

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan kebutuhan energi yang semakin meningkat mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan. Salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dikembangkan adalah energi surya melalui sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Panel surya merupakan komponen utama dalam sistem ini yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaiik. Penggunaan panel surya saat ini semakin luas karena sumber energinya melimpah, ramah lingkungan, serta dapat digunakan pada berbagai sektor seperti rumah tangga, industri, maupun fasilitas umum [1][2].

Dalam pengoperasiannya, kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat panel tersebut dipasang. Panel surya yang berada di ruang terbuka rentan terhadap berbagai faktor eksternal seperti debu, kotoran, intensitas cahaya dan peningkatan suhu permukaan panel. Penumpukan debu pada permukaan panel dapat menghalangi masuknya cahaya matahari ke sel fotovoltaiik sehingga mengurangi energi yang dapat dikonversi menjadi listrik. Selain itu, peningkatan suhu permukaan panel juga dapat menurunkan efisiensi kerja panel surya karena karakteristik material semikonduktor pada sel fotovoltaiik yang sensitif terhadap perubahan temperatur [3], [4], [5].

Permasalahan yang sering terjadi pada sistem panel surya adalah proses pembersihan permukaan panel yang masih dilakukan secara manual oleh manusia. Metode ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti membutuhkan tenaga kerja, tidak dapat dilakukan secara rutin, serta kurang efektif apabila diterapkan pada instalasi panel surya dalam jumlah besar atau pada lokasi yang sulit dijangkau. Akibatnya, panel surya sering berada dalam kondisi kotor dalam waktu yang cukup lama sehingga menyebabkan penurunan kinerja dan efisiensi sistem pembangkit listrik tenaga surya [6].

Kinerja panel surya dapat dianalisis melalui parameter listrik yang dihasilkan, seperti tegangan *output* panel. Penurunan tegangan keluaran yang terjadi bersamaan dengan adanya peningkatan tingkat polutan pada permukaan panel dapat menjadi

indikator bahwa panel surya memerlukan proses pembersihan. Selain itu, suhu permukaan panel juga menjadi parameter penting karena peningkatan temperatur dapat menurunkan efisiensi kerja sel fotovoltaik [3], [7].

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan suatu sistem yang mampu memantau kondisi panel surya serta menentukan kebutuhan pembersihan secara otomatis berdasarkan beberapa parameter. Dalam penelitian ini digunakan mikrokontroler ESP-32 sebagai pusat kendali sistem yang berfungsi untuk membaca data dari sensor, mengolah data tersebut, serta mengendalikan aktuator pembersih panel surya. *Voltage Sensor Module* digunakan untuk mengukur tegangan keluaran panel surya sebagai parameter utama dalam mengevaluasi kondisi performa panel surya, sensor suhu DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu permukaan panel, sedangkan sensor intensitas cahaya BH1750 digunakan untuk mengukur intensitas penyinaran matahari yang diterima panel surya. Data intensitas cahaya digunakan sebagai parameter untuk membedakan penurunan tegangan yang disebabkan oleh rendahnya penyinaran matahari akibatnya dengan kondisi ini panel memerlukan pembersihan. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan modul *Real Time Clock* (RTC) yang berfungsi untuk mengatur waktu operasional sistem pembersihan.

Untuk menentukan kondisi panel surya dan kebutuhan pembersihan, pada penelitian ini digunakan metode *decision tree* CART sebagai metode pengambilan keputusan. Metode ini bekerja menggunakan struktur percabangan logika berdasarkan beberapa parameter input, yaitu tegangan *output* panel surya, suhu permukaan panel, intensitas cahaya, serta waktu operasional sistem. Berdasarkan kombinasi parameter tersebut, sistem dapat menentukan apakah panel berada dalam kondisi bersih atau perlu dilakukan proses pembersihan. Pemilihan metode *decision tree* CART dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik permasalahan yang dihadapi, yaitu menentukan keputusan pembersihan panel surya berdasarkan kombinasi beberapa parameter yang diperoleh dari kondisi aktual panel dan lingkungan. Penurunan tegangan keluaran panel tidak dapat langsung dilihat sebagai indikasi adanya kotoran karena nilai tersebut juga dipengaruhi oleh intensitas cahaya dan kondisi suhu panel. Oleh karena itu, diperlukan metode yang

