Lektrokom: Jurnal Ilmiah Program Studi Teknik Elektro
Volume 9 No. 1, Maret 2026, E-ISSN:2686-1534

ANALISIS KINERJA MPPT *INCREMENTAL CONDUCTANCE* PADA SISTEM PLTS *OFF-GRID* 1 kW_P DENGAN VARIASI BEBAN RUMAH HIJAU POKTAN MUSTIKA KRAMAT JATI JAKARTA TIMUR

[1]*Alsaro Nasario**, [2]*Eva Magdalena Silalahi*, [3]*Judo Ignatius Nempung*
[1,2,3] *Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia*
Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang, Jakarta Timur 13630, DKI Jakarta
[2]eva.silalahi@uki.ac.id , [3]judo.nempung@uki.ac.id
**Corresponding author*: [1]purabanjelo@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis kinerja algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) *Incremental Conductance* pada PLT) *off-grid* 1 kWp dengan variasi beban di Rumah Hijau Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur. Penelitian berbasis simulasi ini menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Model sistem yang dibangun terintegrasi dari PV array 2S×5P, buck converter, baterai lead-acid 12 V 100 Ah, inverter SPWM, transformator step-up, filter LC, dan beban AC rumah hijau. Validasi awal model PV array pada *Standard Test Conditions* (STC) menghasilkan daya simulasi 986,09 W terhadap daya teoritis 1001 W, menunjukkan deviasi daya sebesar 1,49%. Parameter utama yang dianalisis meliputi tegangan, arus, daya PV, dan *tracking efficiency*, sementara parameter pendukung mencakup baterai, bus DC, inverter, serta beban. Evaluasi kinerja menggunakan skenario dinamis data irradiansi dan temperatur NASA POWER 24 jam dengan profil beban harian sedang. Hasil simulasi periode utama pukul 06.00–16.00 menghasilkan efisiensi pelacakan sebesar 93,21%–98,39% dengan nilai rata-rata mencapai 96,15%. Simulasi juga menunjukkan konsistensi logika fisik malam hari dengan keluaran PV bernilai nol. Kesimpulannya, algoritma *Incremental Conductance* terbukti andal menjaga titik kerja PV pada kondisi lingkungan dinamis dalam ruang lingkup simulasi.

Kata Kunci: *Incremental Conductance,* MPPT*, NASA POWER,* PLTS *off-grid,* variasi beban*.*

Abstract

This study analyzes the performance of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) Incremental Conductance algorithm on a 1 kWp off-grid Solar Power Plant (PLTS) system with load variations at the Poktan Mustika Green House, Kramat Jati, East Jakarta. This simulation-based study uses MATLAB/Simulink. The system model built is integrated from a 2S×5P PV array, buck converter, 12 V 100 Ah lead-acid battery, SPWM inverter, step-up transformer, LC filter, and greenhouse AC load. Initial validation of the PV array model under Standard Test Conditions (STC) resulted in a simulated power of 986.09 W against a theoretical power of 1001 W, indicating a power deviation of 1.49%. The main parameters analyzed include voltage, current, PV power, and tracking efficiency, while supporting parameters include the battery, DC bus, inverter, and load. Performance evaluation uses a dynamic scenario of NASA POWER 24-hour irradiance and temperature data with a moderate daily load profile. The simulation results for the main period of 6:00 AM–4:00 PM yielded tracking efficiency of 93.21%–98.39%, with an average value of 96.15%. The simulation also demonstrated consistency with the physical logic of nighttime PV output at zero. In conclusion, the Incremental Conductance algorithm proved reliable in maintaining the PV operating point under dynamic environmental conditions within the simulation scope.

Keywords: *Incremental Conductance, MPPT, NASA POWER, off-grid photovoltaic system, load variation.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring bertambahnya aktivitas masyarakat dan kebutuhan elektrifikasi di berbagai sektor, termasuk sektor pertanian. Pemanfaatan energi surya menjadi alternatif yang relevan mengingat potensi radiasi matahari Indonesia yang besar, khususnya untuk sistem energi mandiri skala kecil-menengah (Pambudi et al., 2023). Sistem PLTS *off-grid* beroperasi tanpa terhubung ke jaringan listrik utama sehingga keseimbangan antara daya PV, energi baterai, dan kebutuhan beban harus dikelola sepenuhnya oleh sistem itu sendiri (Dorel, Gmal Osman, Strejoiu, & Lazaroiu, 2023), (Katche, Makokha, Zachary, & Adaramola, 2023).

Kajian pemanfaatan potensi PLTS di wilayah DKI Jakarta dan sekitarnya sebetulnya telah banyak dilakukan secara makro maupun sektoral. Sebagai contoh, Novita et al., (2024) mengevaluasi potensi PLTS untuk memenuhi total kebutuhan listrik regional di Pulau Tidung (Novita, Silalahi, Widodo, & Purba, 2024), sementara Veronika et al., (2024) melengkapinya melalui analisis tekno-ekonomi menggunakan perangkat lunak HOMER pada sistem hibrida PLTD-PLTS di wilayah yang sama (Veronika, Silalahi, Widodo, & Purba, 2024). Di sisi lain, tren integrasi PLTS pada area urban dan pemukiman umumnya berfokus pada sistem interkoneksi jaringan, seperti analisis energi dan keekonomian sistem *on-grid* berskala rumah tangga yang diteliti oleh David Martua et al., (David Martua, Eva Magdalena Silalahi, Atmonobudi Soebagio, Antonius Dodi Tyas Prasetyo, & Dery Elfando, 2024), serta pemodelan simulasi unjuk kerja elektrikal PLTS *on-grid* menggunakan *boost converter* dan inverter berbasis MATLAB/Simulink oleh Waruwu et al., (Bestan Waruwu, Eva Magdalena Silalahi, & Bambang Widodo, 2025). Meskipun studi-studi tersebut memberikan landasan kuat mengenai kelayakan finansial dan perencanaan energi makro *on-grid*, evaluasi mikro mengenai optimasi kestabilan pelacakan daya searah (dc) pada sistem mandiri (*off-grid*) yang melayani beban pertanian dinamis masih memerlukan kajian lebih lanjut.

