

# Perancangan Sistem Proteksi Fotovoltaik Menggunakan *Piezoelectric Buzzer* Dan Sensor Hujan Berbasis IoT

Zakaria<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Elektro, Prodi Teknik Elektro, Universitas Pamulang Kampus Serang, Jl. Raya Serang-Jakarta, Kelurahan Kelodran, Kecamatan Walantaka, Kota Serang, Banten.

\*zakariasyahril23@gmail.com

**Abstrak**— Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia yang sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat menuntut pengembangan sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Energi matahari melalui sistem pembangkit listrik tenaga surya merupakan salah satu solusi yang potensial karena ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang ramah lingkungan. Namun demikian, performa sistem fotovoltaik dalam operasional jangka panjang sering mengalami degradasi akibat penurunan intensitas radiasi yang diterima panel, yang disebabkan oleh akumulasi debu polutan serta kotoran burung pada permukaan modul. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan prototipe sistem proteksi fotovoltaik berbasis sensor *piezoelectric* dan sensor hujan yang mampu bekerja secara otomatis dan adaptif terhadap kondisi lingkungan. Sensor *piezoelectric* digunakan untuk mendeteksi keberadaan burung melalui respon getaran mekanik pada permukaan panel, sedangkan sensor hujan dimanfaatkan untuk mengidentifikasi kondisi cuaca dan mendukung proses pembersihan alami. Sistem kendali dirancang untuk mengaktifkan mekanisme proteksi dan pembersihan ketika gangguan terdeteksi, sehingga kebersihan permukaan panel dapat terjaga secara berkelanjutan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi pergerakan dengan tingkat keberhasilan 100% pada jarak 100 cm dengan rata-rata waktu respons 7,00 detik. Sensor hujan memiliki waktu respons rata-rata sebesar 4,15 detik, sedangkan sistem notifikasi berbasis IoT memiliki waktu pengiriman rata-rata 7,26 detik. Pengujian pada panel fotovoltaik menunjukkan bahwa akumulasi kotoran menyebabkan penurunan tegangan sebesar 1,36–3,61%, dan sistem mampu memulihkan tegangan sebesar 0,20–0,62 V setelah proses pembersihan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem bekerja efektif dalam menjaga kinerja panel fotovoltaik.

**Kata Kunci**—Energi Surya, Energi Terbarukan, Fotovoltaik, *Piezoelectric Buzzer*, Sensor Hujan, Sistem Proteksi Panel.

DOI: 10.22441/jte.2026.v17i2.002

## I. PENDAHULUAN

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kesejahteraan masyarakat. [1]. Indonesia yang berada di wilayah khatulistiwa menerima intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun, dengan rata-rata energi matahari mencapai 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari [2]. Energi ini dapat dikonversi menjadi listrik melalui sistem fotovoltaik [3]. Meskipun memiliki potensi yang besar, pemanfaatan pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia masih

tergolong rendah. Berbagai tantangan teknis dan nonteknis masih menjadi hambatan dalam optimalisasi kinerja sistem fotovoltaik [4].

Salah satu permasalahan utama yang sering dihadapi pada instalasi panel fotovoltaik adalah penurunan efisiensi akibat gangguan eksternal. Panel fotovoltaik umumnya dipasang di area terbuka sehingga rentan terhadap akumulasi debu, polutan, serta kotoran burung yang menempel pada permukaan panel [5]. Kondisi ini dapat menghambat penyerapan radiasi matahari dan menurunkan performa sistem secara signifikan apabila tidak ditangani secara tepat.

Upaya pemeliharaan dan pembersihan panel secara berkala memang telah diterapkan, namun metode tersebut belum sepenuhnya efektif apabila tidak didukung oleh sistem proteksi yang mampu bekerja secara otomatis dan berkelanjutan. Studi literatur menunjukkan bahwa sistem pengusir burung telah banyak diterapkan pada sektor pertanian sebagai upaya perlindungan terhadap tanaman [6]. Pendekatan serupa berpotensi untuk diadaptasi pada sistem fotovoltaik guna menjaga kebersihan permukaan panel dan mempertahankan kinerja konversi energi.