mampu mempelajari hubungan antarparameter tersebut dan mengklasifikasikan kondisi panel ke dalam keputusan "Bersihkan" dan "Tidak Perlu". *Decision tree* CART memiliki kemampuan dalam melakukan klasifikasi berbasis kombinasi parameter serta menentukan nilai ambang batas (*threshold*) pada setiap percabangan secara otomatis dan adaptif. Nilai *threshold* ini diperoleh selama proses pelatihan (*training*) melalui perhitungan kriteria pemisahan (seperti *Gini Impurity*) yang mengevaluasi seluruh titik pisah (*split points*) dari parameter tegangan, intensitas cahaya, dan suhu untuk menemukan *threshold* paling optimal dalam membedakan kondisi panel [8]. Hal ini memungkinkan keputusan sistem tidak hanya bergantung pada satu nilai sensor, tetapi mempertimbangkan hubungan antarparameter secara bertahap. Selain itu, struktur pohon keputusan yang dihasilkan dapat menjadi aturan *if-else* untuk diimplementasikan pada ESP32, sehingga model yang telah dilatih dapat diterapkan pada sistem tanpa harus menjalankan proses pelatihan *machine learning* secara langsung pada mikrokontroler.

Dalam penelitian ini, proses pengumpulan data dilakukan secara otomatis menggunakan *Firestore Realtime Database* sebagai media penyimpanan data hasil pembacaan sensor. Data berupa tegangan panel surya, suhu permukaan panel, intensitas cahaya matahari, serta waktu pengambilan data dikirim oleh mikrokontroler ESP32 ke *Firestore*. Selain data hasil pembacaan sensor, proses pelabelan data dilakukan secara manual berdasarkan hasil pengujian secara langsung pada panel surya. Pengujian dilakukan dengan memberikan dua kondisi pada panel, yaitu kondisi "Bersihkan" ketika panel diberikan kotoran atau debu pada permukaannya sehingga diperlukan proses pembersihan, dan kondisi "Tidak Perlu" ketika panel berada dalam kondisi bersih dan tidak memerlukan proses pembersihan. Setiap data hasil pembacaan sensor kemudian diberikan label sesuai dengan kondisi panel pada saat pengujian berlangsung. Data yang telah tersimpan dan diberi label tersebut kemudian diekspor ke dalam format CSV dan digunakan sebagai dataset pada proses pelatihan algoritma *decision tree*. Dengan demikian, label pada dataset diperoleh berdasarkan kondisi aktual panel saat dilakukan pengujian secara langsung, sedangkan algoritma *decision tree* digunakan untuk

mempelajari hubungan antara parameter sensor dengan label tersebut dan menghasilkan aturan klasifikasi dan *threshold* untuk menentukan keputusan pembersihan secara otomatis.

Penelitian sebelumnya menggunakan *fuzzy* Mamdani dengan parameter tegangan dan waktu dalam menentukan kebutuhan pembersihan panel surya. Namun, pendekatan tersebut belum mempertimbangkan beberapa parameter kondisi panel dan lingkungan secara bersamaan. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menerapkan *decision tree* berbasis CART menggunakan parameter tegangan, suhu, dan intensitas cahaya, dengan *threshold* yang diperoleh secara otomatis dari proses pelatihan model.

1.2 Kajian Penelitian Terdahulu

Kajian penelitian terdahulu merupakan suatu penegasan keaslian penelitian yang akan dilakukan dan menjelaskan perbandingan terhadap riset sebelumnya yang menjadi acuan dalam pembuatan tugas akhir. Tabel 1.1 menunjukkan beberapa referensi guna menunjang penelitian.

