

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi bersih dan berkelanjutan mendorong pemanfaatan energi surya sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial dalam mendukung transisi energi global. Panel surya sebagai komponen utama sistem fotovoltaik berfungsi mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotolistrik. Meskipun teknologi ini relatif andal dan minim emisi, kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan operasionalnya, khususnya kebersihan permukaan modul. Penumpukan debu, pasir, dan partikel polutan pada permukaan panel dapat menghambat penetrasi radiasi matahari ke sel fotovoltaik sehingga menurunkan efisiensi konversi energi dan daya keluaran sistem.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa akumulasi debu secara signifikan menurunkan performa panel surya. Biswas et al. (2023) menyatakan bahwa partikel debu mengurangi radiasi efektif yang diterima sel fotovoltaik sehingga daya keluaran mengalami penurunan. Bhambure et al. (2024) menambahkan bahwa kotoran pada satu modul saja dapat memengaruhi efisiensi keseluruhan array akibat ketidakseimbangan karakteristik listrik antar modul. Sementara itu, Sihotang dan Satria (2025) menunjukkan bahwa proses pembersihan otomatis mampu meningkatkan kembali tegangan keluaran panel setelah terjadi penurunan akibat penumpukan kotoran. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa kebersihan permukaan panel bukan sekadar faktor pendukung, melainkan variabel kritis yang secara langsung memengaruhi performa sistem fotovoltaik, sehingga diperlukan mekanisme monitoring dan pembersihan yang terkontrol secara sistematis.

Selain faktor debu, intensitas cahaya matahari (irradiance) juga berpengaruh langsung terhadap performa elektrik panel. Bala et al. (2024) menunjukkan bahwa peningkatan irradiance berbanding lurus dengan kenaikan arus, tegangan, dan daya keluaran panel. Hariyanto et al. (2024) turut membuktikan bahwa variasi intensitas cahaya harian memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem. Tanpa

mempertimbangkan parameter irradiance, penurunan daya keluaran berpotensi keliru diinterpretasikan sebagai akibat penumpukan debu, padahal dapat disebabkan oleh perubahan kondisi cuaca. Oleh karena itu, pengukuran intensitas cahaya diperlukan sebagai parameter validasi untuk membedakan penyebab penurunan performa, sehingga sistem pembersihan tidak bekerja secara tidak tepat sasaran.

Dalam praktiknya, proses pembersihan panel surya masih banyak dilakukan secara manual. Metode ini dinilai kurang efisien karena membutuhkan tenaga kerja, waktu operasional, serta memiliki potensi risiko terhadap permukaan modul apabila tidak dilakukan dengan prosedur yang tepat. Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem pembersih otomatis sebagai solusi. Jamaludin et al. (2022) merancang sistem berbasis pompa air dan wiper, namun pengoperasiannya masih dilakukan secara manual. Yusrizal et al. (2025) memanfaatkan sensor warna TCS3200 dan teknologi IoT untuk monitoring, tetapi hanya menggunakan satu parameter permukaan tanpa mempertimbangkan kondisi kelistrikan maupun irradiance. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pembersihan yang ada belum sepenuhnya adaptif terhadap kondisi aktual panel secara komprehensif.

Perkembangan Internet of Things (IoT) memungkinkan proses monitoring dilakukan secara real-time dan terintegrasi. Renaldi dan Nurhaedah (2023), Ghafoor et al. (2024), Wei et al. (2025), Ritonga dan Rohani (2025), Hutabarat et al. (2023), serta Iqbal (2025) menunjukkan bahwa integrasi sensor dengan platform cloud memungkinkan proses pemantauan, penyimpanan data, visualisasi, dan pengendalian sistem dilakukan dari jarak jauh secara real-time. Namun, mekanisme pembersihan yang diterapkan pada penelitian sebelumnya masih berbasis waktu atau parameter terbatas sehingga belum mampu mengambil keputusan secara dinamis. Di sisi lain, pendekatan berbasis visi komputer seperti CNN, MobileNet, atau YOLO mampu mendeteksi debu dengan tingkat akurasi tinggi (Onim et al., 2023; Alatwi et al., 2024; Alçin et al., 2025; Uysal, 2024; Rahman, 2025). Akan tetapi, pendekatan tersebut memerlukan perangkat kamera, kapasitas komputasi tinggi, serta konsumsi daya dan biaya operasional yang lebih besar. Selain itu, solusi berbasis visi komputer modern umumnya mengandalkan perangkat keras dan algoritma yang kompleks, sehingga menimbulkan tantangan dalam penerapannya

pada perangkat resource-constrained seperti mikrokontroler (Beltrán-Escobar et al., 2024; de Figueiredo et al., 2025).