Rumah Hijau Poktan Mustika di Kramat Jati, Jakarta Timur merupakan fasilitas pertanian perkotaan dengan sistem PLTS *off-grid* sekitar 1 kWp yang menyuplai beban berupa lampu LED, kipas angin, lemari pendingin, dan *cup sealer*. Karena beban-beban tersebut tidak selalu aktif bersamaan, kebutuhan daya berubah dinamis mengikuti pola operasional, yang berinteraksi dengan karakteristik keluaran PV yang bersifat nonlinier.

Relevansi algoritma *Incremental Conductance* dalam mempertahankan titik daya maksimum pada kondisi cuaca dinamis terus divalidasi, bahkan bersaing dengan perkembangan metode optimasi berbasis kecerdasan buatan terbaru (Ogunfowora & Bhattacharya, 2026).

Perbedaan karakteristik utama terletak pada konfigurasi jaringan, di mana penelitian terdahulu mengoptimalkan efisiensi pada sistem hibrida *on-grid* (AboRas, Alhazmi, & Megahed, 2025), sedangkan riset ini menitikberatkan pada stabilitas suplai mandiri untuk peralatan pascapanen rumah hijau.

Incremental Conductance (IC) adalah salah satu algoritma MPPT yang menentukan posisi titik kerja berdasarkan perbandingan konduktansi inkremental dan konduktansi instan, sehingga relevan untuk sistem yang mengalami perubahan beban dan irradiansi secara simultan, (Owusu-Nyarko, Elgenedy, Abdelsalam,

& Ahmed, 2021), (Zeke Manurung, Radianto, & Herwandi, 2023). Penelitian terdahulu Owusu-Nyarko et al., (Owusu-Nyarko, Elgenedy, Abdelsalam, & Ahmed, 2021), Manurung et al., Katche et al. (Katche et al., 2023), Al-Wesabi et al. (Al-Wesabi, Fang, Hussein Farh, Al-Shamma'a, & Al-Shaalan, 2024), serta Priya dan Stonier (Priya & Stonier, 2026)—menunjukkan bahwa IC masih relevan dikembangkan, namun kajian yang secara spesifik menganalisis kinerja IC pada model PLTS *off-grid* skala 1 kWp dengan integrasi PV array, buck converter, baterai, inverter, dan variasi beban AC rumah hijau nyata masih terbatas.

Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis kinerja algoritma MPPT IC melalui skenario utama data irradiansi dan temperatur NASA POWER selama 24 jam untuk merepresentasikan kondisi operasional realistis di Jakarta Timur, dikombinasikan dengan profil beban harian sedang rumah hijau (49–609 W). Validasi model PV pada kondisi STC dilakukan sebagai pelengkap. Analisis difokuskan pada respons parameter elektrikal PV (V_{pv}, I_{pv}, P_{pv}), efisiensi pelacakan (η_{MPPT}), dan stabilitas subsistem pendukung.

Rumusan masalah penelitian ini meliputi: (1) bagaimana kinerja IC menjaga titik kerja PV pada kondisi dinamis NASA POWER; (2) bagaimana respons parameter elektrikal terhadap fluktuasi irradiansi dan beban; (3) berapa nilai η_{MPPT} secara kuantitatif; dan (4) bagaimana kestabilan subsistem pendukung selama operasi 24 jam. Tujuan penelitian disusun sejalan dengan keempat rumusan tersebut.

Penelitian ini bersifat simulasi komputasional sehingga pengujian perangkat keras, validasi lapangan, analisis THD, dan studi ekonomi berada di luar cakupan. Data NASA POWER digunakan sebagai pendekatan lingkungan berbasis satelit/model atmosfer, bukan pengukuran langsung di lokasi.

2. KERANGKA TEORI

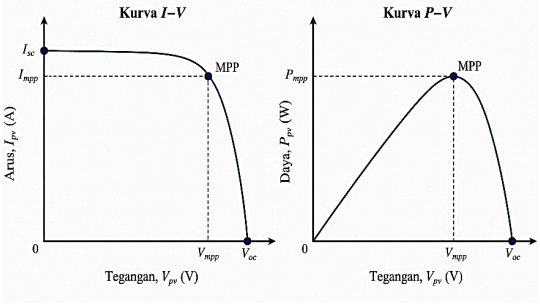
2.1 Sistem PLTS *Off-grid*

PLTS *off-grid* adalah sistem fotovoltaik mandiri yang mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik, tanpa terhubung jaringan utama (Dorel et al., 2023). Komponen utamanya meliputi PV array, konverter DC–DC, baterai, inverter, sistem kendali, dan beban. Karena tidak memiliki penyangga daya eksternal, perubahan beban secara langsung memengaruhi arus PV, tegangan bus DC, kondisi baterai, dan tegangan AC keluaran (Dorel et al., 2023; Katche et al., 2023).

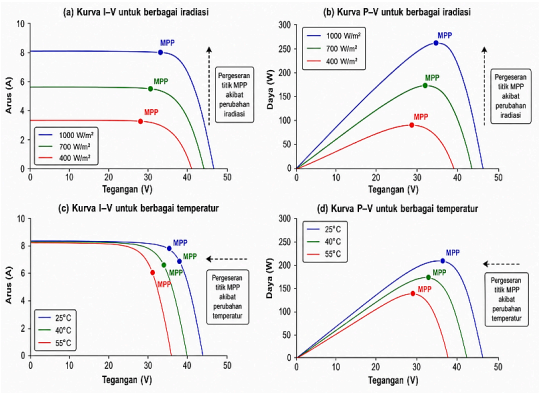
2.2 Karakteristik Modul Fotovoltaik

Modul PV mengonversi foton menjadi pasangan elektron-hole melalui pn-junction, menghasilkan arus fotolistrik yang berbanding lurus dengan irradiansi (G). Karakteristik keluaran PV bersifat nonlinier dan direpresentasikan melalui kurva I–V dan P–V, dengan titik puncak daya (MPP) pada dP/dV = 0. Peningkatan irradiansi menaikkan arus dan daya PV, sedangkan kenaikan temperatur menurunkan tegangan rangkaian terbuka sehingga menurunkan daya maksimum (Al-Ezzi & Ansari, 2022).

