BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, transisi menuju energi terbarukan menjadi fokus utama dalam menjawab tantangan krisis energi dan perubahan iklim global. Energi surya, melalui teknologi fotovoltaik (PV), menempati posisi strategis karena ketersediaannya yang melimpah, khususnya di wilayah tropis seperti Indonesia. Perkembangan teknologi panel surya, termasuk tipe monokristalin dan bifacial, menunjukkan tren peningkatan efisiensi dan fleksibilitas aplikasi. Panel bifacial, misalnya, mampu menyerap radiasi dari kedua sisi sehingga berpotensi menghasilkan energi lebih tinggi dibandingkan panel konvensional. Namun demikian, peningkatan efisiensi tersebut masih menghadapi berbagai kendala teknis yang berkaitan dengan kondisi operasional di lapangan.

Dalam upaya mewujudkan keberlanjutan energi serta menjaga kelestarian lingkungan, optimalisasi beban pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)[1] menjadi hal yang sangat penting. Penggunaan energi surya sebagai sumber energi terbarukan mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang berdampak buruk bagi lingkungan. Dengan demikian, emisi gas rumah kaca dan berbagai polutan yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil dapat ditekan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, baik negara berkembang maupun negara maju telah menyepakati komitmen melalui Perjanjian Paris tahun 2015, yang bertujuan membatasi kenaikan suhu global di bawah 2 derajat Celsius dibandingkan masa pra-industrialisasi, serta mengupayakan pembatasan hingga 1,5 derajat Celsius (UU Nomor 16, 2016). Oleh karena itu, pengelolaan dan pengendalian beban yang tepat pada sistem PLTS sangat diperlukan agar pemanfaatan energi surya dapat berjalan secara maksimal, sekaligus mendukung upaya global dalam mengurangi jejak karbon[2].

Salah satu faktor kritis yang secara konsisten dilaporkan dalam berbagai penelitian adalah pengaruh temperatur terhadap kinerja panel surya. Secara empiris, hanya sekitar 20% energi radiasi matahari yang dapat dikonversi menjadi energi listrik, sementara sisanya berubah menjadi panas yang terakumulasi pada permukaan panel . Akumulasi panas ini menyebabkan peningkatan suhu operasi panel, yang berdampak langsung pada

penurunan efisiensi konversi energi. Bahkan, beberapa studi menunjukkan bahwa setiap kenaikan suhu di atas kondisi standar dapat menurunkan efisiensi panel sekitar 0,40–0,50%[3] . Selain itu, peningkatan suhu juga menyebabkan penurunan tegangan keluaran, yang berimplikasi pada berkurangnya daya listrik yang dihasilkan . Fenomena ini menjadi semakin signifikan di daerah dengan intensitas radiasi tinggi, di mana panel surya cenderung mengalami *overheating* selama operasi.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai pendekatan pengendalian suhu telah dikembangkan, baik secara pasif maupun aktif. Salah satu metode yang menunjukkan potensi signifikan adalah penggunaan sistem pendingin berbasis *water cooling.* Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan pendinginan dengan aliran air mampu meningkatkan tegangan dan daya keluaran panel masing-masing sekitar 5–6% dibandingkan tanpa pendinginan . Selain itu, sistem pendingin juga terbukti mampu menjaga stabilitas temperatur panel sehingga performa sistem fotovoltaik tetap optimal dalam jangka waktu operasi yang lebih panjang . Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan termal merupakan aspek kunci dalam peningkatan efisiensi sistem energi surya.

Secara teoretis, panel bifacial pada dasarnya dirancang untuk memperoleh manfaat optimal apabila diaplikasikan pada sistem PLTS Terapung (*floating photovoltaic*), yaitu instalasi di atas permukaan air, dibandingkan dengan pemasangan konvensional di daratan (*ground mounting*). Hal ini disebabkan oleh mekanisme kerja panel bifacial yang memanfaatkan sisi depan untuk menerima radiasi matahari secara langsung, sementara sisi belakang memanfaatkan pantulan sinar matahari dari permukaan air sebagai sumber energi tambahan.Sisi depan panel surya menerima sinar matahari secara langsung, sedangkan sisi sebaliknya menerima sinar matahari dari pantulan permukaan air. Penerapan konsep ini telah dibuktikan melalui proyek percontohan PLTS Terapung Bifacial pertama di Indonesia yang dikembangkan oleh *Tropical Renewable Energy Center* (TREC), Fakultas Teknik Universitas Indonesia, yang dipasang di atas perairan danau kampus dengan kapasitas 10.000 Wp.Sistem PLTS terapung ini dipasang di atas perairan dengan menggunakan jenis panel surya bifacial yang pertama kali diterapkan di Indonesia, dengan tujuan menghasilkan energi yang lebih besar melalui pemanfaatan dua sisi sel surya yang dapat menerima sinar matahari. [4]

Studi lain yang dilakukan di Universitas Indonesia turut membandingkan performa PLTS Terapung berbasis modul bifacial dengan PLTS Atap berbasis modul monofacial untuk kondisi iklim tropis.Hasil pengukuran menunjukkan bahwa performa modul bifacial memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan modul monofacial, dengan nilai performance ratio (PR) sebesar 68,59% untuk sistem PLTS Terapung. Selain itu, potensi pengembangan PLTS Terapung di Indonesia juga tercermin dari sejumlah proyek besar yang telah dan sedang dibangun, seperti PLTS Terapung Cirata di Jawa Barat serta perencanaan PLTS Apung di Waduk Brigif, Jakarta Selatan, yang menegaskan bahwa instalasi terapung merupakan konfigurasi yang semakin relevan diterapkan pada wilayah perairan di Indonesia.Pemanfaatan PLTS terapung di Indonesia masih tergolong kecil, sehingga sejumlah pihak merancang PLTS Apung di Waduk Brigif, Jakarta Selatan, sebagai bagian dari upaya pengembangan lebih lanjut.[5] [1]

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang ada masih berfokus pada satu jenis panel surya dan belum banyak membandingkan efektivitas sistem pendingin pada teknologi panel yang berbeda, khususnya antara panel bifacial dan monokristalin. Padahal, kedua jenis panel ini memiliki karakteristik struktur, mekanisme penyerapan radiasi, serta distribusi panas yang berbeda, sehingga respons terhadap sistem pendinginan kemungkinan tidak sama. Kesenjangan penelitian ini membuka peluang kajian yang lebih mendalam untuk memahami interaksi antara teknologi panel dan metode pendinginan yang digunakan.

Oleh karena itu, penelitian mengenai analisis pengaruh sistem pendingin berbasis *Water cooling* terhadap efisiensi dan keluaran daya panel surya monokristalin dan bifacial menjadi sangat penting dan mendesak untuk dilakukan, terutama pada kondisi iklim tropis Indonesia yang memiliki intensitas radiasi matahari tinggi sekaligus temperatur lingkungan yang relatif tinggi sepanjang tahun. Penelitian ini dirancang secara eksperimental melalui pengujian langsung di lapangan sehingga mampu memberikan gambaran nyata mengenai perbedaan respons kedua jenis panel terhadap penerapan sistem pendingin. Kajian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan, tetapi juga memberikan dasar ilmiah dalam merancang sistem pembangkit listrik tenaga surya yang lebih efisien, adaptif, dan sesuai dengan kondisi iklim tropis. Tanpa adanya penelitian yang komprehensif dalam aspek ini,

potensi optimalisasi energi surya sebagai sumber energi masa depan tidak akan dapat dimanfaatkan secara maksimal.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Apa perbedaan tingkat efektivitas sistem pendingin *water cooling* antara panel surya bifacial dan monokristalin dalam meningkatkan efisiensi dan keluaran daya ?
2. Mengapa panel surya bifacial dan monokristalin menunjukkan respons yang berbeda terhadap penerapan sistem pendingin berbasis *water cooling* ?
3. Bagaimana hubungan antara penurunan suhu permukaan panel dengan peningkatan tegangan dan daya keluaran pada kedua jenis panel surya ?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang akan dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis perbedaan tingkat efektivitas sistem pendingin berbasis *water cooling* dalam meningkatkan efisiensi dan keluaran daya pada panel surya bifacial dan monokristalin.
2. Menguraikan penyebab perbedaan respons termal dan kinerja listrik antara panel surya bifacial dan monokristalin terhadap penerapan sistem pendingin *water cooling.*
3. Mengukur dan menganalisis hubungan antara penurunan suhu permukaan panel dengan peningkatan tegangan serta daya keluaran pada panel surya bifacial dan monokristalin.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan dari penelitian adalah

1. Dapat mengetahui perbedaan tingkat efektivitas sistem pendingin berbasis *water cooling* dalam meningkatkan efisiensi dan keluaran daya pada panel surya bifacial dan monokristalin.
2. Dapat mengetahui penyebab perbedaan respons termal dan kinerja listrik antara panel surya bifacial dan monokristalin terhadap penerapan sistem pendingin *water cooling.*

3. Dapat Mengukur dan menganalisis hubungan antara penurunan suhu permukaan panel dengan peningkatan tegangan serta daya keluaran pada panel surya bifacial dan monokristalin

1.5. Ruang Lingkup

Untuk mencapai tujuan yang diharapkan dan pembahasan mengenai penelitian menjadi terarah, maka dalam penelitian ini pembahas dibatas dengan hanya membahas tentang :

1. Membahas tentang perbedaan tingkat efektivitas sistem pendingin berbasis *water cooling* dalam meningkatkan efisiensi dan keluaran daya pada panel surya bifacial dan monokristalin.
2. Penelitian ini membahas tentang penyebab perbedaan respons termal dan kinerja listrik antara panel surya bifacial dan monokristalin terhadap penerapan sistem pendingin *water cooling.*
3. Penelitian ni membahas tentang hasil pengukuran dan menganalisis hubungan antara penurunan suhu permukaan panel dengan peningkatan tegangan serta daya keluaran pada panel surya bifacial dan monokristalin.
4. Objek penelitian dibatasi pada dua jenis panel surya yaitu bifacial dan monokristalin
5. Sistem pendingin yang diteliti hanya menggunakan metode *water cooling* (pendingin aktif dengan air), tanpa membandingkan dengan metode pendingin lain seperti pendingin udara (*air cooling*) atau sistem pasif.

1.6. Kebaharuan

Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komparatif efektivitas sistem pendingin berbasis *water cooling* pada dua jenis panel surya, yaitu bifacial dan monokristalin, yang selama ini umumnya diteliti secara terpisah. Penelitian ini tidak hanya mengukur peningkatan efisiensi dan keluaran daya, tetapi juga menganalisis hubungan antara suhu, tegangan, dan daya keluaran secara kuantitatif. Selain itu, penelitian ini menguraikan perbedaan respons termal dan kinerja listrik kedua jenis panel berdasarkan karakteristik material dan penyerapan radiasi. Kebaruan juga diperkuat oleh

konteks pengujian pada kondisi iklim tropis, sehingga hasil penelitian lebih relevan secara aplikatif.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru melalui pendekatan komparatif dan analisis terintegrasi dalam mengkaji pengaruh sistem pendingin *water cooling* terhadap efisiensi panel surya.

1.7. Hipotesis

Berdasarkan rumusan masalah yang di uraikan, maka hipotesis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sistem pendingin berbasis *water cooling* memiliki tingkat efektivitas yang berbeda dalam meningkatkan efisiensi dan keluaran daya antara panel surya bifacial dan monokristalin, di mana panel bifacial diduga mengalami peningkatan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan panel monokristalin.
2. Perbedaan respons antara panel surya bifacial dan monokristalin terhadap sistem pendingin *water cooling* disebabkan oleh perbedaan karakteristik material, struktur panel, serta kemampuan penyerapan dan distribusi radiasi panas pada masing-masing jenis panel.
3. Penurunan suhu permukaan panel surya akibat penerapan sistem pendingin *water cooling* berbanding lurus dengan peningkatan tegangan dan daya keluaran, sehingga semakin rendah suhu panel, maka semakin tinggi efisiensi dan keluaran daya yang dihasilkan.