MeKanik, Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Mesin *Vol.19, No.2 November 2026*
e-ISSN: 3046-8272, p-ISSN: 1979-0708 **(Hal: 56-66)**
Alamat Redaksi : Politeknik Negeri Samarinda, Jurusan Teknik Mesin, Jl.Ciptomangunkusumo Kampus Gg.Lipan Samarinda Kalimantan Timur

ANALISIS EFISIENSI SISTEM PANEL SURYA 160 WP MENGGUNAKAN BATERAI LiFePO₄ DENGAN FITUR PEMBERSIH PANEL OTOMATIS

Efficiency Analysis of a 160 WP Solar Panel System Using a LiFePO₄ Battery with an Automatic Panel Cleaning Feature

Simon Petrus[1] , Merpatih[2] , Mimin Rihotimawati[3], Galang Bara Pratama Putra[4]

[1,2,3] Dosen Jurusan Teknik Mesin, Prodi Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda,
[4]Mahasiswa, Prodi Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Negeri Samarinda,
Jl.Dr.Ciptomangunkusumo Kampus Gunung Lipan, Samarinda Seberang, Kota Samarinda
e-mail: [1]simonpetrus@polnes.ac.id , [2]merpatih@polnes.ac.id , [2]miminr@polnes.ac.id,
[3]gilangbp_p635@gmail.com

Info Artikel

Diterima: 21/09/2026
Diterima dalam bentuk revisi: 19/10/2026
Diterima/publikasi: 17/11/2026

Kata Kunci
Panel surya 160 Wp, baterai LiFePO₄, pembersih panel otomatis, efisiensi PLTS, daya keluaran

Abstrak

Debu yang menempel pada permukaan panel dan penyimpan energi yang boros sama-sama menggerus kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penelitian ini menguji sistem panel surya monocrystalline 160 Wp dengan baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) rakitan 12,8 V 100 Ah dan pembersih panel otomatis di SMK Diponegoro Samboja, Kalimantan Timur. Tegangan dan arus dicatat setiap jam pukul 09.00 hingga 16.00 WITA pada tiga kondisi, yaitu debu tipis, debu tebal, dan panel setelah dibersihkan. Daya keluaran panel bersih mencapai 47,81 W, dibandingkan 28,26 W pada debu tipis dan 24,91 W pada debu tebal, atau naik 69,18% dan 91,93%. Efisiensi hasil hitung berturut-turut 6,05%, 3,58%, dan 3,15% dengan iradiasi diasumsikan 1000 W/m². Tegangan baterai LiFePO₄ turun 0,21 V selama 180 menit pengosongan, sedangkan data pembanding VRLA 65 Ah turun 0,74 V. Energi efektif baterai 960 Wh menyisakan 359,57 Wh setelah beban lampu 50 W selama 12 jam dan dua siklus pembersihan.

Abstract

Dust on the panel surface and a wasteful energy store both erode the performance of a solar power plant. This study tested a 160 Wp monocrystalline solar panel system with a self-assembled 12.8 V 100 Ah Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) battery and an automatic panel cleaner at SMK Diponegoro Samboja, East Kalimantan. Voltage and current were recorded hourly from 09.00 to 16.00 WITA under three conditions: light dust, heavy dust, and after cleaning. The cleaned panel delivered 47.81 W, against 28.26 W with light dust and 24.91 W with heavy dust, increases of 69.18% and 91.93%. Calculated efficiencies were 6.05%, 3.58%, and 3.15%, with irradiance assumed at 1000 W/m². The LiFePO₄ battery voltage dropped 0.21 V over 180 minutes of discharge, whereas the VRLA 65 Ah reference data dropped 0.74 V. The 960 Wh effective battery energy left 359.57 Wh after a 50 W lamp load for 12 hours and two cleaning cycles.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi surya melalui sistem fotovoltaik (photovoltaic, PV) menjadi salah satu pilihan penyediaan listrik terdesentralisasi, termasuk pada instalasi berkapasitas kecil yang memerlukan penyimpanan energi. Akan tetapi, keluaran listrik dari modul PV tidak hanya dipengaruhi spesifikasi daya puncaknya, melainkan juga kondisi operasi

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

dan pemeliharaan selama digunakan. Abdulla et al. [1] mengidentifikasi pemantauan kondisi, perawatan preventif, dan pengendalian rugi-rugi sebagai bagian penting pengelolaan kinerja sistem PV. Tinjauan sistematis Parsay et al. [2] menunjukkan bahwa kontaminasi permukaan modul merupakan persoalan yang mendorong pengembangan teknik deteksi dan pembersihan yang lebih adaptif. Kondisi tersebut menjadikan evaluasi panel, sistem pembersih, dan penyimpanan energi sebagai satu kesatuan yang relevan untuk aplikasi PV mandiri.

Salah satu penyebab penurunan penerimaan radiasi pada permukaan PV adalah akumulasi debu atau soiling. Partikel yang menutupi kaca modul mengurangi radiasi yang diteruskan ke sel surya; pada distribusi yang tidak merata, dampaknya juga dapat berbeda antarsel dan antarbagian modul. Melalui eksperimen, Alkharusi et al. [3] menunjukkan bahwa soiling tidak seragam dapat memicu penurunan daya dan perubahan temperatur lokal. Micheli et al. [4] selanjutnya mengkaji distribusi soiling yang tidak seragam pada instalasi PV skala utilitas beserta pendekatan mitigasinya. Walaupun karakteristik instalasi kecil dan besar berbeda, kedua penelitian tersebut memperlihatkan bahwa tingkat serta pola pengotoran perlu diperhitungkan ketika menilai perubahan kinerja modul.