Oleh karena itu, posisi MPP selalu bergerak secara dinamis sepanjang hari akibat fluktuasi cuaca, yang mempertegas pentingnya penggunaan teknologi MPPT dalam sistem PLTS *off-grid* untuk menjaga efisiensi ekstraksi energi. Sifat non-linearitas ini menuntut pemahaman mendalam mengenai titik kerja optimal modul, sebagaimana direpresentasikan dalam karakteristik kurva daya dan arus, serta pergeseran kurva akibat perubahan irradiansi dan temperatur, pada Gambar 1.



1.(a) Kurva karakteristik I–V dan P–V modul fotovoltaik.



1.(b) Pengaruh irradiansi dan temperatur terhadap kurva I–V dan P–V.

Gambar 1. Karakteristik kurva I–V dan P–V modul fotovoltaik serta pengaruh irradiansi dan temperatur terhadap kurva karakteristik PV (Goswami, 2022), (Duffie & Beckman, 2013) .

2.3 Konfigurasi PV Array

PV array dikonfigurasi 2S×5P menggunakan modul dengan V_{mp} = 18,30 V, I_{mp} = 5,47 A, sehingga:

- $V_{mp,\,array} = 2\times18,30 = 36,60\,V$
- $I_{mp,\,array} = 5\times5,47 = 27,35\,A$
- $P_{mpp,\,array} = 36,60\times27,35 \approx 100$

Tegangan MPP array (36,60 V) lebih tinggi dari tegangan bus baterai (12–14,4 V), sehingga topologi *buck converter* sesuai digunakan sebagai aktuator MPPT.

2.4 Algoritma *Incremental Conductance*

Dasar matematis IC diturunkan dari kondisi dP/dV = 0 pada MPP, yang menghasilkan hubungan dI/dV = −I/V. Dalam implementasi digital, turunan tersebut didekati melalui ΔI/ΔV dari dua sampel berurutan. Perbandingan ΔI/ΔV terhadap −I/V menentukan apakah titik kerja berada di sisi kiri, kanan, atau sekitar MPP (Owusu-Nyarko et al., 2021). Untuk memvisualisasikan urutan pengambilan keputusan dalam proses pelacakan titik daya maksimum tersebut, tahapan eksekusi algoritma *Incremental Conductance* dirangkum dalam diagram alir pada Gambar 2.

Pada implementasi buck converter, kenaikan *duty cycle* menurunkan V_{pv}, sedangkan penurunannya menaikkan V_{pv}, sehingga keputusan algoritma pada Gambar 2 harus diterjemahkan sesuai arah tersebut sebelum diteruskan sebagai sinyal kendali konverter.

2.5 *Buck Converter* sebagai Aktuator MPPT

Buck converter berfungsi sebagai antarmuka daya yang mengatur impedansi efektif sisi PV melalui *duty cycle* (D), dengan hubungan ideal $V_{out} = D\times V_{in}$ (0 < D < 1) (Zeke Manurung et al., 2023). Fungsinya tidak sekadar menurunkan tegangan, tetapi juga menjadi aktuator kendali MPPT.

2.6 Data NASA POWER

NASA POWER menyediakan data irradiansi (ALLSKY_SFC_SW_DWN) dan temperatur (T2M) berbasis satelit/model atmosfer (Goswami, 2015), (NASA Langley Research Center, 2026).

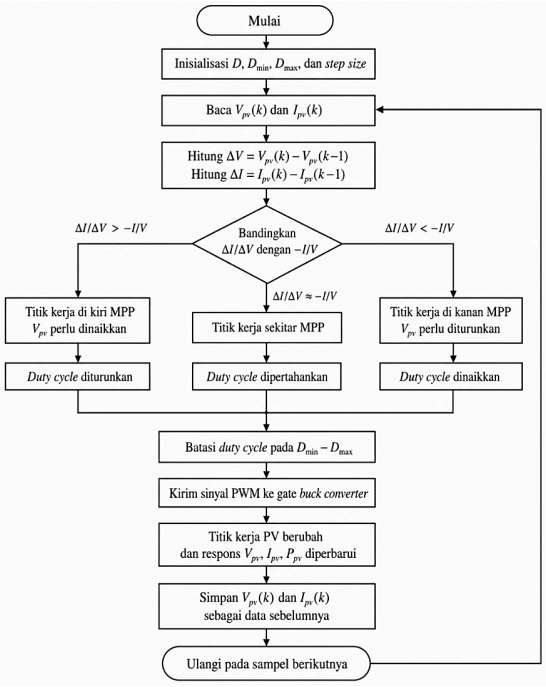
2.7 Daya PV

Daya PV merupakan daya aktual yang diekstraksi PV array pada kondisi operasi tertentu, dihitung dari:

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (1)$$

di mana:
P_{pv} = daya PV (W)
V_{pv} = tegangan PV (V)
I_{pv} = arus PV (A)

P_{pv} digunakan untuk membaca respons terhadap perubahan beban, irradiansi, dan temperatur.



Gambar 2. Diagram alir algoritma MPPT *Incremental Conductance* (Owusu-Nyarko et al., 2021a).