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental terapan dengan pendekatan perancangan dan pengujian sistem untuk mengevaluasi kinerja sistem proteksi panel fotovoltaik berbasis Internet of Things (IoT) dalam menghadapi gangguan lingkungan seperti hama burung, debu, dan hujan. Sistem yang dikembangkan masih berada pada tahap prototipe dan difokuskan pada evaluasi kinerja sistem pembersih serta mekanisme proteksi berbasis sensor. Pengujian dilakukan dalam kondisi laboratorium menggunakan sumber energi dari jaringan PLN guna menjaga kestabilan suplai tegangan dan konsistensi hasil pengujian. Metode penelitian mencakup penentuan jenis penelitian, waktu dan tempat pelaksanaan, target penelitian, prosedur pelaksanaan, instrumen dan teknik pengumpulan data, serta teknik analisis data. Meskipun demikian, sistem telah dirancang dengan konsumsi daya yang relatif rendah dan berpotensi untuk diintegrasikan dengan sumber energi panel fotovoltaik yang dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi (baterai), sehingga dapat beroperasi secara mandiri pada implementasi lapangan di masa mendatang.

### A. Jenis dan Waktu Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental, karena melibatkan pembuatan prototipe, pengujian fungsi, dan

evaluasi kinerja sistem secara langsung. Penelitian dilaksanakan pada tahun 2025 di lingkungan semi-terkendali yang mensimulasikan kondisi operasional panel surya luar ruangan.

Pengujian dilakukan pada rentang suhu lingkungan 28–34 °C dengan kelembapan 60–80%, guna merepresentasikan kondisi iklim tropis yang umum di Indonesia.

#### B. Target dan Subjek Penelitian

Target penelitian adalah sistem proteksi fotovoltaik otomatis berbasis IoT yang dirancang untuk mendeteksi dan merespons gangguan lingkungan secara mandiri. Subjek penelitian meliputi kinerja sensor PIR dalam mendeteksi pergerakan burung, kinerja sensor hujan dalam mendeteksi keberadaan air, serta kinerja sensor debu GP2Y1010AU0F dalam mendeteksi akumulasi partikel. Selain itu, penelitian juga mencakup respons aktuator berupa motor servo dan piezoelectric buzzer, serta keandalan sistem komunikasi NodeMCU ESP8266 dengan aplikasi Telegram.

#### C. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian diawali dengan studi literatur melalui pengkajian jurnal nasional dan internasional terkait pengaruh kotoran burung, debu, hujan, dan shading parsial terhadap efisiensi panel fotovoltaik, kemudian dilanjutkan dengan perancangan sistem yang meliputi penyusunan diagram blok, desain perangkat keras, wiring diagram, serta perancangan perangkat lunak berbasis Arduino IDE dengan integrasi notifikasi Telegram. Tahap berikutnya mencakup implementasi prototipe melalui perakitan seluruh komponen sistem, yaitu NodeMCU ESP8266, sensor PIR, sensor hujan, sensor debu, motor servo, relay, buzzer, dan catu daya, serta pengujian sistem pada beberapa skenario operasional, yaitu kondisi terdeteksi burung tanpa hujan, kondisi hujan tanpa burung, serta kondisi burung dan hujan terjadi bersamaan dengan total 13 kali pengujian. Tahap akhir dilakukan melalui evaluasi kinerja berdasarkan hasil pengujian untuk menilai akurasi sensor, kecepatan respons aktuator, serta keberhasilan sistem dalam mengirimkan notifikasi.

#### D. Data dan Instrumen Penelitian

Data penelitian berupa data kuantitatif dan kualitatif yang meliputi nilai tegangan dan arus pada power supply serta NodeMCU. Data yang dikumpulkan juga mencakup sinyal keluaran sensor PIR, sensor hujan, dan sensor debu, serta respons motor servo dan buzzer terhadap kondisi yang terdeteksi. Selain itu, penelitian turut mencatat status notifikasi sistem melalui aplikasi Telegram sebagai bagian dari evaluasi kinerja komunikasi sistem.

Instrumen yang digunakan antara lain: NodeMCU ESP8266, sensor PIR HC-SR501, sensor hujan MH-RD berbasis LM393, sensor debu GP2Y1010AU0F, motor servo TD-8120MG, piezoelectric buzzer, power supply 5 V, serta multimeter digital.