Besarnya pengaruh debu tidak dapat dipisahkan dari kondisi pengukuran. Fernández-Solas et al. [5] menggunakan pendekatan analitis untuk memperkirakan kerugian akibat soiling dengan mempertimbangkan parameter pengoperasian dan karakteristik modul. Agbogla et al. [6] juga menekankan kebutuhan metode estimasi soiling yang andal di tengah variasi cuaca dan keterbatasan data pemantauan. Secara metodologis, perubahan daya sebelum dan sesudah pembersihan perlu diperbandingkan pada kondisi iradiasi dan temperatur modul yang sebanding, atau dinormalisasi terhadap keduanya. Oleh karena itu, besaran daya keluaran, energi listrik, dan efisiensi konversi harus didefinisikan secara terpisah agar pengaruh debu tidak tercampur dengan fluktuasi masukan energi matahari.

Teknologi penanganan soiling mencakup pembersihan manual, penyemprotan air, penyapuan mekanis, robot bergerak, serta lapisan pelindung permukaan. Liu et al. [7] merangkum mekanisme pembentukan kotoran dan metode pembersihannya, termasuk keterbatasan masing-masing pendekatan. Gandomzadeh et al. [8] mengkaji strategi mitigasi berdasarkan berbagai pertimbangan teknis dan operasional, sementara Shahzad et al. [9] mengulas perkembangan teknik pembersihan mutakhir dan dampaknya terhadap kinerja panel. Keseluruhan kajian tersebut menunjukkan bahwa pemilihan mekanisme tidak dapat hanya didasarkan pada kemampuan membersihkan debu, tetapi juga pada konsumsi air, kebutuhan energi tambahan, biaya, dan kesesuaian dengan skala sistem yang dilayani.

Pendekatan pembersihan berbasis air telah diuji untuk mengembalikan keluaran listrik modul yang terpapar polusi. Umar et al. [10] mengembangkan sistem pembersih otomatis berbasis air pada modul PV terintegrasi bangunan dan mengevaluasi manfaatnya pada kondisi lingkungan berdebu. Pada pengujian lapangan di Oman, Kazem et al. [11] membahas perubahan kinerja PV akibat akumulasi debu serta pembersihan permukaan. Tanveer et al. [12] kemudian menilai mekanisme pembersih otomatis dengan daur ulang air melalui pengukuran kinerja dan pertimbangan ekonomi. Literatur ini menegaskan bahwa efektivitas pembersihan perlu dinilai berdasarkan pemulihan energi yang diperoleh, sementara sumber daya yang dipakai oleh pompa dan penggerak tetap diperhitungkan.

Selain sistem semprot, otomatisasi dapat dilakukan dengan perangkat mekanis yang bergerak sepanjang permukaan modul. Mousavi dan Farahani [13] merancang robot pembersih berbasis hisapan untuk permukaan rangkaian PV, sedangkan Swain et al. [14] mengevaluasi prototipe

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

pembersih panel yang dapat beroperasi menggunakan pasokan daya mandiri. Ghafoor et al. [15] mengembangkan pembersih PV dengan sistem kendali berbasis Internet of Things dan menguji dampaknya terhadap kinerja panel. Ketiga pendekatan tersebut menunjukkan perkembangan dari proses pemeliharaan manual menuju pengendalian pembersihan terotomatisasi. Namun, untuk instalasi berdaya kecil, tambahan sensor, aktuator, dan kendali harus dipertimbangkan terhadap energi yang tersedia agar manfaat bersih tetap positif.

Pembersihan alami oleh hujan dan penentuan jadwal perawatan merupakan variabel penting dalam operasi nyata. Norde Santos et al. [16] memadukan eksperimen dengan pemodelan untuk menjelaskan penghilangan kotoran akibat hujan, yang tingkat keberhasilannya bergantung pada kondisi lapangan. Ahmadullah et al. [17] membandingkan berbagai teknik mitigasi untuk menentukan jadwal pembersihan yang mempertimbangkan biaya dan kehilangan energi. Temuan tersebut memberikan alasan untuk mengevaluasi frekuensi operasi pembersih otomatis sebagai persoalan optimasi, bukan sekadar mengaktifkannya sesering mungkin. Pada sistem PV berkapasitas kecil, bahkan energi aktuator yang relatif terbatas tetap perlu dicatat untuk memperoleh neraca energi operasi yang akurat.

Untuk aplikasi off-grid, kontinuitas pasokan listrik selama tidak ada radiasi matahari bergantung pada karakteristik sistem penyimpanan. Baterai lithium iron phosphate ($LiFePO_4$ atau LFP) menjadi salah satu kandidat karena memiliki karakteristik pengoperasian yang berbeda dari baterai timbal-asam. Wieczorek et al. [18] mengidentifikasi mekanisme degradasi baterai valve-regulated lead-acid (VRLA) pada sistem PV mandiri dan mengusulkan hibridisasi dengan LFP sebagai salah satu alternatif. Dalam kajian siklus hidup, Yudhistira et al. [19] membandingkan dampak lingkungan baterai timbal-asam dengan beberapa kimia baterai litium, termasuk LFP. Gupta et al. [20] selanjutnya mengevaluasi pilihan penyimpanan pada sistem energi hibrida melalui perspektif teknis dan ekonomi. Kajian-kajian ini mendukung pentingnya memilih baterai berdasarkan kebutuhan operasi, bukan hanya berdasarkan kapasitas nominal.

Besaran kapasitas baterai yang terpasang belum tentu sama dengan energi yang dapat dimanfaatkan oleh beban. Zamani dan Hamzeh [21] menunjukkan bahwa strategi pengisian dan pembatasan kedalaman pengosongan memengaruhi kebutuhan kapasitas serta degradasi baterai dalam sistem rumah surya off-grid. Shabani et al. [22] turut memperlihatkan bahwa asumsi penuaan baterai dapat mengubah hasil evaluasi teknis-ekonomis sistem PV dengan penyimpanan. Dengan demikian, pemakaian baterai $LiFePO_4$ pada panel 160 Wp sebaiknya dianalisis melalui tegangan dan arus aktual, kondisi pengisian, kebutuhan beban, serta batas operasi sistem manajemen baterai (battery management system, BMS). Aspek tersebut penting ketika sistem pembersih dan beban utama mengambil energi dari unit penyimpanan yang sama.