Sebagai alternatif yang lebih sederhana, ekonomis, dan sesuai untuk sistem tertanam, sensor optik berbasis warna dapat digunakan untuk membaca perubahan karakteristik permukaan panel. Ta'ali et al. (2023) menunjukkan bahwa sensor TCS34725 mampu membaca nilai RGB secara stabil dalam berbagai kondisi pencahayaan, sedangkan Kabir et al. (2025) membuktikan bahwa hambatan cahaya akibat debu dapat dijadikan indikator kebutuhan pembersihan. Untuk memantau performa listrik panel, Arini dan Amperawan (2025) menunjukkan bahwa sensor INA219 memiliki akurasi tinggi dalam pengukuran arus dan tegangan sehingga sesuai untuk sistem monitoring berbasis mikrokontroler. Sementara itu, Ramadhani dan Haryudo (2024) serta Hamzah et al. (2024) menegaskan pentingnya pengukuran intensitas cahaya karena berkorelasi langsung dengan daya keluaran panel. Integrasi parameter permukaan, parameter listrik, dan parameter irradiance secara simultan berpotensi menghasilkan sistem monitoring yang lebih representatif terhadap kondisi nyata panel.

Selain parameter permukaan dan parameter listrik panel surya, kondisi lingkungan eksternal juga perlu dipertimbangkan dalam proses pengambilan keputusan sistem pembersihan otomatis. Untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi operasional sistem, penelitian ini juga menerapkan sensor hujan sebagai mekanisme proteksi tambahan. Sensor hujan digunakan untuk mencegah aktivasi pompa pembersih saat kondisi hujan berlangsung karena air hujan secara alami telah membantu proses pembersihan permukaan panel surya. Dengan demikian, sistem dapat mengurangi pemborosan energi dan penggunaan air yang tidak diperlukan.

Pada tahap pengambilan keputusan, diperlukan metode kontrol adaptif agar sistem tidak bekerja secara kaku berdasarkan ambang batas tetap. Logika fuzzy memungkinkan representasi kondisi ketidakpastian seperti penurunan efisiensi panel, perubahan karakteristik permukaan panel, dan indeks konsistensi intensitas cahaya ke dalam bentuk derajat keanggotaan sehingga sistem kontrol dapat bekerja lebih fleksibel dan adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan (Saatchi, 2024; Miron et al., 2024). Dwisaputra et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan

fuzzy menghasilkan respons kontrol motor yang lebih halus, Cahyanti et al. (2025) membuktikan efektivitasnya pada sistem robot pembersih panel, dan Velmurugan et al. (2024) menyatakan bahwa fungsi keanggotaan trapesium memberikan kestabilan inferensi yang lebih baik pada sistem kendali.

Selain menggunakan logika fuzzy sebagai pengambil keputusan, sistem pada penelitian ini menerapkan mekanisme baseline pada pagi dan sore hari karena pengukuran sensor optik TCS34725 cenderung lebih stabil pada kondisi pencahayaan tersebut. Evaluasi performa panel dilakukan berdasarkan rasio daya keluaran terhadap intensitas cahaya pada kondisi pencahayaan yang lebih stabil untuk meningkatkan akurasi deteksi perubahan karakteristik permukaan panel. Sistem juga menghitung indeks konsistensi intensitas cahaya berdasarkan persentase perubahan antara pembacaan intensitas cahaya saat ini dan pembacaan sebelumnya. Nilai tersebut digunakan sebagai salah satu parameter masukan pada logika fuzzy untuk membedakan kondisi perubahan cahaya yang kecil maupun besar sehingga keputusan pembersihan menjadi lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan.

Berdasarkan tinjauan tersebut, masih terdapat celah penelitian berupa belum adanya sistem pembersih panel surya berbasis komputasi ringan yang mampu mengintegrasikan evaluasi kondisi permukaan panel, parameter listrik, indeks konsistensi intensitas cahaya, serta validasi kondisi lingkungan secara adaptif dalam satu sistem monitoring berbasis IoT. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan prototipe sistem monitoring dan kontrol adaptif pembersih panel surya menggunakan empat sensor warna TCS34725, sensor INA219, sensor BH1750, sensor hujan, mikrokontroler ESP32, serta metode Fuzzy Logic Mamdani dengan platform ThingSpeak.

