

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Energi surya merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki peluang pengembangan sangat besar, terutama pada wilayah tropis yang menerima intensitas radiasi matahari tinggi sepanjang tahun. Indonesia yang terletak di garis khatulistiwa memiliki potensi energi surya yang sangat signifikan. Laporan IRENA menyebutkan bahwa potensi teknis PLTS Indonesia diperkirakan menembus hampir 3000 GWp, sehingga menjadikannya komponen strategis dalam upaya transisi menuju sistem energi rendah karbon [1]. Berdasarkan data Kementerian ESDM dalam *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023*, pemerintah menargetkan peningkatan kontribusi energi baru terbarukan dalam bauran energi nasional sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi sektor energi [2].

Implementasi kebijakan tersebut diwujudkan melalui pembangunan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) baik pada skala utilitas maupun melalui adopsi PLTS atap pada sektor residensial, komersial, dan industri. PLTS atap dipandang sebagai pendekatan desentralisasi energi yang mampu meningkatkan ketahanan energi sekaligus menekan emisi gas rumah kaca. Meskipun demikian, performa sistem fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokasi pemasangan, terutama faktor-faktor eksternal yang dapat menurunkan kemampuan modul dalam menyerap radiasi matahari secara optimal [3].

Fenomena *soiling* merupakan salah satu faktor lingkungan yang berpengaruh terhadap penurunan kinerja modul fotovoltaik. *Soiling* terjadi akibat penumpukan partikel seperti debu, polutan, maupun kontaminan organik pada permukaan kaca modul yang menyebabkan berkurangnya kemampuan material tersebut dalam meneruskan radiasi matahari ke sel surya. Penurunan intensitas radiasi yang diterima sel akan berdampak langsung pada berkurangnya efisiensi konversi energi dan daya keluaran sistem. Hasil berbagai penelitian menunjukkan

bahwa besarnya kehilangan daya akibat *soiling* sangat bervariasi dan dipengaruhi oleh kondisi lokasi, sifat fisik dan kimia partikel, laju deposisi, sudut kemiringan modul, serta interval pembersihan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa kehilangan daya akibat *soiling* dapat mencapai lebih dari 30%, terutama pada kondisi akumulasi debu tinggi, interval pembersihan yang panjang, serta lingkungan dengan tingkat partikulat atmosfer yang tinggi [4].

Sebagian besar penelitian mengenai dampak *soiling* terhadap kinerja modul fotovoltaik masih berfokus pada wilayah beriklim kering dan semi-kering, seperti Timur Tengah dan Afrika Utara, yang didominasi oleh deposisi debu anorganik. Kondisi tersebut berbeda dengan lingkungan tropis lembap seperti Indonesia yang memiliki curah hujan tinggi, kelembapan relatif besar, serta potensi kontaminasi permukaan yang lebih kompleks, termasuk partikel organik dan residu biologis. Perbedaan karakteristik lingkungan ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian terkait fenomena *soiling* pada iklim tropis [5].

Perbedaan kondisi lingkungan antara wilayah kering dan tropis menyebabkan karakteristik deposisi dan adhesi partikel pada permukaan modul fotovoltaik menjadi berbeda, sehingga hasil penelitian dari daerah kering tidak dapat secara langsung diterapkan pada kondisi tropis lembap. Fenomena *soiling* sangat dipengaruhi oleh faktor lokal seperti curah hujan, kelembapan, kecepatan angin, serta sumber kontaminan di sekitar instalasi, sehingga ketersediaan data empiris spesifik lokasi menjadi penting dalam pengembangan model prediksi kehilangan energi yang akurat. Oleh karena itu, penggunaan model yang dikembangkan berdasarkan data iklim kering berpotensi menghasilkan estimasi kinerja yang kurang representatif ketika diterapkan pada lingkungan tropis [6].