Tabel 1. 1 Referensi utama

NO	JUDUL	PENELITI	TAHUN
1	<i>Optimal Cleaning Robot on Solar Panels With Time-Sequence Input Based on Internet of Things</i>	Fitriyanah D, Saputra R, Abadi I, Musyafa A.	2025
2	Kontrol Otomatis Pembersih Panel Surya Berbasis IoT Dengan Menggunakan <i>Platform Thingspeak</i>	Angga Renaldi, Sitti Nurhaedah, Muhammad Anshar, Suryanto	2024
3	<i>AI-Integrated Autonomous Robotics for Solar Panel Cleaning and Predictive Maintenance Using Drone and Ground Based Systems</i>	Indra Kishor, Udit Mamodiya, Vathsala Patil, Nithesh Naik	2025
4	Rancang Bangun Robot Pembersih Panel Surya Menggunakan Metode <i>Dry Cleaning</i> Berbasis <i>Fuzzy Logic Controller</i>	Cahyanti V, Muflih Rahman M, Dwisaputra I, Sulistyoe E	2025

NO	JUDUL	PENELITI	TAHUN
5	<i>IoT-Based Automated Solar Panel Cleaning and Monitoring Technique</i>	Biswas S, Bhuyan M, Hassan M.	2023

Penelitian [9] mengembangkan sistem pembersih panel surya otomatis berbasis IoT yang menggunakan ESP32 dan aplikasi Blynk. Sistem ini menggabungkan modul *IoT* dengan mekanisme pembersihan berupa semprotan air dan *wiper* silikon untuk membersihkan debu dan kotoran pada panel. Berdasarkan simulasi optimasi pembersihan, frekuensi pembersihan optimal ditemukan satu kali per bulan dengan efisiensi hingga sekitar 75%. Namun, penelitian ini masih mengandalkan jadwal pembersihan tetap (bulanan) dan tidak menggunakan metode pengambilan keputusan seperti *Decision tree* untuk menentukan kapan pembersihan seharusnya dilakukan berdasarkan kondisi aktual panel.

Penelitian [10] merancang alat pembersih panel surya otomatis yang datanya dapat dipantau melalui platform ThingSpeak. Panel diuji dengan berbagai tingkat debu, lalu data tegangan, arus, dan temperatur dicatat setiap interval waktu tertentu dan dibersihkan secara otomatis sesuai jadwal yang ditentukan. Sistem ini terbukti meningkatkan efisiensi panel setelah dibersihkan. Namun, Sistem ini belum menerapkan logika pengambilan keputusan seperti metode *Decision tree* untuk keputusan pembersihan. keputusan masih didasarkan pada jadwal atau ambang waktu tertentu.

Penelitian [11] menggunakan AI dan drone untuk pembersihan otonom capai 91% efisiensi, tapi fokus pada sistem skala besar dengan *reinforcement learning* yang kompleks dan mahal. Belum mengintegrasikan algoritma pengambilan keputusan sederhana untuk prototipe murah dan sederhana, kurang cocok untuk aplikasi skala kecil di daerah tropis seperti Indonesia.

Penelitian [12] membahas pengembangan robot pembersih panel surya yang bekerja secara otomatis menggunakan metode *dry cleaning* tanpa menggunakan air. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor warna TCS3200 untuk mendeteksi tingkat debu pada permukaan panel. Robot pembersih akan bekerja secara otomatis berdasarkan tingkat kotoran yang terdeteksi pada panel surya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi panel surya pada kondisi bersih mencapai

sekitar 36,17%, sedangkan pada kondisi berdebu efisiensinya menurun menjadi 21,27%, sehingga pembersihan panel surya sangat diperlukan untuk menjaga performa sistem fotovoltaik tetap optimal. Namun demikian, penelitian tersebut menggunakan metode *dry cleaning* dengan pendekatan *fuzzy logic* dalam menentukan proses pembersihan panel surya. Pendekatan tersebut memerlukan proses perhitungan logika *fuzzy* yang relatif lebih kompleks. Selain itu, mekanisme pembersihan tanpa menggunakan air dinilai kurang efektif untuk menghilangkan debu atau kotoran yang menempel kuat pada permukaan panel.