2.8 Nilai Deviasi

Rumus deviasi digunakan untuk memvalidasi kesesuaian model simulasi dengan parameter spesifikasi teknis perangkat.

$$Deviasi = \frac{\left|\left(Nilai_{simulasi} - Nilai_{teoritis}\right)\right|}{\left|Nilai_{teoritis}\right|} \times 100\% \quad (2)$$

di mana:
$Nilai_{simulasi}$ = nilai hasil simulasi MATLAB/Simulink.
$Nilai_{teoritis}$ = nilai referensi teoritis dari spesifikasi atau perhitungan manual.

Deviasi yang kecil (<5%) menunjukkan model simulasi sudah representatif.

2.9 Daya Maksimum Referensi

Potensi daya PV berubah mengikuti irradiansi, daya maksimum referensi dihitung dinamis:

$$P_{mpp,ref}(t) = P_{mpp,\,STC} \times \frac{G(t)}{G_{STC}} \quad (3)$$

Pendekatan ini memastikan evaluasi efisiensi mencerminkan kemampuan pelacakan algoritma terhadap pergeseran MPP, bukan sekadar dampak besaran irradiansi itu sendiri.

2.10 Parameter Kinerja MPPT

Tracking efficiency dihitung sebagai:

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{pv,aktual}}{p_{mpp,ref}} \times 100\% \quad (4)$$

Parameter ini hanya mencerminkan efisiensi pelacakan sisi PV, tidak mencakup rugi *buck converter*, baterai, inverter, transformator, filter, atau beban (Katche et al., 2023).

3. METODE PENELITIAN

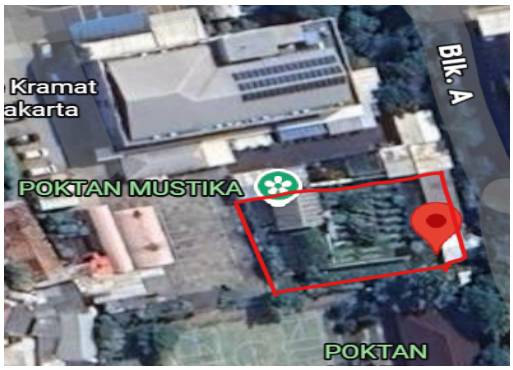
3.1 Jenis Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi komputasional (Sugiyono, 2019), dengan data numerik diperoleh dari simulasi MATLAB/Simulink dan Simscape Electrical pada model sistem PLTS *off-grid* ± 1 kWp yang merepresentasikan konfigurasi lapangan Rumah Hijau Poktan Mustika.

3.2 Objek dan Lokasi Penelitian

Objek penelitian adalah model sistem PLTS *off-grid* berbasis PV array 2S×5P, *buck converter*, baterai *lead-acid* 12 V

100 Ah, inverter SPWM, transformator *step-up*, filter LC, dan beban AC (lampu LED, kipas angin, lemari pendingin, *cup sealer*). Lokasi studi kasus adalah Rumah Hijau Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur (koordinat −6,278163; 106,872086). Kondisi lingkungan dan tata letak fisik fasilitas pertanian perkotaan yang menjadi subjek pemodelan ini ditampilkan pada citra lokasi di Gambar 3.



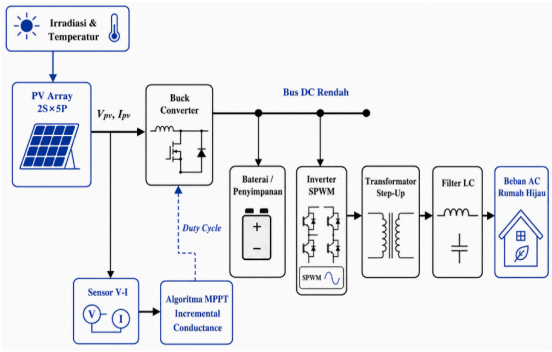
Gambar 3. Lokasi Rumah Hijau Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur (Google Maps, 2026).

3.3 Parameter Sistem Simulasi

Tabel 1. Ringkasan parameter utama sistem simulasi

Subsistem	Parameter Kunci
PV Array	2S×5P; $V_{mp,array}$ = 36,60 V; $I_{mp,array}$ = 27,35 A; $P_{mpp,array} \approx$ 1001 W
Baterai	*Lead-acid* 12 V 100 Ah; SOC awal 80%; $V_{cut-off}$ 10,5 V; V_{full} 14,4 V
Buck converter	L = 220 µH; f_s = 5000 Hz; D_{min} = 0,28; D_{max} = 0,58
Inverter	*Full-bridge* SPWM; f = 50 Hz; $f_{switching}$ = 5000 Hz
Transformator & Filter LC	Sekunder 220 V; daya nominal 1000 VA; L_{filter} 15 mH; C_{filter} 20 µF
Beban	49–609 W (total maksimum)
Algoritma MPPT IC	K_p = 0,05; *deadband* = 0,001; ΔV_{step} = 0,001 V; step adaptif 4 level
Simulasi	*Fixed-step*; sample time 1×10^{-5} s; durasi 24 s (representasi 24 jam)

Integrasi fungsional antara PV array, *buck converter*, baterai, sisi AC, dan beban dalam model PLTS *off-grid* 1 kWp ini secara skematis ditunjukkan pada diagram blok sistem di Gambar 4.



Gambar 4. Diagram blok sistem PLTS *off-grid* 1 kWp.

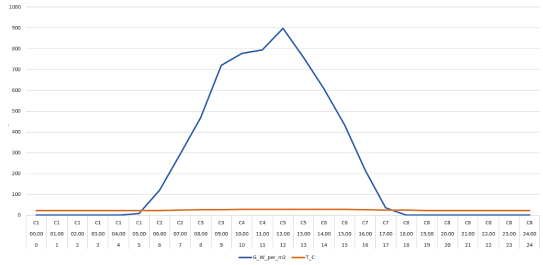
Berdasarkan Gambar 4, alur daya utama dimulai dari PV array menuju buck converter yang dikendalikan algoritma MPPT, kemudian diteruskan ke bus DC rendah yang terhubung paralel dengan baterai dan inverter, sebelum akhirnya disalurkan ke beban AC melalui transformator *step-up* dan filter LC.