Kesenjangan pengetahuan tersebut menjadi semakin penting seiring meningkatnya pembangunan PLTS di Indonesia, baik pada skala utilitas maupun sistem terdistribusi. Tanpa pemahaman yang memadai mengenai pengaruh *soiling* terhadap kinerja modul fotovoltaik pada iklim tropis lembap, strategi perencanaan, pemeliharaan, dan optimasi sistem PLTS berisiko tidak mencapai tingkat efisiensi optimal. Oleh karena itu, diperlukan penelitian eksperimental untuk menganalisis

pengaruh *soiling* terhadap efisiensi panel surya monokristalin dan polikristalin pada kondisi iklim tropis lembap. Penelitian berbasis laboratorium ini dilakukan untuk memperoleh data empiris yang lebih akurat dan representatif terhadap kondisi lingkungan di Indonesia.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dipaparkan, dapat diidentifikasi sejumlah permasalahan yang menjadi dasar dilaksanakannya penelitian ini. Meskipun potensi pemanfaatan energi surya di Indonesia sangat besar, kinerja aktual sistem fotovoltaik di lapangan masih menghadapi berbagai tantangan lingkungan yang belum sepenuhnya terkuantifikasi secara komprehensif, khususnya pada wilayah beriklim tropis lembap.

Permasalahan utama yang teridentifikasi adalah keterbatasan data empiris lokal mengenai besarnya kehilangan daya dan efisiensi panel surya akibat fenomena *soiling* pada kondisi iklim tropis lembap. Sebagian besar referensi yang tersedia masih didominasi oleh studi yang dilakukan di wilayah kering dan semi-kering, sehingga hasilnya belum tentu merepresentasikan karakteristik lingkungan Indonesia secara akurat.

Selain itu, perbedaan respons kinerja antara panel surya monokristalin dan polikristalin terhadap akumulasi *soiling* di lingkungan tropis lembap belum dikaji secara mendalam melalui pendekatan eksperimental yang terkontrol. Kondisi ini menyebabkan keterbatasan informasi dalam menentukan teknologi panel yang lebih adaptif terhadap fenomena kontaminasi permukaan pada lingkungan dengan tingkat kelembapan tinggi.

Permasalahan berikutnya adalah belum tersedianya dasar teknis berbasis data lokal yang dapat digunakan sebagai acuan dalam penyusunan strategi perawatan dan pembersihan panel surya secara optimal. Tanpa pemahaman yang memadai mengenai karakteristik kehilangan kinerja akibat *soiling*, sistem PLTS berpotensi mengalami penurunan produksi energi yang berkelanjutan serta peningkatan biaya operasional.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar pembahasan penelitian ini tetap terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup permasalahan dibatasi pada beberapa aspek tertentu. Penelitian ini hanya difokuskan pada analisis pengaruh *soiling* terhadap kinerja panel surya monokristalin dan polikristalin, tanpa melibatkan jenis teknologi modul fotovoltaik lainnya.

Pengujian dilakukan dalam ruangan dengan menggunakan sumber pencahayaan buatan berupa lampu halogen sebagai simulasi radiasi matahari. Oleh karena itu, penelitian ini tidak membahas pengaruh radiasi matahari alami, variasi cuaca harian, perubahan sudut datang sinar matahari, maupun kondisi lingkungan luar ruang yang bersifat dinamis.

Jenis *soiling* yang dikaji dalam penelitian ini dibatasi pada *soiling* kering berupa partikel debu dan *soiling* basah disimulasikan dengan menyemprotkan air suling sebanyak 5 mL, 10 mL, dan 20 mL pada permukaan panel untuk merepresentasikan kondisi kelembapan atau lapisan air pada permukaan modul. Penelitian ini tidak mencakup analisis komposisi kimia *soiling* secara detail, serta tidak membahas sumber polutan spesifik selain yang digunakan dalam skenario pengujian.

Parameter kinerja panel surya yang dianalisis meliputi tegangan keluaran, arus listrik, daya output, efisiensi panel, serta karakteristik kurva I-V dan P-V. Analisis degradasi jangka panjang, laju penuaan modul (*aging*), dan dampak siklus pembersihan berulang tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini.

