

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Permintaan terhadap energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi setiap tahunnya [1]. Biaya produksi semakin tinggi akibat semakin menipisnya ketersediaan cadangan sumber energi fosil [2]. Kenaikan harga dari bahan bakar fosil, pencemaran lingkungan berupa emisi CO₂, perubahan iklim, krisis energi karena keterbatasan sumber energi fosil menyebabkan pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi prioritas utama [3-6]. Diantaranya, pemanfaatan energi matahari yang dikonversi menjadi listrik menggunakan teknologi panel surya. Sumber energi matahari menjadi populer karena ramah lingkungan, bersih, tidak bising, biaya perawatan rendah, serta bebas dari efek gas rumah kaca [7-11]. Beberapa tahun terakhir, panel surya mendapatkan perhatian lebih dan dianggap layak sebagai penyedia energi untuk bangunan [12].

Building Integrated Photovoltaic (BIPV) adalah sebuah konsep mengintegrasikan PLTS dengan bangunan yang bisa dipasang pada bagian atap, fasad, jendela atau sisi bangunan lainnya [13], [14]. BIPV adalah salah satu kontributor yang memiliki potensi besar untuk mencapai tujuan *Net-Zero Energy Building* (NZEB). BIPV secara signifikan dapat menekan konsumsi bahan bakar fosil, yang memicu pemanasan global dan juga untuk mengurangi emisi CO₂ dari bangunan [15], [16]. Konsep NZEB adalah penggunaan energi untuk mengoperasikan peralatan yang ada pada sebuah gedung berasal dari energi terbarukan yang dihasilkan oleh gedung itu sendiri [17]. Oleh karena itu, konsep NZEB menggunakan sumber energi terbarukan yang tidak memproduksi emisi karbon atau CO₂.

Pada sistem PLTS, radiasi matahari dan suhu menjadi faktor krusial yang menentukan efisiensi produksi energi listrik. Dibandingkan dengan angin dan air, energi matahari memiliki keunggulan terutama dari biaya operasional dan perawatan yang lebih rendah [18]. Namun, saat proses konversi energi matahari

menjadi listrik, ditemukan beberapa permasalahan utama yang secara signifikan mengurangi efisiensi. Permasalahan tersebut meliputi: efisiensi modul panel surya yang masih rendah dalam mengubah energi matahari menjadi listrik [19], [20], fluktuasi nilai radiasi matahari dan suhu [21], [22], serta keberadaan bayangan parsial [23], [24].

Bayangan parsial sendiri dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti bayangan dari awan, pohon dan bangunan [25], [26]. Jika terjadi bayangan parsial pada sistem PLTS, beberapa aspek berikut dapat terjadi.

- a. Munculnya LMPP dan satu titik puncak maksimum global atau GMPP [27], [28].
- b. Penurunan daya listrik yang dihasilkan serta variasi karakteristik panel surya yang memunculkan beberapa titik daya maksimum [29], [30].
- c. Dalam kasus tertentu, bayangan parsial tidak hanya mempengaruhi karakteristik kerja, tetapi juga dapat meningkatkan suhu sel sehingga menimbulkan titik panas (*hotspot*) yang berpotensi menyebabkan kegagalan sistem [31], [32].
- d. Berkurangnya energi listrik yang dihasilkan serta terjadinya ketidaksesuaian (*mismatch*) arus pada *string* panel surya dan *mismatch* tegangan pada *string* panel surya parallel [33], [34].

Bayangan parsial berperan penting dalam menentukan efisiensi ekstraksi listrik pada sistem PLTS. Ketika sebagian panel surya tertutup bayangan, intensitas radiasi matahari yang diterima akan menurun, dan ini langsung mempengaruhi produksi listrik secara keseluruhan.

Beberapa solusi telah dikembangkan oleh peneliti sebelumnya untuk mengatasi permasalahan bayangan parsial, diantaranya:

1. Konfigurasi ulang sistem panel surya dengan cara merubah konfigurasi pemasangan. Diantara metode konfigurasi yang digunakan adalah *Series* (S), *Series Parallel* (S-P), *Honey-Comb* (H-C), *Total-Cros-tied* (TCT), *Bridge Linked* (B-L), *SuDOKu* [35-41], dan *dynamic circuit reconfiguration* [42-45].
2. Penerapan konsep *solar tracker* (pelacakan posisi matahari), meliputi *single axis solar tracker* [46-50] dan *dual axis solar tracker* [51-55].

