

Rancang Bangun Robot Pembersih Panel Surya Menggunakan Metode *Dry Cleaning* Berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC)

Veni Cahyanti¹, Muhammad Muflih Rahman¹, Eko Sulistyo¹, Indra Dwisaputra^{1*}

¹Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

*E-mail : dwisaputra.indra@gmail.com

Received: 9 Januari 2025; Received in revised form: 13 Januari 2025; Accepted: 14 Januari 2025

Abstract

Indonesia has great solar energy potential, but the efficiency of solar panels often decreases due to the accumulation of dust and dirt. This study develops a solar panel cleaning robot with a dry cleaning method based on a fuzzy logic controller. This robot is designed to clean panels automatically without using water or chemicals, using an ESP32 microcontroller and a TCS3200 color sensor, the robot will automatically work with the time set in the system. Tests were carried out on solar panels in dusty and non-dusty conditions. The results showed that the efficiency of solar panels in non-dusty conditions reached 36.17%, while in dusty conditions it dropped to 21.27%. These results emphasize the need for routine cleaning to maintain optimal solar panel performance. The fuzzy logic system on the robot will adjust the cleaning intensity based on the level of dust detected, thus making a significant contribution to maintaining solar panel efficiency. This study offers an environmentally friendly solution and can reduce operational costs related to cleaning solar panels and support the development of more sustainable renewable energy.

Keywords: Dry Cleaning; Microcontroller; Solar Panel; Solar Panel Efficiency; TCS3200 Sensor.

Abstrak

Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar, namun efisiensi panel surya sering menurun akibat akumulasi debu dan kotoran. Penelitian ini mengembangkan robot pembersih panel surya dengan metode *dry cleaning* berbasis *fuzzy logic controller*. Robot ini dirancang untuk membersihkan panel secara otomatis tanpa menggunakan air atau bahan kimia, dengan menggunakan mikrokontroler, ESP32, dan sensor warna TCS3200, robot akan otomatis bekerja dengan waktu yang telah diatur pada sistem. Pengujian dilakukan pada panel surya dalam kondisi berdebu dan tidak berdebu. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi panel surya pada kondisi tidak berdebu mencapai 36,17%, sedangkan pada kondisi berdebu turun hingga 21,27%. Hasil ini menegaskan perlunya pembersihan rutin untuk mempertahankan kinerja optimal panel surya. Sistem *fuzzy logic* pada robot akan menyesuaikan intensitas pembersihan berdasarkan tingkat debu yang terdeteksi, sehingga memberikan kontribusi signifikan dalam mempertahankan efisiensi panel surya. Penelitian ini menawarkan solusi yang ramah lingkungan dan dapat mengurangi biaya operasional terkait pembersihan panel surya dan mendukung pengembangan energi terbarukan yang lebih berkelanjutan.

Kata kunci: Dry Cleaning; Efisiensi Panel Surya; Mikrokontroler; Panel Surya; Sensor TCS3200.

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki peluang yang besar dalam mengembangkan energi matahari sebagai sumber energi terbarukan. Sebagai negara beriklim tropis, Indonesia telah menghasilkan sinar matahari dengan intensitas tertinggi sepanjang tahun. Dibandingkan dengan negara lain, Indonesia memiliki radiasi matahari yang cukup stabil [1]. Pemerintah Indonesia

berkomitmen untuk mencapai target pada tahun 2025-2050.

Salah satu komitmen utama adalah meningkatkan penggunaan energi terbarukan, termasuk energi surya dengan target 23% penggunaan energi terbarukan [2]. Pemerintah memiliki peran penting dalam memanfaatkan energi terbarukan. Oleh karena itu, diperlukan strategi yang tepat untuk memastikan tujuan pemanfaatan energi terbarukan dapat terwujud.

Energi surya adalah sumber energi yang dipilih karena matahari menyediakan dua energi penting bagi kehidupan, yaitu panas dan cahaya. Energi surya menjadi sumber energi terbarukan yang tidak pernah habis jika digunakan dalam jangka panjang. Seiring perkembangan teknologi, manusia mulai mengembangkan panel surya sebagai alat untuk memanfaatkan energi matahari menjadi sumber energi listrik [3]. Panel surya memiliki sel surya yang terdiri dari bahan semikonduktor yang bersifat anti-reflektif. Panel surya menghasilkan energi listrik melalui pengaruh dari intensitas cahaya yang diterima. Panel surya akan menentukan tegangan hasil keluaran panel surya melalui besar kecil satuan watt puncak.