3.4 Skenario Pengujian

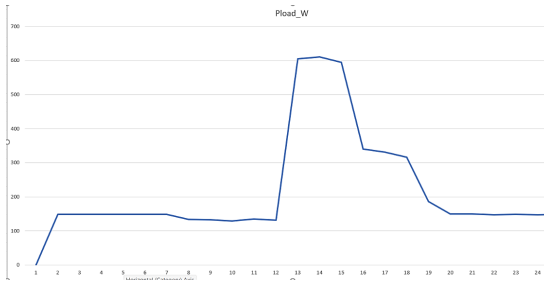
Dua skenario digunakan: (1) Validasi STC — irradiansi konstan 1000 W/m², temperatur 25°C, AM 1,5, sebagai validasi akurasi model PV terhadap spesifikasi teoritis (kriteria deviasi <5%); dan (2) Skenario NASA POWER + profil beban harian sedang — skenario utama menggunakan data irradiansi dan temperatur 24 jam tanggal 24 November

2025 di lokasi studi, dikombinasikan dengan profil beban 49–609 W.

Siklus 24 jam dibagi menjadi delapan interval (C1–C8), dengan C2–C6 (06.00–16.00) sebagai periode evaluasi utama karena irradiansi memadai (>100 W/m²), sedangkan C1, C7, C8 dipantau untuk verifikasi konsistensi fisik pada kondisi minim/tanpa irradiansi. Dinamika input lingkungan dan profil pembebanan yang digunakan untuk menguji ketangguhan algoritma selama siklus 24 jam disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Profil irradiansi dan temperatur ambient NASA POWER 24 jam, tanggal 24 November 2025, di lokasi studi.



Gambar 6. Profil beban harian sedang Rumah Hijau Poktan Mustika (49–609 W).

Sebagaimana terlihat pada Gambar 5, irradiansi mencapai puncak 898,55 W/m² pada pukul 12.00 LST, sementara Gambar 6 menunjukkan lonjakan beban ke level puncak (600–609 W) pada periode siang ketika sistem AC diaktifkan — kondisi interaksi inilah yang menjadikan interval C5 sebagai skenario operasional paling menuntut bagi algoritma MPPT.

3.5 Metode Analisis Data

Analisis dilakukan pada tiga aspek: (1) karakteristik elektrikal PV (V_{pv}, I_{pv}, P_{pv}) menggunakan persamaan (1) dan persamaan (3); (2) *Tracking efficiency* menggunakan persamaan (4), difokuskan pada interval C2–C6; dan (3) stabilitas subsistem pendukung (V_{bat}, I_{bat}, *duty cycle*, V_{rms}, indeks modulasi) untuk memverifikasi kewajaran operasi sistem terintegrasi.

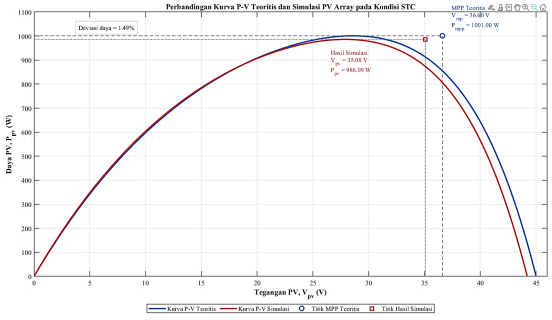
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Model PV Array pada Kondisi STC

Tabel 2. Perbandingan parameter teoritis dan hasil simulasi PV array pada STC

Parameter	Teoritis	Simulasi	Deviasi
Tegangan kerja PV	36,60 V	35,08 V	4,16%
Arus PV	27,35 A	28,12 A	2,81%
Daya PV	1001 W	986,09 W	1,49%

Tingkat akurasi pemodelan ini dipertegas dengan kesesuaian kurva hasil simulasi terhadap kurva teoritis array, sebagaimana ditunjukkan pada perbandingan kurva P–V pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan kurva P–V teoritis dan hasil simulasi PV array pada kondisi STC.

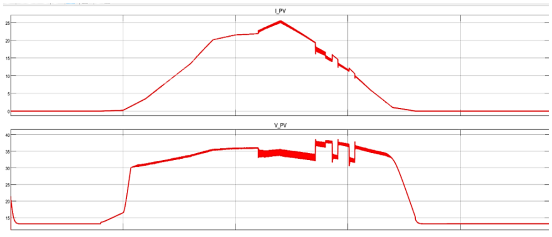
Deviasi daya sebesar 1,49% — parameter paling kritis untuk evaluasi MPPT — berada jauh di bawah ambang 5%, sehingga model PV dinilai representatif. Deviasi tegangan yang lebih besar dibanding daya merupakan konsekuensi logis dari karakteristik I–V nonlinier serta voltage drop akibat resistansi internal pengabelan dan tahap masukan *buck converter* (±1,5–2 V), bukan indikasi kesalahan pemodelan.

4.2 Profil Lingkungan NASA POWER

Data irradiansi tanggal 24 November 2025 di lokasi studi menunjukkan puncak 898,55 W/m² pada pukul 12.00 LST dengan total irradiansi harian ±6,13 kWh/m²/hari, sedangkan temperatur berkisar 21,87°C–28,88°C dengan puncak sekitar pukul 13.00–15.00 LST.

4.3 Respons Karakteristik Elektrikal PV

Arus PV (I_{pv}) menunjukkan korelasi linier kuat terhadap irradiansi, sementara algoritma IC mengendalikan V_{pv} agar tetap di sekitar area V_{mp}. Respons dinamis parameter arus dan tegangan PV terhadap fluktuasi lingkungan sepanjang hari terekam secara berkelanjutan dalam grafik karakteristik pada Gambar 8.