3. Implementasi algoritma MPPT. Secara umum dapat kategorikan menjadi *traditional methods* dan *intelligence control* [56-60] serta *hybrid methods* [61], [62].

Solusi yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya juga memiliki kelemahan untuk penyelesaian masalah bayangan parsial.

1. Re-konfigurasi panel surya membutuhkan penambahan komponen yang lebih banyak dan jika dilakukan pada skala besar akan lebih sulit dan membutuhkan banyak waktu serta membutuhkan pendanaan lebih [63], [64]. Pola konfigurasi, bayangan parsial, dan lokasi fisik dari panel surya rugi-rugi daya saat bayangan parsial [65]. Dari semua metode konfigurasi, jenis TCT dapat memberikan daya keluaran yang lebih besar [66]. Namun, semakin banyak panel surya yang terkena bayangan maka arus keluaran akan semakin berkurang sehingga daya keluaran juga akan berkurang [65]. Metode *dynamic circuit reconfiguration* memiliki kompleksitas dari perangkat keras yang digunakan seperti komponen pensaklaran yang banyak untuk menghubung dan memutus koneksi antar panel surya [67].
2. Sistem *solar tracker* juga berfungsi meningkatkan produksi listrik karena dapat melacak posisi matahari sesuai dengan kondisi iklim [68-70]. Namun, sistem *solar tracker* ini juga banyak memiliki kelemahan. Diantaranya, proses instalasi lebih mahal dan komplek karena sistem membutuhkan unit kontrol, sensor, mekanik untuk pelacakan, serta konsumsi energi tambahan untuk motor dalam menggerakan permukaan panel surya kearah datangnya sinar matahari, dan juga membutuhkan perawatan lebih [71], [72].
3. Algoritma MPPT merupakan salah satu metode yang sangat popular untuk memaksimalkan produksi daya listrik. Algoritma ini dirancang khusus untuk secara dinamis melacak titik daya maksimum baru segera setelah terjadi perubahan radiasi matahari. Algoritma MPPT jenis konvensional mudah untuk diimplementasikan serta berbiaya rendah namun sangat sulit untuk menemukan GMPP pada kondisi bayangan parsial [73-75]. Cenderung kehilangan arah pelacakan ketika terjadi peningkatan pencahayaan sehingga algoritma sering terjebak pada LMPP [76], [77]. Terjadi osilasi di sekitar MPP karena sifat algoritma yang memaksa titik operasi untuk bergerak maju dan

mundur di sekitar titik MPP yang mengakibatkan terjadinya kehilangan daya [78], [79]. *Intelligence control* MPPT juga memiliki beberapa kelemahan, diantaranya kompleksitas yang tinggi serta kecepatan konvergensi yang lambat sehingga kurang diterapkan pada kondisi nyata [80]. Selain itu, kemampuan respon saat perubahan radiasi matahari rendah juga kurang yang mengakibatkan akurasi MPPT menurun [81]. Menggunakan metode *hybrid* juga tidak jauh berbeda dengan *intelligence control* dimana kompleksitas algoritma lebih tinggi sehingga desain algoritma lebih sulit dan membutuhkan biaya lebih dalam mengimplementasikannya.

Salah satu tantangan utama pada sistem PLTS adalah melacak titik daya maksimum secara akurat, dikenal juga dengan istilah dengan MPP. Hal ini menjadi semakin kompleks, terutama saat terjadi variasi radiasi dan kondisi bayangan parsial. Kondisi-kondisi tersebut tidak hanya mengurangi daya listrik yang dihasilkan, tetapi juga menyebabkan karakteristik kurva daya dan tegangan (P-V) serta kurva arus dan tegangan (I-V) dari modul panel surya menjadi sangat tidak linear. Akibatnya, selain titik daya maksimum global (GMPP), dapat muncul pula beberapa titik daya maksimum lokal (LMPP) [30]. LMPP inilah yang menjadi kendala dari algoritma MPPT dalam menemukan GMPP. Berbagai cara dilakukan oleh peneliti dalam mengatasi permasalahan yang dihasilkan oleh bayangan parsial. Diantaranya, memodifikasi algoritma *Hill Climbing* (HC) untuk melacak GMPP. Unjuk kerjanya algoritma HC yang dimodifikasi dikomparasi dengan algoritma *Perturb and Observer* (P&O) dan *Incremental Conductance* (InC) [82]. Memodifikasi algoritma InC untuk menghasilkan respon lebih cepat dan kinerja yang lebih baik dalam mengatasi osilasi. Unjuk kerjanya algoritma InC ini dikomparasi dengan metode InC dan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) konvensional [83]. *Trend line transformation technique* berdasarkan *slope* (dI_{PV}/dP_{PV}) juga merupakan teknik yang dikembangkan untuk melacak titik GMPP. Dari hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan hasil kinerja pelacakan GMPP dan waktu konvergensinya lebih baik dari pada teknik *Particle Swarm Optimization* (PSO), HC, dan P&O [84]. Metode *hybrid* juga diusulkan dalam melacak GMPP, yaitu menggabungkan metode *Artificial Neural Network* (ANN) dan metode P&O. Metode ANN digunakan untuk mengidentifikasi GMPP dan P&O digunakan untuk

menghitung nilai *duty cycle* yang diperlukan untuk operasi konverter dalam menjaga panel surya tetap beroperasi pada titik maksimumnya [85]. GMPP juga dapat dilacak dengan lebih efisien dalam kondisi atmosfer statis dan dinamis menggunakan metode P&O yang dimodifikasi [86].

Penelitian yang dilakukan juga berhubungan dengan bagaimana melacak titik daya maksimum dari panel surya terutama pada kondisi bayangan parsial. Metode eksperimen digunakan untuk memverifikasi algoritma MPPT yang dimodifikasi, yang diintegrasikan dengan *boost converter*. Algoritma MPPT yang akan modifikasi adalah konduktansi inkremental atau InC konvensional dengan tetap memperhatikan kompleksitas dari algoritma. Tujuan yang ingin dicapai adalah perbaikan unjuk kerja dalam melacak MPP pada kondisi bayangan parsial sehingga efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik dapat ditingkatkan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan di latar belakang, permasalahan utama adalah bagaimana meningkatkan unjuk kerja algoritma MPPT dalam melacak GMPP pada kondisi bayangan parsial, dengan fokus pada peningkatan kecepatan pelacakan, reduksi osilasi pada kondisi *steady-state*, dan efisiensi pelacakan.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk;

1. Mengembangkan algoritma MPPT berbasis InC yang adaptif dan sederhana untuk meningkatkan efisiensi sistem PLTS pada kondisi bayangan parsial
2. Meningkatkan unjuk kerja sistem dalam hal daya output, kecepatan pelacakan, dan stabilitas
3. Membangun sistem eksperimen berbasis *boost converter* untuk validasi algoritma yang dikembangkan.
4. Melakukan komparasi unjuk kerja algoritma MPPT yang digunakan dalam penelitian

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam dua aspek utama; keilmuan dan aplikasi praktis sistem PLTS

a. Kontribusi keilmuan (teoritis)

Penelitian ini menyumbangkan model algoritma MPPT adaptif yang tersimplifikasi sebagai pengembangan dari metode InC konvensional. Algoritma ini menawarkan solusi Global MPPT yang cepat dan akurat pada kondisi bayangan parsial, dengan tuntutan komputerisasi yang lebih rendah, menjadi landasan tambahan bagi riset kontrol elektronika daya yang efisien

b. Manfaat praktis (aplikasi)

Diantara manfaat secara praktis dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Peningkatan efisiensi PLTS

Meningkatkan efisiensi konversi daya secara signifikan pada kondisi bayangan parsial, sehingga produksi energi listrik tahunan dari sistem PLTS dapat dimaksimalkan.

2. Solusi kontrol berbiaya rendah

Menyediakan solusi kontrol yang *robust* dan *ringan* (*low computational burden*), memungkinkan implementasi algoritma pada hardware atau mikrokontroller berbiaya rendah, yang berdampak pada pengurangan biaya instalasi sistem PLTS secara keseluruhan.

1.5. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada;

1. Pengembangan dan pengujian modifikasi algoritma *InC* untuk peningkatan kecepatan pelacakan, meminimalkan osilasi, serta meningkatkan efisiensi pelacakan pada kondisi bayangan parsial.
2. Implementasi algoritma dilakukan menggunakan Arduino Uno untuk menjaga kesederhanaan sistem dan efisiensi biaya.

1.6. Keterbaruan

Keterbaruan dari penelitian ini terletak pada optimalisasi mekanisme *step size* untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan *tracking global* dan *stability steady state* lokal, dibandingkan dengan algoritma konvensional dan algoritma adaptif lainnya sebagai pembanding (Algoritma MPPT Abdelkhalek Chellakhi dan V.Deepu yang menggunakan langkah diskrit).

a). Mekanisme *Variable Step Size* (VSS) yang kontinu dan Proporsional

Algoritma InC yang dimodifikasi menawarkan aspek kebaruan dalam aspek adaptifnya dibandingkan dengan algoritma adaptif lain yang menggunakan langkah diskrit. Step size pada algoritma yang dimodifikasi dihitung secara proporsional berdasarkan gradien daya ($|\Delta P/\Delta V|$) atau perubahan daya ($|\Delta P|$). ini menghasilkan *step size* yang berubah secara halus (kontinu). Secara teoritis, mekanisme VSS kontinu ini secara teoritis memberikan *tracking* yang lebih mulus dan lebih presisi dalam transisi, dari pada harus melakukan loncatan seperti menggunakan nilai diskrit.

b). Integrasi *holding mode*

Mekanisme konsep *zero oscillation* seperti pada metode V.Deepu, algoritma InC yang dimodifikasi mengintegrasikan InC VSS dengan *holding mode* yang didasarkan pada toleransi $\Delta V / \Delta I$. Keterbaruannya adalah kemampuan untuk menggunakan VSS yang agresif untuk eksplorasi GMPP yang cepat (terutama di bawah kondisi shading parsial) dan segera beralih ke mode non-perturbasi (*holding mode*) yang dikunci ketika toleransi *steady state* tercapai. Kombinasi ini menjamin efisiensi maksimum karena meminimalkan kerugian daya (*power loss*) selama fase transien (cepat) dan menghilangkan kerugian osilasi (*ripple*) selama fase *steady-state*.

c). Keseimbangan kinerja yang lebih baik yang merupakan kunci utama

Keterbaruan terbesar penelitian ini adalah demonstrasi bahwa modifikasi InC VSS dengan *holding mode* dapat mencapai keseimbangan kinerja yang baik atau setara dengan kompleksitas yang lebih rendah dari pada algoritma pembanding. Keterbaruan utama penelitian ini adalah proposal dan validasi modifikasi InC VSS dengan *Holding Mode* yang mampu menyediakan mekanisme adaptif kontinu (berbeda dengan algoritma *step-size* diskrit) untuk pelacakan yang cepat, yang juga menjamin stabilitas steady-state tanpa osilasi di sekitar *Maximum Power Point*

1.7. Sistematika Penulisan

Disertasi ini di kelompokan menjadi 5 (lima) bab, secara garis besar setiap bab menjelaskan;

- a. Bab 1 pendahuluan, terdiri dari latar belakang dan masalah penelitian yang akan diselesaikan, batasan masalah, hipotetis yang merupakan dugaan sementara, kontribusi penelitian yang merupakan pengembangan terhadap ilmu pengetahuan yang didapatkan dari hasil penelitian, dan tujuan penelitian yang ingin dicapai.
- b. Bab 2 kajian pustaka, membahas kajian teoritis yang mendukung penelitian. Diantaranya model matematis panel surya, konsep bayangan parsial, pelacak titik daya maksimum MPPT, dan bahasan mengenai dc-dc converter
- c. Bab 3 metode penelitian, membahas desain penelitian untuk mencapai tujuan, pengumpulan data, serta metode pengujian.
- d. Bab 4 hasil simulasi dan pembahasan, menjelaskan hasil yang dicapai sesuai dengan menggunakan simulasi.
- e. Bab 5 hasil eksperimen dan pembahasan, sebagai evaluasi dari simulasi dalam bentuk eksperimen untuk membuktikan keefektifan dari algoritma MPPT yang dimodifikasi.
- f. Bab 6 kesimpulan dan rekomendasi, menjelaskan secara umum hasil yang didapatkan dari penelitian sesuai dengan tujuan dan rekomendasi penelitian terkait hasil yang dicapai