Penelitian [13] membuat sistem pembersihan panel surya otomatis yang mengintegrasikan IoT untuk pemantauan secara *real-time*. Dengan sensor LDR dan sensor tegangan, sistem mengontrol pembersihan otomatis melalui mekanisme pembersihan yang digerakkan servo dan pompa air, serta menampilkan data ke aplikasi smartphone. Sistem ini terbukti meningkatkan efisiensi panel dan mendukung pemeliharaan berkelanjutan. Meski sudah memanfaatkan *IoT* dan otomatisasi, penelitian ini tidak menerapkan metode pengambilan keputusan seperti *Decision tree* untuk menentukan kapan dan seberapa kuat pembersihan dilakukan, keputusan masih berbasis kondisi sensor sederhana.

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, sistem pembersih panel surya telah dikembangkan dengan berbagai pendekatan, seperti penggunaan robot pembersih otomatis, penerapan sistem berbasis *Internet of Things (IoT)*, serta metode pengambilan keputusan seperti *fuzzy logic* atau penjadwalan waktu pembersihan. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada penggunaan satu atau dua parameter dalam menentukan proses pembersihan, seperti tingkat debu atau intensitas cahaya, serta belum mempertimbangkan faktor lain yang juga mempengaruhi kinerja panel surya seperti suhu permukaan panel. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan prototipe sistem pembersih panel surya otomatis yang menggunakan metode *decision tree* CART sebagai logika pengambilan keputusan dengan mempertimbangkan beberapa parameter sekaligus, yaitu tegangan *output* panel surya, suhu permukaan panel, intensitas cahaya, serta waktu operasional sistem. Sistem pembersihan dirancang menggunakan mekanisme motor *wiper* berputar

yang dilengkapi dengan semprotan air sehingga diharapkan mampu membersihkan permukaan panel secara lebih efektif serta menjaga kinerja panel surya tetap optimal.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, berikut beberapa masalah yang dapat dirumuskan :

1. Bagaimana rancangan dan implementasi sistem pembersih panel surya otomatis menggunakan metode *decision tree*?
2. Bagaimana kinerja sistem pembersih panel surya otomatis menggunakan metode *decision tree*?

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem pembersih panel surya otomatis menggunakan metode *decision tree* yang dapat bekerja secara mandiri.
2. Menganalisis kinerja sistem pembersih panel surya otomatis menggunakan metode *decision tree*.

1.5 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Manfaat Akademis
Penelitian ini dapat menjadi bahan referensi dan pembelajaran bagi akademisi pada bidang energi terbarukan, sistem kendali dan teknologi *Internet of Things (IoT)*.
2. Manfaat Praktis
Hasil penelitian ini dapat membantu pengguna panel surya dalam melakukan perawatan secara lebih mudah dan efisien. Sistem ini juga diharapkan dapat mendukung penggunaan energi terbarukan yang berkelanjutan.

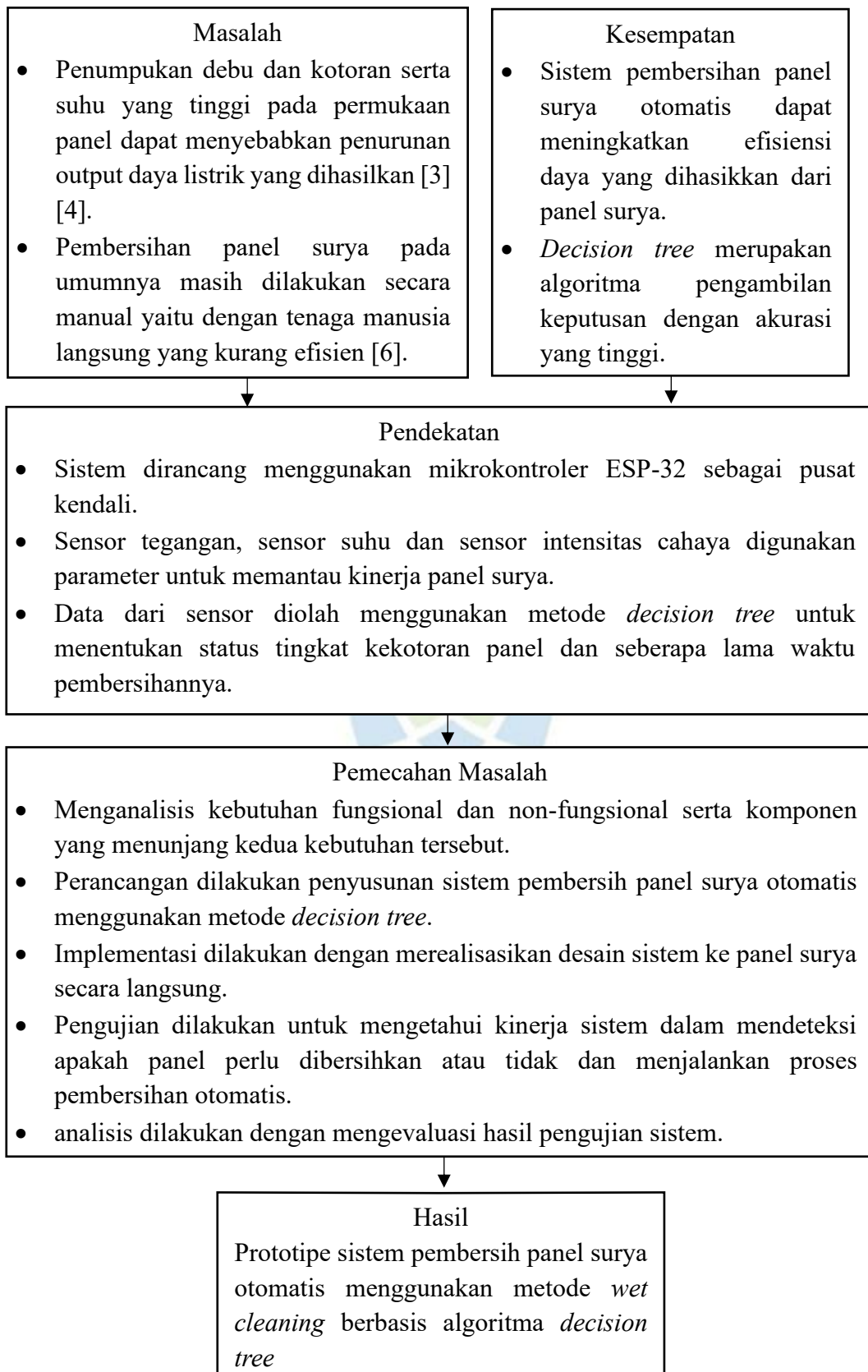
1.6 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini diantaranya :