Kondisi muatan baterai (state of charge, SoC) juga memengaruhi interpretasi hasil pengujian. Kang et al. [23] mempelajari mekanisme penuaan sel $LiFePO_4$ pada tingkat SoC berbeda, sedangkan Ghaeminezhad et al. [24] meninjau pendekatan estimasi SoC sebagai bagian dari strategi pengendalian baterai litium. Pada skala instalasi penyimpanan besar, Zhang et al. [25] mengembangkan estimasi SoC dan kapasitas LFP berdasarkan data operasi nyata. Meskipun skala sistemnya tidak identik dengan panel 160 Wp, prinsip pemisahan antara tegangan terminal, tingkat muatan, kapasitas tersedia, dan efisiensi siklus tetap relevan. Karena itu, pembandingan jenis baterai atau penilaian efisiensi penyimpanan memerlukan kondisi awal dan beban yang setara, bukan sekadar membandingkan penurunan tegangan dari baterai yang berbeda kapasitas.

Selain aspek kinerja listrik, batas sistem perlu ditetapkan ketika menilai

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

keberlanjutan suatu konfigurasi PV dan baterai. Zhu et al. [26] menggunakan analisis siklus hidup pada integrasi PV dan baterai LFP untuk memperlihatkan kontribusi komponen serta umur pakai terhadap dampak lingkungan. Pada pengujian operasional yang lebih sederhana, batas analisis juga menentukan apakah daya yang dinyatakan sebagai keluaran panel, daya pengisian baterai, atau daya yang tersedia pada beban merupakan besaran yang sama. Perhitungan energi bersih harus memperhitungkan rugi-rugi pengendali pengisian dan konsumsi listrik komponen pembersih, sesuai cakupan alat ukur yang benar-benar tersedia. Kejelasan batas ini memungkinkan hasil eksperimen skala kecil dibaca secara lebih dapat dibandingkan dengan kajian sebelumnya.

Literatur mutakhir telah membahas soiling, mekanisme pembersihan, pemilihan jadwal, serta karakteristik baterai sebagai bidang kajian yang berkaitan. Meskipun demikian, pada tingkat prototipe PV berdaya rendah, penilaian perubahan keluaran panel pada beberapa keadaan kebersihan masih perlu dikaitkan secara konsisten dengan pengisian baterai dan penggunaan energi oleh sistem pembersih itu sendiri. Celah penelitian yang dituju di sini bukan klaim bahwa pembersihan otomatis atau penggunaan $LiFePO_4$ merupakan teknologi baru, melainkan pengujian integrasi keduanya dalam satu sistem laboratorium-terapan dengan kondisi pembebanan dan pengotoran yang dijelaskan. Penekanan ini memungkinkan hasil penelitian dinilai sebagai bukti kinerja konfigurasi tertentu tanpa menarik generalisasi yang melampaui cakupan pengukuran.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem PV monokristalin berkapasitas 160 Wp yang dipadukan dengan baterai $LiFePO_4$ 12,8 V 100 Ah dan mekanisme pembersih permukaan otomatis. Pengujian diarahkan pada tiga kondisi yang disiapkan secara eksperimental, yaitu debu tipis, debu tebal, dan permukaan sesudah dibersihkan. Parameter yang dibandingkan meliputi tegangan dan arus pada sisi panel serta pengisian baterai, keluaran daya, estimasi energi yang dihasilkan, dan kebutuhan energi komponen pembersih. Melalui evaluasi tersebut, penelitian diharapkan memberikan gambaran awal mengenai potensi sistem pembersih dalam memulihkan keluaran panel dan batas-batas kinerja sistem penyimpanan untuk aplikasi PV off-grid berkapasitas kecil.

METODE PERANCANGAN

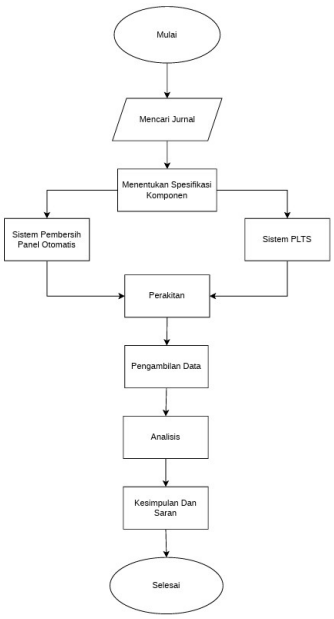
Penelitian ini memakai pendekatan kuantitatif eksperimental. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala kecil dirancang, dirakit, lalu diuji langsung di lapangan, sementara angka hasil pengukurannya dianalisis secara deskriptif. Sorotannya jatuh pada dua hal, yakni baterai Lithium Iron Phosphate ($LiFePO_4$) rakitan sendiri sebagai penyimpan energi dan unit pembersih panel otomatis yang tugasnya menjaga kaca panel tetap bening.

Lokasi dan Waktu Penelitian

Pengujian berlangsung di SMK Diponegoro Samboja, Kecamatan Samboja, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Lahannya terbuka dan kejatuhan sinar matahari langsung hampir sepanjang hari, jadi pembersih panel bisa dicoba dalam kondisi lapangan yang sebenarnya, bukan di ruang yang serba rapi. Seluruh kegiatan memakan waktu 22 Juni hingga 10 Juli 2026 dengan lima tahap: perancangan sistem (22 sampai 25 Juni), perakitan dan pemrograman (26 sampai 30 Juni), uji coba dan kalibrasi (1 sampai 3 Juli), pengambilan data (4 sampai 8 Juli), serta analisis data (9 sampai 10 Juli). Gambar 1 merangkum alurnya.

