

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai alternatif pengganti bahan bakar fosil. Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi listrik menunjukkan peningkatan yang signifikan seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi nasional. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik (BPS), kapasitas PLTS yang terpasang tercatat mengalami pertumbuhan yang cukup pesat. Pada tahun 2022, kapasitas terpasang PLTS nasional mencapai 102,37 MW dan meningkat pada tahun 2023 menjadi 242,33 MW. Rincian kapasitas terbesar pada tahun 2023 berasal dari Provinsi Jawa Barat sebesar 145,00 MW, Kalimantan Timur sebesar 19,03 MW, dan Sulawesi Utara sebesar 17,11 MW [1]. Peningkatan kapasitas pembangkit listrik tenaga surya menunjukkan bahwa pemanfaatan energi matahari melalui *sel fotovoltaik* (PV) semakin berkembang seiring meningkatnya kebutuhan sumber energi yang bersih dan berkelanjutan. *Sel fotovoltaik* (PV) merupakan perangkat berbahan semikonduktor yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah melalui efek *fotovoltaik*. Teknologi tersebut telah banyak diterapkan mulai dari PLTS besar hingga sistem panel surya rumah tangga, karena bersifat ramah lingkungan serta memiliki biaya perawatan yang relatif rendah [2].

Dalam satu panel surya, beberapa sel fotovoltaik disusun secara seri atau paralel, dimana konfigurasi seri berfungsi meningkatkan tegangan, sedangkan konfigurasi paralel berfungsi meningkatkan arus, sehingga sistem dapat disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan daya beban tertentu. Namun, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya tidak bersifat konstan, melainkan sangat dipengaruhi oleh faktor seperti intensitas cahaya (*iradiasi*), suhu dan fenomena tertutupnya sebagian permukaan panel oleh bayangan benda di sekitarnya (*partial shading*). Kondisi *partial shading* ini memicu munculnya beberapa titik puncak daya (*multiple peaks*) pada kurva karakteristik daya-tegangan, yang secara drastis menyebabkan fluktuasi dan penurunan daya keluaran panel secara signifikan,

sehingga energi yang di hasilkan panel juga mengalami perubahan sesuai dengan kondisi tersebut [3][4]. Perubahan kondisi cuaca yang tidak menentu dapat menyebabkan penurunan kinerja panel surya, sehingga daya yang dihasilkan tidak selalu berada pada nilai maksimumnya. Oleh karena itu diperlukan sistem pengendalian yang mampu menyesuaikan keluaran daya agar panel tetap bekerja secara optimal.

Untuk menjaga agar panel surya tetap beroperasi pada kondisi daya maksimum diperlukan suatu sistem pengendalian yang mampu menyesuaikan titik kerja terhadap perubahan kondisi lingkungan seperti intensitas radiasi matahari dan suhu. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menjaga agar panel surya dapat beroperasi dengan optimal. MPPT digunakan untuk mendapatkan daya maksimum dari sistem PV dan berfungsi untuk melacak titik operasi panel surya agar selalu berada pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) [5]. Salah satu algoritma yang umum digunakan dalam sistem MPPT adalah *Perturb and Observe* (P&O). Metode ini adalah algoritma kontrol MPPT yang efektif karena strukturnya yang sederhana dan biaya implementasi yang rendah, yang memungkinkan untuk melacak titik daya maksimum dengan cepat. Tetapi metode ini memiliki kelemahan yaitu osilasi yang terus menerus di sekitar titik MPP yang menyebabkan kehilangan daya, serta penurunan kinerja ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan yang cepat [6].

Dalam upaya memaksimalkan efisiensi panel surya di bawah kondisi lingkungan yang berubah-ubah, dibutuhkan algoritma kontrol *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang adaptif. Pendekatan utama yang diusulkan dalam penelitian ini adalah penerapan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Algoritma PSO merupakan metode *meta-heuristik* berbasis populasi yang terbukti mampu melacak Titik Daya Maksimum (MPP) dengan tingkat presisi tinggi serta memiliki waktu respons yang cepat terhadap fluktuasi iradiasi [7]. Algoritma ini mampu mencapai titik daya maksimum dengan respon yang lebih cepat serta osilasi yang lebih kecil. Oleh karena itu *Particle Swarm Optimization* (PSO) menjadi pendekatan yang lebih efektif untuk diterapkan dalam sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) pada panel surya [7].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengusulkan desain dan implementasi sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang direalisasikan secara nyata melalui perancangan konverter DC-DC tipe *buck* yang terintegrasi dengan mikrokontroler. Algoritma PSO diimplementasikan untuk mengendalikan siklus kerja (*duty cycle*) PWM secara langsung pada pensakelaran komponen daya konverter untuk memaksimalkan transfer daya dari panel surya. Sebagai acuan evaluasi kinerja, sistem yang diusulkan ini diuji secara eksperimental di bawah kondisi *partial shading* dan dibandingkan dengan algoritma konvensional *Perturb and Observe* (P&O). Analisis perbandingan difokuskan pada parameter akurasi pelacakan daya, tingkat kestabilan osilasi, serta kecepatan respons sistem. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membuktikan keunggulan implementasi MPPT berbasis PSO dalam mengatasi hilangnya daya akibat *partial shading* pada kondisi operasi yang nyata.