Integrasi parameter permukaan panel, parameter keluaran listrik, indeks konsistensi intensitas cahaya, serta validasi kondisi lingkungan diharapkan mampu meningkatkan akurasi pengambilan keputusan sistem pembersihan otomatis. Pendekatan multi-parameter tersebut juga diharapkan dapat meminimalkan aktivasi pompa yang tidak diperlukan, menjaga kestabilan daya keluaran panel surya, serta menghasilkan sistem monitoring dan kontrol yang lebih adaptif dan andal.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan dalam pengembangan sistem pembersih panel surya otomatis berbasis IoT, yaitu:

1. Sistem pembersih panel surya yang telah dikembangkan sebelumnya masih berbasis penjadwalan waktu dan parameter tunggal, sehingga proses pembersihan belum mempertimbangkan kondisi aktual performa panel surya secara komprehensif dan adaptif.
2. Penurunan performa panel surya tidak selalu disebabkan oleh akumulasi debu, tetapi juga dipengaruhi oleh variasi intensitas cahaya, perubahan cuaca. Ketidakmampuan sistem dalam membedakan kondisi tersebut berpotensi menyebabkan kesalahan deteksi dan aktivasi pembersihan yang tidak diperlukan.
3. Penelitian yang mengintegrasikan evaluasi perubahan permukaan panel, parameter keluaran listrik panel surya, konsistensi intensitas cahaya, dan kondisi lingkungan secara terintegrasi dalam satu mekanisme kontrol adaptif berbasis komputasi ringan masih terbatas, sehingga diperlukan pendekatan sistem yang lebih efisien dan representatif terhadap kondisi nyata panel surya.

1.3 Pembatasan Masalah

Untuk memperjelas ruang lingkup penelitian dan pengembangan sistem *monitoring* serta kontrol pembersih panel surya berbasis IoT, beberapa batasan masalah perlu ditetapkan. Adapun batasan-batasan yang dimaksud antara lain:

1. Sistem kontrol pembersih panel surya menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani dengan tiga variabel input yaitu penurunan efisiensi panel surya, indeks konsistensi intensitas cahaya, dan perubahan kondisi permukaan panel.
2. Sistem menggunakan perangkat keras berupa empat sensor warna TCS34725 untuk membaca perubahan kondisi permukaan panel, sensor INA219 untuk memantau tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya, sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya lingkungan, sensor hujan

sebagai proteksi sistem, mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, serta pompa air DC sebagai aktuator pembersihan.

3. Untuk memastikan performa sistem dapat dievaluasi secara efektif, simulasi kondisi kotor pada permukaan panel surya dalam penelitian ini hanya menggunakan debu ringan kering dan tidak mencakup jenis kotoran yang bersifat berkerak atau menempel permanen pada permukaan panel.
4. Proses monitoring sistem dilakukan secara real-time menggunakan platform IoT ThingSpeak yang dapat diakses melalui jaringan internet dengan menampilkan data daya keluaran panel surya, intensitas cahaya lingkungan, perubahan kondisi permukaan panel, durasi kerja pompa, status sistem, dan status cuaca.
5. Sistem pembersih panel surya pada penelitian ini dirancang untuk panel surya dengan rangka posisi tetap (*fixed tilt*) dan tidak mencakup panel surya dengan sistem pelacak matahari (*solar tracker*).

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan batasan masalah yang telah dijelaskan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem monitoring kondisi panel surya secara real-time menggunakan sensor TCS34725, INA219, BH1750, dan sensor hujan berbasis IoT?
2. Bagaimana mengimplementasikan metode Logika Fuzzy Mamdani pada ESP32 untuk menentukan durasi kerja pompa air DC secara adaptif berdasarkan kombinasi data multi-sensor?
3. Bagaimana menampilkan data monitoring dan status sistem pembersihan secara real-time melalui platform ThingSpeak?

1.5 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang, dan menguji Prototipe sistem monitoring dan kontrol pembersih panel surya berbasis IoT. Tujuan spesifik dari penelitian ini meliputi:

1. Merancang sistem monitoring kondisi panel surya berbasis sensor TCS34725, INA219, BH1750, dan sensor hujan yang terintegrasi dengan ESP32 dan platform IoT.

2. Mengimplementasikan metode Logika Fuzzy Mamdani pada ESP32 sebagai sistem kontrol adaptif untuk menentukan durasi kerja pompa air DC.
3. Menguji dan mengevaluasi kinerja sistem melalui pengujian eksperimental.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademik maupun praktis dalam bidang energi terbarukan dan otomasi sistem, yaitu:

1. Secara akademik, memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem kontrol cerdas berbasis IoT dan Logika Fuzzy untuk aplikasi pemeliharaan panel surya dengan pendekatan multi-parameter berbasis komputasi ringan.
2. Secara praktis, menyediakan solusi sistem pembersih panel surya yang lebih adaptif terhadap kondisi aktual lingkungan dan performa panel surya, sehingga mampu menjaga kestabilan daya keluaran serta mengurangi aktivasi pompa yang tidak diperlukan.
3. Menjadi referensi bagi penelitian lanjutan yang berfokus pada pengembangan sistem otomasi perawatan panel surya maupun integrasi sensor lain dalam skala industri dan akademik.

Intelligentia - Dignitas