Panel surya adalah bentuk sumber energi listrik alternatif yang dapat dimanfaatkan pada bangunan tempat tinggal dan perusahaan industri yang membutuhkan cukup banyak energi listrik. Keuntungan dari penggunaan panel surya adalah mengurangi ketergantungan dampak polusi dan biaya pemeliharaan yang rendah. Sama seperti perangkat elektronik, panel surya juga mengalami penurunan kinerja seiring bertambahnya usia. Meskipun panel surya memiliki masa pakai yang panjang, efisiensi kinerja panel dapat menurun seiring berjalannya waktu. Salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja panel surya yaitu adanya pengendapan debu dan kotoran. Oleh karena itu, pemeliharaan yang teratur dibutuhkan untuk mengoptimalkan kinerja panel surya.

Pada umumnya panel surya dibersihkan menggunakan metode pembersihan basah yang melibatkan penggunaan air dan bahan kimia. Akan tetapi, metode pembersihan basah ini memiliki kekurangan seperti penggunaan air yang tinggi, mengakibatkan risiko kerusakan, terjadinya korosi pada bagian logam, kerusakan pada koneksi listrik, meninggalkan residu basah yang dapat mengurangi efisiensi panel, berpotensi merusak lingkungan, dan memerlukan biaya operasional yang tinggi bagi beberapa daerah yang mempunyai keterbatasan air.

Mengacu pada permasalahan tersebut ada beberapa penelitian yang merancang alat pembersih panel surya yaitu [4] yang telah berhasil membuat alat pembersih panel surya yang dapat

dikendalikan melalui jarak jauh menggunakan android pada modul WiFi DT-06 dan Bluetooth HC-05. Sistem pada alat ini terdiri dari pengendalian motor sebagai penggerak robot dan roller pembersih, serta sensor sebagai pengaman apabila robot berjalan melewati garis batas pada panel surya. Kemudian penelitian [5] telah berhasil membuat alat pembersih panel surya yang dapat dikontrol secara otomatis dan dapat beroperasi berdasarkan waktu yang telah ditentukan. Penelitian lainnya juga telah membuat alat pembersih panel surya otomatis menggunakan *fuzzy logic controller* [6]. Sistem ini memproses tegangan, arus, dan debu untuk menentukan tindakan pada alat pembersih panel surya. Debu yang terakumulasi akan dibersihkan secara otomatis ketika kondisi memenuhi logika pada sistem *fuzzy* yang telah ditetapkan. Ini memastikan bahwa panel surya tetap bersih dan dapat beroperasi dengan efisiensi yang optimal.

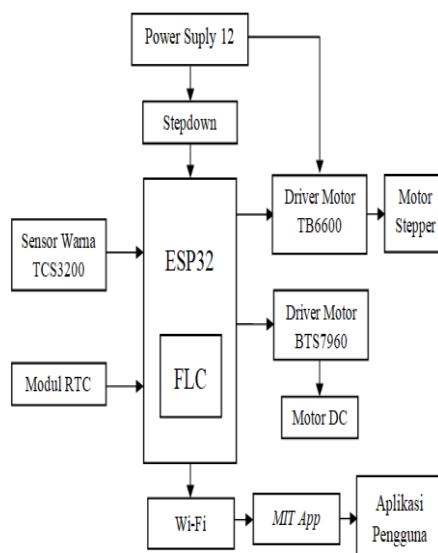
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, peneliti telah memberikan kontribusi pada pemahaman kontrol jarak jauh dan pembersihan otomatis pada alat pembersih panel surya. Penelitian-penelitian ini telah memberikan ide pengembangan alat pembersih panel surya dalam meningkatkan efisiensi kerja panel surya.

