EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282

pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

Rancang Bangun Sistem Pembersih Panel Surya Berbasis Arduino Uno dan Analisis Efektivitas Metode Pembersihan Kering dan Basah Terhadap Efisiensi Energi

Erik Agustian Yulanda[*1], Karel Octavianus Bachri[2], Muhamad Jaelani Sidik[3], Agi Tama[4], Joko Tri Susilo[5]

[1,2]Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
[1,2]Jl. Raya Cisauk Lapan, Sampora, Kec. Cisauk, Kab. Tangerang, Banten 15345, Indonesia
[1,3,4,5]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang
[1,3,4,5]Jl. Raya Puspiptek No. 46, Buaran, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15316, Indonesia

[1]dosen02636@unpam.ac.id
[2]karel.bachri@atmajaya.ac.id
[3]j.sidik86@gmail.com
[4]dosen02635@unpam.ac.id
[5]dosen02659@unpam.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

diajukan : 25-11-2024
revisi : 05-01-2025
diterima : 11-05-2025
dipublish : 30-06-2025

ABSTRAK

Penurunan efisiensi panel surya akibat akumulasi debu dan kotoran merupakan permasalahan umum pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), terutama di lingkungan yang berdebu dan lembap. Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk menyediakan sistem pembersihan alternatif yang efektif sekaligus hemat energi. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pembersih panel surya berbasis Arduino Uno yang beroperasi menggunakan dua metode, yaitu pembersihan kering dan pembersihan dengan air. Sistem ini terdiri atas motor stepper Nema 23 untuk pergerakan linier, motor DC 12 V untuk rotasi sikat, pompa air DC 12 V, serta dua limit switch yang berfungsi untuk membalik arah putaran motor stepper. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan, arus, dan daya keluaran panel sebelum dan sesudah pembersihan, serta mengukur konsumsi energi sistem pembersih untuk setiap metode. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pembersihan kering mampu meningkatkan daya panel dari 1,10 W menjadi 1,33 W (peningkatan sebesar 20,91%) dengan konsumsi energi sebesar 0,097 Wh per siklus. Sementara itu, metode pembersihan dengan air meningkatkan daya dari 0,80 W menjadi 1,32 W (peningkatan sebesar 65,00%) dengan konsumsi energi sebesar 0,187 Wh per siklus. Kedua metode menghasilkan perolehan energi bersih positif masing-masing sebesar 0,133 Wh dan 0,333 Wh. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki efisiensi energi yang baik dan berpotensi untuk diimplementasikan sebagai solusi efektif dalam pemeliharaan panel surya.

Kata Kunci: Pembersih Panel Surya; Arduino Uno; Efisiensi Energi; Metode Pembersihan Kering; Metode Pembersihan Basah.

EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

PENDAHULUAN

Energi surya merupakan sumber energi terbarukan yang yang banyak dipilih untuk mendukung transisi energi bersih dan berkelanjutan. Pemanfaatan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indonesia mengalami peningkata seiring dengan peningkatan kebutuhan energi serta kesadaran akan pentingnya mengurangi emisi karbon. Sistem fotovoltaik bekerja dengan mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik, namun performa sistem ini sangat dipengaruhi oleh kebersihan permukaan panel surya. Akumulasi debu, polusi udara, kotoran burung, dan residu lingkungan lainnya dapat menghambat penyerapan cahaya oleh sel surya dan menyebabkan penurunan efisiensi energi yang signifikan (Hameed et al., 2024), (Kasim et al., 2021). Penelitian menunjukkan bahwa lapisan debu dengan ketebalan hanya beberapa mikrometer dapat menurunkan daya keluaran panel hingga 30% (Oufettoul et al., 2025). Oleh sebab itu, perawatan dan pembersihan rutin menjadi langkah penting untuk menjaga stabilitas daya keluaran sistem PLTS dalam jangka panjang (Geetha et al., 2024), (Sy Yi et al., 2025).