1. Sistem pembersihan panel surya menggunakan motor *wiper* sebagai aktuator pembersih.
2. Sistem dikendalikan menggunakan mikrokontroler ESP-32 sebagai pusat kendali utama.
3. Sensor yang digunakan meliputi *voltage sensor module* digunakan untuk mengukur tegangan keluaran panel surya, sensor suhu DS18B20 untuk mengukur suhu permukaan panel surya, serta sensor intensitas cahaya BH1750.
4. Penelitian ini menggunakan panel surya dengan ukuran 110 x 55 cm dengan daya puncak maksimum 100Wp.
5. Analisis efisiensi dilakukan berdasarkan perbandingan tegangan keluaran panel surya sebelum dan sesudah pembersihan.
6. *Input* sistem *decision tree* diperoleh dari data tegangan *output* panel surya, suhu permukaan panel, intensitas cahaya, serta waktu operasional sistem sebagai dasar pengambilan keputusan.
7. *Output* sistem *decision tree* berupa klasifikasi kondisi kebersihan panel surya yaitu apakah perlu dibersihkan atau tidak perlu yang digunakan untuk mengaktifasi sistem pembersihan secara otomatis.
8. Data sensor yang digunakan sebagai dataset diperoleh dari hasil pengukuran prototipe dan disimpan menggunakan *Firestore Realtime Database*.
9. *Firestore* hanya digunakan sebagai media penyimpanan data sensor dan tidak digunakan sebagai pengendalian sistem.

1.7 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan pemahaman menyeluruh tentang penelitian yang menjadi dasar penelitian. Penelitian ini dilakukan dengan metode yang berdasar pada teori pendukung. Gambar 1.1 menunjukkan kerangka berfikir pada penelitian ini.



Gambar 1. 1 Kerangka berpikir

1.8 Sistematika Penulisan

Pendekatan sistematis penulisan ini mencakup tiga bab. Berikut adalah sistem penulisan laporan tugas akhir pada penelitian ini :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang dari penelitian, kajian penelitian terdahulu, rumusan masalah, tujuan serta manfaat penelitian, batasan masalah, kerangka berfikir dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Pada bab ini menjelaskan tentang teori yang menjadi dasar dari penelitian seperti energi surya, panel surya, jenis-jenis panel surya, faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja panel, pengaruh debu, kotoran dan polutan pada panel surya, metode pembersihan panel surya, *decision tree*, *firebase*, mikrokontroler ESP-32, sensor intensitas cahaya BH1750, Sensor Tegangan, sensor suhu (DS18B20), *real time clock (RTC)*, aktuator pembersih, motor DC, pompa, Arduino IDE.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan seluruh tahapan penelitian yang dilakukan. Metode penelitian yang digunakan pada penyusunan tugas akhir ini diantaranya identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem (meliputi desain *hardware* dan *software*), implementasi perangkat, metode pengujian dan analisis data, dan jadwal penelitian.

BAB IV PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Bab ini membahas proses perancangan dan implementasi sistem pembersih panel surya otomatis secara keseluruhan. Pembahasan meliputi perancangan perangkat keras (*hardware*) yang terdiri atas ESP32, sensor tegangan, sensor suhu DS18B20, sensor intensitas cahaya BH1750, modul RTC DS3231, motor DC JGY370, *motor driver* BTS7960, pompa air DC, relay, dan *limit switch*. Selain itu, dijelaskan pula perancangan perangkat lunak (*software*), implementasi metode *Decision tree* sebagai logika pengambilan keputusan, integrasi sistem dengan *Firebase Realtime Database*.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

Bab ini menjelaskan hasil pengujian terhadap sistem yang telah dirancang beserta analisis kinerjanya. Pengujian dilakukan pada setiap komponen, meliputi sensor tegangan, sensor suhu DS18B20, sensor intensitas cahaya BH1750, modul RTC DS3231, aktuator, *limit switch*, implementasi metode *decision tree*, serta pengujian keseluruhan sistem. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil pengujian untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem dalam melakukan monitoring kondisi panel surya, pengambilan keputusan pembersihan secara otomatis, dan peningkatan performa panel surya setelah proses pembersihan.

BAB VI PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis sistem pembersih panel surya otomatis menggunakan metode *decision tree*. Selain itu, disampaikan pula beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam pengembangan penelitian selanjutnya guna meningkatkan kinerja, keandalan, dan efektivitas sistem yang telah dikembangkan.