Namun, saat ini belum banyak penelitian yang membahas dampak penggunaan air berlebih pada pembersihan panel surya. Metode pembersihan menggunakan air, meskipun efektif juga memiliki kekurangan seperti penggunaan air yang tinggi dan berpotensi dalam membebani sumber daya air, terutama di wilayah dengan keterbatasan air bersih, serta dapat membuat kerusakan komponen panel surya akibat korosi. Oleh karena itu, robot pembersih panel surya dengan metode *dry cleaning* berbasis *fuzzy logic controller* ini menjadi solusi alternatif. Metode ini mengurangi ketergantungan pada penggunaan air dengan biaya pengembangan yang relatif tinggi. Pengembangan ini dapat membantu meningkatkan kinerja panel surya tanpa membebani sumber daya air.

2. METODE PENELITIAN

Sistem robot ini dirancang untuk mengikuti blok diagram pada Gambar 1 yang mencakup berbagai komponen utama. Perancangan sistem robot pembersih dan implementasi komponen utama ini meliputi mikrokontroler ESP32, sensor warna

TCS3200, serta motor DC dan *stepper* untuk penggerak. Sistem ini dirancang agar dapat mendeteksi tingkat kotoran pada panel surya, mengatur jadwal pembersihan secara otomatis, dan melaksanakan pembersihan menggunakan metode *dry cleaning* tanpa air dan bahan kimia.



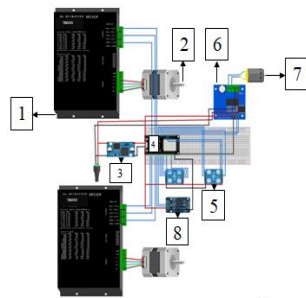
Gambar 1. Blok Diagram Kerja

Diagram tersebut menggambarkan sistem berbasis ESP32 yang berfungsi sebagai mikrokontroler utama yang menyediakan konektivitas Wi-Fi, sehingga pengguna dapat melakukan pengaturan robot secara jarak jauh [7]. Robot ini menerima daya 12V melalui modul stepdown. Kemudian, Sensor warna TCS3200 digunakan untuk mendeteksi tingkat debu atau kotoran pada panel surya dengan mengukur warna RGB [8]. Sementara modul RTC digunakan untuk menukur jadwal pembersihan secara otomatis pada waktu-waktu tertentu, seperti pagi, siang, atau sore hari. Modul RTC menjadi pilihan karena keunggulannya dalam menjadwalkan operasi pada waktu yang tepat [9]. Motor stepper akan dikendalikan oleh driver TB660, dan motor DC dikontrol melalui driver motor BTS7960, keduanya akan diatur oleh ESP32 untuk menggerakkan robot serta mengoperasikan sistem pembersihan dengan presisi yang tinggi. Data dan perintah dikomunikasikan melalui koneksi Wi-Fi ke aplikasi pengguna yang dikembangkan oleh MIT App Inventor, yang membantu pengguna dalam

memantau dan mengontrol sistem secara real-time. Seluruh komponen ini diintegrasikan untuk mendukung operasi robot secara otomatis sesuai dengann logika kontrol yang telah ditetapkan sebelumnya.

2.1. Scematic Hardware Sistem Kontrol

Scematic hardware merupakan representasi yang menggambarkan cara kerja setiap komponen dalam sistem yang dihubungkan secara elektrik. Pada *schematic* ini, *Power Supply* 12V dihubungkan ke modul *stepdown* untuk menyesuaikan tegangan ke level yang sesuai dengan ESP32 dan komponen pendukung. Sensor TCS3200 terhubung langsung ke pin digital ESP32 untuk membaca data warna, sedangkan modul RTC menggunakan jalur komunikasi I2C untuk memberikan data waktu yang akurat. Motor *stepper* dikendalikan melalui sinyal PWM dari ESP32 ke *driver* TB6600, dan motor DC dikontrol dengan sinyal kendali ke driver BTS7960. Modul Wi-Fi ESP32 memastikan koneksi dengan MIT App untuk komunikasi data dengan pengguna secara *real-time*.