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

MeKanik, Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Mesin
e-ISSN: 3046-8272, p-ISSN: 1979-0708
Vol.19, No.2 November 2026
(Hal: 56-66)
Alamat Redaksi : Politeknik Negeri Samarinda, Jurusan Teknik Mesin, Jl.Ciptomangunkusumo Kampus Gg.Lipan Samarinda Kalimantan Timur



Gambar 1: Diagram alir penelitian

Diagram dimulai dari pencarian jurnal dan penentuan spesifikasi komponen, lalu bercabang menjadi sistem pembersih panel otomatis dan sistem PLTS. Kedua cabang bertemu di tahap perakitan, disusul pengambilan data, analisis, dan penarikan kesimpulan.

Spesifikasi dan Komponen Sistem

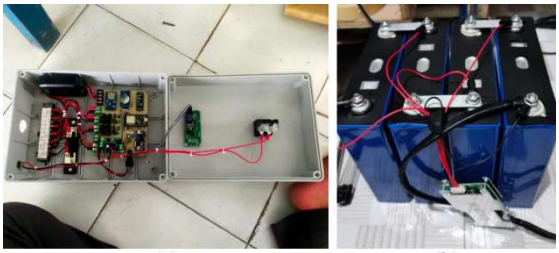
Sistem terdiri atas panel surya monocrystalline 160 Wp, solar charge controller (SCC) tipe MPPT 30 A, baterai $LiFePO_4$, inverter 1000 W, dan beban lampu LED 50 W (AC 220 V). Inverter sengaja dipilih jauh di atas kebutuhan beban supaya lebih aman dan awet. Baterai dirakit dari empat sel $LiFePO_4$ 3,2 V 100 Ah yang disusun seri (4S) lalu dihubungkan ke Battery Management System (BMS) 4S, sehingga tegangan nominalnya 12,8 V pada kapasitas 100 Ah. Di awal pengujian tegangan antarsel ternyata belum seragam, jadi penyeimbangan sel (cell balancing) dilakukan dulu sebelum baterai dipakai. Tabel 1 merangkum komponen yang menentukan kerja sistem, sedangkan daftar lengkap 50 butir alat dan bahan, termasuk baut, kabel, dan bracket.

Tabel 1: Spesifikasi dan komponen utama sistem

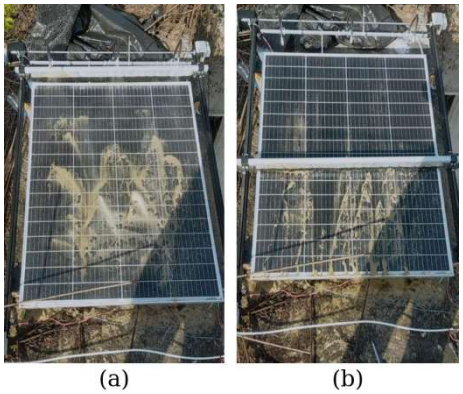
Komponen	Spesifikasi
Panel surya	Monocrystalline 160 Wp, luas 0,7904 m^2, V_{maks} 18,24 V, I_{maks} 8,77 A, V_{oc} 21,80 V, I_{sc} 9,30 A
Baterai	$LiFePO_4$ 12,8 V 100 Ah (4S) dengan BMS 4S
Pengisian	SCC MPPT 30 A, MCB
Beban	Lampu LED 50 W (AC 220 V) lewat inverter 1000 W
Pembersih	Wiper dengan dua motor DC 12 V (0,5 A per motor), pompa air 12 V (65 W), tangki air, tiga nozzle
Kontrol dan data	ESP32, driver motor, relay 1 kanal (2 buah), sensor debu, sensor PZEM-017 DC, RTC DS3231, modul SD card, LCD 16×2 I²C, limit switch (2 buah)
Kemasan	Enclosure box IP65

Sumber: Tugas Akhir penulis [1], Tabel 3 dan Subbab 3.9.

Perakitan dikerjakan bertahap. Komponen kontrol dan pengisian ditata dalam satu kotak, baterai dirakit terpisah, kemudian unit pembersih dipasang pada rangka di sekeliling panel (Gambar 2 dan Gambar 3).



Gambar 2: Perakitan (a) komponen dalam kotak kontrol dan (b) baterai $LiFePO_4$ 4S



Gambar 3: Pengujian pompa dan motor penggerak unit pembersih, (a) sebelum wiper bergerak dan (b) saat wiper menyapu permukaan panel

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data

Pengujian dibagi ke dalam tiga kondisi permukaan panel, yakni debu tipis (level 1), debu tebal (level 2), dan panel setelah dibersihkan sistem otomatis. Debu diberikan secara manual ke permukaan panel, bukan dibiarkan menumpuk sendiri, supaya tingkat kekotorannya bisa diatur. Sebelum data diambil, seluruh komponen dipasang sesuai rancangan lalu dicek satu per satu sampai berfungsi baik. Pada tiap kondisi, tegangan keluaran panel, tegangan masuk panel, tegangan baterai, arus keluaran panel, dan arus masuk ke baterai dicatat setiap jam dari pukul 09.00 hingga 16.00 WITA dengan prosedur yang sama. Selesai dua kondisi berdebu, pembersih otomatis diaktifkan sampai permukaan panel bersih, lalu pengukuran diulang.

Variabel bebasnya adalah jenis baterai dan penggunaan pembersih otomatis, variabel terikatnya efisiensi sistem dan lama keluaran listrik, sedangkan intensitas radiasi, kapasitas panel, dan daya beban diupayakan tetap. Pengambilan data dijadwalkan pada jam yang sama dan saat cuaca relatif cerah. Namun, tiap kondisi diuji pada hari yang berbeda dan radiasi tidak diukur dengan pyranometer, jadi cuaca tetap ikut bermain di dalam angka [1]. Pengujian beban memakai lampu 50 W untuk melihat sanggup tidaknya baterai menyuplai energi.

