

Desain dan Implementasi MPPT Perturb & Observe (P&O) pada Buck Converter sebagai Penyedia Energi untuk Sistem Pengering Biji Kopi Berbasis Photovoltaic

¹Iqbal Nurhamzah*, ²Dwi Ajiatmo, ³Rukslin

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Darul 'Ulum, Jombang

*Email: iqbalnurhamzah@gmail.com, ajiatmo@gmail.com, rukslin05@gmail.com

Abstract - Post-harvest drying is a critical stage in determining coffee bean quality, yet small-scale farmers still largely rely on conventional sun drying, which is highly weather-dependent. This study focuses on the design and performance analysis of a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm using the Perturb and Observe (P&O) method on a buck-converter-based Solar Charge Controller (SCC) for a small-scale off-grid coffee bean drying system. The energy source is a 30 Wp Maysun Solar MS30M-36 monocrystalline panel charging a 12V 8Ah VRLA battery, with duty-cycle control executed by an Arduino UNO microcontroller using a four-branch decision-tree logic based on ΔP and ΔV readings. The design was validated through PSIM simulation prior to hardware testing. Simulation results show the P&O algorithm locks the panel operating voltage at 18.30 V (close to V_{mp}) within a tracking time of approximately 0.035 s, raising the output power from 22.00 W to 30.80 W (a 40.0% increase) compared to a static duty-cycle system. Real-world hardware testing shows the P&O MPPT system maintains the panel voltage within 16.63 V–16.97 V with a peak input power of 25.96 W and an average converter efficiency of 86.73%, markedly outperforming the non-MPPT system, which only reached a peak power of 17.02 W. These results confirm that the P&O algorithm significantly improves photovoltaic power extraction efficiency and is feasible for small-scale off-grid coffee bean drying applications.

Keywords — MPPT; Perturb and Observe; Buck Converter; Photovoltaic; Coffee Bean Dryer

Abstrak—Proses pengeringan pascapanen merupakan tahapan krusial dalam menentukan mutu biji kopi, namun petani skala kecil umumnya masih bergantung pada penjemuran konvensional yang sangat dipengaruhi cuaca. Penelitian ini berfokus pada perancangan dan analisis kinerja algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT) metode Perturb and Observe (P&O) pada Solar Charge Controller (SCC) bertopologi buck converter untuk sistem pengering biji kopi off-grid berskala kecil. Sumber energi berasal dari panel surya monokristalin Maysun Solar MS30M-36 (30 Wp) yang mengisi baterai VRLA 12V 8Ah, dengan pengendalian duty cycle dilakukan oleh mikrokontroler Arduino UNO menggunakan struktur pohon keputusan empat kondisi (four-branch decision tree) berbasis pembacaan ΔP dan ΔV . Validasi rancangan dilakukan melalui simulasi PSIM sebelum diuji pada perangkat keras. Hasil simulasi menunjukkan algoritma P&O mampu mengunci tegangan kerja panel pada titik 18,30 V (mendekati V_{mp}) dalam waktu pelacakan $\pm 0,035$ detik, meningkatkan daya keluaran dari 22,00 W menjadi 30,80 W (naik 40,0%) dibandingkan sistem duty cycle statis. Pengujian perangkat keras pada kondisi lapangan riil menunjukkan sistem MPPT P&O menjaga tegangan panel pada rentang 16,63 V–16,97 V dengan daya masukan puncak 25,96 W dan efisiensi konverter rata-rata 86,73%, jauh lebih baik dibandingkan sistem tanpa MPPT yang hanya mencapai daya puncak 17,02 W. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma P&O mampu meningkatkan ekstraksi daya panel surya dan berpotensi digunakan sebagai metode optimasi penyediaan energi untuk sistem pengering biji kopi off-grid skala kecil.

Kata Kunci—MPPT; Perturb and Observe; Buck Converter; Photovoltaic; Pengering Biji Kopi

I. PENDAHULUAN

Kopi merupakan komoditas strategis dengan permintaan yang terus meningkat, sementara mutu biji kopi sangat ditentukan oleh proses pengeringan pascapanen untuk mencapai kadar air ideal sekitar 12,5%. Petani skala kecil pada umumnya masih mengandalkan penjemuran konvensional di bawah sinar matahari yang bersifat mudah dan ekonomis, namun sangat bergantung pada cuaca sehingga rentan menurunkan mutu biji kopi terutama pada musim penghujan. Keterbatasan akses listrik di sentra-sentra kopi turut memperkuat urgensi pengembangan sistem pengering mandiri (off-grid) berbasis energi surya sebagai alternatif yang murah, efisien, dan ramah lingkungan.

Salah satu tantangan utama pada sistem photovoltaic (PV) skala kecil adalah rendahnya efisiensi ekstraksi daya apabila panel surya dibebani secara statis, karena titik operasi tegangan panel tidak selalu berada pada Maximum Power Point (MPP) akibat perubahan iradiasi dan suhu. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan Solar Charge

Controller (SCC) yang dilengkapi algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT). Di antara berbagai metode MPPT, algoritma Perturb and Observe (P&O) banyak dipilih untuk aplikasi berbiaya rendah karena implementasinya sederhana, tidak memerlukan model matematis panel yang kompleks, serta mudah diprogram pada mikrokontroler berdaya komputasi terbatas seperti Arduino UNO.

Penelitian-penelitian terdahulu terkait pengering biji kopi bertenaga surya umumnya masih terbatas pada solar dryer konvensional tanpa unit pengaturan daya elektronik, atau belum mengintegrasikan algoritma MPPT secara khusus untuk aplikasi off-grid skala kecil. Studi komparatif pengendali baterai panel surya juga menunjukkan bahwa metode MPPT secara umum unggul dibandingkan metode PWM konvensional dalam hal efisiensi pengisian baterai. Namun, kajian yang secara spesifik menganalisis kinerja algoritma P&O pada topologi buck converter untuk kebutuhan pengering biji kopi off-grid berskala kecil, mulai dari tahap perancangan teoritis, validasi simulasi PSIM, hingga pengujian perangkat keras riil, masih terbatas.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan dan analisis kinerja algoritma MPPT P&O pada SCC bertopologi buck converter untuk sistem pengering biji kopi off-grid skala kecil. Tujuan penelitian ini adalah: (1) merancang algoritma P&O beserta parameter kendalinya pada buck converter yang menghubungkan panel surya 30 Wp dengan baterai VRLA 12V; (2) memvalidasi kinerja algoritma melalui simulasi PSIM dengan membandingkan sistem dengan dan tanpa MPPT; dan (3) menganalisis kinerja algoritma P&O pada implementasi perangkat keras melalui pengujian operasional nyata.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan design–simulate–implement, yaitu perancangan analitis komponen daya, validasi melalui simulasi perangkat lunak PSIM, dan dilanjutkan dengan implementasi serta pengujian perangkat keras. Diagram umum sistem terdiri atas panel surya, buck converter, unit kendali MPPT P&O berbasis Arduino UNO, baterai VRLA beserta sistem proteksi tegangan, dan beban pemanas ruang pengering.

A. Spesifikasi Panel Surya dan Baterai

Panel surya yang digunakan adalah modul monokristalin Maysun Solar tipe MS30M-36 dengan daya puncak 30 Wp. Spesifikasi utama pada kondisi Standard Test Condition (STC) ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Panel Surya Maysun Solar MS30M-36

Parameter	Nilai
Daya Maksimum (Pmax)	30 W
Tegangan Maksimum (Vmp)	18,0 V
Arus Maksimum (Imp)	1,67 Ampere
Tegangan Open Circuit (Voc)	21,6 V
Arus Short Circuit (Isc)	1,83 Ampere

Energi yang dihasilkan panel surya disimpan pada baterai VRLA 12V 8Ah, dengan tegangan pengisian target (Vout) sebesar 13,8 V, sedangkan tegangan kerja panel maksimum (Vmp) sebesar 18 V berada di atas tegangan pengisian baterai sehingga dipilih topologi buck converter (penurun tegangan).

B. Perancangan Buck Converter

Duty cycle nominal ditentukan menggunakan hubungan $D = V_{out} / V_{in}$ pada Continuous Conduction Mode (CCM), menghasilkan nilai duty cycle nominal awal sekitar 0,667–0,767 bergantung kondisi V_{in} aktual. Frekuensi switching PWM ditetapkan sebesar 20 kHz dengan pertimbangan berada di atas batas pendengaran manusia,

kompatibel dengan resolusi Timer1 Arduino UNO (16 MHz), serta memberi kompromi baik antara ukuran komponen magnetik dan rugi-rugi switching. Nilai induktor minimum dihitung dari target riak arus 30% terhadap arus keluaran maksimum menggunakan persamaan (1), sedangkan nilai kapasitor masukan dan keluaran dihitung berdasarkan persamaan (2) dan (3) untuk menjaga riak tegangan pada batas toleransi desain.

$$L = [V_{out} \cdot (V_{in} - V_{out})] / (V_{in} \cdot f_{sw} \cdot \Delta IL) \quad (1)$$

$$C_{in} = [I_{out} \cdot D \cdot (1 - D)] / (f_{sw} \cdot \Delta V_{in}) \quad (2)$$

$$C_{out} = \Delta IL / (8 \cdot f_{sw} \cdot \Delta V_{out}) \quad (3)$$

Perhitungan analitis menghasilkan kebutuhan induktor 247 μ H dan kapasitor keluaran 30 μ F. Pada implementasi perangkat keras, nilai induktor disesuaikan menjadi 150 μ H (induktor toroid hasil rewind) dan kapasitor keluaran diperbesar menjadi 1000 μ F untuk mengompensasi kenaikan riak arus akibat pengurangan induktansi, sementara kapasitor masukan diperbesar dari 107 μ F menjadi 470 μ F agar pembacaan tegangan panel oleh sensor MPPT tetap stabil dan akurat.

C. Perancangan Algoritma MPPT Perturb & Observe

Algoritma MPPT diimplementasikan menggunakan metode Perturb and Observe (P&O) dengan struktur pohon keputusan empat kondisi (four-branch decision tree), yang secara periodik membandingkan daya panel surya (P_{pv}) hasil pengukuran saat ini terhadap hasil pengukuran periode sebelumnya (ΔP), serta perubahan tegangan (ΔV), untuk menentukan arah perubahan duty cycle sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Logika Pengambilan Keputusan Algoritma P&O

ΔP	ΔV	Aksi terhadap Duty Cycle
$\Delta P > 0$	$\Delta V > 0$	Duty cycle diturunkan
$\Delta P > 0$	$\Delta V < 0$	Duty cycle dinaikkan
$\Delta P < 0$	$\Delta V > 0$	Duty cycle dinaikkan
$\Delta P < 0$	$\Delta V < 0$	Duty cycle diturunkan

Parameter kendali algoritma P&O yang digunakan pada sistem ditunjukkan pada Tabel 3. Duty cycle awal ditetapkan sebesar 0,667 sebagai estimasi V_{out}/V_{mp} untuk mempercepat konvergensi. Langkah perturbasi (D_{step}) sebesar 0,005 dipilih sebagai trade-off antara kecepatan tracking dan kehalusan ripple, sedangkan batas duty cycle 0,55–0,85 digunakan untuk menjaga efisiensi konverter dan headroom keamanan operasi MOSFET. Ambang batas ΔP sebesar 0,02 W (deadband) diterapkan untuk mencegah osilasi duty cycle akibat derau (noise) sensor, dengan periode sampling 200 ms yang disesuaikan dengan waktu settling daya dan respons pembacaan sensor arus-tegangan berbasis I2C (INA219).

Tabel 3. Parameter Algoritma P&O pada Sistem

Parameter	Nilai	Keterangan
Duty cycle awal	0,667	Estimasi awal V_{out}/V_{mp}
Langkah perturbasi (D_{step})	0,005	Trade-off kecepatan vs ripple
Batas bawah duty cycle	0,55	Menjaga efisiensi converter
Batas atas duty cycle	0,85	Headroom keamanan MOSFET

Ambang batas ΔP (deadband)	0,02 W	Mencegah osilasi akibat noise
Periode sampling	200 ms	Sesuai respons sensor I2C

Untuk menjaga keandalan baterai VRLA, sistem dilengkapi tiga mekanisme proteksi tegangan berbasis hysteresis: High Voltage Disconnect (HVD) melalui penahanan/penurunan duty cycle saat tegangan mendekati batas overcharge (14,7–14,8 V), Low Voltage Disconnect (LVD) yang memutus beban heater pada 10,8 V, dan Low Voltage Reconnect (LVR) yang menyambung kembali beban pada 12,5 V.