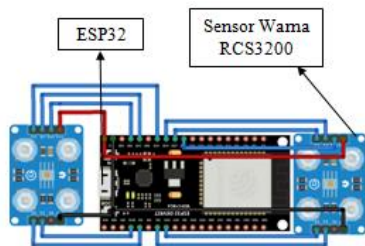


Gambar 2. Wiring Sistem Kontrol Robot Pembersih

2.2. Pengujian Sensor Warna TCS3200

Pengujian sensor warna TCS3200 bertujuan untuk memastikan sensor dapat mendeteksi warna dengan akurat dan mengirimkan data yang sesuai ke mikrokontroler ESP32. Sensor ini bekerja

dengan mengonversi intensitas warna cahaya (merah, hijau, biru) menjadi sinyal frekuensi yang dapat dibaca oleh ESP32. Skema pengkabelan dapat dilihat pada Gambar 3. Sedangkan pemasangan koneksi pin sensor warna dan ESP32 dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 3. Skema Pengkabelan Sensor Warna pada ESP32

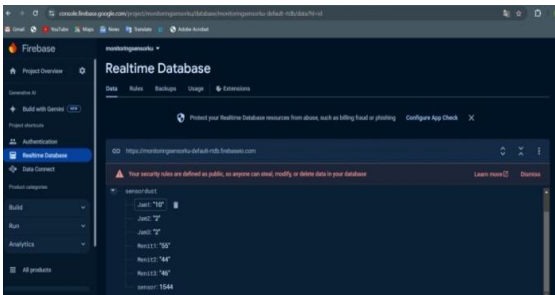
Tabel 1. Tabel koneksi pin sensor TCS3200 dan ESP32

Pin Sensor Warna TCS3200	Pin ESP32
S0	21
S1	19
S2	18
S3	5
OUT	34

2.3. Perancangan *Software Interface* pada *Smartphone*

Perancangan *software interface* pada *smartphone* yang berhubungan dengan monitoring dan kontrol jarak jauh serta otomatisasi robot pembersih panel surya melibatkan pengembangan aplikasi yang memungkinkan pengguna untuk

mengawasi, mengendalikan, dan mengatur operasi robot secara efisien, menggunakan perangkat *smartphone*. Aplikasi ini dapat mengintegrasikan fungsi monitoring secara *real-time*, kontrol manual, serta pengaturan otomatisasi berdasarkan waktu tertentu, dengan tujuan untuk memaksimalkan efisiensi pembersihan panel surya. Tampilan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Tampilan Data yang Disimpan pada *Firebase*

Tampilan data pada gambar 4 adalah platform untuk mengelola *database* yang mendukung sistem robot pembersih panel surya. *Firebase* berbasis *cloud* yang memungkinkan penyimpanan dan sinkronisasi data secara *real-time*, baik

melalui *firebase realtime database* yang menyimpan data dalam format JSON atau *firebase firestore* yang menawarkan struktur dokumen yang fleksibel. Gambar 5 menampilkan tampilan menu.



Gambar 5. Tampilan Menu

Untuk menghubungkan aplikasi MIT *App Inventor* dengan *Firebase*, dalam menu designer perlu ditambahkan komponen *FirebaseDB* yang terletak di menu *Experimental* di sebelah kiri. Komponen ini

digunakan untuk menampilkan data dari sensor pada robot pembersih secara *real-time* ke dalam aplikasi. Pengaturan dapat dilihat pada Gambar 6.

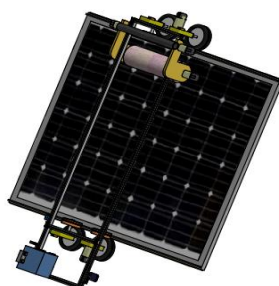


Gambar 6. Pengaturan Waktu Kerja

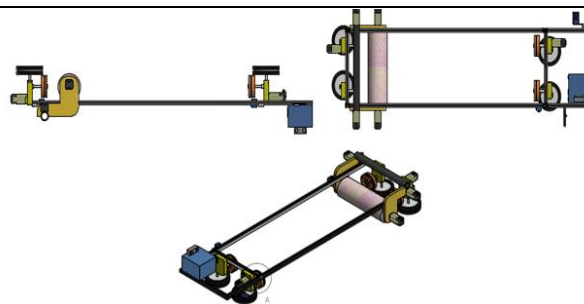
2.4. Perancangan *Hardware Kontruksi* Alat

