bersih secara *global* karena ketersedianya melimpah dan bersifat ramah lingkungan. Kekuatan sinar matahari yang sampai ke permukaan bumi jauh lebih besar dibandingkan kebutuhan energi dunia, secara teoritis energi surya memiliki kemampuan besar untuk memenuhi semua kebutuhan energi di dunia selama digunakan secara efisien dan berkelanjutan [1]. Di Indonesia, potensi energi matahari diestimasi mencapai hingga 3.200 Gigawatt (GW) [2]. Pada awal tahun 2025, pemanfaatan energi matahari masih tergolong kecil yaitu sekitar 233,3 MW [3]. Namun, pada desember tahun 2025 terjadi peningkatan kapasitas dari PLTS menjadi 1.494 MW [4]. Angka ini menunjukkan peran penting PLTS dalam mempercepat pencapaian target energi terbarukan nasional.

Pembangkit listrik tenaga surya sering kali mengalami penurunan performa akibat faktor lingkungan yang sulit dikendalikan, salah satunya adalah fenomena *Partial Shading Condition*, yaitu kondisi ketika sebagian sel atau modul surya tertutup bayangan. Kondisi ini menyebabkan cahaya yang diterima modul menjadi tidak merata, sehingga bentuk kurva karakteristik daya-tegangan (P-V) berubah dan memunculkan beberapa titik puncak daya. Kondisi ini menyulitkan sistem kontrol MPPT dalam menentukan titik operasi terbaik, sehingga berpotensi menurunkan daya keluaran sistem secara signifikan, bahkan dapat mencapai lebih dari 50%. [5].

Sistem fotovoltaik umumnya dilengkapi dengan teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mengoptimalkan daya keluarannya. Namun, metode MPPT konvensional yang sering digunakan, seperti algoritma *Perturb and Observe* (P&O), memiliki keterbatasan dalam menghadapi kondisi *Partial Shading Condition* yang kompleks, sehingga dapat menurunkan efisiensi sistem hingga 20% [5].

Mengingat kelemahan metode konvensional tersebut, dibutuhkan pendekatan algoritma pelacakan yang lebih cerdas, efisien, dan memiliki stabilitas

tinggi saat merespons kondisi PSC. Salah satu metode mutakhir yang memiliki potensi besar untuk menyelesaikan permasalahan ini adalah *PID-Based Search Algorithm* (PSA). PSA merupakan algoritma pencarian optimasi yang mengintegrasikan mekanisme kontrol PID ke dalam proses pelacakan titik daya maksimum. Algoritma ini memiliki keunggulan berupa kecepatan konvergensi dari aksi *Proportional*, akurasi tinggi dari aksi *Integral*, serta kemampuan meredam osilasi dari aksi *Derivative* [6].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan membuat sistem MPPT pada panel surya yang bisa melacak titik daya secara efektif dalam kondisi bayangan sebagian. Pada penelitian ini sistem yang diusulkan menggunakan algoritma pencarian berbasis PID pada panel surya, bukan sekadar simulasi. Sistem yang diusulkan bertujuan melacak titik daya secara efektif pada PSC yang merepresentasikan kondisi di Indonesia. Algoritma PSA digunakan untuk mengatur *duty cycle Asynchronous Buck Converter* agar mengurangi osilasi daya, serta mempercepat konvergensi menuju GMPP. Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan waktu konvergensi, kestabilan daya keluaran, dan efisiensi pelacakan pada 2 skenario PSC, sehingga penelitian ini menekankan validasi metode PSA, pada penelitian sebelumnya yang masih sebatas simulasi.

1.2 Penelitian Terkait

Penelitian terkait berfungsi sebagai dasar pembanding untuk menegaskan keaslian dan kontribusi penelitian ini terhadap bidang optimasi titik daya puncak pada panel surya. Dengan mengkaji studi-studi terbaru, dapat diidentifikasi *research gap* yang menjadi alasan kuat dilakukannya penelitian ini. Tabel 1.1 merangkum lima penelitian terdahulu yang paling relevan dengan topik optimasi pelacakan titik daya maksimum pada panel surya menggunakan algoritma PID-*Based Search Algorithm* (PSA).