Sejumlah metode pembersihan panel surya telah dikembangkan untuk mengatasi masalah tersebut, mulai dari metode manual hingga sistem otomatis berbasis mekanik dan elektronik (Hudedmani et al., 2017). Metode pembersihan kering *(dry cleaning)* seperti penggunaan sikat mekanik dan hembusan udara dinilai hemat energi karena tidak membutuhkan air, namun efektivitas terbatas terhadap jenis kotoran yang menempel kuat (Guha et al., 2011). Sementara itu, metode pembersihan basah *(water cleaning)* dapat menghilangkan kotoran yang lebih keras dan lengket, tetapi membutuhkan tambahan energi serta pengelolaan air yang efisien (Mondal et al., 2018), (Bouzguenda et al., 2023). Beberapa studi menunjukkan bahwa kombinasi kedua metode tersebut dapat memberikan hasil optimal dalam menjaga efisiensi daya panel surya (Castillo-Campos et al., 2024).

Teknologi mikrokontroler seperti Arduino Uno kini banyak digunakan dalam sistem otomasi, termasuk dalam sistem pemeliharaan panel surya (Rizal Wira Kusuma et al., 2020). Mikrokontroler memberikan fleksibilitas dalam pengendalian motor, pompa, sensor, dan aktuator, sehingga memungkinkan pembuatan sistem pembersih panel yang efisien dan ekonomis. Penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pembersihan berbasis Arduino dengan mekanisme penyemprotan otomatis dan kontrol waktu, serta menunjukkan peningkatan daya keluaran setelah pembersihan (A Patil et al., 2024), (Vidhya et al., 2022).

Di Indonesia, penelitian mengenai penerapan energi surya dalam berbagai bidang terus berkembang. Studi oleh (Abdurrahaman et al., 2023) pada Voteteknika membahas aplikasi perancangan PLTS off-grid yang berperan penting dalam mendukung penyediaan energi mandiri di sektor industri kecil. (Ashar Hidayad et al., 2024) menunjukkan bahwa pemanfaatan panel surya di daerah 3T dapat menjadi solusi terhadap keterbatasan

EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

pasokan listrik konvensional. Sementara itu, (Afandi et al., 2024) mengembangkan alat penyemprotan pestisida otomatis menggunakan tenaga surya yang memperlihatkan potensi integrasi energi terbarukan dalam sistem otomasi pertanian. Ketiga penelitian tersebut menegaskan pentingnya pengembangan sistem berbasis energi surya yang efisien, adaptif, dan ramah lingkungan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian bertujuan untuk mengembangkan sistem pembersihan panel surya berbasis Arduino Uno dengan dua metode pembersihan, yaitu *dry cleaning* dan *water cleaning*. Pengujian dilakukan dengan mengukur tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya sebelum dan sesudah proses pembersihan, serta menghitung konsumsi energi sistem pembersih.

METODOLOGI

Penelitian menggunakan pendekatan rancang bangun eksperimental yang bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem pembersih panel surya. Metodologi penelitian terdiri tahapan utama yaitu: (1) analisis kebutuhan sistem, (2) perancangan perangkat keras, (3) perancangan program, (4) integrasi sistem, dan (5) pengujian performa sistem.

A. Analisis Kebutuhan Sistem

Tahapan analisis kebutuhan dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan sistem pembersih panel surya. Analisis kebutuhan mencakup penentuan jenis komponen elektronik, sensor, aktuator, serta komponen pendukung. Hasil analisis kebutuhan perangkat keras disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Kebutuhan Sistem