1.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan penegasan dari keaslian suatu karya ilmiah yang dibuat agar dapat menghindari tindakan plagiarism terhadap karya ilmiah orang lain, dengan melakukan perbandingan-perbandingan riset yang akan dilakukan sebagai acuan dari pembuatan karya ilmiah ini, sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 Penelitian terdahulu.

Judul	Peneliti	Tahun
Desain Buckboost Converter Dengan MPPT P&O Untuk Mendapatkan Daya Optimal Akibat Perubahan Arus Dan Tegangan.	Safirda Hanif Istonirsya, Denda Dewatama , Yulianto [8].	2023
Performance Analysis Of P&O and Pso Mppt Algorithms For	Mustafa Sacid Endiz [9].	2024

Judul	Peneliti	Tahun
Pv Systems Under Partial Shading.		
Particle Swarm Optimization-Based Control for Maximum Power Point Tracking Implemented in a Real Time Photovoltaic System.	Del Rio, A., Barambones, O., Uralde, J., Artetxe, E., & Calvo, I. [10].	2023
Adaptive particle swarm optimization based model predictive control MPPT algorithm for PV systems under partial shading conditions.	Haider Alhusseini, Layth Mohammed Abdali, Hayder Abdulsahib Issa, Vladimir I. Velkin [11].	2025
Perbandingan Algoritma Ant Colony Optimization, Partical Swarm Optimization dan Firefly Algoritm pada Maximum Power Point Tracking dalam Kondisi PV Partial Shadding.	Fuad Hasan [12].	2024

Teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) terus berkembang seiring dengan meningkatnya penggunaan energi surya sebagai sumber listrik alternatif yang ramah lingkungan. Pada Awalnya metode yang digunakan bersifat konvensional seperti *Pertube and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (INC). Metode ini banyak digunakan karena cara kerjanya yang sederhana, mudah diimplementasikan, dann memiliki biaya yang rendah. Namun masih memiliki kelemahan, terutama ketika kondisi cuaca yang berubah-ubah dan tingkat osilasi yang dihasilkan cukup besar. Akibatnya, daya yang dihasilkan panel sering tidak maksimal karena sistem sulit menemukan titik daya tertinggi secara tepat dan stabil.

Permasalahan pada metode konvensional tersebut mendorong berbagai penelitian untuk menemukan cara agar sistem MPPT dapat bekerja lebih optimal pada berbagai kondisi lingkungan. Penelitian [8] merancang sebuah sistem *buckboost converter* menggunakan algoritma *Perturb and Observe* (P&O) sebagai metode *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) untuk mengoptimalkan keluaran daya panel surya pada pengisian daya baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem *buckboost converter* dengan MPPT P&O yang dirancang sendiri memiliki kinerja 1,03% lebih akurat dibandingkan dengan instrumen MPPT pabrikan, dengan nilai efisiensi sistem mencapai kurang lebih 69%.

Penelitian [9] membahas keterbatasan metode dasar dalam menghadapi kondisi bayangan. Penelitian tersebut menemukan bahwa metode konvensional *Perturb and Observe* (P&O) memang memiliki respon yang sangat cepat, yaitu 0,2 detik, tetapi metode ini gagal total saat panel tertutup bayangan sebagian, dengan efisiensi yang jatuh hingga 76,5%. Sebaliknya, metode optimasi seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) terbukti jauh lebih tangguh dan akurat dalam menemukan titik daya maksimal hingga 96,5%, meskipun kelemahannya adalah membutuhkan waktu yang lebih lama (1,8 detik) untuk mencapai titik stabil. Penelitian [10] membuktikan apakah metode cerdas tersebut layak digunakan di dunia nyata, penelitian melakukan pengujian langsung menggunakan perangkat keras. Hasil eksperimen mereka menunjukkan bahwa penerapan algoritma PSO pada sistem *real-time* sangat efektif dalam menekan pemborosan energi. Jika dibandingkan dengan metode P&O yang membuang energi hingga 31,96% saat terjadi perubahan cuaca, metode PSO mampu menurunkannya secara drastis menjadi hanya 9,72%, membuktikan bahwa algoritma ini efisien untuk diterapkan secara praktis di industri.