Dengan pembatasan tersebut, hasil penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran yang terfokus mengenai respons awal panel surya monokristalin dan polikristalin terhadap variasi *soiling* pada kondisi tropis lembap, namun tidak dimaksudkan untuk menggantikan studi lapangan jangka panjang pada instalasi PLTS skala nyata.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah, dan pembatasan masalah yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh keberadaan *soiling* terhadap kinerja listrik panel surya monokristalin dan polikristalin pada kondisi pengujian *Indoor* yang merepresentasikan iklim tropis lembap?
2. Sejauh mana perbedaan tingkat penurunan daya dan efisiensi panel surya monokristalin dan polikristalin akibat variasi jenis dan tingkat *soiling* yang diberikan pada permukaan modul?
3. Bagaimana karakteristik perubahan kurva arus–tegangan (I-V) dan kurva daya–tegangan (P-V) panel surya monokristalin dan polikristalin pada kondisi permukaan bersih dibandingkan dengan kondisi terkontaminasi *soiling* kering dan *soiling* basah?

1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *soiling* terhadap kinerja panel surya monokristalin dan polikristalin pada kondisi pengujian *Indoor* yang merepresentasikan karakteristik iklim tropis lembap. Analisis dilakukan melalui pendekatan eksperimental terkontrol guna memperoleh gambaran yang objektif mengenai respons masing-masing teknologi panel terhadap kontaminasi permukaan modul.

Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan parameter kelistrikan panel surya, meliputi tegangan, arus, daya keluaran, dan efisiensi, pada kondisi permukaan panel bersih dan terkontaminasi oleh variasi jenis serta tingkat *soiling*. Evaluasi tersebut dimaksudkan untuk mengidentifikasi besarnya kehilangan kinerja (*loss*) yang terjadi pada masing-masing jenis panel.

Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perubahan karakteristik kurva arus–tegangan (I-V) panel surya monokristalin dan polikristalin akibat

pengaruh *soiling*, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar teknis dalam pemilihan teknologi panel dan perencanaan strategi pemeliharaan sistem fotovoltaik pada lingkungan tropis lembap.

1.6 Manfaat Penelitian

1.6.1 Manfaat Teoretis

Secara teoretis, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian ilmiah di bidang energi terbarukan, khususnya terkait pengaruh fenomena *soiling* terhadap kinerja panel surya. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi dalam memahami karakteristik penurunan daya dan efisiensi panel surya monokristalin dan polikristalin pada kondisi tropis lembap yang direpresentasikan melalui pengujian *Indoor* terkontrol.

Selain itu, penelitian ini dapat menjadi referensi akademis dalam pengembangan model analisis kinerja fotovoltaik yang mempertimbangkan faktor kontaminasi permukaan modul. Temuan mengenai perbedaan respons teknologi panel terhadap jenis dan tingkat *soiling* diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan, baik dalam skala laboratorium maupun pengujian lapangan.

1.6.2 Manfaat Praktis

Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi teknis bagi perancang, pengelola, dan pengguna sistem pembangkit listrik tenaga surya dalam memilih jenis panel yang lebih sesuai untuk diterapkan pada lingkungan tropis lembap. Informasi mengenai besarnya *soiling* pada masing-masing teknologi panel dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam perencanaan sistem dan estimasi produksi energi.

Selain itu, penelitian ini dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi pemeliharaan dan pembersihan panel surya yang lebih efektif dan efisien. Dengan memahami pengaruh variasi *soiling* terhadap kinerja panel, frekuensi dan metode perawatan dapat dioptimalkan guna menjaga performa sistem fotovoltaik secara

berkelanjutan serta menekan potensi kerugian energi akibat degradasi kinerja modul.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari tesis ini terdiri dari 5 (lima) Bab dengan detail sebagai berikut:

Bab I menjelaskan latar belakang, identifikasi masalah, pembatasan masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab II menyajikan landasan teori yang relevan sebagai dasar analisis teknis penelitian.

Bab III membahas metode penelitian, teknik pengumpulan data, serta pendekatan analisis data.

Bab IV menyajikan hasil pengujian, analisis, dan pembahasan berdasarkan data eksperimen.

Bab V memuat simpulan, saran, dan rekomendasi strategis berdasarkan hasil penelitian.