Metode Analisis Data

Data dikelompokkan per kondisi panel lalu diolah secara deskriptif kuantitatif. Daya masuk panel dihitung dari iradiasi dan luas permukaan:

$$P_{in} = G \times A \quad (1)$$

dengan G diasumsikan 1000 W/m² mengikuti kondisi uji standar (STC) [2] dan A = 1,04 m × 0,76 m = 0,7904 m². Iradiasi tidak diukur di lapangan, jadi nilai ini lebih tepat dibaca sebagai acuan hitung daripada kenyataan. Daya keluaran, efisiensi, dan energi panel dihitung dengan:

$$P_{out} = V \times I \quad (2)$$

$$\eta = P_{out} / P_{in} \times 100\% \quad (3)$$

$$E = P_{out} \times t \quad (4)$$

Rasio daya yang masuk ke baterai terhadap daya keluaran panel dihitung dari $P_{bat} = V_m \times I_m$ dan $P_{panel} = V_k \times I_k$, dengan V_k dan I_k tegangan serta arus keluaran panel, V_m tegangan masuk panel, dan I_m arus masuk ke baterai. Pengaruh pembersihan dinyatakan sebagai persentase peningkatan daya:

$$\Delta P = (P_b - P_k) / P_k \times 100\% \quad (5)$$

dengan P_b daya panel bersih dan P_k daya panel kotor. Untuk neraca energi, kebutuhan beban dihitung dari energi wiper (E_w), pompa (E_p) yang bekerja 10 detik (0,00278 jam) per siklus dan dilakukan dua siklus, serta lampu (E_l). Energi efektif baterai dibatasi pada 80% kapasitas supaya umurnya terjaga, lalu sisanya dihitung dengan:

$$E_{beban} = (E_w + E_p) \times 2 + E_l \quad (6)$$

$$E_{bat} = V \times Ah \times 0,8 \quad (7)$$

$$E_{sisa} = E_{bat} - E_{beban} \quad (8)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

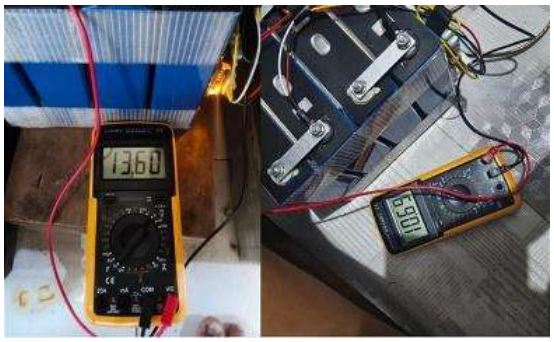
Hasil disajikan dalam tiga rangkaian. Pertama, perilaku tegangan baterai ketika dikosongkan. Kedua, kinerja panel pada tiga kondisi permukaan. Ketiga, neraca energi beban terhadap kapasitas baterai.

Pengosongan Baterai $LiFePO_4$

Baterai rakitan diuji dengan lampu 50 W dan tegangannya dibaca memakai multimeter. Saat penuh tegangannya 13,60 V. Setelah dipakai sampai habis selama 16 jam, tegangannya tinggal 10,69 V, sehingga turun 2,91 V (Gambar 4).

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

MeKanik, Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Mesin
e-ISSN: 3046-8272, p-ISSN: 1979-0708
Vol.19, No.2 November 2026
(Hal: 56-66)
Alamat Redaksi : Politeknik Negeri Samarinda, Jurusan Teknik Mesin, Jl.Ciptomangunkusumo Kampus Gg.Lipan Samarinda Kalimantan Timur

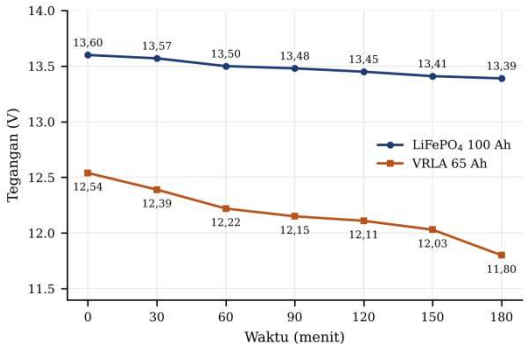


Gambar 4: Tegangan baterai (kiri) saat penuh dan (kanan) setelah 16 jam dibebani lampu 50 W

Untuk mengetahui posisinya, 180 menit pertama dibandingkan dengan data baterai VRLA 65 Ah yang dibebani pompa air 50 W pada penelitian terdahulu, sebagaimana dikutip dalam Tugas Akhir penulis [1]. Kedua deret tegangan ada pada Tabel 2 dan diplot pada Gambar 5.

Tabel 2: Tegangan pengosongan baterai $LiFePO_4$ 100 Ah dan VRLA 65 Ah

Waktu (menit)	$LiFePO_4$ 100 Ah (V)	VRLA 65 Ah (V)
0	13,60	12,54
30	13,57	12,39
60	13,50	12,22
90	13,48	12,15
120	13,45	12,11
150	13,41	12,03
180	13,39	11,80



Gambar 5: Grafik tegangan pengosongan baterai $LiFePO_4$ 100 Ah dan VRLA 65 Ah (digambar ulang dari Tabel 2)

Kurva $LiFePO_4$ nyaris datar. Tegangannya bergeser dari 13,60 V ke 13,39 V, hanya turun 0,21 V atau 1,54%. Kurva VRLA jauh lebih curam, dari 12,54 V ke 11,80 V, turun 0,74 V atau 5,90%, dan lajunya menajam di ujung, yaitu 12,03 V pada menit ke-150 menjadi 11,80 V pada menit ke-180. Singkatnya, $LiFePO_4$ memegang tegangannya lebih rapat.