#### E. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung menggunakan multimeter untuk memperoleh data tegangan dan arus pada sistem. Metode yang digunakan juga mencakup

observasi fungsional untuk menilai respons sensor dan aktuator, serta pencatatan sistem melalui notifikasi Telegram sebagai umpan balik kinerja. Selain itu, seluruh hasil pengujian didokumentasikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mendukung proses analisis data.

#### F. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan hasil pengujian sistem terhadap data acuan yang diperoleh dari studi literatur. Analisis difokuskan pada tingkat keberhasilan deteksi sensor, ketepatan respons aktuator, serta efektivitas sistem proteksi dalam menjaga kinerja panel fotovoltaik.

Hasil analisis digunakan untuk menilai efektivitas sistem secara keseluruhan dan sebagai dasar rekomendasi pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perancangan perangkat keras dari prototipe sistem proteksi panel fotovoltaik berbasis *Internet of Things* (IoT) telah berhasil direalisasikan sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem ini dirancang untuk memberikan perlindungan terhadap gangguan hama burung serta membantu proses pembersihan debu pada permukaan panel surya secara otomatis. Perangkat keras disusun secara terintegrasi, di mana panel fotovoltaik berfungsi sebagai objek utama yang dilindungi dari gangguan eksternal seperti kehadiran burung dan penumpukan debu.

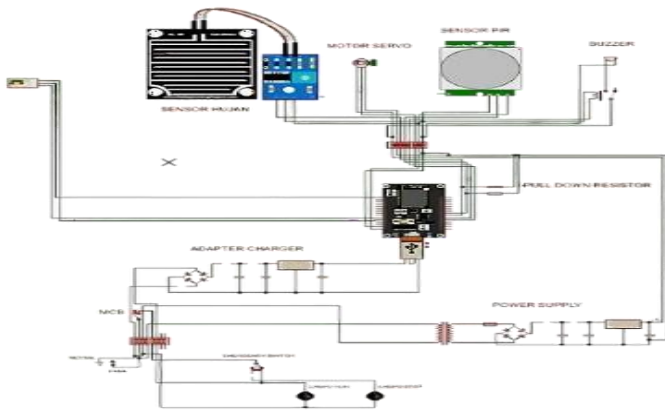
Sumber energi utama sistem berasal dari adaptor *charger* yang terhubung langsung ke tegangan PLN. Penggunaan sumber energi dari jaringan PLN pada tahap penelitian ini bertujuan untuk menjaga kestabilan suplai tegangan selama proses pengujian di laboratorium, sehingga variabel pengujian dapat dikontrol dengan baik tanpa dipengaruhi fluktuasi daya dari panel fotovoltaik. Selain itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan dan evaluasi kinerja sistem pembersih panel fotovoltaik, sehingga aspek sumber energi belum menjadi variabel utama yang diuji secara mendalam. Sistem yang dirancang dalam penelitian ini masih berada pada tahap prototipe, yang dikembangkan untuk memvalidasi konsep kerja, respons sistem, serta integrasi antar komponen.

Namun demikian, sistem memiliki konsumsi daya yang relatif rendah dan secara konseptual telah disesuaikan untuk dapat diintegrasikan dengan sumber energi dari panel fotovoltaik melalui penambahan sistem penyimpanan energi (baterai). Dengan konfigurasi tersebut, sistem diharapkan dapat beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan terhadap jaringan PLN. Oleh karena itu, penggunaan sumber PLN dalam penelitian ini hanya bersifat sementara pada tahap pengujian, sedangkan implementasi aktual dirancang berbasis energi terbarukan secara penuh.

Tegangan tersebut kemudian disuplai ke *mikrokontroler* ESP8266 yang berperan sebagai pusat pengendali sistem. Untuk mendukung pengoperasian aktuator, digunakan catu daya dengan keluaran 5 volt yang sesuai dengan kebutuhan tegangan motor servo dan *piezoelectric buzzer*.

Untuk memperjelas hubungan antar komponen secara elektrik, ditambahkan skematik rangkaian sistem yang menggambarkan koneksi antara NodeMCU ESP8266 dengan sensor PIR, sensor hujan, sensor debu GP2Y1010AU0F, motor servo, dan piezoelectric buzzer. Pada skematik tersebut, seluruh

sensor terhubung pada pin input analog dan digital mikrokontroler, sedangkan aktuator dikendalikan melalui pin output PWM. Sistem menggunakan catu daya 5V DC yang didistribusikan ke seluruh komponen sesuai spesifikasi masing-masing. Skematik ini memberikan gambaran detail mengenai arsitektur sistem secara keseluruhan.



Gambar 1. Skematik Rangkaian

Modul pengusir burung menggunakan *piezoelectric buzzer* yang diaktifkan berdasarkan masukan dari sensor pendeteksi keberadaan burung. Sementara itu, modul pembersih debu otomatis bekerja berdasarkan masukan dari sensor hujan yang berfungsi sebagai pemicu pengaktifan motor servo untuk melakukan pembersihan permukaan panel. Seluruh rangkaian dirancang agar mampu bekerja secara otomatis dan responsif terhadap kondisi lingkungan, sehingga sistem proteksi panel fotovoltaik dapat berfungsi secara optimal. Hasil perancangan perangkat keras sistem ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Perancangan Alat

#### A. Pengujian Sensor Pir dan Piezoelectric Buzzer

Pengujian sensor PIR dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan deteksi pergerakan di sekitar panel fotovoltaik sebagai indikator keberadaan burung. Pengujian dilakukan secara simulatif di laboratorium dengan lima kali percobaan berurutan menggunakan simulasi dua burung, dengan durasi pengujian selama  $\pm 30$ –50 menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor PIR menghasilkan *output* logika *HIGH* saat mendeteksi gerakan dan kembali ke *LOW* beberapa detik setelah gerakan berhenti. Hal ini menunjukkan bahwa sensor

PIR bekerja secara responsif dan sesuai dengan fungsinya dalam kondisi pengujian terkendali. Pengujian terdiri dari lima percobaan berturut-turut dengan durasi rata-rata 17–18 detik, dilakukan secara manual dalam kondisi terkendali. Hasilnya menunjukkan bahwa sensor memberikan *output* logika *HIGH* selama mendeteksi gerakan dan kembali ke *LOW* setelah gerakan berhenti beberapa detik, mencerminkan kinerja sistem yang responsif dalam skenario simulasi.

Tabel 1. Pengujian Sensor PIR

| Uji Coba | Sensor PIR | Output Logika | Status Buzzer | Waktu (Detik) | Jarak Uji |
|----------|------------|---------------|---------------|---------------|-----------|
| 1        | Terdeteksi | 1             | Bunyi         | 7.86          | 100 cm    |
|          | Selesai    | 0             | Selesai       | 9.72          |           |
| 2        | Terdeteksi | 1             | Bunyi         | 6.58          | 100 cm    |
|          | Selesai    | 0             | Selesai       | 10.44         |           |
| 3        | Terdeteksi | 1             | Bunyi         | 6.60          | 100 cm    |
|          | Selesai    | 0             | Selesai       | 10.83         |           |
| 4        | Terdeteksi | 1             | Bunyi         | 6.58          | 100 cm    |
|          | Selesai    | 0             | Selesai       | 10.60         |           |
| 5        | Terdeteksi | 1             | Bunyi         | 7.12          | 100 cm    |
|          | Selesai    | 0             | Selesai       | 10.23         |           |

Tabel 1 menyajikan hasil pengujian sensor PIR dalam mendeteksi gerakan di sekitar panel fotovoltaik. Sistem bekerja pada dua kondisi, yaitu logika 1 saat gerakan terdeteksi dan logika 0 saat gerakan berhenti, yang secara otomatis mengaktifkan dan menonaktifkan *buzzer* sebagai pengusir burung. Pengujian dilakukan pada jarak 100 cm dan menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi gerakan secara akurat dan responsif.

Rata-rata waktu aktivasi *buzzer* setelah deteksi gerakan adalah 7,00 detik (6,58–7,86 detik), sedangkan rata-rata waktu *buzzer* berhenti setelah gerakan hilang adalah 10,61 detik (9,72–10,83 detik). Perbedaan waktu respons ini dipengaruhi oleh pengaturan *delay* 5 detik pada *mikrokontroler* untuk mencegah deteksi palsu. Secara umum, sistem menunjukkan performa awal yang baik dan konsisten sebagai sistem proteksi berbasis deteksi gerakan.