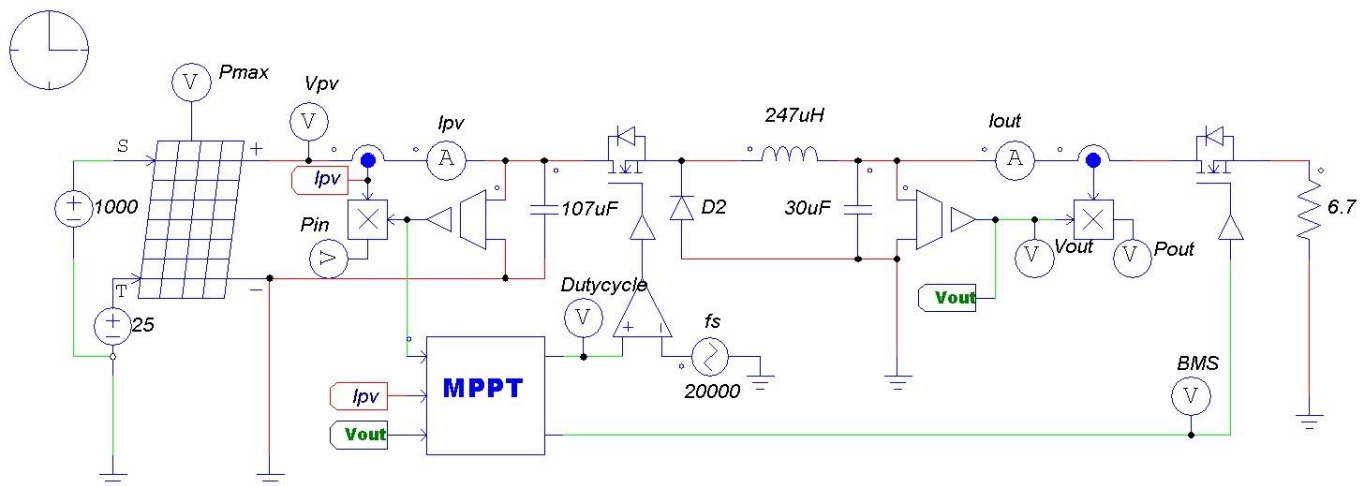
D. Validasi melalui Simulasi PSIM

Sebelum perakitan perangkat keras, seluruh parameter komponen daya hasil perhitungan analitis beserta algoritma P&O diimplementasikan pada perangkat lunak PSIM menggunakan modul Simplified C Block yang menerima variabel V_{pv} , I_{pv} , dan V_{out} , kemudian menghasilkan sinyal duty cycle PWM. Model panel surya dikonfigurasi mengikuti datasheet Maysun Solar MS30M-36. Simulasi ini berfungsi sebagai design validation loop untuk memastikan konverter beroperasi stabil pada Continuous Conduction Mode (CCM) serta memverifikasi keakuratan algoritma P&O dalam melacak titik daya maksimum sebelum dilanjutkan ke tahap fabrikasi perangkat keras.

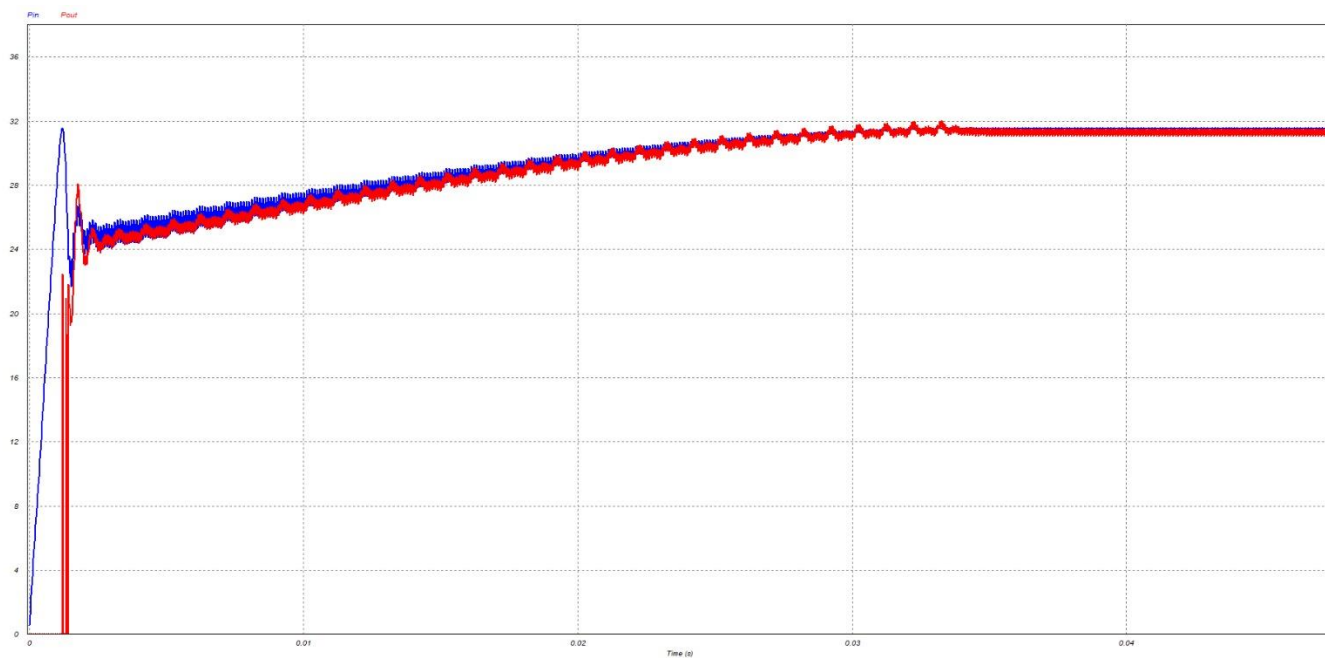
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kinerja MPPT P&O pada Simulasi PSIM

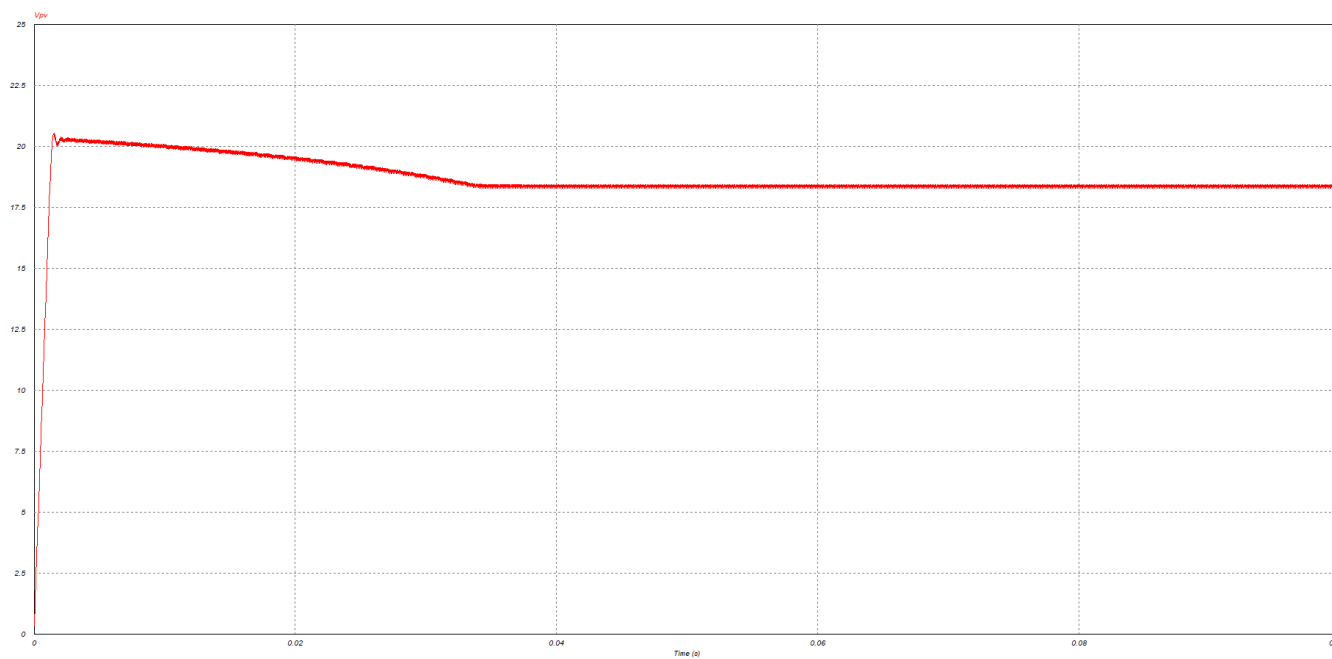
Pengujian komparatif dilakukan antara sistem dengan duty cycle statis (tanpa MPPT) dan sistem dengan algoritma P&O aktif. Pada sistem tanpa MPPT, tegangan operasional panel (V_{pv}) tertahan tinggi pada 20,50 V (mendekati V_{oc} = 21,6 V), jauh di luar zona daya maksimum (V_{mp} = 18,0 V), sehingga arus yang ditarik sangat terbatas dan daya keluaran hanya mencapai 22,00 W. Sebaliknya, ketika algoritma P&O diaktifkan, sistem mengeksekusi perturbasi tegangan sejak $t = 0$ s hingga mencapai kondisi tunak pada waktu pelacakan (tracking time) sekitar 0,035 detik, berhasil mengunci V_{pv} secara presisi pada 18,30 V (mendekati V_{mp}), sehingga daya masukan melonjak menjadi 31,50 W dan daya keluaran mencapai 30,80 W.



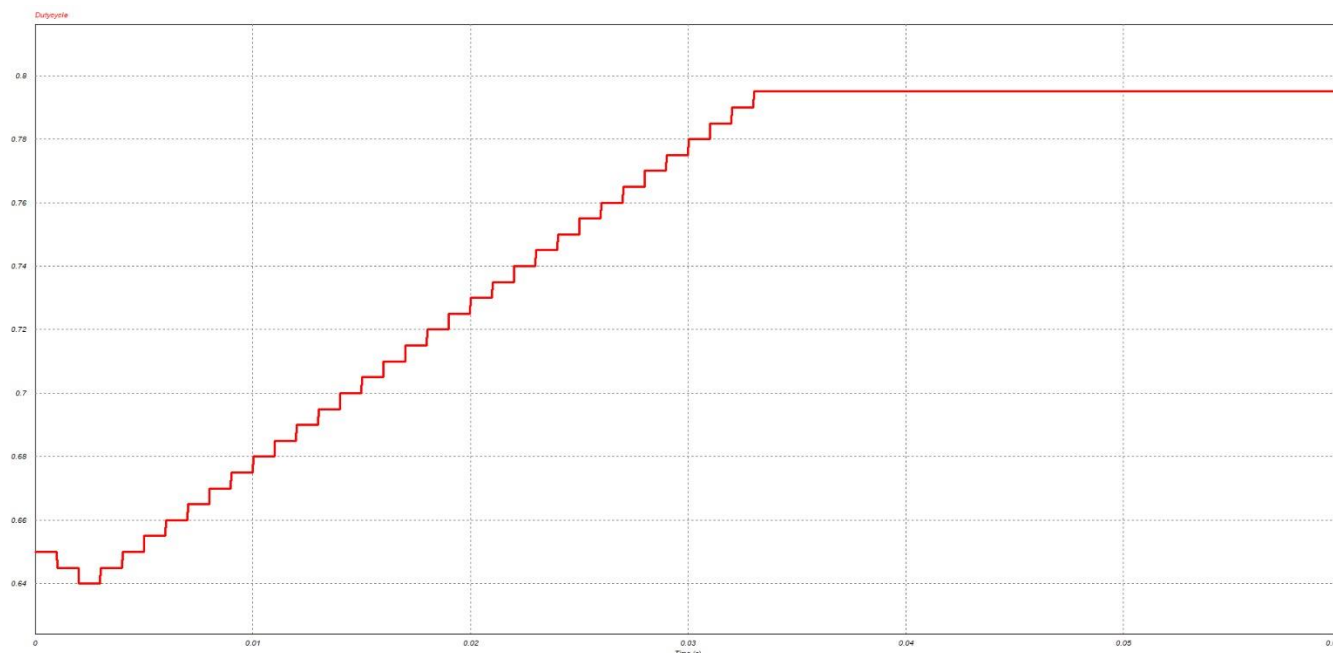
Gambar 1 Skematik simulasi MPPT & Buck Converter pada PSIM



Gambar 2. Grafik Kinerja Daya Sistem dengan MPPT (P&O)



Gambar 3. Kurva *Tracking* V_{pv}



Gambar 4. Kurva Tracking *Duty Cycle*

Rekapitulasi hasil komparasi simulasi ditunjukkan pada Tabel 4. Penerapan algoritma P&O terbukti meningkatkan daya keluaran sebesar 8,80 W, setara peningkatan 40,0% dibandingkan sistem tanpa MPPT, dengan efisiensi konverter simulasi sebesar 97,78% pada kondisi komponen ideal PSIM.

Tabel 4. Rekapitulasi Komparasi Kinerja Simulasi dengan dan Tanpa MPPT

Parameter	Tanpa MPPT	Dengan MPPT (P&O)	Peningkatan
Daya Masukan Panel (Pin)	22,50 W	31,50 W	+9,00 W (+40,0%)
Daya Keluaran Beban (Pout)	22,00 W	30,80 W	+8,80 W (+40,0%)
Tegangan Operasional (Vpv)	20,50 V	18,30 V (terkunci mendekati V_{mp})	Lebih optimal
Efisiensi Konverter	97,78%	97,78%	Sama (ideal)

Peningkatan daya sebesar 8,80 W secara kontinu selama 4 jam operasional secara teoritis setara dengan tambahan suplai energi sebesar 35,2 Wh/hari. Tambahan energi tersebut menunjukkan potensi peningkatan ketersediaan energi yang dapat dimanfaatkan untuk memasok beban pada sistem pengering

B. Kinerja MPPT P&O pada Pengujian Perangkat Keras

Pengujian perangkat keras dilakukan dengan membandingkan sistem tanpa MPPT (PWM statis) dan sistem dengan MPPT P&O saat mengisi baterai VRLA 12V pada kondisi lapangan riil. Pada sistem tanpa MPPT (Tabel 5), tegangan panel (V_{in}) tertahan pada rentang 19,75 V–19,89 V, jauh di atas V_{mp} (18 V), menyebabkan arus masukan hanya berkisar 0,70–0,86 A dan daya masukan puncak hanya 17,02 W (sekitar 56% dari kapasitas panel 30 W), dengan efisiensi konverter rata-rata 80,28%.

Tabel 5. Hasil Pengujian Tanpa MPPT pada Baterai

Jam	Vin (V)	Iin (A)	Pin (W)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (W)	Eff (%)
11:00	19,84	0,70	13,89	13,8	0,79	10,90	78,50
11:30	19,83	0,74	14,67	13,8	0,89	12,28	83,70
12:00	19,79	0,86	17,02	13,8	1,10	15,18	89,19
12:30	19,89	0,84	16,71	13,8	1,03	14,21	85,08
13:00	19,87	0,77	15,30	13,8	0,89	12,28	80,28
13:30	19,75	0,76	15,01	13,8	0,82	11,32	75,39
14:00	19,77	0,86	17,00	13,8	0,86	11,87	69,80

Sebaliknya, pada pengujian sistem dengan MPPT P&O (Tabel 6), algoritma secara aktif menyesuaikan duty cycle sehingga tegangan kerja panel (Vin) berhasil diturunkan dan dijaga pada rentang 16,63 V–16,97 V. Nilai ini sedikit di bawah Vmp STC pabrik (18 V) sebagai konsekuensi wajar kenaikan suhu sel surya di atas 25°C saat beroperasi di bawah terik matahari. Dengan menempatkan titik kerja pada tegangan optimal aktual tersebut, arus masukan (Iin) meningkat signifikan menjadi 1,28–1,54 A, sehingga daya masukan puncak mencapai 25,96 W pada pukul 12:30, atau sekitar 86% dari kapasitas panel 30 W, dengan efisiensi konverter rata-rata 86,73%.

Tabel 6. Hasil Pengujian Dengan MPPT P&O pada Baterai

Jam	Vin (V)	Iin (A)	Pin (W)	Vout (V)	Iout (A)	Pout (W)	Eff (%)
11:00	16,76	1,41	23,63	13,8	1,37	18,91	80,00
11:30	16,79	1,48	24,85	13,8	1,51	20,84	83,86
12:00	16,97	1,49	25,29	13,8	1,61	22,22	87,88
12:30	16,86	1,54	25,96	13,8	1,64	22,63	87,17
13:00	16,93	1,47	24,89	13,8	1,62	22,33	89,71
13:30	16,63	1,41	23,45	13,8	1,51	20,88	89,04
14:00	16,63	1,28	21,29	13,8	1,38	19,04	89,47

Perbandingan kedua pengujian menegaskan bahwa algoritma P&O berhasil menggeser titik kerja panel mendekati Vmp aktual di lapangan, sehingga arus dan daya yang diekstrak jauh lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa MPPT, sekaligus meningkatkan efisiensi konverter rata-rata dari 80,28% menjadi 86,73%. Selain itu, penyesuaian komponen daya pada perangkat keras — induktor toroid 150 μ H, kapasitor masukan 470 μ F, dan kapasitor keluaran 1000 μ F — terbukti efektif meredam riak arus dan tegangan sehingga pembacaan sensor tetap stabil dan proses tracking P&O tidak terganggu derau switching.

C. Diskusi

Secara keseluruhan, hasil simulasi PSIM dan pengujian perangkat keras saling menguatkan bahwa algoritma P&O efektif menjaga titik kerja panel surya mendekati MPP secara adaptif terhadap kondisi iradiasi dan suhu aktual, berbeda dengan pendekatan duty cycle statis yang membiarkan panel bekerja pada tegangan tinggi mendekati Voc

dengan arus ekstraksi yang sangat kecil. Selisih hasil antara simulasi (efisiensi ideal 97,78%) dan perangkat keras (efisiensi rata-rata 86,73%) mencerminkan rugi-rugi non-ideal pada komponen fisik seperti resistansi konduksi MOSFET ($R_{DS(on)}$), resistansi kawat induktor (RDC), dan konsumsi daya internal mikrokontroler, yang lazim terjadi pada transisi dari lingkungan simulasi ideal menuju implementasi nyata. Sifat empat-kondisi dari algoritma P&O yang diterapkan, dikombinasikan dengan deadband ΔP 0,02 W, terbukti mampu menekan osilasi duty cycle di sekitar titik MPP sekaligus mempertahankan waktu tracking yang cepat ($\pm 0,035$ detik pada simulasi).

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi PSIM, dan pengujian perangkat keras, algoritma MPPT Perturb and Observe (P&O) pada Solar Charge Controller bertopologi buck converter terbukti efektif meningkatkan kinerja ekstraksi daya panel surya 30 Wp untuk sistem pengering biji kopi off-grid skala kecil. Pada simulasi PSIM, algoritma P&O meningkatkan daya keluaran dari 22,00 W menjadi 30,80 W (naik 40,0%) dengan waktu pelacakan sekitar 0,035 detik. Pada pengujian perangkat keras riil, sistem MPPT P&O menjaga tegangan panel pada 16,63 V–16,97 V dengan daya masukan puncak 25,96 W dan efisiensi konverter rata-rata 86,73%, jauh melampaui sistem tanpa MPPT yang hanya mencapai daya puncak 17,02 W dengan efisiensi 80,28%. Hasil ini menegaskan bahwa algoritma P&O layak diterapkan sebagai solusi optimasi daya yang sederhana namun efektif pada tahap catu daya dan pengisian baterai sistem photovoltaic off-grid skala kecil bagi petani kopi. Penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu validasi belum mencakup kinerja ruang pengering (suhu ruang, kadar air akhir, lama pengeringan) serta pengujian hardware antara skenario dengan dan tanpa MPPT belum mencatat iradiasi dan suhu panel secara simultan, sehingga hasil perbandingan perlu dimaknai sebagai indikasi awal dan bukan angka mutlak. Penelitian lanjutan disarankan mengarah pada penerapan metode MPPT tingkat lanjut, seperti Incremental Conductance atau pendekatan berbasis kecerdasan buatan, untuk menekan osilasi daya di sekitar MPP serta mempercepat konvergensi saat terjadi perubahan iradiasi yang ekstrem dan mendadak, dan juga mengarah pada validasi menyeluruh terhadap kinerja pengeringan biji kopi aktual dengan pencatatan kondisi lingkungan yang simultan.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alombah, N. H., Harrison, A., Mbasso, W. F., Belghiti, H., Fotsin, H. B., Jangir, P., Al-Gahtani, S. F., & Elbarbary, Z. M. S. (2025). Multiple-to-single maximum power point tracking for empowering conventional MPPT algorithms under partial shading conditions. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98619-3>
- [2] Gultom, S. S. T., Ambarita, H., Gultom, M. S., & Napitupulu, F. H. (2019). Rancang bangun dan pengujian pengering biji kopi tenaga listrik dengan pemanfaatan energi surya. *Jurnal Dinamis*, 7(4).
- [3] Kusmiyati, Salam, A., & Ratnawati, J. (2021). Pengembangan solar dryer dome untuk peningkatan kualitas produksi kopi. *Jurnal APTS*, 4(4). <https://doi.org/10.36257/apts.vxix>
- [4] Narendro, A., Wirawan Wisnuadji, T., & Broto, S. (2024). Perbandingan efisiensi pengendali baterai panel surya PWM vs MPPT. *OKTAL: Jurnal Ilmu Komputer dan Science*, 3(12).
- [5] Sa'diyah, H., Zahwa, D. A., Sudarti, & Mahmudi, K. (2025). Analisis konsep fisika pada proses pengeringan kopi menggunakan solar dryer. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 2025(12), 334–341.
- [6] Suherman, S., Hadiyanto, H., Franz, N., Kamandjaja, V., & Sinuhaji, T. R. F. (2024). Energy analysis and economy performance of a hybrid solar dryer for drying coffee. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 26(1), 25–34. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2024.3135>
- [7] Seguel, J. L., & Seleme, S. I. (2021). Robust digital control strategy based on fuzzy logic for a solar charger of VRLA batteries. *Energies*, 14(4), 1001. <https://doi.org/10.3390/en14041001>

- [8] Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O., & Adaramola, M. S. (2023). A comprehensive review of maximum power point tracking (MPPT) techniques used in solar PV systems. *Energies*, 16(5), 2206. <https://doi.org/10.3390/en16052206>
- [9] Rizalman, M. K., Mounq, E. G., Dargham, J. A., Jamain, Z., Yaakub, N. M., & Farzamnia, A. (2023). A review of solar drying technology for agricultural produce. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 30(3), 1407–1419. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i3.pp1407-1419>
- [10] Fitriyanto, N. I., & Gunawan, B. (2026). Pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi pada sistem pengering kopi berbasis IoT dengan catu daya hybrid. *Jurnal Ilmiah Global Education*, 7(2), 1131–1149. <https://doi.org/10.55681/jige.v7i2.5902>