Meski begitu, perbandingan ini jangan dibaca terlalu jauh. Kedua baterai berbeda kapasitas (100 Ah dan 65 Ah), bebannya berlainan jenis (lampu dan pompa air), dan datanya berasal dari dua penelitian yang memang tidak dirancang untuk saling berhadapan. Tegangan pun hanya cermin tidak langsung dari sisa kapasitas. Menurut penulis, uji pengosongan arus konstan yang mengukur kapasitas (Ah) pada kedua jenis baterai sekaligus akan jauh lebih meyakinkan.

Kinerja Panel Surya pada Tiga Kondisi Permukaan

Ibarat kaca jendela yang dibiarkan berdebu, panel yang tertutup lapisan debu menahan cahaya sebelum sampai ke sel. Kajian Sarver dkk. menyebut soiling sering diabaikan atau diremehkan, padahal pada kasus tertentu dapat membuat instalasi surya tidak layak [27]. Ketiga kondisi yang diuji tampak pada Gambar 6.



Gambar 6: Kondisi permukaan panel, (a) debu tipis (level 1), (b) debu tebal (level 2), dan (c) bersih

Data per jam kondisi debu tebal ada pada Tabel 3 dan kondisi bersih pada Tabel 4. Keduanya memuncak pukul 12.00. Pada jam itu panel berdebu tebal hanya mengalirkan 2,8 A dengan tegangan keluaran 16,25 V, sedangkan panel bersih mengalirkan 5,6 A pada 20,63 V, atau tepat dua kali lipat arusnya. Tegangan baterai pada panel bersih naik dari 13,71 V pukul 09.00 menjadi 14,58 V pukul 16.00, dan pada panel berdebu tebal dari 12,26 V

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

menjadi 13,78 V, pola yang sejalan dengan baterai yang sedang diisi.

Tabel 3: Hasil pengukuran panel surya, debu tebal (level 2)

Pukul	V_k (V)	V_m (V)	V_{bat} (V)	I_k (A)	I_m (A)
09.00	13,47	12,75	12,26	1,3	1,1
10.00	14,32	13,81	12,75	1,9	1,6
11.00	15,46	14,37	13,28	2,2	1,9
12.00	16,25	14,58	13,42	2,8	2,4
13.00	15,87	14,23	13,58	2,5	2,1
14.00	15,56	13,75	13,62	1,8	1,5
15.00	14,86	13,38	13,70	1,2	0,9
16.00	14,34	13,22	13,78	0,8	0,6

Tabel 4: Hasil pengukuran panel surya setelah dibersihkan

Pukul	V_k (V)	V_m (V)	V_{bat} (V)	I_k (A)	I_m (A)
09.00	16,47	13,10	13,71	1,5	1,4
10.00	18,56	13,48	13,84	2,3	2,1
11.00	19,45	14,32	13,93	4,0	3,6
12.00	20,63	15,34	14,22	5,6	5,1
13.00	18,44	14,92	14,36	5,2	4,7
14.00	17,48	14,61	14,45	4,2	3,8
15.00	16,86	13,89	14,51	2,8	2,5
16.00	16,56	12,53	14,58	1,7	1,6

*V_k tegangan keluaran panel, V_m tegangan masuk panel, V_{bat} tegangan baterai, I_k arus keluaran panel, I_m arus masuk ke baterai.

Rata-rata ketiga kondisi dirangkum pada Tabel 5. Arus keluaran panel rata-rata 2,01 A pada debu tipis dan 1,81 A pada debu tebal, lalu melonjak menjadi 3,41 A setelah panel dibersihkan.

Tabel 5: Nilai rata-rata hasil pengukuran

Kondisi	V_k (V)	V_m (V)	V_{bat} (V)	I_k (A)	I_m (A)
Debu tipis	15,36	14,06	13,42	2,01	1,83
Debu tebal	15,02	13,76	13,30	1,81	1,51
Bersih	18,06	14,02	14,20	3,41	3,10

Daya, Efisiensi, dan Energi Panel

Hasil perhitungan dari rata-rata pada Tabel 5 disajikan pada Tabel 6. Daya keluaran panel bersih mencapai 47,81 W, sekitar 1,7 kali panel berdebu tipis (28,26 W) dan hampir dua kali panel berdebu tebal (24,91 W). Efisiensi hasil hitung 6,05% untuk panel bersih, 3,58% untuk debu tipis, dan 3,15% untuk debu tebal. Selama 8 titik pengukuran, panel bersih menghasilkan 382,48 Wh, sedangkan panel berdebu menghasilkan 226,08 Wh dan 199,28 Wh.

Tabel 6: Hasil perhitungan daya, efisiensi, dan energi

Parameter	Debu tipis	Debu tebal	Bersih
P_{panel} (W)	30,87	27,19	61,58
P_{bat} (W)	25,73	20,78	43,46
Rasio daya (%)	83,35	76,43	70,57
P_{out} (W)	28,26	24,91	47,81
η (%)	3,58	3,15	6,05
E, 8 jam (Wh)	226,08	199,28	382,48

$P_{in} = 1000 \times 0{,}7904 = 790{,}4$ W untuk ketiga kondisi. $P_{out} = V_m \times I_k$, $E = P_{out} \times 8$ jam. Persentase peningkatan daya dari debu tebal ke debu tipis 13,45%, dari debu tipis ke bersih 69,18%, dan dari debu tebal ke bersih 91,93%. Lompatan terbesar justru terjadi pada langkah terakhir, saat debu dibersihkan sampai tuntas. Menurut penulis, ini alasan kuat untuk tidak menunggu panel kotor sebelum dibersihkan, apalagi pembersihnya bekerja otomatis.