Tahap perancangan *hardware* secara mekanik ini dilakukan perancangan kontruksi dari robot pembersih panel surya menggunakan metode *dry cleaning* berbasis *fuzzy logic controller*. Rancangan ini dibuat dengan menggunakan aplikasi *FreeCAD*. Rangka robot dirancang menggunakan bahan aluminium profil, yang dipilih karena

sifatnya yang kuat dan ringan. Aluminium profil memiliki ketahanan yang baik sehingga mempermudah pergerakan robot ketika di atas permukaan panel surya. Robot ini dirancang untuk membersihkan panel surya 100 Wp, dengan dimensi panjang 100 cm dan lebar 30 cm. Berikut desain rancangan kontruksi robot pembersih panel surya. Gambar 7 dan 8 adalah rancangannya.



Gambar 7. Rancangan Konstruksi Alat



Gambar 8. Rancangan Robot Tampak Samping, Tampak Atas, dan Tampak Depan

2.5. Perhitungan Efisiensi Panel Surya

Pada *research* ini akan menggunakan panel surya berjenis *Monocrystalline* sebagai bahan uji coba. Penggunaan jenis panel ini didasarkan pada beberapa alasan utama seperti panel *monocrystalline* yang telah dikenal memiliki efisiensi konversi energi mencapai 14 - 20%, memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan jenis panel lainnya, memiliki umur panjang dan mampu

bertahan pada cuaca yang ekstrem dengan kondisi cuaca yang sangat panas, dan panel surya *monocrystalline* ini memiliki permukaan lebih halus serta seragam, sehingga memudahkan dalam pembersihan yang lebih efisien. Akan tetapi, panel ini memiliki kelemahan jika sinar matahari yang didapat kurang maka efisiensi panel surya ini akan menurun [10]. Tabel 2 menunjukkan spesifikasi panel.

Tabel 2. Spesifikasi panel surya *monocrystalline*

No	Parameter	Keterangan
1.	<i>Modul Type</i>	SP-100-P36
2.	<i>Rated Max.Power (Pmax)</i>	100W
3.	<i>Number of Cells</i>	36
4.	<i>Max.System Voltage</i>	700V
5.	<i>Voltage at Pmax (Vmp)</i>	17.6V
5.	<i>Current at Pmax (Imp)</i>	5.69A
6.	<i>Open Circuit Voltage (Voc)</i>	22.6V
7.	<i>Short-Circuit Current (Isc)</i>	6.09A
8.	<i>Dimension (mm)</i>	1020*670*35

Perhitungan efisiensi panel surya sangat diperlukan untuk menganalisis efisiensi panel sebelum dan sesudah dibersihkan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa efektif robot pembersih panel surya dalam meningkatkan efisiensi panel surya [11]. Efisiensi dinyatakan dalam persentase (%) dan menggunakan perhitungan dengan rumus yang dapat dilihat pada persamaan (1).

$$\eta = \frac{P_{out}}{\left(\frac{W}{m^2}\right) \times (m^2)} \times 100 \% \dots \dots \dots (1)$$

Efisiensi panel surya bisa saja berubah akibat beberapa faktor seperti debu, kotoran, daun, dan intensitas cahaya matahari.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini akan menyajikan hasil penelitian serta analisis yang telah dilakukan.

3.1. Deskripsi Alat

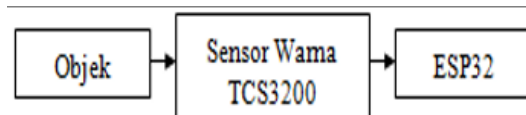
Implementasi rancang bangun robot pembersih panel surya menggunakan metode *dry cleaning* berbasis *Fuzzy Logic Controller* menggabungkan perangkat keras dan lunak untuk sistem pembersihan otomatis. Robot menggunakan motor DC dan *stepper* untuk pergerakan, sensor warna TCS3200 untuk mendeteksi kondisi permukaan, serta *Fuzzy Logic Controller* (FLC) untuk menentukan intensitas pembersihan. Pengaturan jadwal dilakukan melalui aplikasi *MIT App Inventor* dengan modul RTC, dan sistem akan dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 yang mengintegrasikan sensor, jadwal, dan kontrol pada motor.

Metode *dry cleaning* digunakan untuk membersihkan panel surya tanpa menggunakan air atau bahan kimia, dengan fokus pada efisiensi energi dan

perlindungan lingkungan. Implementasi ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja panel surya dengan cara menghilangkan penghalang cahaya akibat debu atau kotoran lainnya, sehingga daya serap cahaya oleh panel dapat dimaksimalkan.

3.2. Hasil Pengujian Sensor Warna TCS3200 dan ESP32

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sensor warna TCS3200 dapat mendeteksi objek seperti debu, daun hijau dan daun kering dengan efektif. Pengujian ini akan mencatat nilai RGB yang terdeteksi oleh sensor. Berikut diagram blok pengujian sensor warna TCS3200. Gambar 9 menunjukkan blok diagramnya.



Gambar 9. Diagram Blok Pengujian Sensor Warna TCS3200

Diagram blok pada Gambar 9 menggambarkan alur pengujian sensor warna TCS3200, di mulai dari objek yang akan dideteksi. Sensor TCS3200 berfungsi untuk membaca warna pada objek. Data kemudian diteruskan ke mikrokontroler ESP32, yang bertugas memproses nilai RGB

untuk menentukan tingkat kototran atau debu. Diagram ini juga menunjukan hubungan antara objek, sensor, dan mikrokontroler dalam memastikan deteksi kotoran berfungsi dengan akurat. Gambar 10 menunjukkan pengujian sensor dan Tabel 3 adalah hasil pengujiannya.



Gambar 10. Pengujian Sensor pada Objek Daun Hijau (a) dan Daun Kering (b)

Tabel 3. Hasil pengujian sensor warna pada objek

No	Objek	R (Red)	G (Green)	B (Blue)	Warna
1.	Daun Kering	178	243	234	Coklat
2.	Daun Hijau	128	192	183	Hijau
3.	Debu	152	178	163	Abu-Abu Terang

Tabel 3 menunjukkan koneksi pin antara sensor TCS3200 dan mikrokontroler ESP32. Berdasarkan hasil pengujian, sensor warna mampu membedakan berbagai objek dengan baik berdasarkan nilai RGB yang terdeteksi.

3.3. Pengujian Robot Bersih

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja robot pembersih panel surya menggunakan metode *dry cleaning* berbasis *Fuzzy Logic Controller*. Pengujian meliputi pengaturan waktu kerja melalui aplikasi *MIT App Inventor* yang terhubung dengan modul RTC, deteksi kondisi permukaan panel oleh sensor TCS3200,

serta pemrosesan data oleh *Fuzzy Logic Controller* untuk menentukan intensitas pembersihan. Selain itu, kinerja motor DC sebagai penggerak dan motor *stepper* untuk kontrol alat pembersih juga diuji. Efisiensi pembersihan dievaluasi dengan membandingkan intensitas cahaya (lux) yang diterima panel sebelum dan sesudah pembersihan, yang kemudian dikonversi ke W/m^2 . Uji lapangan dilakukan pada panel surya berdebu dan tidak berdebu, menunjukkan bahwa robot mampu bekerja otomatis sesuai jadwal, mendeteksi kotoran dengan baik, dan meningkatkan efisiensi panel surya setelah proses pembersihan. Gambar 11 menunjukkan pengujiannya.



Gambar 11. Pengujian Robot Pembersih pada Panel Surya

3.4. Pengambilan Data Intensitas Matahari

Pengambilan data intensitas matahari adalah proses pengukuran jumlah energi cahaya matahari yang mencapai suatu permukaan pada waktu dan lokasi tertentu. Tujuan Pengambilan data intensitas matahari sangat penting dalam pengujian robot

pembersih panel surya dengan metode *Dry Cleaning* berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) karena data ini berhubungan langsung dengan efisiensi energi yang dihasilkan panel surya serta efektivitas proses pembersihan oleh robot. Gambar 12 adalah pengambilan datanya.



Gambar 12. Pengambilan Data pada Intensitas Matahari Menggunakan Lux Meter

Dalam pengambilan data ini dilakukan dalam 6 waktu yang berbeda yaitu pada jam 07.00, 09.00, 11.00, 12.00, 13.00, dan 15.00.