Tabel 1. 1 Penelitian terkait MPPT.

Nama Peneliti	Tahun	Judul Penelitian
Masoud Etezadinejad, Behzad Asaei, Shahrokh Farhangi, and Amjad Anvari-Moghaddam	2022	*An Improved and Fast MPPT Algorithm for PV Systems Under Partially Shaded Conditions* [7].
Susilo, Windri Setiawan, Rizki Ade Pradana	2022	Optimasi Pengisian Daya Panel Surya MPPT dengan Kontrol *Proportional Integral Derivative* [8].
Muhammad Zainal Roisul A, Adi Mulyadi, Adi Pratama Putra	2022	*Maximum Power Point Tracking (MPPT)* dengan Kontrol PID untuk Optimasi Pengisian Daya Baterai pada Panel Surya [9].
Rasool Kahani, Mohsin Jamil, and M. Tariq Iqbal	2023	*An Improved Perturb and Observed Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Systems* [10].
Md Adil Azad, Adil Sarwar, Mohd Tariq, Farhad Ilahi Bakhsh, Shafiq Ahmad, Adamali Shah Noor Mohamed, Md Rasidul Islam	2025	*Global Maximum Power Point Tracking for photovoltaic systemsunder partial and complex shading conditions using a* PID *basedsearch algorithm (PSA)* [6] .

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI

Perkembangan teknologi MPPT dalam sistem fotovoltaik telah menghasilkan berbagai metode yang bertujuan meningkatkan efisiensi konversi energi surya, terutama pada kondisi lingkungan yang dinamis seperti PSC. Beragam algoritma, mulai dari metode konvensional hingga pendekatan berbasis kecerdasan buatan dan kontrol adaptif, dikembangkan untuk mengatasi permasalahan utama MPPT, yaitu osilasi daya di sekitar titik MPP, kegagalan pelacakan akibat kondisi PSC, serta respons sistem yang lambat terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Salah satu penelitian mengusulkan pendekatan analitis langsung berbasis model fisik sel surya untuk menentukan tegangan MPP. Metode ini memanfaatkan persamaan matematis berbasis fungsi *Lambert-W* serta parameter *datasheet* modul PV, seperti arus fotonik I_{ph}, arus saturasi dioda I_s,dan tegangan rangkaian terbuka

V_{oc}, untuk menghitung lokasi MPP secara eksplisit. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen menggunakan modul HNM20P-12, metode ini mampu melacak lebih hanya dalam 4–6 siklus *sampling*, sehingga jauh lebih cepat dibandingkan metode pencarian berbasis *sweeping* [7].

Namun demikian, pendekatan ini memiliki keterbatasan utama berupa ketergantungan yang tinggi terhadap akurasi parameter model fisik. Parameter seperti V_{oc} dan I_{sc} sangat sensitif terhadap faktor eksternal, seperti variasi suhu, akumulasi debu, degradasi material, serta perbedaan karakteristik manufaktur. Akibatnya, ketika panel mengalami penuaan atau kondisi operasional menyimpang dari standar, estimasi titik MPP menjadi kurang akurat. Selain itu, meskipun mampu menangani kondisi PSC yang sederhana, metode ini belum terbukti efektif pada pola bayangan yang lebih kompleks.

Beberapa penelitian lain mengimplementasikan kontrol PID dalam sistem MPPT, namun perannya masih terbatas sebagai regulator tegangan keluaran pada konverter DC–DC tipe *Asynchronous Buck*. Dalam studi tersebut, algoritma pelacakan MPP tetap mengandalkan metode konvensional P&O, sementara PID hanya digunakan untuk menyesuaikan *duty cycle* agar tegangan pengisian baterai mengikuti nilai referensi yang diinginkan [8] [9].