Soal efisiensi, angka 3 sampai 6 persen terlihat kecil dibanding data panelnya sendiri. Dengan 160 Wp pada 0,7904 m², efisiensi pada STC mestinya sekitar 20,24%. Studi lain pada panel 160 Wp dengan baterai $LiFePO_4$ 12 V 100 Ah melaporkan efisiensi sekitar 21,07% pada iradiasi terukur rata-rata sekitar 637 W/m². Jurang itu, penulis menduga, lebih banyak lahir dari cara menghitung daripada dari kualitas panel. P_{in} memakai 1000 W/m² padahal iradiasi di lapangan naik turun dan lebih rendah pada pagi dan sore. Selain itu, P_{out} diperoleh dari hasil kali rata-rata tegangan dan rata-rata arus, yang bukan rata-rata daya sesaat, dan tiap kondisi diukur pada hari berbeda. Karena itu nilai mutlak η lebih cocok dipakai untuk membandingkan ketiga kondisi satu sama lain, bukan untuk menilai mutu panel.

Ada satu pola yang berlawanan dengan harapan. Rasio daya ke baterai turun dari 83,35% pada debu tipis menjadi 70,57% pada panel bersih, padahal daya panelnya naik. Penulis menduga rugi pengisian dan rugi kabel ikut membesar ketika arus

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

membesar, tetapi dugaan ini baru bisa dibuktikan bila daya diukur di sisi masuk dan keluar SCC pada titik yang sama.

Neraca Energi Beban dan Sisa Energi Baterai

Energi wiper 12 W × 0,00278 jam = 0,0334 Wh dan energi pompa 65 W × 0,00278 jam = 0,1807 Wh per siklus. Dengan dua siklus pembersihan dan lampu 50 W menyala 12 jam, total beban 600,43 Wh (Tabel 7). Energi efektif baterai 12 V × 100 Ah × 0,8 = 960 Wh, sehingga tersisa 359,57 Wh atau sekitar 37,5% dari energi efektif.

Tabel 7: Neraca energi beban dan baterai

Komponen	Daya (W)	Durasi	Energi (Wh)
Wiper (2 siklus)	12	2 × 10 detik	0,07
Pompa (2 siklus)	65	2 × 10 detik	0,36
Lampu LED	50	12 jam	600,00
Total beban			**600,43**
Energi efektif baterai			960,00
Sisa energi			**359,57**

Beban pembersih nyaris tidak terasa, hanya sekitar 0,07% dari total beban, jadi fitur otomatis ini murah dari sisi energi. Namun, ada hal yang menurut penulis patut dicatat. Energi yang dihasilkan panel bersih dalam 8 titik pengukuran (382,48 Wh) belum menutup beban lampu 12 jam (600,43 Wh), sehingga bila pola ini diulang tiap hari tanpa tambahan pengisian, cadangan baterai akan terkuras pelan-pelan. Perhitungan di atas juga belum memasukkan rugi inverter dan memakai tegangan nominal 12 V. Dengan 12,8 V energi efektifnya menjadi 1024 Wh.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian sistem panel surya monocrystalline 160 Wp yang menggunakan baterai $LiFePO_4$ 12,8 V 100 Ah serta dilengkapi fitur pembersih panel otomatis, dapat disimpulkan bahwa kondisi kebersihan permukaan panel berpengaruh terhadap daya listrik yang dihasilkan. Panel dalam kondisi bersih menghasilkan daya keluaran sebesar 47,81 W, lebih tinggi dibandingkan kondisi debu tipis sebesar 28,26 W dan debu tebal sebesar 24,91 W. Pembersihan panel mampu meningkatkan daya keluaran masing-masing sebesar 69,18% dibandingkan kondisi debu tipis dan 91,93% dibandingkan kondisi debu tebal.

Penggunaan baterai $LiFePO_4$ menunjukkan kestabilan tegangan yang cukup baik selama pengujian pengosongan. Dalam 180 menit pertama, tegangan baterai mengalami penurunan sebesar 0,21 V, dari 13,60 V menjadi 13,39 V. Nilai tersebut lebih kecil dibandingkan penurunan tegangan baterai VRLA sebesar 0,74 V berdasarkan data pembanding. Namun, perbedaan kapasitas dan jenis beban pada kedua pengujian menyebabkan hasil tersebut belum dapat dijadikan perbandingan langsung.

Dari sisi konsumsi energi, mekanisme pembersih otomatis membutuhkan energi yang relatif kecil, yaitu sekitar 0,43 Wh untuk dua siklus pembersihan. Sementara itu, total kebutuhan energi lampu LED 50 W selama 12 jam dan mekanisme pembersih mencapai 600,43 Wh. Dengan energi efektif baterai sebesar 960 Wh, energi yang tersisa diperkirakan sebesar 359,57 Wh. Meskipun demikian, energi keluaran panel dalam kondisi bersih selama delapan jam pengukuran sebesar 382,48 Wh masih belum mencukupi untuk memenuhi keseluruhan kebutuhan beban tersebut. Oleh karena itu, penerapan sistem ini perlu mempertimbangkan keseimbangan antara energi yang dihasilkan panel, kapasitas penyimpanan baterai, dan kebutuhan beban agar kontinuitas operasional dapat terjaga.

REFERENSI

[1] H. Abdulla, A. Sleptchenko, and A. Nayfeh, “Photovoltaic systems operation and maintenance : A review and future directions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 195, no. December 2023, p. 114342, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114342.

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

[2] A. Parsay *et al.*, "Enhancing photovoltaic efficiency: An in-depth systematic review and critical analysis of dust monitoring, mitigation, and cleaning techniques," *Appl. Energy*, vol. 388, p. 125668, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125668.

[3] T. Alkharusi, M. M. Alzahrani, C. Pandey, H. Yildizhan, and C. N. Markides, "Experimental investigation of nonuniform PV soiling," *Sol. Energy*, vol. 272, p. 112493, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112493.

[4] L. Micheli, E. F. Fernández, Á. Fernández-Solas, J. G. Bessa, and F. Almonacid, "Analysis and mitigation of nonuniform soiling distribution on utility-scale photovoltaic systems," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 30, no. 3, pp. 211–228, Mar. 2022, doi: 10.1002/pip.3477.