3.5. Hasil Pengujian Alat Keseluruhan

Hasil pengujian menunjukkan robot bekerja sesuai jadwal yang diatur dengan akurasi tinggi. Sensor TCS3200 berhasil mendeteksi debu, daun, dan kotoran

dengan baik, dan *Fuzzy Logic Controller* menentukan intensitas pembersihan secara optimal. Motor DC dan *stepper* bekerja stabil, memastikan pergerakan robot lancar. Pembersihan meningkatkan daya serap cahaya panel surya, terbukti dari peningkatan intensitas cahaya yang diukur setelah pembersihan.

Tabel 4. Pengujian Panel Surya Saat Kondisi Berdebu

Waktu	Arus (I)	Tegangan (V)	Daya Output (W)	Intensitas Cahaya (W/m ²)	Daya Input (W)	Efisiensi (%)
07.00	1.03	12.76	13.14	66	45.10	29.13
09.00	1.23	13.24	16.29	87	59.47	27.39
11.00	1.42	13.37	18.98	92	62.88	30.18
12.00	2.47	13.37	33.04	165	112.76	29.31
13.00	2.34	13.59	31.82	137	93.61	34.00
15.00	1.17	13.29	15.55	107	73.10	21.27

Rancang Bangun Robot Pembersih Panel Surya Menggunakan Metode *Dry Cleaning* Berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) (Veni Cahyanti)

Tabel 5. Pengujian Panel Surya Saat Kondisi Tidak Berdebu

Waktu	Arus (I)	Tegangan (V)	Daya Output (W)	Intensitas Cahaya (W/m ²)	Daya Input (W)	Efisiensi (%)
07.00	1.26	12.24	15.42	66	45.10	34.19
09.00	1.46	13.17	19.22	87	59.47	32.31
11.00	1.70	13.34	22.74	92	62.88	36.17
12.00	2.02	13.34	26.97	165	112.76	23.92
13.00	1.27	13.10	16.66	137	93.61	17.79
15.00	1.27	13.10	16.66	107	73.10	22.80

Tabel di atas menunjukkan hasil pengujian kinerja panel surya dalam dua kondisi: kondisi tidak berdebu dan kondisi berdebu, dengan parameter pengukuran meliputi waktu, arus (A), tegangan (V), daya output (W), intensitas cahaya (W/m²), daya input (W), dan efisiensi (%). Pengukuran dilakukan pada interval waktu tertentu mulai pukul 07.00 hingga 15.00. Nilai arus dan tegangan yang dihasilkan panel surya dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan kondisi kebersihan panel, yang kemudian digunakan untuk menghitung daya output menggunakan rumus pada persamaan (2).

$$P = I \times V \dots \dots \dots (2)$$

Selain itu, intensitas cahaya diukur dalam satuan watt per meter persegi (W/m²) yang mencerminkan kekuatan sinar matahari, dikonversi dari pembacaan lux meter. Daya input dihitung dari perkalian intensitas cahaya dengan luas panel (0,6834 m²), sedangkan efisiensi menunjukkan seberapa efektif panel mengubah energi matahari menjadi energi listrik, dengan menggunakan rumus Efisiensi pada persamaan (3).

$$\eta = \frac{13,14}{66 \left(\frac{W}{m^2} \right) \times 0,6834 (m^2)} \times 100 \% = \frac{13,14}{45,10} \times 100 \% = 29,13 \%$$

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa robot pembersih panel surya menggunakan metode *dry cleaning* berbasis *fuzzy logic controller* berhasil meningkatkan efisiensi panel dari 21, 27% menjadi 36, 17% setelah pembersihan. Sistem otomatis yang dilengkapi dengan MIT App Inventor memungkinkan pengaturan jadwal pembersihan secara *real-time*, memberikan solusi ramah lingkungan dan efisiensi untuk

$$\frac{\text{Daya Output}}{\text{Daya Input}} \times 100 \dots \dots \dots (3)$$