Upaya lain dilakukan dengan mengembangkan versi modifikasi algoritma P&O yang mampu mengenali saat sistem melintasi puncak kurva daya dengan membandingkan perubahan daya antar siklus. Ketika tanda perubahan daya berubah, misalnya dari positif menjadi negatif, algoritma menghentikan perturbasi dan mempertahankan *duty cycle*, sehingga osilasi pada kondisi tunak dapat dikurangi. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan efisiensi MPPT rata-rata sebesar 3,1% dibandingkan P&O konvensional pada kondisi iradiasi normal, dan hingga 9% lebih baik pada kondisi PSC berat [10].

Keunggulan utama metode ini terletak pada kompleksitas yang rendah dan kemudahan implementasi, tanpa memerlukan data pelatihan atau komputasi yang intensif. Namun, keterbatasannya masih terlihat pada ketergantungan terhadap deteksi perubahan yang rentan terhadap *noise* sensor dan gangguan eksternal. Selain itu, penggunaan langkah perturbasi tetap menyebabkan algoritma masih

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG

berisiko gagal melacak titik daya maksimum secara akurat ketika menghadapi kondisi PSC yang kompleks.

Penelitian terbaru memperkenalkan *PID-Based Search Algorithm* (PSA) sebagai pendekatan metaheuristik baru untuk melacak titik daya maksimum pada panel surya. Berbeda dari pendekatan sebelumnya, PSA memanfaatkan prinsip kendali PID bukan sebagai regulator, melainkan sebagai mekanisme pencarian. Pada algoritma ini, *error* didefinisikan sebagai selisih antara solusi terbaik saat ini dengan solusi kandidat, yang kemudian digunakan untuk memperbarui posisi solusi melalui komponen Proporsional, Integral, dan Derivatif, menyerupai cara kerja pengendali PID pada umumnya. Hasil simulasi menggunakan MATLAB/Simulink serta validasi *Hardware-in-the-Loop* (HIL) menunjukkan bahwa PSA mampu mencapai efisiensi pelacakan rata-rata sebesar 99,8%, dengan waktu konvergensi yang sangat cepat, yaitu sekitar 0,23–0,38 detik. Selain itu, PSA juga menunjukkan stabilitas yang lebih baik dibandingkan algoritma metaheuristik lain seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan JAYA, terutama pada kondisi PSC yang kompleks [6]. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih terbatas pada lingkungan simulasi dan emulator HIL, tanpa implementasi langsung pada sistem panel surya fisik di lapangan.

Berdasarkan tinjauan penelitian terdahulu, perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada aspek implementasi dan mekanisme algoritma. Penelitian yang memperkenalkan algoritma *PID-Based Search Algorithm* (PSA) sebagai metode pelacakan titik daya maksimum masih terbatas pada lingkungan simulasi, tanpa validasi langsung pada sistem panel surya fisik di lapangan. Sementara itu, penelitian lain yang mengintegrasikan kontrol PID hanya memanfaatkan PID sebagai regulator tegangan keluaran pada konverter dengan algoritma MPPT konvensional, sehingga performa pelacakannya pada kondisi PSC tetap bergantung pada keterbatasan P&O itu sendiri.

Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada implementasi nyata algoritma PSA sebagai mekanisme pencarian langsung pada perangkat keras panel surya, yang dirancang untuk mengoptimalkan pelacakan titik daya pada kondisi PSC yang merepresentasikan kondisi lapangan di Indonesia.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan beberapa hal berikut:

1. Bagaimana perancangan dan implementasi algoritma PSA untuk optimasi Pelacakan titik daya pada panel surya?
2. Bagaimana kinerja algoritma PSA dalam mengoptimalkan daya panel surya?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah maka dapat dirumuskan tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk merancang dan mengimplementasikan model sistem kontrol MPPT menggunakan algoritma PID-*Based Search Algorithm* (PSA) dalam mengoptimalkan daya yang dihasilkan panel surya.
2. Menganalisis kinerja sistem algoritma PSA dalam optimasi daya pada panel surya.

1.4.2 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi akademik mengenai perkembangan di bidang keilmuan pembangkit listrik tenaga surya. khususnya terkait sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) panel surya.

2. Manfaat Praktis

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi daya panel surya sehingga dapat bermanfaat bagi pengguna panel surya skala rumah.

1.5 Batasan Masalah

Tujuan batasan masalah yaitu supaya menghindari adanya penyimpangan atau perluasan topik, agar penelitian lebih terarah dan mudah dibahas, sehingga dapat mencapai tujuan penelitian. Beberapa batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

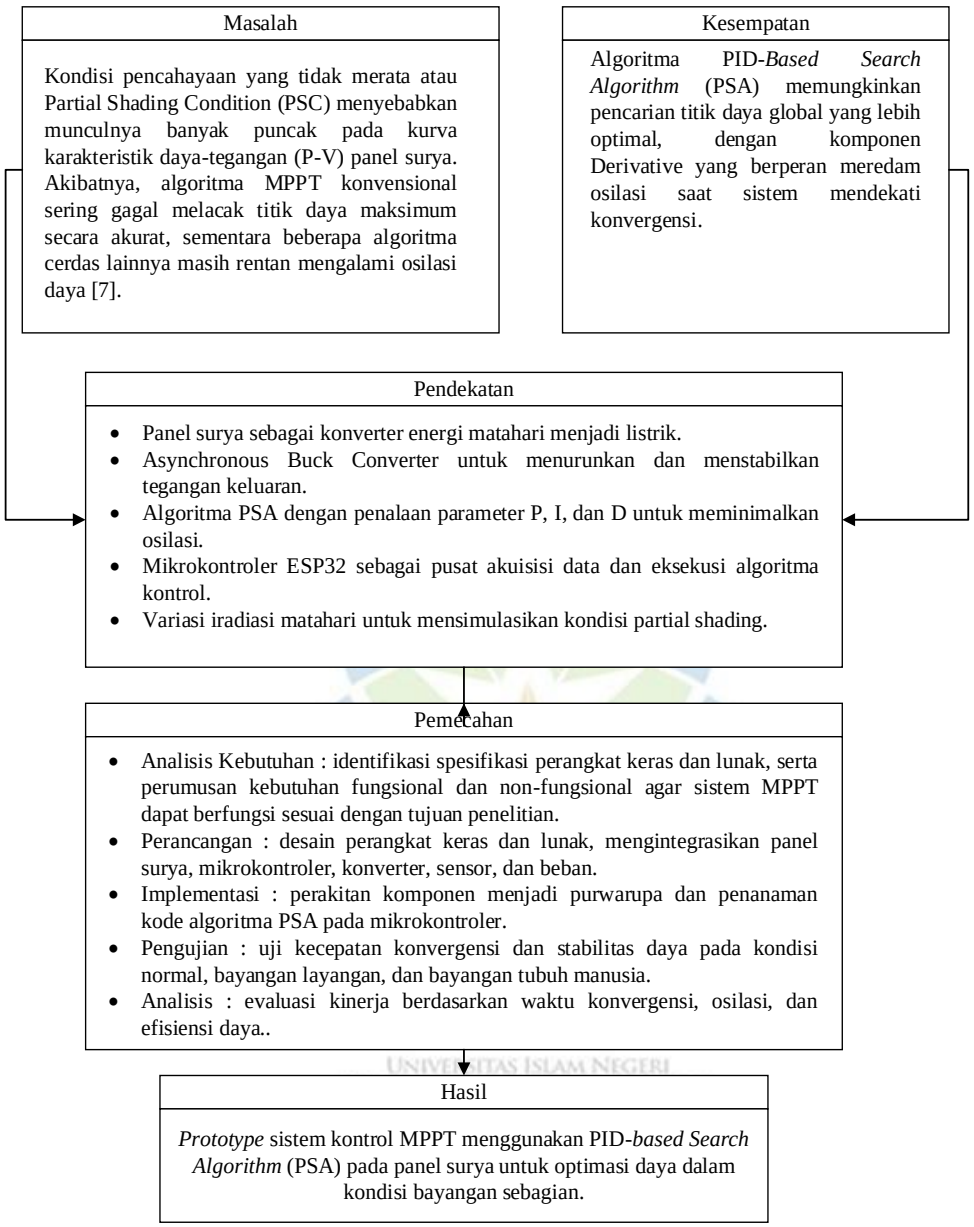
1. Algoritma P&O hanya digunakan sebagai pembanding, tidak dibahas detail.

2. Konverter DC-DC yang digunakan adalah *Asynchronous Buck Converter step-down*.
3. Fokus penelitian hanya pada implementasi algoritma PSA.
4. Pengujian dilakukan di luar ruangan dengan skenario PSC buatan seperti layangan, bayangan tubuh, dan kondisi normal tanpa naungan.
5. Evaluasi difokuskan waktu konvergensi, osilasi daya, dan efisiensi ekstraksi. Rugi-rugi daya pada komponen *buck converter* tidak dianalisis.
6. Beban menggunakan *dummy load* 1,5 Ω.
7. Penentuan nilai K_p, K_i, dan K_d pada algoritma PSA dilakukan dengan *trial-and-error*.
8. Sensor INA219, DHT22, *Pyranometer*, dan mikrokontroler ESP32 hanya berfungsi sebagai perangkat pendukung akuisisi data dan antarmuka.
9. Pengaruh iradiasi dan suhu terhadap karakteristik panel surya tidak dibahas secara mendalam dalam penelitian ini.

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir yaitu berisi alur pemikiran yang memuat uraian sistematis hasil perumusan masalah penelitian yang diperkirakan dapat diselesaikan melalui pendekatan yang dibutuhkan Gambar 1. 1 menunjukkan alur berpikir penelitian.

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI
SUNAN GUNUNG DJATI
BANDUNG



Gambar 1. 1 Kerangka berpikir penelitian.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan untuk penelitian ini terdiri dari 5 bab agar dapat menghasilkan penulisan yang baik, diantaranya sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan tentang latar belakang masalah, kajian penelitian terdahulu, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, kerangka pemikiran, dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

Pada bab ini berisi tentang teori dasar yang digunakan dalam penelitian, seperti sistem fotovoltaik, PSC, PID, MPPT, PSA, P&O, asyncronous buck converter, pyranometer, sensor arus dan tegangan, ESP32.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan ketika melakukan penelitian optimasi pelacakan titik daya maksimum pada panel surya menggunakan algoritma PSA.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Pada bab ini menjelaskan tahap-tahap perancangan sistem secara komprehensif, mulai dari perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, hingga tahapan realisasi atau implementasi dari sistem yang dirancang. Proses implementasi mencakup perakitan perangkat keras serta penanaman kode program pengendali ke dalam mikrokontroler.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada bab ini memaparkan hasil dari seluruh pengujian yang telah dilakukan pada *prototype* sistem yang selesai dibuat. Pengujian dilakukan secara terintegrasi, baik pengujian pada instrumen perangkat keras kalibrasi sensor dan kinerja konverter DC-DC maupun pengujian perangkat lunak. Selanjutnya, dilakukan analisis mendalam terhadap data yang diperoleh untuk mengevaluasi kinerja sistem pelacakan titik daya maksimum pada panel surya menggunakan algoritma PSA, khususnya dalam merespons berbagai kondisi PSC.

BAB VI PENUTUP

Pada bab ini merupakan bab penutup di dalam penulisan tugas akhir. Bagian ini berisi kesimpulan yang menjawab tujuan penelitian berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan. Selain itu, bab ini juga memuat saran-saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk perbaikan dan pengembangan pada penelitian-penelitian selanjutnya.