#### B. Pengujian Sensor Hujan dan Servo

Pengujian sensor hujan dilakukan untuk mengevaluasi kepekaan sensor dalam mendeteksi keberadaan air pada permukaan panel fotovoltaik sebagai pemicu aktivasi servo *wiper* otomatis. Pengujian dilakukan secara simulatif di laboratorium dengan menempelkan tisu basah pada permukaan sensor untuk merepresentasikan kondisi hujan. Pengujian dilaksanakan dalam satu sesi uji jangka pendek dengan durasi  $\pm 30$ –40 menit pada kondisi terkendali, bertujuan memperoleh data awal terkait sensitivitas sensor dan kecepatan respons sistem.

Tabel 2. Pengujian Sensor Hujan

| Uji Coba | Kondisi Sensor | Output Logika | Status Servo | Waktu (Detik) |
|----------|----------------|---------------|--------------|---------------|
| 1        | Basah          | 0             | Aktif        | 5.63          |
|          | Kering         | 1             | Tidak        | 3.07          |
| 2        | Basah          | 0             | Aktif        | 4.85          |

|   |        |   |       |      |
|---|--------|---|-------|------|
|   | Kering | 1 | Tidak | 2.47 |
| 3 | Basah  | 0 | Aktif | 5.21 |
|   | Kering | 1 | Tidak | 2.59 |
| 4 | Basah  | 0 | Aktif | 5.82 |
|   | Kering | 1 | Tidak | 2.66 |

Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian sensor hujan dalam mendeteksi kondisi kering dan basah serta respons sistem terhadap perubahan tersebut melalui aktivasi motor *servo*. Pengujian dilakukan sebanyak empat kali, masing-masing mencakup dua kondisi. Sensor menghasilkan logika 1 pada kondisi kering (*servo* tidak aktif) dan logika 0 pada kondisi basah (*servo* aktif).

Hasil pengujian menunjukkan sistem merespons perubahan kondisi lingkungan dengan baik. Rata-rata waktu respons keseluruhan sebesar 4,15 detik, dengan waktu respons rata-rata 2,69 detik pada kondisi kering dan 5,37 detik pada kondisi basah. Perbedaan ini menunjukkan bahwa sistem dirancang lebih berhati-hati dalam merespons keberadaan air guna memastikan aktivasi *servo* yang akurat dan aman bagi panel fotovoltaik.

#### C. Pengujian Sistem (Feedback Sensor Pir)

Pengujian sistem feedback dilakukan untuk mengevaluasi kinerja alat dalam mendeteksi pergerakan di sekitar panel fotovoltaik menggunakan sensor PIR sebagai pemicu aktivasi buzzer dan pengiriman notifikasi melalui aplikasi Telegram. Pengujian dilaksanakan secara simulatif dalam satu sesi uji laboratorium dengan durasi  $\pm 30$ –60 menit dan lima kali percobaan berurutan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi gerakan dan memberikan respons terintegrasi, sehingga pengujian ini merepresentasikan tahap awal pengembangan sebelum dilakukan pengujian lanjutan pada kondisi lapangan.



Gambar 3. Notifikasi PIR

Tabel 3. Pengujian Sistem (Feedback PIR)

| Uji Coba | Output Logika |        | Notifikasi (Detik) |
|----------|---------------|--------|--------------------|
|          | PIR           | Buzzer |                    |
| 1        | 1             | -      | 8.34               |
|          | -             | 1      | 7.11               |
| 2        | 1             | -      | 6.67               |
|          | -             | 1      | 7.78               |
| 3        | 1             | -      | 7.42               |
|          | -             | 1      | 7.83               |

|   |   |   |      |
|---|---|---|------|
| 4 | 1 | - | 5.72 |
|   | - | 1 | 7.67 |
| 5 | 1 | - | 6.10 |
|   | - | 1 | 7.96 |

Tabel 3 tersebut menyajikan hasil lima kali percobaan sistem proteksi fotovoltaik berbasis sensor PIR, *buzzer*, dan notifikasi. Sensor PIR menghasilkan logika '1' saat mendeteksi gerakan dan '-' saat tidak ada deteksi, yang diikuti oleh aktivasi *buzzer* serta pengiriman notifikasi. Waktu pengiriman notifikasi tercatat berada pada rentang 5,72–8,34 detik.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem merespons deteksi gerakan dengan cepat. Rata-rata waktu pengiriman notifikasi sebesar 7,26 detik, dengan rata-rata 6,85 detik saat hanya sensor PIR aktif dan 7,67 detik saat *buzzer* juga aktif. Perbedaan ini mengindikasikan adanya tambahan beban sistem akibat aktivasi *buzzer*. Secara keseluruhan, sistem telah bekerja sesuai rancangan dan memenuhi karakteristik respons *real-time* untuk proteksi panel fotovoltaik berbasis IoT.