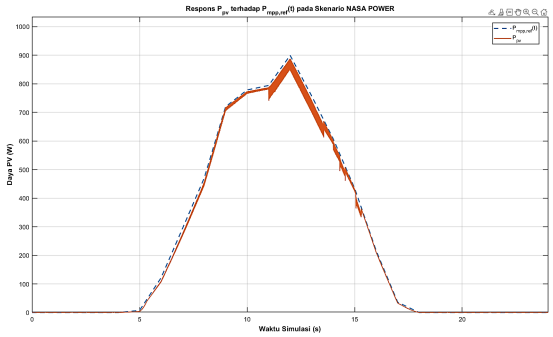
Gambar 8. Grafik karakteristik arus dan tegangan PV terhadap waktu pada skenario NASA POWER.

Pengaruh beban paling jelas teramati pada interval 12.00–13.00, bertepatan dengan beban rata-rata tertinggi (608,18 W): V_{pv} menurun dari 35,81 V (11.00) menjadi 33,68 V (12.00) dan 32,62 V (13.00), sebelum kembali naik menjadi 36,14 V pada pukul 14.00 seiring penurunan beban. Pada malam hari, I_{pv} konsisten 0,00 A sedangkan V_{pv} berada pada 13,12–13,17 V — merepresentasikan tegangan umpan-balik baterai pada bus DC, bukan kesalahan model.

Kurva P_{pv} berhimpit secara presisi dengan kurva $P_{mpp,ref}(t)$ sepanjang siklus harian. Keberhasilan pelacakan daya maksimum oleh algoritma diperlihatkan melalui kemampuan kurva daya aktual dalam mengikuti garis referensi ideal secara presisi, sebagaimana disajikan pada Gambar 9.

Tabel 3. Rekapitulasi respons PV pada periode evaluasi utama (C2–C6)

Waktu	G(t) (W/m²)	$P_{mpp,ref}$ (W)	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)
06.00–07.00	121,38	121,50	30,67	3,50	107,31
09.00–10.00	719,45	720,17	35,26	20,22	712,98
12.00–13.00	898,55	899,45	33,68	25,66	864,14
14.00–15.00	607,33	607,94	36,14	16,69	603,27
15.00–16.00	434,02	434,45	36,38	11,83	430,45

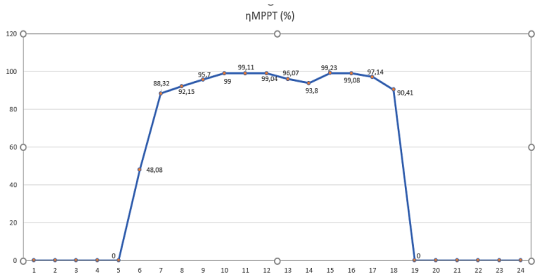


Gambar 9. Respons Ppv terhadap $P_{mpp,ref(t)}$ pada skenario NASA POWER.

Stabilitas kurva daya pada Gambar 9 mengonfirmasi bahwa penggunaan langkah adaptif (*adaptive step*) berhasil meminimalkan osilasi transien, sehingga daya yang diekstraksi tetap berada pada level optimal meskipun kondisi lingkungan berubah secara kontinu. Mengindikasikan kecepatan respons algoritma yang baik terhadap pergeseran MPP akibat data NASA POWER, dengan osilasi transien yang minim berkat strategi *adaptive step*.

4.4 *Tracking efficiency*

Nilai η_{MPPT} pada periode evaluasi utama berkisar 93,21%–98,39%, dengan rata-rata 96,15%. Efisiensi terendah (88,32%, sebagaimana tercatat pada transisi awal 06.00) merupakan karakteristik wajar *cold start* saat selisih P_{pv} terhadap referensi masih lebar, sementara efisiensi tertinggi (99,23% pada pukul 14.00) menunjukkan akurasi algoritma saat kondisi lingkungan mulai stabil. Nilai rata-rata di atas 96% menegaskan efektivitas IC dengan strategi multi-level *adaptive step* pada sistem PLTS *off-grid* yang diteliti (Al-Wesabi et al., 2024; Katche et al., 2023). Distribusi capaian efisiensi pelacakan untuk setiap interval waktu evaluasi utama dirangkum dalam grafik performa pada Gambar 10.



Gambar 10. *Tracking efficiency* MPPT pada skenario NASA POWER berdasarkan profil cuaca bertahap.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 10, efisiensi terendah tercatat pada transisi awal pukul 06.00 (karakteristik wajar cold start), sedangkan efisiensi tertinggi (99,23%) terjadi pada pukul 14.00 saat kondisi lingkungan mulai stabil.

4.5 Stabilitas Subsistem Pendukung

Tabel4 memperlihatkan rekapitulasi hasil simulasi parameter subsistem pendukung.

Tabel 4. Rekapitulasi parameter subsistem pendukung

Interval	V_{bat} (V)	P_{load} (W)	V_{rms} (V)	*Duty* (avg)	m (avg)
C1 (00.00–05.00)	12,52	148,25	219,88	0,420	0,87
C4 (10.00–11.00)	13,20	133,32	220,28	0,405	0,81
C5 (12.00–13.00)	12,98	608,18	211,77	0,402	0,96
C8 (18.00–24.00)	13,20	154,32	220,27	0,394	0,86

Tegangan baterai tetap stabil pada rentang 12–13 V bahkan saat beban puncak, mengonfirmasi fungsi baterai sebagai penyangga energi yang efektif. *Duty cycle* bergerak halus di kisaran 0,394–0,420 tanpa lonjakan transien signifikan meskipun irradiansi berubah drastis, membuktikan efektivitas strategi *adaptive step* dalam menyeimbangkan kecepatan pelacakan dan kestabilan operasi konverter. Tegangan AC tetap berada dalam toleransi standar (211,77–220,28 V dari target 220 V ±10%), didukung penyesuaian otomatis indeks modulasi hingga 0,96 saat beban puncak untuk mengompensasi jatuh tegangan.

4.6 Pembahasan Umum

Berdasarkan simulasi NASA POWER di Jakarta Timur, algoritma MPPT *Incremental Conductance* terbukti konsisten menjaga titik kerja PV di sekitar *Maximum Power Point* (MPP) dengan rata-rata *tracking efficiency* mencapai 96,15% pada beban harian sedang. Algoritma ini secara dinamis menyesuaikan *duty cycle buck converter*, dengan hasil evaluasi pada periode utama menunjukkan efisiensi pelacakan berada dalam rentang 93,21% hingga 98,39%. Model simulasi juga mematuhi karakteristik fisik, di mana tegangan, arus, dan daya PV bernilai nol saat malam hari (00.00–06.00 dan 18.00–24.00) ketika irradiansi nol. Selain memonitor sisi PV, kinerja parameter sistem pendukung seperti arus baterai dan bus DC tetap terjaga stabil, menunjukkan keandalan sistem PLTS *off-grid* 1 kWp. Hasil ini memberikan landasan teoretis yang kuat bahwa metode *Incremental Conductance* efektif untuk diimplementasikan dalam berbagai kondisi cuaca dinamis.

4.7 Perbandingan Hasil Penelitian

Perbandingan dengan studi terdahulu pada Tabel 5 berfungsi memetakan posisi riset ini, bukan membandingkan nilai kuantitatif secara langsung akibat perbedaan konfigurasi sistem.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Penelitian yang serupa.

Penelitian	Fokus Penelitian	Hasil Teknis Utama
(Owusu-Nyarko et al., 2021)	Modified variable *step-size Incremental Conductance* pada sistem PV 600 W	*Tracking time* 12,6 ms; *efficiency* 99,84%; daya *steady-state* sekitar 596,9 W
(Katche et al., 2023)	Review teknik MPPT pada sistem PV	Evaluasi MPPT ditinjau dari *tracking speed*, *efficiency, stability*, *cost*, dan *complexity*
(Zeke Manurung et al., 2023)	*Incremental Conductance* pada konverter buck untuk pengisian aki	Tegangan keluaran sekitar 14 V; aki terisi dari 10,7 V ke 13,7 V selama 2 jam 15 menit
(Al-Wesabi, Fang, Hussein Farh, Al-Shamma'a, & Al-Shaalan, 2024)	Enhanced *Incremental Conductance* pada sistem PV	*Efficiency* metode usulan 98,83%; konvensional 92,04%; modifikasi pertama 97,84%
(Priya & Stonier, 2026)	Review perkembangan teknik MPPT solar PV	Tidak menyajikan satu nilai uji tunggal; membahas efisiensi, partial shading, dan kelayakan penerapan
Penelitian ini	Simulasi IC MPPT pada PLTS *off-grid* 1 kWp dengan variasi beban rumah hijau	*Tracking efficiency* rata-rata 96,15% pada kondisi dinamis (NASA POWER); Validasi model dengan deviasi 1,49%

Berdasarkan Tabel 4.5, penelitian terdahulu menunjukkan algoritma *Incremental Conductance* sangat relevan dalam pengembangan sistem PV melalui modifikasi *step-size* dan evaluasi topologi konverter. Meskipun beberapa studi mencatat *tracking efficiency* di atas 98% pada kondisi terkontrol, nilai tersebut tidak dapat dibandingkan langsung akibat

perbedaan kapasitas sistem, resolusi data, dan model beban.

Kontribusi penelitian ini terletak pada pengujian kinerja MPPT pada sistem PLTS *off-grid* 1 kWp kompleks yang mengintegrasikan baterai, inverter, serta beban AC rumah hijau di bawah fluktuasi cuaca dinamis Jakarta Timur. Menghasilkan rata-rata efisiensi 96,15% melalui skenario NASA POWER, riset ini memvalidasi efektivitas algoritma pada model mandiri untuk kebutuhan riil pertanian perkotaan, bukan berfokus pada pengembangan metode baru.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Kinerja Algoritma MPPT IC pada Kondisi NASA POWER: Algoritma MPPT *Incremental Conductance* terbukti memiliki kemampuan yang tangguh dalam menjaga titik kerja PV tetap berada di sekitar daerah *Maximum Power Point* (MPP) meskipun dihadapkan pada fluktuasi lingkungan yang dinamis sesuai profil cuaca NASA POWER 24 jam di Jakarta Timur. Respons daya PV (P_{pv}) secara konsisten mengikuti tren daya maksimum referensi ($P_{mpp,ref}$); ketika irradiansi naik, titik kerja bergeser untuk meningkatkan daya, dan sebaliknya, dengan selisih yang sangat minim akibat dinamika konverter.
2. Respons Karakteristik Elektrikal PV terhadap Dinamika Irradiansi dan Beban: Sistem menunjukkan respons elektrikal yang konsisten dengan hukum fisika selama siklus 24 jam. Pada siang hari, karakteristik PV berubah secara dinamis mengikuti profil cuaca Jakarta Timur, sementara pada malam hari (pukul 00.00–06.00 dan 18.00–24.00), nilai tegangan (V_{pv}), arus (I_{pv}), dan daya (P_{pv}) adalah benar-benar nol karena ketiadaan irradiansi matahari. Pengaruh variasi beban terhadap V_{pv} teramati paling jelas pada interval 12.00–13.00 dengan penurunan sekitar 3,2 V, menunjukkan bahwa sistem responsif terhadap perubahan beban rumah hijau.
3. Perhitungan Efisiensi Pelacakan (*Tracking efficiency*): Secara kuantitatif, kinerja algoritma MPPT IC pada kondisi lingkungan dinamis (NASA POWER) menghasilkan nilai efisiensi pelacakan (η_{MPPT}) pada rentang 93,21% hingga 98,39% dengan nilai rata-rata sebesar 96,15%. Pencapaian efisiensi rata-rata di atas 96% ini membuktikan bahwa algoritma *Incremental Conductance* dengan strategi langkah adaptif (*adaptive step*) sangat efektif untuk mengekstraksi daya maksimal dari PV array secara berkelanjutan pada berbagai kondisi operasional.
4. Stabilitas Operasi Subsistem Pendukung: Data simulasi menunjukkan bahwa subsistem pendukung beroperasi pada rentang nilai yang stabil sepanjang siklus 24 jam, dengan tegangan baterai terjaga pada rentang 12,52–13,20 V, *duty cycle buck converter* pada rentang 0,394–0,420, dan tegangan AC pada rentang 211,77–220,28 V meskipun terjadi beban puncak sebesar 608,18 W pada siang hari. Stabilitas ini membuktikan bahwa integrasi kendali *Incremental Conductance* mampu menjaga kestabilan operasional sistem PLTS *off-grid* secara menyeluruh.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Pengujian perangkat keras (*hardware testing*) untuk memvalidasi hasil simulasi dan mengevaluasi pengaruh delay sensor, rugi komponen, dan respons actual sistem PLTS terhadap kinerja MPPT.
2. Pengambilan data irradiansi dan temperatur lokal di lokasi studi sebagai pembanding data NASA POWER, untuk meningkatkan akurasi evaluasi dan representativitas kondisi lingkungan actual.
3. Perbandingan algoritma MPPT *Incremental Conductance* dengan metode lain *(Perturb & Observe*, *Fuzzy Logic*, *Neural Network*) pada konfigurasi sistem dan skenario pengujian yang sama, untuk evaluasi relatif performa algoritma lebih objektif.