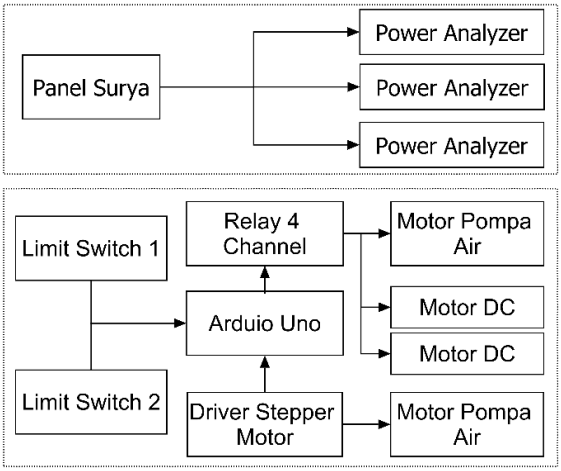
No	Komponen	Spesifikasi	Fungsi Utama
1	Panel Surya	14 se @ 0.5 V	Sumber energi dan objek uji pembersihan
2	Arduino Uno	Atmega 328P	Pengendali utama sistem
3	Relay 4 Channel	5 VDC	Pengatur aliran arus ke aktuator
4	Motor Pompa Air	12 VDC	Mengalirkan air untuk metode *water cleaning*
5	Stepper Motor	Nema 23	Menggerakkan sistem pembersih secara presisi
6	Driver Stepper Motor	DM542	Penguat sinyal kontrol dari Arduino
7	Motor DC	12 VDC, 200 rpm	Menggerakkan sikat pembersih (brush)
	Limit Switch	20 DC, 5 A	Pengendali arah dan Pengaman gerak stepper motor
8	Nylon Brush	Ø 4 inch	Media pembersih permukaan panel
9	Power Supply	24 VDC	Menyediakan daya untuk Stepper Motor
10	Power Supply	12 VDC	Menyediakan daya untuk arduino uno, pompa air dan motor dc
11	Power Analyzer	DC 60 V, 100 A	Mengukur tegangan dan arus panel surya
12	Rail Lnier Shaft	-	Menggerakkan sistem pembersih secara linier
13	Lead Screw	-	Menggerakkan sistem pembersih secara linier
14	Rangka Besi Siku	30 mm	Struktur mekanik sistem pembersih
15	Kabel dan Baut	-	Koneksi listrik dan sambungan mekanik

B. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dimulai dengan penyusunan blok diagram sistem yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem terdiri dai 2 blok diagram utama, yaitu:

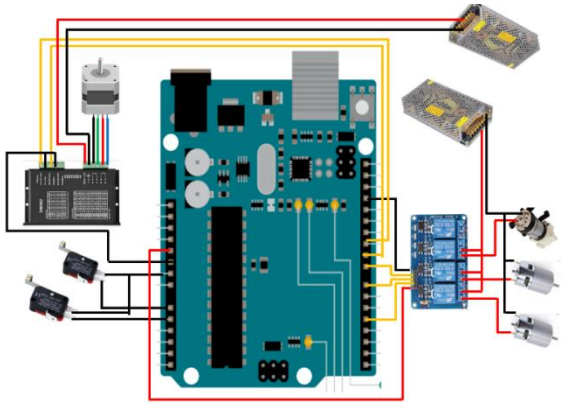
EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

1. Blok Diagram PLTS yang terdiri dari Panel Surya dan *Power Analyzer*.
2. Blok Diagram Pembersih PLTS yang terdiri dari mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat pengendali yang mengatur kerja pompa, motor DC, dan *stepper* motor melalui *relay* dan *driver*.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Selanjutnya, hubungan antar komponen ditunjukkan pada wiring diagram sistem Gambar 2.

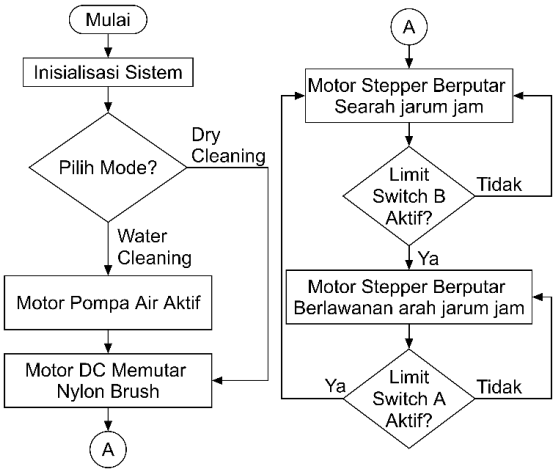


Gambar 2. Wiring Diagram

Wiring diagram pada Gambar 2. menunjukan koneksi pin Arduino ke *relay*, *driver stepper motor DM542*, motor DC, serta jalur daya 12 VDC dan 24 VDC. *Wiring diagram* menjadi acuan utama dalam proses perakitan sistem untuk memastikan koneksi listrik dan kontrol bekerja optimal.