#### D. Pengujian Sistem (Feedback Sensor Hujan)

Pengujian sistem *feedback* sensor hujan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi perubahan kondisi hujan dan memberikan notifikasi secara *real-time* melalui aplikasi Telegram. Pengujian dilakukan secara simulatif dalam satu sesi laboratorium dengan kondisi hujan dan kering yang dikendalikan. Fokus pengujian meliputi kecepatan respons sensor, ketepatan deteksi, serta kestabilan pengiriman notifikasi. Pengujian berlangsung selama  $\pm 30$ –40 menit dengan empat kali percobaan, dan merepresentasikan tahap awal prototipe sebelum dilakukan pengujian lanjutan pada kondisi lapangan.



Gambar 4. Notifikasi Sensor Hujan

Tabel 4. Pengujian Sistem (Feedback Sensor Hujan)

| Percobaan Ke | Output Logika | Waktu (Detik) |
|--------------|---------------|---------------|
| 1            | 0             | 6.83          |
|              | 1             | 7.30          |
| 2            | 0             | 7.49          |
|              | 1             | 7.89          |
| 3            | 0             | 6.64          |
|              | 1             | 13.26         |
| 4            | 0             | 6.88          |
|              | 1             | 13.12         |

Tabel 4 menyajikan hasil empat kali pengujian sistem *feedback* sensor hujan dalam mendeteksi perubahan kondisi cuaca dan mengirimkan notifikasi melalui aplikasi Telegram. Setiap pengujian mencakup kondisi hujan terdeteksi (logika 0) dan hujan berhenti (logika 1). Rata-rata waktu pengiriman notifikasi saat hujan terdeteksi sebesar 6,96 detik (6,64–7,49 detik), sedangkan saat hujan berhenti mencapai 10,39 detik dengan fluktuasi yang lebih besar.

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem merespons kondisi hujan dengan cepat, sementara respons terhadap kondisi hujan berhenti relatif lebih lambat. Secara keseluruhan, sistem mampu memberikan notifikasi *real-time* secara akurat dan andal untuk mendukung proteksi panel fotovoltaik.

#### E. Pengujian Sensor Debu (GP2Y1010AU0F)

Pengujian sensor debu GP2Y1010AU0F dilakukan untuk mengevaluasi kemampuannya dalam mendeteksi partikel debu yang berpotensi menurunkan kinerja panel fotovoltaik. Sensor menghasilkan tegangan analog yang dibaca melalui *pin* ADC NodeMCU ESP8266 dan dikonversi menjadi konsentrasi debu ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) berdasarkan sensitivitas sensor sebesar  $0,005 \text{ V}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Nilai ADC dikonversi menjadi tegangan aktual, kemudian dikoreksi dengan tegangan *baseline* sebesar 0,90 V untuk memperoleh estimasi konsentrasi debu. Sistem dirancang mengaktifkan motor *servo* secara otomatis ketika konsentrasi debu mencapai  $\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pengujian dilakukan sebanyak lima kali dengan variasi kondisi udara untuk mengevaluasi kinerja sensor.