Penelitian [11] mengusulkan metode MPPT APSO-MPC untuk memaksimalkan daya panel surya pada kondisi bayangan sebagian (*partial shading*). Melalui simulasi MATLAB/Simulink, algoritma ini terbukti secara akurat melacak titik daya maksimum global (GMPP) tanpa terjebak pada puncak lokal, menghasilkan efisiensi pelacakan 99,4%, waktu konvergensi 0,14 detik, serta osilasi *steady-state* yang sangat minim. Penelitian [12] mengevaluasi kinerja

algoritma berbasis kecerdasan buatan melalui studi komparatif antara metode *Ant Colony Optimization* (ACO), *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan *Firefly Algorithm* (FA)³. Dalam studi tersebut, algoritma PSO terbukti memiliki keunggulan kecepatan konvergensi dengan waktu pelacakan terbaik 0,89 detik dan efisiensi daya hingga 99,99%, meskipun teridentifikasi memiliki risiko terjebak pada *local peak* dengan tingkat keberhasilan pelacakan tercatat sebesar 70% pada kondisi pengujian tertentu.

Berdasarkan analisis terhadap berbagai literatur tersebut, terlihat bahwa sebagian besar penelitian mengenai optimasi MPPT masih terbatas pada pengujian berbasis simulasi perangkat lunak. Masih sedikit penelitian yang memvalidasi kinerja algoritma cerdas melalui implementasi perangkat keras secara langsung untuk melihat responsnya terhadap kondisi lingkungan nyata. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem MPPT berbasis perangkat keras menggunakan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO), dengan menjadikan metode konvensional *Perturb and Observe* (P&O) sebagai acuan perbandingan kinerjanya.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang masalah yang dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan dan implementasi *Maximum Power Point Tracking* berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization* pada panel surya?
2. Bagaimana kinerja sistem *Maximum Power Point Tracking* berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization* dalam optimasi daya panel surya?

1.4 Tujuan dan Manfaat

Adapun manfaat dan tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1.4.1 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem *Maximum Power Point Tracking* berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization*.
2. Mengetahui dan menganalisis kinerja rancangan *Maximum Power Point Tracking* berbasis Algoritma *Particle Swarm Optimization* dalam mengoptimalkan daya pada panel surya.

1.4.2 Manfaat

Semoga penelitian ini memiliki manfaat bagi berbagai kalangan. Berikut manfaat yang diharapkan:

1. Manfaat Akademik

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu di bidang Teknik elektro dan kontribusi ilmiah mengenai penerapan algoritma pada sistem kendali daya fotovoltaiik.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini memberikan solusi yang lebih efisien untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya, terutama pada kondisi intensitas cahaya dan suhu yang berubah-ubah.

1.5 Batasan Masalah

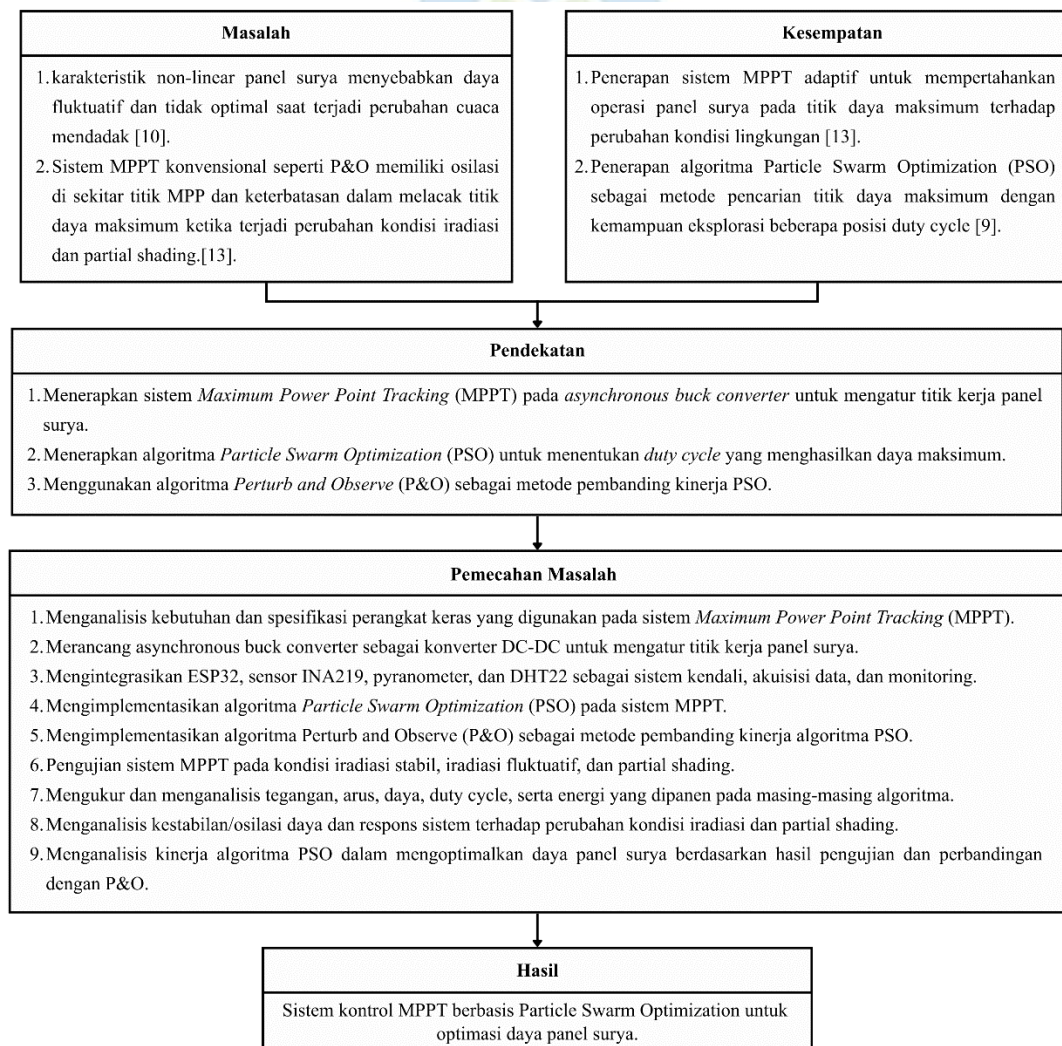
Berdasarkan identifikasi masalah di atas, penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Panel surya yang digunakan sebagai sumber energi utama adalah jenis *monocrystalline* dengan kapasitas daya total sebesar 100 Wp.
2. Perancangan perangkat keras menggunakan konverter DC-DC tipe *buck* yang dikendalikan langsung melalui sinyal PWM dari mikrokontroler.
3. Implementasi sistem kendali MPPT menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pemrosesan untuk menjalankan algoritma.
4. Penelitian tidak membahas proteksi pada baterai atau *Battery Management System*.
5. Perbandingan kinerja panel surya dibatasi pada dua pengujian:
 - a. Sistem dengan algoritma *Perturb and Observe* (P&O).
 - b. Sistem dengan algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO).

6. Pengujian kondisi operasional difokuskan pada perubahan kondisi iradiasi matahari normal dan kondisi fluktuasi daya akibat penutupan sebagian permukaan sel surya (*partial shading*).
7. Jenis Beban yang digunakan dalam pengujian berupa beban resistif tetap untuk memudahkan analisis perubahan daya keluaran.

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir pada penelitian ini disusun sebagai dasar dalam menjelaskan alur logika penelitian dari identifikasi masalah hingga perancangan solusi yang diusulkan. Berikut merupakan kerangka berpikir yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Kerangka berpikir.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah pemahaman terhadap isi laporan tugas akhir ini, penulis menyusun pembahasan secara sistematis dan saling berkaitan sesuai dengan tahapan penelitian yang dilakukan. Adapun sistematika penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian (akademis dan praktis), penelitian terdahulu, kerangka berpikir, serta sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini menguraikan landasan teori penelitian yang mencakup prinsip kerja dan karakteristik panel surya, konsep dasar MPPT beserta topologi konverter DC-DC (*Buck converter*), serta penjelasan mengenai algoritma kontrol *Perturb and Observe* (P&O) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan mikrokontroler, sensor yang digunakan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan metodologi penelitian secara sistematis, mulai dari studi literatur, identifikasi masalah, dan analisis kebutuhan sistem (fungsional, non-fungsional, *hardware*, *software*). Pembahasan dilanjutkan dengan tahapan perancangan, implementasi alat, pengujian, serta analisis hasil.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab ini membahas proses perancangan dan implementasi sistem MPPT berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO), meliputi perancangan *asynchronous buck converter*, pemilihan dan implementasi komponen pendukung, implementasi perangkat keras, implementasi perangkat lunak, serta implementasi algoritma PSO pada mikrokontroler ESP32.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis terhadap sistem yang telah dirancang. Pengujian meliputi kinerja *buck converter*, pengujian algoritma MPPT pada kondisi iradiasi stabil, iradiasi fluktuatif, dan *partial shading*, serta perbandingan kinerja algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dengan

algoritma *Perturb and Observe* (P&O) berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem MPPT berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO). Selain itu, disampaikan juga saran yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