C. Perancangan Program

Program dikembangkan dengan menggunakan bahasa Arduino IDE (C/C++). Pemrograman dibangun berdasarkan alur kerja sistem yang ditunjukan pada diagram alir Gambar 3. Diagram alir kerja sistem menjelaskan langkah-langkah mulai dari inisialisasi sistem, kodisi *switch*, kendali motor pompa air dan motor DC hingga logika arah gerak stepper motor.



Gambar 3. Diagram Alir Kerja Sistem

Perbedaan mode *dry cleaning* dan *water cleaning* yaitu: mode *dry cleaning* hanya mengaktifkan motor dan *brush* tanpa pompa air, sedangkan mode *water cleaning* mengaktifkan pompa air dan motor *brush* untuk pembersihan basah.

D. Integrasi dan Pengujian Performa

Integrasi dilakukan dengan memastikan perangkat keras dan perangkat lunak berinteraksi sesuai rancangan, sehingga keseluruhan sistem dapat menjalankan fungsi pembersihan secara terkoordinasi. Arduino Uno dihubungkan ke semua komponen *input* dan *output* sesuai

EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

dengan *wiring diagram*. Uji fungsi dilakukan secara bertahap, mulai dari pengujian respon motor, pompa, *relay*, hingga verifikasi komunikasi antar komponen untuk memastikan semua berjalan sesuai perintah logika dalam program.

Tahap akhir adalah pengujian performa sistem yang dilakukan dari metode pembersihan, Parameter yang diukur meliputi:

1. Tegangan dan arus keluaran panel surya sebelum dan sesudah pembersihan.
2. Konsumsi energi sistem pembersih selama proses operasi mode *dry cleaning* dan *water cleaning*.

Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk menentukan efektivitas masing-masing metode pembersihan terhadap pemulihan efisiensi energi panel surya, serta membandingkan rasio antara energi yang diperoleh dan energi yang digunakan oleh sistem pembersih.

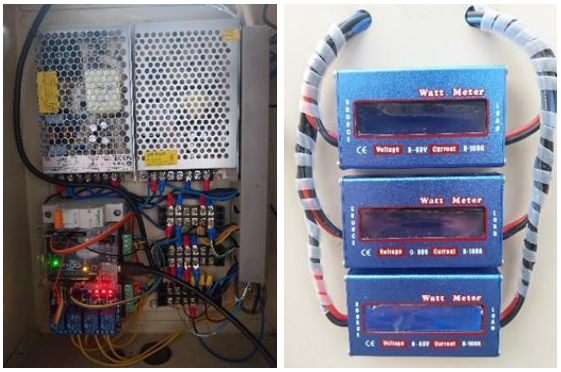
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Rancang Bangun Sistem

Sistem pembersih panel surya otomatis berhasil direalisasikan menggunakan komponen utama Arduino Uno sebagai pusat kendali, motor *stepper* Nema 23 dengan *driver* DM542 untuk menggerakkan *brush* secara linear, motor 12 VDC untuk rotasi sikat, serta pompa air 12 VDC untuk metode *water cleaning*.

Gambar 4. Prototipe Sistem Pembersih Panel Surya

Rangka sistem dibuat menggunakan besi siku 30 mm, sedangkan mekanisme gerak translasi memanfaatkan *lead screw* yang digerakkan oleh motor *stepper*. Dua buah *limit switch* dipasang di ujung lintasan untuk membalik arah putaran motor *stepper* secara otomatis setiap kali salah satu sakelar aktif.



Gambar 5. Bagian Panel Kendali dan Pemantau

B. Hasil Pengujian Mode *Dry Cleaning*

Pengujian mode *dry cleaning* dilakukan sebanyak sepuluh kali dengan kondisi permukaan panel surya yang telah terakumulasi debu ringan.

Tabel 2. Pengujian pada Mode Dry Cleaning

No.	Tegangan (V)		Arus (A)	
	Sebelum	Setelah	Sebelum	Setelah
1	6.86	6.91	0.15	0.19
2	6.85	6.91	0.16	0.19
3	6.86	6.90	0.16	0.19
4	6.87	6.91	0.15	0.19
5	6.85	6.90	0.16	0.20
6	6.86	6.90	0.17	0.20

EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

7	6.86	6.91	0.16	0.19
8	6.85	6.89	0.16	0.19
9	6.87	6.91	0.17	0.20
10	6.86	6.90	0.16	0.19
Rerata	6.86	6.90	0.16	0.19

Tabel 2. memperlihatkan nilai tegangan dan arus panel surya sebelum dan sesudah proses pembersihan, data kemudian diolah sehingga mendapatkan nilai peningkatan daya sebebsar 20.91% yang ditunjukan pada Tabel 3.

Tabel 3. Pengujian Daya pada Mode Dry Cleaning

Parameter	Rerata Sebelum	Rerata Sesudah	Peningkatan (%)
Tegangan (V)	6.86	6.90	0.58%
Arus (A)	0.16	0.19	18.75%
Daya (W)	1.10	1.33	20.91%

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengukur daya yang dibutuhkan oleh sistem pembersih panel surya dalam proses pembersihan dengan metode *dry cleaning*.

Tabel 4. Konsumsi Daya pada Mode *Dry Cleaning*

No.	*Stepper Motor*		Motor DC		Daya Total (W)
	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	
1	24.28	0.22	11.93	0.31	9.04
2	24.21	0.25	11.95	0.29	9.52
3	24.18	0.26	11.97	0.28	9.64
4	24.2	0.25	11.98	0.27	9.28
5	24.23	0.24	11.96	0.28	9.16
6	24.22	0.25	11.98	0.27	9.29
7	24.27	0.22	11.97	0.27	8.57
8	24.21	0.25	11.96	0.28	9.4
9	24.25	0.23	11.98	0.27	8.81
10	24.21	0.25	11.98	0.27	9.29
Rerata	24.23	0.24	11.97	0.28	9.20

Dapat disimpulkan rerata daya yang dibutuhkan adalah 9.20 W dan berdasarkan observasi rerata waktu yang dibutuhkan agar panel surya menjadi bersih adalah 38 detik. Rerata konsumsi energi oleh sistem pembersih (motor DC dan *stepper*) adalah:

$$E_{konsumsi} = P_{total}\ x\ t$$
$$E_{konsumsi} = 9.20\ x\ \frac{38}{3600}$$
$$E_{konsumsi} = 0.097\ Wh$$

Jika peningkatan daya keluaran panel surya dikonversi ke bentuk energi listrik selama satu jam operasi, maka energi bersih *(net gain energy)* sebagai berikut:

$$E_{net} = (P_{Setelah} - P_{Sebelum}) - E_{konsumsi}$$
$$E_{net} = (1.33 - 1.10) - 0.097$$
$$E_{net} = 0.133\ Wh$$

Dapat disimpulkan bahwa mode *dry cleaning* memberikan peningkatan energi bersih positif sebesar 0,133 Wh.

C. Hasil Pengujian Mode *Water Cleaning*

Pengujian mode *water cleaning* juga dilakukan sebanyak sepuluh kali dengan kondisi permukaan panel surya yang telah terakumulasi debu ringan.

Tabel 5. Pengujian pada Mode *Water Cleaning*

No.	Tegangan (V)		Arus (A)	
	Sebelum	Setelah	Sebelum	Setelah
1	6.64	7.02	0.12	0.19
2	6.63	6.9	0.13	0.19
3	6.65	6.93	0.12	0.19
4	6.64	6.92	0.12	0.20
5	6.63	6.96	0.13	0.20
6	6.63	6.87	0.13	0.19
7	6.65	6.94	0.12	0.19
8	6.63	6.91	0.13	0.20
9	6.64	6.97	0.12	0.19
10	6.65	6.90	0.12	0.20
Rerata	6.64	6.93	0.12	0.19

Tabel 5. memperlihatkan nilai tegangan dan arus panel surya sebelum dan sesudah proses pembersihan, data kemudian diolah sehingga mendapatkan nilai peningkatan daya sebebsar 65.00% yang ditunjukan pada Tabel 6.

EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

Tabel 6. Pengujian Daya pada Mode *Dry Cleaning*

Parameter	Rerata Sebelum	Rerata Sesudah	Peningkatan (%)
Tegangan (V)	6.64	6.93	4.37%
Arus (A)	0.12	0.19	58.33%
Daya (W)	0.80	1.32	65.00%

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengukur daya yang dibutuhkan oleh sistem pembersih panel surya dalam pembersihan dengan metode *water cleaning*.

Tabel 7. Konsumsi Daya pada Mode *Water Cleaning*

***Stepper* Motor**		**Motor DC**		**Pompa Air**	
Tegangan (V)	**Arus (A)**	**Tegangan (V)**	**Arus (A)**	**Tegangan (V)**	**Arus (A)**
24.23	0.28	11.93	0.72	11.94	0.35
24.22	0.29	11.91	0.72	11.96	0.41
24.20	0.30	11.96	0.7	11.93	0.40
24.25	0.27	11.97	0.7	11.90	0.38
24.21	0.29	11.95	0.71	11.97	0.39
24.21	0.29	11.93	0.72	11.90	0.40
24.26	0.25	11.95	0.71	11.95	0.41
24.21	0.29	11.97	0.7	11.90	0.41
24.24	0.23	11.95	0.71	11.93	0.38
24.26	0.25	11.96	0.71	11.91	0.36
24.229	0.27	11.95	0.71	11.929	0.39

Pada Tabel 7. dapat disimpulkan Rerata daya yang dibutuhkan adalah 19.76 W dan berdasarkan observasi rerata waktu yang dibutuhkan agar panel surya menjadi bersih adalah 34 detik dan membutuhkan 2.1 L air.

Rerata konsumsi energi oleh sistem pembersih (motor DC + stepper motor + pompa air) adalah:

$$E_{konsumsi} = P_{total}\ x\ t$$
$$E_{konsumsi} = 19.76\ x\ \frac{34}{3600}$$
$$E_{konsumsi} = 0.187\ Wh$$

Dengan demikian, jika peningkatan daya keluaran panel surya dikonversi ke bentuk energi listrik selama satu jam operasi, maka energi bersih *(net gain energy)* dapat dihitung sebagai berikut:

$$E_{net} = 0.333\ Wh$$

Dapat disimpulkan metode *water cleaning* memberikan peningkatan energi bersih lebih besar dibandingkan *dry cleaning*, walaupun membutuhkan energi sistem lebih tinggi.

Hasil penelitian ini selaras dengan temuan (Hameed et al., 2024) dan (Kasim et al., 2021), yang melaporkan bahwa penghilangan debu secara teratur dapat meningkatkan efisiensi panel surya hingga 20–60 %.

Metode water cleaning lebih unggul karena proses pembilasan mampu mengurangi hambatan cahaya dan resistansi permukaan, sehingga foton yang diterima sel surya meningkat signifikan. Namun, konsumsi energi sistem pembersih harus tetap dipertimbangkan agar tidak mengurangi keuntungan energi bersih.

KESIMPULAN

Penelitian merancang dan mengimplementasikan sistem pembersih panel surya berbasis mikrokontroler Arduino Uno dengan dua mode operasi, yaitu *dry cleaning* dan *water cleaning* dapat disimpulkan yaitu:

1. Pengujian menunjukkan bahwa kedua metode pembersihan meningkatkan efisiensi energi keluaran panel surya secara signifikan dibandingkan kondisi sebelum pembersihan.
2. Mode *dry cleaning* menghasilkan peningkatan daya rata-rata dari 1.10 W menjadi 1.33 W, atau naik sebesar

EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

20.91%, dengan konsumsi energi sistem pembersih sebesar 0.097 Wh per siklus.

3. Pada mode *water cleaning*, daya meningkat dari 0.80 W menjadi 1.32 W, atau naik sebesar 65.00%, dengan konsumsi energi sistem sebesar 0.187 Wh per siklus.
4. jika dianalisis untuk satu jam periode manfaat pembersihan maka kedua mode menghasilkan energi bersih positif, dengan *net gain* masing-masing sebesar 0.133 Wh *(dry cleaning)* dan 0.333 Wh *(water cleaning)*.
5. Metode *dry cleaning* lebih efisien dari sisi konsumsi daya dan cocok untuk kondisi debu ringan, sedangkan *water cleaning* memberikan peningkatan efisiensi tertinggi untuk kondisi panel yang kotor berat.
6. Rancangan dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan sensor pendeteksi debu, kelembapan dan intensitas cahaya untuk menentukan waktu pembersihan otomatis, serta evaluasi jangka panjang terhadap durasi efektif periode manfaat pembersihan (T) pada berbagai kondisi lingkungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terima kasih Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Pamulang atas dukungan fasilitas laboratorium dan sumber daya yang mendukung penelitian. Apresiasi juga diberikan kepada rekan-rekan dosen dan laboran yang telah memberikan bantuan teknis selama proses perancangan dan pengujian sistem pembersih panel surya otomatis. Penulis berharap hasil penelitian dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi energi terbarukan dan peningkatan efisiensi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di lingkungan akademik maupun industri.

DAFTAR PUSTAKA

A Patil, S., R Patil, A., Chougule, V. N., & Sanamdikar, S. T. (2024). Design and Analysis of Automated Solar Panel Cleaning System. *Current World Environment*, *18*(3), 1032–1045. https://doi.org/10.12944/CWE.18.3.11

Abdurrahaman, M., Nurcipto, D., & Jehan Tamamy, A. (2023). Aplikasi Perancangan PLTS Off Grid pada Website PT. Sogy Energy Indonesia. *Voteteknika (Vocational Teknik Elektronika Dan Informatika)*, *11*(4), 377. https://doi.org/10.24036/VOTETEKNIKA.V11I4.122517

Afandi, R. A., Ikhwanul Attar, S., Aditia, A., Achmad, M. H., & Alfi, I. (2024). Rancang Bangun Alat Penyemprotan Pestisida Organik Dalam Perkebunan Cabai Menggunakan Tenaga Surya. *Voteteknika (Vocational Teknik Elektronika Dan Informatika)*, *12*(4), 513. https://doi.org/10.24036/VOTETEKNIKA.V12I4.131140

Ashar Hidayad, A., Wrahatnolo, T., & Mei Dini Damayanti, A. (2024). Dampak Pemanfaatan Panel Surya di Daerah 3T sebagai Solusi Keterbatasan Energi Listrik. *Voteteknika (Vocational Teknik Elektronika Dan Informatika)*, *12*(4), 459. https://doi.org/10.24036/VOTETEKNIKA.V12I4.131155

Bouzguenda, M., Bashmail, B., Al-Khaldi, M. B. Y., Al-Jafar, N., Al-Jasim, S., & Al Aqil, M. A. (2023). Design of an automated cleaning system for solar panels. *Materials Research Proceedings*, *31*, 408–414. https://doi.org/10.21741/9781644902592-42

Castillo-Campos, N. A., Escobedo-Márquez,

EPIC (Journal of Electrical Power, Instrumentation and Control)
Teknik Elektro – Universitas Pamulang
Vol. 8, No. 1, Bulan Juni, Tahun 2025, Hal 23-32
http://openjournal.unpam.ac.id/index.php/jit
DOI: 10.32493/epic.v8i1.58282
pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

D. L., Álvarez-Macías, C., Loera-Palomo, R., & Esmeralda-Gómez, A. G. (2024). Comparative efficiency analysis of photovoltaic module under wet and dry cleaning. *2024 IEEE PES Generation, Transmission and Distribution Latin America Conference and Industrial Exposition, GTDLA 2024*. https://doi.org/10.1109/GTDLA61236.2024.10913577

Geetha, A., Usha, S., Santhakumar, J., Palanisamy, R., Sarawagi, R., & Singh, A. (2024). Solar Panel Self-Cleaning Mechanisms and Its Effect on the Economic and Environmental Sustainability. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, *2024*(1). https://doi.org/10.1155/2024/7726716

Guha, A., Barron, R. M., & Balachandar, R. (2011). An experimental and numerical study of water jet cleaning process. *Journal of Materials Processing Technology*, *211*(4), 610–618. https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2010.11.017

Hameed, D., Ditta, A., Bajwa, M. W., Ullah, S., Mujtaba, M. A., Fouad, Y., Kalam, M. A., & Soudagar, M. E. M. (2024). Evaluation of self-cleaning mechanisms for improving performance of roof-mounted solar PV panels: A comparative study. *PLOS ONE*, *19*(10), e0309115. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0309115

Hudedmani, M. G., Joshi, G., Umayal, R. M., & Revankar, A. (2017). A Comparative Study of Dust Cleaning Methods for the Solar PV Panels. *Advanced Journal of Graduate Research*, *1*(1), 24–29. https://doi.org/10.21467/AJGR.1.1.24-29

Kasim, N. K., Obaid, N. M., Abood, H. G., Mahdi, R. A., & Humada, A. M. (2021). Experimental study for the effect of dust cleaning on the performance of grid-tied photovoltaic solar systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, *11*(1), 74–83. https://doi.org/10.11591/IJECE.V11I1.PP74-83

Mondal, S., Mondal, A. K., Sharma, A., Devalla, V., Rana, S., Kumar, S., & Pandey, J. K. (2018). An overview of cleaning and prevention processes for enhancing efficiency of solar photovoltaic panels. *Current Science*, *115*(6), 1065–1077. https://doi.org/10.18520/CS/V115/I6/1065-1077

Oufettoul, H., Oubraik, O., Ait Abdelmoula, I., Motahhir, S., & EL Majid, B. (2025). A novel solar panel cleaning system for improved efficiency. *Unconventional Resources*, *8*, 100249. https://doi.org/10.1016/J.UNCRES.2025.100249

Rizal Wira Kusuma, M., Apriakar, E., Teknik Elektro, J., Teknik, F., & Negeri Semarang, U. (2020). Rancang Bangun Sistem Pembersih Otomatis Pada Solar Panel Menggunakan Wiper Berbasis Mikrokontroler. *Techné : Jurnal Ilmiah Elektroteknika*, *19*(1), 23–32. https://doi.org/10.31358/TECHNE.V19I01.220

Sy Yi, S., Aiman Mohamad Rafie, M., Aliff Hafeez Azman, M., Aboubakr Hasan Mousay, K., John Lim Meng Siang, A., Azfar Azri, M., Abdul Talib Mat Yusoh, M., Tun Hussein Onn Malaysia, U., Pahat, B., Kencana Sdn Bhd, G., & Alam, S. (2025). Smart Dust Detection and Automated Cleaning for Photovoltaic Systems in Hydroponic Farming Applications. *Multidisciplinary Applied Research and Innovation*, *6*(2), 96–103. https://doi.org/10.30880/mari.2025.06.02.011

Vidhya, H., Akshaya, U., Keerthana, M. G.,

pISSN 2615-0646
eISSN 2614-8595

& Dhivyanandhini, T. (2022). IoT based Solar Technology Monitoring and Cleaning System. *International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems, ICACRS 2022 - Proceedings*. https://doi.org/10.1109/ICACRS55517.2022.10029254