Tabel 5. Pengujian Sensor Debu (GP2Y1010AU0F)

| No | Kondisi Udara     | Output (V) | Baseline (V) | Selisih (V)   | ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) |
|----|-------------------|------------|--------------|---------------|------------------------------|
| 1  | PV Bersih         | 0.98       | 0.90         | 7.86<br>9.72  | 16<br>(Servo tidak aktif)    |
| 2  | Debu Ringan       | 1.42       | 0.90         | 6.58<br>10.44 | 104<br>(Servo aktif)         |
| 3  | Debu Ringan       | 1.80       | 0.90         | 6.60<br>10.83 | 180<br>(Servo aktif)         |
| 4  | Debu Tebal        | 2.00       | 0.90         | 6.58<br>10.60 | 220<br>(Servo aktif)         |
| 5  | PV Bersih (Ulang) | 0.97       | 0.90         | 7.12<br>10.23 | 14<br>(Servo tidak aktif)    |

Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian sensor debu GP2Y1010AU0F pada lima kondisi untuk mengevaluasi kemampuan sensor dalam mendeteksi akumulasi debu pada panel surya. Sensor menghasilkan tegangan *output* yang dibandingkan dengan tegangan *baseline* sebesar 0,90 V, dan selisih tegangan digunakan untuk menghitung estimasi konsentrasi debu ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi panel bersih, konsentrasi debu berada jauh di bawah ambang batas 100

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  sehingga *servo* tidak aktif. Sebaliknya, pada kondisi debu ringan hingga tebal, konsentrasi debu melebihi ambang batas tersebut dan sistem secara otomatis mengaktifkan motor *servo*. Setelah pembersihan, nilai konsentrasi kembali rendah dan *servo* tidak aktif. Temuan ini menunjukkan bahwa sensor GP2Y1010AU0F mampu membedakan tingkat akumulasi debu secara akurat dan bekerja andal sebagai pemicu sistem pembersih otomatis pada panel fotovoltaik.

#### F. Pengujian Proteksi Fotovoltaik

Pengujian sistem pembersih fotovoltaik dilakukan dalam skala laboratorium dengan pendekatan simulatif pada lingkungan terkontrol. Pengujian menggunakan satu unit panel surya yang ditempatkan pada area terbuka atau semi-terbuka dengan intensitas cahaya relatif stabil.

Pengujian dilaksanakan dalam tiga sesi pada hari yang berbeda, dengan tahapan meliputi pengukuran tegangan panel dalam kondisi bersih, setelah panel dikotori, dan setelah sistem proteksi otomatis bekerja. Sistem pembersih diaktifkan melalui sensor hujan yang mendeteksi keberadaan air dan memicu motor *servo* untuk menggerakkan *wiper* guna membersihkan permukaan panel.

Meskipun dilakukan dalam beberapa sesi, pengujian ini masih bersifat simulatif dan jangka pendek, sehingga hanya merepresentasikan respons awal sistem. Oleh karena itu, diperlukan pengujian lanjutan dalam durasi lebih panjang dan pada skala lapangan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam kondisi lingkungan nyata yang lebih dinamis.

Tabel 6 Pengujian Proteksi Fotovoltaik

| Uji Coba | Kondisi Panel | V (VDC) | $\Delta$ (%) | Pemulihan (VDC) |
|----------|---------------|---------|--------------|-----------------|
| 1        | Normal        | 19,80   | -            | -               |
|          | Abu Kertas    | 19,53   | 1,36         | -               |
|          | Dibersihkan   | 19,73   | -            | 0,20            |
| 2        | Normal        | 20,48   | -            | -               |
|          | Pasir         | 19,74   | 3,61         | -               |
|          | Dibersihkan   | 20,36   | -            | 0,62            |
| 3        | Normal        | 20,60   | -            | -               |
|          | Pasir+Abu     | 19,97   | 3,06         | -               |
|          | Dibersihkan   | 20,39   | -            | 0,42            |

Tabel 6 menunjukkan nomor percobaan pengujian panel surya. Kondisi Panel menunjukkan keadaan permukaan panel saat pengukuran, yaitu bersih, kotor (abu kertas, pasir, atau kombinasi keduanya), dan setelah pembersihan otomatis (Dibersihkan). V (V) merupakan tegangan keluaran panel fotovoltaik yang terukur.  $\Delta$  (%) menyatakan persentase penurunan tegangan dibandingkan kondisi bersih pada percobaan yang sama. Pemulihan (V) menunjukkan besar kenaikan tegangan setelah sistem proteksi otomatis bekerja melalui aktivasi motor *servo* dan *wiper*.

Tabel 6 menyajikan hasil pengujian tegangan panel fotovoltaik pada tiga percobaan dengan kondisi permukaan panel yang berbeda, yaitu bersih, kotor, dan setelah pembersihan otomatis. Pada seluruh percobaan, panel dalam kondisi bersih menghasilkan tegangan tertinggi, menunjukkan bahwa permukaan panel yang bebas kotoran memungkinkan penyerapan radiasi matahari secara optimal.

Ketika permukaan panel dikotori oleh abu kertas, pasir, maupun kombinasi keduanya, terjadi penurunan tegangan sebesar 1,36–3,06% dibandingkan kondisi bersih. Penurunan ini disebabkan oleh terhalangnya sebagian cahaya matahari oleh lapisan kotoran, sehingga menurunkan efisiensi konversi energi listrik. Setelah sistem proteksi otomatis diaktifkan melalui deteksi sensor hujan yang memicu pergerakan motor *servo* dan *wiper*, tegangan panel mengalami pemulihan sebesar 0,20–0,62 V.

Meskipun tegangan setelah pembersihan belum sepenuhnya kembali ke nilai awal, selisih tegangan yang relatif kecil menunjukkan bahwa sistem pembersih otomatis bekerja efektif dalam menjaga kinerja panel mendekati kondisi optimal. Hasil ini menegaskan bahwa sistem proteksi fotovoltaik yang dirancang mampu mengurangi dampak kotoran pada permukaan panel dan berpotensi meningkatkan keandalan operasi sistem PLTS skala kecil hingga menengah.

#### IV. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil merancang dan menguji sistem proteksi panel fotovoltaik berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu bekerja secara otomatis dan terintegrasi. Sistem menunjukkan kinerja yang baik dengan tingkat keberhasilan deteksi gerakan mencapai 100% pada jarak 100 cm, waktu respons sensor PIR rata-rata 7,00 detik, serta waktu pengiriman notifikasi sebesar 7,26 detik. Sensor hujan memiliki waktu respons rata-rata 4,15 detik, sedangkan sensor debu mampu mengaktifkan sistem pembersih secara otomatis pada ambang  $\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pengujian panel fotovoltaik menunjukkan bahwa kotoran menyebabkan penurunan tegangan sebesar 1,36–3,61% dan sistem mampu memulihkan

tegangan sebesar 0,20–0,62 V. Dengan demikian, sistem terbukti efektif dalam menjaga performa panel fotovoltaik dan berpotensi diterapkan pada sistem PLTS skala kecil hingga menengah. Sistem ini berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada implementasi lapangan berbasis energi terbarukan secara mandiri.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nayuan Alamsyah, "Optimalisasi Program 5s Untuk Menekan Jumlah Gangguan Pada Sistem Jaringan Distribusi 20kv," *Jurnal Elektronika dan Teknik Informatika Terapan (JENTIK)*, vol. 1, no. 4, pp. 103–114, 2023, doi: 10.59061/jentik.v1i4.500.
- [2] I. M. A. Nugraha, F. Luthfiani, G. Sotiyaramadhani, M. A. Idrus, K. Tambunan, and M. Samusamu, "Pendampingan Teknis Pemasangan dan Perawatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Desa Tablolong Nusa Tenggara Timur," *Rengganis Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 1, no. 2, pp. 97–107, 2021, doi: 10.29303/rengganis.v1i2.89.
- [3] H. B. Nurjaman and T. Purnama, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 136–142, 2022, doi: 10.21831/jee.v6i2.51617.
- [4] S. Sriyadi, Y. Z. Arief, S. Wilyanti, and R. R. Al-Hakim, "Desain Plts Atap Spklu Di Pln Unit Induk Distribusi Jakarta Raya," *Electro Luceat*, vol. 9, no. 1, pp. 50–63, 2023, doi: 10.32531/jelekn.v9i1.597.
- [5] F. Shaik, S. S. Lingala, and P. Veeraboina, "Correction: Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study," *Sustainable Energy Research*, vol. 12, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s40807-025-00180-0.
- [6] M. Hanif Yuhdi, A. Indah Yuliana, P. Informatika, U. K. A Wahab Hasbullah, and P. Agroekoteknologi, "Rancang Bangun Alat Pengusir Hama Burung Pipit Pada Tanaman Padi Sawah Berbasis WeMos ESP8266," *Exact Papers in Compilation*, vol. 5, no. 4, pp. 40–61, 2023.