Efisiensi panel juga mengalami penurunan yang cukup tinggi ketika dalam kondisi permukaan panel berdebu. Berikut penjelasan penurunan efisiensi panel surya. Penurunan ini menunjukkan bahwa debu yang menumpuk di permukaan panel surya mengurangi kemampuan panel untuk menyerap cahaya secara efektif, yang secara langsung berdampak pada daya output yang dihasilkan. Dengan kata lain, panel surya yang tidak dibersihkan secara rutin akan kehilangan efektifitas dalam menghasilkan energi listrik. Untuk menilai kinerja panel surya dalam kondisi yang berbeda, efisiensi panel surya dihitung dengan mengacu pada daya keluaran yang dihasilkan oleh panel dan intensitas cahaya yang diterima. Efisiensi panel surya mengukur seberapa efektif panel dalam mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Perhitungan efisiensi panel surya sebagai berikut.

pemeliharaan biaya operasional serta perlindungan lingkungan dengan tidak menggunakan air atau bahan kimia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Manahara, S. Kusuma Putri, I. W. Septa Kencana, S. Ilmu Lingkungan, and J. Pusat, "Tantangan transisi energi terbarukan di Indonesia (Studi kasus PLTS di Kabupaten Cilacap)," *Jimese*, vol. 1, no. 1, pp. 78-92, 2023, [Online].

- Available: <https://journal-iasssf.com/index.php/JIMESEJIMESE>.
- [2] S. Ayu Arsita, G. Eko Saputro, and S. Susanto, "Perkembangan Kebijakan Energi Nasional dan Energi Baru Terbarukan Indonesia," *J. Syntax Transform.*, vol. 2, no. 12, pp. 1779-1788, 2021, doi: 10.46799/jst.v2i12.473.
- [3] Q. adar BakhshBaloch, "Analisis struktur kovariansi indikator terkait kesehatan lansia yang tinggal di rumah, dengan fokus pada kesehatan subjektif," *Title*, vol. 11, no. 1. 2017.
- [4] B. Adi and A. Tanto, "Rancang Bangun Alat Pembersih Panel Surya Menggunakan Outseal Plc Dan Sensor Ir Proximity Yang Terkoneksi Dengan Android Melalui Modul Wifi Dt-06 Dan Modul Bluetooth Hc-05," *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, p. 37, 2022, doi: 10.31000/jte.v6i1.7049.
- [5] J. T. Mesin, P. Negeri, and U. Pandang, "Kontrol Otomatis Pembersih Panel Surya Berbasis Iot Dengan Menggunakan Platform Angga Renaldi," 2023.
- [6] M. S. Afandi, S. Soedibyo, and F. A. Pamuji, "Desain Dan Implementasi Alat Pembersih Panel Surya Portabel Otomatis Menggunakan Fuzzy Controller," 2021, [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/82715/>
- [7] A. ArjunPratikto, "Simulasi Kendali Dan Monitoring Daya Listrik Peralatan Rumah Tangga Berbasis ESP32," *ALINIER J. Artif. Intell. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 38-48, 2022, doi: 10.36040/alinier.v3i1.4855.
- [8] I. Zulkarnain, R. Mukhlis, and A. Badrul, "Implementasi Alat Pendeteksi Warna Benda Menggunakan Fuzzy Logic dengan Sensor TCS3200 Berbasis Arduino," *J. Teknol. Sist. Inf. dan Sist. Komput. TGD*, vol. 2, no. 2, pp. 106-117, 2019.
- [9] S. Samsugi, "Penerapan Penjadwalan Pakan Ikan Hias Molly Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno Dan Sensor Rtc Ds3231," *J. Teknol. dan Sist. Tertanam*, vol. 4, no. 1, 2023, doi: 10.33365/jtst.v4i1.2209.
- [10] D. Darwin, A. Panjaitan, and S. Suwarno, "Analisa pengaruh Intesitas Sinar Matahari Terhadap Daya Keluaran Pada Sel Surya Jenis Monokristal," *J. MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 1, no. 2, pp. 99-106, 2020, doi: 10.53695/jm.v1i2.105.
- [11] Z. Arizal, A. Y. Dewi, A. Effendi, and R. Andari, "Analysis of a 735 kWp On-Grid Solar Power Plant System on the Rooftop of the Main Office of PT . Pertamina Hulu Rokan," vol. 1, no. 3, pp. 93-105, 2025.