

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sel surya atau fotovoltaik merupakan perangkat semikonduktor yang berfungsi mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah dengan emisi yang rendah serta kebutuhan perawatan yang relatif minimal [1], [2]. Meskipun memiliki berbagai keunggulan, kinerja sistem fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama intensitas iradiasi matahari dan suhu operasi. Perubahan kedua parameter tersebut menyebabkan karakteristik tegangan, arus, dan daya panel surya berubah secara dinamis sehingga panel surya sering kali tidak beroperasi pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point* atau MPP). Akibatnya, daya keluaran yang dihasilkan menjadi tidak optimal [3],[4].

Secara umum, efisiensi konversi energi panel surya berkisar antara 14% hingga 19%, bergantung pada jenis material serta kondisi operasinya [5]. Karakteristik panel surya yang bersifat nonlinier menyebabkan perubahan iradiasi dan suhu secara langsung memengaruhi titik operasi panel. Tanpa mekanisme pengendalian yang tepat, energi listrik yang seharusnya dapat diekstraksi dari panel surya tidak dapat dimanfaatkan secara optimal [6], [7].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkan teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang bertujuan menjaga titik operasi panel surya agar selalu berada pada MPP sehingga daya keluaran dapat diekstraksi secara maksimum [8]. Berbagai metode MPPT konvensional, seperti *Perturb and Observe* (P&O), *Incremental Conductance*, dan *Hill Climbing*, banyak digunakan karena memiliki algoritma yang sederhana serta mudah diimplementasikan dengan kebutuhan sensor yang relatif sedikit [9]. Namun, metode-metode tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti munculnya osilasi di sekitar titik MPP, waktu penjejakan yang relatif lambat, serta penurunan akurasi ketika terjadi perubahan iradiasi secara cepat [10]. Keterbatasan tersebut menyebabkan daya yang diekstraksi belum selalu berada pada kondisi optimum sehingga efisiensi sistem secara keseluruhan dapat menurun.

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah *Model Predictive Control* (MPC). Berbeda dengan metode MPPT konvensional yang menentukan aksi kendali berdasarkan perubahan hasil pengukuran sebelumnya, MPC menggunakan model matematis sistem untuk memprediksi kondisi pada horizon prediksi tertentu. Berdasarkan hasil prediksi tersebut, MPC memilih aksi kendali yang memberikan kinerja terbaik dengan tetap mempertimbangkan batasan operasi sistem secara *real-time*. Pendekatan ini memungkinkan sistem memiliki respons yang lebih cepat, osilasi yang lebih kecil, serta kestabilan daya yang lebih baik dibandingkan dengan metode MPPT konvensional [2].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian mengenai MPPT berbasis MPC masih didominasi oleh kajian simulasi atau implementasi pada platform tertentu, sehingga evaluasi kinerjanya pada sistem prototipe nyata dengan perangkat keras berbiaya rendah masih memerlukan kajian lebih lanjut. Selain itu, kajian komparatif terhadap metode MPPT konvensional, khususnya P&O, pada kondisi operasi yang sama juga masih terbatas. Berdasarkan *gap* tersebut, penelitian ini mengimplementasikan sistem MPPT berbasis MPC pada *asynchronous buck converter* menggunakan ESP32 dan mengevaluasi kinerjanya melalui pengujian eksperimental terhadap metode P&O. Sistem kendali dirancang dengan mengatur *duty cycle buck converter* berdasarkan prediksi arus induktor terhadap arus referensi yang dihasilkan oleh algoritma MPPT. Kinerja sistem kemudian dievaluasi melalui pengujian eksperimental dan dibandingkan dengan sistem MPPT berbasis P&O berdasarkan parameter daya keluaran, kestabilan daya, waktu penjejukan MPP, respons terhadap perubahan iradiasi, dan *ripple* daya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai implementasi MPPT berbasis MPC pada sistem nyata serta menunjukkan peningkatan performa dibandingkan metode MPPT konvensional.