DAFTAR PUSTAKA

AboRas, K. M., Alhazmi, A. H., & Megahed, A. I. (2025). Optimal Incremental Conductance-Based MPPT Control Methodology for a 100 KW Grid-Connected PV System Employing the RUNge Kutta Optimizer. *Sustainability*, *17*(13), 5841. https://doi.org/10.3390/su17135841

Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation*, *5*(4), 67. https://doi.org/10.3390/asi5040067

Al-Wesabi, I., Fang, Z., Hussein Farh, H. M., Al-Shamma'a, A. A., & Al-Shaalan, A. M. (2024). Comprehensive comparisons of improved incremental conductance with the state-of-the-art MPPT Techniques for extracting global peak and regulating dc-link voltage. *Energy Reports*, *11*, 1590–1610. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.020

stan Waruwu, Eva Magdalena Silalahi, & Bambang Widodo. (2025). Analisis Energi Listrik PLTS On-Grid dengan Boost Converter dan Inverter Berbasis Matlab/Simulink. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, *13*(1). https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5959

vid Martua, Eva Magdalena Silalahi, Atmonobudi Soebagio, Antonius Dodi Tyas Prasetyo, & Dery Elfando. (2024). Analisis Energi Dan Ekonomi PLTS On-Grid Pada Rumah Dinas Pastori HKBP Papan Mas - Bekasi. *Lektrokom: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, *7*(2), 37–46. Retrieved from https://ejournal.uki.ac.id/index.php/lektrokom/article/view/6655

rel, S., Gmal Osman, M., Strejoiu, C.-V., & Lazaroiu, G. (2023). Exploring Optimal Charging Strategies for Off-Grid Solar Photovoltaic Systems: A Comparative Study on Battery Storage Techniques. *Batteries*, *9*(9), 470. https://doi.org/10.3390/batteries9090470

ffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118671603

ogle Maps. (2026, July 10). *Google Maps: Lokasi Rumah Hijau Poktan Mustika, Kramat Jati, Jakarta Timur*. Retrieved 10/07/2026 from https://www.google.com/maps/@-6.278163,106.872086,17z?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI2MDcxNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

swami, D. Y. (2022). *Principles of Solar Engineering*. Boca Raton: CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003244387

tche, 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

NASA Langley Research Center. (2026, June 4). *POWER Data Access Viewer: Prediction Of Worldwide Energy Resources*. Retrieved 04/06/2026 from https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

Novita, M., Silalahi, E. M., Widodo, B., & Purba, R. (2024). Evaluation of solar power's potential to fulfill Tidung Island's electricity demands (p. 020005). https://doi.org/10.1063/5.0209810

Ogunfowora, A. R., & Bhattacharya, I. (2026). Solar Photovoltaic Maximum Power Point Tracking (MPPT): A Comparative Analysis of Incremental Conductance, Q-Learning, and Transformer Deep Learning for Performance Evaluation Under Standard and Dynamic Environmental Scenarios. *Energies*, *19*(13), 3183. https://doi.org/10.3390/en19133183

Owusu-Nyarko, I., Elgenedy, M. A., Abdelsalam, I., & Ahmed, K. H. (2021). Modified Variable Step-Size Incremental Conductance MPPT Technique for Photovoltaic Systems. *Electronics*, *10*(19), 2331. https://doi.org/10.3390/electronics10192331

Pambudi, N. A., Firdaus, R. A., Rizkiana, R., Ulfa, D. K., Salsabila, M. S., Suharno, & Sukatiman. (2023). Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development. *Sustainability*, *15*(3), 2342. https://doi.org/10.3390/su15032342

Priya, P., & Stonier, A. A. (2026). Advancements in maximum power point tracking (MPPT) techniques for solar photovoltaic (PV) applications: A comprehensive review. *Energy Conversion and Management: X*, *29*, 101438. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101438

giyono. (2019). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D* (2nd ed.). Bandung: Alfabeta.

ronika, E., Silalahi, E. M., Widodo, B., & Purba, R. (2024). Analysis of the hybrid power plants of PLTD and PLTS on Tidung Island, Seribu Islands, DKI Jakarta using homer (p. 020004). https://doi.org/10.1063/5.0209809

ke Manurung, B. Z., Radianto, D., & Herwandi, H. (2023). Implementasi Incremental Conductance Photovoltaic MPPT Pada Konverter Buck. *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri*, *10*(1), 44–51. https://doi.org/10.33795/elkolind.v10i1.2748