[5] Á. Fernández-Solas, J. Montes-Romero, L. Micheli, F. Almonacid, and E. F. Fernández, "Estimation of soiling losses in photovoltaic modules of different technologies through analytical methods," *Energy*, vol. 244, p. 123173, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123173.

[6] J. Agbogla, C. K. K. Sekyere, F. K. Forson, R. Opoku, and B. Baah, "Soiling estimation methods in solar photovoltaic systems: Review, challenges and future directions," *Results Eng.*, vol. 26, p. 104810, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104810.

[7] Y. Liu *et al.*, "Solar photovoltaic panel soiling accumulation and removal methods: A review," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 18, no. 16, pp. 4097–4118, Dec. 2024, doi: 10.1049/rpg2.12940.

[8] M. Gandomzadeh *et al.*, "Dust mitigation methods and multi-criteria decision-making cleaning strategies for photovoltaic systems: Advances, challenges, and future directions," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 57, p. 101629, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.esr.2024.101629.

[9] N. Shahzad, N. Hussain, S. Umar, M. F. Azam, T. Yousaf, and A. Waqas, "Impacts of soiling on solar panel performance and state-of-the-art effective cleaning methods: A recent review," *J. Clean. Prod.*, vol. 497, p. 145119, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145119.

[10] S. Umar *et al.*, "A building integrated solar PV surface-cleaning setup to optimize the electricity output of PV modules in a polluted atmosphere," *Renew. Energy*, vol. 216, p. 119122, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119122.

[11] H. A. Kazem, A. H. A. Al-Waeli, M. T. Chaichan, K. Sopian, A. Gholami, and W. E. Alnaser, "Dust and cleaning impact on the performance of photovoltaic: an outdoor experimental study," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 45, no. 1, pp. 3107–3124, Apr. 2023, doi: 10.1080/15567036.2023.2191064.

[12] W. Tanveer, A. Waqas, S. Umar, N. Shahzad, U. Imtiaz, and S. Shakir, "Economic and performance evaluation of an automated PV cleaning system with water recycling in Islamabad, Pakistan," *Energy Reports*, vol. 15, p. 109132, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.egyr.2026.109132.

[13] S. Mousavi and G. Farahani, "Introducing a new method of automatic cleaning of the PV array surface using a suction robot," *Mechatronics*, vol. 85, p. 102845, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.mechatronics.2022.102845.

[14] M. K. Swain, M. Mishra, R. C. Bansal, and S. Hasan, "A Self-Powered Solar Panel Automated Cleaning System: Design and Testing Analysis," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 49, no. 3, pp. 308–320, Feb. 2021, doi:

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal

10.1080/15325008.2021.1937400.

[15] M. Ghafoor, A. A. Amin, and M. S. Khalid, "Design of IoT-based solar array cleaning system with enhanced performance and efficiency," *Meas. Control*, vol. 57, no. 8, pp. 1099–1111, Aug. 2024, doi: 10.1177/00202940241233383.

[16] F. Norde Santos *et al.*, "Cleaning of Photovoltaic Modules through Rain: Experimental Study and Modeling Approaches," *Sol. RRL*, vol. 8, no. 24, Dec. 2024, doi: 10.1002/solr.202400551.

[17] A. B. Ahmadullah, I. A. Bakhtyal, A. S. Irshad, Z. H. Doost, N. Wali, and B. A. Karimi, "Comparative assessment of optimal cleaning schedules for various PV cleaning techniques," *Renew. Energy*, vol. 256, p. 124182, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.renene.2025.124182.

[18] M. Wieczorek, S. Wodyk, R. Poliszkiewicz, and P. Witaszek, "The influence of current in off-grid PV systems on lead–acid battery lifetime and hybridization with LFP battery as solution," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 766–773, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.05.213.

[19] R. Yudhistira, D. Khatiwada, and F. Sanchez, "A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage," *J. Clean. Prod.*, vol. 358, p. 131999, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131999.

[20] S. Gupta, Y. Sawle, K. Thakre, and M. Thirunavukkarasu, "Techno-economic-environmental analysis of hybrid renewable energy system with lead acid and lithium-ion energy storage under different PV tracking orientations," *J. Energy Storage*, vol. 130, p. 117417, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.117417.

[21] S. Zamani and M. Hamzeh, "The effect of battery charging method on reducing battery capacity in off-grid solar home systems," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 3418–3426, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.10.026.

[22] M. Shabani, F. Wallin, E. Dahlquist, and J. Yan, "Techno-economic assessment of battery storage integrated into a grid-connected and solar-powered residential building under different battery ageing models," *Appl. Energy*, vol. 318, p. 119166, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119166.

[23] J. Kang, G. Yang, Y. Wang, J. V. Wang, Q. Wang, and G. Zhu, "Study of aging mechanisms in LiFePO4 batteries with various SOC levels using the zero-sum pulse method," *iScience*, vol. 27, no. 7, p. 110287, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.110287.

[24] N. Ghaeminezhad, Q. Ouyang, J. Wei, Y. Xue, and Z. Wang, "Review on state of charge estimation techniques of lithium-ion batteries: A control-oriented approach," *J. Energy Storage*, vol. 72, p. 108707, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108707.

[25] Z. Zhang *et al.*, "State-of-charge and capacity estimation for MWh-scale LiFePO4 peak-shaving battery energy storage stations based on real-world operating data," *Energy*, vol. 339, p. 139086, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.139086.

[26] Z. J. Zhu, N. Espinosa, and S. M. Jordaan, "Life cycle assessment of solar photovoltaic–battery systems: A Canadian case study," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 90, p. 105017, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.seta.2026.105017.

[27] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, "A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 698–733, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.065.

@MEKANIK 2026. Diterbitkan oleh UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal