

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Ketergantungan Indonesia terhadap energi fosil masih menjadi tantangan dalam upaya mewujudkan transisi energi nasional. Berdasarkan Kementerian ESDM (2025) bauran penyediaan energi primer Indonesia pada tahun 2024 masih didominasi oleh batu bara sebesar 40,37%, diikuti minyak bumi sebesar 28,82%, dan gas bumi sebesar 16,17%, sedangkan porsi energi baru terbarukan (EBT) baru mencapai 14,65%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan EBT masih relatif rendah dibandingkan dengan dominasi energi fosil, sehingga pengembangan dan optimalisasi sumber energi terbarukan, khususnya energi surya, perlu terus ditingkatkan untuk mendukung ketahanan energi nasional serta mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor energi.

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan dengan potensi paling besar di Indonesia. Berdasarkan data Kementerian ESDM, dari total potensi energi baru terbarukan nasional sebesar 3.687 gigawatt (GW), energi surya menyumbang potensi terbesar yaitu 3.294 GW, namun pemanfaatannya hingga baru terealisasi sekitar 1,49 GW atau kurang dari 1% dari potensi yang ada. Besarnya potensi yang belum dimanfaatkan sejalan dengan letak geografis Indonesia yang dilalui garis khatulistiwa, sehingga menerima intensitas radiasi matahari yang tinggi dan relatif stabil sepanjang tahun dibandingkan negara-negara di lintang tinggi.

Meskipun potensinya besar, pemanfaatan energi surya melalui panel surya menghadapi kendala teknis dalam proses penyerapan energi. Panel surya hanya mampu mengonversi radiasi matahari yang jatuh langsung pada permukaannya, sehingga radiasi yang datang di luar area permukaan panel tidak dapat dimanfaatkan dan menjadi energi yang terbuang percuma, padahal luas area penangkapan cahaya berbanding lurus dengan besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan. Selain masalah keterbatasan area penangkapan radiasi, kenaikan suhu permukaan panel akibat paparan sinar matahari secara terus-menerus juga menjadi kendala tersendiri, karena kenaikan suhu dapat menurunkan tegangan dan efisiensi keluaran panel surya, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil penelitian yang

mengamati variasi efisiensi panel surya 100 Wp sebesar 40,26% hingga 14,7% akibat pengaruh suhu dan kecepatan angin selama periode pengujian (Siregar & Harahap, 2024). Kendala pada panel surya baik keterbatasan luas penangkapan radiasi maupun penurunan performa akibat suhu, menunjukkan bahwa peningkatan kinerja sistem panel surya terutama pada proses pengisian baterai, masih memerlukan upaya tambahan di luar peningkatan spesifikasi panel itu sendiri.

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan area penangkapan radiasi tersebut adalah penambahan reflektor pada sistem panel surya. Reflektor berfungsi memantulkan dan mengarahkan radiasi matahari tambahan dari area di sekitar panel menuju permukaan panel surya, sehingga intensitas radiasi total yang diterima menjadi lebih besar tanpa perlu menambah luas permukaan panel itu sendiri (Abdullah dkk., 2024). Penelitian yang dilakukan oleh Hanifah, dkk. (2024) membuktikan bahwa penambahan reflektor datar pada sisi panel surya mampu meningkatkan daya keluaran panel dibandingkan tanpa reflektor, sehingga pendekatan penambahan reflektor terbukti efektif sebagai solusi sederhana secara konstruksi untuk meningkatkan kinerja sistem panel surya, khususnya pada proses pengisian baterai pada sistem skala kecil.

Meskipun terbukti dapat meningkatkan performa panel surya, reflektor jenis cermin datar yang paling umum digunakan pada penelitian-penelitian terdahulu memiliki keterbatasan pada sifat pemantulannya. Cermin datar hanya mampu memantulkan cahaya secara sejajar tanpa memusatkannya ke satu titik tertentu, sehingga peningkatan intensitas radiasi yang dihasilkan cenderung terbatas dan sangat bergantung pada sudut pemasangannya. Ditunjukkan oleh penelitian Hanifah, dkk. (2024) yang menemukan bahwa peningkatan daya keluaran panel surya dengan reflektor datar menurun drastis seiring bertambahnya sudut reflektor, yaitu dari 29% pada sudut 60° menjadi hanya 4% pada sudut 90° . Temuan serupa juga ditunjukkan oleh Yuniarti, dkk. (2022) yang memperoleh peningkatan tegangan yang sangat kecil, yaitu hanya 2,83% pada sudut 120° dan 0,83% pada sudut 150° , sehingga membuktikan bahwa peningkatan sudut reflektor cermin datar tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan performa panel. Keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa reflektor cermin datar belum mampu memanfaatkan

radiasi matahari secara optimal karena sifatnya yang hanya memantulkan cahaya tanpa memusatkannya pada satu area target di permukaan panel.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, reflektor jenis cermin cekung atau cermin konvergen menjadi alternatif yang lebih menjanjikan. Berbeda dengan cermin datar, cermin cekung bersifat konvergen karena berpotensi mengarahkan dan memusatkan pantulan cahaya ke area permukaan panel (Herisman & Baihaqi, 2023). Arah pemusatan cahaya oleh cermin konvergen mengikuti prinsip hukum pemantulan cahaya, di mana sudut datang cahaya terhadap garis normal permukaan cermin akan selalu sama dengan sudut pantulnya, sehingga kemiringan cermin dapat diatur secara spesifik untuk mengarahkan pantulan cahaya ke permukaan panel surya (Abyan dkk., 2025). Sifat pemusatan cahaya yang menjadikan cermin konvergen berpotensi menghasilkan peningkatan intensitas radiasi yang lebih besar dan lebih terarah dibandingkan cermin datar, sebagaimana dibuktikan oleh penelitian (Harahap dkk., 2025) yang menunjukkan bahwa penggunaan reflektor cermin pada panel surya monokristalin mampu meningkatkan daya rata-rata panel dari 1,58 W menjadi 1,75 W dibandingkan tanpa reflektor. Penggunaan reflektor cermin konvergen juga berpotensi meningkatkan suhu permukaan panel akibat bertambahnya radiasi yang diterima serta menghasilkan distribusi pantulan cahaya yang tidak merata apabila posisi dan sudut reflektor tidak sesuai. Kondisi tersebut dapat memengaruhi kinerja panel surya, sehingga perlu dianalisis sebagai salah satu keterbatasan dalam penerapan reflektor cermin konvergen.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji penggunaan reflektor pada sistem panel surya dengan berbagai pendekatan yang berbeda. Penelitian pertama dilakukan oleh Syekha & Fadlioni, (2024) dengan judul "Analisis Perbandingan Reflektor Cermin Cekung dari Kaca *Puzzle* dan Aluminium Foil terhadap Daya Output Pembangkit Listrik Tenaga Surya", bertujuan untuk membandingkan pengaruh material reflektor cermin cekung terhadap daya keluaran panel surya. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan membandingkan dua material reflektor pada sudut 45° di empat sisi panel, dan memperoleh hasil bahwa reflektor kaca *puzzle* menghasilkan daya rata-rata sebesar 22,5 watt, lebih tinggi dibandingkan reflektor aluminium foil sebesar 21,78 watt. Penelitian memiliki gap berupa fokus yang hanya membandingkan material reflektor tanpa

mengembangkan prototipe sistem secara menyeluruh dan tanpa menguji variasi sudut reflektor.

Penelitian kedua dilakukan oleh Hanifah, dkk. (2024) dengan judul "Pengaruh Penggunaan Reflektor Datar Dengan Variasi Sudut Terhadap Daya Keluaran Panel Surya", bertujuan mengetahui pengaruh variasi sudut reflektor datar terhadap daya keluaran panel surya. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan variasi sudut 60° , 75° , dan 90° , dan memperoleh hasil peningkatan daya tertinggi sebesar 29% pada sudut 60° . Gap dari penelitian terletak pada penggunaan reflektor datar yang hanya memantulkan cahaya tanpa memusatkannya pada satu titik fokus, sehingga potensi peningkatan intensitas radiasi belum optimal.

Penelitian ketiga dilakukan oleh Fallo, dkk. (2023) dengan judul "Analisis Efisiensi Panel Surya Menggunakan Reflektor dan Sistem Pendingin Berbasis Mikrokontroler", bertujuan mengetahui pengaruh kombinasi reflektor dan sistem pendingin terhadap efisiensi panel surya. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan membandingkan empat kondisi pengujian, dan memperoleh hasil efisiensi tertinggi sebesar 15,4% pada kombinasi reflektor sudut 60° dengan sistem pendingin. Gap penelitian ini adalah penambahan variabel sistem pendingin yang menyebabkan pengaruh reflektor secara mandiri tidak dapat dianalisis secara terpisah.

Penelitian keempat dilakukan oleh Nadhiroh, dkk. (2022) dengan judul "Pemanfaatan Reflektor untuk Peningkatan Daya Luaran Panel Surya pada Sistem Off Grid", bertujuan mengoptimalkan daya keluaran panel surya off-grid melalui reflektor yang dapat diatur posisinya. Penelitian menggunakan metode eksperimen berdasarkan standar IEC 61724, dan memperoleh hasil bahwa reflektor cermin datar memberikan keluaran daya tertinggi pada sudut 83° . Gap penelitian terletak pada penggunaan reflektor datar yang belum mengkaji potensi reflektor cermin konvergen sebagai alternatif peningkatan performa.

Penelitian kelima dilakukan oleh Putri, dkk (2022) dengan judul "Rancang Bangun PLTS Kapasitas 50 Wp Menggunakan Reflektor untuk Meningkatkan Efisiensi Panel Surya", bertujuan membandingkan kinerja modul surya konvensional dengan modul yang menggunakan reflektor. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan variasi sudut reflektor 50° , 60° , dan 70° , dan

memperoleh hasil efisiensi tertinggi sebesar 13,56% pada sudut 70°. Gap penelitiannya fokus yang hanya berpusat pada variasi sudut reflektor datar tanpa disertai pengembangan prototipe sistem secara terintegrasi dengan komponen penyimpanan energi.

Berdasarkan uraian kelima penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai penggunaan reflektor pada sistem panel surya masih didominasi oleh jenis reflektor cermin datar, dengan sudut optimal yang bervariasi antar penelitian pada kisaran 60° hingga 83° tergantung pada konfigurasi dan material reflektor yang digunakan. Penelitian yang secara khusus mengkaji reflektor cermin cekung/konvergen, seperti yang dilakukan oleh Syekha & Fadlioni, (2024) memang sudah ada, namun masih terbatas pada perbandingan material reflektor (kaca *puzzle* dan aluminium foil) pada satu sudut pemasangan tetap 45°, tanpa menguji variasi sudut kemiringan maupun mengintegrasikannya dengan sistem penyimpanan energi. Belum ada pengembangan prototipe dengan reflektor cermin konvergen, baterai *lithium-ion*, dan variasi sudut dalam satu sistem pengujian.

Urgensi penelitian semakin diperkuat oleh kesenjangan antara target bauran energi terbarukan nasional yang belum tercapai dengan besarnya potensi energi surya yang masih jauh dari termanfaatkan secara optimal, sehingga diperlukan inovasi teknologi PLTS skala kecil yang sederhana secara konstruksi dan dapat diterapkan pada skala prototipe karena berpotensi mengarahkan dan memusatkan pantulan cahaya ke area permukaan panel. Reflektor cermin konvergen dipilih dalam penelitian karena sifat optiknya yang mampu memusatkan cahaya matahari pada satu titik fokus, sehingga berpotensi menghasilkan peningkatan intensitas radiasi yang lebih signifikan dibandingkan reflektor cermin datar, sekaligus menjadi solusi atas keterbatasan yang telah dibuktikan pada penelitian-penelitian terdahulu.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian menggunakan panel surya jenis monokristalin karena memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan jenis polikristalin pada ukuran permukaan yang sama, sehingga lebih sesuai untuk diintegrasikan dengan reflektor cermin konvergen dalam skala prototipe. Penelitian menguji empat variasi sudut kemiringan reflektor cermin

konvergen, yaitu 30° , 50° , 60° , dan 70° . Rentang sudut dipilih untuk mencakup batas mekanis engsel dudukan reflektor pada prototipe, yang secara struktural mampu diatur pada rentang 30° – 70° terhadap bidang panel, mewakili variasi dari sudut landai hingga sudut tegak agar dapat diamati kecenderungan performa sistem pada rentang sudut yang cukup lebar. Pemilihan keempat titik sudut juga mempertimbangkan kisaran sudut optimal 60° – 83° yang ditemukan pada penelitian-penelitian terdahulu dengan reflektor cermin datar, sehingga sudut 60° dan 70° mewakili rentang tersebut, sementara sudut 30° dan 50° ditambahkan untuk mengamati performa sistem pada sudut yang lebih landai yang belum banyak dikaji pada penelitian sebelumnya. Penelitian ini tidak mengukur secara langsung besarnya energi matahari yang diserap pada permukaan panel surya akibat pantulan reflektor. Evaluasi dilakukan berdasarkan parameter keluaran sistem setelah *Solar Charge Controller* (SCC), yaitu intensitas radiasi matahari, tegangan, arus, daya, energi, efisiensi sistem, suhu permukaan panel, dan waktu pengisian baterai pada sistem dengan dan tanpa reflektor sebagai indikator kinerja sistem pengisian baterai. Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, penelitian ini mengembangkan sebuah Prototipe Sistem Panel Surya dengan Reflektor Cermin Konvergen sebagai Optimalisasi Penyerapan Energi Matahari, guna meningkatkan kinerja sistem pengisian baterai pada sistem PLTS berskala kecil.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, identifikasi masalah dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pemanfaatan energi surya di Indonesia masih rendah dibandingkan dengan potensi yang tersedia, sehingga diperlukan upaya untuk meningkatkan pemanfaatan energi matahari secara lebih optimal.
2. Panel surya konvensional hanya menerima radiasi matahari yang jatuh langsung pada permukaan panel, sehingga sebagian energi cahaya tidak termanfaatkan secara optimal akibat pengaruh sudut datang sinar matahari.
3. Penggunaan reflektor cermin datar pada panel surya masih belum mampu meningkatkan kinerja keluaran sistem secara konsisten pada berbagai sudut reflektor.

4. Diperlukan perangkat reflektor yang mampu mengarahkan pantulan cahaya ke permukaan panel surya untuk meningkatkan kinerja sistem pengisian baterai.
5. Belum diketahui besarnya pengaruh penggunaan reflektor cermin konvergen terhadap kinerja sistem pengisian baterai yang diukur berdasarkan parameter tegangan, arus, daya, energi, dan efisiensi sistem pengisian.
6. Belum diketahui sudut reflektor cermin konvergen yang menghasilkan kinerja sistem pengisian baterai paling baik di antara variasi sudut 30° , 50° , 60° , dan 70° .
7. Belum diketahui pengaruh penggunaan cermin konvergen terhadap suhu permukaan panel surya sebagai variabel pendukung dalam analisis kinerja sistem pengisian baterai.

1.3. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian Prototipe Sistem Panel Surya Dengan Reflektor Cermin Konvergen Sebagai Optimalisasi Penyerapan Energi Matahari yaitu:

1. Penelitian difokuskan pada pengembangan sistem panel surya dengan penambahan reflektor cermin konvergen untuk mengarahkan tambahan radiasi matahari ke permukaan panel surya.
2. Pengujian dilakukan dengan membandingkan kinerja panel surya tanpa reflektor dengan panel surya yang menggunakan reflektor cermin konvergen.
3. Reflektor yang digunakan berupa cermin konvergen sebanyak dua buah yang dipasang pada sisi kanan dan kiri panel surya. Jumlah dua reflektor merupakan rancangan prototipe pada penelitian, bukan hasil optimasi jumlah cermin, sehingga penelitian tidak membandingkan performa antara penggunaan satu, dua, atau lebih dari dua reflektor.
4. Variasi yang diteliti adalah sudut pemasangan reflektor terhadap permukaan panel surya, yaitu 30° , 50° , 60° , dan 70° .
5. Parameter yang diukur meliputi radiasi matahari, tegangan, arus, daya, energi, suhu permukaan panel surya, efisiensi sistem pengisian, serta waktu pengisian baterai. Pengukuran daya, energi, dan efisiensi sistem pengisian dilakukan pada jalur keluaran *Solar Charge Controller* (SCC) menuju baterai,

sehingga hasil pengukuran tidak merepresentasikan daya keluaran langsung pada terminal panel surya.

6. Pengujian dilakukan pada kondisi cuaca cerah di Laboratorium Mekatronika dan Robotika Lantai 3 Tower A Universitas Negeri Jakarta pada waktu pengujian yang telah ditentukan. Hasil penelitian tidak dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi cuaca, musim, maupun lokasi geografis lain, mengingat pengujian hanya dilakukan pada waktu dan lokasi tertentu.
7. Perhitungan yang dilakukan meliputi daya keluaran, energi listrik, efisiensi sistem pengisian, serta persentase peningkatan kinerja sistem pengisian baterai akibat penggunaan reflektor cermin konvergen.
8. Posisi pemasangan reflektor hanya diuji pada sisi kanan dan kiri panel surya, sehingga penelitian tidak membandingkan posisi pemasangan pada sisi atas, bawah, pojok, maupun konfigurasi reflektor pada keempat sisi panel sekaligus.
9. Reflektor cermin konvergen pada penelitian dibuat dari potongan-potongan cermin yang disusun membentuk permukaan cekung, sehingga karakteristik pantulannya belum tentu sama dengan cermin cekung ideal yang memiliki permukaan kontinu.
10. Penelitian dibatasi pada analisis pengaruh penggunaan reflektor cermin konvergen terhadap kinerja sistem pengisian baterai dan tidak membahas aspek ekonomi maupun umur pakai komponen.

1.4. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah, dan pembatasan masalah yang telah diuraikan, rumusan masalah pada penelitian adalah bagaimana mengembangkan dan menguji prototipe sistem panel surya dengan reflektor cermin konvergen, serta bagaimana pengaruh variasi sudut reflektor (30° , 50° , 60° , dan 70°) terhadap kinerja sistem pengisian baterai pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)?

1.5. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menghasilkan dan menguji prototipe sistem panel surya dengan reflektor cermin konvergen, untuk menganalisis pengaruh penggunaan reflektor serta variasi sudut reflektor (30° , 50° , 60° , dan 70°) terhadap kinerja

sistem pengisian baterai pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), untuk menentukan konfigurasi sudut dengan kinerja terbaik di antara variasi yang diuji. Kinerja dinilai berdasarkan parameter radiasi matahari, tegangan, arus, daya, energi, efisiensi sistem, dan waktu pengisian baterai, dengan suhu permukaan panel sebagai variabel pendukung.

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang akan didapatkan setelah melakukan penelitian adalah:

1. Manfaat Teoritis

Hasil penelitian yang diperoleh diharapkan dapat memberikan tambahan wawasan dan pemahaman mengenai sistem panel surya dengan menggunakan reflektor cermin konvergen. Melalui pendekatan yang dilakukan, penelitian dapat dimanfaatkan sebagai referensi awal mengenai pengaruh reflektor cermin konvergen terhadap kinerja sistem pengisian baterai pada PLTS skala kecil.

2. Manfaat Praktis

a. Bagi peneliti

Penelitian dapat menjadi sarana peneliti dalam mengimplementasikan pengetahuan dan hasil pembelajaran yang telah diperoleh selama masa perkuliahan.

b. Bagi pengguna

Penelitian memberikan informasi awal bahwa penggunaan reflektor pasif berupa cermin konvergen dapat meningkatkan kinerja pengisian pada prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala kecil. Hasil penelitian masih bersifat prototipe dan belum dapat dijadikan rekomendasi komersial untuk implementasi pada skala yang lebih luas.

c. Bagi peneliti selanjutnya

Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan yang mengkaji variasi jumlah reflektor, posisi pemasangan reflektor, variasi sudut reflektor yang lebih rapat, serta penggunaan *Solar Charge Controller* (SCC) tipe MPPT untuk meningkatkan kinerja sistem pengisian baterai pada PLTS skala kecil.