

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengembangan energi surya di Indonesia didukung oleh regulasi Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 yang menetapkan target bauran energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Selain itu, Permen ESDM Nomor 49 Tahun 2018 yang mengatur tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap. Namun, implementasi PLTS mengalami tantangan berupa fenomena *Soiling*, yaitu akumulasi debu dan polutan pada permukaan modul yang menghambat transmisi cahaya matahari. Yadav *et al.* (2025) mengidentifikasi bahwa *Soiling* dapat menyebabkan penurunan kinerja PLTS sebesar 0,20%–0,70% per hari, dengan rata-rata penurunan 0,43% pada periode kering. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem deteksi *Soiling* yang akurat dan real-time untuk meminimalkan kerugian energi tersebut.

Pemantauan *Soiling* umumnya dilakukan dengan metode visual dan manual yang bersifat subjektif, tidak akurat, serta kurang efisien untuk instalasi berskala besar (Maghami *et al.* , 2016). Kedua pendekatan ini juga tidak dapat menyajikan informasi kuantitatif tentang distribusi spasial *Soiling* secara cepat dan objektif. Akumulasi partikel dipengaruhi secara simultan oleh arah angin, gravitasi, dan sudut inklinasi panel, sehingga ketebalan lapisan kontaminan bervariasi secara spasial. Penelitian Wibowo *et al.* (2023) mengembangkan instrumen estimasi kekotoran panel fotovoltaik (PV) menggunakan satu sensor BH1750 dengan konfigurasi pengukuran titik tunggal. Meskipun mampu mendeteksi penurunan transmisi cahaya, konfigurasi satu titik menghasilkan data yang rentan terhadap bias spasial karena tidak dapat merepresentasikan kondisi keseluruhan permukaan panel. Di sisi lain, metode berbasis citra digital menggunakan kamera atau drone (Bessa *et al.* , 2021) membutuhkan investasi perangkat keras yang tinggi serta sumber daya komputasi yang intensif. Berdasarkan analisis kesenjangan tersebut, penelitian ini mengadopsi konfigurasi pemindaian grid 3×3 (sembilan titik pengukuran) sebagai kompromi optimal antara akurasi representasi spasial dan efisiensi mekanik. Grid 3×3 memungkinkan pendeteksian heterogenitas distribusi kontaminan tanpa memerlukan

kompleksitas pemrosesan citra, sehingga menghasilkan estimasi indeks *Soiling* yang lebih representatif dibandingkan dengan pengukuran titik tunggal yang dilakukan oleh Wibowo *et al.* (2023) dan sekaligus lebih ekonomis dibandingkan dengan metode berbasis citra.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem *Soiling Scanner* berbasis sensor optik dan *Internet of Things* (IoT). Sistem dirancang menggunakan tiga pasang sensor LED-fotodioda yang digerakkan oleh motor stepper untuk memindai permukaan kaca uji pada konfigurasi grid 3×3. Mikrokontroler ESP32 dengan konektivitas WiFi terintegrasi digunakan sebagai unit pengendali utama, dengan protokol MQTT sebagai media transmisi data nirkabel menuju broker HiveMQ Cloud. Data hasil pemindaian divisualisasikan secara real-time melalui antarmuka dashboard berbasis Python, sehingga memungkinkan pemantauan jarak jauh yang akurat, efisien, dan representatif terhadap distribusi *Soiling* pada permukaan panel surya.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini difokuskan pada pengembangan sensor untuk mendeteksi *Soiling* dan memberikan pengukuran yang akurat. Adapun rumusan masalah yang relevan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara merancang sensor berbasis optik dan pencahayaan yang mampu mendeteksi tingkat *Soiling* pada kaca simulasi panel surya secara akurat?
2. Bagaimana kinerja sistem *Soiling Scanner* dalam melakukan kalibrasi, pemindaian, dan komunikasi data melalui protokol MQTT ke dashboard Python?
3. Bagaimana karakteristik distribusi dan konsistensi tingkat *Soiling* yang terdeteksi oleh sistem *Soiling Scanner* pada berbagai variasi massa kontaminan ?

1.3. Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang diuraikan, berikut adalah tujuan dari penelitian:

1. Merancang dan mengembangkan sensor pendeteksi tingkat *Soiling* pada panel surya menggunakan kombinasi teknologi sensor optik dan pencahayaan.
2. Menguji kinerja sistem *Soiling Scanner* dalam melakukan kalibrasi, pemindaian, dan komunikasi data melalui protokol MQTT ke *dashboard* Python.
3. Menganalisis karakteristik distribusi dan konsistensi tingkat *Soiling* yang terdeteksi oleh sistem *Soiling Scanner* pada berbagai variasi massa kontaminan.

1.4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi sensor untuk deteksi *Soiling* pada panel surya.
2. Memudahkan pemantauan tingkat *Soiling* secara akurat untuk mendukung pengambilan keputusan pembersihan.
3. Memberikan kemudahan akses data secara *real-time* melalui broker MQTT dan *dashboard* Python.
4. Memberikan kemudahan akses data *Soiling* secara *real-time* melalui internet dan broker MQTT.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dibuat untuk memastikan penelitian tetap fokus, Batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Alat yang dikembangkan merupakan probe yang berbentuk papan seperti panel surya yang ditempatkan di lokasi serta pengaturan yang sama dengan PLTS.
2. Alat yang dikembangkan hanya berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur tingkat *Soiling*, tanpa mekanisme pembersihan otomatis.
3. Alat yang dikembangkan akan menggunakan sensor optik dan pencahayaan untuk mendeteksi *Soiling*, dengan memindai penurunan pembacaan intensitas cahaya dari luar permukaan

4. Pengujian sensor dilakukan dalam kondisi laboratorium dan pengujian akurasi sensor dilakukan menggunakan metode simulasi aerodinamik, di mana tepung terigu diterbangkan menggunakan kipas angin menuju permukaan kaca simulasi.
5. Sensor optik yang digunakan pada sistem *Soiling Scanner* belum terkalibrasi dengan alat ukur yang telah berstandar SNI (Standar Nasional Indonesia), sehingga hasil pengukuran yang dihasilkan berupa nilai relatif dalam bentuk *Soiling index* (persentase penurunan transmisi cahaya) dan belum dapat dikonversi menjadi nilai absolut yang terstandarisasi.
6. Penelitian ini berfokus pada uji fungsional alat *Soiling Scanner*, yang meliputi verifikasi kinerja setiap subsistem , serta pengujian respons sensor terhadap variasi massa kontaminan dalam kondisi laboratorium terkontrol.