1.2 Penelitian Terdahulu

Kinerja sistem fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh karakteristik nonlinier hubungan arus–tegangan ($I-V$) dan daya–tegangan ($P-V$), serta perubahan kondisi lingkungan seperti iradiasi matahari dan temperatur. Perubahan kondisi tersebut

menyebabkan titik daya maksimum (*Maximum Power Point* atau MPP) berpindah secara dinamis, sehingga diperlukan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang mampu mempertahankan titik operasi panel surya pada MPP secara cepat, stabil, dan efisien. Berbagai metode MPPT telah dikembangkan, mulai dari metode konvensional hingga pendekatan berbasis kecerdasan buatan dan kontrol prediktif. Ringkasan beberapa penelitian terdahulu yang relevan disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Penelitian terdahulu

No	Peneliti	Tahun	Judul Penelitian
1	Vandy Dwi Putra, dkk [11].	2025	Peningkatan Unjuk Kerja Sistem MPPT Melalui Algoritma <i>Perturb and Observer</i> Yang Ditingkatkan Pada Sistem PLTS
2	Muhammad Andrian, dkk [12].	2025	Analisa Desain PV Menggunakan Algoritma P&O (<i>Perturb And Observe</i>) Metode Abdurrazik Berbeban <i>Non Linier</i>
3	Walid S. E. Abdellatif, dkk [13].	2021	<i>A Fuzzy Logic Controller Based MPPT Technique for Fotovoltaik Generation System</i>
4	Mohammed Yassine Dennai, dkk [14].	2025	<i>Ensuring robust power tracking in microgrids: A new hybrid MPPT approach for improved dynamic behavior</i>
5	Mostafa Ahmed, dkk [15].	2023	<i>Highly Efficient MPPT Technique Using Model Predictive Control</i>

Perkembangan algoritma MPPT diawali dengan penggunaan metode konvensional, seperti *Perturb and Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IC), karena memiliki struktur algoritma yang sederhana dan mudah

diimplementasikan. Namun, kedua metode tersebut masih memiliki kelemahan berupa osilasi di sekitar MPP dan penurunan akurasi ketika terjadi perubahan iradiasi secara cepat. Keterbatasan tersebut mendorong berbagai penelitian untuk mengembangkan metode MPPT yang memiliki kecepatan respons dan akurasi pelacakan yang lebih baik.

Penelitian [11] mengembangkan algoritma P&O menggunakan mekanisme *adaptive step size* sehingga perubahan *duty cycle* menjadi lebih adaptif ketika titik operasi mendekati MPP. Pendekatan ini mampu meningkatkan kecepatan penjejakan dan daya keluaran dibandingkan P&O konvensional. Meskipun demikian, algoritma tersebut masih menggunakan prinsip perturbasi sehingga tetap berpotensi mengalami *drift* ketika terjadi perubahan iradiasi yang sangat cepat.

Pendekatan modifikasi P&O lainnya ditunjukkan pada penelitian [12] dengan menggunakan metode Abdurrazik yang menentukan besar langkah perturbasi berdasarkan gradien daya terhadap tegangan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan performa dibandingkan P&O standar, namun peningkatan daya yang diperoleh relatif kecil. Selain itu, pengujian masih menggunakan sumber cahaya buatan sehingga karakteristiknya belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasi panel surya di lapangan.

Selain metode konvensional, algoritma berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) juga dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan MPPT dalam menghadapi karakteristik nonlinier panel surya. Pada penelitian [13], FLC mampu menghasilkan daya yang lebih tinggi, respons yang lebih cepat, dan osilasi yang lebih kecil dibandingkan metode P&O maupun IC. Akan tetapi, implementasi FLC memerlukan proses perancangan *rule base* yang kompleks serta kebutuhan memori yang lebih besar sehingga kurang efisien untuk sistem tertanam (*embedded system*) dengan sumber daya terbatas.

Untuk mengatasi permasalahan *Partial Shading Condition* (PSC), metode MPPT hibrida mulai dikembangkan. Penelitian [14] mengusulkan metode MPPT hibrida yang mengombinasikan *Artificial Ecosystem Optimization* (AEO) dan P&O. Pendekatan tersebut mampu meningkatkan kecepatan penjejakan dan mempertahankan daya keluaran pada kondisi *partial shading*. Namun, penggunaan

algoritma optimasi menyebabkan kompleksitas komputasi meningkat sehingga implementasinya pada perangkat keras berbiaya rendah menjadi kurang efisien.

Sebagai alternatif, pendekatan *Model Predictive Control* (MPC) mulai banyak diterapkan pada sistem MPPT karena mampu menentukan aksi kendali berdasarkan prediksi perilaku sistem. Penelitian [15] mengusulkan metode MPPT berbasis MPC dengan memanfaatkan fungsi biaya (*cost function*) untuk menentukan kondisi pensaklaran yang optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode tersebut mampu meningkatkan efisiensi serta mengurangi *steady-state ripple* dibandingkan metode konvensional. Namun, implementasi penelitian tersebut masih menggunakan topologi *boost converter*, sehingga karakteristik penerapan MPC pada *buck converter* belum dikaji.

Berdasarkan hasil telaah penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa berbagai metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) telah berhasil meningkatkan performa sistem fotovoltaik dibandingkan metode konvensional. Modifikasi *Perturb and Observe* (P&O) mampu meningkatkan kecepatan penjejakan, *Fuzzy Logic Controller* (FLC) memberikan respons yang lebih cepat dengan osilasi yang lebih kecil, sedangkan metode hibrida menunjukkan performa yang lebih baik pada kondisi *partial shading*. Di antara berbagai metode tersebut, *Model Predictive Control* (MPC) memiliki potensi yang lebih unggul dalam meningkatkan kecepatan respons, akurasi pelacakan, dan kestabilan daya keluaran melalui pendekatan prediktif.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang telah dilakukan masih berfokus pada implementasi menggunakan *boost converter* atau hanya divalidasi melalui simulasi. Implementasi MPC pada *asynchronous buck converter* yang dievaluasi menggunakan perangkat keras nyata serta dibandingkan secara langsung dengan metode *Perturb and Observe* (P&O) masih relatif terbatas. Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini mengimplementasikan MPC pada *asynchronous buck converter* berbasis mikrokontroler ESP32 dan mengevaluasi kinerjanya melalui pengujian eksperimental. Kinerja sistem selanjutnya dibandingkan dengan metode P&O berdasarkan parameter daya keluaran, waktu penjejakan, *ripple* daya, dan respons terhadap perubahan tingkat iradiasi.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem MPPT berbasis *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem panel surya menggunakan *asynchronous buck converter*?
2. Bagaimana kinerja sistem MPPT berbasis MPC dibandingkan dengan metode P&O dalam mengoptimalkan daya keluaran berdasarkan daya keluaran, waktu penjejukan, ripple daya, dan respons terhadap perubahan iradiasi?

1.4 Tujuan dan Manfaat

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, penelitian ini memiliki tujuan dan manfaat sebagai berikut.

1.4.1 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijabarkan sebelumnya, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem MPPT berbasis algoritma *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem panel surya menggunakan *asynchronous buck converter*.
2. Menganalisis dan membandingkan kinerja algoritma MPC dan *Perturb and Observe* (P&O) berdasarkan daya keluaran, waktu penjejukan, ripple daya, dan respons terhadap perubahan iradiasi.

1.4.2 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan, baik secara teoretis maupun praktis, di bidang teknik energi terbarukan.

1. Manfaat Akademis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kajian sistem kendali, khususnya penerapan *Model Predictive Control* pada sistem *Maximum Power Point Tracking* panel surya. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan optimasi daya, sistem fotovoltaik, serta pengembangan metode kendali pada sistem energi surya.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran implementasi MPPT berbasis MPC sebagai alternatif metode pengendalian pada sistem panel surya. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan sistem MPPT yang lebih responsif terhadap perubahan iradiasi sehingga mampu meningkatkan kestabilan dan daya keluaran sistem fotovoltaiik, khususnya pada aplikasi skala kecil hingga menengah.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada aspek-aspek berikut:

1. Sistem MPPT menggunakan algoritma *Model Predictive Control* (MPC) dan dibandingkan dengan metode *Perturb and Observe* (P&O).
2. Topologi konverter DC–DC yang digunakan adalah *asynchronous buck converter*.
3. Panel surya yang digunakan merupakan panel surya *monocrystalline* berkapasitas maksimum 100 Wp.
4. Pengujian dilakukan pada variasi intensitas iradiasi dan suhu lingkungan.
5. Evaluasi kinerja sistem difokuskan pada tegangan, arus, daya keluaran, kestabilan daya, waktu penjejakan, *ripple* daya, dan respons sistem terhadap perubahan iradiasi.
6. Pengujian sistem menggunakan beban resistif sebagai beban pengujian. Jenis beban dengan karakteristik tegangan konstan, seperti beban elektronik atau lampu, tidak dibahas pada penelitian ini.

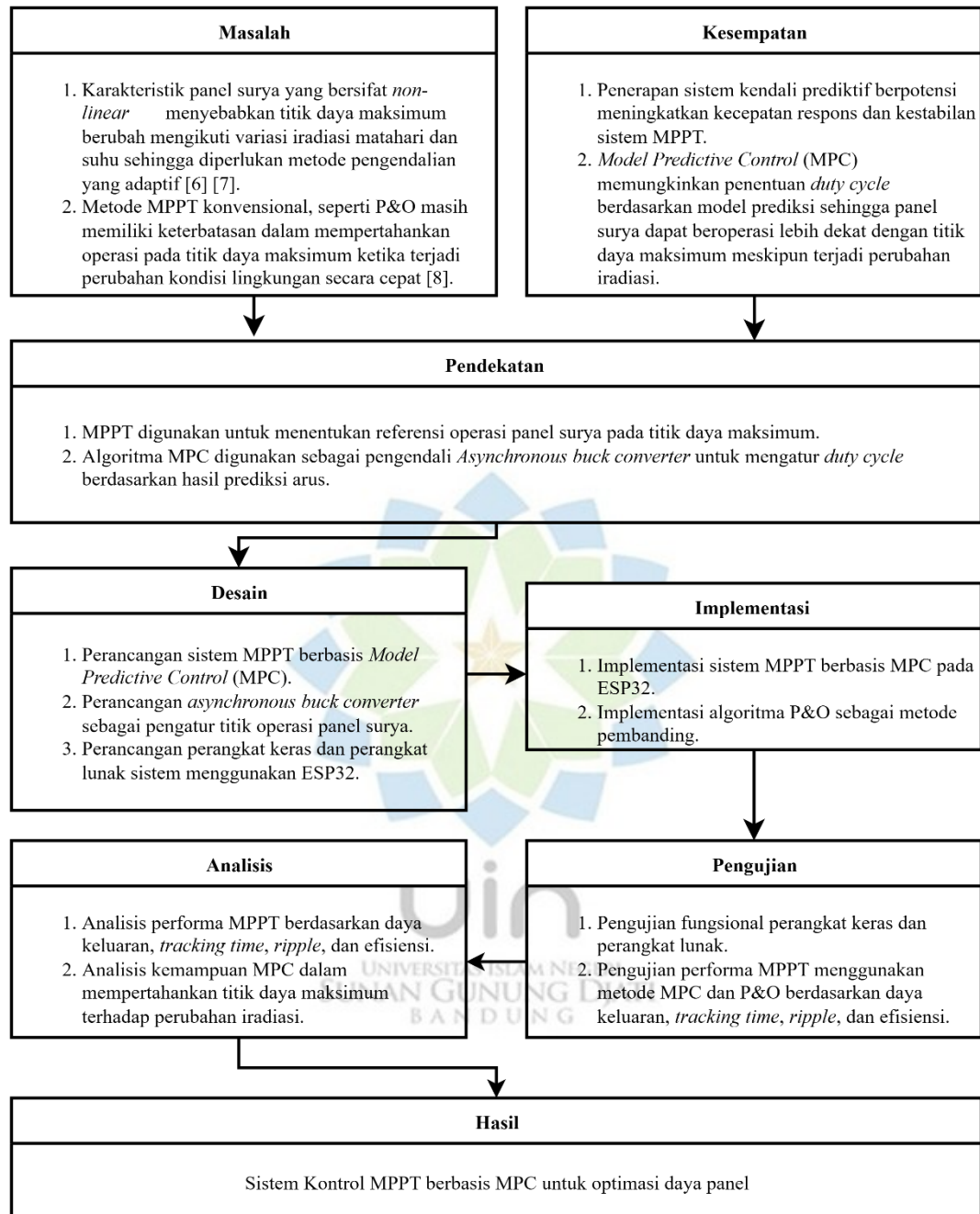
1.6 Kerangka Berpikir

Penelitian ini berawal dari permasalahan utama pada sistem fotovoltaiik, yaitu daya keluaran panel surya yang berubah-ubah akibat fluktuasi intensitas iradiasi matahari dan suhu lingkungan. Perubahan kondisi tersebut menyebabkan titik daya maksimum (*Maximum Power Point* atau MPP) berpindah secara dinamis sehingga panel surya tidak selalu beroperasi pada kondisi optimum. Akibatnya, daya yang dapat diekstraksi dari panel surya menjadi tidak maksimal.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan penerapan sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berbasis *Model Predictive Control* (MPC). Algoritma MPC digunakan untuk memprediksi respons sistem berdasarkan model *asynchronous buck converter*, kemudian menentukan nilai *duty cycle* yang optimal sehingga titik operasi panel surya dapat dipertahankan sedekat mungkin dengan MPP. Kinerja metode yang diusulkan selanjutnya dibandingkan dengan metode MPPT konvensional berbasis *Perturb and Observe* (P&O) sebagai pembandingan.

Tahapan penelitian meliputi perancangan sistem perangkat keras, pengembangan algoritma MPPT berbasis MPC, implementasi pada sistem panel surya, serta pengujian eksperimental pada berbagai kondisi iradiasi. Hasil pengujian kemudian dianalisis berdasarkan parameter daya keluaran, waktu penjejakan, *ripple* daya, dan respons sistem terhadap perubahan iradiasi untuk mengevaluasi efektivitas metode yang diusulkan. Alur hubungan antara permasalahan, solusi, implementasi, dan evaluasi penelitian tersebut dirangkum dalam kerangka berpikir yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.





Gambar 1.1 Kerangka berpikir penelitian.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini disusun untuk memberikan gambaran mengenai isi setiap bab sehingga memudahkan pembaca dalam memahami alur penelitian. Adapun sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, batasan masalah, kerangka berpikir, serta sistematika penulisan sebagai dasar pelaksanaan penelitian.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini memuat landasan teori yang mendukung penelitian, meliputi sistem fotovoltaik, karakteristik panel surya, *buck converter*, *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), algoritma *Perturb and Observe* (P&O), dan *Model Predictive Control* (MPC).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang meliputi perancangan sistem, implementasi algoritma MPPT berbasis MPC, skenario pengujian, serta metode pengambilan dan analisis data.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

Bab ini membahas proses perancangan dan implementasi perangkat keras, perangkat lunak, algoritma MPPT berbasis MPC, serta integrasi seluruh komponen sistem.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini menyajikan hasil pengujian dan analisis kinerja sistem, meliputi validasi sensor, pengujian *asynchronous buck converter*, serta evaluasi performa MPPT berbasis MPC melalui perbandingan dengan metode *Perturb and Observe* (P&O).

BAB VI PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.